

Svenska erfarenheter av vindkraft i kallt klimat – nedisning, iskast och avisning

Elforsk rapport 04:13

Förord

Föreliggande projekt har genomförts av Göran Ronsten, FOI, inom ramen för Elforsks vindkraftprogram.

Målsättningen med programmet är:

- att identifiera insatser som kan leda till förbättrad driftekonomi och medverka till att dessa genomförs.
- att öka kunskap om integration med elnät och samkörning med andra kraftslag.
- att söka möjligheter att förbättra möjligheterna att bygga vindkraftverk med avseende på ekonomi och tillståndsgivning
- att få tillgång till bättre underlag för bedömning av ny vindkraftteknik

Innevarande etapp (projekt 2243) avser ett treårigt ramprogram för perioden 2002-01-01 till 2004-12-31 och som finansieras av Falkenberg Energi, Granninge Kraft, Göteborg Energi, Härnösands Elnät, Statens Energimyndighet via Vind-Forsk, Statkraft, Sydkraft, Umeå Energi, Vattenfall och Öresundskraft.

Stockholm maj 2004

Helena Andersson

Sammanfattning

Föreliggande rapport är en delrapport från Elforsks branschgemensamma FoU-program för vindkraft.

Programmet finansieras av ett tjugotal energiföretag samt Energimyndigheten. Rapporten har skrivits av Göran Ronsten (FOI) på uppdrag av Elforsk.

I rapporten behandlas nedisning, risk för iskast och avisning.

Statistik över nedisning finns men behöver bearbetas för att passa vindkraftsbranschen. Uppvärmda vindgivare för att säkerställa vindkraftverkets funktion under nedisningsförhållanden medför en liten merkostnad och bör övervägas på många platser. Preliminära nedisningskartor och driftstatistik indikerar var nedisning förekommer. De lokala variationerna kan dock vara stora vilket medför en ökad osäkerhet kring bedömningen när det lönar sig att investera i en avisningsutrustning.

Nedisningsmätningar i höga master bör startas i syfte att verifiera och förbättra befintliga prognosmetoder vilka i sin tur kan bilda underlag för nedisningsfrekvenskartor. Utifrån tillförlitliga frekvenskartor kan sedan lämplig placering av vindkraftverk samt behovet av avisningsutrustning bedömas på ett mer tillförlitligt sätt än vad som sker idag.

Riskområden för iskast, baserade på resultat från EU:s forskningsprogram, presenteras. Risken att träffas av kringflygande is är liten men reell varför försiktighetsåtgärder för att undvika olyckor bör vidtas.

Det finns idag inga avisningssystem att köpa för avisning under drift. Från Bonus sida meddelar man att ett sådant system kan levereras 2005. Enercon är den enda vindkraftsleverantör som marknadsför ett lättare avisningssystem för stillastående verk. Detta kan köpas som tillval till Enercons E-40 (600 kW) och E-66 (1800 kW) för €9.200 respektive €12.800. Med ett vindkraftverkspris på 7000:-/kW blir det en extrakostnad på 2% för E-40 och 1% för E-66. Enercon gör sedan slutet av 2003 reklam för en kommande, mera effektiv, avisningsutrustning som även skall klara avisning under drift.

Ökad personsäkerhet och produktionssäkerhet samt minskad bullerrisk är andra skäl som, utöver ökad produktion, kan motivera installation av avisningssystem.

De första svenska vindkraftverken i kallt klimat¹ togs i drift under oktober månad 1998. I denna rapport kan således drygt fem års erfarenhet sammanfattas.

Ett av dessa första aggregat är en Bonus 600 kW Mk IV vilken står på en ås mellan två av de tre Suorvadamarna. Tre aggregat från lika många tillverkare (Bonus, NEG-Micon och Nordex/Vestas) står sedan hösten 1998 på Rodovålen i Jämtland. På Rodovålen avsåg ägaren bl.a. att prova olika former av avisningsutrustning. Ett av kraftverken, vilket ursprungligen avsågs vara försett med bladvärme, har under 2003 bytts ut mot ett aggregat utan denna utrustning. Orsaken till detta byte uppges inte vara att behovet av bladvärme har bortfallit utan snarare att de på marknaden tillgängliga lösningarna inte uppfyller ägarens krav på funktionalitet till en tillräckligt låg kostnad.

Mellan oktober 1998 och sista januari 2004 har bladvärmesystemet på Bonusaggregatet Suorva konsumerat 70 MWh på 8548 MWh (8,2%) medan Rodovålenverket t.o.m. slutet av november 2003 hade förbrukat 142 MWh på 6230 MWh (2,3%). Behovet av avisning skulle således kunna sägas vara 3 gånger högre på Rodovålen jämfört med det på Suorvadammen.

Är då nedisningen tre gånger svårare på Rodovålen jmf. med i Suorva? För att kunna svara på den frågan behöver vi kunskap om a) vilken typ av nedisning det handlar om, b) intensitet under förloppet samt c) varaktighet.

Nedisningsmätningar i höga master skulle öka kunskapen om när nedisning förekommer.

Vår generella kunskap inom detta område är tyvärr mycket ringa eftersom kontinuerliga nedisningsmätningar, enligt SMHI, inte förekommit sedan mätningarna i höga master avslutades på 80-talet. Dagens isdetektorer fungerar bättre men anses, jämfört med t.ex. vindmätningens utrustning, alltför dyra för att kunna tas i bruk på det stora antal platser (100-tals) som skulle krävas för att ge en heltäckande bild av den verkliga frekvensen och geografiska utbredningen av, inte enbart själva nedisningen utan även, dess varaktighet.

Bör ett vindkraftverk stå nedisat i nästan 2 månader?

Det mest uppseendeväckande, och av ispåslag orsakade, stilleståndet för ett svenskt vindkraftverk inträffade i Äppelbo i Dalarna under perioden nov 2002 - jan 2003. Under ca 2 månader stod aggregatet stilla med is på bladen utan att ägarna ansåg sig kunna göra något för att återuppta driften.

För vindkraftbranschen i stort handlar det, i ett större sammanhang, dock inte främst om värdet av den genom ispåslag orsakade produktionsförlusten utan om att kunna garantera leveranssäkerhet när det verkligen finns förutsättningar för drift, dvs när det blåser. Om inte branschen själv tar på sig ett ansvar för möjligheten att avisa inom rimlig tid kan det tänkas att Energimyndigheten överväger

1. Med "kallt klimat" avses här förhållanden, orsakade av snö, is eller kyla, vars intensitet eller varaktighet medför att standardmetod för prospektering efter vindresurs eller byggnation/bruk av ett standardaggregat inte utan vidare eftertanke eller åtgärder kan användas.

vilka framtida myndighetskrav som en storskalig utbyggnad av vindkraft i kallt klimat kan komma att kräva.

De för vindkraftverk dimensionerande standarderna anger idag kriterier för hur aggregat skall klara av att hantera lastfall orsakade av, ibland snabba, förändringar i vindhastighet och vindriktning. På samma sätt kan krav komma att införas på hur långvariga driftstopp orsakade av ispåslag kan tillåtas vara. Därmed följer krav på anpassning av vindkraftverkens utrustning till i kallt klimat rådande förhållanden.

Tillkännagivanden

Detta arbete har finansierats av Elforsk AB. Kontaktpersoner har varit Elforsks Ulf Arvidsson, tel. 08-677 27 52, samt Helena Andersson vid Svensk Energi, tel. 08-677 28 09.

Synpunkter på rapportinnehållet har jag tacksamt mottagit från Elforsks referensgrupp, Sven-Erik Thor (FOI) samt meteorolog Bernt Olofsson (tidigare HKV).

Innehållsförteckning

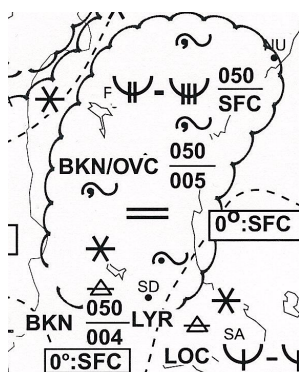
1	När förekommer nedisning?	9
1.1	Klimat och väder	9
1.1.1	Nederbörd	9
1.1.2	Solinstrålning	11
1.1.3	Temperatur	11
1.1.4	Luftfuktighet	14
1.1.5	Lufttryck	14
1.1.6	Vindhastighet	14
1.1.7	Vindriktning	15
1.2	Olika nedisningsformer på vingprofiler	18
1.2.1	Förekomst av nedisning	21
1.2.2	Varaktighet	27
1.2.3	Frost	30
1.2.4	Klaris	30
1.2.5	Dimfrost	30
1.2.6	Snöblandat regn	31
1.3	Exempel på nedisade strukturer	32
1.3.1	Nedisning av master	32
1.3.2	Nedisning av broar	32
1.3.3	Nedisning av helikoptrar	33
1.3.4	Nedisning av båtar	35
1.4	Exempel på nedisade vindkraftverk	38
1.4.1	Bockstigen	38
1.4.2	Yttre Stengrund och Utgrunden	39
1.4.3	Äppelbo	39
1.4.4	Rodovålen	45
2	Iskast	48
2.1	Allmänt om nedisning och arbete vid vindkraftverk i kallt klimat	48
2.2	Bakgrund om is på rotorblad	48
2.3	Säkerhetsmässiga krav	51
2.3.1	Krav på skyltning	51
2.3.2	Krav på avlysning	52
2.4	Försäkringsbolagen om iskast	53
2.4.1	If	53
2.4.2	Länsförsäkringar	54
2.4.3	Sveland	55
2.5	Kastavstånd	57
3	Bladvärme	60
3.1	Bakgrund - vinteranpassning	60
3.2	Isens inverkan på prestanda	61
3.3	Inverkan på laster	62

3.4	När skall vi avisa?	63
3.5	Effekt- och energibehov	63
3.6	Vilken ytemperatur bör bladet ha?	64
3.7	Avisningssystem på marknaden	67
3.8	Avisningens ekonomi	70
4	Sammanfattning.....	72
	Referenser	75

1 När förekommer nedisning?

1.1 Klimat och väder

Figur 1. Exempel på flygväderprognos som indikerar svår nedisning ned till markytan, underkylt duggregn och kornsnö. 2003-11-23 kl 09 UTC. Metoder att förutse nedisning finns. Frågan är om vindkraftsexploaterer på något sätt kan få tillgång till ett relevant beslutsunderlag baserat på insamlade mätvärden?



För att förstå mekanismerna bakom olika former av isbildning är definitionerna av klimat och väder av intresse.

På en viss plats är nederbörd bara en av många olika faktorer vilka under lång tid skapar det under en viss period rådande klimatet. Övriga parametrar är solinstrålning, temperatur, luftfuktighet, lufttryck samt vindhastighet och vindriktning. Kortvariga variationer hos ovanstående utgör det vi till vardags kallar väder [fritt efter Encyclopædia Britannica, EB].

Inom traditionell väderrapportering finns numera möjlighet att automatiskt mäta samtliga dessa faktorer. Nedisning eller korta siktavstånd från 20-200 m, som kan ge en uppfattning om luftens innehåll av flytande vatten, mäts dock inte. För att råda bot på detta har ett samarbete påbörjats inom EU:s COST-program, [60].

1.1.1 Nederbörd

Luftens andel vattenånga kan, uttryckt i volymsprocent, variera från 0% i kalla ökenområden till 7% i tropiskt fuktiga miljöer. Nederbörd kan falla först när vattenången i luften, genom t.ex. en temperatur eller trycksänkning, blivit mättad och kondenserat. Kondensation är dock inte tillräcklig för att framkalla nederbörd. Varken dimma¹ eller fuktdis² räknas t.ex. som nederbörd, trots att luftens vatteninnehåll delvis har kondenserat. Hög luftfuktighet på platsen där nederbörd faller är dock inget krav. I [28] finns en referens till Matsuo et al som visar att den relativa luftfuktigheten kan vara så låg som 50% under snöfall. Nederbörden har då bildats på annan plats där förutsättningarna för kondensation och nederbördsutlösning var uppfyllda.

Är underkyld nederbörd en absolut förutsättning för nedisningsrisk?

Nej. Vattenånga kan även kondensera och övergå direkt till iskristaller³. Antag t.ex. att vi har en varm luftmassa ovanför en kallare dito. Detta är en vanlig situation nattetid i fjälldalar vid klar himmel och då stark vind inte orsakar omblandning. I gränsskiktet mellan luftmassorna kyls varm fuktig luft och faller ned i form av isnålar som kan bilda ringar, s.k. halo, runt belysta föremål. Även en yta, t.ex. en flygplansvinge fylld med nedkyld bränsle, som är kallare än sin omgivning kan utlösa nedisning utan att underkyld nederbörd förekommer.

1. Vid dimma är sikten per definition mindre än 1000 m.

2. Dis innebär sikt mellan 1-10 km.

3. När is övergår direkt till vattenånga kallas det sublimation. I engelskspråkig litteratur används detta begrepp i båda riktningar, dvs även vid kondensation.

Ett talande exempel på oväntad nedisning inträffade när SAS DC9-81 från Zürich den 26 dec 1991 strax efter kl. 22 landade på Arlanda. Vingarna innehöll nedkyllt bränsle och detta i kombination med högt innehåll av flytande vatten i luften, skapade under natten ett lager svårobserverbar klaris på vingarnas ovasida. Framåt morgonen sjönk temperaturen under 0°. Flygplanet avisades¹ därefter ofullständigt påföljande morgon. Kvarvarande klaris observerades inte av tekniker och besättning före start. Resultatet känner vi som "Gottröraolyckan". Isen som lossnade från vingarna sögs in i motorn och orsakade så svåra motorstörningar att besättningen ansåg sig tvungen att nödlanda.

Retroreflektiv yta kan användas för att detektera klaris.

Nedisning, orsakad av såväl dimfrost som klaris, på Flygvapnets SK60 har sedan lång tid indikerats m.h.j.a. ett mönster av vertikala vita och svarta linjer. När mönstret inte syns indikerar det förekomst av ogenomskinlig dimfrost medan de vertikala linjerna förvrängs, buktar ut, vid nedisning orsakad av klaris. I början av 90-talet genomförde FMV helikopterprov i Boden som syftade till att kunna detektera och skilja på dimfrost och klaris på roterande helikopterblad, [72]. Gottröraolyckan återuppväckte tanken om att retroreflektiv tejp skulle kunna användas för att detektera klaris. F.n. pågår ett Vindforsk-finansierat projekt med syfte att utvärdera denna optiska isdetektionsmetod för bruk på vindkraftverk.

Nederbörd kan i frusen form falla i många olika former utan att det f.n. är möjligt att automatiskt och på ett tillförlitligt sätt skilja dessa åt. Att vi ändå känner till trolig förekomst av t.ex. underkyllt regn, snöblandat regn, snö och hagel beror på vad meteorologer förväntar sig vid en given vädersituation samt på rapporter från mänskliga observatörer som, framför allt vid flygplatser, kompletterar de automatiska mätsystemen.

Att kunna skilja mellan klaris och dimfrost, kräver idag någon form av mänsklig inblandning.

Det finns från bl.a. finskt håll en strävan att nedisning skall ingå i den "normala" väderrapporteringen.

F.n. pågår därför arbete inom EU:s COST program, [60], vilket bl.a. syftar till att ge utrymme för nedisning inom ramen för den ordinarie väderrapportmallen. Två viktiga förutsättningar för att detta skall kunna ske är att a) behovet att rapportera nedisning upplevs som tillräckligt stort inom "The World Meteorological Organization", WMO, och b) tillförlitliga metoder för isdetektering kan påvisas. Målsättningen är inte att mer än indirekt kunna skilja olika nedisningsformer åt eftersom detta idag bedöms som alltför komplicerat. Med nya mätmetoder kan förhoppningsvis detta visa sig vara fullt möjligt.

1. <http://aviation-safety.net/database/1991/911227-0.htm>

Svarta blad gör bäst verkan på lägre breddgrader med tillräcklig solinstrålning.

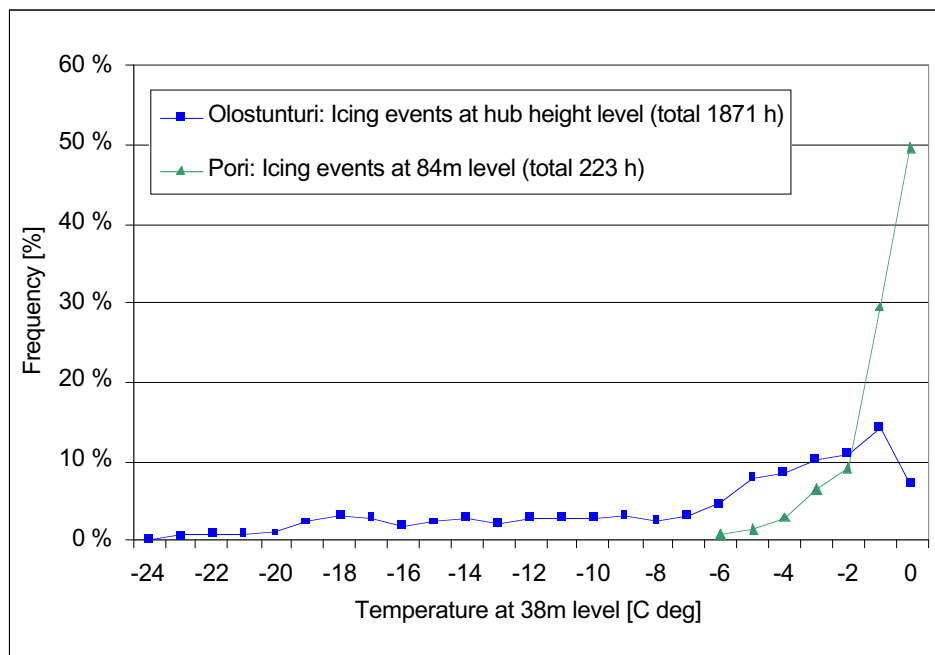
1.1.2 Solinstrålning

Solinstrålningen per areaenhet på jordens medelavstånd från solen, solarkonstanten, är $1,37 \text{ kW/m}^2$ [NE]. Vi kan dock inte tillgodogöra oss hela denna effekt eftersom a) atmosfären absorberar, b) moln reflekterar och c) den mottagande ytan i de flesta fall inte är vinkelrät mot den infallande solstrålningen. Kimura et al. anser, förenklat uttryckt och baserat på data från finska Pyhäntunturi jan-apr 1996 att is på vindturbinblad smälter då solinstrålningen överskrider 300 W/m^2 . Eftersom solinstrålningen i genomsnitt är högre i Alperna och NÖ USA jmf. med förhållanden på våra breddgrader kan svartmålade blad på dessa platser vara en passiv avisningsåtgärd som ökar energiproduktionen. Den högre solinstrålningen på lägre breddgrader på norra halvklotet innebär även att nedisningsperioderna där blir kortare.

1.1.3 Temperatur

Nedisning förekommer i Finland vid temperaturer från strax över 0° C ned till ca minus 20° C , [19]. Från Kanada rapporteras nedisning ha inträffat ned till -30° , [7]. Underkylda vattendroppar kan i vissa moln förekomma ända ned till -40° C . Någon motsvarande svensk statistik finns ej att tillgå eftersom givare för nedisning inte finns monterad vid SMHI:s meteorologiska mätstationer. Svenska nedisningsrapporter till dags dato är således antingen baserade på indirekta observationer eller manuell avläsning.

Figur 2. Nedisning som funktion av temperatur för kustorten Pori i södra Finland samt för berget Olostunturi i norra Finland, [19]. Diagram: VTT, Finland.



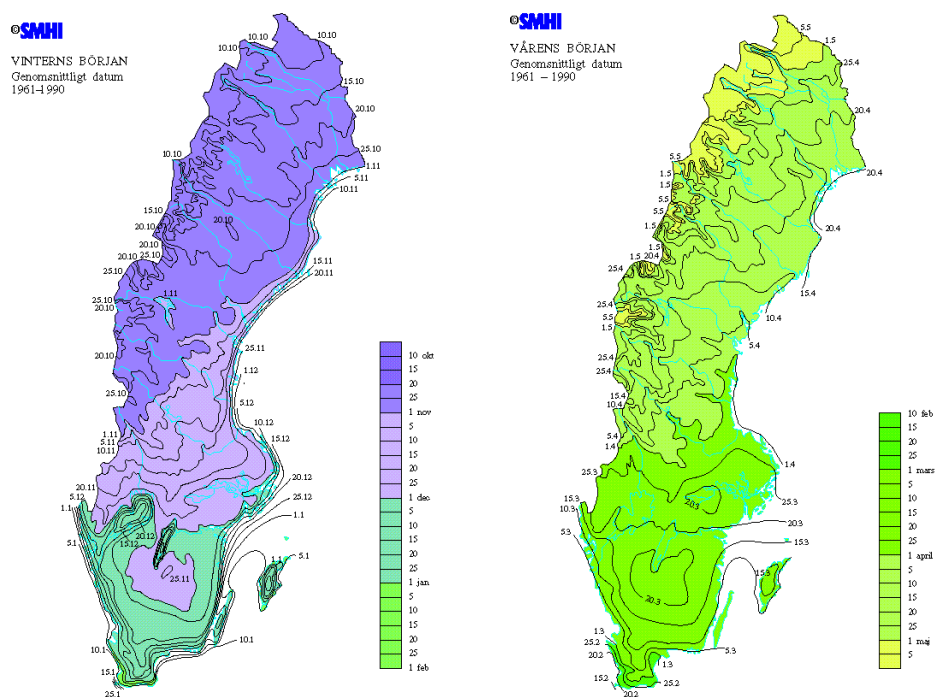
Sverige-karta med frekvens av temperaturfördelningar under 0°, -10°, -20° samt minus 30° C efterfrågas.

Vindkraftverk är anpassade/certifierade för drift inom speciella klimatgränser. Så utgör t.ex. temperaturen en begränsande faktor. Aggregaten kan vara certifierade för drift ned till t.ex. -10, -20, -25 resp. -30 grader. En sverigekarta som visar frekvensen av förekomsten av dessa temperaturer skulle underlätta kundens val av utrustning och materialkvaliteter i vindkraftverk. En mindre detaljerad karta som visar det genomsnittliga antalet dygn med minimitemperatur under -20° C återfinns i Figur 4 i [57]. Att det blåser vid låga temperaturer i fjällen samt vid tillfällena med effekttoppar i Finland visas i [59].

Risk för nedisning förekommer i huvudsak vid temperaturer kring 0° och därunder. I snöblandat regn och dimma kan nedisning av kalla ytor dock inträffa även ovanför 0°-strecket. Speciellt svår kan nedisning orsakad av snöblandat regn bli om upprepade nederbördstillfällen följs av påfrysning.

Ett känt mastbrott orsakat av svår nedisning från fastfrusen snö inträffade den 7 feb. 1988, [65]. Det var den 330 m höga telemasten vid Flugtjärnshöjden, Sollefteå, som efter att blivit nedisad med början den 10 november, ej helt överraskande, föll efter två månaders nedisning i olika omgångar. Vintern 1987-1988 rapporteras ha varit såväl mild som nederbördsrik. Rapporten nämner dock inget om risken för nedisning i moln, jmf. [30], där författarna anger geografiska gränser avseende kraftig nedisningsrisk i Finland p.g.a. dimfrost på 100, 150 och 200 m höjd.

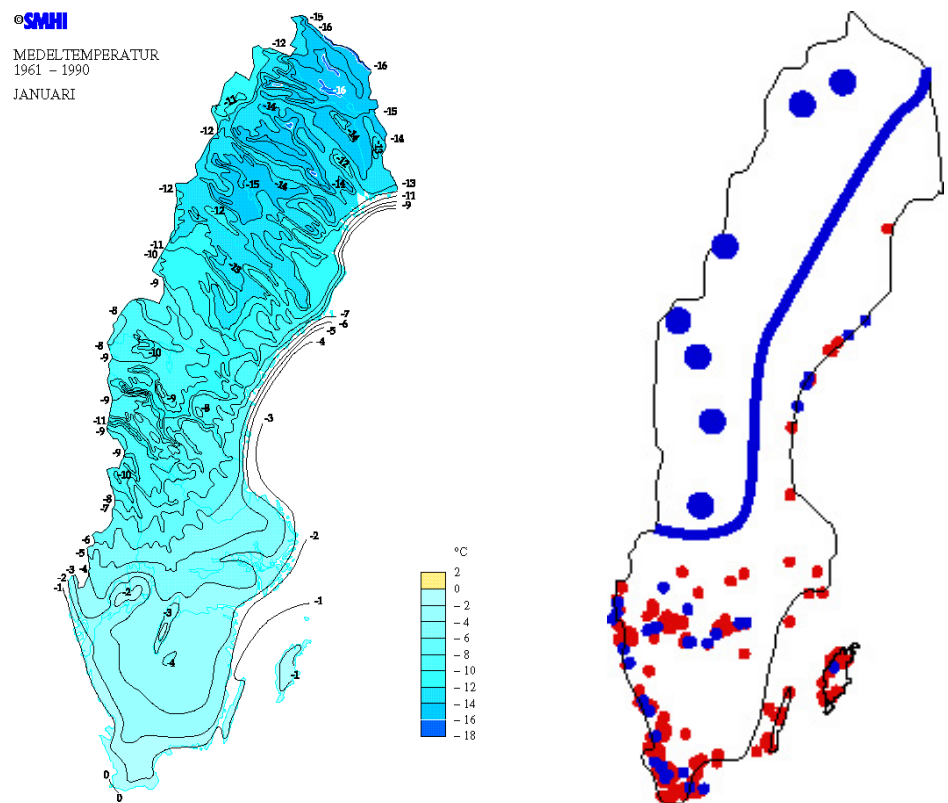
Figur 3. Genomsnittligt datum för vår- och vinterstart under perioden 1961-1990. Definitionen på vinter är när dygnets medeltemperatur understiger 0°C.



Figur 4. a) Medeltemperaturen under januari månad. Karta: SMHI. b) Område inom vilket drifterfarenheter visar att hänsyn bör tas till risken för driftstörningar orsakade av nedisning och kyla. Kartan är baserad på Elforsk driftdatabas, Göran Ronsten, FOI

Det finns ett behov av kartor som visar den geografiska förekomsten av temperaturer under 0°, -10°, -20° samt -30°. Dessa kan användas för att avgöra val av material och tilläggskomponenter.

Kartor bör tas fram som visar den geografiska fördelningen av det ackumulerade energiinnehållet mellan nedisning och upptining/sublimation.



De blå markeringarna i Figur 4b markerar att nedisning har rapporterats från platsen. I södra Sverige blir inte nedisningsperioderna särskilt långvariga varför behovet av bladvärme ur produktionshänseende kan betecknas som mycket litet. Andra faktorer, som t.ex. risk för iskast och ökat buller skulle kunna utgöra argument för att ändå installera avisningssystem. Ett exempel på det förstnämnda, att förhindra iskast m.h.j.a. bladvärme, utgör de aggregat som står nära en större väg i finska Pori. Om bullerhänsyn berättar Henrik Lindqvist från Ålands Vindenergi Andelslag, [79]:

Avisningssystem kan ibland motiveras av bullerskäl.

Därtill kommer aspekten med det ljud is på vingar skapar om man inte har ett dylikt system [avisningssystem] mao. trivsselfaktorn för grannar och besökare, vilket har sitt värde. Vi har erfarenheter från våra äldre verk där vi sett dem gå med låg uteffekt vid högre vindar samt även hört det "onödiga" ljud de skapat... Det har gjort att vid nybeställning av verk till våra projekt på Åland skall verken ha ett lättare avisningssystem.

Det går att räkna ut riskområden för iskast och tilläggsbuller vid nedisning.

Insikten om det lämpliga i att, där så krävs för såväl aktuellt projekt som framtida dito, göra det som är tekniskt möjligt har ibland saknats hos svenska exploitörer. Risk för iskast samt risk för ökat buller orsakat av nedisning är inte lätta ämnen att hantera i en tillståndsprocess där det finns så många andra hinder att övervinna. Bägge dessa faktorer skulle dock gå utmärkt att hantera med hjälp av allt efterhand förbättrade ingenjörformler.

Vattenånga är en växthusgas med betydande klimatpåverkan. Vatten i form av ånga, men även som moln och nederbörd, anses stå för 60-80% av den naturliga växthuseffekten. Förutom på hög höjd, i stratosfären och högre troposfären, anses utsläpp av vattenånga inte bidra till växthuseffekten. Indirekt kan emellertid vattenånga som släpps ut över ca 7 kilometers höjd genom kondensation på partiklar ge upphov till ihållande kondensationsstrimor. Dessa kan i sin tur öka förekomsten av cirrusmoln, vilket kan bidra till att öka växthuseffekten. Vattenånga som släpps ut vid marknivå anses däremot inte ha någon påverkan på jordens strålningsbalans, och därmed inte heller dess klimat. Fredrik Svensson, FOI.

1.1.4 Luftfuktighet

Tidigare har sambandet mellan relativ luftfuktighet och temperatur stått i fokus för att indirekt, och med befintlig mätutrustning, kunna detektera nedisning. Ett starkare samband, jmf. med relativ luftfuktighet, tycks dock finnas mellan sikt och nedisning. Detta beror på en jämförelsevis mer entydig relation mellan luftens innehåll av flytande vatten, som direkt påverkar sikten, och nedisning vid låga temperaturer. Problematiken som uppstår vid enbart bruk av temperatur och relativ luftfuktighet för att detektera is beror på att det har visat sig svårt att vid låga temperaturer mäta luftfuktighet på ett tillförlitligt och exakt sätt samt att droppstorleken inte är känd. En metod att ta hänsyn till förekomsten av is vid mätning av relativ luftfuktighet vid minusgrader föreslås i [2] och används i [7]. Här konstateras att hög relativ luftfuktighet vid minusgrader inte är ett tillräckligt villkor för att orsaka nedisning. Ett skäl till detta är hur relativ luftfuktighet definieras. Luften kan således på samma gång vara mättad på vattenånga relativt is men ändå vara omättad relativt vatten.

1.1.5 Lufttryck

Den geostrofiska vindriktningen, ovan markgränsskiktet, följer isobarerna (= linjer som sammanbinder platser med samma lufttryck). Ett exempel på detta visas i Figur 5. F.n. pågår en nationell vindenergikartering vid Uppsala Universitet vilken bl.a. baserar sig på Skandinaviska långtidsmätningar av det statiska lufttrycket. Här finns en framtida möjlighet att utifrån dessa beräkningar ta fram frekvensfördelningar (En tempersturfrekvensfördelning kan t.ex. visa hur många dagar som temperaturen på ett ställe understiger -20°C) för såväl temperatur, nedisning på olika höjder (t.ex. 0-400 m med steget 100 m) samt energiproduktionsförluster p.g.a. nedisning. Nedisning har, enligt [7], en tendens att inträffa vid något lägre lufttryck än det genomsnittliga. Detta beror på att nedisning ofta förekommer vid frontpassager och lågtryckssituationer där förekomsten av låga moln är hög¹.

1.1.6 Vindhastighet

Den geostrofiska vindhastigheten kan bestämmas genom att studera avståndet mellan isobarer (= linjer som sammanbinder platser med samma lufttryck). Ett litet avstånd mellan dessa tyder på hög vindhastighet, se Figur 5, utanför det markgränsskikt som orsakas av friktion mot jordytan. Vindhastigheten nära markytan, där "när"-avståndet normalt kan variera mellan 200-500 m, beror främst på markens skrovlighet, topografi och vertikala temperaturfördelning. I undantagsfall kan den geostrofiska vinden nå ner nära markytan. Detta sker t.ex. vintertid över de isolerade finska fjällen där medelvindhastigheten under vinter-

1. Låga moln kan även förekomma vintertid i högtryckssituationer.

månaderna kan överstiga 11-12 m/s. Det mest extrema exemplet från en sådan plats, som Lasse Makkonen vid VTT har berättat om, [81], är en uppmätt medelvindhastighet under en enskild månad på 19 m/s.

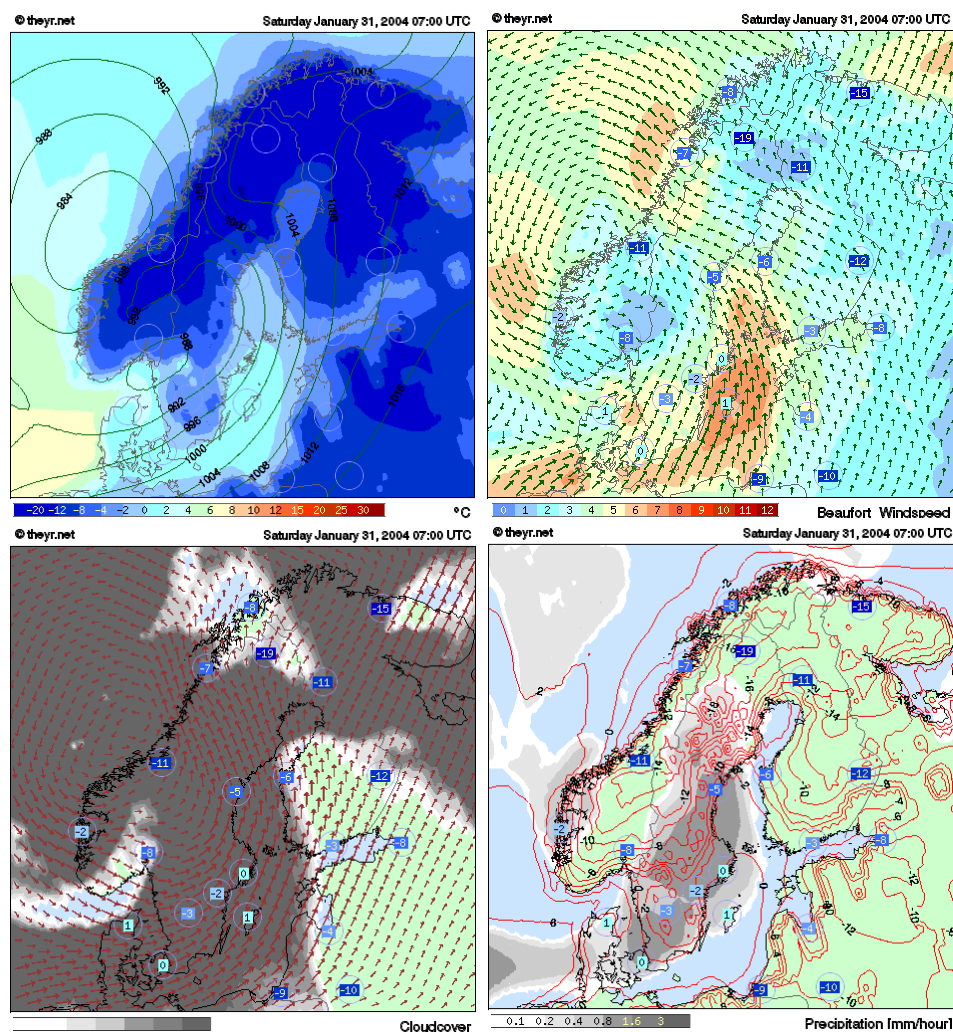
Vid snöblandat regn och låg vindhastighet kan det vara lämpligt att rotern inte står parkerad eftersom nederbörden annars riskerar att frysa fast på rotorblad om temperaturen skulle sjunka.

Vindhastigheten påverkar nedisning på många olika sätt. Snöblandat regn kan t.ex. ställa till med problem om nederbörden faller vid låga vindhastigheter (eller på stillastående rotorblad) och sedan följs av fallande temperaturer. Vid högre vindhastigheter tenderar snöblandat regn att blåsa av aerodynamiskt utformade strukturer som t.ex. snurrande rotorblad. Detta hindrar inte att snöblandat regn vid höga vindhastigheter kan samlas i fickor på master, maskinhus och för vindkraftverkens reglersystem viktiga givare. Utan korrekta signaler från vindhastighets- och vindriktningssystem måste verket stängas av även om inte rotorbladen är täckta med is. Ökande vindhastighet i moln medför ökad risk för nedisning. I [53] föreslås ett samband mellan vindhastighet och nedisningsintensitet [$\text{g}/(\text{cm}^2\text{h})$] i moln på en 5 cm standardcylinder. Denna intensitet kan sedan räknas om till nedisningsmängd på vindturbinblad eller användas för att dimensionera ett bladavvisningssystem.

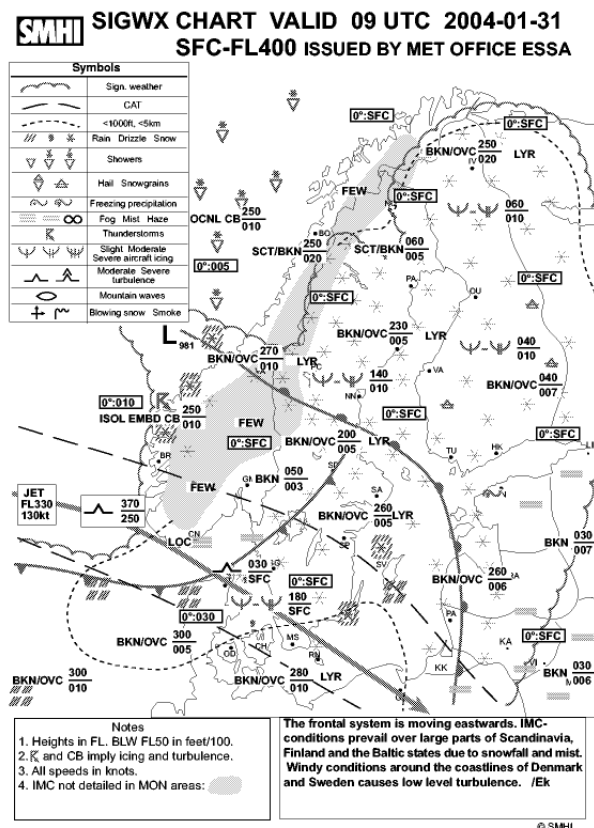
1.1.7 Vindriktning

Hög vindhastighet över lång vattenväg skapar goda förutsättningar för nedisning. Vid situationen nedan (Figur 5), 2004-01-31, förekommer risk för nedisning såväl på Västkusten som i mellersta Norland.

Figur 5. Vindriktningen ovanför markgränsskiktet följer isobarerna, som är linjer vilka binder samman orter med samma lufttryck. På lägre höjd tvingar friktionen mot marken i kombination med Coriolis-kraften vindriktningen mot 20-30 grader lägre riktning (tumregel). Prognoskartor från theyr.net, 2004-01-31.

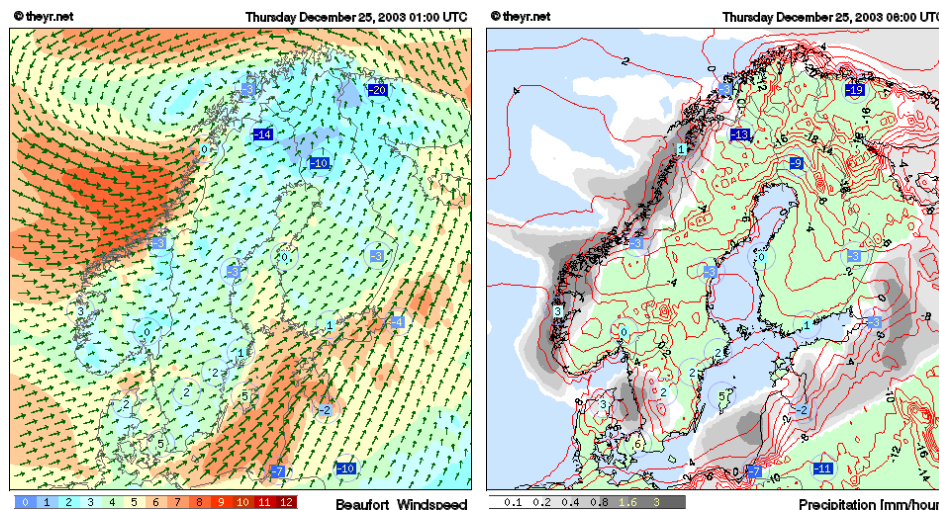


Figur 6. Flygväderprognos karta för lördag 31 januari 2004 kl. 09 UTC (SMHI). Lätt till måttlig risk för nedisning ner till marknivån föreligger längs Västkusten i samband med kallfrontspassage. I södra Norrland föreligger nedisningsrisk ned till 1000 ft (300 m) i samband med en varmfront. Snöblandat regn, likt det mellan Öland och Gotland, kan i omgångar lägga sig i t.ex. master och tillhörande staglinor. (Nedisning i master på 1000 kg/m har uppmätts.)



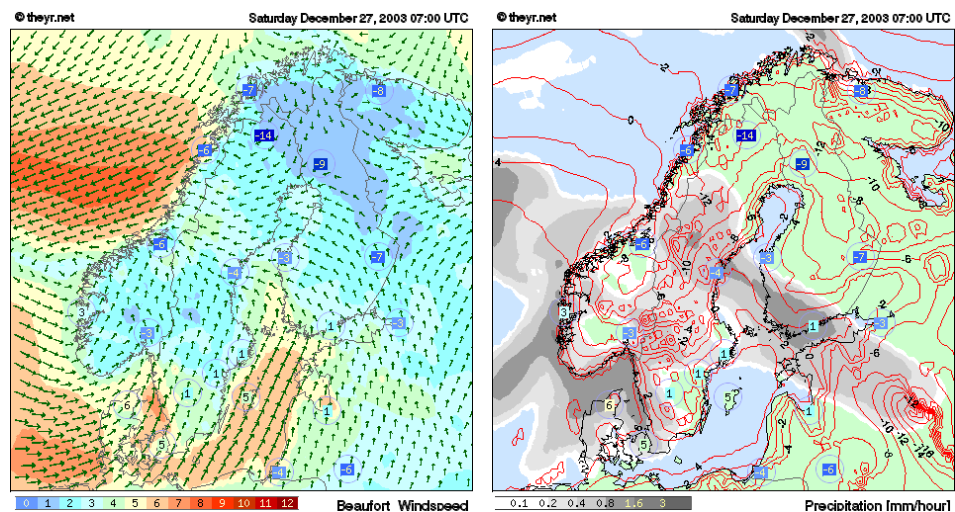
Nedisning förekommer även vid andra vindriktningar än från Östersjön.

Figur 7. Västliga vindar kan medföra nedisning i Jämtland där en öppning i den norska fjällkedjan tillåter fuktig atlantluft att föras in. Prognoskartor från theyr.net, 2003-12-25.



Vindkraftverket i Vallrun, en Vestas V52 på 850 kW stannade ca 13.20 för larmet "Extern rotationsvakt". Enligt Pär-Ola Säterhall på Vindgruppen tyder detta på obalans orsakad av ojämn isbildning på rotorn.

Figur 8. Vid SV vind kan fuktig atlantluft "smita in" bakom den skandinaviska fjällkedjan. Prognoskartor från theyr.net, 2003-12-27.



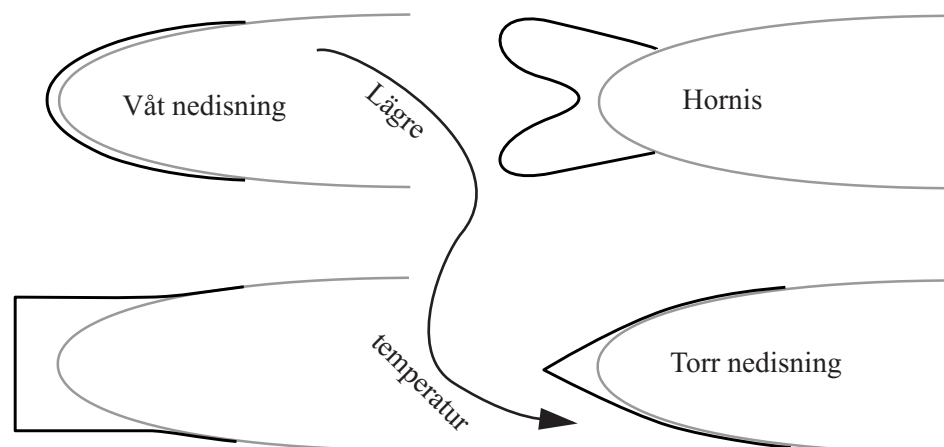
Nedisningsfrekvens kan beräknas av Theyr.net.

Är det kanske möjligt att använda data från theyr.net för att kunna skapa statistik över den geografiska frekvensutbredningen av nedisning följt av blåsiga perioder? Det jakande svaret från Theyr.net kom den 29 dec 2003. Det är enbart budgetfrågan som begränsar möjligheterna.

1.2 Olika nedisningsformer på vingprofiler

Beroende på temperatur, droppstorlek, hastighet mm så kommer isen på bladytan att anta olika form, [69], vilket visas i Figur 9.

Figur 9. Olika isformer visas schematiskt beroende på temperatur. Temperaturen är nära 0° ö.t.v. och har sjunkit till ca minus 10° n.t.h.



Ovan syns några schematiska isformer. I verkligheten sker nedisning mindre symmetriskt och mer ojämnt fördelat. Så "taggig" som den beräknade nedisningen har en tendens att bli ser man sällan, om någonsin, i verkligheten, [10].

I de allra flesta fall så kommer nedisning på rotorblad att a) minska lyftkraften och b) öka motståndet vilket i sin tur minskar det drivande momentet och därmed även effekten. I fallet underkyllt regn kring 0° finns det dock en möjlighet att isen lägger sig som en jämn hinna runt framkanten vilket inte orsakar några abrupta

störningar i strömningen kring profilen. För en passivt stallreglerad turbin kan, när profilströmningen inte blir den förväntade, detta orsaka ökad lyftkraft vid given anfallsvinkel, [29], vilket i sin tur medför försenad effektbegränsning, [41] och [56], med överbelastningsskador på växellåda och generator som följd.

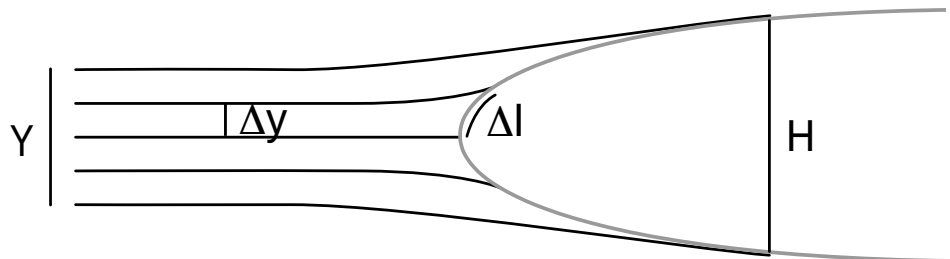
Även hög vindhastighet vid mycket låg temperatur kan på ett passivt "stall"-reglerat aggregat, genom luftens höga densitet, orsaka motsvarande skador, [55].

Ytterligare ett exempel på skadlig övereffekt på passivt stallreglerade aggregat ges i [42]. Ingen nedisning eller hög luftdensitet förekommer här eftersom det studerade temperaturintervallet är nedåt begränsat till $+2^{\circ}\text{C}$. Låg turbulens gör här att aggregatet inte lyckas begränsa maxeffekten på avsett sätt. En förklaring till detta ges i [14]. Stabil vertikal temperaturskiktning och låg turbulens hänger samman och när detta inträffar i t.ex. en fjälldal eller över ett öppet och kallt hav så förmår inte de på bladframkanten monterade listerna, s.k. stall-strips, att begränsa uteffekten.

Det är möjligt att simulera nedisning. En sådan metod beskrivs i [9] där det dock förutsätts att varje vattendroppe omedelbart fryser, och inte rinner bakåt, när den träffar bladytan. Detta antagande förenklar beräkningsgången men är inte tillämpligt vid temperaturer över t.ex. -5° , beroende på ytemperatur, nederbördens temperatur, droppstorlek etc.

Överkurs:

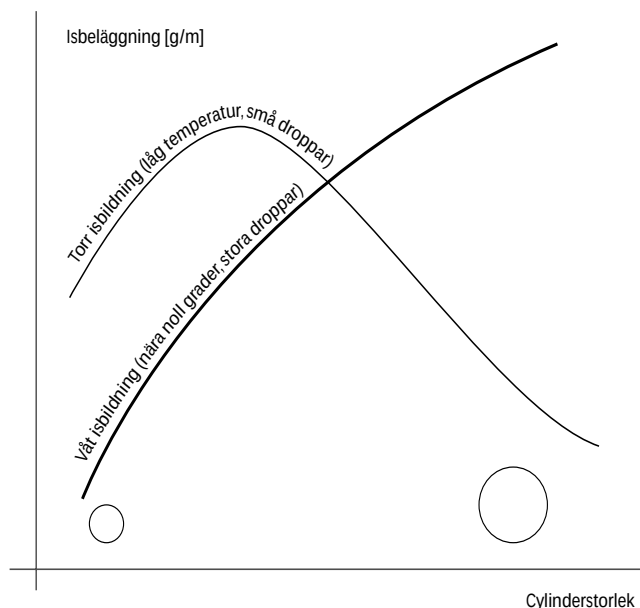
Figur 10. Definition av kollisionskoefficienter vid 0° anfallsvinkel och den symmetriska profilen NACA 0015.



Här definieras kollisionskoefficienten som förhållandet mellan $\frac{Y}{H}$. Nu fastnar inte isen jämt över ytan utan för att kunna utföra simuleringar krävs att man inför en lokal kollisionskoefficient; $\Delta y / \Delta l$. Förenklat uttryckt viker små lätta vattendroppar lättare undan lättare jmf. med större. Samma förhållande gäller för hastigheten; låg relativ hastighet medför att vattendroppen hinner ändra riktning innan den träffar bladytan.

Makkonen visar i [29] att isbeläggningen, uttryckt i g/m, på en roterande stav av varierande diameter har ett maximum för en viss diameter vid torr isbildning. Beläggningen saknar däremot sådant maximum vid våt isbildning, Figur 11.

Figur 11. Isbeläggning på roterande stav, som funktion av cylinderdiameter vid torr (dimfrost) resp. våt (klaris) isbildning



En konsekvens av detta blir att även smala föremål, som t.ex. åskledare och kraftledningar kan dra på sig mera is per längdmeter jmf med större föremål som t.ex. vindturbintorn eller ett vindturbinblad.

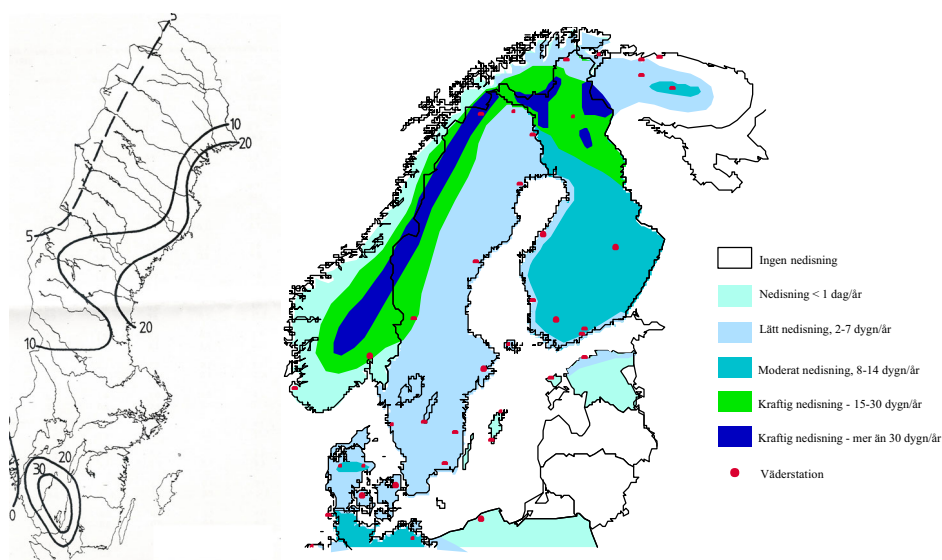
Makkonen fortsätter med att beskriva isbeläggningens tjocklek som funktion av den relativa vindhastigheten och konstaterar att det är mycket svårt, utan detaljerad kunskap om droppstorlek och luftens innehåll av flytande vatten, att översätta en isdetektorsignal på maskinhuset till motsvarande förhållanden på rotorbladytan. Den säkraste metoden att fastställa droppstorlek och luftens innehåll av flytande vatten är genom s.k. multi-cylinder-isdetektering. Det finns ett enkelt och direkt samband mellan sikt och luftens innehåll av flytande vatten (som dock inte gäller vid snöfall). Detta samband kan skrivas: $W = 1.3 \frac{D}{S}$ där S är sikt [m], D

droppstorlek [μmm] och W luftens innehåll av flytande vatten [g/m^3]. Varför behöver man detta samband när den relativa luftfuktigheten är den parameter som sedan länge är en vedertagen indikator för att uppskatta risken för isbildning? Indikator är just vad den är då den bara indirekt och ibland även felaktigt kan användas för att indikera isbildningsrisk. Detta beror på att den relativa luftfuktigheten är svår att mäta noggrant vid minusgrader samt att kunskapen om isbildningsrisk vid låga temperaturer och låg relativ luftfuktighet är ofullständig. Ett uppenbart exempel är risk för nedisning vid förekomst av underkylda vattendroppar i vissa typer av moln vilket kan inträffa vid temperaturer ned till -40° , även om det är mycket ovanligt under -20° . En annan felkälla, om man enbart lutar till den relativa luftfuktigheten är snöblandat regn som vid $+4^\circ C$ kan falla vid 50% relativ luftfuktighet, [28]. Genom avdunstning ökar dock förmodligen den relativa luftfuktigheten relativt snabbt vid sådana tillfällen. Kall snö kan däremot falla länge genom torr luft utan att detta ökar den relativa luftfuktigheten.

1.2.1 Förekomst av nedisning

I en preliminär utredning, utförd av SMHI 1998 på uppdrag av Luftfartsinspektionen, [64], presenterar Vedin bl.a. geografiska gränser för det genomsnittliga antalet uppmätta timmar med underkyld nederbörd. Analysen baseras på data från 1961-90 från 16 mätstationer samt från 1974-1990 på ytterligare 6 platser.

Figur 12. a) Det genomsnittliga antalet timmar med underkyldt regn eller duggregn under perioden 1961-1990, [64], samt b) antalet dygn/år när nedisning förekommer enligt WECO, [51]. Som ett helt dygn räknas om nedisning beräknas förekomma någon gång under dygnet.



“Molnbasen anpassar sig till medelmarkhöjden i ett område men hinner inte med att anpassa sig till enskilda bergstoppar.”

I Finland har förekomst av såväl underkyld nederbörd som snöblandat regn befunnits vara relativt platsberoende och enbart kunna orsaka lättare nedisning jämfört med nedisning i moln [dimma eller sjörök], [30]. På det finska slättlandet har nedisningsgraden, uttryckt i kg/m is på en standardcylinder, uppmätts i höga master. Återigen är nedisningsgraden relativt platsberoende medan höjdberoendet är framträdande. Här är molnbasen den avgörande faktorn. Författarna förklarar varför nedisning mer ofta förekommer i ett kuperat landskap jmf. med på slättlandet: “Molnbasen anpassar sig till medelmarkhöjden i ett område men hinner inte med att anpassa sig till enskilda bergstoppar.” Dessa toppar sveps in i moln och kommer därmed att vara extra utsatta för nedisning om temperaturen faller under 0°C. I [30], Figur 1, visas höjdkurvor för nivåer ovan medelmarknivån, ej ö.h., med kraftig nedisning i Finland. I och med att de utsatta nivåerna är 100, 150 och 200 m över medelmarknivån, samt att vindkraftverk ofta står på fjälltoppar, kommer dessa ofta att vara utsatta för nedisning i moln.

Nedisningsrisken är mycket platsberoende. I lä bakom ett större bergsparti är nedisningsrisken å ena sidan mindre men å andra sidan blåser det förmodligen sämre. Var ett vindkraftverk placeras kan då bli en kompromiss mellan hög energiproduktion och risken/kostnaden för nedisning.

Det mellan 1961 och 1990 uppmätta genomsnittliga antalet timmar med underkyld nederbörd, enligt [64], förefaller lågt vid en enkel visuell jämförelse med SMHI:s isprognoser för flyget under vintern 2002/2003. Å andra sidan visar finsk statistik, [13], över när underkyld nederbörd orsakat svår nedisning att detta

skett 14 gånger på 23 år i trakten av Vasa. Jämfört med denna finska uppgift är Sverige således relativt rikt försett med nedisningstillfällen.

Bortsett från oklarheten i vad definitionen av svår nedisning ovan innebär tycks Åland, [40], vara mer likt svenska förhållanden med upp till 20-talet årliga observationer av underkyld nederbörd och dimma på vissa platser. Varje nedisningsperiod vara i 3 timmar. Kontinuerliga nedisningar som stoppat anemometrar har pågått i upp till 36 timmar. För ultrasoniska anemometrar gällde att de plötsligt gav ifrån sig onormalt höga indikerade vindhastighetsnivåer när de nedisades vilket även bekräftas av resultat i [54].

Var vintern 2002/2003 exceptionellt rik på nedisningstillfällen i de svenska fjäll-
len? Här finns behov och möjligheter att använda SMHI:s grundmaterial för statistiska studier av prognoserad nedisningsfrekvens. Vilka metoder använder SMHI:s meteorologer egentligen för att bedöma nedisningsrisken?

Esbjorn.Olsson vid SMHI berättar: *Jag har jobbat en del med att ta fram en metod för att göra prognos för isbildning på flygplan. Den metoden bygger på data från vår operativa prognosmodell, Hirlam. Denna modell gör prognoser på bl.a. molnvattenmängd i hela atmosfären. Prognosmetoden går ut på att relatera denna molnvattenmängd till isbildningsrisk på flygplan, med hänsyn tagen till temperaturförhållande som också modellen prognoserar. Molndropparnas storlek har ju en väldig påverkan på isbildningen, men det är inte något som modellen gör prognos på utan den faktorn plockas in via modellens vertikalvind istället. Hög uppåtgående vertikalvind antas ge större förutsättningar för att stora underkylda molndroppar skall bildas.*

Modellupplösningen kan förbättras inom fjällområdet.

Sparade mätdata och analyser skulle kunna bearbetas statistiskt för att skapa nedisningskartor för vindkraftsbranschen.

Vår modell jobbar med en upplösning på 22 km horisontellt och 40 nivåer vertikalt. Det innebär att vi har svårt att med någon större noggrannhet beskriva förhållandena i fjällen. Modellens berg är betydligt "snällare" än verklighetens. Prognoserna blir lite översiktliga. Bifogad bild visar hur isbildningsprognoserna presenteras för meteorologen. Vid produktion av SWCn¹ har meteorologen tillgång till denna typ av prognos. Jag tror dock att SWCn ger en än mer översiktlig bild än de automatiska prognoserna, meteorologerna tenderar att förenkla den bild det automatiska förslaget ger. De siffror som finns i isbildningsbilden beskriver mellan vilka nivåer isbildning kan förekomma. Sorten är 1000-tals fot. Siffran under den färgade rutan är lägsta nivån, siffran över den högsta nivån och siffran mitt i rutan talar på vilken nivå det är värst. Bara varannan gridpunkt har nivå-information. Dessa bilder sparas ej, men data för att skapa en bild sparas. Det man ser i bilden är positioner för de gridpunkter där isbildning förekommer, det antyder hur tätt (22km) informationen finns lagrad. Totalt sett räknar denna modell över ett område som täcker in hela Skandinavien med omnejd. Det går alltså att extrahera data med isbildning under 1000ft ur vår databas. Det finns inte några tidserier av nedisning sparade explicit, men det skulle kunna gå att skapa sådana från de data vi har lagrade.

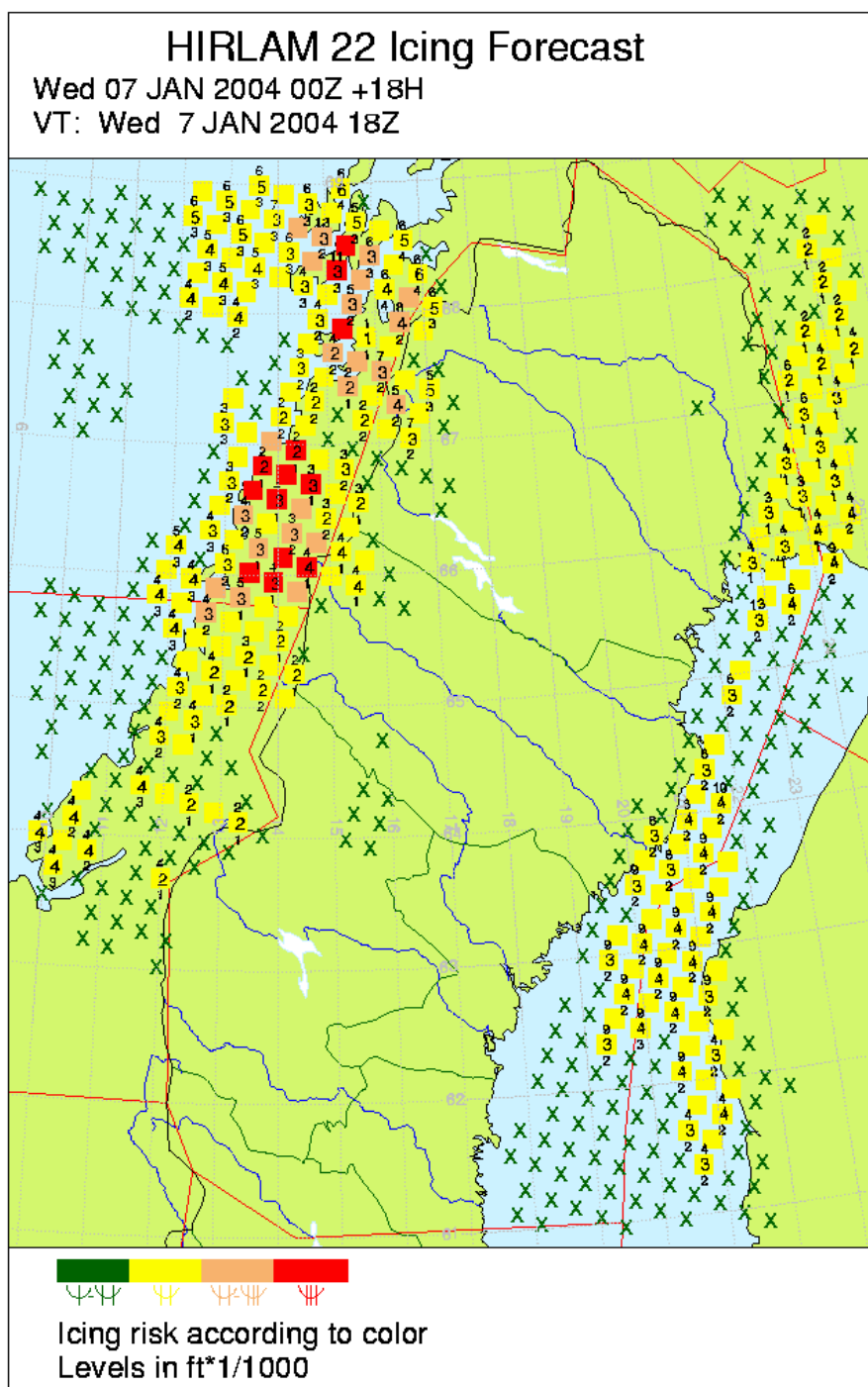
1. SWC: Significant Weather Chart

En annan möjlighet att komma åt isbildningsfrekvens i fjällen skulle kunna vara att använda data från vårt automatiska analysystem, MESAN. MESAN står för mesoskalig analys och det är ett system som gör analyser på bl.a. temperatur, relativ fuktighet, nederbörd och molnbas. Till MESAN tas alla tillgängliga observationer (markobsar, radar, satellit) in för att ge en så fullständig bild som möjligt. Även här har vi ett avstånd på 22 km mellan punkterna, så även dessa analyser är lite väl översiktliga för fjällförhållanden.

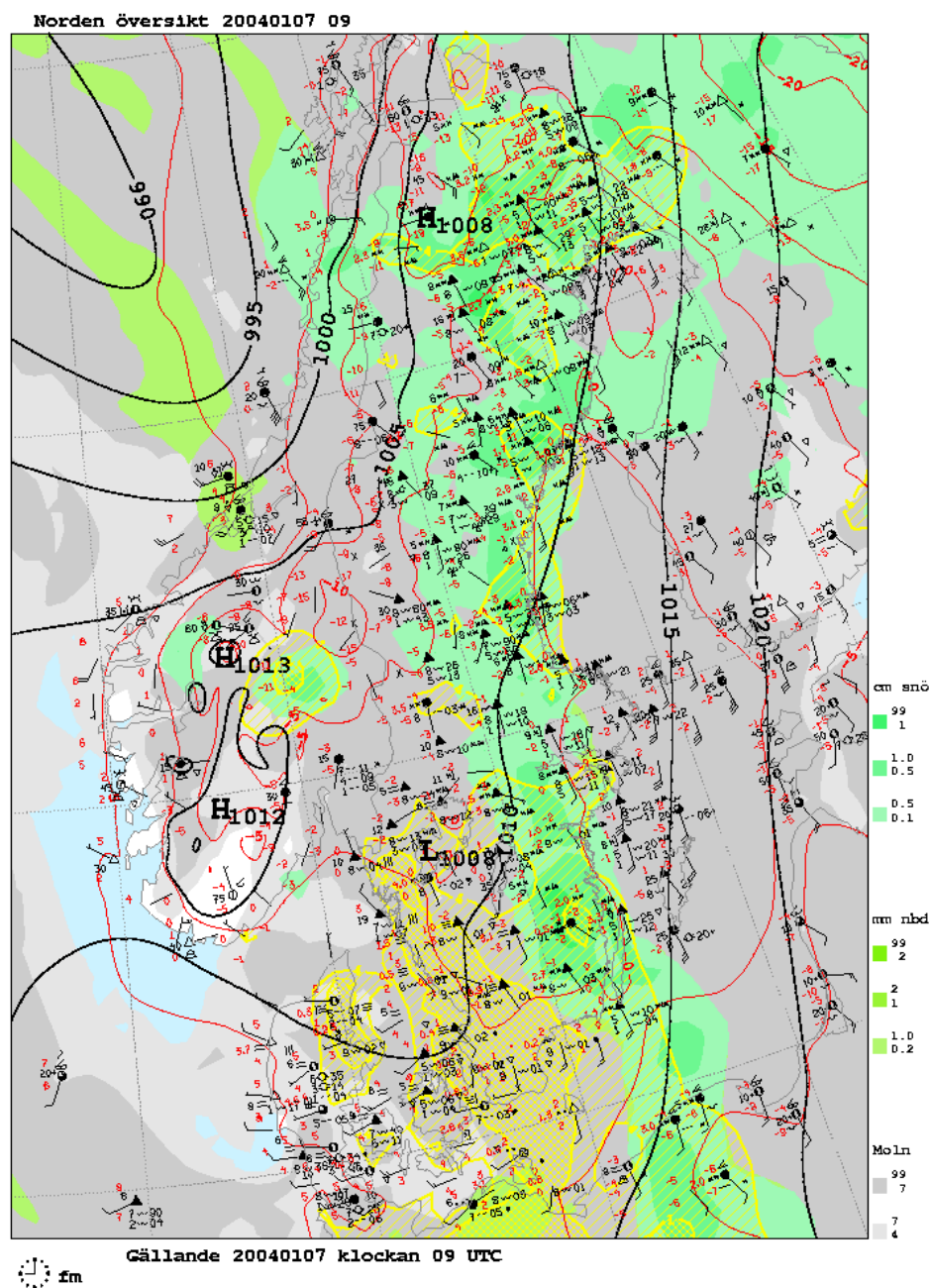
I Figur 13 visas exempel på nedisningsprognoser från HIRLAM och MESAN.

Figur 13. Isprognos från HIRLAM 2004-01-07. Prognoserna i Figur 38. är baserade på denna typ av bakgrundsinformation.

Andelen "korrekta" temperaturprognoser baserat på HIRLAM ökade från 47% till 56% genom att använda den i praktiken bästa beräkningsfältet istället för det i teorin bästa, [15].

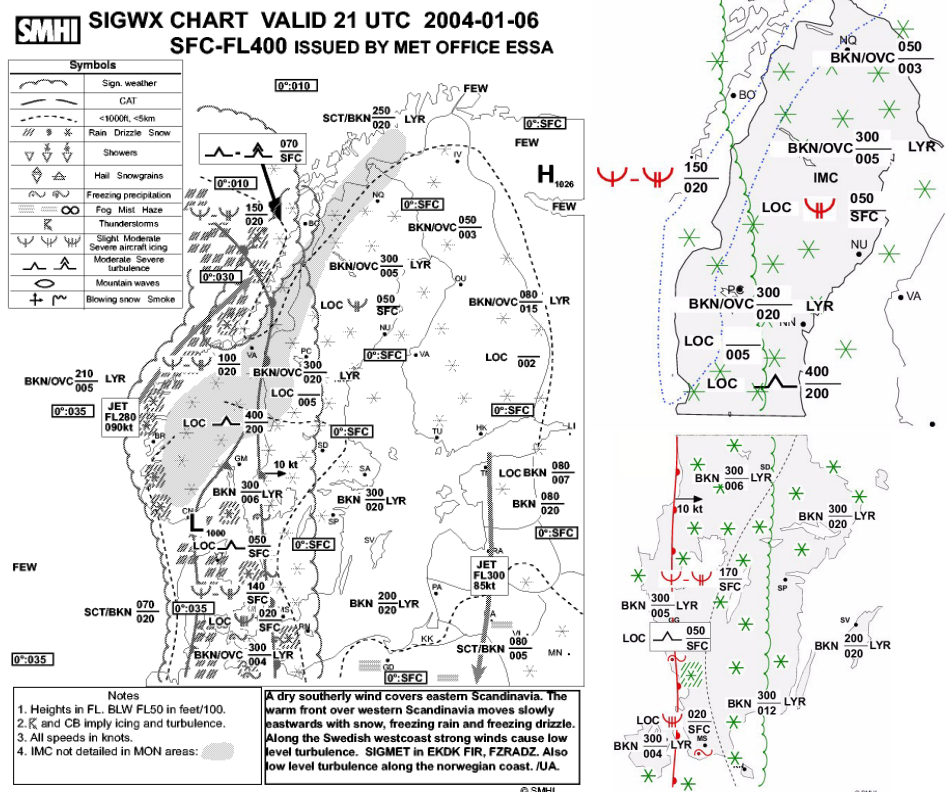


Figur 14. Isprognos från MESAN, 2004-01-07. Prognoserna i Figur 38. är baserade på denna typ av bakgrundsinformation.



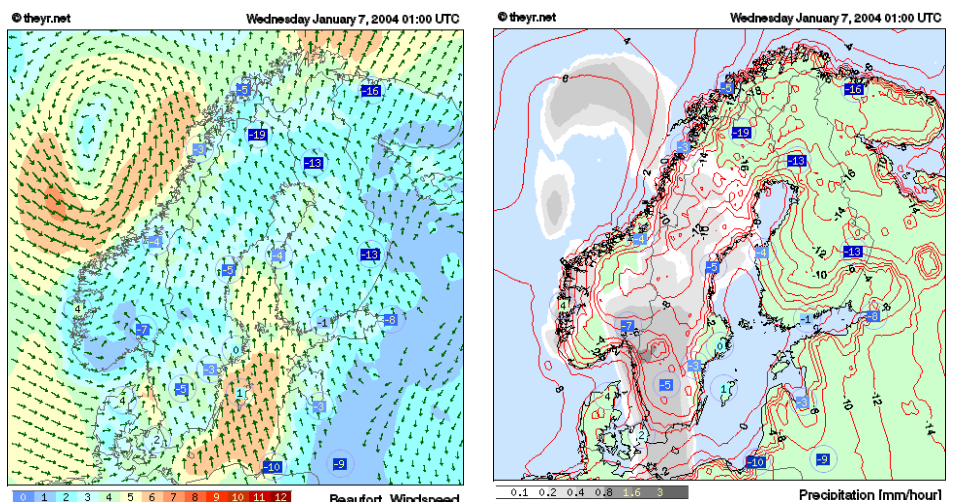
Några timmar tidigare såg vädersituationen ut på följande sätt:

Figur 15. Prognoskarta för flyget, 2004-01-06, kl. 21 UTC. Källa: SMHI. En varmfront passerar österut och fuktig luft från Östersjön förs med vindar från SSO in över landet och medför lätt till svår nedisningsrisk i form av underkylt regn, duggregn och låga moln. Kartorna t.h. visar en förenklad version av kartan t.v.



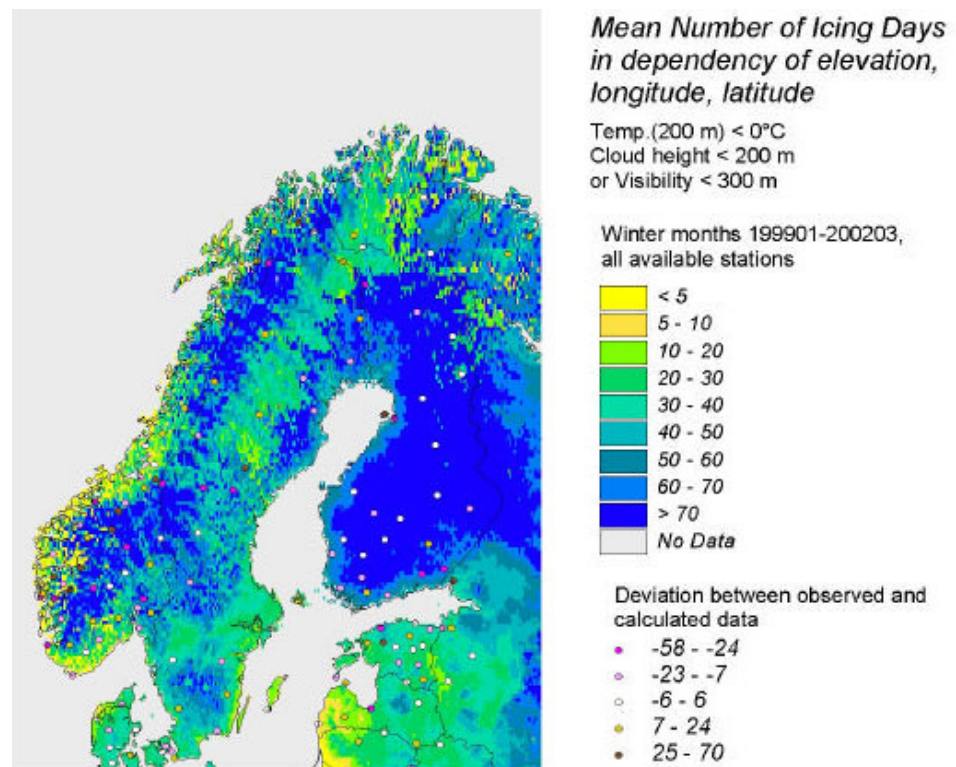
En för icke-flygaren mera lättfattlig prognoskarta från Theyr.net visas i Figur 16.

Figur 16. Vindhastighet och nederbörd 2004-01-07 kl. 01 UTC. Prognoskarta från Theyr.net.



Mellan 2002-2004 pågår EU-projektet NEW ICETOOLS som syftar till att ta fram verktyg för att bättre kunna hantera vindkraft i kallt klimat. Nedanstående preliminära nedisningskarta, Figur 17, presenterades av Österrikiska meteorologer vid konferensen Boreas VI i Finland våren 2003, [8].

Figur 17. Ett exempel på preliminär nedisningskarta ur [8] från EU-projektet NEW ICETOOLS.



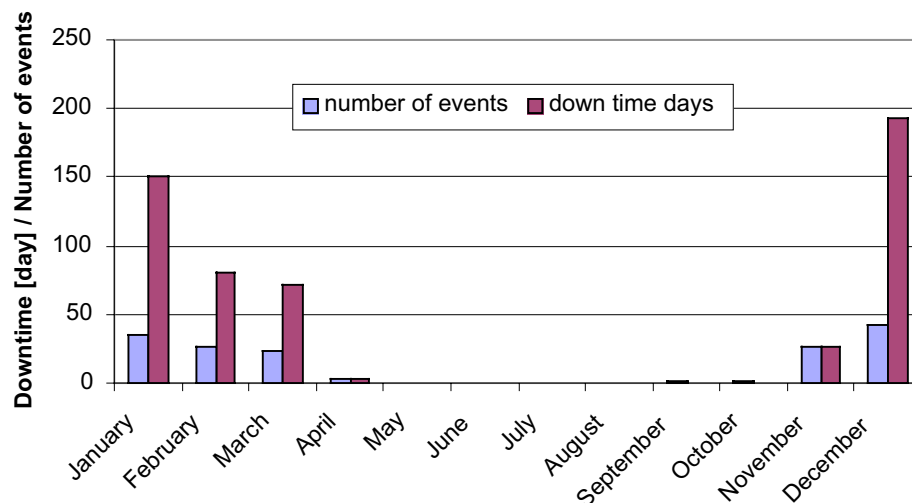
Författarna skriver att det beräknade, baserat på synoptiska mätningar, genomsnittliga antalet nedisningsdagar som visas i exemplet förmodligen är underskattat i fjällkedjan och längs kusterna. Säkrare nedisningskartor är under utarbetande.

Det finns ett behov av att kunna skatta energiproduktionsförlusten p.g.a. is. För att kunna utföra ett sådant arbete kan t.ex. tidsserier från HIRLAM och/eller MESAN analyseras med fokus på nedisningsperioder som följs av kyla och blåst.

Det bör vara möjligt att, baserat på tillgängliga prognosmetoder, förutse nedisning på vindkraftverk.

Förekomst av nedisning på vindkraftverk har i Finland rapporterats sedan 1996. Nästa bild visar den månadsvisa fördelningen av antalet driftbortfall orsakade av nedisning i Finland under perioden 1996-2002 samt det totala antalet dygn med produktionsbortfall, [20]. Under perioden 1996-2002 har antalet aggregat i Finland ökat från ca 20 till drygt 60 st vilket utgör ca 1/10 av det i Sverige installerade antalet.

Figur 18. Den månadsvisa fördelningen av antalet driftbortfall orsakade av nedisning i Finland under perioden 1996-2002 samt det totala antalet dygn med produktionsbortfall, Källa: VTT, [20].

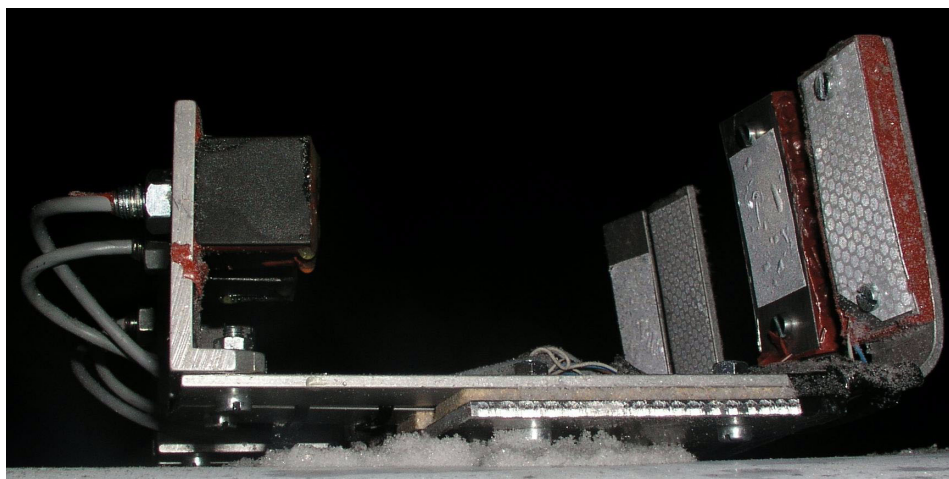


1.2.2 Varaktighet

Vi har i Sverige sett exempel på nedisning av vindkraftverk i som har varat i nästan 2 månader (Äppelbo vintern 2002/2003). Så långa nedisningsperioder förutsätter förmodligen upprepade perioder av nedisning, [16], eftersom isen, om den inte smälter ändå efterhand eroderar, sublimerar (övergår till vattenånga) eller helt enkelt kastas av de roterande bladen. Från Finland finns rapporter om nedisning på vindturbinblad som pågått i mer än två månader, [45].

Ett sätt att mäta varaktigheten av nedisning är att jämföra uppvärmda och ouppvärmda isdetektorer. En ny typ av isdetektor har därför nyligen testats i Suorva.

Figur 19. Isdetektorprototyp från HoloOptics. Foto: Rolf Westerlund, 2003-12-21.



Resultaten visar att detta sätt att mäta nedisning fungerar väl i miljön på maskinhuset. Aggregatets regelsystem ser till att givaren, som är fast monterad på maskinhuset, är uppriktad i vindriktningen. Frågan är hur relevant den på maskinhuset uppmätta nedisningen är för förhållanden på själva bladytan? Leverantören av bladvärmesystemet på Suorva- och Rodovålenaggregaten; Kemijoki,

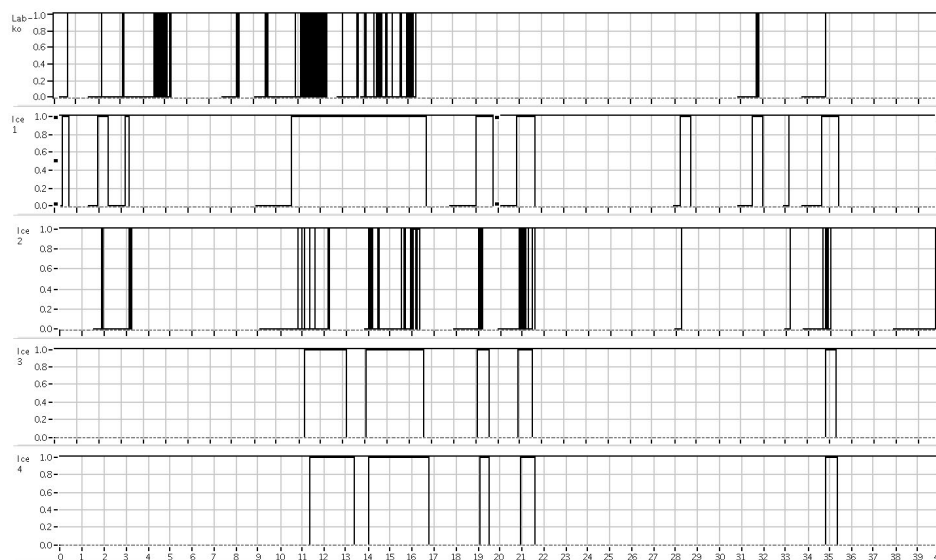
har provat olika typer av isdetektorer från finska Labko. Dessa har varit monterade på såväl maskinhus som på roterande bladytor. F.n. testar Kemijoki en ny modell av isdetektor på aggregatet i Suorva.

Figur 20. Labko LID-3200 isdetektor på maskinhuset i Suorva.



I Figur 21 visas uppmätt nedisning vid Suorva under 40 dygn med början 031221.

Figur 21. Uppmätt nedisning på maskinhuset i Suorva. Labko (LID-3200) och "Ice 2" (3:e raden) är uppvärmda medan övriga förmår mäta nedisningens varaktighet. Skillnaden i mätresultat mellan givarna beror på teknisk utformning och placering. Diagram: Göran Ronsten, FOI.



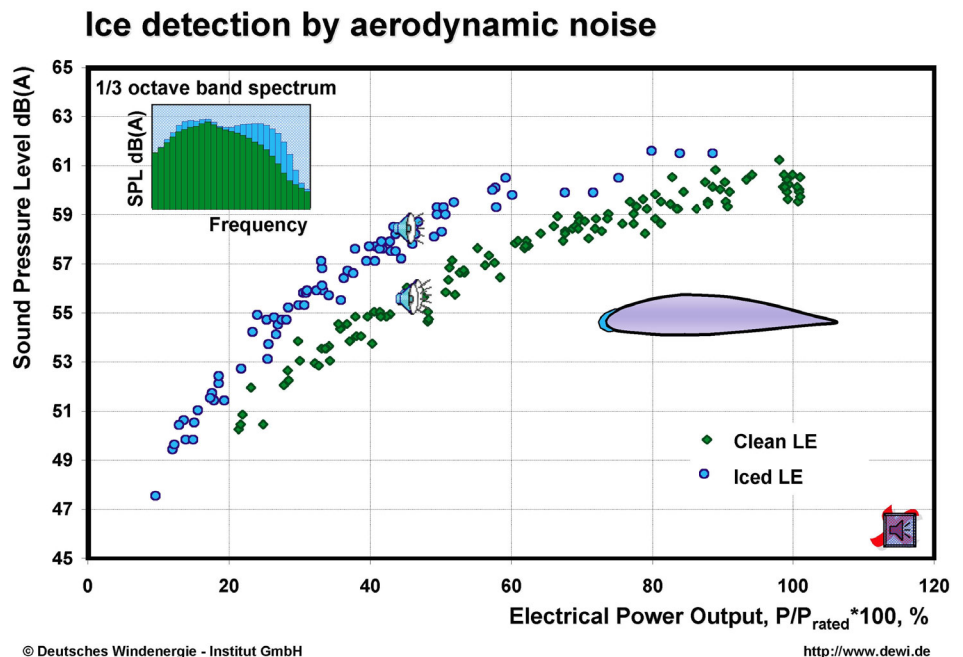
Det finns flera olika sätt att detektera nedisning. Så kan t.ex. en uppvärmd och en uppvärmd anemometer sida vid sida utgöra referens för varandra. Skälet till att inte den uppvärmda anemometern alltid visar rätt beror på att nederbörd, som annars inte skulle störa mätningarna, kan smälta och bilda en isskorpora om inte avisningseffekten är tillräckligt hög.

Ett annat sätt att indirekt detektera nedisning utförs genom att jämföra uppmätt vind-effektsamband med ett börvärde. Om skillnaden är alltför stor kan aggregatet antingen stängas av i avvaktan på manuell start eller, om verket är försett med avisningsutrustning, en avisningscykel påbörjas.

I [31] visas att Vaisalas frostdetektor HMP243 på ett korrekt sätt kan mäta luftfuktigheten även vid temperaturer under 0° C. Vid en jämförelse med isdetektorn LID-2000 konstaterades därför att frostdetektorn HMP243 är en minst lika bra isdetektor i moln som LID-2000.

Nedisning på vindkraftverk kan även detekteras genom analys av rotorljud, [47]. En sådan mätmetod kan, under förutsättning att kunskapen om frekvensinnehåll vid nedisning visar sig kunna användas i praktiken, resultera i kostnadseffektiv och tillförlitlig isdetektering.

Figur 22. Nedisning kan detekteras genom analys av uppmätt frekvensinnehåll och jämförelse med referensspektra från förhållanden utan nedisning. Diagram: DEWI.



Medan nyfallen snö dämpar bullerutbreddningen så kan hård snö och is bidra till att minska den akustiska dämpningen. Bullerdämpningen beror av flera meteorologiska faktorer varav temperaturgradient, vindhastighet, vindriktning samt markdämpning är de viktigaste. Conny Larsson vid Institutionen för geovetenskaper vid Uppsala universitet presenterade "Bullermätningar" vid SMHI:s metodkonferens i april 2004. Han lanserade där påståendet: "Skillnader i vädret under ett dygn kan medföra att ljudnivån ändrar sig med 20-25 dBA". De i industribullernormen angivna bullernivåerna bör därför, enligt Larsson, för varje månad kompletteras med uppgift om genomsnittlig bullernivå som funktion av tid på dygnet.

Nedisade blad bör vid certifiering för kalla klimat i säkerhetshöjande syfte betraktas som ett normaltillstånd så att drifttillståndet även kombineras med andra "fel".

Nedisning betraktas vid certifiering av vindkraftverk idag som ett fel. Vid utvärdering av hur fel hanteras kombineras inte ett fel med ytterligare ett fel. Då nedisning på våra breddgrader inte kan anses alltför ovanligt vore det, ur säkerhetsynpunkt, lämpligt att vid certifiering acceptera drift med nedisade blad som ett normaltillstånd.

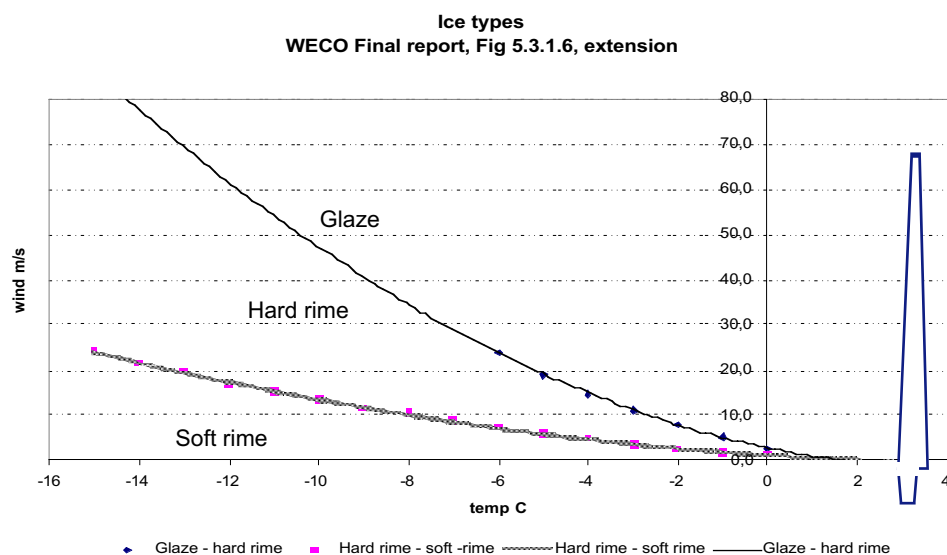
1.2.3 Frost

Frost är ett tunt lager med vita iskristaller som bildas när luftens vattenånga vid ingen eller mycket låg vindhastighet sublimerar på en kall yta. Frost kan initialt störa strömningen över vindturbinbladet och därmed minska effekten och förändra ljudbilden eftersom en större del av strömningen nu blir turbulent. Eftersom frostagret är mycket tunt så eroderar/sublimerar det dock relativt snabbt. För att avlägsna frost krävs inget avisningssystem.

1.2.4 Klaris

Vid underkyld nederbörd eller dimma (moln) som innehåller relativt stora underkylda vattendroppar kan klaris bildas. Klaris som lägger sig som en hinna runt profilen kan komma att öka framkantsradien utan att profilegenskaperna drastiskt förändras. På passivt överstegringsreglerade aggregat kan detta orsaka försenad effektereglering, [41], med skador på växellåda och generator som följd. Beroende på droppstorlek, temperatur och relativ hastighet bildas antingen klaris eller dimfrost. Klaris har en densitet mellan 0,7-0,9 g/cm³.

Figur 23. Beroende på temperatur och lokal hastighet på bladet kommer nedisning att ske på olika sätt. Inne vid roten bildas mjuk dimfrost medan isen längre ut packas hårdare och bildar hård dimfrost och längst ut klaris. Källa, WECO Final report, [51].



1.2.5 Dimfrost

Dimfrost kommer i två versioner (på en flytande skala); mjuk och hård. Den mjuka dimfrosten utgör ingen fara för omgivningen då dess densitet är låg. Hård dimfrost däremot, kan ha en densitet som är nästan lika hög som klaris, upp till

0.8 g/cm³. När och var dimfrost bildas på vindturbinblad visas schematiskt i Figur 23.

Nedisning på en mast, eller annat stillastående föremål, kan således ha låg densitet samtidigt som nedisning på bladets olika delar kan anta högst varierande densitet, vilken i allmänhet är högre utåt spetsen. Under förutsättning att bladet roterar förstås.

Dimfrost bildas i huvudsak vid drift i moln och anses vara ett mycket stort problem för fjällbaserad vindkraft i Finland [50]. Den vertikala hävningen i lufthavet är lokalt mycket stor runt de isolerade lågfjällstopparna. Molnbasen hinner inte anpassa sig på samma sätt som i långsamt stigande terräng varför medelmolnhöjden i ett finskt lågfjällsområde ofta kan vara lägre än toppen på berget. Ett vindkraftverk på toppen av ett sådant berg kommer således ofta att få arbeta i moln. Vid minusgrader kommer då dimfrost, och längst ut på det roterande bladet klaris, se Figur 23, att bildas. Vid senare diskussioner med Esa Peltola vid VTT visar det sig att detta påstående gäller för beräkningar och då enbart i stagnationspunkten. Oavsett vilken fördelning som sedan gäller i verkligheten så ökar olycksrisken vid kast av is från bladspetsen eftersom denna is har såväl högre hastighet som högre densitet jmf. med is från en position närmare turbinnavet.

Molnhöjdsmätningar på presumtiva fjälllokaliseringar kan ge en uppfattning om risken för nedisning.

Eftersom svenska flygplatser, där molnhöjden regelbundet uppmäts, ofta ligger en god bit från de fjälltoppar som är aktuella för vindkraftsetableringar finns det tyvärr ingen databas över lokala molnbaser att ösa ur.

Vid dimma, eller i höglänt terräng, kan det hända att aggregatet befinner sig ovanför nedisningsområdet. Om rotern har avisningsanordning så är det olämpligt att en ev. isdetektor sitter monterad i marknivå. Ofta sitter aggregatets isdetektor på maskinhuset. Helst skall dock nedisning mätas direkt på bladet. Detta gäller i synnerhet för stora aggregat, och även till havs, där delar av rotorbladet kan gå i moln. Några kommersiellt tillgängliga metoder för detta finns ej f.n. även om akustiska och optiska metoder håller på att utvecklas. Ett alternativt sätt att detektera is kan vara att leta efter frekvenser som är identiska med rotorvarvtalet, s.k. 1P-störningar, i lastsignaler eller uteffekt. Detta samband har, under vissa givna förutsättningar, tidigare visats i [64] och nyligen i [11].

1.2.6 Snöblandat regn

Snöblandat regn förekommer vid temperaturer mellan 0°C och ned till 50% relativ luftfuktighet.

Makkonen visar i [28] gränsen mellan torr och våt snö som funktion av lufttemperatur och relativ luftfuktighet. Förenklat uttryckt går skiljelinjen mellan torr och våt snö linjärt från 0°C och 100% relativ luftfuktighet till +4°C och 50% relativ luftfuktighet. Ovan skiljelinjen är snön våt medan den definieras som torr därunder. Snöblandat regn inträffar således per definition vid lufttemperatur över 0°C. Om det snöblandade regnet inte blåser undan eller smälter utan istället fastnar på kallare strukturer, lägger sig på horisontella ytor eller fångas i vindfällor kan fallande yttemperatur, t.ex. på grund av ökad utstrålning vid uppklärnande

väderlek efter en kallfrontspassage eller sjunkande nattemperatur, orsaka svår nedisning. Jmf. mastbrottet i Sollefteåtrakten i februari 1988, [65].

1.3 Exempel på nedisade strukturer

1.3.1 Nedisning av master

Den främsta nedisningsfaran på master utgörs av snöblandat- eller underkyldt regn i själva masten, om den är av fackverkstyp, eller underkyld nederbörd, dimma eller moln som kondenserar på staglinorna. En "isbarksstorm", som den 23 oktober 1921 orsakade svåra skador på kraftledningsnätet i Mellansverige, medförde strängare dimensioneringskrav som följd, [35].

Figur 24. Vägverkets väderstation vid Högfjällshotellet i Sälen. Den halvt isfria givaren är en nederbördsdetektor; "Optic Eye" från AerotechTelub. Foto från Tommy Sundquist, Vägverket.



1.3.2 Nedisning av broar

Vägverket anlitar AerotechTelub för meteorologiska mätningar på mer än 700 platser. För att övervaka nedisning på bl.a. broar har tidigare en isdetektor av folietöjningstyp tagits fram, [35]. Ett system för att detektera nedisning m.hj.a. av videokamera är under uppbyggnad. Problem med risk för fallande is kan medföra avstängda körbanor och manuell isborttagning.

Figur 25. Nedisning på Högakustenbron 2003-11-14. Foto från Tommy Sundquist, Vägverket.



1.3.3 Nedisning av helikoptrar

Vid en framtida utbyggnad av havsbaserad vindkraft kommer servicepersonal att behöva kunna ta sig från land till parken och åter, samt förflytta sig mellan enskilda aggregat. Detta kommer förmodligen företrädesvis att ske med båt även om alternativet helikoptertransport kan användas vid t.ex. Horns Rev, [70].

Figur 26. Helikopter kan användas vid transport till och från vindkraftverk. Nedisade firningsytor skulle dock försvåra eller till och med kunna omöjliggöra persontransport. Foto: Elsam.



Jens Nybo Jensen vid Elsam skriver: "Vi har oplevet at helikopteren ikke kan flyve, når der er risiko for overisning. Pudsigt nok kan forsvarets gamle Sikorsky redningshelikoptere heller ikke.

Personalen fick övernatta i vindkraftverket.

Vi havde problemstillingen først 2004-01-06, hvor en planlagt formationsflyvning med forsvarets Sikorsky helikoptere måtte aflyses på grund af overisningsvarsel. Flyvningen skulle gennemføres i anledning af flytningen af en eskadrilje fra flyvestation Værløse, og blev omtalt i Danmarks Radio. Men risikoen for overisning gjorde også at helikopteren til vore teknikere heller ikke kunne flyve, og vore teknikere måtte derfor overnatte i møllerne. Der har mig bekendt ikke været problemer med overisning i forbindelse med bådtransport."

Den senast byggda vindkraftsparken i Danmark; Nysted, är p.g.a. sitt, jmf. med Horns Rev mer skyddade läge, inte förberedd för helikoptertransport av servicepersonal.

Bör en helikopter flyga i vaken bakom ett vindkraftverk? Svaret beror främst på helikopterns flygegenskaper vid en sådan störning.

Spetsvirvelstyrkan från ett vindkraftverk kan, enligt [82], vid $c_l=1$ uppskattas

till $\Gamma_{80} \approx 0.4 v_{tip} c_{80}$ vilket

med $v_{tip}=80$ m/s och

$c_{80}=2$ m innebär

$\Gamma_{80} \approx 64 \frac{m^2}{s}$. Detta

motsvarar ca 25% av virvelstyrka bakom en landande BAe 146.

Vid räddningsaktioner med helikopter nära vindkraftverk bör aggregaten snabbt kunna stängas av.

Hindermarkering för 3G-master behöver förbättras. Samtliga master över 20-30 m bör ha röd toppbelysning samt reflektorer för IR-strålkastare i toppen.

De svenska militära räddningshelikoptrar som idag används för civil räddningstjänst; Hkp 4 (Boeing-Vertol 107-II-15) och HKP 10 (Aérospatiale AS 332M1 Super Puma) är inte utrustade för flygning under mer än lätt isbildning. Enligt Lars Fridman, flygchef vid helikopterflottiljen Säve/Såtenäs, är nedisning inget problem vid flygning på låg höjd över öppet vatten. I många fall går det ofta att välja alternativa flyg- höjd/vägar för att på så sätt undvika nedisning över land. Hkp 4 kommer inom kort att ersättas av Hkp 14 (NH90 levereras från bolag bildat av Eurocopter, Augusta, Eurocopter Deutschland och Fokker). Hkp 14 kommer att vara godkänd för flygning under kända nedisningsförhållanden.

Kommer då helikoptrar överhuvudtaget att kunna flyga nära vindkraftverk? OSF - Ordnings- och säkerhetsföreskrifter för militär flygverksamhet innehåller, enligt Major Ronnie Larsen vid GRO FV Flygsäk, en skrivning om att försiktighet bör iaktas vid flygning nära vindkraftverk.

Efter flertalet egna manöverprov bakom vindkraftverk har han dock inte själv kunnat konstatera några signifikanta störningar. Larsen menar att det endast är en tidsfråga innan en manöveroduglig båt riskerar att driva på ett vindkraftverk till havs. Helikopterbesättningarna kommer då naturligtvis att göra sitt yttersta för att bistå de nödställda.

För att underlätta detta arbete krävs möjlighet att snabbt beordra avstängning av individuella vindkraftverk. För detta ändamål bör aggregat vara tydligt numrerade, samt kontaktvägar mellan larmcentral och driftansvariga/operatörer vara upparbetade.

Vad beträffar hindermarkering av vindkraftverk är en skärpning av tillämpningen av befintliga regler aviserad från såväl civila som militära myndigheter. Ett troligt krav är därför röd lampa i toppen av rotorplanet på samtliga nya aggregat med totalhöjd över ca 50 m (lägsta höjd kan variera beroende på plats). Förmodligen kommer det att räcka det med blinkande rött ljus varför bladspetsarna kommer att förses med lysdioder, liknande de som används vid trafiksignaler, som tänds på toppen av varvet.

Hindermarkeringsproblemet är inte unikt för vindkraftverk. Fridman menar att helikopterförare idag saknar hindermarkering på t.ex. 3G-master även under 50 m höjd. Sådan hindermarkering bör ske med röd topplampa samt reflexanordning för flygning med NVD¹ eller NVG².

För den civila flygräddningstjänsten i Visby och Sundsvall har Sjöfartsverket tecknat avtal med Norrlandsflyg AB. Pilot Kim Gardberg berättar att man har samma möjligheter och begränsningar som sina militära kollegor, dvs flygning i

1. NVD = Night Vision Devices (mera frekvent förekommande ordval jmf. med NVG)

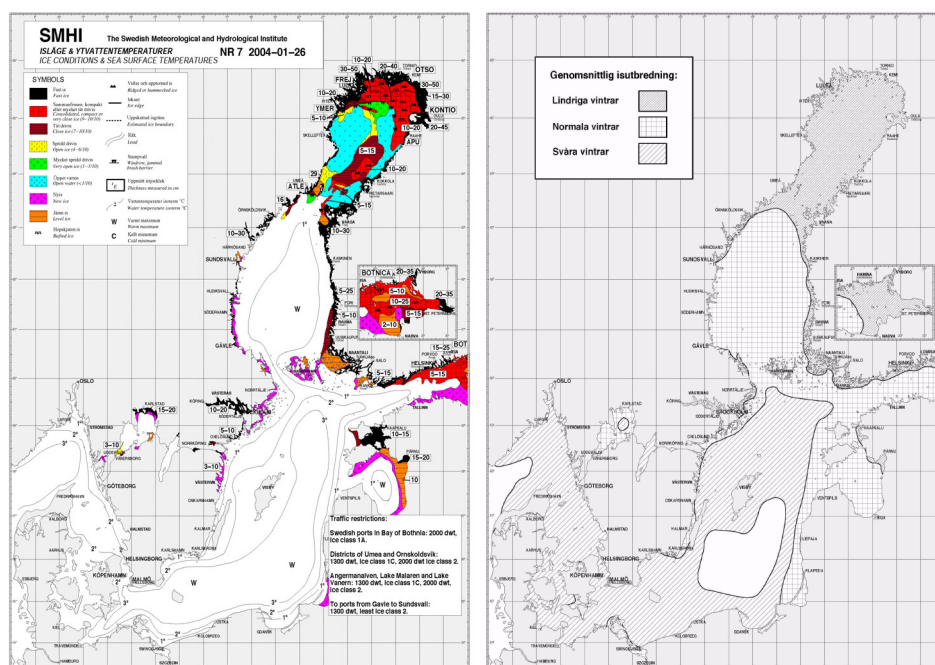
2. NVG = Night Vision Goggles

känd isbildning är inte tillåten. Låga moln, underkyld dimma, sjörök samt underkylt duggregn eller regn är faktorer som kan hindra insats. Snöblandat regn är däremot inget problem för helikoptern eftersom denna form av nederbörd inte fastnar på rotorerna. Lundqvist gör motsvarande konstaterande för snöblandat regn vid höga vindhastigheter, [23].

1.3.4 Nedisning av båtar

Den marina prognos- tjänsten vid SMHI meddelar israpport och nedisningsvarningar via bl.a. radions ordinarie sjörapporter. Informationen finns även tillgänglig på “nätet”. Figur 27 visar isläget i Östersjön och Bottenviken 2004-01-26. Risken för nedisning av fartyg är betydligt mindre inom istäckta områden jämfört med i områden med öppet vatten.

Figur 27. Isläget 2004-01-26 beskrivet av SMHI:s marina prognostjänst. Ytvattentemperaturen visas med isotermer. T.h. syns den genomsnittliga isutbredningen under lindriga, normala respektive svåra vintrar. Karta med högre upplösning finns att hämta på www.smhi.se. Kartor: SMHI



Fartyg kan, enligt [23], främst drabbas av nedisning orsakad av:

- Översköljning
- Underkylt regn, dimma eller sjörök
- Snö, snöblandat regn
- Skum från självförvållade vågor
- Skum från brytande vågor

Isvarning utfärdas idag baserad på uppgifter från fartyg från 500 ton dödvikt och uppåt och med en högsta hastighet på ca 15 knop. Små och snabba båtar kan råka ut för nedisning utan att ha blivit varnade.

Inom istäckta områden finns varken brytande vågor eller sjörök varför nedisningsrisken då främst beror på den egna hastigheten. En nedisningsvarning från SMHI:s marina prognostjänst den 28 januari 2004 lyder: "Varning för lätt nedisning på Bottenhavet". Varningen utfärdas baserad på erfarenhet från ett stort antal observationer på fartyg med lägst 500 ton dödvikt¹ med en högsta hastighet kring 15 knop, [79]. Dagens snabbare fartyg, samt mindre båtar, riskerar således att råka ut för kraftigare nedisning på ett tidigare stadium jämfört med de fartyg som utgör referens för SMHI:s varningskriterier. Risken för nedisning av dagens stora och förhållandevis snabba båtar samt nedisning av mindre båtar är områden som SMHI önskar studera ytterligare. I [22] presenteras bilder på nedisade fartyg, nedisningsfrekvens under resp. månad, vindriktningsberoende och sambandet mellan vindhastighet, lufttemperatur och grad av nedisning.

Bilderna på nedisade fartyg är tånvärda. Ett exempel är m/s Peter Pan som 18 januari 1972 fick återvända till Trelleborg efter att ha råkat ut för så kraftig nedisning att besättningen fick slå sönder rutorna på kommandobryggan för att kunna se ut, Figur 28.

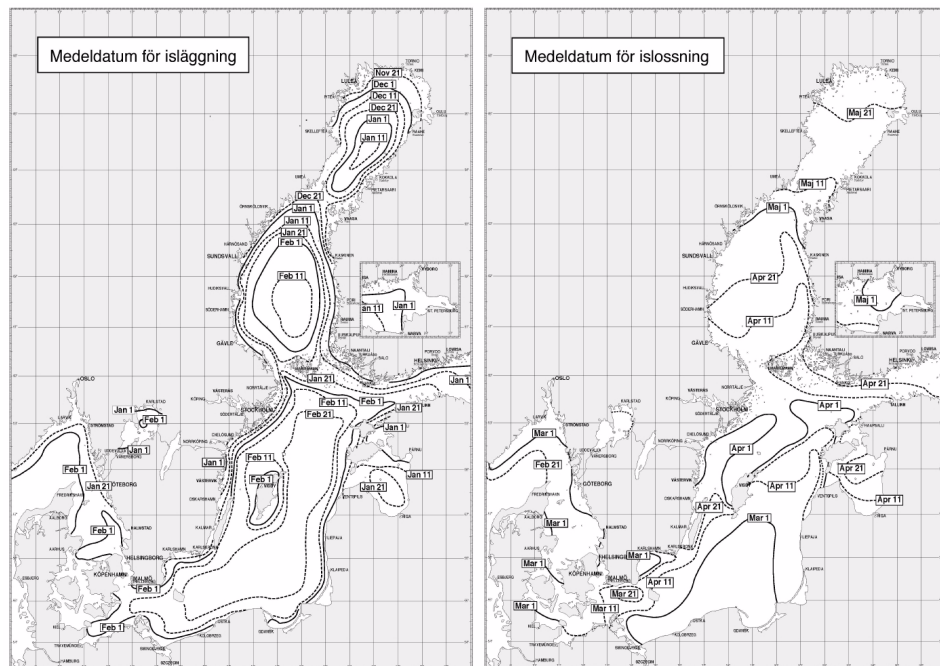
Figur 28. M/s Peter Pan fick den 18 januari 1972 kraftigt nedisad återvända till Trelleborg. Foto: SMHI. Bilden t.h. visar personal på väg ut till vindkraftverken vid Bockstigen utanför Näsudden på Gotland 2003-02-05. Hur stor är risken för nedisning? Foto: Jan Orrvik, Nordisk Vindkraftservice.



Nedisningsperioden för båttrafiken startar i oktober med ett maximum under januari. Därefter avtar nedisningsrisken snabbt eftersom förekomsten av höga vindhastigheter minskar samtidigt som en allt större del av Östersjön fryser till, Figur 29.

1. NE: dödvikt (eng. deadweight), den sammanlagda vikten i ton av den last och det bränsle ett fartyg förmår bära då det nedlastas till största tillåtna djupgående, dvs. lastmärket. Tankfartyg (de största fartygen) kan ha en lastförmåga av upp till omkring 500 000 ton dödvikt.

Figur 29. Medeldatum för isläggning och islossning. Karta med högre upplösning finns att hämta på www.smhi.se. Karta: SMHI.



Risk för måttlig eller svår nedisning förekommer, enligt [22], vid samtliga vindriktningar förutom i en sektor mellan SSO-W.

Is innehåller inte salt. Detta kan utnyttjas för att avsalta havsvatten, [68]. Metoden har studerats sedan 1945, påstås ha stor potential men anses idag inte vara tillräcklig lönsam. Främsta nackdelen uppges vara en omständlig mekaniska hantering av is och vatten.

Gränserna för olika grader av nedisning skiljer sig mellan Östersjön och oceanförhållanden åt beroende på oklara definitioner av gränser samt den lägre salthalten i Östersjön. Oceanvatten har en betydligt högre salthalt och fryser därför vid en lägre temperatur; -2°C , jmf. med nära 0°C i Östersjön. Tabeller för nedisningsrisk på världshaven kan således inte användas i Östersjön.

Gränserna för lätt, måttlig och svår isbildning på stora fartyg är, förenklat uttryckt:

Nedre gränser vid olika grad av nedisning på fartyg	Vindhastighet [m/s]	Lufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$]
Lätt	< 4	< -5
	> 10	< -0
Måttlig	< 7	< -6
	> 12	< -2.5
Svår	< 10	< -6
	> 13	< -4.5

Vid vindhastigheter lägre än 4 m/s råder, oavsett temperatur, ingen nedisningsrisk för stora fartyg med maximal hastighet kring 15 knop.

Tabellen skall tolkas på följande sätt: Om den lägsta angivna vindhastigheten, i detta fall 4 m/s underskrids så råder, oavsett lufttemperatur, ingen risk för nedisning. Vid vindhastigheter över den övre gränsen i respektive kategori finns risk för nedisning vid den där angivna, samt lägre, temperaturer. Hänsyn har ej tagits till fartygets kurs eller hastighet. Ett fartyg kan minska risken för nedisning genom att ändra kurs och/eller hastighet.

Risken för nedisning på blad, orsakad av skum från havet, på stora havsbaserade vindkraftverk får anses obefintlig.

Enligt [23] i kombination med muntlig kommunikation med författaren, får risken för nedisning av vindturbinblad orsakad av skum från havet anses obefintlig då dessa i framtiden mycket sällan kommer att passera mindre än 50 m från havsytan. Rapporten förutsätter dessutom storm eller orkanvindar vid de analyserade nedisningstillfällena.

Islaster på vindkraftsfundament har studerats av bl.a. Thor, [60], Bergdahl, [1] och Haapanen et al, [11]. Praktiska studier av islaster på vindkraftsfundament bör utföras på platser med riklig förekomst av tjock havsis. F.n. finns dock inga havsbaserade vindkraftverk byggda på sådana platser utan studier kring nedisning på havsbaserade vindkraftverk utförs på platser där is av signifikant tjocklek mycket sällan förekommer.

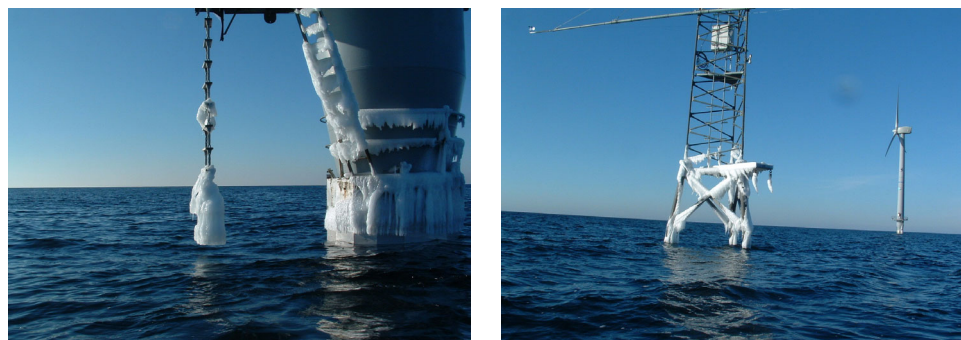
1.4 Exempel på nedisade vindkraftverk

1.4.1 Bockstigen

Jan Orrvik vid Nordisk vindkraftservice berättar 2004-01-28 om situationen på Bockstigen:

Burgsviks hamn är i praktiken stängd för trafik med mindre båtar p.g.a. is. Livräddningskryssaren från Vändburg kan bryta ca 10-15 cm tjock is, vilket räcker för tillfället. Att utnyttja denna skulle kosta i storleksordningen 10 kSEK för ett servicebesök. Från udden vid Valar går det dock att ta sig ut till Bockstigen med en lättare gummibåt. Farten ut till vindkraftverken minskas kraftigt av sönderbrutna isflak.

Figur 30. Nedisning på fundament och havstorn vid Bockstigen, 2003-02-05. Foto: jan Orrvik



Väl på plats går det inte att använda repstegen för äntring då denna i sin nedre del har 300-500 kg fastfrusen is. Personalen vet helt enkelt inte om repstegen håller för ytterligare 100 kg.

För att ändå kunna ta sig upp till plattformen kan man få ägna upp till en timma per aggregat åt att knacka bort is på pålfundamentet och den därpå sittande metallstegen. Orrvik hyser hopp om att en nyutvecklad elastisk gummistega skall kunna underlätta det framtida underhållsarbetet.

Figur 31. En elastisk stege fäst i såväl båt som vindkraftverk kan förhoppningsvis öka möjligheten att snabbt ta sig ombord på vindkraftverket. Foto: Jenny Trumars, Chalmers.



Nedisning av blad och givare förekommer [på Bockstigen], men är så pass ovanligt att det inte behöver föranleda några som helst åtgärder.

1.4.2 Yttre Stengrund och Utgrunden

De två senaste svenska vindkraftsparkerna till havs är belägna i Kalmarsund med hamnen i Bergkvara, Torsås kommun, som bas för verksamheten. Serviceansvarig samt skeppare på de fartyg som trafikerar vindkraftverken, [83], anser inte att isbildning på antringsstegar är något problem eftersom båtarna är så pass höga att man där kliver över den is som motsvaras av den som syns på bilderna från Bockstigen. Nedisning på själva båten hanterar man genom att minska farten om förhållandena så kräver, [22].

Havsbaserade vindkraft måste kunna angöras från mer än ett håll.

Havsisen antog vintern 2002/2003 en sällan skådad tjocklek. Till skillnad från på södra Gotland så finns det båtar med isbrytande förmåga i Bergkvara. Eftersom aggregaten här är större, och därmed kan bära en högre transportkostnad jmf. med Bockstigenanläggningen, anser de tillfrågade skepparna inte heller att havsis är något problem. Då sjön kan vara grövre vid Yttre Stengrund jmf. med vid Utgrunden kan det vid sådana tillfällen där anses vara en fördel med en något större båt. En sak är sjömännen överens om: Havsbaserade vindkraftverk måste i framtiden kunna angöras från mer än ett håll.

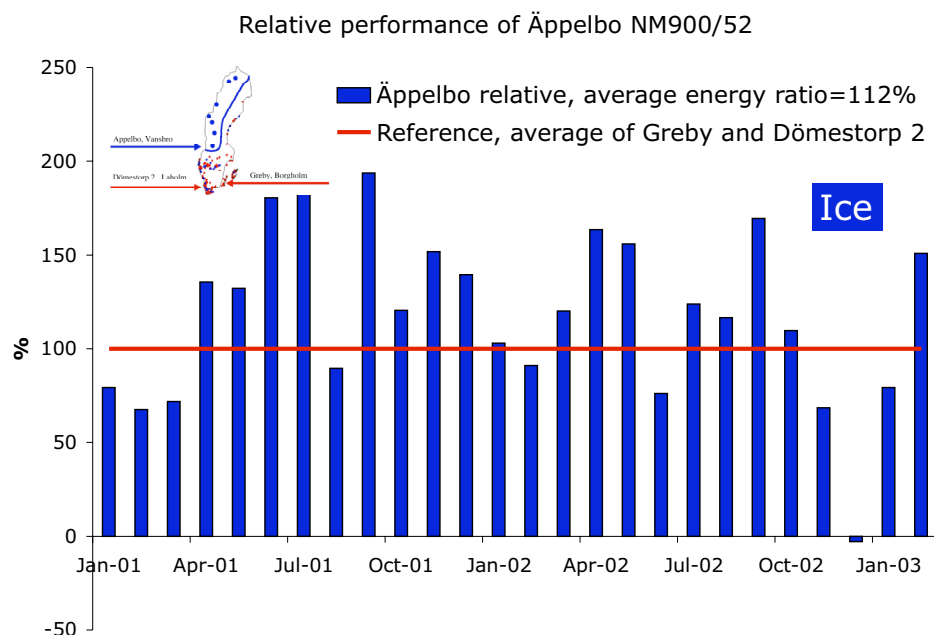
1.4.3 Äppelbo

På Hunflen utanför Vansbro, närmare bestämt på höger sida i höjd med Äppelbo om man kör väg 71 norrut mot Sälen, står ett 900 kW-aggregat från NEG Micon. Där blåser det bra; energiproduktionen är betydligt bättre jämfört med den ursprungliga prognosen. Nedisning har dock orsakat såväl korta som längre drift-

stopp. Det hittills längsta driftstoppet p.g.a. nedisning inträffade mellan 2002-11-22 - 2003-01-13. Som en sista utväg för att underlätta avisning parkerades aggregatet i söderläge 2003-01-09. Även mellan 2003-02-04 och 2003-02-10 gick verket med reducerad effekt p.g.a. nedisning.

För att få en uppfattning om energiproduktionsförmågan har en jämförelse gjorts med motsvarande aggregat i Södra Sverige, Figur 32.

Figur 32. Driftstatistiken talar sitt tydliga språk, Äppelboaggregatet stod nedisat under drygt 7 veckor mellan 22 nov 2002 och 13 jan 2003.



Figur 33. Hunflen 2003-01-07. Verket har nu varit avställt i 6 veckor p.g.a. av nedisade blad. Lägg märke till att den svarta bladframkanten, kanske tack vare parkering med rotorn i söderläge, är fri från is. Aerodynamiken är ändå så pass störd att aggregatet inte förmår uppnå för drift erforderligt moment och varvtal. Det skulle dröja ytterligare en vecka innan aggregatet kunde tas i drift. Foto: Kjell Jansson, Malungs Elnät AB.



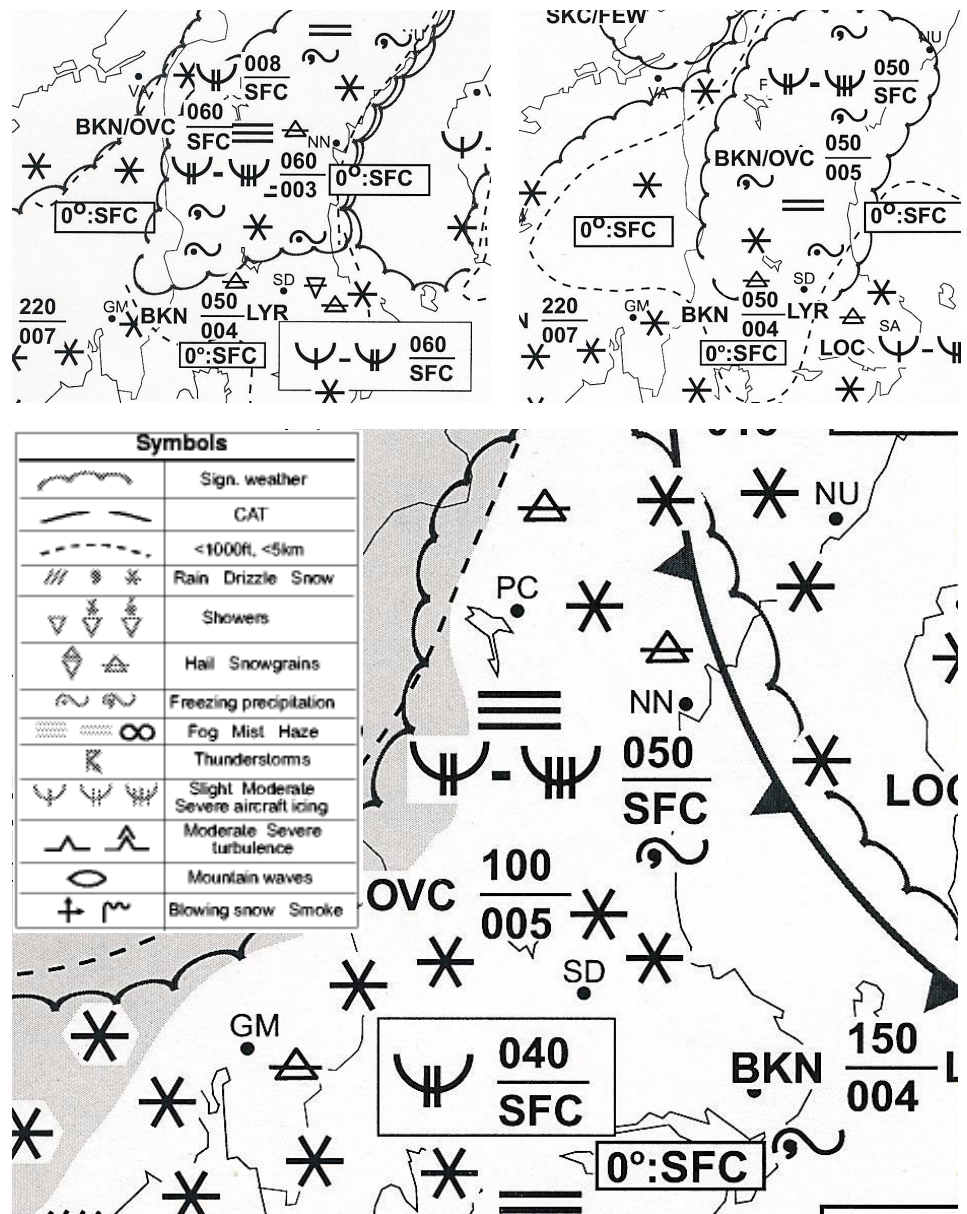
Intressant att notera är kommentaren "Is förutsätts inte fästa längre tid än 5 dagar eftersom mycket stora ispåslag inte har observerats" i [16]. Dessa observationer

bygger på data från finska Pyhätunturi under perioden jan-apr 1996 och tyder på att längre perioder av nedisning förutsätter återkommande nedisningstillfällen. Så var fallet i Dalarna under nov-dec 2002.

Figur 34. Vindkraftverket på Hunflen utanför Äppelbo är beläget väster om Siljan som är sjön NV Borlänge (SD).

Flygets prognoskartor (SMHI) från 2003-11-22 kl 21 UTC, 2003-11-23 kl 09 UTC samt 2003-12-28 kl 06 UTC visar att stora delar av mellansverige vid dessa tillfällen var utsatt för måttlig till svår isbildning ner till markytan orsakad av underkyld nederbörd, och underkyld dimma. Snöhagel är vita ogenomskinliga, snölika, runda och har en diameter mellan 2 och 5 mm. De är, liksom ishagel ett tecken på förekomst av underkyld nederbörd i ovanliggande luftlager.

Genom okulärbesiktning, dvs en snabbtitt, på motsvarande kartor för perioden mellan 2003-11-23 och 2003-12-28 kan konstateras att nedisning förutsågs vid flera tillfällen. Speciellt första veckan i december tycks ha varit besvärlig med snöhagel, underkyld dimma och underkyld duggregn.

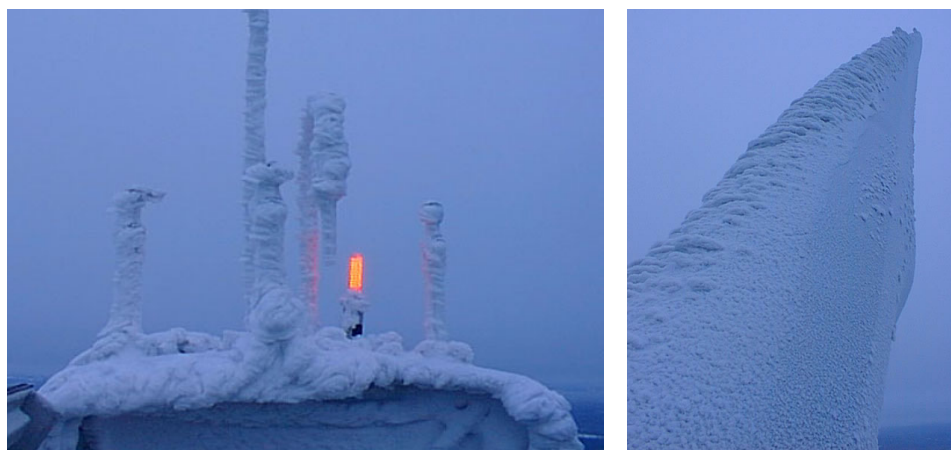


Nedisning har även förekommit under vintern 2003/2004.

Figur 35. Bilder tagna på maskinhuset på Äppelboaggregatet på Hunflen den 5 dec 2003.
Foto: Göran Ronsten, FOI.

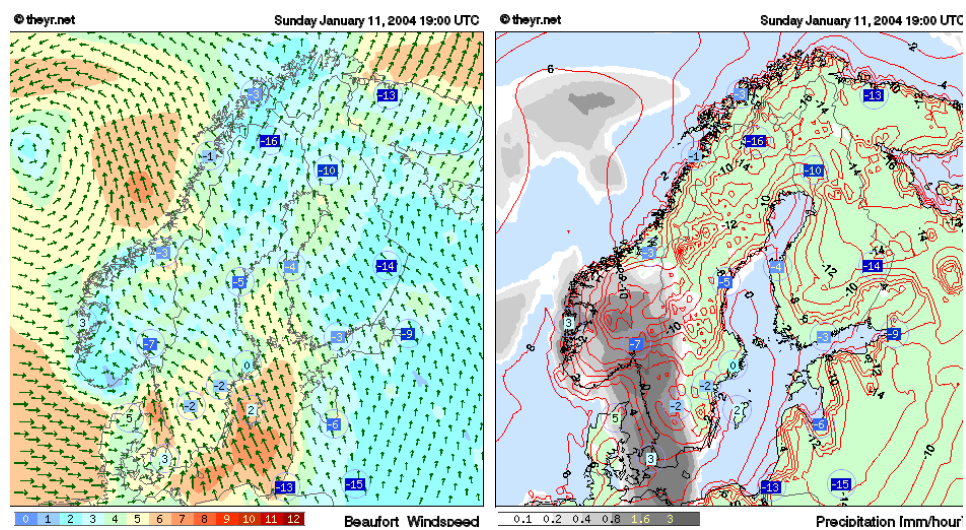


Figur 36. Bilder tagna på maskinhuset på Äppelboaggregatet på Hunflen den 15 jan 2004.
Foto: Kjell Jansson, Malungs Elnät AB. Verket stod avställt p.g.a. nedisning mellan 12 till 20 januari.



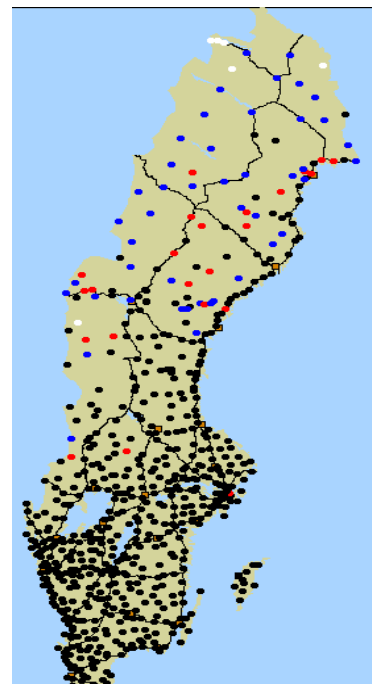
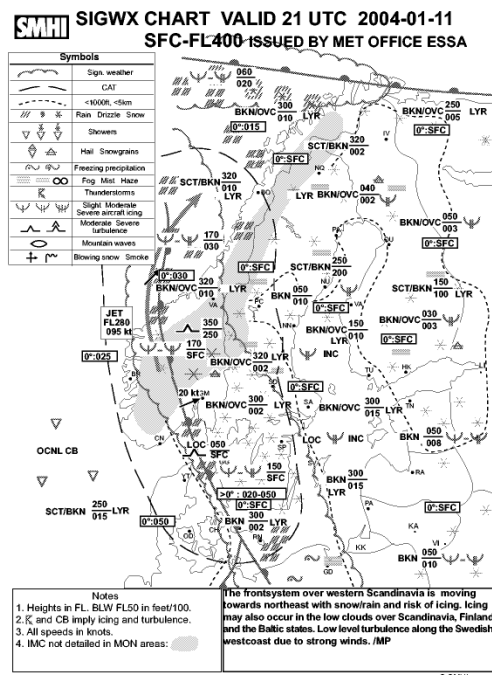
Vädersituationen som den 11 januari 2004 orsakade nedisning i bl.a. Dalarna visas på följande bilder.

Figur 37. Prognoskartor över vindhastighet och nederbörd från theyr.net visar hur fuktig östersjöluft på kvällen den 11 jan 2004 förs upp mot södra Norrland.



SMHI förser flyget med väderprognoser som bl.a. visar nedisningsrisken.

Figur 38. SMHI:s väderkartor för flyget visar på kvällen den 11 jan 2004 på måttlig nedisningsrisk ned till marken inom delar av nederbördsområdet. Kartan t.h. kommer från Vägverket och visar var de mer än 700 mätstationerna finns belägna. På vägverkets web-plats går det att se informationen från varje enskild mätplats.



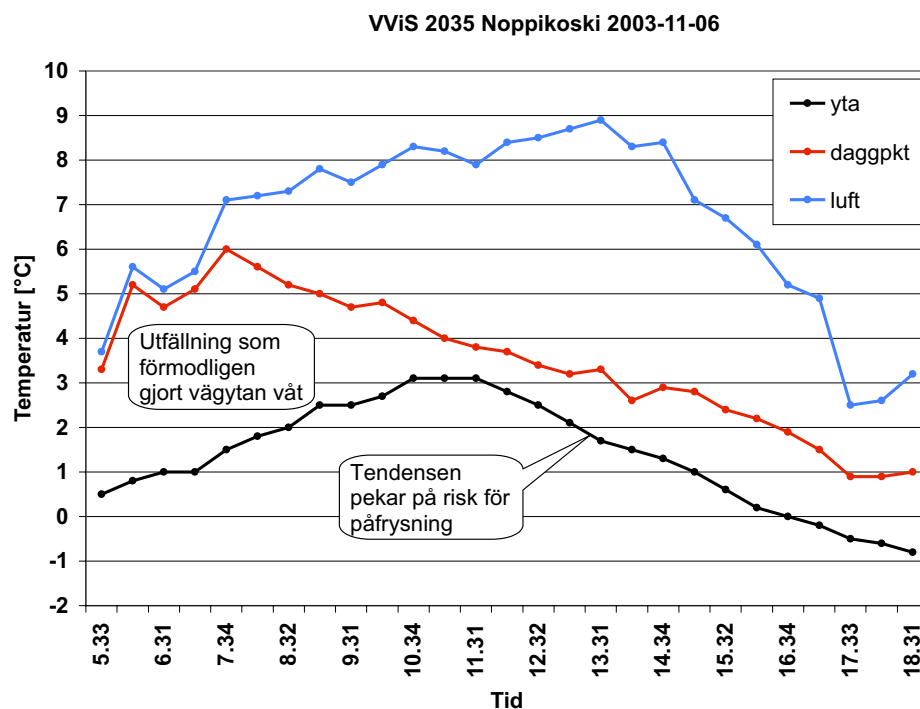
Vägverket har ett on-linesystem som vintertid mäter och uppdaterar nedisningsrisken var 30:e minut, Figur 38. På de flesta ställen mäter Vägverket ytttemperatur, luftfuktighet, daggpkt.temperatur, lufttemperatur, nederbörds-typ och mängd samt vindhastighet.

Vägverket:
"Daggpunktstemperaturen kan bara mätas på saltad vägbanan."

Det främsta syftet med vägverkets mätstationer är att kunna förse entreprenörer med direktinformation om när det är dags att vidta halkbekämpningsåtgärder (Södra Sverige och Norrlandskusten) och/eller påbörja snöröjning (norra Sverige). Det är endast på vägar som saltas som information om fryspunkt går att mäta eftersom den använda metoden att mäta daggpunktstemperatur förutsätter att den i vägbanan monterade givaren inte är snö- eller istäckt.

Från Vägverkets Tommy Sundquist kommer följande exempel på vilka grunder som risken för nedisning har bedömts i Noppiskoski 2003-11-06.

Figur 39. Risk för nedisning i Noppikoski 2003-11-06. Eftersom yttemperaturen understiger daggpunkten kan man förmoda att fukt har kondenserat på vägbanan. När sedan yttemperaturen riskerar att sjunka under +1°C sätts halkbekämpande åtgärder in. Diagram: Tommy Sundquist, Vägverket.



Från Vägverkets Knut Heijekenskjöld kommer följande information, [74], om hur risken för nedisning har uppmäts inom Nås trafikområde vintern 2002/2003. Aggregatet i Äppelbo är beläget inom detta trafikdistrikt. Tabell 1 visar antalet tillfällen à 5 timmar med specificerad typ av halka.

Tabell 1. Antalet tillfällen à 5 tim. med uppmätt typ av halka inom Nås trafikområde under vintern 2002/2003. Aggregatet på Hunflen, nära Äppelbo är beläget inom detta trafikområde.

Antalet väderutfall 2002-10-01 tom 2003-04-30

VViS-station	Halka av typ			
	HR1	HR2	HT	HN
2026	83.0	36.0	6.0	16.0
2029	47.0	31.0	6.0	16.0
2039	75.0	56.0	6.0	24.0
2010	59.0	27.0	16.0	36.0
Medel	66.00	37.50	8.50	23.00

H1 - måttlig dimfrostutfällning (jmf. HR1 i VädErs), vägytans temperatur ska vara minst 0,5 °C lägre än daggpunktstemperaturen, vägytans temperatur ska vara lägre än +1,0 °C.

H2 - kraftig dimfrostutfällning (jmf. HR2 i VädErs), vägytans temperatur ska vara minst 2,0 °C lägre än daggpunktstemperaturen, vägytans temperatur ska vara lägre än +1,0 °C.

HT - temp.fall och fuktig vägbana p.g.a. blöt nederbörd eller kondens, vägytans temperatur sjunker under +1,0 °C och vägbanan är fuktig, Fuktig vägbana definieras som det har regnat eller fallit snöblandat regn (ned_typ 2,3,6),

(eller relativa luftfuktigheten > 96% och yta > 0, borttagen 2001-11-01),
eller yta minst 0,5 grader lägre än dagpunktttemp och yta > 0 (kondensering) 3
gångar inom de 3 senaste timmarna.

HN - blöt nederbörd på kall yta (jmf. HN i VädErs), regn eller snöblandat regn
faller (ned_typ 2,3,6), vägytans temperatur är lägre än + 1,0 °C.

Den sammanlagda halktiden för vintern 2002/2003 var enligt Tabell 1 drygt 28
dygn.

Går det att i Vägverkets databas hitta några tecken som tyder på ökad nedisnings-
risk 2003-11-22? Både ja och nej. Nej eftersom någon direkt indikering på halka
förekommer inte förrän två dagar senare. Ja, om man nöjer sig med indirekta
tecken som snöfall, temperatur strax under 0°C och vind från O och NO.

Motsvarande uppgifter för 2003/2004 t.o.m. 2004-01-08 lyder:

Tabell 2. Antalet tillfällen å
5 tim. med uppmätt typ av
halka inom Nås trafikområde
under vintern 2003/2004
t.o.m. 2004-01-08.
Aggregatet på Hunflen, nära
Äppelbo är beläget inom
detta trafikområde.

Antalet väderutfall 2003-10-01 tom 2004-01-08

VViS- station	Halka av typ			
	HR1	HR2	HT	HN
2026	30.0	15.0	3.0	8.0
2029	19.0	7.0	6.0	11.0
2039	39.0	5.0	15.0	22.0
2010	23.0	21.0	8.0	21.0
Medel	27.75	12.00	8.00	15.50

Den sammanlagda halktiden under perioden 2003-10-01 t.o.m. 2004-01-08 var
enligt Tabell 2 drygt 13 dygn.

Nedisningsrisken är platsberoende. För att erhålla maximal energiproduktion
letar exploatörer med ljus och lykta därför efter platser med hög medelvindhastig-
het. Ofta placeras vindkraftverk av denna anledning på toppen av kullar och
berg där den vertikala rörelsen i kombination med ett högt flytande vatteninnehåll
i luftmassan skapar goda förutsättningar för isbildning i form av underkylda
moln, duggregn, underkyllt regn och snöblandat regn. Det sistnämnda utgör inget
problem om vindkraftverkets blad roterar med tillräcklig hastighet. För stillastå-
ende aggregat skapar även snöblandat regn problem om det följs av sjunkande
temperatur.

1.4.4 Rodovålen

På Rodovålen, ca 830 m.ö.h. står sedan 1998 tre olika typer av aggregat på ett
och samma berg. Ägarnas avsikt har varit att utvärdera olika typer av tekniker för
att kunna hantera de utmaningar som kyla och nedisning medför. De olika aggre-
gaten är: Nordex 600kW (t.o.m. ca 02-12-31), Bonus Mk IV 600 kW, NEG

Micon 750kW, Vestas V52-850 (fr.o.m. ca 03-01-01). Drifterfarenheter från Rodovålen finns presenterade i [43]. Behovet av bladuppvärmning kan anses uppenbart på denna plats. Vindkraftsindustrin har dock hittat mer lukrativa marknader i varmare klimat. Utvecklingen av kostnadseffektiva avisningssystem tycks därför ha avstannat.

En ansökan om forskningsstöd för att utveckla avisning m.h.j.a. mikrovågor har nyligen (jan 2004) lämnats in till Energimyndigheten. Det är skövdeföretaget Gisip AB som tillsammans med Agrivind AB och Vestasvind Svenska AB avser att pröva denna teknik i verkstad följt av fältprov på vindkraftverk på Rodovålen eller motsvarande annan plats med signifikant nedisningsrisk. I ansökan anges att merproduktionen från Bonus 600 kW Mk IV med bladvärme är 200 MWh/år medan avisningen konsumerar ca 30 MWh/år.

Inkomsten från 170 MWh skall alltså betala investeringskostnad och DoU (driftel tas från den egna produktionen under förutsättning att avisning skapar en netotomerproduktion.). Antag nu att värdet av den producerade elen sätts till 50 öre/kWh och att DoU kostar 5% av investeringskostnaden för bladvärmesystemet per år, realräntan är 4% samt att övriga intäkter och kostnader följer inflationen. Den tillåtna kostnaden för systemet blir då beroende av kravet på återbetalningstid.

Det är författarens avsikt att, inom ramen för pågående IEA-samarbete inom IEA R&D Wind Energy, Annex XIX "Wind Energy in Cold Climates", presentera en analys av den månadsvisa svenska driftstatistiken efter vintersäsongen 2003/2004. I Figur 40 visas den uppmätta relativa produktionen under en vecka från några utvalda vindkraftverk i de svenska fjällen från Suorva i norr till Äppelbo i söder.

Figur 40. Relativa energiproduktionen, jmf. med möjlig dito, under en vecka från några utvalda vindkraftverk i de svenska fjällen. Utan att ha kontrollerat vindhastigheten på dessa platser under den studerade tiden är det inte möjligt att avgöra om den låga produktionen beror på nedisning eller låg vindhastighet. Det enda aggregatet med fungerande avisningssystem under denna period var det i Suorva. Källa: www.vindstat.nu.

Tillverkare:	Bonus	Bonus	NEG Micon	Vestas	Vestas	Vestas	Vestas	NEG Micon
Plats:	Suorva	Rodovålen	Rodovålen	Rodovålen	Vallrun	Almåsa	Björnskalen	Äppelbo
Effekt [kW]:	600	600	750	850	850	850	850	900
Datum	% av prod + eventuellt fel							
040123	11	FEL 1	37	54	20	12	4	7
040124	30	FEL 0	23	FEL 37	22	56	12	1
040125	30	-	FEL 3	13	8	35	5	0
040126	26	-	7	25	12	22	11	1
040127	30	-	1	FEL 5	7	14	3	0
040128	47	-	1	5	7	FEL 10	5	0
040129	54	-	0	FEL 1	5	7	1	0
040130	FEL 29	-	1	13	FEL 0	29	-	0
040131	10	-	1	10	0	FEL 12	-	0

Bladvärmesystemet på Bonusaggregatet på Rodovålen reparerades i början av feb. 2004. Anledningen till att produktionsuppgifter saknas för detta aggregat var att telefonmodemet hade slutat fungera vilket markerats med symbolen "-".

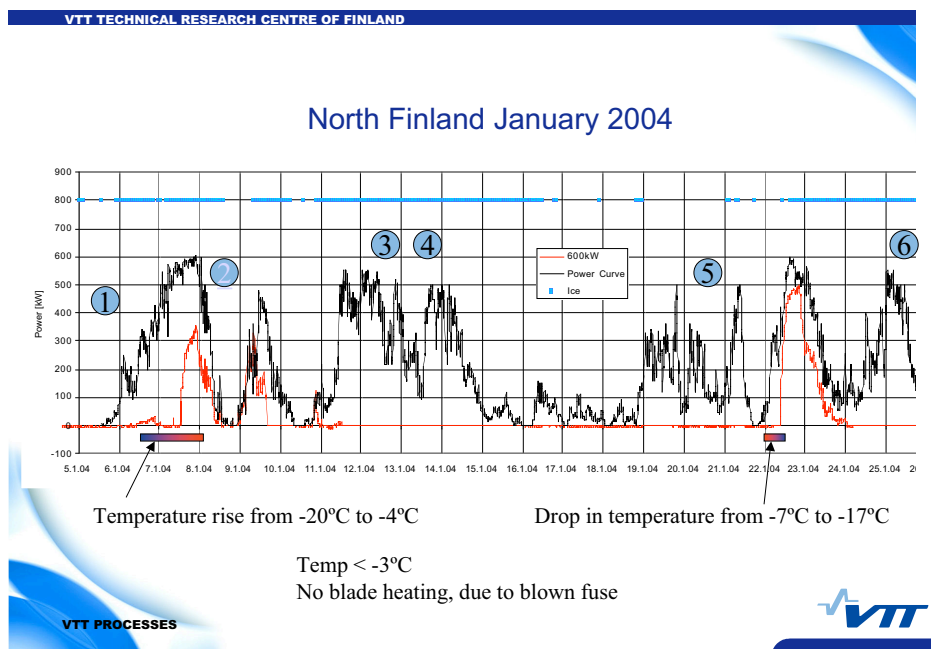
Det finns ett behov av att i efterhand kunna anropa en databas med tid, plats och höjd över marken och få en uppskattad vindhastighet i retur.

För att kunna avgöra om dygnsproduktionen ovan är rimlig i förhållande till dygnets medelvindhastighet krävs att denna antingen mäts på plats eller kan uppskattas på annat sätt. Förhoppningsvis kan detta bli möjligt i och med det karteringsarbete som Hans Bergström vid Uppsala Universitet f.n. håller på med.

Vindkraft i kallt klimat kräver, precis som till havs, mycket tillförlitliga aggregat. Här finns utrymme för förbättringar.

Finska VTT har studerat nedisningens konsekvenser på energiproduktionsförmågan på ett vindkraftverk i Norra Finland under januari 2004, Figur 41 och tillhörande vindmätningens möjlighet, Figur 42.

Figur 41. Vindens praktiska energiinnehåll jämförd med aktuell energiproduktion. Den svarta kurvan motsvarar den effekt som vindkraftverket, baserat på vindhastighetsmätning med uppvärmd anemometer, borde ha uppnått. Den röda kurvan visar verklig uppmätt effekt. Skillnaden kan förklaras med att bladen var nedisade då bladvärmesystemet var ur drift under hela mätperioden. Figur: Timo Laakso, VTT



Figur 42. Enbart tillräckligt väl uppvärmda givare fungerar under svåra nedisningsförhållanden. Mätresultaten är dock, oavsett hur väl avisningen än fungerar, störda av den p.g.a. isen förändrade luftströmningen runt upphängningsanordningarna. Foto: Timo Laakso, VTT.



2 Iskast

2.1 Allmänt om nedisning och arbete vid vindkraftverk i kallt klimat

Nedfallande is är inget unikt för vindkraftverk utan förekommer i fuktigt vinterklimat från alla typer av byggnader. Speciellt utsatta platser är under hängrännor, master, vajerstag, broar samt andra höga byggnader som når ovan molnbasen.

Kyla kan öka olycksrisken genom att förutsättningen för att fatta korrekta beslut minskar.

Kallt klimat innebär speciella risker utöver risken att bli träffad av nedfallande is, [5]. Kyla orsakar extra trötthet varför omdömet kan påverkas så att onödiga risker skapas. Tjocka kläder minskar rörligheten, hörselförmågan och synvidden. Blåst och nederbörd kan ytterligare minska möjligheten att höra och se. Handskar är otympliga att arbeta med. Utan handskar kan arbetstiden i sämsta fall vara begränsad till ner mot 30 sekunder. Mörker kräver ofta extra belysning som gör utrustningen än tyngre. Ofta måste speciella fordon, t.ex. snöskoter, användas för persontransporter. Tyngre transporter och större reparationsarbeten kanske inte alls är möjliga utan får vänta till våren.

Å andra sidan erbjuder igenfrusna vattenytor nya transportmöjligheter. Finlands första större vindkraftverk monterades t.ex. vintertid med kranbil som på isväg kördes till den holme där montaget skulle ske, [75].

2.2 Bakgrund om is på rotorblad

När ett vindkraftverk, vid temperaturer kring 0°C och nedåt, roterar i moln, dimma, sjörök eller underkyld nederbörd finns risk is att bildas på bladens framkanter. Vid stillastående aggregat kan även snöblandat regn frysa fast på blad och andra olämpliga ställen. Var fastfrysning på bladen äger rum beror då på om bladen är vridbara eller ej samt om aggregatet följer vindriktningen eller är avställt.

Några frågor som behöver besvaras på varje ny lokaliseringsort eller vid byte till större aggregat är:

1. Finns det en signifikant risk för iskast?
2. Kan nedisning orsaka signifikant oönskat aerodynamiskt buller?
3. Kan nedisning orsaka signifikant produktionsförlust?
4. Kan nedisning orsaka laster som påverkar livslängden?
5. Vilken typ isdetektering, direkt, indirekt eller ingen, krävs i tillstånd?
6. Vilka förändringar är nödvändiga i aggregatens reglersystem?
7. Räcker passiva avisningssystem som svarta framkanter, hydrofobiska material eller flexibla blad?
8. Om så krävs, vilken typ av aktivt avisningssystem är mest lämplig?

I detta kapitel behandlas enbart pkt. 1. I det efterföljande kapitlet om bladvärme-system behandlas pkt. 8. Hur ser is på rotorblad ut i verkligheten?

Figur 43. Hornis på Näsudden, Wind World 500 kW, 27 feb 2003 mellan kl. 12 och 13. Foto: Gunnar Britse.



Graden av nedisning är ofta direkt beroende av den lokala hastigheten. Istillväxten kan antas vara linjärt växande mot rotorspetsen, [44]. Om isen får växa till vid en temperatur som tillåter flytande vatten att rinna bakåt kan lokal mättnad kunna uppstå, Figur 44.; tillväxten är inte längre proportionell mot radien.

Figur 44. Vestas V47 660 kW på Näsudden 27 feb 2003 mellan kl. 12 och 13. Foto: Gunnar Britse.



Om isen får växa till sig vid lägre temperaturer, där bakåtrinnande vatten inte förekommer så kommer tillväxten att ske i stort sett linjärt ut mot rotorspetsen. Isen lossnar sedan ofta bitvis så att framkanten får ett sågtandsformat utseende, Figur 45.

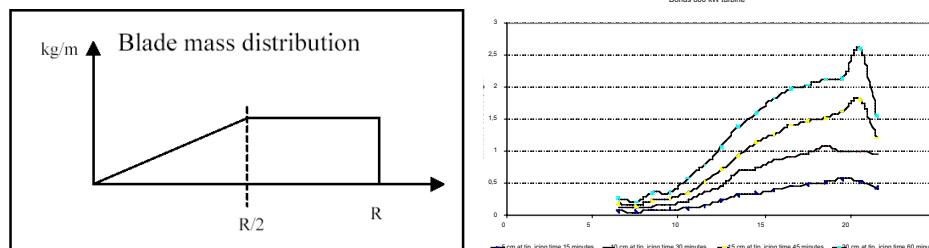
Figur 45. 600 kW Bonus aggregat på Olostunturi, Finland, 2004-01-20. Framkanten är t.v. i bilden. Bladvärmesystemet var ur funktion då en säkring hade löst ut. Foto: Timo Laakso, VTT.



Den ursprungliga aerodynamiken är nu helt förstörd, rotorn kan t.ex. börja rotera i fel riktning om inte reglersystemet är programmerat att upptäcka detta. Å andra sidan är det inte möjligt att driva en så kraftigt nedisad rotor runt vid några högre varvtal utan extra kraft från nätet. För den som önskar ytterligare nedisningsbilder, se t.ex. [51].

Bilderna ovan ger en uppfattning om hur nedisning ser ut i verkligheten. Vid certifiering används en förenklad modell, se Figur 46.

Figur 46. Nedisning enligt GL och beräknad nedisning, [38]. (Axeltexten är liten. Det viktiga att lägga märke till är den av GL generaliserade isfördelningen jämfört med den av VTT beräknade.) Graf: NEW ICETOOLS och VTT.



I [38] visas att bladspetsen enligt beräkningar blir mera nedisad jmf. med vad som anges i certifieringskrav från GL.

2.3 Säkerhetsmässiga krav

I den svenska tillståndsprocessen kan sökanden behandla risken för iskast på t.ex. följande sätt, [88]:

Isbildning - Det finns risk för isbildning när luften är kall och fuktig. Nedisning av rotorbladen påverkar effektiviteten på kraftverken och kan vara ett problem. I allvarliga fall måste det åtgärdas med avisningsutrustning. Snö och is kan falla ned i verkets närhet.

Isbildning på Hornberget - Det är inte klarlagt hur vindkraftverk på Hornberget kommer att påverkas av isbildning.

Åtgärder - Skyltar med varning för fallande snö och is kommer att sättas upp i terrängen runt vindkraftverken, precis som kring telemaster i fjällmiljö. Normalt finns inga avspärrningar runt vindkraftverk

Behöver vindkraft med is på bladen stoppas? Om ja - hur kan is bäst detekteras?

I de flesta av Österrikes nio delstater krävs att vindkraftverk med is på bladen stoppas, [18]. Det är däremot inte specificerat hur detektering av is skall gå till. I Tyskland sätts villkoren för drift med nedisade blad av de lokala myndigheterna. I kustområdena, där nedisning är en ovanlig förekomst, ställs inga krav på isdetektering medan sådana krav återfinns i höglänt terräng och då speciellt om vindkraftverken står nära en allmän väg.

2.3.1 Krav på skyltning

Om inte myndighetskrav finns på skyltning som varnar för nedfallande is kan ägaren själv välja att varna för detta. Skyltning bör göras på tillräckligt stort avstånd från aggregatet. F.n. är det rekommenderade riskavståndet, enligt [48], $1,5 (H+D)$ där H är navhöjden och D rotordiametern. Ofta är H och D lika stora. Riskavståndet kan då förenklas till $3H$.

Figur 47. Varningsskylt vid vindkraftverk i Kiruna.
Foto: Göran Ronsten, FOI.



2.3.2 Krav på avlysning

Områden intill vindkraftverk är i regel inte avlysta eller inhägnade om inte speciella skäl därtill föreligger. Ofta är anledningen att verket står på en industrifastighet som skulle varit inhägnad även utan närvaro av vindkraftverk, jmf Viscaria i Kiruna. På ett industriområde har Sydkraft ett 2 MW-aggregat försett med en isdetektor på maskinhuset. Detta verk stoppas så fort isdetektorn indikerar is, [89]. För återstart krävs visuell inspektion alternativt plusgrader.

Figur 48. Myndigheter kräver ofta att risken för iskast från vindkraftverk markeras med skyltar. Bilden är tagen 2003-11-26 på 500 m.ö.h. vid Windpark Söhrewald 15 km SÖ Kassel, Tyskland. Foto: Michael Durstewitz, ISET.



2.4 Försäkringsbolagen om iskast

Nedan följer svar från If och Länsförsäkringar på frågor kring iskast från vindkraftverk.

2.4.1 If

If:s Björn Wiahl skriver, [91]: *“Den som svarat är en sk underwriter. En underwriter är den som bedömer en verksamhets riskpotential, bestämmer vilka försäkringsvillkor som skall erbjudas och som bestämmer premien. Som du kommer att se från svaren är vindmölleverksamhet ännu inte en sådan verksamhet som det samlats erfarenhet kring. En slutsats man kan dra av svaret är just att det fenomen du tar upp är knutet till en verksamhet som ännu inte är så utbredd och heller inte, inom det kollektivet, gestalta sig i någon påtaglig skadeomfattning.”*

Den som svarar på frågorna är “Underwriter” Henrik Jönsson på Ansvar:

a) Hur ni ser på risken för iskast från vindkraftverk? - *Det är en reell och icke försumbar risk som måste tas i beaktande.*

b) Täcker en “vanlig” vindkraftverksförsäkring skador orsakade av iskast? - *Det går inte att generellt svara på om ansvarsförsäkringen täcker alla skador orsakade av iskast. Ansvarsförsäkringen ersätter den skadeståndsskyldighet (inom ramen för villkoren) som kan uppkomma. En förutsättning för att en skada ska ersättas genom ansvarsförsäkringen är således att ägaren/nyttjaren av vindkraftverket är skadeståndsskyldig för den uppkomna skadan. Skadeståndsskyldigheten bestäms på skadeståndsrättslig grund, vilket ligger helt utanför försäkringsavtalet.*

c) Finns krav på isdetektering inom områden med stor nedisningsrisk? - *Svar saknas*

d) Finns krav på att aggregat skall stoppas vid risk för iskast? - *Svar saknas*

e) Ställer ni krav på hur stort en uppmätt signifikant skillnad mellan verkligt och nominellt vind-effektsamband får vara innan ett aggregat skall stoppas? - *Svar saknas*

f) Är det, enligt er uppfattning, markägaren, aggregatägaren eller en ev. verksamhetsansvarig, t.ex. alpin skidorganisation, som är skadeståndsskyldig vid skada orsakad av iskast? - *Först och främst är det inte självklart att någon överhuvudtaget är skadeståndsskyldig vid en skada. Skador inträffar ofta, utan att någon kan anses skadeståndsskyldig. En förutsättning för skadeståndsskyldighet är att skadan orsakats genom vårdslöshet. En bedömning av om någon varit vårdslös måste göras i varje enskilt fall och utgången beror på omständigheterna i detta fall. Min uppfattning är att det borde finnas störst möjligheter vid den här typen av skador, att hävda ett skadeståndsansvar hos aggregatägaren eller en ev. verksamhetsansvarig.*

g) Hur hanteras en ev. sak- resp. personskada orsakad av iskast från ett vindkraftverk? - *När en inträffad sak- eller personskada anmäls till oss så - utreder vi det inträffade, - förhandlar med den som kräver skadestånd, - om så behövs för vi den försäkrades talan i rättegång, - betalar det skadestånd (efter avdrag för självrisk) som ska utgå.*

h) Vilka ersättningsbelopp rör det sig maximalt om vid sak- resp. personskada orsakad av iskast? - *I försäkringen angivet försäkringsbelopp är det maximala skadeståndet som kan utbetalas. Vad ersättningen blir i ett specifikt fall är beroende av värdet på den skadade egendomen alt. "allvarligheten" av personskadan. Några generella belopp kan inte anges, utan ersättning sker i varje enskilt fall enligt skadeståndsrättsliga ersättningsregler.*

i) Vilka krav, nuvarande och ev. kommande, ställer/avser ni ställa angående tekniska åtgärder för att förhindra iskast? - *Svar saknas*

j) Premierar ni på något sätt åtgärder för att detektera och/eller förhindra iskast (i analogi med att godkänt stöldlarm i vissa fall kan befria en bilägare från att betala självrisk)? - *Det skulle vi sannolikt göra.*

k) Har ni någon uppfattning om risken för nedisning på platser där ni har försäkrade vindkraftverk? - *Det en risk man inte kan bortse från. Risken, i så motto att tiden över året då denna risk är påtaglig, varierar naturligtvis beroende av var någonstans vindkraftverket är beläget.*

2.4.2 Länsförsäkringar

Länsförsäkringars Lars Johnson, [77]:

a) Hur ni ser på risken för iskast från vindkraftverk? - *Vi har så här långt inte haft detta i åtanke vad gäller prissättning eller riskbedömning.*

b) Täcker en "vanlig" vindkraftverksförsäkring skador orsakade av iskast? - *Vår vindkraftsförsäkring omfattar inte ansvarsförsäkring utan är endast egendomsförsäkring. Vi kräver dock att kunden även tecknar ansvarsförsäkring för sin verksamhet. På så sätt omfattar försäkringslösningen den typen av skador.*

c) Finns krav på isdetektering inom områden med stor nedisningsrisk? - *Nej, men vi har premiepåslag för fjällbaserat kraftverk. Detta dock p g a den ökade maskinskaderisken.*

d) Finns krav på att aggregat skall stoppas vid risk för iskast? - *Nej*

e) Ställer ni krav på hur stort en uppmätt signifikant skillnad mellan verkligt och nominellt vind-effektsamband får vara innan ett aggregat skall stoppas? - *Nej*

f) Är det, enligt er uppfattning, markägaren, aggregatägaren eller en ev. verksamhetsansvarig, t.ex. alpin skidorganisation, som är skadeståndsskyldig vid skada

orsakad av iskast? - *Den som driver kraftverket. I första hand den som driver verket. Kan ju vara samtliga uppräknade parter.*

g) Hur hanteras en ev. sak- resp. personskada orsakad av iskast från ett vindkraftverk? - *Som vilken ansvarsskada som helst skulle jag tro. Vi har så här långt inte haft en sådan skada inom länsförsäkringsgruppen.*

h) Vilka ersättningsbelopp rör det sig maximalt om vid sak- resp. personskada orsakad av iskast? - *10.000.000 kr per skada/20 miljoner per år.*

i) Vilka krav, nuvarande och ev. kommande, ställer/avser ni ställa angående tekniska åtgärder för att förhindra iskast? - *Inga*

j) Premierar ni på något sätt åtgärder för att detektera och/eller förhindra iskast (i analogi med att godkänt stöldlarm i vissa fall kan befria en bilägare från att betala självrisk)? - *Eftersom vår vindkraftsaffär är ganska liten och den som trots allt finns är koncentrerad till Gotland, Skåne och Halland så är iskastproblematiken för oss ganska okänd. Affären har dessutom på senare år varit en dålig affär, men det har mest handlat om växellådshaverier. Vår premiesättning är individuell på i princip varje objekt och så här långt har vi mest haft maskinska-deproblematiken att ta hänsyn till vad gäller premiesättning.*

k) Har ni någon uppfattning om risken för nedisning på platser där ni har försäkrade vindkraftverk? - *Nej, men våra premiesättningsregler anger att ett fjällbase-rat verk ska "kosta mer", men detta med tanke huvudsakligen på maskinskaderisken.*

2.4.3 Sveland

Svelands Karl-Axel Henrichs svarar genom Fredrik Olsson från samarbetspartnern A.B. Vindkraft [84]:

Allmän kommentar - *"Svaren är baserade på erfarenheter inom vårt serviceområde i södra Sverige och behöver förmodligen kompletteras avseende förhållanden inom övriga Sverige."*

a) Hur ni ser på risken för iskast från vindkraftverk? - *Risken för att is bildas på vingarna i vår del av Sverige är mycket liten. Under mina 11 år i branschen, som serviceansvarig hos A.B. Vindkraft, har jag endast sett detta ske vid några få tillfällen. Vid samtliga fall utom ett, har isen fallit rakt ner intill verket. Vid det enda av oss kända tillfället då is lossnat och kastats iväg hade det varit fel på ett 750 kW verk under en längre tid varvid en tjock isbark hade byggts upp på vingarna. De danska montörer som var på plats för att reparera felet hade ingen erfarenhet av den rådande situationen. Man valde att tvångsstarta verket genom att köra generatoren som motor då det rädde fullständig stiltje. Resultatet blev att isstycken på upp till 10 kg bröts loss och flög iväg upp till 40-50 m från verket. Vindkraftverket hade aldrig självt kunnat komma igång då vingarnas aerodynamik var starkt förändrad med så mycket isbark på vingarna. Isen ger dessutom*

en obalans som gör att verket ej kan komma upp i varv innan säkerhetsfunktionen för vibrationer stoppar det. I det aktuella fallet som omnämns ovan, är det den mänskliga faktorn som är orsaken till problemet. I normala fall, när det blåser även vid svag vind, flexar materialet i vingarna hela tiden, p.g.a. turbulent vind, och då bryts isen loss efterhand som den bildas och faller ned utan att orsaka någon skada.

b) Täcker en "vanlig" vindkraftverksförsäkring skador orsakade av iskast? - *Självklart borde en vindkraftsförsäkring täcka även detta. Med tanke på antalet kända skador (=0) kan ej detta vara något problem för försäkringsgivaren.*

c) Finns krav på isdetektering inom områden med stor nedisningsrisk? - *Har ej funnits så vitt jag vet.*

d) Finns krav på att aggregat skall stoppas vid risk för iskast? - *Det finns så vitt jag vet inga sådana krav från tillverkare/servicefirma i branschen.*

e) Ställer ni krav på hur stort en uppmätt signifikant skillnad mellan verkligt och nominellt vind-effektsamband får vara innan ett aggregat skall stoppas? - *De flesta vindkraftverksmodeller har en inprogrammerad funktion som stoppar verket om produktionen ej överensstämmer med vindhastigheten.*

f) Är det, enligt er uppfattning, markägaren, aggregatägaren eller en ev. verksamhetsansvarig, t.ex. alpin skidorganisation, som är skadeståndsskyldig vid skada orsakad av iskast? - *Den som äger anläggningen bör vara den som är ansvarig.*

g) Hur hanteras en ev. sak- resp. personskada orsakad av iskast från ett vindkraftverk? - *Har ej skett vad jag vet. Hur hanterar man liknande skador i andra branscher: lyftkranar, skidliftar, vattentorn, byggnadsställningar, pariserhjul, höghus, flygplan, radiomaster mm.?*

h) Vilka ersättningsbelopp rör det sig maximalt om vid sak- resp. personskada orsakad av iskast? - *Borde finnas regler för liknande skador att jämföra med.*

i) Vilka krav, nuvarande och ev. kommande, ställer/avser ni ställa angående tekniska åtgärder för att förhindra iskast? - *Antalet skador är ju relativt få (=0).*

j) Premierar ni på något sätt åtgärder för att detektera och/eller förhindra iskast (i analogi med att godkänt stöldlarm i vissa fall kan befria en bilägare från att betala självrisk)? - *Sverige är indelat i olika klimatzoner. Problemet med iskast visar sig endast förekomma i den nordligaste i av dessa zoner. Vindkraftverken kan förses med speciella detektorer, som dock kan visa sig bli en dyr affär och dessutom är en obeprövad metod. I första hand bör andra metoder väljas. Att i drifttillståndet utfärda säkerhetsavstånd till vindkraftverk då man befärar att vingarna kan komma att beläggas med isbark ser vi förstås som en säkrare metod. Vad jag vet finns inga speciella isdetektorer att tillgå på marknaden.*

k) Har ni någon uppfattning om risken för nedisning på platser där ni har försäkrade vindkraftverk? - *Enligt min uppfattning är det en mycket liten risk.*

2.5 Kastavstånd

Av [36] framgår att större bitar av hård dimfrost har hittats inom en rotordiamenters avstånd från tornet. Mindre bitar kan ha fallit ner på större avstånd. Även tornet var här tidvis kraftigt nedisat. Torn-is faller plötsligt och överraskande i stort sett, naturligtvis även beroende på vindstyrka och topografi, rakt ned. Ett horisontellt tak ovanför torndörren rekommenderas därför som skydd mot nedfallande is.

Från Åland berättar Henrik Lindqvist, [79]: *“Vi har inte upplevt problem med iskast, vi har dock hittat isformationer som ramlat rakt ned från vindkraftverken då “avfrostningssystemet” [Enercon] avlägsnat is. Varningsskyltar finns ej.”*

Scanwinds Bengt Göransson skriver, [73]: I Norge räknar vi med att nedisningsrisk föreligger på höjder över 400 m.ö.h. Om det är sannolikt att människor vistas nära aggregatet måste man före start säkerställa att ingen is finns på bladen.

Från Bydalen rapporterar Anders Durling, [71]: *“Ögonvittnen och fynd av issjok tyder på att kast möjligen kan ske upp till 250 m. (navhöjd 45 m). Dessa kast, som sker vid start av nedisat verk, har ej observerats under drift. Skyltar finns, men framför allt har säkerhetschefen för liftanläggningen som ligger omkring verket rätt att beordra stopp under liftanläggningens öppettider om risk för iskast föreligger. Pistörer har också ansvar för att kolla status på nedisning vid morgonkollen.”*

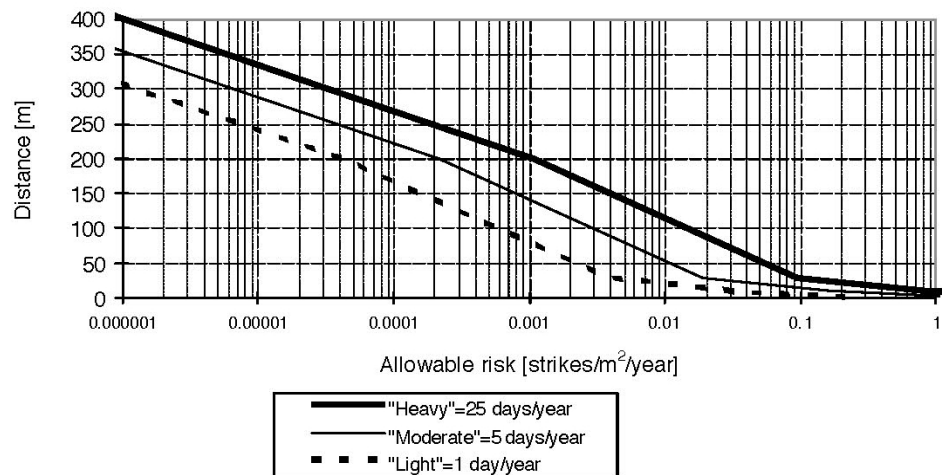
NEG Micons Anders Rylin skriver, [86]: *“Visst förekommer det iskast från vindkraftverk i fjällen. Vi har dock inte gjort någon kartläggning eller dokumentation av detta.”*

Kjell Jansson meddelar från Äppelbo, [76]: *“Iskast har förekommit och skyltar som varnar för detta finns uppsatta.”*

Någon “slangbelleffekt” har inte kunnat påvisas i verkligheten

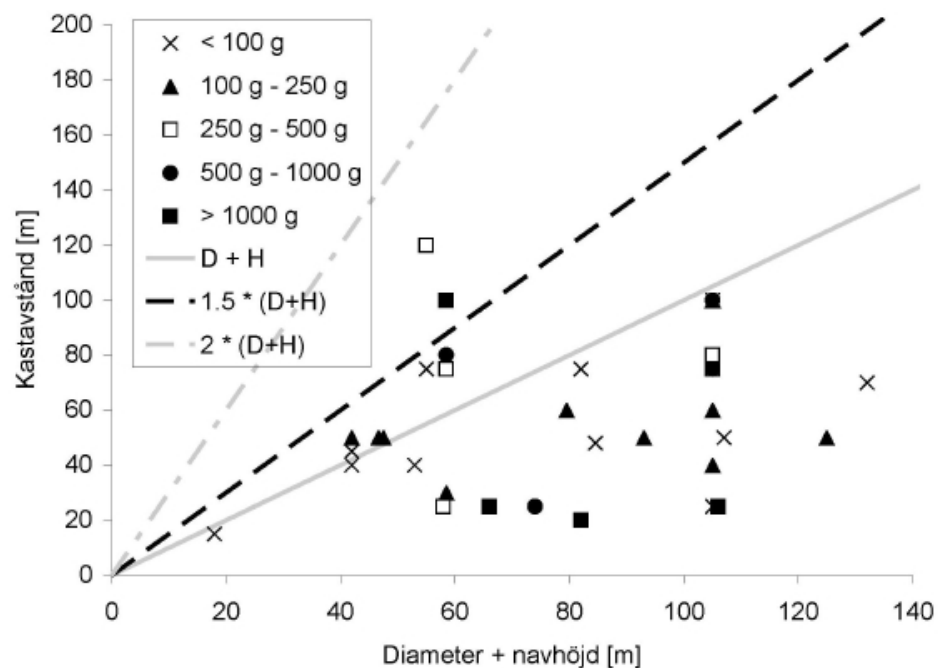
Vad händer om is lossnar och glider längs med bladet till spetsen? I [32] visas att riskavståndet då ökar med 30%. I verkligheten har någon sådan “slangbelleffekt” dock ej observerats. Isen separerar istället från bladet från den plats där den suttit fast. I rapporten visas vidare att risken för att träffas av is kan minskas kraftigt genom att besökare närmar sig vindkraftverket från uppvindssidan. Genom ett stort antal simuleringar av iskast, där hänsyn även tas till luftmotstånd, vid olika bladpositioner kan ett riskområde beräknas. För enkelhetens skull kan det antas att alla vindriktningar är lika vanliga samt att vindhastighetsfördelningen är lika inom alla sektorer. Riskområdet blir då en cirkel runt vindkraftverket.

Figur 49. Simulerat "tillåtet" riskavstånd för iskast. Tabellen visar sannolikheten att ett isfragment landar inom en kvm på ett visst avstånd från ett vindkraft med 50 m rotordiameter. Källa: WECO [58], Garrad & Hassan and DEWI.



I de fall strömningen är kanaliserad, i t.ex. en dalgång, kan riskområdet anta en mera oval form där riskområdet är kortare i riktning mot de förhärskande vindriktningarna.

Figur 50. Konstaterade iskastdistanser. Källa WECO [58] och DEWI.



Seifert skriver, [58]: *“Varje olycka som orsakas av iskast är en onödig olycka som kommer att minska allmänhetens acceptans av vindkraft.”*

Slutresultatet av WECO-projektet så som det beskrivs i [48] och [58] blev följande rekommendationer för roterande respektive stillastående vindkraftverk:

Figur 51. Rekommenderat riskavstånd för iskast när vindkraftverket är igång. Källa: WECO och DEWI.

$$d = (D + H) \cdot 1.5$$

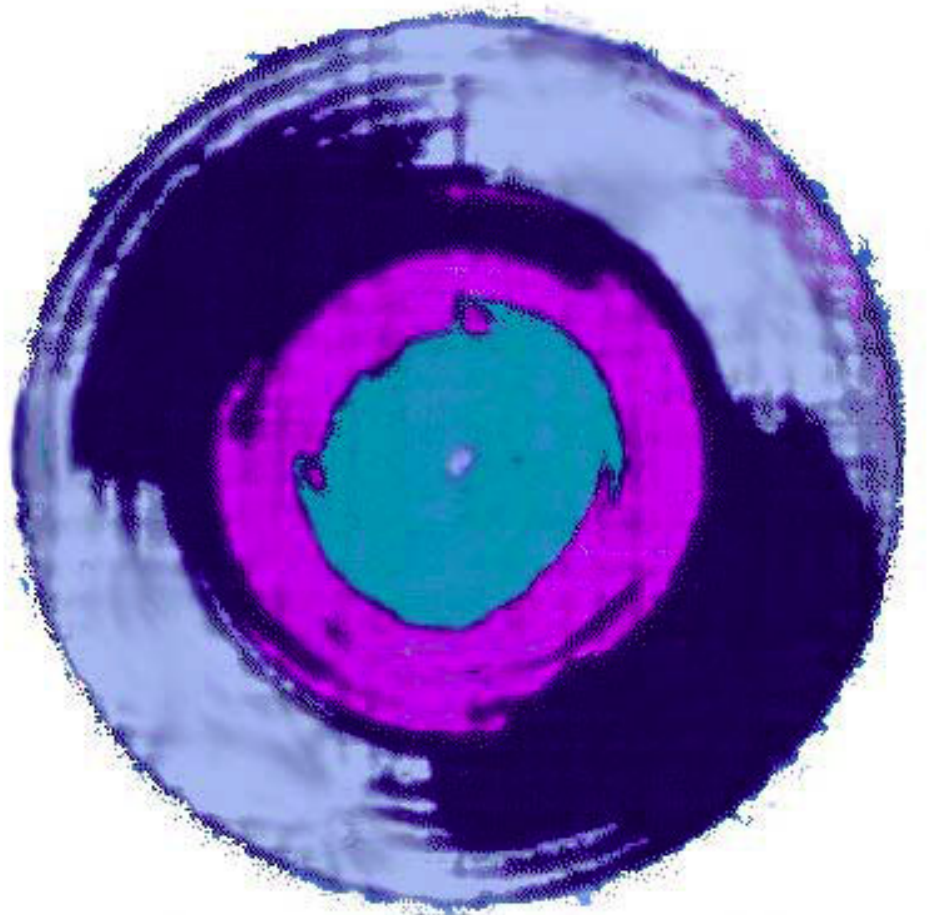
Figur 52. Rekommenderat riskavstånd för iskast när vindkraftverket står stilla. Källa: WECO och DEWI.

$$d = v \frac{D/2 + H}{15}$$

där d är riskavstånd [m], D rotordiameter [m], H navhöjd [m] och v vindhastighet [m/s].

Ett alternativ till dessa enkla formler är att genomföra en beräkning på varje plats som baserat på lokal vindhastighet, vindriktning och samhörande nedisningsrisk ger en bild av den lokala risken för iskast, [48].

Figur 53. Risk för iskast runt ett vindkraftverk. Bild: DEWI-OCC.



3 Bladvärme

3.1 Bakgrund - vinteranpassning

Fjällvärlden är med sina speciella utmaningar; svårtillgänglig terräng, snö, is och kyla, inte den första plats en exploatör väljer att bygga vindkraftverk på. När de mest lättillgängliga platserna längs kusterna och i slättlandskapen börjar tryta, och vindtillgången i högre terräng visar sig vara bättre än förväntat, ja då framstår inte fjälllokaliseringar som ett alltför tokigt alternativ.

Ett exempel på hur aggregat anpassas till kallt klimat ges i följande lista över innehållet i det arktiska tilläggs paketet (utan bladvärme) från NEG-Micons Anders Rylin, [86]:

Alla arctic vindkraftverken är dimensionerade och typgodkända för drift nertill minus 30 grader. Samtliga NEG Micon-verk i kallt klimat är utrustade med arktisk-broms, anpassad stålqualité i huvudaxel och nav, gjuten bottenplatta, speciell hydraulikenhet i navet till vingtippbromsarna, speciell hydraulikolja, uppvärmda anemometrar och vindfanor, uppvärmt styrskåp, arktisk stålqualitet i flänsar och svetsade plåtar i tornet. Dessutom sitter en värmebläkt i maskinhuset för uppvärmning av växellåda och girsystem om vindkraftverket stått stilla under sträng kyla under en längre tid. Aggregaten i Äppelbo och Klimpfjäll har dessutom svartmålade bladframkanter för att påskynda avisning genom ökad värmeabsorption från solen.

En tillverkare av isdetektorer hävdar att det enda problemet vid utnyttjande av vindkraft i norra Finland är kraftig nedisning, [34]. Författaren glömmer då t.ex. alla de övriga utmaningar som åtgärdats genom vinterpaketet ovan. Några ytterligare speciella problem som tillstött vid sträng kyla är t.ex. alltför högt girmoment och alltför låg pitchhastighet. Om transformatorn inte placeras i tornfoten så kan kondens frysa på tornets innerväggar. För att få en dräglig arbetsmiljö för personalen kan därför speciell värmebläkt krävas.

Vinteranpassning kan ske på många sätt. Ett sätt är att inte göra något alls och hoppas att det går bra ändå. Det brukar det inte göra. Antag t.ex. att de finska aggregaten på fjälltopparna i norr skulle sakna bladvärme. Risken skulle då vara överhängande att vindkraftverken stannar med is på bladen i oktober för att sedan, korta isfria perioder undantaget, inte starta förrän framåt våren i maj. I Sverige har inga vindkraftverk ännu byggts på ställen med så svår nedisning som på fjälltopparna i norra Finland. De två mest utsatta platserna i Sverige förefaller att vara Äppelbo och Rodovålen.

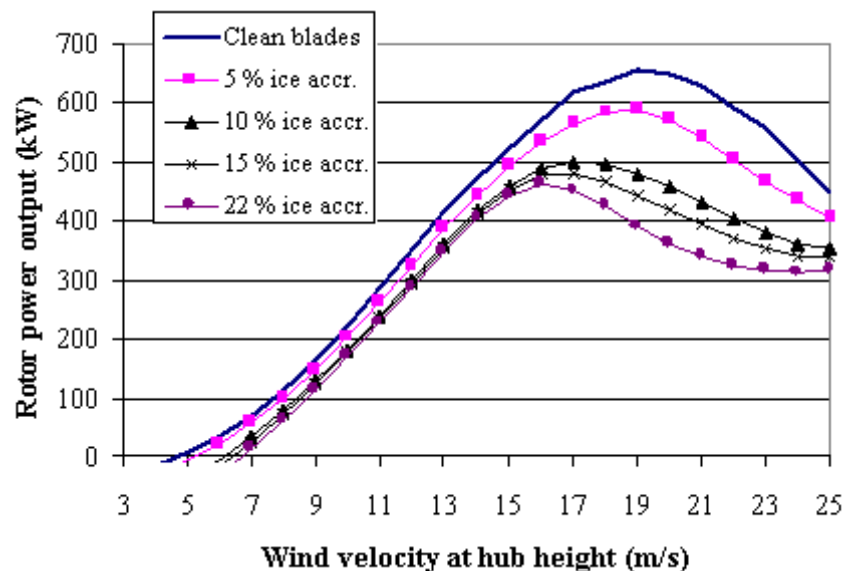
Återstår att lösa problemet med nedisade blad. (I denna text behandlas inte nedisade givare eller andra strukturer, t.ex. torn, med ibland betydande ispåslag.) Till att börja med, vilka skäl finns det till att hålla rotorbladen fria från is?

- Aggregatet kan vara i drift
- Förbättrade prestanda
- Minskade laster
- Mindre buller
- Minskad risk för iskast

3.2 Isens inverkan på prestanda

Prestanda påverkas av graden av nedisning samt var på bladet isen finns. I [55] och [58] visas hur olika grader, uttryckt som en procentuell ökning av bladkordan, av nedisning påverkar prestanda. Den största prestandaförlusten sker i början av nedisningsprocessen.

Figur 54. Den största prestandaförlusten sker i början av nedisningsprocessen. Graf från WECO, [58].



Effekt kan t.ex. uttryckas som kraft gånger hastighet eller varvtal gånger moment. Av det sistnämnda framgår att en bladdel med samma area kan vara mer effektiv ju längre momentarm den har, dvs ju längre ut på bladet den befinner sig. Detta gäller dock inte hela vägen ut till spetsen eftersom strömningen runt bladspetsen orsakar förluster.

I analogi med erfarenheter av is på flygplanspropellrar kan is på de inre delarna av bladet ha indirekt påverkan på bladströmningen längre ut. Det finns ett förmodat samband mellan nedisad bladrot och försämrade prestanda längre ut på bladet. I beräkningsprogram som bygger på enklare teorier och som används vid design av vindturbinblad finns ofta ingen koppling mellan prestanda på olika radiella stationer.

Ett aggregat med direktkopplad asynkrongenerator "orkar" alltför nedisat inte komma upp i rätt varvtal för att kunna fasa in på nätet. Med variabelt varvtal kan

det vara något lättare att erhålla produktion även vid lägre varvtal. Genom olika typer av manövrar, såsom bladvridning och nödbromsning kan isen ibland “skakas” av. Detta kräver närvaro av personal som ser till att inga utomstående står inom riskområde för nedfallande is.

Lacroix skriver, [21], att nedisning kan sänka prestanda med upp till 20%. I verkligheten ser vi ofta att prestanda kan sänkas med mer än 100%, dvs det krävs ett energitillskott från nätet för att hålla verket driftberett, jmf. Äppelbostatistik i Figur 32, vilken även presenterats i [19], som visar ett aggregat som stått nedisat och stilla i nästan 7 veckor. Värdet av produktionsbortfallet vid detta enda tillfälle har uppskattats till 75 kSEK av exploatören, [83], och 100-125 kSEK, eller 180 MWh, av ägaren, [76]. Ägaren anser, trots detta, inte att bladvärme är nödvändigt på denna plats. Skälet till denna slutsats är förmodligen att energiproduktionen f.ö. är så pass god att ägarens ekonomi inte står och faller med nästan två månaders stillestånd under bästa vindsäsongen. Frågan läsaren bör ställa sig är ifall långa stillestånd p.g.a. nedisning är något som samhället kan acceptera om de inträffar i betydligt större skala?

Vid sammanfattningen av Boreas IV 1998 uppskattades den p.g.a. nedisning förlorade energiproduktionen på platser med svår och mycket svår nedisning till mellan 20 och 50% av den möjliga årsproduktionen. I sådana fall är avisnings-system av någon typ nödvändig. En något lägre energiproduktionsförlustuppskattning; 20% baserat på data från finska Pyhänturi, görs i [16]. Detta ställe betecknas i artikeln som en extrem plats när det gäller nedisning. Å andra sidan gör författarna antagandet att “gammal” is stannar kvar högst 5 dygn. Om detta villkor inte visar sig gälla så ökar energiproduktionsförlusterna således ytterligare. Skillnaden i beräknad energiproduktion för överstegrings- respektive bladvidreglerat aggregat utan avisning var 3% till det bladvinkelreglerade aggregatets fördel.

3.3 Inverkan på laster

Is orsakar, utom i undantagsfall vid underkyld nederbörd, alltid reducerade prestanda. Eftersom isen aldrig växer identiskt lika på bladen kommer störningar i drivlinan att introduceras via förändrad aerodynamik och massfördelning. Det har tidigare förutsatts att aggregatens reglersystem stänger av vindkraftverk med is på bladen.

Tecken finns dock som tyder på att tillverkare eller operatörer av aggregat med flexibla blad i kalla klimat önskar att dessa skall rotera för att verkan av bladens avisande flexibilitet skall kunna utnyttjas fullt ut. Frågan är om verken är certifierade för sådan drift och hur rotation med is på bladen påverkar aggregatens livslängd och risken för iskast? Det har inte varit möjligt att från leverantörer av vindkraftverk i Sverige få fram en uppgift på vid vilken skillnad, uttryckt i t.ex. % mellan uppmätt och nominellt vind-effektsamband, som aggregat stängs av.

Nedisning, sänker genom den ökade massan, bladets egenfrekvenser. Vid en olycklig kombination av nedisning och rotationsvarvtal kan därför delar av vindkraftverket råka ut för mindre dämpade rörelser. Det är viktigt att vindkraftverkets normala reglersystem kan identifiera sådana situationer och stänga av kraftverket.

Om endast ett blad är nedisat enligt värsta fallet i GL-normen, [61], och övriga blad är isfria så kommer utmattningslasterna att öka med en faktor 2 vilket skulle kunna påverka livslängden om tillståndet fick fortgå någon längre tid.

Vid studie av ett fall med uppmätt nedisning i Danmark [67] blev uteffekten mera stabil jmf. med det isfria fallet och inga ökade laster kunde påvisas. En misstanke förs dock fram om att den aerodynamiska dämpningen hade minskat vilket skulle kunna förklara det fördubblade energiinnehållet vid de första flap- och edge-moderna.

3.4 När skall vi avisa?

Vi har tidigare lärt oss att molnbasen i ett mot NÖ långsamt stigande Finland beror på en tänkt medelmarknivå där högre lågfjällstoppar högst frekvent når molnens undersida. Ett vindkraftverk på en sådan plats råkar oundvikligen ut för nedisning.

Situationen i Sverige är annorlunda jmf. med Finland eftersom höga berg i väster, förutom i Jämtlandstrakten, skyddar oss från svår marknära nedisning i de förhärskande vindriktningarna. Ibland, som i nov-dec 2003 kan dock kraftiga och ihärdiga östliga vindar från ett öppet hav få ett långsamt stigande Sverige att dela Finlands molnbasdilemma, Figur 38. De uppstickande bergstopparna sveps in i moln som skapar svår nedisning.

Är det en klok strategi att i stället låta värma upp bladen kontinuerligt under hela vinterperioden, 8 månader, utan att ens försöka detektera nedisning med indirekta eller direkta metoder? Svaret är nej. Enligt [52] är det på lägre höjder, i detta fallet ca 120 m över medelmarknivån runt Sodankylä inte ens möjligt eftersom vindenergipotentialen inte räcker till kontinuerlig bladuppvärmning.

3.5 Effekt- och energibehov

Antag nu istället att vi, enligt resultat i [52], utan problem skulle kunna detektera nedisning av vindturbinblad på de allra svåraste platserna och att vi hade ett väl fungerande avisningssystem med effekten 1.2 kW/m på ett 200 kW aggregat. Den finska studien visar att 10% av årsenergiproduktionen i värsta fall kan gå åt till att värma bladen och att denna siffra är oberoende av höjden ovan Sodankylä. Detta är förmodligen en övre gräns för energikonsumtion för bladvärme som inte är lätt att komma nå upp till i praktiken.

De bladvärmesystem som har använts i Sverige på två Bonusaggregat, har sedan oktober 1998 t.o.m. sista januari 2004 konsumerat 70 MWh på 8548 MWh (8,2‰) i Suorva och, t.o.m. början av dec 2003, 142 MWh på 6230 MWh (2,3‰) på Rodovålen. Bladvärmesystemet på Rodovålen reparerades och togs i drift för första gången denna vinter först i början av februari.

I [24] visas att bladvärmeeffekten för ett anti-is-system på finska Pyhäntunturi bör vara ca 7% av vindkraftverkets märkeffekt samt att energiåtgången för avisning ligger på mellan 3-5% av årsproduktionen. Dessa uppgifter har senare reviderats till 5% resp. 1-3% i [25].

Enercons "lättare" avisningssystem för stillastående rotor använder 3*4 kW för E-40 och 3*10 kW på E-66, [78]. Detta motsvarar ca 2% av märkeffekten. En kraftigare version av Enercons varmluftsbaserade system, denna gång avsett för bruk under drift, anges vara under utprovning.

Från Åland får vi följande visdomsord från Henrik Lindqvist [79]: *"Energiåtgången för bladvärmesystemet på våra Enerconaggregat är marginellt (9kW * 2-3 h/år) är marginellt och har ingen ekonomisk betydelse. Tyvärr har vi ingen statistik där vi kan läsa ut ett ev produktionsbortfall om vi inte hade "avfrostnings-systemet" men en känsla i ryggraden säger att systemet betalar sig. Därtill kommer aspekten med det ljud is på vingor skapar om man inte har ett dylikt system mao. trivselfaktorn för grannar och besökare, vilket har sitt värde. Vi har erfarenheter från våra äldre verk där vi sett dem gå med låg uteffekt vid högre vindar samt även hört det "onödiga" ljud de skapat. Det har gjort att vid nybeställning av verk till våra projekt på Åland skall verken ha ett lättare avisnings-system."*

Föregångarna till det bladvärmesystem som används i Suorva och på Rodovålen testades i Finland i mitten av 1990-talet. I början användes rena kopparelement på bladytan som dock senare visade sig vara alltför utmattningskänsliga. Den nuvarande lösningen består av en kolfiberbaserad värmeduk vilken placeras under ett lager av gelcoat. Med en sådan lösning minskar känsligheten för att småskador skall kunna sätta hela det uppvärmda området ur funktion.

3.6 Vilken ytemperatur bör bladet ha?

I [36] visas hur bladvärmen pulsas ut och hur en nedisad rotor återfår sin produktionsförmåga för att sedan återigen förlora dragkraften när bladvärmen stängs av. Skälet till att ytan värms genom små korta strömpulser är att reglersystemet strävar efter att hålla bladytan vid en temperatur mellan 21° och 22° C.

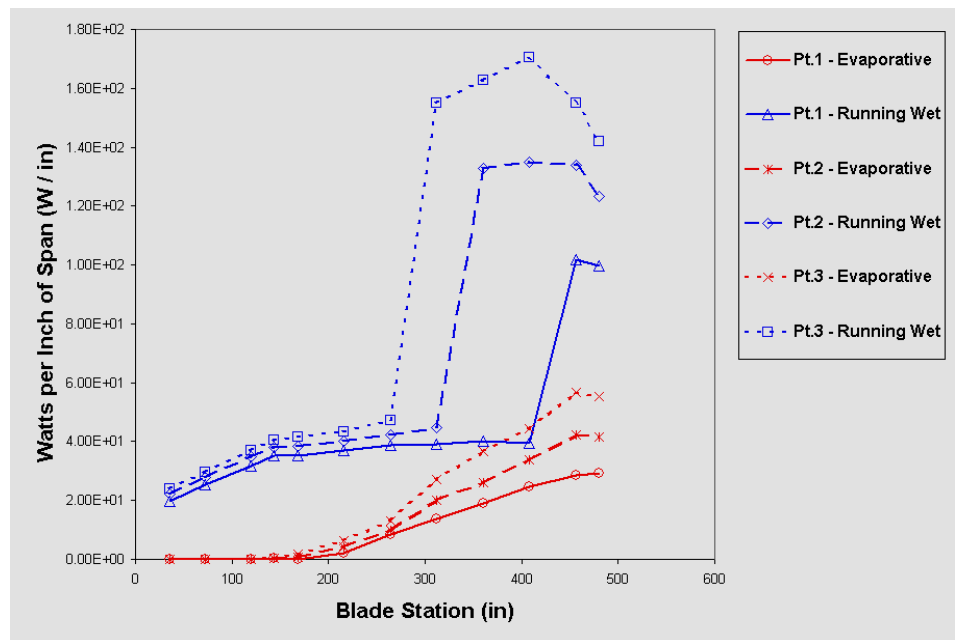
Är detta en rimlig ytemperatur? Räcker det inte med att hålla bladytan strax ovan 0° C? Valet av ytemperatur är förmodligen en kompromiss som vi kan se i Figur 55 och Figur 56 nedan.

I [20] visas hur ett beräkningsprogram för nedisning på flygplan, Lewice 2.0 kod från NASA, har anpassats till att hantera nedisning på vindturbinblad. Testfallet är en ESI-80 - 250 kW med 27 m diameter, två blad nerströms och varvtalet 60 RPM. Två olika uppvärmningsmoder används i beräkningarna:

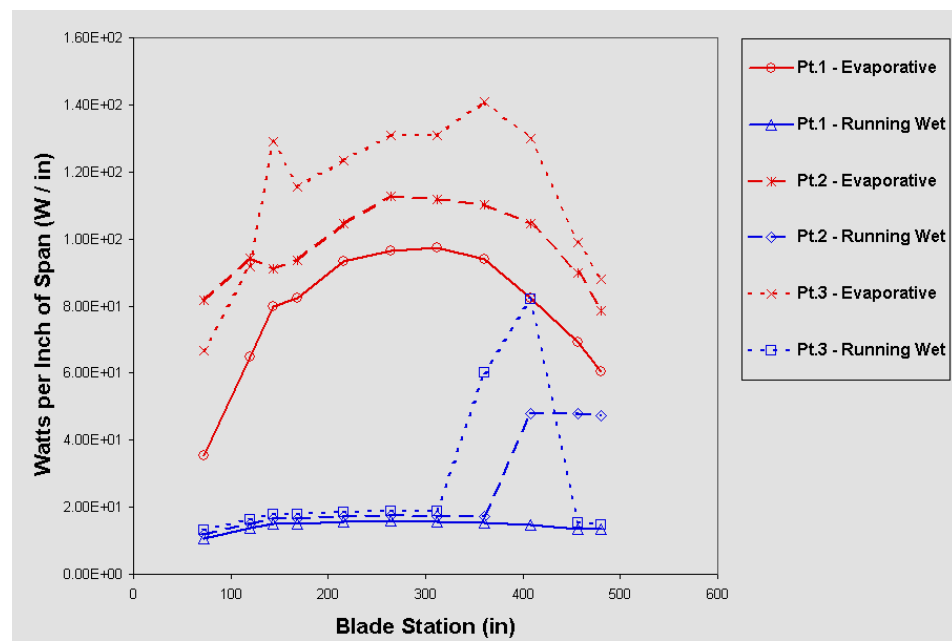
- avdunstande med ytemperatur på mer än 50°C och
- rinnande med en ytemperatur på mellan 5 och 10°.

Av Figur 55. och Figur 56. framgår att energiåtgången vid avisning av dimfrost, som ju upptar en mindre yta jmf. med våt och bakåtrinnande nedisning, blir lägre för avdunstande temperatur jmf. med avisning vid lägre ytemperatur. Och vice versa för våt och bakåtrinnande nedisning där energiåtgången blir lägre vid lägre ytemperatur.

Figur 55. Beräknad effektåtgång vid avisning av dimfrost med hög (+50°C, röd kurvskara) respektive låg (+5°C, blå kurvskara) ytemperatur. Energiåtgången vid avisning av dimfrost blir lägre vid avdunstande temperatur jmf. med avisning vid lägre ytemperatur. Graf från Lacroix [21], University of Massachusetts



Figur 56. Beräknad effektåtgång vid avisning av klaris, flytande underkylt vatten som ej omedelbart fryser, med hög (+50°C, röd kurvskara) respektive låg (+5°C, blå kurvskara) ytemperatur. Energiåtgången vid avisning av klaris blir lägre vid låg temperatur jmf. med avisning vid högre ytemperatur. Graf från Lacroix [21], University of Massachusetts.



Det finns idag inte någon kommersiellt tillgänglig givare som kan skilja mellan klaris och rim- eller dimfrost på blad. Även givare som direkt kan detektera is på bladytan är sällsynta och används inte på något av dagens kommersiella vindkraftverk. Nedisning konstateras istället med isdetektor på maskinhus, vibrationsvakt eller minskad uteffekt. Förslag finns om att detektera is genom analys av frekvensinnehållet i bladbrus, vilket förändras vid nedisning eller genom optiska metoder baserade på laserljus mot reflekterande yta och fotodetektor och/eller kameraövervakning. Baserat på avsaknad av lämplig isdetektor samt på ovanstående beräkningsresultat så förefaller därför valet av en ytemperatur på 21°-22° C på Bonusaggregaten att vara en rimlig kompromiss.

När är det dags att börja avisa ett blad? Korrekt vokabulär kräver att vi först definierar skillnaden mellan avisningssystem och anti-is-system; Avisningssystemet tar bort redan ackumulerad is medan anti-is-systemet förhindrar att is, utom vid extrem nedisning, hinner bygga på strukturen. Anti-is-systemet kräver således en isdetektor som känner förhållandena på bladytan. Tillförlitliga sådana givare, om de finns, är förmodligen mycket dyra. Någon isindikering på roterande blad används således ej på dagens vindkraftverk även om försök har gjorts i Finland. Dessa givare, [34], visade sig dock vara alltför kortlivade i den hårda miljön på ett roterande blad.

Vad skulle vara den största fördelen med att kunna detektera is direkt på bladet? Förutom att kunna stoppa rotern av säkerhetsskäl när så är befogat kan energiåtgången för bladvärme minskas med en faktor 3, [24], om bladströmningen genom tidig avisning kan förhindras att slå om från laminär till turbulent strömning.

Senare rön, [26], visar varför Kemijokis avisningssystem inte alltid klarar att avisa bladen på vindkraftverken på Olostunturi och på Rodovålen. Anledningarna till detta anges vara att:

- platsberoende nedisningsförhållanden i kombination med att en ekvivalent cylinder istället för en vingprofil använts vid dimensioneringen av avisningssystemet gör att bladspetsens värmeeffekt skulle behöva ökas med 60%.
- en alltför sen isdetektering, i kombination med att avisning vid turbulent strömning kräver 2-3 gånger högre effekt jmf. med avisning vid laminärströmning, gör att den tillförda värmeeffekten inte förmår avisa bladen.
- rinnande vatten återfryser bakom den uppvärmda bladytan och bildar en barriär som minskar lyftkraften och ökar motståndet.
- lister på framkanten, s.k. stall strips, orsakar turbulent strömning vilket medför att det för laminärströmning dimensionerade avisningssystemet inte förmår avisa kringliggande ytor under svåra nedisningsförhållanden.

3.7 Avisningssystem på marknaden

Trots den stora optimismen i mitten av 1990-talet så finns det, prototypanläggningar undantagna, inga färdiga avisningssystem för bruk under drift att köpa från någon tillverkare.

Bl.a. följande avisningstekniker är tänkbara kandidater till framtida avisningssystem, [37]:

- Elektrisk direktuppvärmning av bladytan
- Mikrovågsbaserad uppvärmning
- Indirekt uppvärmning av bladytan m.hj.a. varmluft
- Ytbehandling med hydrofoba material
- Kemiskt, genom smältning, avisande gummiyta
- Mekanisk avisning genom rörlig framkant eller elektromagnetisk puls

Vestas har provat avisning vid Gråsjön (Kall) i Jämtland utan att tala högt om succé. Kostnaden för vinterutrustning anges i [63] till 100 kSEK exkl. bladvärme och 400 kSEK ytterligare med bladvärme på Vestas V-52 med märkeffekt 850 kW. Detta motsvarar, med 7000:-/kW som referens en merkostnad på 1,7% för vinterutrustning och totalt 8,4% med bladvärme. Vestas marknadsför f.n. inte aggregat med avisning. Såväl Svenska Vestas som moderbolaget i Danmark har valt att inte besvara några frågor kring detta ämne via e-post. Vindgruppens P-O Säterhall ger följande allmänna råd till exploitörer av vindkraft i kallt klimat, [87]:

“Köp den bästa teknik som går att få. Välj läge med omsorg, inte bara utifrån klimat, utan även med avseende på närhet till komplex terräng och optimal backeffekt. Hög höjd över havet är viktigt, men höjden innebär även större risk för

isproblem i vissa vädersituationer. Serviceorganisationens tillgänglighet och kompetens är mycket viktig. I annat fall uppstår långa stilleståndstider eftersom kallt klimat ofta är entydigt med glesbygd med stora avstånd till civilisation. Allmän konstruktionsanpassning av aggregaten sker för drift ned till -30 grader C. Pitch-reglering bedöms fördelaktig m.h.t. bästa möjliga anpassning till variationer i vind och densitet, samt måttlig påisning. Transformator i torn bedöms fördelaktigt mot kondens/kyla och dess följdfel. Graden av klimatanpassning och servicenivån är ett mycket viktigt kriterium. Produktionsförlusten p.g.a. is och kyla kan motsvara 8-12 procent av årsproduktionen generellt, men förekomsten av is/dimfrost är mycket slumpartad. Vi hade satsat mer på förebyggande åtgärder om det bara hade funnits utprovade lösningar till rimligt pris. Det finns i branschen ingen vederhäftig kompetens om risken för produktionsbortfall i samband med kyla resp. nedisning.”

Vindkompaniets Staffan Niklasson anger, [83], att vinteranpassning av NEG Micons aggregat sker genom installation av värme i styrning och maskinhus, anpassad stålqualité i utvalda detaljer, uppvärmda givare samt svarta framkanter på några maskiner. Det sistnämnda kostar ca 50 kSEK extra per aggregat. Niklasson ger rådet: *Se till att produktionsförluster från is finns med i kostnads kalkylen!*” För uppgraderingen till arctic modell från standard tillkommer, enligt Rylin, en kostnad på ca 2-3%, [86]. Rylin menar vidare:

“Man skall satsa på ett avisningssystem som inte måste vara fullt flexibelt och kunna värma upp vingarna under drift. Enligt våra erfarenheter så blir dessa system för dyra. De långa stilleståndstiderna som varit har ju uppkommit genom att en isig period följts av en period där gradantalet inte gått över noll igen. Det innebär att isen suttit länge, men själva nedisningen inte varat särskilt länge. Därför tror jag att man helt enkelt skulle stanna maskinen och sedan värma bort isen när nedisningen slutat. Nedisning är dessutom är en högst lokal företeelse varför jag bestämt vill påpeka att man i väldigt stora områden med arktiskt klimat i norra Sverige inte kommer att behöva utrustning mot nedisning. Man bör ta hänsyn till risken för nedisning i sina kalkyler. Under vissa vintermånader kan ju intäkterna minska p.g.a. av stundtals nedisning vilket kan påverka likviditeten. När man bygger i fjällmiljö bör man alltid genomföra vindmätningar under lång tid. Under denna tid bör man även dokumentera isförhållandena. Kylan ser vi inte som något problem om man bygger arktiska modeller. Produktionsbortfallet har dock varit väldigt svårt att uppskatta, på grund av bristande kunskap i det stora hela, varför kunden fått göra denna värdering själv. Jag anser dock inte att det finns några direkta risker för själva konstruktionen genom att bygga i kallt klimat.”

Om NEG-Micon-verket i Bydalen skriver Anders Durling, [71], *“Vi var överens med leverantören om att verket skulle ha uppvärmda vingar för att slippa nedisning. Det visade sig dock att ingen vingtillverkare levererar uppvärmning till så små vingar. Verket har således ingen avisningsutrustning. Uppskattat stillestånd p.g.a. nedisning vintern 2002-03 var 3 veckor. Sannolikt var detta något mer än normalt (erfarenheter från skidliftar). Jag tror inte normalt att stilleståndet behöver överskrida 10 dygn/år på denna plats. Produktionsförlusten vintern*

2002/2003 uppskattas till 120 MWh eller ca 75 kSEK. Aggregatet borde ha blad-uppvärmning. Leverantören brast i information på denna punkt. Ett gott råd: Mät vinden helst en längre tid, vi mätte 4 månader under en vinter. Då kan man undersöka även nedisning av mätutrustning.”

Nuvarande NEG Micon har erfarenhet av bladvärme från två finska aggregat: Wind World 220 kW och Nordtank 120 kW från finska Kemijoki. Företaget har på senare tid vänt sig till LM Glasfiber som f.n. testat ett, i deras egna ögon ännu något för dyrt, avisningssystem på NEG-Micons aggregat på Digerberget. LM:s Søren Andersen skriver 2003-12-17:

“Teknisk har vi udviklet afisningssystemer der med den seneste version giver en fornuftig funktion [...]. Systemet er i drift på enkelte møller, men udelukkende som prototypemodeller. Der er endnu en del arbejde at gøre med hensyn til levetid og vedligehold. Med et elektrisk system som vi har anvendt er udmattelsesstyrken kritisk, idet det endnu ikke er muligt at udskifte de elektriske varmeelementer. Omkostningerne har indtil videre gjort at det kun har været interessant til specielle projekter. En større efterspørgsel vil kunne reduceres prisen noget, men det er “hønen og ægget” situationen.

Markedsmæssigt har der ikke være nogen interesse for afisning. Der er stor interesse for at få bladene dokumenteret til koldt klimaet, og de fleste LM blade er udviklede eller opgraderet til drift i ned til -30 grader. Dette stiller specielle krav til materialer og udmattelsestest, der alle skal dokumenteres til disse lave temperaturer. Afisning spørges der sjældent til, og i de tilfælde hvor et projekt afhænger af afisningssystemer bliver det aldrig til noget, idet afisningen gør de fleste projekter urentable. LM får nok ikke hele sandheden, idet vi som underleverandør ikke kender til de detaljerede forhandlinger mellem møllefabrikanterne og kunderne.

Endvidere er der ikke nogen entydig forståelse for hvad formålet med afisning er. Hvis det er af hensyn til årsproduktionen er et simpelt system der ikke afiser hele vingen tilstrækkeligt, endvidere er der sjældent nogen stor elproduktion under overisningsforhold. Er det et sikkerhedsmæssigt argument der taler for afisning, skal hele vingen afises for derved at forhindre personskafe pga. flyvende is fra vingerne.”

Bonus, är den tillverkare som idag har flest vindkraftverk med bladvärme i drift; 16 st i storlekar från 450 till 1000 kW med Kemijoki som underleverantör. Bonus 10-åriga erfarenhet av vindkraft i kallt klimat sammanfattas i [49]. Idag är det inte möjligt att beställa ett färdigt avisningssystem till Bonus vindkraftverk för leverans under 2004.

Företaget meddelar att samtliga aggregat som levereras under 2004 kan vara förberedda för ett egenutvecklat avisningssystem som avses sättas i drift under 2005. Tekniken uppges vara densamma som i tidigare Bonusaggregat vilket torde betyda att bladen på de aggregat som levereras förberedda för avisning måste bytas ut i efterhand. Kostnaden för detta kommande system är inte känd men

uppges kunna bli väsentligt lägre jmf. med tidigare lösning i och med att företaget nu slipper licenskostnader och har full kontroll över integrationen med befintligt reglersystem. Kostnaden för enbart anpassning till kallt klimat, exkl. bladvärme, uppgår till ca 1,5% för 1,3 MW och är mindre än 1% för 2,3 MW.

Nordic Windpowers Staffan Engström anser: *“Det finska avisningssystemet från Kemijoki är alltför dyrt för att komma i fråga. Branschen, t ex blad tillverkare, har hittills bedömt avisning som alltför marginellt för att sätta in tillräckliga utvecklingsresurser. Därför finns det fortfarande, vad vi erfarit, fortfarande inte något ekonomiskt och utprovat avisningssystem att tillgå. Ett avisningssystem, som läggs in vid tillverkningen, borde medföra en marginell merkostnad.”*

Andra typer av avisningssystem, med ursprung inom flygindustrin har presenterats i bl.a. [3] och [4]. Den på flygplan vanliga tekniken med uppblåsbar framkant presenteras här som ett alternativ till uppvärmda blad. Vindkraftsbranschen förhåller sig kyligt avvaktande till en sådan lösning eftersom underhållsbehovet kan visa sig vara alltför stort. Även elektriskt uppvärmd bladframkant presenterades som ett lämpligt alternativ för framtida tester på riktiga vindkraftverk.

Även i Sverige har ett projekt att avisa blad, här med mikrovågor nyligen startats med delfinansiering från Vindforsk (STEM). Metoden har tidigare prövats av Nordex på Rodovålen utan efterföljande offentliggjord framgångsberättelse.

Även passiva system i form av olika ytbeläggningar, för att hindra eller minska nedisningen, har provats, [17]. Dessa tester visar att en vattenavvisande yta kunde halvera isens vidhäftningsförmåga jämfört med övriga testade ytbehandlingsmetoder men att isen hur som helst fäster oavsett detta. Författarna föreslår därför att en vattenavvisande yta bör kombineras med andra avisningsmetoder.

3.8 Avisningens ekonomi

När lönar det sig att köpa utrustning för att hålla bladen isfria?

Ett sätt att undvika iskast skulle kunna vara att indirekt detektera is genom att sätta upp krav på hur mycket verklig effekt och nominell effekt får skilja sig åt innan ett aggregat måste stoppas.

Låt oss först konstatera att ett onödigt myndighetskrav på avisningsutrustning skulle kunna göra ett vindkraftsprojekt olönsamt. Ett sådant myndighetsbeslut skulle kunna motiveras med antingen säkerhets- eller bullerargument. Alternativet till att installera avisning blir då att stoppa aggregaten när nedisning, på något sätt, har konstaterats. Uppgifter om vilka styrparametrar som verkligen används av olika tillverkare har inte varit möjliga att erhålla. Det är inte heller känt ifall dessa kriterier skiljer sig åt mellan aggregat i områden med och utan nedisningsrisk.

Att vissa blad är mer flexibla än andra, och på så sätt kan underlätta avisning utan annan speciell utrustning, hjälper förmodligen föga om de inte samtidigt tillåts att rotera, med ökad risk för iskast som följd.

Det kan finnas ytterligare skäl till varför ett myndighetskrav på lättare avisningsutrustning skulle kunna motiveras. Frågan är t.ex. om det kan anses vara acceptabelt ifall stora vindkraftsparker, i analogi med de längre stopp som Äppelboaggregatet råkat ut för, alltför ofta slås ut efter frontpassager? Räcker det inte med att vi i Sverige har problem med träd som faller över kraftledningar? Ett sådant krav skulle kunna lyda att aggregaten, Extremsituationer undantagna, skall kunna avisas inom ett visst antal timmar.

Lättare avisning för
Enercon E-40 och E-66
kostar 9.200 Euro
respektive 12.800 Euro.

Vilka avisningssystem finns på marknaden? Svaret är mycket enkelt. Det finns idag endast ett system för avisning, och då enbart för stillastående aggregat, att köpa. Detta kan köpas som tillval till Enercons E-40 (600 kW) och E-66 (1800 kW) för €9.200 respektive €12.800. Med ett vindkraftverkspris på 7000:-/kW blir det en extrakostnad på 2% för E-40 och 1% för E-66.

Även den holländska tillverkaren Zephyros uppges ha ett varmluftsbaserat avisningssystem på sin Z72.

För den som önskar finna stöd för egna ekonomiska beräkningar finns exempel i [34]. Återbetalningstiden för bladvärmesystemet anges för en grupp på 4*500 kW till 4,5 år på en plats med 30 dagars nedisning och till 13,4 år med 10 dagars nedisning per år.

4 Sammanfattning

I rapporten visas att meteorologiskt underlag för att kartera nedisningsriskens geografiska utbredning existerar men att detta arbete återstår att utföra. Detta kan antingen ske via respektive lands meteorologiska institutioner eller av annan instans med likvärdiga kunskaper och tillgång till grunddata.

Det finns goda möjligheter att i förväg tala om när nedisning kommer att inträffa. Prognosmetoderna och modellupplösningen inom fjällområdet behöver förbättras samtidigt som mätning av nedisning i master kan användas för att verifiera och förbättra beräkningsmetoderna.

Nedisning kan hindra ett vindkraftverks drift samt försvåra eller helt hindra servicebesök med båt och helikopter.

Föreslaget riskavstånd d vid risk för iskast från roterande verk:

$$d = (D + H) \cdot 1.5$$

Motsvarande riskavstånd är för stillastående aggregat:

$$d = v \frac{D/2 + H}{15}$$

där d är riskavstånd [m], D rotordiameter [m], H navhöjd [m] och v vindhastighet [m/s].

På marknaden finns idag inget avisningssystem avsett för bruk under roterande förhållanden att köpa.

Enercon är den enda vindkraftsleverantör som marknadsför ett lättare avisningssystem. Detta kan köpas som tillval till Enercons E-40 (600 kW) och E-66 (1800 kW) för €9.200 respektive €12.800. Med ett vindkraftverkspris på 7000:-/kW blir det en extrakostnad på 2% för E-40 och 1% för E-66.

Ökad personsäkerhet och produktionssäkerhet samt minskad bullerrisk är andra skäl som, utöver ökad produktion, kan motivera installation av avisningssystem.

De bladvärmesystem som har använts i Sverige på två Bonus 600 kW Mk IV, har sedan oktober 1998 t.o.m. sista januari 2004 konsumerat 70 MWh på 8548 MWh (8,2‰) i Suorva och, t.o.m. början av dec 2003, 142 MWh på 6230 MWh (2,3‰) på Rodovålen. Dessa system levereras dock ej idag p.g.a. ett förmodat ointresse från aggregatleverantörerna vilka f.n. arbetar mot mindre teknikutvecklingskrävande marknader samt den i närtid förmodat mycket stora havsbaserade marknaden.

Det står klart är att visst, men inte tillräckligt omfattande, utvecklingsarbete pågår inom avisningsområdet. Det kommande svenska pilotprojektprogrammet kommer förhoppningsvis att kunna skapa utrymme för de tekniklyft som krävs för att risken i samband med investeringar i fjällbaserad vindkraft skall minska till en acceptabel nivå.

Referenser

- [1] Bergdahl L., "Islaster på vindkraftverk till havs. Beskrivning av mekanismer och rekommendationer för dimensionering", Report No 2002:1, Water Environment Transport, Chalmers.
- [2] Berry, Bollay, Beers, "Handbook on Meteorology", McGraw-Hill, 1945
- [3] Botura G., Fisher K. "Development of Ice Protection System for Wind Turbine Applications", Boreas VI, Pyhätunturi, Finland, april 2003
- [4] Botura G., Fisher K. "Development of Ice Protection System for Wind Turbine Rotor Blades", EWEA 2003, Madrid, Spanien, 2003
- [5] Brothers C., "Wind Turbines in Northern Climates - Canadian Experience", Boreas 1, Hetta, Finland, 1992
- [6] Claréus U., "Ice simulation - a 2 dimensional wind tunnel investigation of a NACA 652A215 wing section with single slotted flap", FFA TN AU-955, part 2, Stockholm 1974
- [7] Craig D., Craig D., "Wind Energy Potential, Whitehorse, Yukon. Report #4. An Investigation of Icing Events on Haeckel Hill", Boreas III, Saariselkä, Finland, 1996
- [8] Dobesch H. et al, "A New Map of Icing Potentials in Europe - Problems and Results", Boreas VI, Pyhätunturi, Finland, april 2003
- [9] Finstad K.J., Makkonen L., "Turbine Blade Icing Model", Boreas 1, Hetta, Finland, 1992
- [10] Finstad K.J., Makkonen L., "Modelling of Rime on Turbine Blades", Boreas III, Saariselkä, Finland, 1996
- [11] Ganander H., Ronsten G., "Design Load Aspects Due to Ice Loading on Wind Turbine Blades", Boreas VI, Pyhätunturi, Finland, 2003
- [12] Haapanen E., Määttä M., Koskinen P., "Offshore Wind Turbine Foundations in Ice Infested Waters", 1997. In Proceedings of European seminar Offshore wind energy in Mediterranean and other European seas OWEMES'97, 10-11.4.1997
- [13] Holttinen H., Peltola E., "Icing Experiences on Korsnäs Windfarm", Boreas II, Pyhätunturi, Finland, 1994

-
- [14] Højstrup J., "Performance of a Stall Regulated Wind Turbine in a Cold Climate", EWEC 2003, Madrid, 2003
- [15] Juntti H., "About Forecasting Wind and Temperature for the Fjells in Northern Finland", Boreas 1, Hetta, 1992
- [16] Kimura S., Tammelin B., Sääntti K., "Estimation of Reduction of Power Production due to Icing from the Existing Meteorological Data", Boreas V, Levi, Finland, dec. 2000
- [17] Kimura S., Kosugi K., "The Effect of Anti-icing Paint on the Adhesion Force of Ice Accretion on a Wind Turbine Blade", Boreas VI, Pyhänturi, Finland, 2003
- [18] Kury G., "Legislation and Regulation on Operation of WECS in Cold Climate in Austria, Germany and other EC Countries", Boreas VI, Pyhänturi, Finland, 2003
- [19] Laakso T. et al, "State-of-the-art of wind energy in cold climates", IEA R&D Wind Energy, Annex XIX, 2003
- [20] Laakso T., "A statistical evaluation of icing and low temperature failures in Finland 1996-2002", Boreas VI, Pyhänturi, Finland, april 2003
- [21] Lacroix A., "An Analytical Method for Assessing the Power Requirements of Wind Turbine Blade Anti-icers", The Yukon International Wind Conference, Kanada, maj 2003
- [22] Lundqvist J-E, Udin I., "Ice accretion on ships - with special emphasis on Baltic conditions", Winter Navigation Research Board, Report #23, SMHI, Norrköping, 1977
- [23] Lundqvist J-E, "Icing of drilling rig type GVA 5000 (An estimation of order of magnitude)", SMHI, Norrköping, 1982
- [24] Marjaniemi M., Peltola E., "A Blade Heating Element Design Method", Boreas III, Saariselkä, Finland, 1996
- [25] Marjaniemi M., Peltola E., "Blade Heating Element Design and Practical Experience", Boreas IV, Hetta, Finland, 1998
- [26] Marjaniemi M., Makkonen L., Laakso T., "Turbice - The Wind Turbine Blade Icing Model", Boreas V, Levi, Finland, 2000
- [27] Makkonen, 1984, "Atmospheric Icing of Sea Structures", U.S. Army CRREL Monograph 84-2, 102 p.

-
- [28] Makkonen L., "Estimation of Wet Snow Accretion on Structures", Cold Regions Science and Technology, 17 (1989) 83-88
- [29] Makkonen Lasse, "Structure independent measurement of icing", Boreas 1, Hetta, Finland, 1992
- [30] Makkonen L., Ahti K., "Icing Climate in Finland", Boreas II, Pyhänturi, Finland, 1994
- [31] Makkonen L., "Evaluations of Ice-free Anemometers and Ice Detectors, Boreas VI, Pyhänturi, Finland, 2003
- [32] Morgan C., Bossanyi E., "Wind Turbine Icing and Public Safety - A Quantifiable Risk?", Boreas III, Saariselkä, Finland, 1996
- [33] Morgan C. et al, "Assessment of Safety Risks Arising from Wind Turbine Icing", Boreas IV, Hetta, Finland, 1998
- [34] Mäkinen J., "Labko Ice Detection OY", Boreas III, Saariselkä, Finland, 1996
- [35] Nordell T., Iaktagelser beträffande isbarkstormen den 23 oktober 1921 samt dess verkningar å Vattenfallsstyrelsens linjebyggnader, Tekniska meddelanden från Kungl. Vattenfallssyrelsen, Ser. E, N:r 5, 15 nov. 1922
- [36] Peltola et al, "Pyhänturi Operational Experience", Boreas III, Saariselkä, Finland, 1996
- [37] Peltola E. et al, "Prevention of Icing Effects", Boreas VI, Pyhä, Finland, april 2003
- [38] Peltola et al, "Modelling, Verification and Classification of Ice Loads in Wind Turbines", NEW ICETOOLS, EWEC 2003, Madrid, 2003
- [39] Persson P-E, "Mätrapport: Utredning av fukt/isbildningsproblematik vid Veda", Telub Teknik, Östersund, 1993-06-24.
- [40] v. Pfaler R., Hyvönen R., "Icing Problems in the Wind Power Stations in the Åland Isles", Boreas III, Saariselkä, Finland, 1996
- [41] Ronsten G., "Can delayed stall be caused by ice accretion on the leading edge of an airfoil?", FFAP-A-981, Stockholm, maj 1993.
- [42] Ronsten G., Thor S-E, "Utvärdering av id och laster i kallt klimat. Bonus 600 kW Mk IV vindkraftverk i Suorva, FOI-R--0170--SE, Stockholm, Sverige, 2001

-
- [43] Schönborg A., Blomgren L., "Two years experience of three different turbines on the same site - Rodovålen - in the very middle of Sweden", Boreas V, Levi, Finland, nov. 2000
- [44] Seifert H., "Icing of Wind Turbine Rotor Blades During Operation", Boreas I, Hetta, Finland, 1992
- [45] Seifert H., "Icing of Wind Turbines in Europe", Boreas III, Saariselkä, Finland, 1996
- [46] Seifert H., Westerhellweg A., Kröning J., "Hit by a Piece of Ice or Win the Jackpot?", Boreas VI, Pyhä, Finland, april 2003
- [47] Seifert H., "Technical Requirements for Rotor Blades Operating in Cold Climate", Boreas VI, Pyhä, Finland, april 2003
- [48] Seifert H., Westerhellweg A., Kröning J., "Risk Analysis of Ice Throw from Wind Turbines", Boreas VI, Pyhänturi, Finland, 2003
- [49] Stiesdal H., Kruse H., "10 Years with Arctic Modifications - A Manufacturer's Experience". Boreas IV, Hetta, Finland, 1998
- [50] Sääntti K., Tammelin B., "Rime Climate in Sodankylä", Boreas I, Hetta, Finland, 1992
- [51] Tammelin B., Sääntti K., "Rime Accretion on the Fells", Boreas 1, Hetta, Finland, 1992
- [52] Tammelin B., Sääntti K., "Effect of Rime Accretion on Wind Energy Production in the Top Areas of Fells", Boreas II, Pyhänturi, Finland 1994
- [53] Tammelin B., Sääntti K., "Estimation of Rime Accretion at High Altitudes - Preliminary Results", Boreas III, Saariselkä, Finland, 1996
- [54] Tammelin et al, "The Accuracy of Wind Measurements Under Icing Conditions", Boreas III, Saariselkä, Finland, 1996
- [55] Tammelin et al, "Wind Energy Production in Cold Climate", Boreas IV, Hetta, Finland, 1998
- [56] Tammelin et al, "Icing Effect on Power Production of Wind Turbines", Boreas IV, Hetta, Finland, 1998
- [57] Tammelin B., Sääntti K., "Icing in Europe", Boreas IV, Hetta, Finland, 1998.

-
- [58] Tammelin et al, "Wind Energy Production in Cold Climate", (WECO), FMI publikation nr. 41, Helsingfors, 2000
- [59] Tammelin B., Hyvönen R., "No Wind Power During Cold Weather?", Boreas VI, Pyhänturi, Finland, 2003
- [60] Tammelin B. et al, "Measuring and forecasting atmospheric icing structures", http://cost.cordis.lu/src/action_detail.cfm?action=727, 2003, URL: 2003-12-07
- [61] Thirstrup Petersen J., Rasmussen F., "Effect of Rotor Imperfections on Wind Turbine Loads" Boreas II, Pyhänturi, Finland, 1994
- [62] Thor S-E, "Islaster på fundament till vindkraftverk", Litteraturstudie, FOI-R --0108--SE, Stockholm, maj 2001
- [63] Thornberger R., "Vindkraft i fjällen - anpassning av vindkraftverk för en arktisk miljö", Projektrapport, Högskolan på Gotland, Visby, 2002-11-27
- [64] Vartiainen M., "Effects of Ice Mass on Turbine Dynamics", Boreas II, Pyhänturi, Finland, 1994
- [65] Vedin H., "Mastbrottet vid Flugtjärnshöjden 1988-02-07", SMHI, Norrköping, Sverige, 1988
- [66] Vedin H., "Distribution of Freezing Rain and Drizzle in Sweden During the Period 1961-1990, L 1998-1839, SMHI, 1998
- [67] Vølund P., "Measured Ice Loads on Avedoere 1MW Test Turbine", Boreas IV, Hetta, Finland, 1998.
-
- [68] Avsaltning genom frysning - <http://www.serve.com/damien/home/solarweb/desal/freezing.html>
- [69] "Varning för isbildning", Meddelande från Luftfartsinspektionen, MFL 60/1978-B, 1978
- [70] <http://www.hornsrev.dk/>, search for "helicopter", 2004-01-27
-
- [71] Anders Durling, Bydalen, e-post, 2003-12-07
- [72] Rutger Forss, tidigare FMV, tel. samtal, 2004-05-06

-
- [73] Bengt Göransson, Scanwind Vindkraft AB, e-post, 2004-01-14
- [74] Knut Heijkenskjöld, Vägverket, e-post, 2004-01-09
- [75] Jari Ihonen, KTH, muntlig uppgift 2001-11-23
- [76] Kjell Jansson, Malungs Elnät AB, e-post, 2003-12-11
- [77] Lars Johnson, Länsförsäkringar, e-post, 2004-02-04
- [78] Martina Kuhlmann, Enercon, e-post, 2004-02-06
- [79] Henrik Lindqvist, Ålands Vindenergi Andelslag, e-post, 2004-01-28
- [80] Tel. samtal med Jan-Eric Lundqvist vid SMHI:s marina prognostjänst, 2004-01-27
- [81] Samtal med Lasse Makkonen, VTT, i Bryssel, 2004-04-28
- [82] Montgomerie Björn, FOI, muntlig kommunikation, 2004-01-30.
- [83] Staffan Niklasson, Vindkompaniet, e-post, 2003-12-05
- [84] Fredrik Olsson A.B. Vindkraft, Karl-Axel Henrichs, Sveland, fax, 2004-02-12
- [85] Flemming Ougaard (NEG Micon), Bert-Ove Svensson samt Anders Johansson, tel. samtal, 2004-01-29
- [86] Anders Rylin, NEG Micon, e-post, 2003-12-09
- [87] Säterhall P-O, VindGruppen Sverige AB, e-post, 2003-12-10
- [88] <http://www.resskandinavien.se/images/pageImages/underlagutokatsamrad200310249114.pdf>
- [89] Stjernfeldt U., Sydkraft, e-post, tel. samtal, 2004-01-28
- [90] Tommy Sundquist, Vägverket, e-post, 2004-01-08
- [91] Björn Wiahl, If, e-post, 2004-01-23

ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS – ELFORSK – AB
Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31
Telefon: 08-677 25 30. Telefax 08-677 25 35
www.elforsk.se