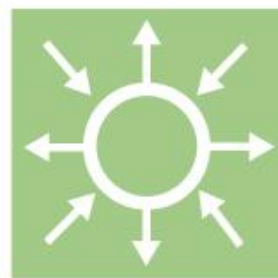




# Metrologi för vindkraft

Underlag till Vindforsks syntesrapport

Vindforsk teknikrapport 8:08



Hans Bergström

oktober 2008

# **Metrologi för vindkraft**

Underlag till Vindforsks syntesrapport

Vindforsk teknikrapport 8:08

## Förord

Vindforsk är ett samfinansierat program för grundläggande och tillämpad vindkraftsforskning. Programmet pågår tre år (2006-01-01 till 2008-12-31) med en total omslutning på cirka 45 MSEK.

Under programmets tredje år, och inför en planering av ett nytt program, har resultat och forskningsläget för ett antal teknikområden sammanställts i en syntesrapport som utges som Elforsk rapport 08:46

Den sammanställda syntesrapporten är baserad på ett underlag för teknik- och forskningsområdena

- Stor andel vindkraft ur ett marknads- och teknikperspektiv
- Planering och tillstånd
- Metrologi
- Ljud från vindkraftverk
- Miljöeffekter av vindkraft
- Vindkraftverk i kallt klimat
- Anslutning av vindkraftverk
- Kosntruktion av vindkraftanläggning
- Elsystem inom vindkraftstation
- Drift och underhåll av vindkraftanläggning

Vissa av underlagsrapporterna ges ut i Vindforks serie teknikrapporter.

Denna underlagsrapport som är framtagen av Hans Bergström på Uppsala Universitet beskriver området Metrologi

Stockholm oktober 2008

Anders Björck

Vindforsk programsekretariat

## Sammanfattning

I rapporten ges en kortfattad redogörelse över de viktigaste delarna inom vindkraftsforskningen med stark koppling till meteorologi. Dessa har under senare år inkluderat områden som berör kartering av vindresursen, vind- och turbulens över skog, nedisning samt vakeffekter från vindparker. Tydlig koppling till meteorologi finns även när det gäller frågor rörande ljudutbredning, korttidsprognoser av vind, normalårskorrigering av vindmätningar, generellt mätning av vind samt analys och statistisk bearbetning av vindmätningar.

Avseende vindkartering är nedskalning av resultaten i fokus. Syftet är att få hög rumslig upplösning av vindarna över t.ex. en vindpark. Detta kan göras med olika typer av modeller men oftast saknas i rummet högupplösande vindmätningar för att verifiera resultaten.

Över skog kan det atmosfäriska gränsskiktet inte beskrivas med samma enkla samband som över lägre vegetation. Den kunskap som finns om vinden över en skog behöver fördjupas. Osäkerhet finns avseende hur trädens höjd och inbördes avstånd påverkar vindarna via nollplansförskjutning och skrovlighetslängd. Speciellt avseende hur en regional bedömning kan göras i heterogena skogsområden.

Produktionsberäkningar baserade enbart på vinden i navhöjd har visat sig ge osäkra värden beroende på inflytande av både turbulens och vindgradient. Behov finns att i vind-effektsambanden inkludera dessa beroenden.

Is på bladen utgör ett allvarligt problem i vissa områden och kan ge kraftigt försämrad produktion. En noggrannare kartläggning av nedisningsklimatet behöver göras.

Produktionen från en vindpark påverkas av vakeffekter. I och med utbyggnad i områden med mycket olika klimat, som hav-skog eller slätt-berg, ökar vikten av att de modeller som beskriver vakarna inkluderar de meteorologiska effekterna av atmosfärens stabilitet och turbulens.

Ljudutbredning i atmosfären är starkt kopplad till gradienter av temperatur och vind, vilket de modeller som används idag för beräkning av ljudutbredning inte inkluderar på ett bra sätt. Man bör inte heller enbart beräkna medelnivåer utan även hur ofta och när olika ljudnivåer inträffar. Detta kan göras utgående från den meteorologiska databas som finns tillgängliga efter den nationella vindkarteringen.

Extrema vindhändelser utgör viktiga lastunderlag. Sannolikheter kan beräknas med teoretiska extremvärdesfördelningar, men resultaten är svåra att verifiera p.g.a. av bristen på observationer med hög tidsupplösning under lång tid.

Behovet av lokala vind- och produktionsprognoser ökar i takt med att andelen vindkraftsel ökar. Tillgängliga lokalprognoser baserar idag till stor del på statistisk analys av tidigare utfall. Möjligheter finns till förbättringar om de lokala prognoserna baseras på högupplösta resultat från en mesoskalemodell.

Vindmätningar i sig behöver inte alltid ge det säkraste vindunderlaget. Osäkerheter i samband med normalårskorrekationer kan vara lika stora som osäkerheterna i modellberäkningar. Kombination modell-mätning ger det säkraste underlaget.

## Summary

A short summary is given of the most important parts of the wind energy research having strong coupling to meteorology. This has during recent years included research on mapping of wind resource, wind and turbulence above forests, icing, and wakes from wind farms. The importance of meteorology is also obvious as regards propagation of sound, short time forecasts, normal-year corrections of measurements, generally as regards wind measurements, and doing analysis and statistical evaluation of wind measurements.

Regarding wind resource mapping, downscaling of the results has become important. The aim is to get high spatial resolution of wind within e.g. a wind farm. This can be done using different types of models, but most often observations with high spatial resolution are not available for verification.

Above forests the atmospheric boundary layer can not be described by the same simple relations as above low vegetation. Better knowledge about winds above forests are needed. Uncertainties exist regarding how the height and density of the trees affects the winds through the zero-plane displacement and the roughness length. Especially as regards making a regional judgement in heterogeneous areas.

Production estimates based on the wind at hub height alone have been shown to give uncertainties following influence from turbulence and wind shear. There is a need to include this into the power curves.

Ice on turbine blades is a serious problem in some areas and may result in considerable production losses. A more detailed mapping of the icing climate is needed.

Production from a wind farm is affected by wake effects. Building in areas with highly different climate conditions, such as sea-forest or planes-mountains, increase the importance of wake models including meteorological effects of atmospheric stability and turbulence.

Atmospheric sound propagation is strongly coupled to gradients of temperature and wind, which is not fully included in the commonly used models for estimating sound propagation today. Also not only average sound levels should be estimated, but also how often and when different sound levels occur. This may be done using the meteorological database which is available from the national wind resource mapping.

Extreme wind events are important for load estimates. Probabilities may be calculated using extreme value distributions, but the results are difficult to verify due to limited observations with high temporal resolution during long time.

The need for local wind and production forecasts will increase with an increase in wind produced electricity. Available local forecasts are today mainly based upon a statistical analysis of previous events. Improvements are possible basing the local forecasts on high resolution results from meso-scale models.

Wind measurements as such does not necessarily give a more accurate wind resource estimate. Uncertainties in connection to correction to a normal year may be as large as uncertainties in model estimates. The combination model-measurements gives the most accurate estimate.

## Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Vindpotential</b>	<b>2</b>
2.1	Bakgrund .....	2
2.2	Varför har vi vind? .....	2
2.3	Tillförlitligheten hos enkla modeller .....	4
2.4	Metoder att förbättra vindkarteringar.....	6
2.5	Högupplösta vindkarteringar.....	7
<b>3</b>	<b>Vind och turbulens över skog</b>	<b>10</b>
3.1	Kunskapsläget .....	10
3.2	Turbulensintensitet.....	12
<b>4</b>	<b>Vindturbiner och produktion</b>	<b>13</b>
<b>5</b>	<b>Is</b>	<b>16</b>
<b>6</b>	<b>Vakeffekter</b>	<b>18</b>
<b>7</b>	<b>Ljudutbredning</b>	<b>20</b>
<b>8</b>	<b>Extremvindar</b>	<b>21</b>
<b>9</b>	<b>Vindprognoser</b>	<b>22</b>
<b>10</b>	<b>Vindmätningar och vindindex</b>	<b>24</b>
<b>11</b>	<b>Pågående och framtida forskning</b>	<b>27</b>
11.1	Resultat från Vindforskprogrammet .....	27
11.2	Framtida utveckling.....	28

# 1 Inledning

Att utnyttja vinden som energikälla är ingalunda en nyhet. Det man först kommer att tänka på i detta sammanhang är kanske segelfartygen och de vinddrivna kvarnarna och pumparna. Att man försökte placera väderkvarnarna på blåsiga platser är väl en självklarhet. Dessa platser hittades då utifrån bondebefolkningens lokala erfarenheter och upplevelser – ingen djupare kunskap om atmosfärfysiken, eller meteorologin, fanns att tillgå och behövdes inte heller för detta ändamål i dåtidens samhälle.

Under andra hälften av 1900-talet och främst efter 1970 fördes vindenergi fram som ett av alternativen rörande förnyelsebar elproduktion. Behovet av mer detaljerade kunskaper om vindarna ökade snabbt. Meteorologisk forskning med inriktning mot vindenergiområdet inleddes på allvar i Sverige och i den övriga världen på 1970-talet och pågår än idag. Forskningens fokus har varit att ta fram relevant meteorologisk information för lokalisering av vindkraftverk och som underlag för dimensioneringar och lastberäkningar. Vindunderlaget inkluderar således kunskap både avseende medelvind och turbulens, samt även information om hur de naturliga vindförhållandena modifieras till följd av vakeffekter i vindparker. Också för ljudutbredningen är de meteorologiska förhållande av avgörande betydelse.

Trots 30 år av forskningsarbete är inte behovet av ytterligare och mer detaljerade kunskaper mättat. Detta hänger samman med att tekniken hela tiden utvecklats samtidigt som nya typer av landområden kommit att behöva utnyttjas.

De tidiga vindkraftverken, typiskt 20-40 m höga, byggdes nästan uteslutande i öppna åkerlandskap. Den typ av landskap där vindarna på dessa höjder kan förväntas vara högst i normalfallet. Ännu högre vindar finner vi dock över haven, varför utvecklingen mot off-shore inleddes och kunskaperna om vindförhållandena till havs behövde ökas. Vindkraftverken har också blivit allt högre och större med åren, vilket ställer ökade krav på de meteorologiska verktyg och modeller som används. Man söker sig också till alltmer komplex och ibland även skogsklädd terräng där nya krav ställs på kunskaperna om vindprofil och turbulens.

Fokus i den aktuella vindenergiforskningens koppling till meteorologi ligger idag inom områden som berör kartering av vindresursen, vind- och turbulens över skog, samt vakeffekter från vindparker och studier av klimatologin för nedisning. Kopplingen till meteorologin är även tydlig när det gäller frågor som berör ljudutbredning, korttidsprognoser av vind, normalårskorrigerings av vindmätningar, generellt mätning av vind samt analys och statistisk bearbetning av vindmätningar.

En kort genomgång av dessa till meteorologin kopplade områden ges i de följande avsnitten. Rapporten baseras på erfarenheter och diskussioner i samarbetet inom branschen samt på en genomgång av presentationer inom ämnet som gjordes på EWEC2007 konferensen i Milano, maj 2007.

## 2 Vindpotential

### 2.1 Bakgrund

I Sverige inleddes arbetet med att försöka uppskatta vindenergipotentialen i mitten och slutet av 1970-talet. Ett samarbete mellan MIUU (dåvarande Meteorologiska institutionen vid Uppsala universitet) och SMHI (Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut) ledde fram till att man för första gången fick en viss uppfattning om medelvindarna på 50 m och 100 m höjd i södra Sveriges kustområden. Vindmätningarna på 10 m höjd från ett antal av SMHIs väderstationer utnyttjades för ändamålet och enkla exponentiella samband rörande vindens variation med höjden användes, där exponenterna tilläts vara beroende av jordytans skrovlighet och den atmosfäriska stabiliteten.

I fotspåren av detta pionjärarbete har därefter ett flertal mer eller mindre omfattande vindkarteringar gjorts i Sverige, inklusive ett flertal studier inom det svenska programmet för vindenergiforskning. Så småningom kom en metod utvecklad vid Risø National Laboratory i Danmark att i praktiken användas alltmer. Den bygger på det PC-baserade datorprogrammet WA<sup>SP</sup> och har utnyttjats för att göra vindkarteringar av ett stort antal europeiska länder och även utanför Europa. WA<sup>SP</sup> bygger på enkla fysikaliska samband rörande vindprofilens variation med höjden i det atmosfäriska gränsskiktet, d.v.s. de delar av atmosfären som direkt påverkas av den underliggande jordytan. Hänsyn kan i parametrisk form tas till variationer i jordytans skrovlighet, topografin och eventuella hinder såsom byggnader som kan påverka vinden i närområdet till en vindmätplats eller ett tilltänkt vindkraftverk.

Metoderna vid användandet av WA<sup>SP</sup> är i princip desamma som användes vid pionjärarbetet i Sverige, även om de använda modellerna som beskriver vindens variation med höjden är olika, samt att det i WA<sup>SP</sup> är möjligt att inkludera topografin. Utgående från vindmätningar, vanligen på 10 m höjd, från en plats beräknas en vindatlas som generellt beskriver vindklimatet för olika skrovligheter och höjder. Denna vindatlas antas sedan vara giltig över ett större område eller en region. Vindatlasen utnyttjas sedan för att beräkna en ny vindfördelning på en annan plats där man inte har några vindmätningar. Beräkningarna görs i 30°-sektorer, vari hänsyn tas till skrovlighet, topografi och eventuella hinder, såsom byggnader, både på den plats där vindmätningar finns och på den plats för vilken vindberäkningar görs.

### 2.2 Varför har vi vind?

Hur väl fungerar då en enkel modell av typen WA<sup>SP</sup> i verkligheten? Vilka faktorer är det som primärt påverkar vinden och finns de med i en sådan modell?

Den yttersta orsaken till att vi har vind över huvud taget, d.v.s. att luften rör sig relativt jordytan, är att lufttrycket varierar mellan olika platser – vi har en

horisontell gradient i lufttrycket. Vädret på våra breddgrader karakteriseras av en näst intill oändlig variabilitet som en följd av den ständiga raden av mer eller mindre kraftiga lågtryck och högtryck vilka med större eller mindre hastighet passerar. När lufttryckskillnaderna är stora mellan olika platser är vindstyrkan hög, och vindens riktning bestäms av riktningen på isobarerna – de linjer som sammanbinder platser med lika lufttryck.

Med kunskap om lufttryckets horisontella gradient skulle det alltså i teorin vara möjligt att beräkna hur stark vinden är och att utifrån klimatologiska data över lufttrycket, som fås med hjälp av mätningar under lång tid, beräkna vindklimatet och vindenergipotentialen. Men detta gäller dock enbart i fria atmosfären, d.v.s. på så hög höjd att det direkta inflytandet av den underliggande jordytan är försumbart. Denna höjd varierar med de meteorologiska förhållandena, men är vanligen mellan 500 m och 2000 m. Skiktet mellan marken och denna höjd benämns det atmosfäriska gränsskiktet.

Vindklimatet på lägre höjd påverkas däremot i hög grad av flera faktorer som sammanhänger med jordytans utseende och de meteorologiska förhållandena i det atmosfäriska gränsskiktet:

- 1) *Friktionen mot jordytan:* När luften rör sig över denna bromsas vinden, i vilken omfattning beroende på jordytans grad av skrovlighet. Alla har vi väl en känsla för att det blåser ganska lite i skogsområden – där skrovligheten är stor – medan vinden är kraftigare på samma höjd över öppna fält med lägre skrovlighet. Allra kraftigast är vinden ute på havet där också skrovligheten är som lägst. Detta betyder alltså att vindens variation med höjden är störst över den skrovligare ytan med hög friktion, medan lägre skrovlighet medför en mindre variation med höjden.
- 2) *Temperaturens variation med höjden:* Den termiska skiktningen påverkar vindens variation med höjden och därmed vindstyrkan i marknära skikt. I de fall då temperaturen avtar med höjden (instabil skiktning), d.v.s. då det är som varmast vid markytan vilket är vanligt dagtid främst under sommarhalvåret, är transporten av rörelseenergi från högre höjder, där vinden främst bestäms av lufttrycksgradienten, ned mot markytan effektiv (hög turbulensgrad). Detta medför att vinden blir relativt hög även närmast marken och att den vertikala vindgradienten är relativt liten. Nattetid, och under vintern ofta även dagtid, är det vanligen som kallast vid marken varför temperaturen ökar med höjden (stabil skiktning). I dessa fall är transporten av rörelseenergi från högre höjder ned mot marken mindre effektiv (låg turbulensgrad), vilket får till följd att vinden blir relativt svag nära marken och den vertikala vindgradienten stor. Det är alltså av stor betydelse att känna till och att ta hänsyn till den vertikala temperaturgradienten då vinden ska beräknas på 50-100 m höjd utgående t.ex. från den på klimatstationer oftast tillgängliga vinden på 10 m höjd.
- 3) *Topografin:* Denna modifierar vindfältet i högre eller mindre grad beroende på terrängens höjd och den termiska skiktningen. Enkla samband finns för att uppskatta hur vinden modifieras då den passerar en kulle eller en bergsrygg, men dessa gäller egentligen endast under ideala förhållanden. I den verkliga terrängen samverkar i regel kullar, bergsområden och dalgångar, så att det av terrängen modifierade vindfältet blir betydligt mer komplext än vad de enkla sambanden kan ta

hänsyn till. I vissa fall medför detta att vindfält beräknade med hjälp av enkla samband för strömning över kullar och bergsryggar blir helt missvisande. T.ex. kan vinden i långsträckta dalgångar vara betydligt högre än vad som ges av de enkla sambanden.

- 4) *Olikheter i jordytans beskaffenhet:* Påverkar vinden, t.ex. i en kustzon eller vid övergången från ett jordbruksområde till ett skogsområde. Då det blåser från ett område av en viss typ in över ett annat, kommer vinden på lägre höjder att alltmer anpassa sig till det nya underlaget ju längre in över den nya typen av jordyta vinden kommer. Man benämner detta 'tillväxt av internt gränsskikt'. Hur snabbt denna anpassning sker beror främst på atmosfärens termiska skiktning samt typ av övergång. En mängd modeller för detta har föreslagits under åren, men stora skillnader finns mellan de olika modellerna.
- 5) *Skillnader i temperatur mellan olika områden:* Kan modifiera vindfältet och den vertikala vindprofilen över stora områden. Främst gäller detta havsområden och stora sjöar, vilkas temperatur endast långsamt förändras med årstiden, medan temperaturen över omgivande landområden snabbare svarar på årstidsväxlingarna. Speciellt då temperaturen över omgivande landområden är högre än över mindre skrovliga havsområden, vilket leder till stabil skiktning över havet, medför den minskade friktionsbromsningen som atmosfären plötsligt erfar då luften passerar en kust och rör sig ut över havet att en s.k. *low-level jet*, d.v.s. ett vindmaximum vanligen på ca 50-300 m höjd, ofta bildas vilket påverkar vindklimatet över stora delar av ett havsområde som Östersjön. Temperaturskillnader mellan land och hav kan även leda till att *sjöbrisar* utvecklas och påverkar vindfältet, inte alltid enbart i kustzonen som ofta antagits, utan ibland över stora havsområden vilket visats genom flygmätningar och modellberäkningar gjorda över Östersjön. Både för fallet med en *low-level jet* och med en *sjöbris* avviker vindens vertikala variation från de ideala förhållanden som alltid antas gälla då enklare vindmodeller används.

Vi har alltså identifierat ett antal faktorer som påverkar vinden och vindklimatet i de skikt av atmosfären som är av intresse i vindenergisammanhang. Då klimatologiska mätningar (mätningar under lång tid) så gott som uteslutande endast finns att tillgå från väderstationer på 10 m höjd, förutom i specifika projekt, har någon form av modellberäkning krävts för att kartlägga vindklimatet på högre höjder (50-100 m). Dessutom är stationsnätet relativt glest med avstånd av storleksordningen 100 km mellan mätplatserna. Dessa ligger dessutom företrädesvis i kustzonen, även om antalet mätplatser i inlandet har ökat i och med automatiseringen av det nationella stationsnätet som drivs av SMHI.

### 2.3 Tillförlitligheten hos enkla modeller

Såsom nämnts ovan inkluderar de modeller som nästan uteslutande fram till 1900-talets slut i praktiken använts för vindkarteringar, främst  $WA^{SP}$ , förenklade parameteriseringar av vissa av de fysikaliska faktorer som påverkar vinden i det atmosfäriska gränsskiktet. Men flera faktorer som påverkar vindpotentialen i större eller mindre grad är det tveksamt om en

sådan modell kan hantera. Det är faktorer som inverkan av low-level jets, sjöbris och andra termiskt drivna vindar, samt förhållandena i den komplexa terräng som ett högländ eller fjällområde utgör. Det är dessutom så att den betydande påverkan som atmosfärens termiska skiktning har på vindens variation med höjden inte inkluderas i denna modell annat än på mycket förenklad klimatologisk basis.

Utvärderingar som gjorts visar att en enkel modell i medeltal trots detta kan ge ett bra resultat vid jämförelser med mätningar eller faktisk produktion från existerande vindkraftverk, men att detta långt ifrån alltid är fallet för varje enskild tillämpning. Detta förhållande är inte speciellt förvånande när det gäller vindpotentialen i fjällterräng och inte heller vad gäller vindklimatet till havs. Där påverkas förhållandena i hög grad av de ofta förekommande stora temperaturskillnaderna mellan land och hav, och förenklade modeller av typen WA<sup>SP</sup> kan därför inte förväntas modellera vindförhållandena på ett realistiskt sätt. För en sådan modell, som ju enbart inkluderar samband för hur olika grader av markskrovlighet påverkar hur vinden varierar med höjden, samt hur snabbt vinden anpassar sig till ett nytt underlag såsom t.ex. är fallet vid en kust, ter sig ett stort öppet havsområde som Östersjön som ett område med enhetliga vindförhållanden så snart inverkan från de omkringliggande kusterna upphör, vilket vanligen är på avstånd längre än ca 10-20 km från kusterna enligt modellen.

I verkligheten kan vindarna över hela Östersjön vara påverkade av omgivande landområden. Detta har med hjälp av mer avancerade prognostiska numeriska s.k. mesoskale-modeller, såsom t.ex. MIUU-modellen och den tyska KAMM-modellen, visats vara helt missvisande. I en sådan modell beräknas vind-, temperatur-, fuktighets- och turbulensförhållandena i atmosfären med betydligt mer fullständiga samband än vad som är fallet med enklare modeller. Mesoskale-modeller ger en bild av vindklimatet över havet som ingalunda visar på enhetliga förhållanden, utan vindar som i hög grad påverkas av skeenden som kan förknippas med termiska skillnader mellan land och hav. Det begränsade antalet mätningar med flygplan som gjorts av vindförhållandena över Östersjöns öppna havsvidder styrker detta.

Även om det, som antydde ovan, i medeltal har kunnat förväntas att även enklare modeller i många fall ska kunna beräkna vindklimatet på 50-100 m höjd med hygglig noggrannhet, så har det visat sig i flera studier att så inte alltid behöver vara fallet även om beräkningarna begränsas till kuster och inlandsområden med mindre komplex terräng. I kustområden påverkas ju vinden av de understundom stora termiska skillnaderna mellan land och hav. Också i inlandslägen, där det framförallt är skillnader i markytans skrovlighet och topografi som påverkar vindarna, kan systematiska skillnader föreligga mellan uppmätt och med en enkel modell beräknad vindpotential. Detta har t.ex. visat sig i en jämförande studie rörande vindklimatet i Västra Götalands län, ett område med relativt måttlig topografi. Bristerna i hur hänsyn tas till termiska stabilitetens inflytande på vindprofilen är också uppenbara, vilket tenderar att medföra att den med t.ex. WA<sup>SP</sup> beräknade vindgradienten blir för liten.

Det allmänna intrycket är alltså att även i de fall då en enkel modell i *medeltal* ger hygglig överensstämmelse med observationer, så riskerar man *i varje enskilt fall* en osäkerhet på ca  $\pm 20-30\%$  i den beräkna energipotentialen,

alltså även i områden där man i en första bedömning förväntar sig ett bättre resultat. Detta beror på att verklighetens topografi inte består av renodlade kullar och bergsryggar, samt att man oftast inte har enkla övergångar mellan olika marktyper som skog eller åker. Istället består vår verklighet av en mycket komplex sammansättning av topografi och olika markanvändning, vilket får till följd att enkla modeller inte alltid fungerar tillfredsställande i det enskilda fallet, trots att de i många fall kan ge en god medelbild av vindklimatet i genomsnitt inom ett större område.

I vissa fall då terrängen blir alltför komplex, såsom i fjällerna, eller då det gäller speciella vindförhållanden vars orsak står att finna i temperaturskillnaderna mellan land och hav, är risken stor att resultaten från enkla modeller kan vara helt missvisande. Som antytts ovan saknas de vindmätningar över hav som behövs för att verifiera detta. I stort sett gäller samma sak vad det gäller vindpotentialen i fjällerna. Forskning i området runt Torneträsk och vid Suorva i Lapplands fjälltrakter påvisar starkt den stora variabiliteten hos vindklimatet i denna typ av terräng. Om vindklimatologin från t.ex. Ritsem används för att bedöma vindpotentialen vid Suorva leder detta till fel i den beräknade vindpotentialen på storleksordningen 100 %, d.v.s. resultaten är helt oanvändbara.

Med facit i hand, d.v.s. om en vindmätning finns för att verifiera den modellberäknade vindpotentialen, kan man i vissa fall dra slutsatsen att om en klimatologisk referensstation finns att tillgå i en mycket likartad terräng och med i stort sett samma avstånd från kustlinjer som den plats där man önskar beräkna vindpotentialen, så är sannolikheten större att resultatet blir tillfredsställande. Om däremot större skillnader finns avseende topografi, markanvändning och avstånd till kuster, ökar sannolikheten för att beräkningarna med den enklare modellen ger ett sämre resultat.

För att minska osäkerheterna i bedömningen av vindpotentialen på 50-100 m höjd till under ca  $\pm 20-30$  % i det enskilda fallet, krävs alltså bättre kännedom om vindklimatets variationer inom skalan 1-100 km än vad som kan fås med hjälp av de idag tillgängliga klimatologiska vindmätningarna från 10 m höjd och en modell av typen  $WA^{SP}$ . Det kan däremot vara möjligt att med gott resultat använda  $WA^{SP}$  för den mer detaljerade småskaliga kartläggningen av vindpotentialen.

## 2.4 Metoder att förbättra vindkarteringar

Vad kan då göras för att förbättra kunskaperna om och öka tillförlitligheten i bedömningen av vindenergipotentialen, och därmed även minska de ekonomiska riskerna vid en ökad utbyggnad av vindenergin? Två vägar finns tillgängliga. Den ena utgörs av direkta vindmätningar i master på höjder som är relevanta i vindenergिसammanhang, d.v.s. 50-100 m höjd. Den andra utgörs av bättre modellberäkningar av vindpotentialen, varvid mer avancerade modeller används.

Då alla beräkningar med modeller är behäftade med viss osäkerhet, kanske de direkta mätningarna vid en första anblick kan bedömas vara det säkraste alternativet då det gäller att minimera osäkerheten i bestämningen av vindklimatet och vindpotentialen. Detta förutsätter att vindmätningarna utförs på ett fackmannamässigt sätt med tillförlitlig utrustning och att vindmätarna

monterats så att de aerodynamiska störningar som en mast alltid ofrånkomligt medför inte påverkar de uppmätta vindarna i nämnvärd utsträckning. Mätningar görs emellertid oftast endast under en begränsad tid, varför de behöver normalårskorrigeras. D.v.s. resultaten från den korta mätperioden måste omräknas så att de representerar klimatet och de förväntade medelvindarna under en längre tid. Osäkerheten i denna normalårskorrigerings är ofta av samma storleksordning som osäkerheterna i de modellberäknade resultaten under förutsättning att en avancerad s.k. mesoskalemodell används.

Modellering av vindklimatet med mesoskalemodeller, tidsberoende numeriska modeller (CFD, Computational Fluid Dynamics), har under de senaste 10 åren kommit att bli en alltmer vanlig väg att gå för att öka kunskaperna om vindklimatet i ett område. Detta som en följd av en ökande insikt om potentiella problem och osäkerheter i resultat som erhålls med sedan tidigare använda modeller som WA<sup>SP</sup>. Denna modell har dock fortfarande sitt berättigande inom många användningsområden, t.ex. när det gäller beräkningar av parkeffekter och vindklimatet inom en vindpark.

Två vägar är tänkbara när det gäller modellering av vindklimatet med mesoskalemodeller. I den ena metoden, som utvecklats vid Uppsala universitet, körs modellen enbart för ett antal scenarier vilka ska vara representativa för klimatet som helhet. Resultaten viktas sedan samman till en klimatologi. I den andra metoden körs modellen för ett antal verkliga vädersituationer varefter resultatens medelvärde får representera klimatet. Båda metoderna har stor potential att ge tillförlitliga resultat och tillämpas rutinmässigt för en horisontell upplösning mellan 0,5 – 1 km och 5 km.

De modeller som används bör ha hög vertikal upplösning för att korrekt fånga hur vinden ändras med höjden i det atmosfäriska gränsskiktet. Modellerna bör förutom ekvationer som beskriver medelförhållanden av vind, temperatur och fuktighet, även inkludera ekvationer som beskriver turbulensen i atmosfären, vilken är av stor betydelse för utseendet på medelprofilerna och även kan vara av betydelse i sig. En bra parameterisering i modellen av turbulensen är alltså viktig. Vidare måste modellerna kunna beräkna hur markytans egenskaper påverkar temperaturen via energibalansen vid jordytan, samt naturligtvis kunna hantera hur de meteorologiska variablerna, som vinden, påverkas av topografin.

## 2.5 Högupplösta vindkarteringar

I spåren av en regional vindkartering med en typisk upplösning av 1 km<sup>2</sup> som utnyttjas för att identifiera vindmässigt intressanta områden kommer ofta ett ökat intresse för mer högupplösta resultat där projekteringar planeras. Det kan då röra sig om en upplösning på 0.01-0.25 km<sup>2</sup>. Eventuellt kan då andra typer av modeller komma till användning än vad som använts vid den regionala karteringen.

Det kan i detta sammanhang vara på sin plats med ett klarläggande vad det gäller CFD-modeller. Benämningen börjar mer och mer dyka upp som namn på något slags 'mirakelmodeller' i samband med vindklimatologiska modellering. Detta är dock missvisande. CFD, som alltså står för Computational Fluid Dynamics, är en generell benämning på olika typer av

numeriska modeller som löser fluiddynamiska problem där analytiska uttryck och enklare modeller inte kan förväntas ge tillfredställande resultat. De har alla det gemensamt att de numeriskt löser de samband som styr förhållandena i t.ex. atmosfären. De globala vädermodellerna är alltså en typ av CFD-modeller, men ofta används kanske benämningen mest för de mycket högupplösande beräkningskoderna. Det kan då röra sig om att beräkna strömningen runt en bil eller ett flygplan. I meteorologiska sammanhang används CFD som modellbenämning när man gör detaljerade beräkningar av t.ex. gatuplanet i en stad eller mellan husen i ett bostadsområde.

Alla CFD-modeller, inklusive t.ex. MIUU-modellen, är alltså numeriska fluiddynamiska modeller som innehåller en kärna bestående av ekvationer (samband) som beskriver fluidens (luftens) rörelser baserade på den s.k. Navier-Stokes ekvation. Till detta kommer en termodynamisk ekvation som beskriver de termiska förhållandena, en ekvation som beskriver luftens fuktighet, samt en eller flera ekvationer som behandlar den atmosfäriska turbulensen.

Det är av stor vikt att CFD-modeller som används för att t.ex. studera vindarna inkluderar effekterna av den termiska skiktningen. Att döma av presentationer och rapporter under de senaste årens vindkonferenser så försummas detta ofta. I mesoskaliga modelleringar över större områden eller regioner anses det mer självklart att inkludera de termiska effekterna. Men allt fler studier har kommit som fokuserat på detaljklimatet inom ett mindre område, såsom en vindpark. På denna mindre skala, som vi kan benämna *mikroskalan*, anger man ofta att neutrala förhållanden antagits råda. Motiven för detta eller effekterna av antagandet på resultatens trovärdighet diskuteras inte. Möjligen har det att göra med datortid – de CFD-modeller som använts för mikroskalan är ofta speciellt datortunga eftersom det rör sig om s.k. icke-hydrostatiska modeller som kräver korta tidssteg för att inte bli numeriskt instabila. Skillnaden mellan icke-hydrostatiska och hydrostatiska modeller är att i hydrostatiska modeller, som MIUU-modellen, har ekvationen som beskriver vertikalvindarna reducerats till en balans mellan gravitation, vertikal tryckgradient och densitet, varefter vertikalvinden fås via kontinuitets-ekvationen vilken beskriver massans bevarande.

Bruket av icke-hydrostatiska modeller har under senare år blivit 'på modet' även i vindkarteringssammanhang utan att behovet av dessa extra datorkrävande modellversioner har studerats närmare. Det kan diskuteras om inte en bra beskrivning och parameterisering i modellerna av den atmosfäriska turbulensen är viktigare för studier av vindklimatet. Vidare presenteras resultaten från de högupplösande CFD-modelleringarna ofta i stort sett bara i färgrika grafer, där trovärdigheten i resultaten inte går att bedöma. Alternativt presenteras resultat tillsammans med mätningar i någon punkt, där det ur jämförelserna är svårt att konstatera om inte likartade resultat även kunnat erhållas med en betydligt enklare modell som WA<sup>5</sup>P. Skillnader på  $\pm 5\%$  mellan CFD-modellernas resultat och observationer verkar vara typiska.

En viktig orsak till att det kan vara svårt att verifiera resultaten från modellering på mikroskalan är att rumsligt högupplösta observationer i stort sett saknas. Därmed saknas också underlag för att studera huruvida den högupplösande modellens resultat avseende den rumsliga variationen av

vindarna ger en korrekt beskrivning av verkligheten. Det finns några experiment som gjorts för att detaljerat studera strömningen över topografi, t.ex. över Askervein Hill, vilka ibland använts för att verifiera modellberäkningar. Men experimenten sträcker sig då över begränsad tid och inga klimatologiska resultat kan erhållas. Då det ger ett extra mått av osäkerhet att modellera specifika situationer p.g.a. att de atmosfäriska randvillkoren ofta inte kan bestämmas med exakthet, skulle mätningar under lång tid vara ett avsevärt mycket bättre alternativ för att utvärdera hur realistiska resultaten är från de högupplösande modellerna. Huvudsyftet är ju dessutom ofta inte att modellera vädret och vindarna under speciella situationer, utan istället att så bra som möjligt beskriva skillnader i vindklimatet inom en planerad vindpark. Ett möjligt undantag är då lokala vindprognoser är målet – men för detta är det inte realistiskt att utnyttja de allra mest tidskrävande modellerna i kombination med maximal upplösning.

En annan typ av modell som används ibland för att med mycket hög rumslig upplösning modellera vindarna är s.k. LES-modeller (Large Eddy Simulation). I dessa modeller delas turbulensen upp i en högfrekvent och en lågfrekvent del. För de låga frekvenserna – den storskaliga turbulensen – görs beräkningar explicit i LES-modellerna varför endast den småskaliga delen av turbulensen behöver parameteriseras. Modellerna är dock mycket datorkrävande och knappast realistiska idag att använda för vindklimatologiska beräkningar i större omfattning. De har dock potential att ge intressant information om speciella förhållanden avseende turbulens, t.ex. vid en klippkant.

Inom ramen för Vindforsk pågår vid Uppsala universitet forskningsarbete som syftar till en primär värdering av nyttan med en icke-hydrostatisk modell vad det gäller vindkartering på mikroskalan. Även jämförelser med resultaten från en enklare analytisk modell som WA<sup>S</sup>P kommer att göras. Problemet är som nämnts ovan att vindmätningar inte finns med tillräcklig horisontell upplösning för en fullständig utvärdering av modellresultaten.

## 3 Vind och turbulens över skog

Intresset för vindenergiutbyggnad i skogsområden har ökat kraftigt under de senaste åren. Detta är delvis beroende på att vi i Sverige har stora glest befolkade skogsområden medan det i de mer tätbefolkade slättbygderna har visat sig att utbyggnaderna ofta medför konflikter med olika andra intressen.

Samtidigt visade resultaten från den rikstäckande vindkarteringen som gjorts vid Uppsala universitet att det även över skogsområden kan finnas tillräckligt höga medelvindar för att göra dem intressanta för vindenergiutbyggnad. Detta gäller då framförallt där topografiska effekter ökar vindarna så att årsmedelvindarna kan nå upp i 6.5 – 7.0 m/s eller mer på 100 m höjd.

En förutsättning för att kunna utnyttja dessa områden med skog är också den teknikutveckling som skett vad det gäller de kommersiellt tillgängliga vindturbinerna vilket medfört att dessa idag är mycket större än vad som var fallet för 10 år sedan. Navhöjder på runt 100 m är idag inte ovanliga. Dessa höga turbiner är en förutsättning i skogslandskapet där vinden når energimässigt intressanta styrkor först på hög höjd. Trots en medelvind på 7 m/s på 100 m höjd kan den vara så låg som 5 m/s på 50 m höjd som en följd av den stora vindgradient vi normalt har över skog. Utan teknikutvecklingen av turbinerna skulle alltså skogsområden typiskt inte ha varit av intresse.

Tidigare bedömdes skogsområden som ointressanta ur vindenergiutbyggnadsperspektiv. Delvis beroende på de mindre turbinerna som inte hade potential att nå upp till de högre vindarna, men också beroende på att tidigare vindkarteringar inte alls inkluderat skogsområden eftersom de bedömts ointressanta. De tidigare använda modellerna innehåller inte heller den fysik som är nödvändig för att på ett bra sätt beskriva hur vindarna påverkas av topografien. Primärt är det då samspelet med den termiska skiktningen i det atmosfäriska gränsskiktet som saknas. Detta medför att den topografiska effekten på vinden riskerar att underskattas och som en följd härav kan vindarna underskattas över höglänta skogsområden.

### 3.1 Kunskapsläget

Intresset för vindenergiutbyggnad i skogsterräng har inneburit en ökad efterfrågan på meteorologiskt underlag i sådana områden. Det rör sig dels om att verifiera nivån hos de modellberäknade medelvindarna, dels om att få information om hur vindarna generellt sett ser ut över skog. Framförallt är oron för hög turbulensintensitet stor. Det görs även studier avseende möjligheterna att i beräkningarna med enklare modeller som  $WASP$  ta hänsyn till de speciella förhållanden som råder över skog.

Man har dock redan nu en hel del kunskaper om förhållandena i det gränsskikt som vi har över skogar. En viktig skillnad som konstaterats är att jämfört med gränsskiktet över lägre vegetation har det s.k. ytskiktet inte samma egenskaper över hög vegetation. I ytskiktet, de lägst liggande delarna av gränsskiktet, varierar de turbulenta flödena i vertikal led i stort inte med höjden – de avtar endast långsamt uppåt. Över lägre vegetation har man här

kunnat visa att den s.k. Monin-Obukhovs similaritetsteori i medeltal kan användas för att förutsäga t.ex. vindprofilens utseende.

Detta gäller inte över hög vegetation som skog. Här återfinns vi istället i de lägre delarna av gränsskiktet det s.k. 'roughness sublayer', i vilket similaritetsteorin inte är giltig. Turbulensen påverkas här av koherenta rörelser med skalor av samma storleksordning som vegetationsskiktet. Strömningen kan förklaras med teorier som behandlar vad som sker längs skiljeytan mellan två fluider som rör sig med olika hastighet. I fallet med skog eller annan hög vegetation gäller detta alltså strömningen med låg hastighet i vegetationsskiktet och strömningen med hög hastighet ovanför trädkronorna. Skillnaden i strömningshastighet mellan dessa två skikt ger upphov till en stor vindgradient omedelbart ovan vegetationen och en inflexionspunkt i vindprofilen vilket skapar den turbulens med skalor av samma storlek som vegetationsskiktets djup.

I motsats till fallet med låg vegetation då den största vindgradienten är närmast marken där den lokala turbulensens skalor är mindre, kommer turbulensens skalor att vara mycket större omedelbart ovanför vegetationen vilket medför att similaritetsteorierna inte gäller, åtminstone inte i de lägre delarna av ytskiktet i det s.k. 'roughness sublayer'. Höjden på 'roughness sublayer' är typiskt av samma storleksordning som vegetationens höjd, men beror på hur tät vegetationen är och avståndet mellan träden. Är vegetationen tät och/eller bladverket koncentrerat till de övre delarna av vegetationen minskar djupet på 'roughness sublayer'.

Om ytskiktet når tillräckligt högt upp, t.ex. mer än ca 40 m för 20 m hög skog, gäller Monin-Obukhovs similaritetsteori i de övre delarna av ytskiktet. Under förhållanden med neutral termisk skiktning förväntas vinden variera logaritmiskt med höjden i de övre delarna av ytskiktet även ovan skog. Detta resultat fås dock endast om höjdskalet förflyttas med den s.k. nollplansförskjutningen  $d$ . Vindprofilen kommer då att bestämmas av sambandet

$$U = \frac{u_*}{k} \ln \left( \frac{z-d}{z_0} \right)$$

där  $U$ =vindhastigheten,  $z$ =höjden,  $k$ =von Karmans konstant=0.4,  $u_*$ =friktionshastigheten (ett mått på den vertikala turbulenta transporten av rörelseenergi) och  $z_0$ =skrovlighetslängden. Med mätningar av vinden på flera höjder under neutrala förhållanden kan alltså  $d$  och  $z_0$  i princip bestämmas grafiskt. I praktiken är dock detta inte helt enkelt och det finns olika metoder för detta som sinsemellan ger olika resultat. Typiskt kan man anta att nollplansförskjutningen är 2/3 - 3/4 av vegetationens höjd, så att den för en 20 m hög skog blir 13-15 m, medan skrovlighetslängden för skog ligger på 0.5-1 m. Fysikaliskt kan nollplansförskjutningen tolkas som den nivå i vegetationen där sänkan för rörelseenergi har sin tyngdpunkt.

Vissa resultat pekar på att både  $d$  och  $z_0$  inte bara beror av vegetationens utseende utan även av vindhastigheten. Om vinden ökar minskar  $d$  samtidigt som  $z_0$  ökar. Effekten skulle hänga samman med att vindbyar lättare skulle kunna tränga ned mellan träden i en skog vid höga vindar jämfört med vid låga vindar. Resultatet blir då att friktionsbromsningen ökar (större  $z_0$ )

samtidigt som tyngdpunkten för rörelsmängdssänkan hamnar på lägre höjd (mindre  $d$ ). Eftersom effekten av vindhastigheten på  $d$  och  $z_0$  gör att den ena ökar när den andra minskar kommer den sammanlagda effekten på vindhastigheten på en viss höjd ovan mark dock totalt sett inte att vara lika stor eftersom ett ökande  $z_0$  ger en lägre vind men om samtidigt  $d$  minskar kommer detta att höja vinden om man betraktar en viss höjd över mark. Men detta behöver undersökas närmare, samtidigt som effekterna av skogens höjd och täthet inte heller är enkla att kvantifiera generellt.

## 3.2 Turbulensintensitet

Att en skrovligare markyta genererar mer turbulens än en slätare yta är självklart. Över den skrovliga skogen är det alltså helt normalt att förvänta sig hög turbulensintensitet. Den mekaniskt skapade turbulensen utgör dock endast en av källorna till turbulens. Turbulensintensiteten påverkas även av de termiska förhållandena i atmosfären. Instabil skiktning ger ytterligare en källa som ökar turbulensen, medan stabil skiktning ger en sänka som sänker turbulensnivåerna. Dessutom begränsar en stabil skiktning gränsskiktets höjd så att turbulensintensiteten därmed avtar relativt sett snabbare med höjden jämfört med neutral eller instabil skiktning. Redan på 100 m höjd kan i många situationer turbulensen därför ha reducerats kraftigt jämfört med förhållandena närmare trädtopparna.

I ytskiktet över låg vegetation finns experimentellt framtagna samband som beskriver hur turbulensen varierar med höjden för olika skrovlighetslängder. Därvid utnyttjas Monin-Obukhovs similaritetsteori. Men som sagt ovan är denna inte giltig över hög vegetation, åtminstone inte närmast vegetationsskiktet, varför osäkerhet råder hur turbulensprofilen egentligen ser ut ovan en skog. Enligt similaritetsteorin skulle turbulensintensiteten avta från ca 25 % på 50 m höjd till drygt 20 % på 100 m höjd, men sannolikt är dessa värden för höga i medeltal, framförallt på högre höjder.

De observationer som finns visar på stor spridning i turbulensintensiteten med stora skillnader mellan värdena under olika meteorologiska förhållanden. På 100 m höjd kan strömningen variera mellan nästan laminär med en turbulensintensitet på endast 2-3 % och kraftigt turbulent strömning med värden på 30-40 % för turbulensintensiteten. Medelförhållandena kanske därmed inte ger tillräcklig information. Toppen i fördelningen av turbulensintensiteten kan på 100 m höjd ligga på runt 15 %, medan den på 50 m höjd kan ligga på 20-25 %. Variationerna med höjd kan dessutom som nämnts vara större än vad som teoretiskt beräknas med similaritetsteorin.

## 4 Vindturbiner och produktion

Information om medelvind och turbulens utgör naturligtvis ett viktigt underlag vid konstruktionen av vindturbiner. Detta dels för att kunna göra korrekta last- och hållfasthetsberäkningar, dels för att bestämma vind-effektsamband och därmed göra beräkningar av produktion för olika vindklimat. Stora insatser gjordes inom dessa områden under 1980 och 1990-talen vilket ledde till klassificeringar av vindturbinerna utgående från vissa vindklimatologiska data. En mängd olika lastfall fastslogs vilka skulle ligga till grund för lastberäkningarna.

Det vindunderlag som användes hämtades i detta arbete främst från slättbygder och kustområden, eftersom det främst var i dessa områden som vindkraften byggdes ut. Så småningom kom lokalisering till havs att ställa krav på ett underlag avseende vindarna över hav. Mätprogram initierades i detta syfte, bl.a. vid Bockstigen i havet utanför Näsudden på Gotland.

Under senare år har intresset kraftigt ökat för lokalisering av vindenergi i skogsområden. En viktig orsak till detta är att risken för konflikter med andra intressen är mindre i de mer glesbefolkade skogsregionerna. Ytterligare ökande intresse för skogslandskapet följde efter den nya nationella vindkarteringen som genomförts vid Uppsala universitet och som kom ut i en första version 2006 och andra version 2007. Den visade att även i områden som domineras av skogar kan medelvindarna vara tillräckligt höga för att det ska vara ekonomiskt lönsamt med vindenergi etableringar.

Allmänt hade skogsområden tidigare betraktats som ointressanta ur vindenergisympunkt. Orsaken till svängningen var egentligen inte enbart vindkarteringen i sig utan det faktum att vindturbinerna under åren blivit allt större. Från att under 1980- och 1990-talen ha haft navhöjder på typiskt 30-50 m blev en navhöjd på 80-100 m allt vanligare under 2000-talets första år. På dessa höjder kan även skogslandets vindar vara tillräckliga för att få ekonomi i en etablering där.

Detta hade antytts redan genom mätningar i Emmaboda i sydöstra Småland under tre år i början av 1980-talet, vilka visat en årsmedelvind på 6.9 m/s på 100 m höjd. Eftersom dåtidens vindkraftverk inte var mer än kanske 40 m höga, där medelvinden är under 5 m/s, fanns dock inget intresse för skogslandet i vindenergisammanhang. Skogsområden glömdes bort som potentiellt intressanta.

De kom dock åter att få ett visst intresse i och med att resultaten från den nya vindkarteringen publicerades. Speciellt i topografiskt vindgynnade områden framstod nu åter skogarna som intressanta i vindkraftssammanhang. Detta intresse inleddes i Svealands inland och delar av Norrland där topografin mer uppenbart kan ha en gynnsam effekt på vindklimatet. Men vindkarteringen visade att även i mindre dominant höjdlägen, som på sydsvenska höglandet, kan relativt goda vindförhållanden råda. Vilket alltså stöddes av mätningen i Emmaboda som gjorts 20 år tidigare. Arbetet med att bekräfta detta har inneburit att ett flertal nya vindmätningar på olika platser i skogsområden över hela landet har inletts.

En oro avseende att etablera vindkraft i skogsområden finns dock, vilket antytts i föregående avsnitt. Detta rör dock inte enbart vindklimatet som sådant, d.v.s. om medelvinden är så hög som vissa resultat pekar på och oron för hög turbulens. Istället har det slutgiltiga syftet med vindenergiutbyggnaden, energiproduktionen, kommit att alltmer hamna i fokus.

Man har sedan tidigare vant sig vid att på en plats beräkna produktionen utgående från årsmedelvinden på navhöjd och antagit att fördelningen av vindhastigheten kan beskrivas med en Weibullfördelning. Det finns emellertid farhågor för att detta kan ge en överskattning av den beräknade produktionen. Vissa jämförelser mellan den faktiska produktionen från existerande vindkraftverk och beräkningar enligt den metoden antyder att så kan vara fallet med skillnader på 10-20 %. Det bör då noteras att underlagen från vindkraftverken då egentligen inte är tillräckligt bra för att göra en sådan jämförelse, eftersom drifttiden inte finns dokumenterad på ett tillfredställande sätt. Oftast saknas trovärdiga siffror på drifttiden helt. Även om tidsuppgifter finns är de generellt inte tillgängliga timme för timme så att det är möjligt att korrekt korrigera produktionsbortfall till vind och på så sätt ta fram den produktion som motsvarar vindarna under drifttiden. Utan sådan korrektion för stillestånd underskattas alltid den vind som beräknas utgående från uppmätt produktion.

Detta svarar dock sannolikt inte för hela den skillnad på 10-20 % som noterats vid jämförelser mellan beräkningar utgående från medelvind på navhöjd och uppmätt produktion. Orsaken till den resterande skillnaden kan naturligtvis vara att det modellerade vindklimatet överskattar årsmedelvinden. Då jämförelser mellan uppmätt och modellberäknad medelvind visar att det inte verkar finnas någon systematisk skillnad mellan de två borde det då inte heller finnas någon systematisk skillnad mellan en utgående från modellresultaten beräknad produktion och faktisk produktion. Jämförelser med ett, i och för sig begränsat, antal vindkraftverk visar dock att detta verkar vara fallet.

Orsakerna till skillnaderna verkar alltså inte ligga i att en systematiskt felaktig medelvind på navhöjd använts. Istället verkar det som om det är de använda vind-effekt sambanden som inte är korrekta. Åtminstone fungerar de inte praktiken när de används på vissa platser och/eller under vissa vindklimatologiska betingelser.

En anledning till detta kan vara stor vindgradient så att, speciellt för vindkraftverk med stor diameter, bladen under ett varv kommer att röra sig genom luft med mycket olika vindhastigheter. Detta skulle kunna få till följd att effekten blir mindre än det optimala därför att bladvinkeln inte kommer att vara optimerad för 'rätt' vindhastighet varvet runt. Exakt hur detta kommer att påverka den totala energiproduktionen är emellertid svårt att säga. För små vindturbiner med liten diameter placerade i öppen terräng där vindgradienten normalt är mindre är denna typ av problem också mindre. Ett vind-effekts samband som används tillsammans med vindfördelningen på navhöjd kan här förväntas ge en bra uppskattning av energiproduktionen. Oftast är vind-effekts sambanden framtagna med hjälp av mätningar på sådana platser. Men om ett vindkraftverk placeras i en annorlunda miljö med större

vindgradients kommer sannolikt effekten inte att variera med vinden på samma sätt.

En annan anledning till att angivna vind-effektsamband kanske inte ger en helt sann bild av hur ett vindkraftverk i praktiken lyckas fånga energin i vinden är att olika platser har olika grad av turbulens i vinden. Vid en och samma medelvind kommer vinden energiinnehåll att vara större på en plats med hög turbulensintensitet jämfört med en plats med låg turbulensintensitet. Om ett vindkraftverk kan ta tillvara detta eller inte är inte heller det klart. En osäkerhet kan här vara hur en snedanblåsning i horisontal led påverkar produktionen. Vissa undersökningar pekar på att en viss snedanblåsning faktiskt kan resultera i högre effekt än om vindkraftverket står rätt i vindriktning. Hur detta slår klimatologiskt på en plats med hög turbulens och stora turbulenta variationer i vindriktning är oklart.

Det finns en del studier där effektsamband tagits upp under förhållanden med olika grad av turbulens i atmosfären som visar att en vindturbin faktiskt kan producera mer när turbulensintensiteten ökar. Men det är oklart hur generella resultaten är. Observationer i mer komplex terräng pekar på att det är en kombination av turbulensintensitet och vindgradient som är av betydelse för hur mycket effekt ett vindkraftverk ger vid olika vindstyrkor på navhöjd. Individuell bladreglering skulle kunna vara en metod att ta hänsyn och optimera för inverkan av en stor vertikal vindgradient.

Man kan emellertid konstatera att det sannolikt inte räcker att ha bra kunskap om medelvindklimatet på navhöjd för att få bra kunskap om energiproduktionen. Den vindklimatologiska beskrivningen bör även innehålla statistisk information om vindgradient och turbulens. Samtidigt är det idag osäkert hur denna information bör användas för att beräkna produktionen för olika typer av vindkraftverk vilka sinsemellan kan reagera olika på dessa saker. Att experimentellt bestämma vind-effektsamband är emellertid inte helt enkelt i de mer topografiskt komplexa terrängtyper som är typiska för skogslandskap. En viktig orsak till detta är om den mätta vinden verkligen är densamma eller hur representativ den är för platsen där vindkraftverket står.

## 5 Is

Ytterligare en faktor som påverkar vindkraftverkens förmåga att fånga vindens energiinnehåll är nedisning. Om bladen på vindturbinen täcks med is och/eller rimfrost ändras deras aerodynamiska egenskaper och följderna blir att deras effektivitet avseende att utnyttja vindens energi och omvandla den till elektricitet minskar. Blir isbeläggningarna stora kan också lasterna på vindkraftverket bli så stora att turbinen tvingas nödstoppa och dess livslängd minska. I vissa situationer kan även isbitar eller isblock lossna från turbinen och slungas iväg, vilket kan medföra fara för de som vistas i dess närhet. Om ett vindkraftverk ligger i ett område där människor vistas kan det därför vara nödvändigt att stoppa det i vädersituationer med risk för nedisning.

Risken för isbildning på vindkraftverk är naturligtvis kopplad till de meteorologiska och klimatologiska förhållandena i ett område. I Sverige finns risk för nedisning i princip i hela landet. Mindre i södra Sverige, möjligen med undantag för sydsvenska höglandet, medan man för norra delen av landet, från inre och norra Svealand och norrut, kan räkna med att det hör till det normala att vintertid ha mer eller mindre långa perioder med nedisningsrisk.

Eftersom intresset för att bygga ut vindkraften i de norra delarna av landet ökat kraftigt under senare år, har problemen som sammanhänger med isbildning kommit att hamna alltmer i fokus. Utbyggnaden riskerar att bromsas upp i områden med risk för isproblem som en följd av bristande kunskaper både avseende tekniska lösningar för att hantera problemen och avseende klimatologisk information rörande nedisningsriskerna. Mer storskaliga riskbedömningar finns som resultat i de första karteringarna med information om antal dagar med nedisning per år, men ingen mer detaljerad kartering finns. Detta kan delvis tillskrivas en brist på insatser på området, men sammanhänger också på bristande kunskaper om och observationer av nedisning.

Tidigare kopplades nedisning oftast till de enklare parametrarna relativ luftfuktighet och temperatur, men studier under senare år har visat att enbart dessa parametrar inte utgör ett bra mått på risken för isbildning. Sikten – atmosfärens genomskinlighet – har istället framförts som en viktig styrande faktor. I dessa sammanhang är sikten sannolikt starkt kopplad till mängden vattendroppar (eller ispartiklar) som svävar i luften. Mängd och, eventuellt, storlek av dessa svävande vattendroppar kan antas vara primärt avgörande för risken för isbildning på t.ex. vindkraftverk och master, tillsammans med temperatur och vind.

Rent observationsmässigt är det svårt att med stor noggrannhet mäta relativa fuktigheten vid låga temperaturer. Typisk kan man räkna med osäkerhet på 2-5 %. Med att mäta hur mycket flytande (eller fast) vatten det finns i luften är inte heller det helt enkelt. Vidare är detektorer för att mäta nedisning ett problem. Flera olika tekniker finns och provas här, men tillförlitligheten är osäker varför det finns behov av utvecklingsarbete och tester. Fungerande mätinstrument är naturligtvis ett krav för att kunna värdera resultat från modeller vad det gäller nedisning.

Sedan länge finns algoritmer i storskaliga vädermodeller, typ HIRLAM hos SMHI, för att ge prognoser för nedisning som underlag framförallt för flygtrafiken. Dessa modeller är dock inga gränsskiktmodeller. De parameteriserar ganska grovt allt som händer i det atmosfäriska gränsskiktet. Därför riskerar man med denna typ av modeller att missa väsentlig information om kopplingen mellan lokal terräng och gränsskiktet som i sin tur kan vara väsentlig för nedisningsprocesserna.

De processer som styr kondensation av vattenånga är naturligtvis väsentligt att ha kunskap om. Här kan också finnas kopplingar till hur förorenad luften är, t.ex. via halten partiklar av olika storlek. Men vid modellering av nedisning är det inte bara dessa kondensationsprocesser som bör vara i fokus, tillsammans med vind- och temperaturförhållanden, utan även generellt alla processer som påverkar förhållandena i gränsskiktet.

Att studera nedisning av vindturbiner innebär att man söker information rörande isbildning på höjder mellan 50 m och 150 m. Denna del av atmosfären påverkas i hög grad av turbulensen och de turbulenta transportererna i gränsskiktet. För att korrekt kunna modellera kondensation på dessa höjder måste modellen kunna hantera vertikala flödena av värme och vattenånga, tillsammans med flödet av rörelseenergi för att kunna beräkna vinden. Fokus bör därför även ligga på modellens parameterisering av turbulensen. Det kan visa sig otillräckligt att använda en modell som endast i grova drag beskriver de turbulenta flödena. En mesoskalemodell med s.k. 'higher-order turbulence closure' (t.ex. MIUU-modellen eller MM5/WARF), som explicit beräknar turbulensen, är att föredra eftersom den löser upp de vertikala variationerna i strömning och flöden. En modell av denna typ borde ge störst tilltro till resultaten av en kartering av nedisningsrisken över landet.

## 6 Vakeffekter

Kunskap om vakar bakom vindkraftverk, d.v.s. hur vinden modifieras bakom dessa som en följd av energiuttaget, är ett område som även det är kopplat till de meteorologiska förhållandena. Den turbulens som skapas av de i luftströmmarna roterande bladen är naturligtvis en viktig komponent som påverkar hur snabbt det underskott i vindhastigheten som bildas bakom vindturbiner fylls igen. Men denna turbingenererade turbulens samverkar med den naturliga atmosfärsturbulensen som alltid finns i gränsskiktet. Den sammanlagda effekten blir att vakarna lever kvar i olika hög grad beroende på hur stora de totala turbulenta transporterna av rörelsemängd från vakens omgivning in i densamma blir.

Det är alltså på detta sätt meteorologin och processer som påverkar den naturliga turbulensen i gränsskiktet kommer in. Generellt sett kan man säga att under förhållanden med liten naturlig turbulens i atmosfären kommer en vak att fyllas igen långsamt och leva kvar på längre avstånd bakom den vindturbin där den skapades, medan stor naturlig turbulens medför en snabbare utfyllnad av vaken och den kommer då inte att fortleva så långt bakom vindturbinen.

I de enklaste modeller som beskriver hur underskottet i vindhastighet varierar med avståndet bakom vindturbinen är turbindiametern ett vanligt längdmått. Dessa enklaste modeller ger en rimlig information om förloppet och man kan bilda sig en hygglig bild av hur stor påverkan av vaken blir på en bakomvarande turbin.

Men undersökningar om gjorts visar att en förbättrad bild erhålls om det fysiska avståndet bakom den vindturbin som skapar vaken ersätts med transporttiden. Det betyder att med i övrigt likartade förhållanden kommer en vak på ett visst avstånd att vara större i fallet med en hög vindhastighet jämfört med en låg. Vid låg vindhastighet kommer ju den omgivande turbulensen att hinna med en transport av rörelsemängd in i vaken under längre tid fram till ett givet avstånd jämfört med om vindhastigheten är högre. Tiden som de turbulenta transporterna hinner verka är en avgörande faktor som man bortser från i de allra enklaste modellerna.

En annan faktor som man bortser från i de enklaste modellerna, åtminstone explicit, är turbulensens storlek eller turbulensintensiteten. Med hög turbulensintensitet kommer de turbulenta transporterna av rörelsemängd in i vaken från den omgivande luften med högre vindhastighet att bli effektivare. De enklaste modellerna tar inte heller hänsyn till att den naturliga atmosfäriska turbulensen är starkt beroende av på vilket sätt temperaturen varierar med höjden i gränsskiktet, den s.k. termiska skiktningen. Den kopplingen gör att vakeffekterna kan variera kraftigt med tid på dygnet och/eller tid på året.

För ett antal år sedan blev frågan om vakutbredningens beroende av turbulensintensitet aktuell i och med att intresset för vindkraft till havs ökade. Man beförde att i det lågturbulenta havsgränsskiktet, där strömningen ibland t.o.m. kan vara närmast laminär om temperaturskiktningen är stabil, skulle

vakarna leva kvar mycket långa sträckor och därmed påverka nedströms liggande vindturbiner i mycket högre utsträckning än vad som normalt antagits för landbaserade vindparker. Detta har också konstaterats kunna vara fallet vid studier t.ex. i danska vindparker. De sammanlagda vakeffekterna från en stor vindpark som Hornsrev kan ses i vindarna nedströms parken i tiotals kilometer.

Den andra ytterligheten vad det gäller den naturliga turbulensens storlek utgör skogsterräng. Här har intresset ökat markant under de senaste åren. I motsats till de vanligen låga turbulensnivåerna över hav, är turbulensen över skog hög i många fall. Risken finns få att man överskattar vakarnas livslängd i vindparker i skogsområden om vakmodellerna inte tar hänsyn till den naturliga bakgrundsturbulensens storlek i beräkningen av vakeffekterna.

Även i de mycket avancerade modeller som har börjat användas alltmer finns ofta brister i den meteorologiska kopplingen. Även om de med hög rumslig upplösning löser Navier-Stokes ekvationer, vilka beskriver den turbulenta vinden, och återger t.ex. de spetsvirvlar som skapas av turbinbladen och vakarnas principiella struktur och utbredning väl, är det ännu osäkert i vilken utsträckning de kan ge tillräckligt underlag för en korrekt statistisk bild av vakarnas utbredning och utfyllnad.

En intim koppling mellan de meteorologiska förhållandena i gränsskiktet och vakmodelleringen måste alltså finnas för en korrekt beräkning av vakeffekterna. Dessutom tillkommer osäkerheter med att modellera vakeffekterna från multipla vakar. Även om vaken bakom enskilda vindturbiner kan modelleras med hygglig noggrannhet så ökar osäkerheterna avseende hur vakarna ser ut när vinden passerat två eller flera vindturbiner. Här görs en hel del forskning men de modeller som testats ger ofta inte en helt övertygande överensstämmelse vid jämförelser med mätningar. Den mer eller mindre bra överensstämmelsen skulle även här kunna hänga samman med brister i kopplingen till de meteorologiska faktorer som påverkar den naturliga turbulensen och de turbulenta transporterna i gränsskiktet.

## 7 Ljudutbredning

Ljudutbredning i atmosfären påverkas i hög grad av de meteorologiska förhållandena. Främst är det de vertikala gradienterna av temperatur och vind som är betydelsefulla. I de flesta sammanhang och i de modeller som används för praktiska ändamål avseende ljudutbredning tar man idag dock inte explicit hänsyn till detta. Man har vissa allmänna riktlinjer för de meteorologiska förhållanden som ska råda när en ljudmätning genomförs, men modellerna inkluderar i princip inte hur t.ex. ljudutbredningen påverkas som en följd av dygns- och årstidsvariationerna i temperatur- och vindgradienterna. Osäkerhet råder därför om hur väl de framräknade ljudnivåerna stämmer överens med verkligheten. Det kan vara både över- och underskattningar. Dessutom beräknas enbart en medelnivå vilken kanske inte alltid är representativ för den potentiella störning som kan upplevas i omgivningarna till en vindpark eller ett vindkraftverk.

Frågan om störande ljud från vindkraftverk dyker ständigt upp i debatten. Speciellt över vatten har diskussioner förts om att 'cylindrisk' ljudutbredning skulle kunna ge högre ljudnivåer även på långa avstånd. Mätningar har gjorts över Kalmarsund från Utgrundens fyr till Öland 9 km bort. Resultaten visar att den omdebatterade modell som Naturvårdsverket rekommenderar för beräkning av ljudutbredning från vindkraftverk sannolikt överskattar ljudnivån från vindkraftverk till havs. Resultaten är dock enbart baserade på mätningar från en plats gjorda under försommaren (juni månad), varför det är svårt att bedöma hur allmängiltiga de är. Mätningar skulle därför behöva göras på fler platser och under andra årstider, vilket är både tidsödande och kostsamt.

En alternativ metod vore att utnyttja avancerade modeller avseende både de meteorologiska förhållandena och ljudutbredning. Avseende ljudutbredning så har t.ex. FOI utvecklat en strålgångsmetodik för ljudutbredning i atmosfären. Avseende meteorologin har inom projektet avseende karteringen av vindpotentialen över Sverige en avancerad meteorologisk modell (MIUU-modellen) använts. Som ett resultat av vindkarteringen finns en rikstäckande databas som kan utnyttjas för att ta fram statistik rörande vind- och temperaturgradienter med 1 km horisontell upplösning.

Som ett första steg verifieras att denna meteorologiska databas kan användas för att beräkna de statistiska egenskaperna hos ljudutbredningen på en plats. Detta göra genom jämförelser med den avancerade ljudutbredningsmodellen.

Klimatologisk statistik över ljudnivåerna skulle därefter kunna beräknas över hela Sverige med 1 km horisontell upplösning genom att utnyttja statistik från den meteorologiska databasen framtagen under vindkarteringen. Resultaten skulle då inte enbart vara begränsade till ljudets medelnivåer utan även inkludera sannolikhetsfördelningar för att ljudnivån ska överskrida vissa gränsvärden. Även dygnsvariationer och årstidsvariationer för sannolikhetsfördelningarna skulle kunna bestämmas. D.v.s. hur ofta och när olika ljudnivåer inträffar.

## 8 Extremvindar

Extrema vindbyar av olika varaktighet och för olika återkomsttider, t.ex. 1 år eller 50 år, används som underlag för lastberäkningar avseende både statiska och dynamiska laster. Underlag rörande extremvindar är svårt att få rent experimentellt, eftersom det skulle kräva homogena vindmätningar med hög tidsupplösning (1 s) under mycket lång tid.

Alternativet är att beräkna sannolikheterna för extremvindarna genom att utnyttja teoretiska metoder baserade på teorier för extremvärdesfördelningar. Olika typer av metoder för extremvärdesanalys ger dock inte helt identiska resultat. En 50-årsvind kan kanske enligt en metod ligga på 30 m/s, enligt en annan metod på 35 m/s. Att experimentellt belägga att den ena metoden ger mer korrekta värden än den andra är emellertid svårt, för att inte säga omöjligt med tanke på de mycket små sannolikheterna och de mycket långa observationsserier som skulle krävas för detta.

Nya studier avseende extremvindar presenteras, men de domineras av analyser där olika metoder testas och resultaten jämförs. Det är sannolikt svårt att komma till speciellt mycket bättre resultat än vad som kan åstadkommas med gängse teorier avseende extremvärdesfördelningar. Det är dock viktigt att på ett bra sätt hantera den ökade spridningen i vindarna som orsakas av turbulensen när extremvindar av kortare varaktighet studeras.

Då medelvindfördelningen ofta väl kan beskrivas med en exponentialfördelning, den s.k. Weibullfördelningen, utgör den s.k. dubbelexponentialfördelningen en teoretiskt stabil grund för att beräkna extremvindar. Den är väl beprövad och har använts i ett antal former under de senaste decennierna. Den ökade betydelse av turbulens i samband med beräkning av extremvindar med allt kortare varaktighet kan inkluderas genom att använda sig av vindspektra som visar fördelningen på olika frekvenser av vindens turbulenta kinetiska energi (variansen), d.v.s. fördelningen på olika stora turbulenselement. När extremvindar för olika varaktighet ska beräknas bör alltså en allt större och större del av turbulensspektrumets varians inkluderas när varaktigheten minskas. Denna metod har visats ge goda resultat vid jämförelser med mätningar, även om sådana jämförelser är svåra att göra på grund av de begränsade längderna på mätserier med hög tidsupplösning.

## 9 Vindprognoser

Som en följd av att en ökande mängd vindkraft kommer in på det svenska elnätet kommer efterfrågan på bra lokala korttidsprognoser avseende vind och produktion att öka. Detta har redan skett i länder som Danmark och Tyskland. Där finns redan idag fungerande prognostjänster som anlitas och vars resultat sedan utgör vägledning inför handeln på elbörsen.

De lokala vindprognoserna bygger naturligtvis i grunden på de storskaliga vädermodellernas prognoser. Om dessa visar sig felaktiga är det omöjligt att göra en bra lokal vindprognos. Detta problem är inte heller något specifikt för vindenergiprognoserna utan ett allmänt väderprognosproblem.

Med ett bra storskaligt prognosutfall finns däremot möjligheter att förbättra en lokal vindprognos. Vanligen görs detta idag genom att dels göra lokala beräkningar med en högre upplösning, dels 'lära upp' det lokala prognosystemet genom jämförelser med tidigare utfall för att på så sätt förbättra prognoserna allt mer. Tekniken fungerar bättre ju fler verifieringsmöjligheter som finns, men de saknar en atmosfärfysikalisk koppling. De är rent statistiska till sin natur och förlitar sig alltså på ett bra statistiskt underlag.

En alternativ metodik är att göra lokala modellberäkningar där modellen innehåller den fysik som påverkar de lokala vindförhållandena. I och med att de storskaliga vädermodellernas upplösning ökas mer och mer, kommer även detta primära underlag att inkludera mer och mer av de lokala faktorer som påverkar de lokala vindarna. Men vädermodellerna är inga gränsskiktsmodeller, d.v.s. de förenklar kraftigt de fysikaliska processer som styr vindarna lokalt på de för vindenergi intressanta höjderna. För att förbättra de lokala vindprognoserna behöver s.k. mesoskaletmodeller användas, modeller av den typ som MIUU-modellen och MM5/WARF är representanter för. Det börjar bli alltmer realistiskt att faktiskt köra sådana modeller för att förbättra lokala vindprognoser. De drivs då på ränderna för det mindre modellområde beräkningar görs av resultaten från de mer storskaliga vädermodellerna.

Denna metod är att rekommendera inför framtiden. Ett bra alternativ är också att utnyttja en databas av tidigare genererade lokala väderparametrar, t.ex. vind, temperatur och turbulens. Databasen måste då ha genererats med högupplösta modellberäkningar, minst 1 km horisontell upplösning, där en modell av mesoskaletyp använts. För varje storskaligt genererad vädersituation byggs algoritmer upp för att ur databasen välja den situation som bäst överensstämmer med det storskaliga väderläget. Databasen ger sedan de lokala variationerna i t.ex. vindarna som inte löses upp i det storskaliga underlaget. Sannolikt kan ett likvärdigt prognosunderlag fås på detta sätt som om den mesoskaliga gränsskiktsmodellen körs 'på riktigt' för varje prognostillfälle.

Ett system som bygger på denna teknik är redan i drift inom ramen för den verksamhet avseende beräkningar av spridning av luftföroreningar som bedrivs av 'Luft i väst', Luftvårdsförbundet för Västra Sverige, det s.k. Alarm-

systemet (<http://liv.vg/alarm.htm>). Primärt har därvid underlaget för att hitta rätt modellfält här utgjorts av meteorologiska mätningar i några master och med några sodar i området.

Systemet testas nu även avseende prognoser. Storskaliga prognoser används då som underlag istället för lokala mätningar, för att på så sätt förbättra de lokala prognoserna där småskaliga effekter således kommer att inkluderas via den lokala databasen. Metoderna behöver testas och förfinas avseende hur modellberäkningarna nedskalas från den globala skalan till en regional skala, innan den slutliga lokala prognosen genereras via den mesoskaliga modelldatabasen. Preliminära resultat och tidigare erfarenheter från driften av Alarm-systemet visar att metodiken har stor potential för att optimera den lokala förbättringen av vindprognoserna på ett fysikaliskt sätt, för att på så sätt kunna möta det kommande behovet inom produktionsplaneringen.

## 10 Vindmätningar och vindindex

I de flesta fall förlitar man sig idag inte enbart på modellberäkningar när större vindkraftprojekt planeras. Vindmätningar under en period på 1-2 år görs innan slutgiltigt beslut tas av de stora investeringar som behöver göras. Trots att modellberäkningarnas kvalitet och trovärdighet stadigt förbättras med tiden, kan det vara klokt att komplettera med vindmätningar. Det är dock inte med nödvändighet så att en mätning i sig ensam ger ett mer korrekt vindunderlag än vad en modellberäkning ger. Detta sammanhänger framförallt med att en kortare mätperiod inte behöver vara representativ för det mer långsiktiga vindklimatet. Därför måste en s.k. normalårskorrektion göras av mätningarna innan de används som underlag för produktionsberäkningar. Detta kan göras med t.ex. ett vindindex som underlag, vilket alltså ska relatera en kortare period till ett långtidsmedelvärde. Osäkerheten i ett sådan normalårskorrektion ökar naturligtvis ju kortare mätperioden är, men kan typiskt sägas vara av samma storleksordning som osäkerheterna i en modellberäknad vindklimatologi under förutsättning att en fysikaliskt bra gränsskiktmodell använts.

Att mäta vinden är i sig inte heller det helt trivialt. Anemometrar av skålkorstyp är idag de vanligaste instrumenten i vindenergिसammanhang. Även om dessa är ganska robusta till design är de ändå känsliga mätinstrument som kräver varsam hantering. En mindre skada på skålkorset kan innebära felaktiga mätningar. Det är även viktigt med korrekt montering på bommar som i sin tur monteras på master. Annars är risken stor att aerodynamiska störningar försämrar mätningarnas kvalitet avsevärt. Råd om hur montaget bör göras finns i ett IEC-dokument, men det är viktigt att även betona risken från störningar av antenner och paraboler som kan finns i master om man hyr mätplats i befintliga kommunikationsmaster. Det är viktigt av att ha 'mycket luft' mellan anemometer och mast/antennerna. Även om masternas konstruktion och täthet kan variera en hel del, är en bra tumregel att bommarna om möjligt ska vara så långa att anemometern hamnat minst 6-7 mastsidor ut från masten, samtidigt som vindmätaren placeras på ett vertikalt rör som gör att den sitter 10-15 bomdiametrar över bommen.

Ytterligare problem finns i samband med mätningar i kalla klimat. Dels kan det röra sig om att lagringen i anemometrarna kan vara temperaturkänslig, men framförallt är det risken för nedisning och/eller fastfrysning av anemometrarna som kan vara ett stort problem. Därför rekommenderas ofta uppvärmda anemometrar. I första hand uppvärmning av lagren, men om nedisningsrisken bedöms stor under vintermånaderna bör skålkorsen också värmas.

Att rensa mätningar som drabbats av nedisning är inte helt enkelt. Perioder med fastfrosna skålkors är i och för sig oftast enkla att identifiera, men om det enbart bildas is eller frost på kopporna är det näst intill omöjligt att med säkerhet identifiera felaktiga data. Beroende på hur is/frostbeläggningen på skålkorsen ser ut kan dessutom effekten bli både att mätningen kan ge för höga eller för låga vindar. I vissa fall kanske dessa fel tar ut varandra i det

långa loppet, vilket visade sig vara fallet i mätningar från Suorva i Lappland. Men detta är långtifrån alltid säkert.

Alternativ till skålkorsanemometrar vad det gäller instrument som monteras i master utgör dels propelleranemometrar, dels ultraljudsanemometrar. De senare har den fördelen att de inte innehåller några rörliga delar, varför inget mekaniskt slitage finns. De är dock lika drabbade av nedisning som skålkorsanemometrar om de inte har uppvärmning. Möjligen kan det vara lättare att identifiera is/frostbeläggning om denna är så tjock att ljudpulserna inte går igenom.

Propelleranemometrar har även de liknande problem som skålkorsanemometrar, men har den fördelen att de i ett instrument kombinerar vindhastighet och vindriktning. De rekommenderas dock av någon anledning inte i vindenergisammanhang, trots att de är mycket bra instrument. För båda typerna av anemometrar kan skillnader förekomma i hur de reagerar på snedanblåsning. För propelleranemometern gäller detta både i vertikal och horisontell led om vindfanan inte hinner med att rikta in den mot vinden. För skålkorsanemometern gäller det enbart vertikalvindar. Vissa typer reagerar olika på om vindarna kommer snett uppifrån eller snett nedifrån.

En annan faktor som kan ge skillnader i mätningarna är hur anemometern reagerar på byighet i vinden. Den kanske snabbt reagerar på en ökande vind, men mindre snabbt på en avtagande vind. Detta leder till vad som kallas 'over-speeding', d.v.s. anemometern mäter en för hög medelvindhastighet. Problemet var stort för 20-30 års sedan och mer, då en over-speeding på 10 % inte var ovanlig. Moderna anemometrar har dock skålkors som är utformade så att de ger en mycket liten over-speeding. De sammanlagda skillnaderna i hur anemometrarna reagerar på snedanblåsning och turbulens kan dock även idag ge skillnader på någon procent i uppmätt medelvindhastighet.

Behovet av alternativ till vindmätning i master har kommit att diskuteras alltmer under senare år. I samband med att vindturbinerna blivit högre och högre har också önskemålen om mätningar på högre höjder ökat. Men med höga master ökar kostnaden för mätningen avsevärt. De alternativ som finns idag är sodar och lidar. Båda instrumenttyperna är mättekniskt mycket avancerade och bygger på att en signal som skickas upp i atmosfären studsar tillbaka och kan detekteras av instrumentet. Den uppmätta ekosignalen har en liten dopplerförskjutning som svara mot den hastighet som luften rör sig med på den höjd varifrån ekot kommer.

I sodarns fall sker mätning med en ljudpuls, för lidarn är det elektromagnetisk strålning (ljus) som används. Ljudet sprids och ger ett eko tillbaks mot jordytan genom ett det finns turbulens i atmosfären, i de flesta moderna sodarinstrumenten är det fluktuationer i temperaturen som utnyttjas. Ljuset som sänds ut av lidarn kan studsar tillbaka mot jordytan när det finns stoft eller liknande i atmosfären, vilket det nästan alltid gör i verkligheten. Turbulensstrukturerna respektive stoftet antas röra sig med vinden varför ekots frekvens kommer att dopplerförskjutas och man kan bestämma rörelsehastigheten, d.v.s. vinden. Görs mätningar i olika riktningar kan slutligen både vindens hastighet och riktning bestämmas.

Det har länge rått tveksamhet i hur bra dessa fjärranalysmätningar är. Tester och jämförelser med mätningar i master har dock visat att åtminstone vissa av de modernaste instrumenten håller hög kvalitet. De utgör därför ett mycket intressant alternativ till mastmätningar. Dessutom ger de ofta mätningar upp till över 100 m höjd. Man kan därför tänka sig att komplettera mätningar i en mindre mast på kanske 60 m höjd med t.ex. sodarmätningar som då ger den samtidiga profilen upp till dubbla masthöjden eller mer. Kostnaden för mastmätningen hålls då nere.

Samtidigt är det betydligt lättare att flytta en sodarutrustning till en ny mätplats än vad det är att flytta en mast vilket också gör sodarn till ett intressant alternativ. Man kan tänka sig ett upplägg där en mastmätning på en central plats kompletteras med sodarmätningar under några månader på ett antal platser i mastens omgivning för att få information om vindklimatets variationer inom ett mindre område.

I samtliga fall är det dock viktigt att inte begränsa mätperiodens längd för mycket. Minst ett års mätdata, helst två, är att rekommendera. Även om kortare mätserier på några månader kan accepteras för fallet med en central mast som har en längre serie men där mätningar med t.ex. sodar görs på olika platser i dess närhet. Detta under förutsättning att god korrelation erhålls mellan sodarmätning och mast samt att alla vindriktningar finns väl representerade i data.

# 11 Pågående och framtida forskning

## 11.1 Resultat från Vindforskprogrammet

Inom Vindforskprogrammet anslogs under perioden 2006/08 2.5 Mkr till forskning inom området vid Uppsala universitet, Institutionen för geovetenskaper, rörande tre projekt.

### *V-114 Vindindex*

Vindindex används i många sammanhang för att relatera vindenergi-produktion under en begränsad tid till förhållanden under en längre tid. Man brukar prata om 'normalårskorrigerig'. Motsvarande normalårskorrigerig är också väsentlig att göra för att kunna utnyttja vindmätningar gjorda under kortare tider. Det naturliga har därvid varit att först leta fram siffrorna ur den svenska driftstatistiken. Den har dock den begränsning att endast ett värde på vindindex finns för hela Sverige, medan de geografiska variationerna är stora. En jämförelse med motsvarande danska statistik visar också på mycket stora skillnader. Behovet att regionalisera vindindex är stort. Målet med projektet som pågår till december 2008 är att utarbeta en ny metodik för att beräkna vindindex för Sverige samt att bestämma detta index regionalt.

### *V-115 Statistisk analys av resultaten från den svenska vindkarteringen och nedskalning av resultaten*

Projektet 'Kartering av vindpotentialen i Sverige' har producerat en stor databas av meteorologiska parametrar över hela Sverige med 1 km horisontell upplösning. Denna databas utnyttjas för att extrahera ytterligare i vindenergisammanhang viktig statistisk information. Denna utgörs av Weibull-parametrar totalt sett och sektorsvis rörande vindriktning, extremvindar för 50-100-årsperioder avseende olika medelvärdestider från 1 s till 1 tim, information om vindens turbulensintensitet, samt avseende vertikal vindskjuvning. Metoder att öka upplösningen i vindkarteringen från 1 km till 100 m tas fram. Dessa kommer att bygga på information om vinden på 1 km skala, vilken appliceras i modeller som ger den högre upplösningen. Projektet pågår till december 2008. Den nya statistiska informationen kommer därmed att finnas tillgänglig via internet.

### *V-120 Meteorologiska mätningar i höga master*

Meteorologiska långtidsmätningar i höga master är betydelsefulla för vår kunskap om vindenergi-potential och vindens statistiska egenskaper. Speciellt avseende vindunderlag för extrema förhållanden är det nödvändigt att mätningarna görs under långa tidsperioder för en tillfredställande kartläggning

av de små sannolikheterna för sällsynt förekommande extremhändelser. Att upprätthålla långtidsmätningar har också stor relevans rörande möjliga klimatförändringar och dessas eventuella effekter på vindklimat och vindenergipotential. Även studier av 'normala' variationer i vindpotentialen kräver tillgång till kontinuerliga mätningar av vindklimatet under lång tid. Mätningar drivs inom projektet på tre platser i Sverige: Näsudden och Östergarnsholm på Gotland och Suorva i Lapplandsfjällen. Projektet avslutade i december 2007, men mätningarna rullar tills vidare på.

## 11.2 Framtida utveckling

I ett fortsatt program för forskning och utveckling inom området vindkrafts-meteorologi finns behov av insatser inom följande områden:

1. Vindkartering med hög rumslig upplösning över begränsade områden som en vindpark. Detta kan göras med olika typer av modeller men tillgången på i rummet högupplösande vindmätningar för att verifiera resultaten behöver ökas.
2. Kunskaperna om vinden över skog behöver fördjupas. Osäkerhet finns avseende hur trädens höjd och inbördes avstånd påverkar vindarna via nollplansförskjutning och skrovlighetslängd. Speciellt avseende hur en regional bedömning kan göras i heterogena skogsområden.
3. Is på bladen utgör ett allvarligt problem i vissa områden och kan ge kraftigt försämrad produktion. En noggrann kartläggning av nedisningsklimatet behöver göras.
4. Produktionen från en vindpark påverkas av vakeffekter. I och med utbyggnad i områden med mycket olika klimat, som hav-skog eller slättberg, ökar vikten av att de modeller som beskriver vakarna inkluderar de meteorologiska effekterna av atmosfärens stabilitet och turbulens.
5. Produktionsberäkningar baserade enbart på vinden i navhöjd har visat sig otillräcklig beroende på inflytande av både turbulens och vindgradient. Behov finns att i vind-effektsambanden inkludera dessa beroenden.
6. Ljudutbredning i atmosfären är starkt kopplad till gradienter av temperatur och vind, vilket de modeller som används idag för beräkning av ljudutbredning inte inkluderar på ett tillfredställande sätt. Man bör inte heller enbart beräkna medelnivåer utan även hur ofta och när olika ljudnivåer inträffar. Detta kan göras utgående från den meteorologiska databas som finns tillgängliga efter den nationella vindkarteringen.
7. Långtidsmätningar av vind och andra meteorologiska parametrar med hör tidsupplösning. Dessa utgör ett viktigt underlag för normalårskorrekationer, studier av förändringar i vindklimatet, samt för studier av extrema vindhändelser och verifiering av teoretiska extremvärdesfördelningar.
8. Behovet av lokala vind- och produktionsprognoser ökar i takt med att andelen vindkraftsel ökar. Tillgängliga lokalprognoser baserar idag till stor del på statistisk analys av tidigare utfall. Möjligheter finns till förbättringar om de lokala prognoserna baseras på högupplösta resultat från en mesoskalemmodell.