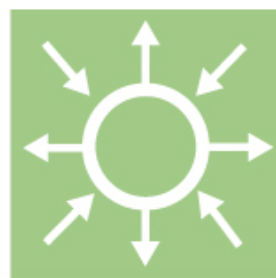


Forskning för mer och bättre vindkraft

Vindforsk-II syntesrapport

Elforsk rapport 08:46



December 2008

Forskning för mer och bättre vindkraft

Vindforsk-II syntesrapport

Elforsk rapport 08:46

December 2008

Förord

Vindforsk II är ett samfinansierat svenskt program för grundläggande och tillämpad vindkraftsforskning. Det 3-åriga programmet Vindforsk II har pågått sedan 2006 och löper fram till den 31 december 2008. Programmet har en total omslutning på cirka 45 miljoner kronor.

Denna rapport innehåller dels en översiktlig sammanfattning av verksamheten och dels själva syntesrapporten med en mer utförlig redovisning av forskningen inom programmets områden. I rapporten finns även omvärldskommentarer och synpunkter på behovet av forskning inom ett antal verksamhetsområden.

Vindforsk har haft projekt inom de flesta forskningsområden som behandlas i rapporten men inte inom alla. Utomliggandeområden har tagits med för att göra rapporten mer fullständig inför diskussioner om framtida forskningsbehov.

Parterna bakom programmet är Svenska staten (genom Energimyndigheten) och svensk industri (representerad av såväl energiföretag som tillverkningsindustrin). I programmet har även norska energiintressen deltagit. Energimyndigheten finansierar grundforskningsprogrammet samt 40 procent av det tillämpade programmet som sedan industrin finansierar resten av.

En styrelse bestående av 10 ledamöter med representanter från finansiärerna har styrt och lett arbetet. Vindforsk har administrerats av Elforsk AB.

Föreliggande skrift baseras på underlagsrapporter, som är tillgängliga genom Vindforsk:

Nils Andersson	Stor andel vindkraft ur ett marknads- och teknikperspektiv
Åsa Elmqvist	Planering och tillstånd
Hans Bergström	Meteorologi
Åsa Elmqvist	Miljöeffekter
Martin Almgren	Ljud från vindkraftverk
Torbjörn Thiringer	Elsystem för vindkraftsanläggningar
Åke Larsson och Michael Lindgren	Anslutning av vindkraftsanläggningar

Skriften har redigerats av Staffan Engström, som även svarat för avsnitten om Vindforsk, internationell forskning, effekter på tekniska system, kallt klimat, vindkraft i skog, konstruktion samt drift och underhåll. Skogsavsnittet baseras på en rapport av Staffan Engström och Jonathan Hjort.

Sammanfattningen har redigerats av Vindforsk IIs styrelse.

Varje områdesbeskrivning (kapitel i rapporten) har likartat upplägg och beskriver i tur och ordning resultatet av forskningen, omvärldsläget och framtida utveckling.

I omvärldskapitlen beskrivs kunskapsläget i relation till pågående forskning och vindkraftutveckling. I kapitlen om framtida utveckling beskrivs behoven av framtida FoU-insatser med förslag på prioriterade insatser. Förhoppningen är att rapporten ska utgöra en bra grund för den som vill orientera sig om kunskapsläget och frågeställningar inom respektive område och därmed bli ett värdefullt underlag vid diskussioner om inriktning på framtida insatser.

Vindforsk II tackar beslutsfattare, utredare, forskare och alla som genom eget aktivt arbete, drivit frågor, lämnat synpunkter eller på annat sätt fört vindkrafttekniken framåt.

Stockholm december 2008

Anders Björck

Vindforsk programsekretariat

Inledande text och sammanfattning

Vindforsk II

Vindforsks program för forskning och utveckling inom vindkraftsområdet sträcker sig över treårsperioden 2006 – 2008. Det är uppdelat i en grundläggande och en tillämpad del. Den grundläggande forskningen finansieras helt av Energimyndigheten medan den tillämpade delen finansieras tillsammans med industrin. Omfattningen för hela perioden är cirka 45 miljoner kronor.

Programmets syfte är att generera kunskap som underlättar utbyggnaden av vindkraft och dess integration med kraftsystemet. Vindforsk täcker inte hela vindkraftsområdet utan är fokuserat på forskningen kring teknisk utveckling av kraftverken och deras samspel med den tekniska miljö i vilken de arbetar. Utförare är i allt väsentligt högskolor, forskningsinstitut, konsulter och vindkraftaktörer.

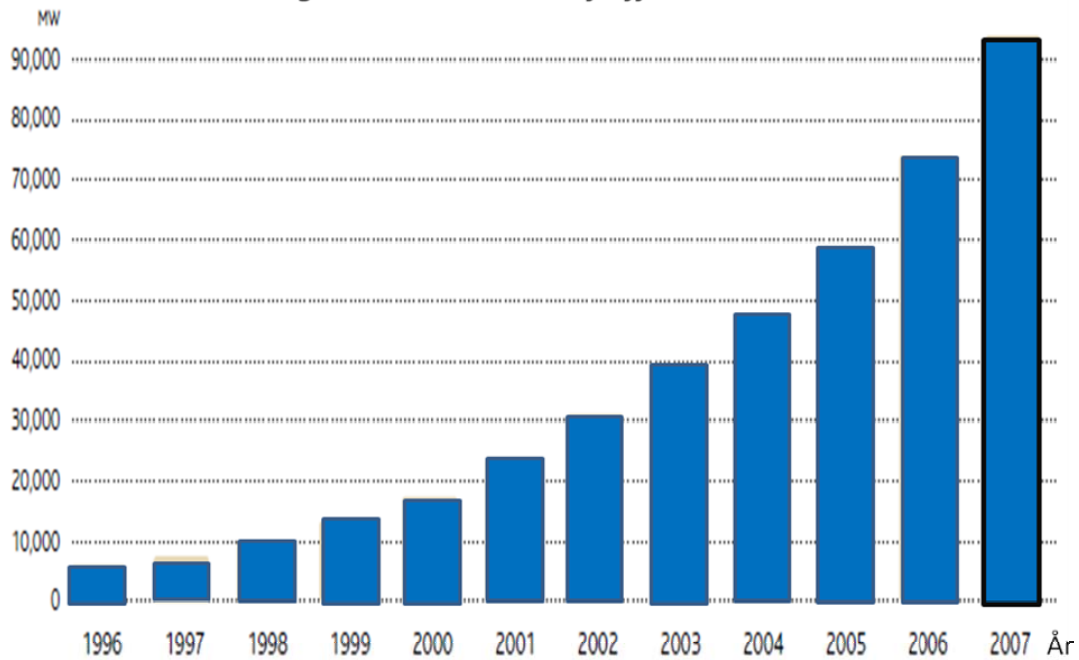
Internationell utveckling av vindkraften

I slutet av 2007 fanns i världen installerade vindkraftverk med en total effekt av 94 000 MW¹. Elproduktionen från dessa vindkraftverk motsvarar cirka en procent av världens elproduktion. I Sverige fanns vid samma tidpunkt 832 MW vindkraft, som producerade cirka en procent av Sveriges elenergi, vilket för övrigt råkar motsvara knappt en procent av världens totala vindkrafteffekt. Under 2007 ökade den installerade kapaciteten i världen med 20 000 MW och enligt en prognos från BTM Consult² beräknas vindkraften år 2012 motsvara 2,7 procent av elproduktionen.

¹IEA Wind Energy Annual Report 2007 published July 2008 – ISBN 0-9786383-2-8
page 9

² BTM Consult www.btm.dk press release 27 mars 2008

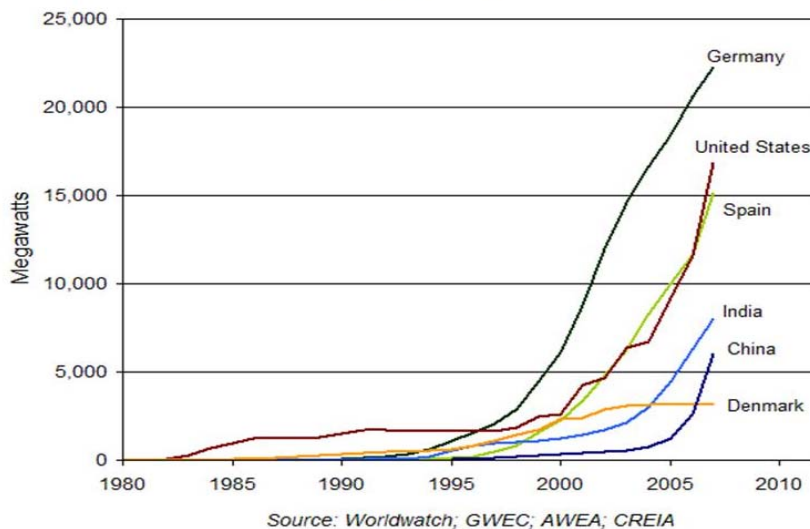
Sammanlagt installerad vindkrafteffekt i världen



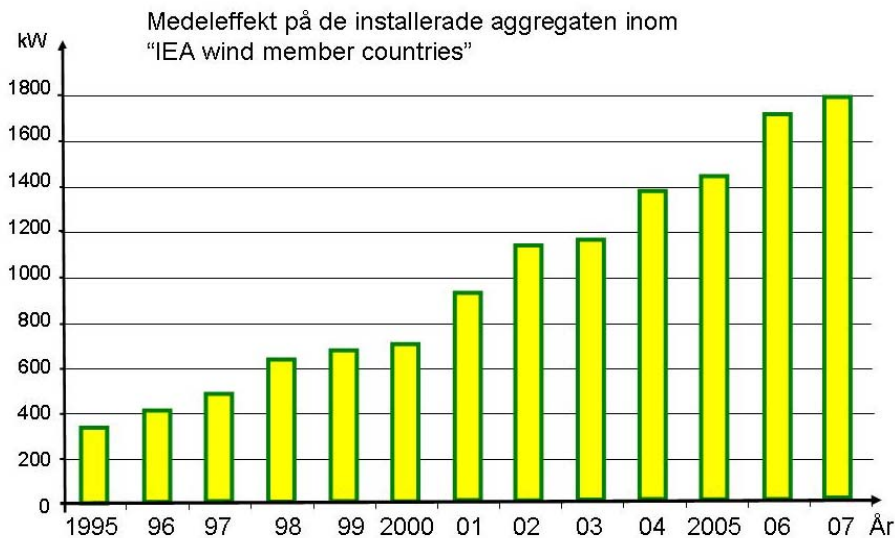
Vindkraftens utveckling i världen

Utbyggnadstakten är just nu störst i Europa (cirka 8 000 MW per år) och USA (5 200MWper år) men även Kina (3 500MW per år) och Indien (1 750 MW per år) kommer starkt. Vindkraftsutbyggnaden i Europa var förra året större än för något annat kraftslag. Historisk tillväxt i några av de största vindkraftländerna framgår av nedanstående figur.

Cumulative Installed Wind Power Capacity by Country, 1980-2007



Sett över en längre tidsperiod har utvecklingen av tekniken följt två huvudspår. Dels har vindkraftverken blivit större, vilket gett kostnadssänkande skalfördelar, dels har komponenter utvecklats vilket ytterligare sänkt kostnaden per producerad kWh. Nedanstående figur från IEA Wind Energy annual report 2007 illustrerar att aggregatstorleken hittills växt ganska jämnt med drygt 100 kW/år.



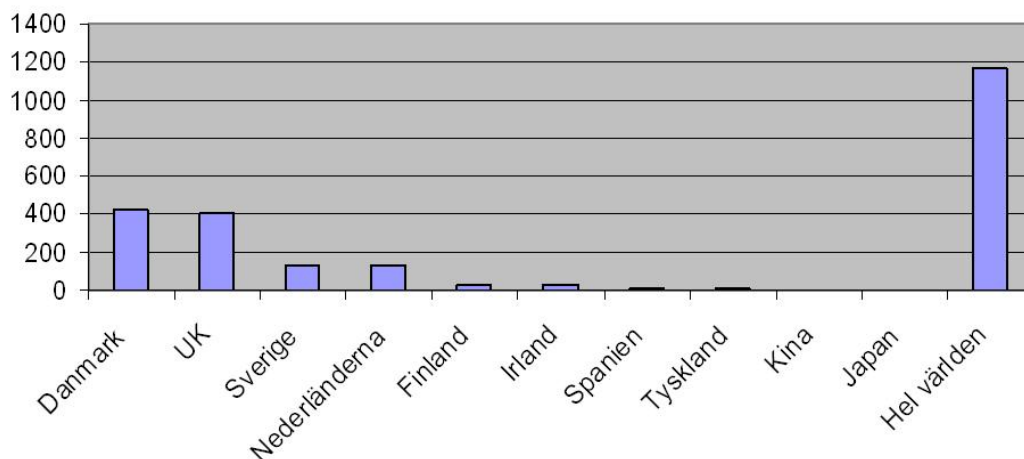
För den landbaserade vindkraften kan man dock se tecken på en viss återhållsamhet när det gäller att ytterligare öka storleken på aggregaten. Möjligheten att transportera verken sätter ofta en gräns för ekonomisk storlek.

Idag ligger mycket fokus i utvecklingen av vindkraften på ökad tillförlitlighet och bättre driftsdata i de storlekar som nu tillverkas. Det kan till exempel handla om större rotoror för en given effekt och högre torn för att möta efterfrågan på vindkraftverk för lägen med måttlig vindtillgång.

En annan utveckling de senaste åren är att vindkraftverk etableras till havs. Nordsjön och södra Östersjön är områden där Danmark, Tyskland och Storbritannien driver utvecklingen för havsbaserad vindkraft. Tyskland är visserligen i början av sin utbyggnad men kommer under 2009 att bygga en havsbaserad utvecklingsanläggning³ med tolv stycken fem megawatts vindkraftverk av två olika fabrikat.

³ www.aplha-ventus.de

Hasvsbaserad vindkraft år 2007



Vindkraften i världen väntas enligt BTM Consult⁴ under de kommande fem åren fortsätta att växa starkt. BTM:s prognos är att det kommer att finnas 287 GW vindkraft i installerad effekt i världen år 2012, vilket motsvara tre gånger 2007 års nivå. BTM redovisar även en uppskattning på att värdet av denna kumulativa marknad under dessa fem år har ett värde på cirka 300 miljarder dollar.

Vindkraften växer på grund av sina miljömässiga fördelar i förhållande till andra kraftslag, men dessa fördelar är svåra att synliggöra och behöver konkretiseras. Hjälp i form av ekonomiskt stöd, som ska ses som ett sätt att ge ett värde på miljöfördelarna, är fortfarande i de flesta fall en förutsättning för en utbyggnad av vindkraft.

Kostnaderna för vindkraft har dock stadigt sjunkit. Analyser från USA visar på halverade kostnader per installerad kW mellan år 1985 och år 2000⁵. Andra länder rapporterar liknande kostnadsreduktioner. Historiskt anses uppemot 60 procent av kostnadsminskningen⁶ komma från uppskalning, det vill säga det faktum att industrin utvecklat större och större verk, att längre och standardiserade serier tillverkas och/eller att montagemetoder likriktats eller standardiserats. Ungefär hälften (40 procent) av kostnadsreduktionen tillskrivs tekniska förbättringar, produktutveckling och/eller innovationer i enskilda komponenter eller system.

Vindforsks uppgift är att ge förutsättningar för teknikförbättringar. Vindforsksprogrammet ska bidra till att vindkraftverken anpassas till svenska förhållanden men även att det svenska systemet ges förutsättningar att anpassas till vindkraften. När Vindforsk till exempel anpassar vindkraftparkers elsystem och teknisklösningar till svenska elnät och svensk elmarknad så underlättar Vindforsk etableringen av uppskalade serier på den svenska

⁴ BTM Consult www.btm.dk press release 27 mars 2008

⁵ IEA Wind Energy Annual report 2007 page 269

⁶ Kostnadsreduktioner från EUs TPWind vilka citeras i IEA Wind Annual Report 2007 på sid 23.

marknaden, vilket ger kostnadsreduktioner per kW. När Vindforsk lämnar stöd till enskilda konstruktionsförbättringar så löses ett problem eller sänks kostnaden för verket. Vindforsk medverkar alltså till att utveckla vindkraften över hela skalan, det vill säga med möjligheter för uppskalning och serieeffekter samt med teknisk utveckling. Tillverkarna bär naturligt nog det mesta av utvecklingsansvaret för komponenterna, men just systemfrågorna kan bara lösas ihop med brukarna.

En summa motsvarande cirka två procent av tillverkarnas försäljning uppskattas gå till forskning. Globalt motsvarar det forskning för cirka tre miljarder kronor per år. Till detta kommer den statligt finansierade forskningen, som uppskattas vara knappt hälften. Uppgifterna är visserligen osäkra, men i IEA Wind Energy Annual Report 2007 rapporteras att flera länder nu ökar forskningen om vindkraft.⁷

I en internationell jämförelse verkar de svenska FUD⁸-insatserna inte sticka ut, omfattningen är någonstans i mittenregistret. Jämförelser mellan länder är visserligen vanskelig då sätten att redovisa och definiera insatserna varierar.

Sverige står inför en kraftig utbyggnad de närmaste åren och andra länder ökar⁹ sina FUD-insatser. Det finns således motiv till att fortsätta stödja vindkraftens utveckling och även att höja omfattningen på FUD-satsningar. En eventuell ambition om en teknikledande ställning inom någon nisch kräver säkerligen en markering. Även om EUs gemensamma program hittills varit förhållandevis långsamt så är ökade satsningar också där aviserade.¹⁰

Rapportens områden

Allmänt.

Denna syntesrapport har ställts samman av underlag från FoU-programmet i sju underlagsrapporter från utvalda rapportörer¹¹. Vindforsk II har inte drivit forskning inom alla dessa områden men genom att inkludera även utomliggande områden tillförs synteser, värderingar och synpunkter som har ett värde vid diskussioner om framtida forskningsbehov. (Underlagsrapporterna bakom syntesrapporten är tillgängliga genom Vindforsk¹²).

Syntesrapporten har 14 avsnitt varav de två första (om Vindforsk respektive den internationella utblicken) berörs i sammanfattningens första avsnitt. Avsnitten 3-14 är mer fakta- och forskarbetonande. De behandlar tekniken och hur vindkraften påverkar omgivningen och samverkar med andra system i samhället.

⁷ IEA Wind Energy Annual report 2007 page 23 and selected country reports later in the text.

⁸ FUD: Forskning Utveckling och Demonstration

⁹ Tyskland dubblade till 35 millioner Euro 2007 och Danmark dubblar sin FoU nivå och talar om 1 miljard även om den satsningen innehåller mer än bara vindforskrelaterade satsningar – energy technologies)

¹⁰ Förslag som lagts fram av European Wind Energy Technology Platform, vilken tillkom genom ett EU-initiativ.

¹¹ Rapporterna och författarna listats i förordet.

¹² www.vindenergi.org

Av tabellen nedan framgår även hur fördelningen av anslagen kommit att läggas ut enligt den områdesindelning som rapporten är gjord i.

Kapitel i rapporten	Procent av programmets anslag	Kapitel i rapporten	Procent av programmets anslag
3. Stor andel vindkraft ur ett marknads och teknikperspektiv	14 %	9. Vindkraft i kallt klimat	6 %
4. Planering och tillstånd	-	10. Vindkraft i skog	-
5. Meteorologi	7 %	11. Konstruktion av vindkraftverk	14 %
6. Miljöeffekter	-	12. Elsystem för vindkrafts-anläggningar	28 %
7. Ljud	9 %	13. Anslutning av vindkrafts-anläggningar	14 %
8 . Effekter på flyg, radar och signalspaning	-	14. Drift och underhåll	9 %

Stor andel vindkraft ur ett marknads- och teknikperspektiv

Vindforsk II:s projekt har studerat vindkraftens potential, vindkraftens påverkan på elkvaliteten, hur verken och parkerna bäst ansluts, hur marknadspriset påverkas och hur verken kan samköra med såväl lokala som landsomfattande vattenkraftproducenter.

Energimyndigheten har föreslagit ett nytt planeringsmål för vindkraften i Sverige på 30 TWh för år 2020, varav 10 TWh havsbaserad vindkraft. Energimyndighetens förslag knyter an till EU: s beslut att till år 2020 öka andelen förnybar energi till 20 procent. När målen fördelas nationellt väntas Sveriges beting bli 49 procent andel förnybar energi, mot idag 40. För att uppnå det krävs en mängd ny förnybar elproduktion, och vindkraft förväntas stå för merparten eftersom vindkraft bland de förnybara möjligheterna är förhållandevis kostnadseffektivt.

En studie inom Vindforsk II visar tydligt på att utbyggnaden av vindkraft inte begränsas av den fysiska potentialen. Enligt studien uppskattas Sverige kunna etablera 510 TWh per år på land och 46 TWh per år till havs när gränsen för den utbyggbara potentialen satts till medelvinden 6 meter per sekund på 71 meters höjd. Potentialen på land är således mycket stor. Förutsättningarna för att utnyttja denna potential effektivt – och med en stor

utbyggnad före 2020 – hänger till stor del på att tillståndsprocessen, nätanslutningsmöjligheter eller tekniska problem inte ställer hinder i vägen. Tekniska svårigheter och osäkerheter kring vindkraft i skog och kallt klimat finns berörda i kapitel i denna rapport.

Kostnaderna för ny vindkraft är ofta högre än för annan elproduktion men dess miljövinster och målet att nå förnybar energiproduktion gör att stödsystem införts. Det elcertifikatsystem som används i Sverige börjar nu sätta fart på vindkraftsutbyggnaden. Havsbaserad vindkraft är dock i dagsläget så pass dyr att den kräver kompletterande stöd för att, i Sverige, få betydelse i det korta perspektivet. Tekniken för havsbaserad vindkraft är dock ung, oprövad och kan utvecklas men då krävs att nya verk beställs och för att det ska ske krävs att stödsystem finns på plats. Här finns utrymme för kreativa FoU-uppslag.

En storskalig introduktion av vindkraft kommer att ställa krav på kraftsystemens reglerförmåga. I Norden finns vattenkraft, som är utmärkt för att kompensera vindkraftens variationer. Den är attraktiv inte bara för svenska vindkraftoperatörer utan också för Europas vindkraft. Studier kring behovet av reglerkraft och hur vattenkraften effektivt ska kunna utnyttjas som balans- och reservkraft i ett bredare perspektiv är därför angelägna.

En avreglerad marknad med stor andel vindkraft fungerar också annorlunda än dagens. I Norge finns ett omfattande program med målsättning att utveckla vindkraften, reglera denna med vattenkraft och även att samverka med övriga länder i Europa. I sammanhanget är det naturligt att studera hur framtidens vindkraft påverkar den nuvarande utformningen av handeln på den nordiska elbörsen NordPool och översynen bör genomföras i ett nordiskt samarbete.

Behovet av reglerkraft gör att mer vattenkraftseffekt måste överföras från norr till söder. Det påverkar stamnätets kapacitet. Med nu planerade tillskott av den totala elproduktionskapaciteten, till exempel vindkraft och kärnkraft, fram till 2020 kan utbudet på den nordiska elmarknaden bli större än efterfrågan på motsvarande elmarknad. Det skapar behov av en utbyggnad av utlandsförbindelserna om inte nordisk koldioxidfri elproduktion skall bli inlåst i Norden. Även annan teknikutveckling kan påverka vindkraftens framtid. För att möjliggöra en effektiv elmarknad, i så hög utsträckning baserad på förnybar och koldioxidneutral produktion, behövs en god framförhållning i planeringen av nätutbyggnaden. Även energieffektivisering kan påverka elmarknaden genom att efterfrågan på el både ökar och minskar. En marknadsintroduktion av el- och elhybridbilar är ett exempel på något som pekar på en ökning av efterfrågan på el. System för laddning av dessa bilar kan också positivt inverka på tillgången och behovet av reglerkraft.

Stora satsningar på så kallade smarta nät pågår i USA såväl som inom EU. För att underlätta en utbyggnad av vindkraft, som kräver rätt nätutbyggnad och rätt mängd regler- och reservkraft, är studier kring en mängd områden angelägna. Angelägna områden är exempelvis prognostisering av elkonsument, utformning av stödsystem samt behovet av byggda elnät och hur dessa kan byggas på bästa sätt (smarta nät). Noteras kan att detta inte handlar om enskilda vindkraftsfrågor och att planeringen av forskningsbehov måste säkerställa samarbete mellan forskning inom en rad program och projekt, såväl nationellt som internationellt.

Planering och tillstånd

Samhällets planering avgör hur man ska kunna utnyttja vindkraften. Detta till trots har planering inte ingått som något eget område i de svenska vindforskningsprogrammen. Inga projekt inom området har ägt rum inom inom Vindforsk II . Men tre projekt pågår inom programmet Vindval¹³.

Till skillnad från exempelvis Danmark saknar Sverige en övergripande nationell planering av vindkraften. Ett helhetsgrepp på landets vindkraftsutbyggnad är önskvärd av såväl tekniska som miljörelaterade skäl. Exempel på närliggande regionala studier är Sydhavsvind och Utsjöbanksinventeringen.

Både Vindforsk och Vindval är tillämpade program, (de har ett tydligt användarperspektiv), men för den fortsatta utvecklingen av programmen bör även planeringsområdet ägnas viss uppmärksamhet. Det bör finnas goda förutsättningar att skapa konkreta verktyg som kan underlätta kommande vindkraftsetableringar och bidra till en effektivare resursanvändning hos projekterande företag, myndigheter och intresseorganisationer samt, inte minst, mer nöjda medborgare. Vid forskning kring acceptans bör noteras att det inte enbart är acceptans för vindkraftverken som krävs utan även acceptans för elnätsutbyggnad och utbyggnad av annan infrastruktur.

Meteorologi

Vindkraftverk kräver kunskap om vinden, både som energiresurs och som dimensionerande faktor för verken. European Wind Energy Technology Platform trycker starkt på behovet av mer forskning på detta område. I Sverige bedrivs sedan lång tid en högklassig meteorologisk vindforskning, som i flera avseenden varit banbrytande men som idag kanske har tappat fart. Det finns skäl att bryta denna utveckling speciellt inom områden som är landsspecifika, till exempel för vindförhållanden i skogsmark och för vindkraft i kallt klimat.

Vindforsk II har finansierat tre projekt som har karaktären av grundkunskap och statistikinsamling. För framtida projekt är det intressant att öka den rumsliga upplösningen i modellen för vindkarteringen. Denna kan då bli ännu mer användbar för projekteringsändamål. Över hav, skog och kuperad terräng är vindförhållandena speciella, vilket motiverar ytterligare utveckling avseende bland annat vakmodeller, det vill säga hur vindkraftverken skuggar varandra i olika terräng. Fortsatta mätningar av vindhastigheter i olika landskap gör det möjligt att dimensionera vindkraftverk och långtidsmätningar ger grunden för att ta fram det normala vindåret. Behovet av lokala vindprognoser ökar och andra meteorologiska effekter som till exempel isbildning kan behöva följas om vindkraft i nordligt klimat skall kunna hanteras.

¹³ Programmet Vindval är ett kunskapsprogram som tar fram fakta om vindkraftens miljöeffekter men innehåller även projekt kring acceptans och planering. Programmet finansieras av Energimyndigheten och sköts av Naturvårdsverket, www.naturvardsverket.se/vindval

Miljöeffekter

Miljöaspekten är både vindkraftens chans och dess begränsning. Intresset för vindkraft har sitt ursprung i att den har låg miljöpåverkan. Detta till trots är det ofta miljöfrågor som begränsar eller försenar vindkraftsprojekt.

Miljöfrågor har inte ingått som forskningsområde för Vindforsk II annat än kring frågeställningar om ljudutbredning, som också fått en egen rubrik nedan. Forskningsprogrammet Vindval, som finansieras av Energimyndigheten och sköts av Naturvårdsverket har däremot som syfte att samla in, bygga upp och sprida kunskap om vindkraftens miljöeffekter.

Ljud

Ljud är en viktig del av vindkraftens miljöpåverkan och källa till mycken diskussion i tillståndsprocessen. Tillgängligt och aktuellt svenskt vetande på området baseras till större delen på projekt finansierade av Vindforsk och dess föregångare.

I ett projekt har ljudspridning kring havsbaserade vindkraftverk studerats genom att mäta upp ljudets dämpning över från Utgrundens fyr till Öland. Resultatet har givit underlag för en modifiering av Naturvårdsverkets modell "Ljudspridning från vindkraft till havs". I ett projekt, som använder mätdata från Utgrundens fyr för att verifiera beräkningar, studeras olika nya typer av modeller som tar hänsyn till meteorologiska förhållanden som temperatur och vindgradient. Metoder för att beräkna ljudspridningen är således under ständig utveckling – delvis tack vara att snabba datorer nu gör det möjligt att använda fysikaliskt noggrannare modeller. Detta leder till en bättre förmåga att beräkna de ljudnivåer som uppstår på olika avstånd från vindkraftverken. Områden som beskrivs som angelägna för framtida forskning är ljudutbredning i skogsterräng och över hav. Det är även viktigt att öka kunskapen om hur hänsyn tas till maskerande effekter av annat ljud samt hur hänsyn tas till vindskyddade lägen med låg nivå på maskerande ljud.

Det finns alltså ytterligare behov av kunskap och det förtjänar att påpekas att den svenska forskningen inom området förefaller stå sig väl internationellt men det är också så att intresset för ljudfrågor förefaller vara större i Sverige än i andra nationer och det gäller särskilt ljud över havet.

Frågeställningar kring vilka mått på ljudnivåer som bör användas och hur andra källor i omgivningen än vindkraften påverkar andelen som känner sig störda, tangerar forskningen kring acceptans. Under Vindforsk II har denna del av forskningen skett inom Vindval och projekten inom Vindforsk har handlat om den mer tekniska biten kring ljudspridning. För att i framtiden utforma rätt mått på ljudnivåer, till exempel varaktighet, är det viktigt att den acceptansfokuserade forskningen och den tekniska delen kring ljudspridning sker samordnat.

Effekter på radar, radiolänk och signalspaning

Vindkraftverk påverkar och stör ibland befintliga tekniska system. Flygplan ska naturligtvis kunna upptäcka verken i tid och försvarsmakten vill att svensk radarspaning och signalspaning, inte skall påverkas. Förvaret har även andra intressen som ibland kolliderar med möjligheten att etablera vindkraft.

De ser till exempel gärna att ett militärt reservsystem för landning skall kunna behållas. Detta system har emellertid låg precision och kräver stora fria ytor och är ett exempel på frågor där vindkraftsbranschen hävdar att det militära intresset måste ställas mot utbyggnadsbehovet av vindkraft. I sådana fall hävdar vindkraftbranschens förespråkare att, och där den sammanvägda nyttan i kombination med möjliga alternativa lösningar, inte kan motivera en förhindrad vindkraftsutbyggnad. Hinderbelysning på vindkraftverk är ett annat exempel på att intressen också kan stå mot varandra. Hinderbelysning är till för luftfarten men kan vara störande för omgivningen och medför en kostnad.

Vindforsk II har inte prioriterat området. Ett separat forskningsprojekt med finansiering från Energimyndigheten kring radarpåverkan från vindkraft till havs har dock ägt rum under perioden.

I kapitlet ges en översikt över ett antal konfliktområden. Dessa rör till exempel behov av "fritt luftrum" runt flygplatser, hinderbelysning samt vindkraftens störning på radar och radiolänk. Kapitlet innehåller även förslag på konkreta områden där forskningsinsatser kan vara nödvändiga för att komma fram till alternativa lösningar och en rimlig avvägning mellan de olika intressena.

Vindkraft i kallt klimat

Storleksordningen 70 procent av Sveriges yta riskerar omfattande isbildning på eventuella vindkraftverk. Kommersiellt tillgänglig teknik klarar endast lätt isbildning. Månadslånga stillestånd, som några verk drabbats av är inte acceptabelt och definitivt ett hinder för omfattande utbyggnader. Med den säljarens marknad som råder idag prioriteras problemet med nedisning inte av de stora vindkraftsleverantörerna eftersom det i ett globalt perspektiv är ett litet problem. Leverantörerna har redan tillräckligt med kunder som efterfrågar vindkraftverk utan specifika krav på avisningsegenskaper. Leverantörernas intresse för att utveckla lösningar är därför svagt.

Nya vindkraftverk byggs, trots detta, på platser där isbildning kan förekomma. Uppenbarligen ser inte exploitörerna isbildningen som ett avgörande hinder, men de uttrycker samtidigt ett behov av att kunna bemästra problemen. Kunskap om vilka områden där risken för nedisning är stor samt utveckling av tekniska sätt att förhindra eller ta bort is från bladen är sålunda angeläget. Eftersom antalet länder med liknande problem är få är det viktigt att Sverige är aktivt på detta område för att utvecklingen ska kunna drivas framåt.

Inom Vindforsk II pågår ett projekt kring utveckling av tekniker för att avisa eller förhindra is på blad samt två projekt kring mätning av is och isindikering. Dessa projekt kan, förutom att öka kunskapen inom sina områden, ge förutsättningar för utveckling av de produkter som används i projekten. Sverige deltar även i ett IEA-samarbete på området.

För framtiden behöver inte minst statistik och annat underlag samlas in för att kunskapen om isbildning och nedisning skall kunna systematiseras och utvecklas. Det behövs också bättre resurser för att lokalt, liknande vindkarteringen, kunna bedöma risken och omfattningen för nedisning på olika potentiella platser för vindkraft

Vindkraft i skog

Vindkraft i skog har inte legat inom Vindkraft II: s prioriterade områden. Med det stora intresset för att bygga vindkraft i skog ändras emellertid behovet av forskning på detta område.

I kapitlet redovisas erfarenheter från ett sextiototal svenska vindkraftverk, som uppförts i eller i anslutning till skog. Några står i öppen mark men påverkas av omgivande skog medan de flesta står i renodlade skogsområden, ofta på kullar och höjdsträckningar. En sammanfattande slutsats är att förutsägelser om produktionen verkar vara säkrare för verk i skog än för andra verk i landet. Möjligen är detta en följd av att skogsprojekten är större, med större budget för vindmätningar och annan verifiering, än de mindre projekten i öppen terräng. Det visar sig att produktionen från verken uppförda i skogen är i stort likvärdig med produktionen från andra vindkraftverk av samma storlek.

Trots att genomgången visar att vindkraftverken i skog producerar bra och än så länge fungerar väl, är vindförhållandena över skogen ännu outredda. Höga turbulensintensiteter och vindgradienter borde påverka produktionen och ge större laster och kanske därmed korta livslängden. Grundläggande och tillämpade forskningsinsatser, liksom bättre statistik är därför motiverade insatser i kommande program. Det gäller särskilt hur vindarna beter sig över skog och hur de interagerar med många vindkraftverk i skogsterräng, samt hur vakarna¹⁴ bakom turbinerna utbredd och upplöses.

Konstruktion av vindkraftverk

Förbättrad teknik, utvecklade komponenter och bättre dimensioneringskriterier för kraftverken är naturligtvis ett huvudområde för att utveckla vindkrafttekniken. Det är också i det internationella utvecklingsarbetet ett huvudområde för FoU-insatserna. Eftersom Sverige saknat leverantör av kompletta verk blir emellertid den svenska forskningen på konstruktion av vindkraftverk naturligt nog knuten till beställarens önskemål av att kunna påverka leverantörer och mot de frågor som svenska underleverantörer kan önska utveckla. Inom Vindforsk II har fem projekt finansierats. Projekten har varierat från hur vindparker kan optimeras och styras med hänsyn tagen till vakarna bakom verken till nya skarvmeter av ståltorn för vindkraftverk. Ett viktigt område även för ett land som beställare är standardisering. Sverige har varit aktiva till exempel inom kommunikationsstandard för övervakning och styrning.

Ett område för fortsatta aktiviteter är det internationella standardiseringsarbetet. Möjligheterna att påverka arbetet är stort för nya områden som till exempel skog och kallt klimat. Deltagande i standardiseringsarbete ger en tidigt värdefull information om inriktningen på nya standarder.

¹⁴ Vindkraftverk tar energi ur vinden genom att bromsa vinden till lägre hastigheter. En vak är benämningen på det "vindhål" som bildas bakom turbinerna. Genom inblandning av omgivande luft löses dessa vakar upp efter en viss längd bakom turbinerna.

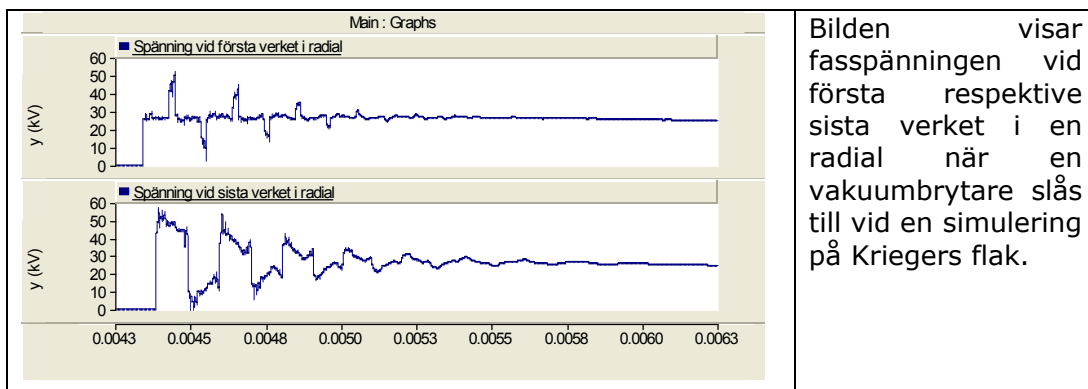
Om och när utveckling av svenskproducerade vindkraftverk tar fart kan det finnas skäl att stödja speciell konstruktionsinriktad forskning som har direkt bäring på denna industris problem.

Elsystem för vindkraftsanläggningar

De två områdena elsystem för vindkraftsanläggningar och elanslutning av vindkraftsanläggningar är intimt förknippade men är i denna syntesrapport beskrivna i två olika kapitel. Båda områdena tillhör de prioriterade inom Vindforsk II. Dels är elsystemfrågor av såväl historiska som industriella skäl ett svenskt intresseområde med världsledande industri och fortgående utveckling, dels är frågan om hur vindkraften skall anpassas till de lokala – och ibland specifikt svenska – nätförhållandena viktig för att få in vindkraftproduktion i det svenska kraftsystemet på ett tekniskt acceptabelt sätt.

Vindkraftverken ska samverka med stora elektriska system och hur denna samverkan sker är mycket viktigt. Med elektriska styrning, som till exempel variabelt varvtal, kan vindkraftverkens produktion hållas hög samtidigt som styrningen kan göra att de mekaniska lasterna på vindkraftverket hålls låga. Samtidigt kan de elektriska systemen med hjälp av kraftelektronik göra så att vindkraftverken samverkar, och kan integreras på ett bra sätt, med elnätet. Projekten inom Vindforsk bidrar till att öka kunskapen om hur elsystemen ska kunna utformas för att dessa saker – hög produktion, låga laster och gott samspel med kraftsystemet – ska kunna uppnås till låg systemkostnad.

Ny layout av elsystem och ny utrustning ställer emellertid krav på kunskap om elsystemens funktion även på detaljnivå. Ett exempel belyser en del av problematiken. Flera havsbaserade stationer, exempelvis Middelgrunden och Horns Rev, har drabbats av haverier i transformatorer och generatorer. Orsakerna är inte helt kända, men en möjlig förklaring är att högfrekventa svängningar i elnätet orsakat haverierna. De numera vanliga vakuumbrytarna kan till exempel ge transienter vid tillslag och frånslag. Det vidsträckta kabelnätet inom en havsbaserad vindpark kan omfatta tiotals kilometer och transienterna svänger sig genom hela nätet. (Se bilden nedan)



Inom tre av Vindforsk II:s projekt studeras problemet med högfrekventa transienter i vindparker. Projekten leder till verifierade modeller för elsystemen med detaljerad modellering av brytarna i systemet. Projekten är viktiga för en framgångsrik projektering av vindparker till havs.

Anslutning av vindkraftsanläggningar

Nätägarnas krav på hur vindkraftverk skall anslutas har höjts i takt med att vindkraften svarar för en allt större del av elproduktionen. Krav på reaktiv effektutmatning vid felfall har kommit in i allt fler internationella nätägares bestämmelser. Krav finns även på möjligheten till deltagande i frekvensregleringen, det vill säga gatt kunna reglera ned eller upp effekten. Hydro Quebec fordrar till exempel att vindkraften ska kunna medverka i frekvensregleringen genom att tillfälligt kunna öka effekten med 10 procent.

Inom anslutningsområdet har Vindforsks II: s projekt handlat om hur man vid projektering ska se till att uppfylla nätföretagen och Svenska Kraftnäs krav på hur vindkraftverken ska "uppföra sig" på nätet. Till exempel utvecklas metoder för hur vindkraftverkens förmåga att uppfylla kraven ska kunna testas.

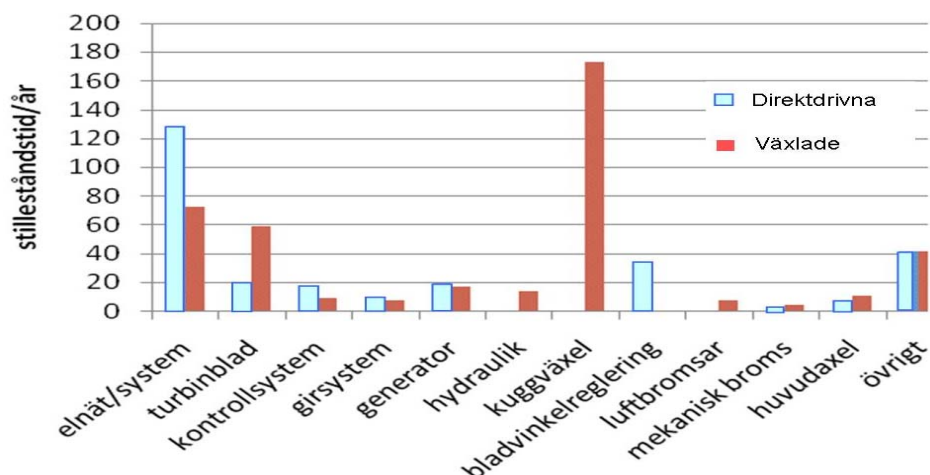
Fortsatta aktiviteter är motiverade inte bara för att problemområdet är stort utan också för att Sverige traditionellt har en stark elkraftteknisk industri som kan komma ifråga för att delta i utbyggnadsprojekt inte bara i Sverige utan över hela världen. Områden som knyter an till hur man använder kraftelektronik och likströmssystem bör därför fortsätta att vara tunga i framtida forskningsprogram.

Ett näraliggande tema som rönt uppmärksamhet är idén om ett "supergrid" för att koppla ihop och ansluta havsbaserad vindkraft. Ett eller flera jättelika likströmsnät i Nordsjön och Östersjön skulle kunna mata energi till olika länder samtidigt som länderna kan kopplas samman. Norsk vattenkraftindustri är intresserad att utnyttja vattenkraft för att reglera denna vindkraft. Norge har påbörjat studier. Kanske bör även Sverige ta fram en plan för hur detta kan påverka det svenska elnätet, vindkraftprogrammet och användningen av svensk vattenkraft.

Drift och underhåll

Inom Vindforsk II har tre projekt inom området drift och underhållsutveckling ägt rum. Ett har gällt statistiken. Vindkraftverk har länge ansetts ha tillgänglighet om 98-99 procent, och den rapportering för svenska vindkraftverk som har förts sedan 1980-talet stöder detta antagande. En genomgång av statistiken visar emellertid att det finns fel och vilseledande uppgifter i rapporteringssystemet. Ett mer rättvisande värde är nog att tillgängligheten snarare ligger i intervallet 90-95 procent. Det betyder å ena sidan att produktionsförmågan överskattats men också att förbättringspotentialen är större än vi trott.

Förståelse för drift och underhåll och dess kostnader är avgörande för vindkraftens utveckling. Det blir än mer viktigt när anläggningarna blir svåra att nå, till exempel vid lokalisering till havs, men även i kallt klimat kommer tillgängligheten för större underhåll periodvis att vara begränsad. För att utveckla bra drift- och underhållsstrategier krävs kunskap inte bara om enskilda komponenters livslängd och fel utan också förståelse för hur de olika delsystemen påverkar varandra. Tillgång till statistik, felorsaker, frekvens, med mera är naturligtvis grundläggande men analyserna blir inte tillförlitliga förrän det finns en tillräcklig mängd data, bra sätt att följa upp tillståndet hos komponenter samt utvecklade strategier för underhåll.



Orsaker bakom fel i danska och tyska vindkraftverk enligt en analys av J.V. Tavner våren 2008

Ovanstående bild från en EWEC rapport¹⁵ baseras på två tyska och en dansk databas med värden från 7 000 vindkraftverk under elva år. Fel i växellådan sticker ut för de verk som har en sådan och fel i elsystemet drabbar de direkt drivna i stor grad. Att förstå krafterna och samspelet mellan mekaniska och elektriska system framstår som det kanske viktigaste.

Systematisk faktainsamling och goda underhållsmetoder utvecklar driftsresultaten. Ett projekt inom Vindforsk II har handlat om att förbättra statistiken och ett annat om att optimera underhållet för vindkraftverk till havs. Eftersom det är svårt att nå anläggningarna krävs en annan underhållsstrategi än för andra verk. Metoderna bör även vara intressanta när det gäller vindkraft i kallt klimat.

Fel ger stillestånd och kostar pengar. Efter ett blixtnedslag och en brand kan verken helt förstöras om släckningssystemen inte räcker till. I Tyskland totalförstördes under 2002 åtta vindkraftverk av brand¹⁶. Räknet på 12 000 verk blir frekvensen 0,07 procent, vilket sänker tillgängligheten med 0,7 procent. Alla slags stillestånd påverkar ekonomin och förtjänar uppmärksamhet.

Vindkraftverken har blivit större och enligt Tavnors studie ökar detta felfrekvensen. Från ett fel per år för verk runt 250 kW till 3,5 fel per år för 1,5 MW-verken. De direkt drivna verken på 0,5 respektive 1,5 MW ligger på samma felfrekvens, 2,5 fel per år. En ökande felfrekvens kan inte försummas. Tekniskt liknar vindkraft på många sätt vattenkraft och ambitionen borde vara att vindkraften skall utvecklas till samma låga felfrekvens och höga tillgänglighet, som sedan lång tid gäller för vattenkraften.

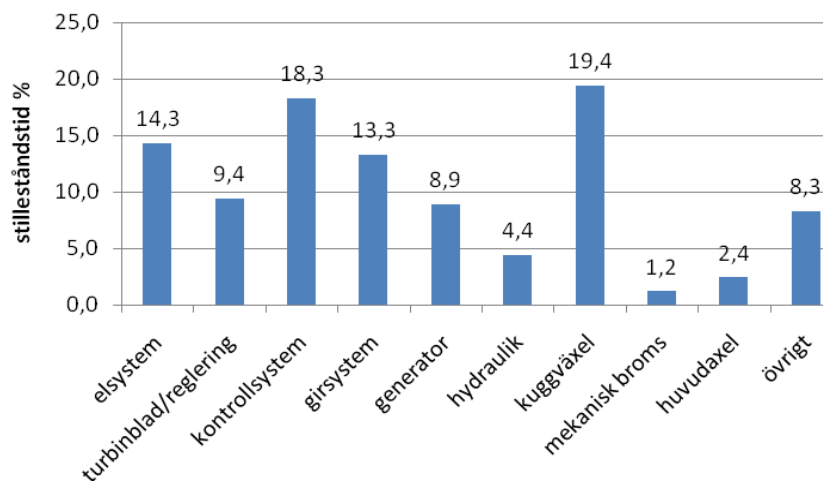
¹⁵ P J Tavner et al. Reliability of different wind turbine concepts with relevance to offshore application. EWEC 2008, Bryssel 30/3 – 4/4 2008.

¹⁶ Wind Kraft Journal 3/2005

Avslutande kommentarer – inklusive synpunkter på framtida satsningar

Vindforsk II:s prioriteringar

Vindforsk II har utvecklats och fortsatt i spåren från Vindforsk I. Prioriteringen har bestämts av deltagande företags behov, initiativförmågan att komma med forskningsförslag men också vilka uppgifter eller fakta forskarna har och får tillgång till. Ett krav är också någon slags grundläggande syn på att resultaten – låt vara med viss fördröjning – kan göras publikt tillgängliga.



Procentuell fördelning av stilleståndstid för svenska vindkraftverk, grundat på bearbetade data från Ribrant och Bertling (2007).

Även om forskning kring kuggväxelpromblem skulle stå högst upp på önskelistan, vilket den kanske borde göra med tanke på ovanstående bild, så begränsas möjligheterna av FoU på detta område eftersom ett sådant utvecklingsarbete till stor del måste drivas av tillverkare. Elsystem, kontrollanläggningar och problem som relaterar till hur vindkraft passar in på den svenska elmarknaden är däremot områden som lämpar sig mycket väl för forskning i Vindforsks regi.

I konsekvens med detta är det naturligtvis angeläget att söka svar på frågor som är specifika för svensk industri, det svenska samhället eller det nordiska klimatet. En viktig aspekt blir även att prioritera sådana frågor som inte bara löser tekniska problem utan även bidrar till att skapa industriell utveckling och arbetstillfällen i Sverige. Exempel på sådana områden är idéer som utvecklar vindkraftens möjligheter att samspela med elproduktion, elnät och/eller elförbrukning; utvecklade elsystemlösningar i vindkraftparker; konstruktioner som öppnar för nya industriella lösningar (till exempel ståltorn, fundament etc.); konstruktioner som anpassas till nordiskt klimat och terräng (till exempel skog, kyla, etc.) med mera.

I IEA Wind Energy Annual Report 2007¹⁷ finns en tankeväckande tabell där den installerade vindkrafteffekten i olika länder ställs mot en uppskattning av antalet arbetstillfällen och ekonomiska nyttskattningar.

Table 5 Wind Capacity, Jobs, and Economic Impact in 2007			
Country	"Capacity (MW)"	Estimated number of jobs	"Economic impact (Million EURO)"
Germany	22,247	84,300	11,729
United States	16,904	17,000	6,165
Spain	15,145	45,000	5,000
Denmark	3,124	28,000	4,690
Italy	2,726	10,600	1,000
United Kingdom	2,390	8,000	
Portugal	2,125		
Canada	1,845	3,340*	1,490*
Netherlands	1,745		230
Japan	1,538		
Austria**	982		
Greece	874		
Australia	824	978	180
Ireland	803		90
Sweden	788		
Norway	385		
Republic of Korea	193		
Finland	110		
Mexico	85		
Switzerland	12		100
* Numbers form 2006			
** Numbers from Wind Power Monthly			

Även om tabellens siffror säkerligen innehåller en del osäkerheter så bekräftar innehållet det man anat att länder som byggt upp egen tillverkarkapacitet parallellt med att vindkraften byggts ut drar dubbel nytta av satsningarna. Svensk FUD bör fortsatt vikta upp projektförslag, som ökar möjligheterna att utveckla svensk industri.

Det andra huvudsyftet bakom Vindforsk är att genom FOU-projekt till högskolor och institut medverka till att dessa bygger upp en svensk vindkraftteknisk kompetens. Alla svenska vindkraftaktörer kan också dra växlar på att högskolan lockar ny kompetent ungdom genom att stimulera doktorander att ta sig an såväl teoretiska som industriella frågeställningar.

¹⁷ IEA Wind Energy Annual Report 2007 page 18

Avslutande kommentarer inför Vindforsk III

Utfallet av Vindforsk II har bedömts som gott i utvärderingen av programmet. Det gäller såväl resultat av själva forskningen som processen bakom fördelningen av medlen. Denna rapport redovisar flera skäl att fortsätta programmet. Skälen har tidigare beskrivits under respektive avsnitt i kapitel 2 och överlämnas därmed till det kommande Vindforsk III (under framtagande när detta skrivs). Någon total omvärdering av inriktningen för Vindforsk III tycks inte behöva ske.

Svensk vindkraft står inför en rejäl utmaning. Under perioden 2009-2011 (och vidare mot 2015 då planeringsmålet cirka 10 TWh kanske skall nås) behöver den svenska vindkraften årligen expandera med 600 à 700 MW för att 4 000 à 4 500 MW skall finnas installerade år 2015. Investeringarna ligger i nivån åtta miljarder per år¹⁸. Om den statliga forskningen skulle uppgå till 1 procent¹⁹ av det beloppet det vill säga 80 miljoner kronor så skall det i så fall fördelas inte bara på Vindforsk utan även på Vindval och satsningar genom andra av staten stöttade fonder. En nivå på 15 -30 miljoner kronor/år statlig FoU avsatt för Vindkraftteknisk forskning genom ett Vindforsk III verkar ligga i nivå med vad många andra stater satsar.²⁰

Till det rent tekniska och kunskapshöjande värdet av Vindforskprogrammen kommer några mjuka men väl så viktiga uppgifter:

- En första är att öka synligheten för branschen.
 - Fler ungdomar behövs i sektorn. Befintliga vindkraftverk skall drivas samtidigt som sektorn beställer, bygger och kanske rent av levererar nya verk.
 - Till bättre synlighet hör också att skapa en jämn tillströmning av kvalificerad personal, speciellt doktorander. Något slags rullande paket kan kanske brygga över svårigheter, som relateras till att forskningsprogrammen löper på viss tid och inte relateras den normala doktorandtiden, som är tre år.

¹⁸ EWEA (European Wind Energy Association) anger i ett nyhetsbrev från febr 08 att cirka 20 000 MW ny vindkraft installerats under 2007. Investeringarna anges till 25 miljarder Euro vilket ger cirka 12 000 kr/kW (kurs cirka 10 kr/Euro. IEA Wind Energy Annual report 2007 page 269, anger för USA en nybyggnadskostnad till 1 700 US\$/kW vilket med en kronkurs om 7,5 kr/\$ blir 12 750 kr/kW. Därav $650 \times 10^3 \times 12\,500 = 8,125 \times 10^9$ kr.

¹⁹ 1% av investeringarna till FoU anges ofta som en "rimlig" statlig FoU nivå för denna typ av industri. Med det industriella engagemanget ökar då ofta de totala FoU insatserna till 2% eller mer. Industrisektorer med kortare livscyklar än kraftindustrin till exempel telekom ligger ofta på 10% FoU.

²⁰ I Norge aviserades i oktober 2008 ett 8 årigt samfinansierat vindforskningsprogram genom ett nytt "institut" för havsbaserad vindkraft på 40 milj NKR/år totalt 320 NKR.

- En andra är att se och medverka till standardiserade lösningar för att pressa kostnader och integrera aktörerna. Det kräver engagemang i internationella grupper.
- Ett tredje är att öka det industriella utbytet av den svenska vindkraftuppbyggnaden. Nya industriella aktörer behöver stöd för att kunna delta i vindkraftprogram och utveckla nya komponenter. (Under sommaren 2008 har åtminstone en ny heltäckande vindkraftleverantör etablerats och möjligheterna att utveckla fler aktiva industriella aktörer finns.)

Introduction and summary

Vindforsk II

Vindforsk's program for wind energy research and development runs for a three-year period from 2006 to 2008. It is divided into two parts, one for basic and one for applied research projects. The basic research projects are funded exclusively by the Swedish Energy Agency, while the applied research is funded jointly with stakeholders in the Swedish energy industry. The total budget for the entire period is approximately SEK 45 million.

The goal of the program is to generate knowledge in order to facilitate the deployment of wind energy and its integration with the power grid. Vindforsk does not cover the entire wind energy area, but is focused on research related to technological development of wind turbines and their interplay with the technical environment in which they operate. The research is performed by universities and technical institutes, research institutes, consultants and players in the wind energy sector.

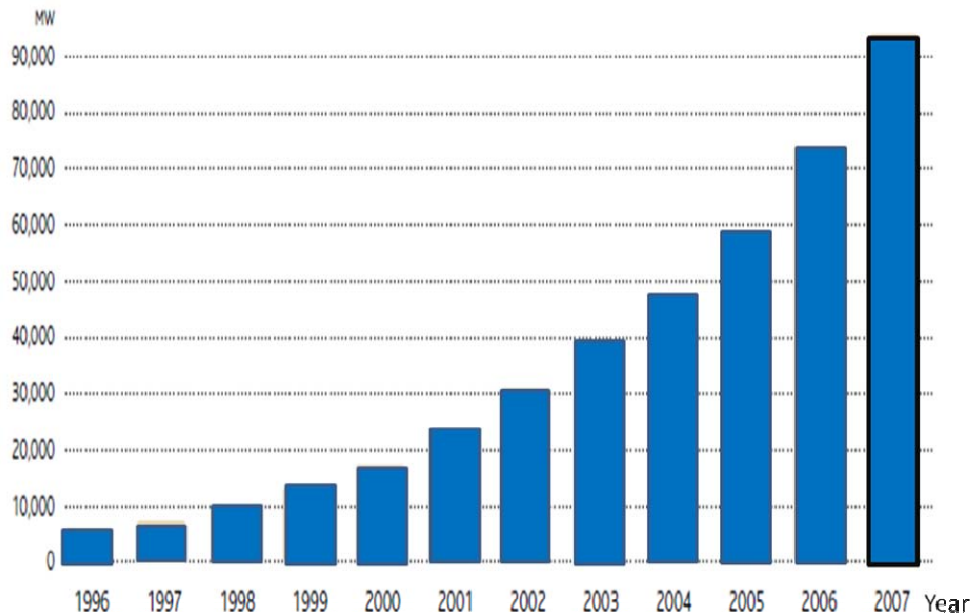
International wind energy development

Total installed wind power capacity worldwide at the end of 2007 amounted to 94,000 MW²¹. Electrical production from these wind power plants is equal to approximately 1% of global electricity production. At the same point in time, Sweden had 832 MW of wind generating capacity that produced around 1% of Sweden's electrical output, which incidentally corresponds to nearly 1% of total global output from wind. In 2007 worldwide wind generating capacity increased by 20,000 MW and according to one forecast by BTM Consult²² the electricity produced by wind power is expected to account for 2.7% of total electrical production by 2012.

²¹IEA Wind Energy Annual Report 2007 published July 2008 – ISBN 0-9786383-2-8, page 9

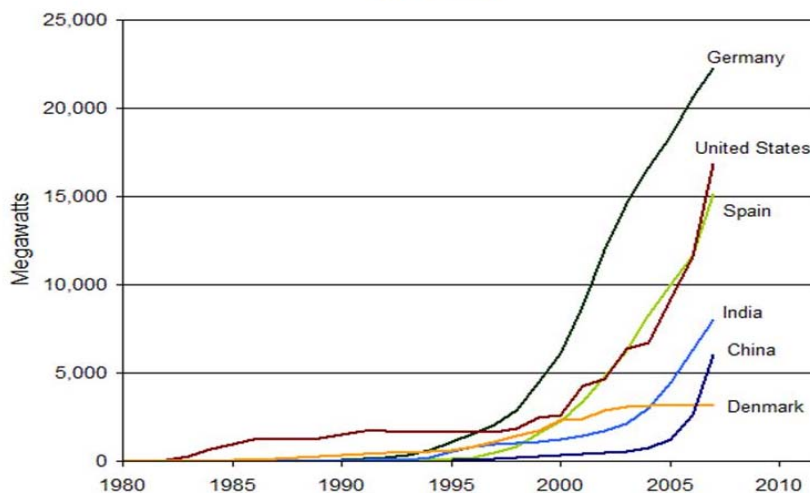
²² BTM Consult www.btm.dk press release 27 mars 2008

World accumulate Wind Power Capacity



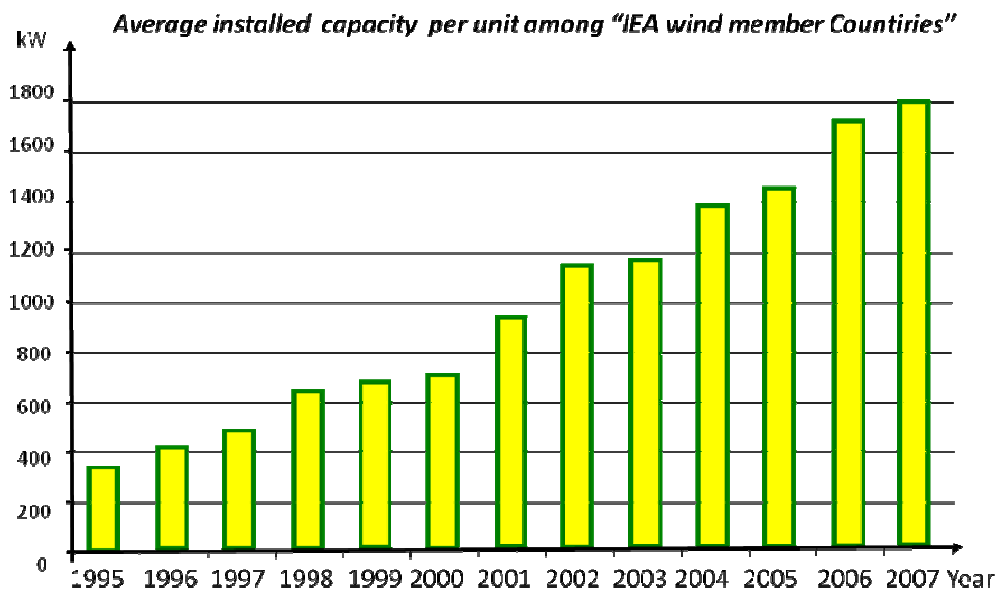
At present, the rate of capacity expansion is highest in Europe (approximately 8,000 MW per year) and the USA (5,200MW per year), but China (3,500 MW per year) and India (1,750 MW per year) are fast approaching these levels. In Europe, growth in generating capacity for wind outpaced that of all other power sources during 2007. Historical growth in a few of the leading wind power-producing countries is shown in the graph below.

Cumulative Installed Wind Power Capacity by Country, 1980-2007



Source: Worldwatch; GWEC; AWEA; CREIA

Seen over a longer time span, technological development has followed two main lines. The first of these is the increasing size of wind turbines which has led to cost-reducing economies of scale, and the second is the development of components that have further decreased the cost per produced kWh. The following diagram from IEA Wind Energy Annual Report 2007 shows that the average turbine size has grown at a fairly stable rate of more than 100 kW annually.



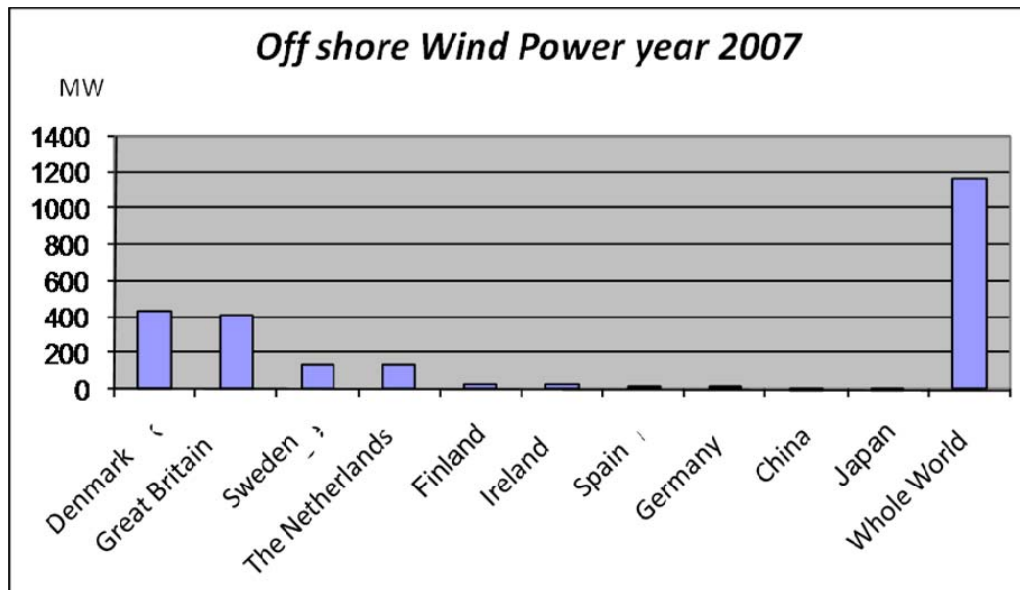
For onshore wind farms, however, there are signs of a certain restraint in further increasing the turbine size. The feasibility of transporting turbine components often sets the limit for their economically viable size.

Much of the current focus in wind power development is on increased availability and better operating performance in the sizes now in production. Examples are larger rotors for a specific output rating and higher towers to meet demand for wind turbines on sites with moderate wind resources.

Another trend in recent years is the establishment of offshore wind farms²³. The North Sea and southern Baltic are areas where Denmark, Germany and the UK are all pursuing offshore wind development. Although Germany is just beginning its expansion, in 2009 the country will build an offshore test field²⁴ containing twelve 5 MW wind turbines of two different models.

²³ The graph is based in figures from IEA Wind Energy Annual Report 2007.

²⁴ www.alpha-ventus.de



Wind power is expected to grow substantially. According to wind power consultant BTM Consult²⁵ the capacity will grow to 287 GW in 2012, an increase by a factor three relative to the installed power at the end of 2007. A judgment of this cumulative market during these five years indicates an investment value of some US\$ 300 billions.

The explosive growth of wind energy has been fuelled by its environmental advantages relative to other power sources, but these advantages are difficult to make visible and need to be concretised. Assistance in the form of financial support, which should be seen as a means for assigning a value to these environmental advantages, is in most cases still essential for the expansion of wind energy.

However, the costs for wind energy have fallen steadily. Analyses from the USA indicate a 50% decrease in the cost per installed kW between 1985 and 2000²⁶ and other countries report similar reductions. Historically, up to 60% of the cost reductions²⁷ have come from economies of scale, i.e. the industry has developed increasingly larger turbines, longer and more standardised series are being manufactured and/or the assembly methods have become more similar or standardised. Close to half (40%) of the cost reductions are attributed to technical improvements, product development and/or innovations in individual components or systems.

Vindforsk's task is to provide an impetus for technological advancement. The Vindforsk program is aimed at contributing to the adaptation of wind turbines to Swedish conditions, but also at creating the conditions for adaptation of the Swedish power system for wind power deployment. For example, when Vindforsk adapts the electrical systems and technical solutions in wind turbines to the Swedish grid and electricity market, this facilitates the

²⁵ BTM Consult www.btm.dk press release 27 mars 2008

²⁶ IEA Wind Energy Annual Report 2007, page 269

²⁷ Cost reductions from the EU-funded TPWind initiative as cited in IEA Wind Annual Report 2007, page 23.

establishment of upscaled series in the Swedish market and therefore also results in a lower cost per kW. When Vindforsk provides support for individual design improvements, a problem is solved or the cost of a turbine is reduced. In other words, Vindforsk promotes the development of wind energy across the entire spectrum, i.e. with possibilities for upscaling and serial effects and for technological development. While the manufacturers naturally bear the main responsibility development of the components, system-related issues can be solved only in cooperation with the users.

It is estimated that a sum equal to approximately 2% of total manufacturer sales is devoted to research. At the global level, this corresponds to research investments of around SEK 3 billion annually. Added to this are government-financed research initiatives, which are estimated at just under half that amount. Although the figures are somewhat uncertain, the IEA Wind Energy Annual Report 2007 states that several countries are now intensifying their wind energy research.²⁸

Sweden's R&D commitments do not stand out in an international comparison, but lie somewhere in the mid-range. On the other hand, it is difficult to make comparisons between countries due to varying methods for reporting and defining these activities.

Sweden is planning a dramatic capacity expansion over the next few years and other countries are also increasing²⁹ their R,D&D budgets. Against this background, there is good reason to continue supporting wind energy development and widening the scope of R,D&D initiatives. The ambition to secure a technology leadership position in any niche will most certainly require an explicit emphasis. Although the EU's joint programs have been relatively modest so far, a stronger commitment has also been indicated at this level.³⁰

Report areas

General

This synthesis report has been compiled on the basis of data from the R&D program – seven underlying reports by selected authors³¹. Although Vindforsk II has not conducted research in all of these areas, by also including outside areas of interest it is possible to incorporate syntheses, evaluations and viewpoints of value in discussions about future research needs. (The

²⁸ IEA Wind Energy Annual report 2007, page 23, and selected country reports later in the text.

²⁹ Germany doubled its R, D&D investments to EUR 35 million during 2007 and Denmark will double its level to an indicated DKK 1 billion, although this latter amount includes more than strictly wind-related initiatives – energy technologies)

³⁰ Proposal from the European Wind Energy Technology Platform, an industry-led forum for wind energy research and development that was created through an EU initiative.

³¹ The reports and their authors are listed in the foreword.

underlying reports behind the synthesis report are available through Vindforsk³²).

The synthesis report contains 14 chapters, of which the first two (on Vindforsk and the international outlook) are mentioned in the first section of the summary. Chapters 3-14 are more fact- and research-oriented, dealing with the technology and how wind energy influences the environment and interacts with other systems in society.

The table below shows how the program funding has been allocated according to the subject areas in the report.

Chapter in the report	Share of program funding	Chapter in the report	Share of program funding
3. Large amounts of wind power from a market and technical perspective	14%	9. Wind energy in cold climates	6%
4. Planning and permitting	-	10. Wind energy in forested areas	-
5. Meteorological conditions	7%	11. Wind turbine design	14%
6. Environmental issues	-	12. Electrical systems in wind turbine conversion systems	28%
7. Noise	9%	13. Grid connection of wind power	14%
8. Effects on aircraft, radar and signals intelligence	-	14. Operation and maintenance	9%

Large amounts of wind power from a market and technical perspective

The Vindforsk II project has studied the potential for wind energy development, its impact on power quality, the best methods for grid connection of wind turbines and farms, how the market price is affected and how wind power can be integrated with both local and nationwide hydropower production.

The Swedish Energy Agency has proposed a new planning goal for wind energy in Sweden of 30 TWh by 2020, of which 10 TWh from offshore wind

³² www.vindenergi.org

farms. The Agency's proposal is linked to the EU's decision to increase the share of energy from renewable sources to 20% by 2020. When broken down at the national level, Sweden is expected to be assigned a target of 49% renewables, compared to the current 40%. Meeting this target will require a large amount of new renewable generation capacity and wind energy is expected to account for the bulk of this, due to its relative cost-effectiveness compared to other renewable sources.

A study within Vindforsk II clearly shows that the opportunities for wind power expansion are not limited by its physical potential. According to the study, Sweden could establish an estimated 510 TWh per year on land and 46 TWh per year at sea when the limit for exploitable potential is set at an average wind speed of 6 m/s at a height of 71 meters. The land-based potential is thus considerable. However, the ability to effectively utilise this potential – and to achieve large-scale expansion before 2020 – will depend largely on whether or not barriers are created by the permitting process, opportunities for grid connection and technical problems. The technical difficulties and uncertainties surrounding wind power in forested areas and cold climates are touched on in the respective chapters of this report.

Although the cost of new wind capacity is often higher than for other power generation technologies, its environmental advantages and renewable energy targets have motivated the introduction of support systems. Sweden's system of renewable energy certificate (REC) is now starting to accelerate the pace of wind deployment, although sea-based wind power is so expensive at present that it requires supplementary support in order to play any significant role in Sweden in a near-term perspective. The relatively young and untested technology for offshore wind turbines can be further developed, but this will require ordering of new turbines, and before that can happen there must be support systems in place. Here, there is scope for creative R&D proposals.

The large-scale deployment of wind power will create new demands on the power system's regulation capacity. The Nordic region has access to hydropower, which is an effective means of compensating for fluctuations in wind power output. This is attractive not only for Swedish wind utility operators but also for the European wind energy industry. Studies on the need for regulation power and how to effectively exploit hydropower for power balancing and regulation in a wider perspective are therefore urgent.

A deregulated market with large amounts of wind power will also function differently than at present. Norway has launched an ambitious program where the aims are to develop wind energy, regulate this with hydropower and interact with other countries in Europe. In this context it is natural to study how future wind deployment will affect the current trading regime on the Nordic power exchange NordPool, an analysis that should be carried out in pan-Nordic collaboration.

The need for regulation power means that more hydroelectric power must be transmitted from north to south, which will affect capacity on the national grid. With the now planned additions to the total power system, including wind and nuclear power, by 2020, the supply of electricity in the Nordic market could exceed total market demand. This will require expansion of international interconnections to avoid locking Nordic CO₂-free electricity production within the Nordic system. Other technological developments could

also affect the future of wind power. In order to create the conditions for an efficient electricity market based on renewable and CO₂-neutral production to the greatest possible extent, adequate advance planning is needed for grid reinforcement. Increased energy efficiency can also affect the electricity market through both higher and lower demand for electricity. The market launch of electric and hybrid electric vehicles is an example of a phenomenon that indicates rising demand for electricity, and the systems for recharging these vehicles could also have a positive impact on access to and the need for regulation power.

Numerous efforts are underway to develop smart grids in both the USA and the EU. To facilitate the expansion of wind energy, which demands adequate grid reinforcement and the right amount of regulation and backup power, it is crucial to conduct studies in a number of areas such as forecasting of electricity consumption, the structure of support systems, the need for reinforcement of transmission networks and development of smart grid technologies. It should be noted that this is not restricted to individual wind energy issues and that planning of future research needs must ensure cooperation between multiple research programs and projects, both national and international.

Planning and permitting

Society's planning determines the framework for utilisation of wind energy. But despite this, planning has not been pursued as a separate area in the Swedish wind research programs. No projects on this topic have been conducted within Vindforsk II, although three are being carried out in the Vindval³³ program.

In contrast with countries like Denmark, Sweden has no wind energy planning at the national level. An overall approach to the country's wind energy deployment is desirable for both technical and environmental reasons. Examples of closely-related regional studies are Sydhavsvind and the Offshore Bank Survey (Utsjöbanks-inventeringen).

Although both Vindforsk and Vindval are applied research programs (with a clear user perspective), some attention should also be devoted to planning in the ongoing development of these programs. There should be ample scope to create concrete tools that facilitate future wind energy projects and contribute to more efficient utilisation of resources by wind developers, public agencies and special interest organisations and, not least, more satisfied citizens. It should be noted research on acceptance is concerned not only with acceptance for the wind turbines themselves, but also for expansion of the transmission network and other infrastructure.

³³ Vindval is a research program that compiled data and knowledge about the environmental effects of wind energy, but also includes projects on acceptance and planning. The program is funded by the Swedish Energy Agency and administered by the Swedish Environmental Protection Agency, www.naturvardsverket.se/vindval

Meteorological conditions

Wind energy development requires knowledge about wind, both as an energy resource and as a dimensioning factor for the turbines. The European Wind Energy Technology Platform is urgently appealing for more research in this area. For many years Sweden has conducted high quality meteorological wind research, which has been ground-breaking in several respects but has today perhaps lost some momentum. There is reason to break this trend, particularly in country-specific areas such as wind conditions in forested areas and wind energy in cold climates.

Vindforsk II has financed three projects dealing with basic research and collection of statistical data. For future projects, it would be beneficial to increase spatial resolution in the wind mapping model to further enhance its usefulness for project development and siting purposes. In addition, the special wind conditions existing over the ocean, forest and hilly terrain call for further development of wake models, i.e how wind turbines shade each other in different terrain. Continuous measurement of wind speeds in different landscapes makes it possible to dimension wind turbines and long-term measurements also provide a basis for determining the normal wind year. There is a growing need for local wind forecasts and possible monitoring of other meteorological conditions such as icing events in order to handle wind energy in northerly climates.

Environmental effects

The environmental aspect represents both wind energy's foremost opportunity and its greatest limitation. Although interest in wind energy stems from its low environmental impact, environmental issues are often the cause of restrictions and delays in wind energy projects.

Environmental issues have not been covered by Vindforsk II other than in relation to noise issues, which are covered under a separate heading below. The task of Vindval, a research program funded by the Swedish Energy Agency and administered by the Swedish Environmental Protection Agency, has on the other hand been to compile data, build knowledge and distribute information about the environmental effects of wind power.

Wind turbine noise

Noise accounts for a significant share of wind energy's environmental impact and is a topic of extensive discussion in the permitting process. The currently available Swedish knowledge on this topic is based mainly on projects financed by Vindforsk and its predecessors.

In one project, sound propagation around offshore wind turbines has been investigated by measuring sound attenuation over the distance from the Utgrunden lighthouse in the Kalmar Strait to the island of Öland. The results have provided a basis for modification of the Swedish Environmental Protection Agency's model "Sound propagation around offshore wind turbines". A project using measurement data from the Utgrunden lighthouse to validate the calculations is investigating new types of models that include the effects of meteorological conditions such as temperature and wind gradient. Methods to calculate sound propagation are thus under continuous

development – partly thanks to fast computers that now make it possible to use more physically detailed models which lead to a better ability to calculate the sound levels arising at different distances from wind turbines. The areas described as critical for future research are sound propagation in forest terrain and over the ocean surface. It is also important to increase knowledge about how consideration is taken to the masking effects of ambient noise and wind-sheltered sites with a low level of masked noise.

In other words, additional knowledge is needed and it is worth mentioning that Swedish research on turbine noise stands up well in an international comparison. However, it is also true that noise issues appear to be of greater interest in Sweden than other countries, particularly for offshore wind farms.

Questions about which noise level parameters should be used and how ambient noise sources affect the share of people who experience noise annoyance are both related to research on acceptance. During Vindforsk II, this research has taken place within Vindval and the Vindforsk projects have focused on the more technical aspects of sound propagation. In order to formulate the right noise level parameters, such as duration, in the future, it is vital to coordinate acceptance-oriented research and technical research on sound propagation.

Effects on radar, microwave link and signals intelligence

Wind turbines affect and sometimes create disturbances in existing technical systems. Aircraft must naturally be able to detect the turbines in time and the national defence does not want these to interfere with Swedish radar and signals intelligence. The military also has other interests that sometimes conflict with potential siting of wind turbines, such as the desire to maintain a system of reserve landing strips. However, this imprecise landing system requires large amounts of free space and is a case where the wind energy industry asserts that military interests must be weighed against the need for expansion of wind power. In such cases, advocates of the wind energy sector claim that in view of the overall benefits in combination with possible alternative solutions, this may not be allowed to hinder wind energy deployment. Obstacle warning lights on wind turbines are a further example of how these interests can be opposed. Obstacle warning lights are intended to prevent aircraft collisions, but can be disruptive for the surrounding environment and represent an added cost.

This has not been a prioritised area for Vindforsk II. However, a separate research report with funding from the Swedish Energy Agency on radar interference from offshore wind farms was carried out during the period.

This chapter reviews a number of conflict areas, such as the need for “free air space” around airports, obstacle warning lights and wind turbine interference with radar and microwave link. The chapter also presents proposals for specific areas where research can be necessary to find alternative solutions and a reasonable balance between the various interests.

Wind energy in cold climates

Some 70% of Sweden’s total surface area is at risk for heavy icing on wind turbine rotor blades and other components. However, commercially available

technology is made to withstand only moderate icing. The month-long standstills that have occurred in certain turbines are not acceptable and are definitely a barrier to large-scale expansion. But in the sellers' market that exists today, icing is not a prioritised consideration for the major wind turbine suppliers since this problem is minor in a global perspective. The suppliers already have a sufficient number of customers for wind turbines not specially designed for cold climate conditions, and therefore have little interest in developing solutions.

In spite of this, new wind turbines are being built in sites affected by icing. The developers apparently do not see icing as a decisive obstacle, but at the same time express a need to address the problem. Knowledge about which areas that are at significant risk for icing and the development of techniques to prevent icing or remove ice from the rotor blades is therefore vital. Due to the small number of countries with problems of this type, it is important for Sweden to play an active role in driving development forward.

The Vindforsk II program includes one project focusing on development of methods to de-ice or prevent icing on rotor blades and two projects on ice measurement and detection. Besides contributing to increased knowledge in these areas, the research efforts can create opportunities for development of the products used in the projects. Sweden is also participating in an IEA Wind task for research on wind energy in cold climates.

For the future, it is vital not least to collect statistics and other data in order to systematise and develop knowledge about icing. Better resources are also needed, as in the case of wind mapping, for classification of local risks and the rate of icing at potential wind turbine sites.

Wind energy in forested areas

Wind energy in forested areas has not been a priority for Vindforsk II, but a keen interest in building wind turbines in forested areas has changed the need for research on this area.

This chapter describes experiences from some 60 Swedish wind turbines built in or near the forest. A few stand on open ground but are affected by the surrounding forest, while most are located in purely forested areas, often on hills and rises. A general conclusion is that energy yield predications appear more reliable for turbines in forested areas than for other turbines in the country. This is possibly due to the fact that forest projects tend to be larger, with more generous budgets for wind measurement and other validation, than the typical project in open terrain. It has been found that energy yield levels from wind turbines in forested areas are largely equal to those in other turbines of similar size.

Although the review shows that wind turbines in forested areas have good output levels and have functioned well thus far, the nature of wind conditions over the forest has not yet been studied. High turbulence intensities and wind gradients should affect output and lead to increased fatigue loadings and subsequently also shorter turbine lifetimes. Basic and applied research initiatives, like better statistics, are therefore motivated components of future programs. This applies particularly to the dynamic behaviour of winds over

the forest and how they interact with a large array of wind turbines in forest terrain, as well as how wind turbine wakes³⁴ spread and break down.

Wind turbine design

For obvious reasons, improved technology, more advanced components and better dimensioning criteria for power plants are key drivers for the development of wind power technology and are also a central area for R&D initiatives in the international arena. Because Sweden has no suppliers of complete turbines, however, Swedish research on wind turbine design is naturally tied to the project orderer's desire to influence the suppliers and the problems Swedish sub-contractors may wish to focus on. Five projects have been financed within Vindforsk II, ranging from how wind farms can be optimised with regard to wind turbine wakes to new splicing methods for steel wind turbine towers. One area of importance also for a country as project orderer is standardisation, where Sweden has been active among other things in formulating communication standard for monitoring and control of wind turbines.

The international standardisation effort is an area that deserves continued attention. There are considerable opportunities to influence activities in new fields of interest such as wind energy in forests and cold climates. Participation in the standardisation process provides valuable early-stage information about the direction of new standards.

When and if the development of Swedish-made wind turbines picks up momentum, there may be reason to support special design-oriented research with a direct bearing on the problems of this industry.

Electrical systems in wind turbines

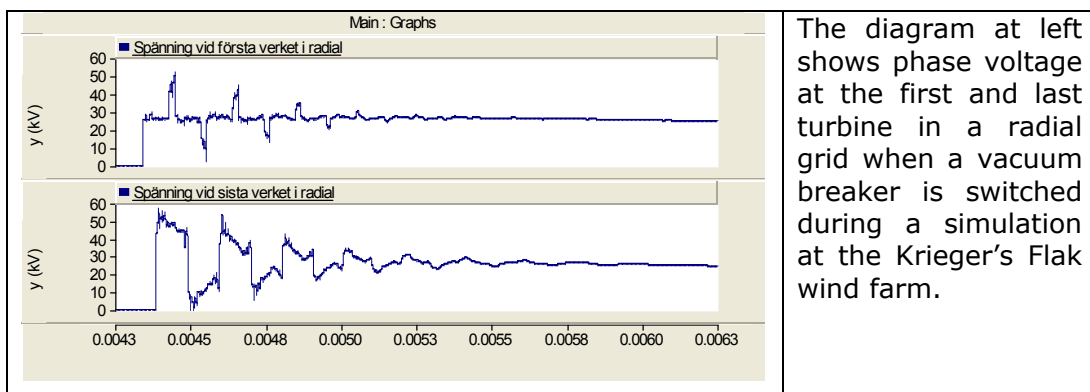
The two areas of electrical systems for wind turbines and grid connection of wind turbines are closely related, but are described in two separate chapters in this synthesis report. Both are prioritised research areas in Vindforsk II. For both historical and industrial reasons, electrical system issues are of special interest to Sweden with its world-leading industry and ongoing development. The question of how to adapt wind turbines to the local – and sometimes specifically Swedish – conditions of the electrical network system is crucial in order to integrate wind generation into the Swedish power system in a technically acceptable manner.

Wind farms interact with large electrical systems, and the way in which this interaction takes place is highly important. With electronic controls, such as variable rotational speeds, it is possible to maintain high wind turbine output while also minimising mechanical loads on the turbine. At the same time, with the help of power electronics the electrical systems can make it possible for wind turbines to interact, and be effectively integrated, with the power grid. The Vindforsk projects are contributing to increased knowledge about how

³⁴ Wind turbines extract energy from the air by slowing the wind to a lower velocity. A wake is the name of the "wind hole" that is created behind a turbine. Through influence from the ambient atmospheric air flow, these wakes recover at a certain distance behind the turbine.

electrical systems can be designed to achieve these goals – high output, low loads and effective interaction with the power system – at a low system cost.

However, new electrical system layouts and new equipment demand knowledge about the function of electrical systems all the way down to the detail level, where an example can be used to illustrate part of the problem. Several offshore wind farms, such as Middelgrunden and Horns Rev, have experienced transformer and generators failures. The underlying reasons are not fully known, but one possible explanation is that these failures have been caused by high frequency oscillations in the power grid. For example, switching of the now common vacuum circuit breakers can give rise to transient overvoltages (spikes). The large cable systems in an offshore wind farm can extend for tens of kilometers, and these transients travel along the network. (See diagram below).



Three Vindforsk II projects are studying the problem of high frequency transients in wind farms, and are resulting in models for electrical systems with more detailed modelling of circuit-breakers in the system. These projects are vital for successful planning and design of offshore wind farms.

Grid connection of wind turbines

The electrical newtwork owners' technical requirements for grid connection of wind turbines have become more rigorous as wind power accounts for a growing share of total system generation. The grid codes issued by newtwork owners increasingly include requirements on reactive power compensation during net-faults. Some requirements also apply to participation in the frequenct control. For instance, Hydro Quebec's code states that wind farms must be able to support frequency control by temporarily boosting reactive output current by 10%.

With regard to grid connection, the Vindforsk II projects have focused on ways during the planning and design stage to ensure that wind farms meet the code requirements of Svenska Kraftnät (the Swedish National Grid) regarding their behavior in the grid. Testing procedures are being developed to evaluate the wind turbines' ability to meet these requirements.

Ongoing activities are motivated not only due to the scope of this problem area, but also because Sweden has traditionally had a strong power technology industry that may be attractive for participation in wind deployment projects both in Sweden and worldwide. Areas related to usage of power electronics and direct current systems should therefore remain central in future research programs.

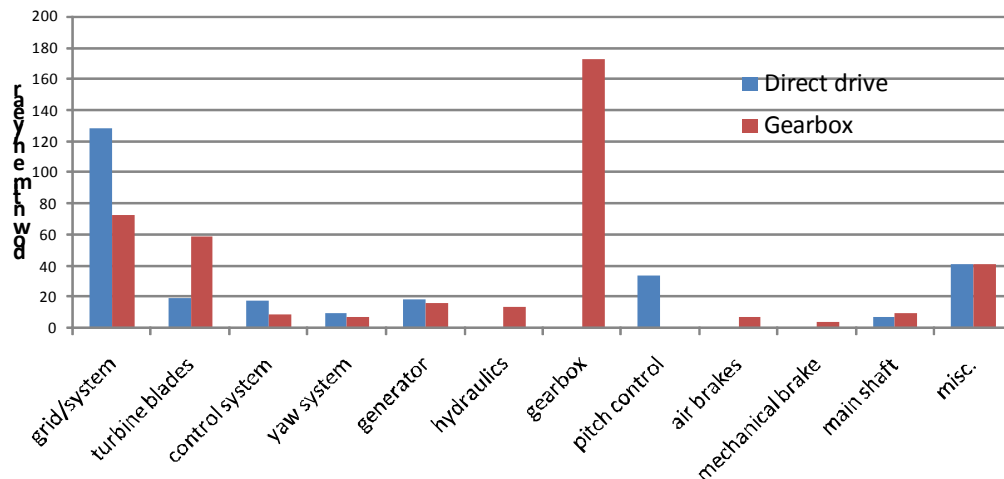
A closely related theme that has attracted widespread attention is the idea of a "super grid" to interlink and connect offshore wind turbines. One or more gigantic direct current grids in the North Sea and the Baltic could feed energy to different countries while at the same time interconnecting them. The Norwegian hydropower industry is interested in utilising hydropower to regulate this wind power, and Norway has launched studies in this area. Perhaps Sweden should also draw up a plan for how a super grid could affect the Swedish transmission system, the wind energy program and usage of Swedish hydropower.

Operation and maintenance

Within Vindforsk II, three projects have been carried out in the area of operation and maintenance development. One of these has applied to statistics. Wind turbines have long been considered to have an availability of 98-99%, and the statistics reported for Swedish wind turbines since the 1980s support this assumption. However, a review of the statistical data uncovers errors and misleading information in the reporting system. A more accurate availability value is more likely in the range of 90-95%, which means that production capacity has been overestimated but also that the potential for improvement is greater that previously believed.

An understanding of operation and maintenance, and the related costs, is essential for wind power development. This is even more crucial when the turbines are difficult to reach, such as in the case of offshore wind turbines,

and accessibility for major maintenance will also be periodically limited in cold climates. In order to develop efficient operation and maintenance strategies, it is necessary to have knowledge not only about the service life and failure rates of individual components, but also about how the various sub-assemblies affect each other. While access to statistics, failure causes and frequencies, etc., is essential, no reliable analysis is possible until there is a sufficient volume of data, effective methods for monitoring the condition of components and developed maintenance strategies.



Causes of failures in Danish and German wind turbines according to an analysis by J.V. Tavner in the spring of 2008

The above graph from an EWEC report³⁵ is based on one Danish and two German databases containing data from 7,000 wind turbines over a period of 11 years. Gearbox failures are common in geared turbines, while direct drive turbines are commonly affected by malfunctions in the electrical system. Understanding the forces at work and the interplay between mechanical and electrical systems stands out as the perhaps most important factor.

Systematic data collection and good maintenance methods lead to better operating performance. One project within Vindforsk II has been aimed at improving the statistics and another at optimising maintenance in offshore wind farms. Because offshore turbines are difficult to access, they require a different maintenance strategy than used for other power generation facilities. These methods should also be of interest for wind energy in cold climates.

Failures lead to downtimes and cost money. After being hit by lightning and catching fire, a turbine can be destroyed if its fire extinguisher systems are not adequate. In Germany, 8 wind turbines were ravaged by fire³⁶ during 2002. Data from 12,000 turbines shows a failure frequency of 0.07%, which reduces reliability performance by 0.7%. Downtimes of all types affect operating economy and deserve attention.

³⁵ P.J. Tavner et al. Reliability of different wind turbine concepts with relevance to offshore application. EWEC 2008, Brussels 30/3 – 4/4 2008.

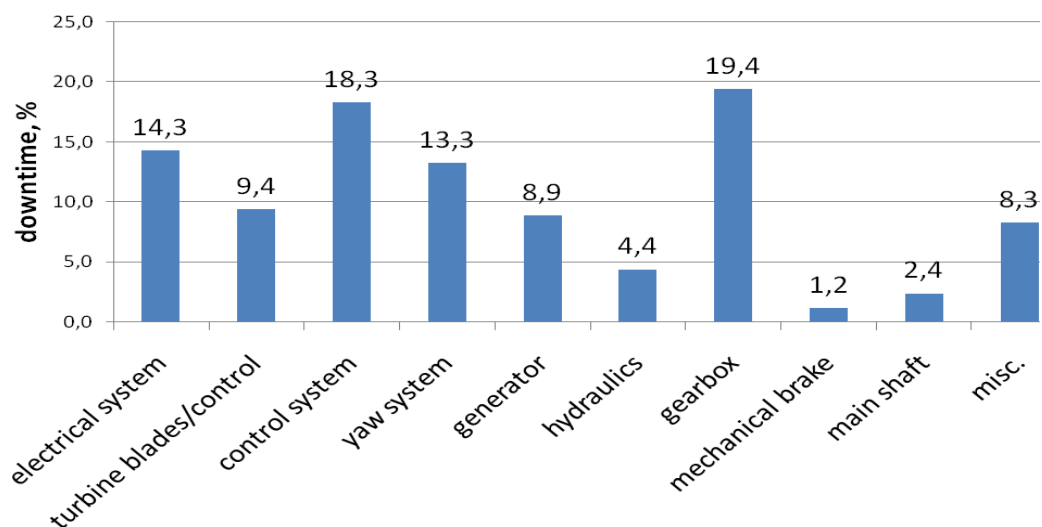
³⁶ Wind Kraft Journal 3/2005

Wind turbines have become larger, and Tavner's study indicates that this is leading to a higher failure frequency – from one failure per year for turbines with a capacity of around 250 kW to 3.5 failures per year for 1.5 MW turbines. The direct drive turbines with capacities of 0.5 MW and 1.5 MW show the same frequency of 2.5 failures per year. A rising failure rate cannot be ignored. From a technical standpoint, wind power resembles hydropower and the ambition should be to achieve the same low failure frequency and high reliability performance in wind turbines that have long been seen in hydropower plants.

Closing comments – including views on future initiatives

Priorities for Vindforsk II

Vindforsk II has been developed and continued along the same lines as Vindforsk I. The priorities have been determined by the participating companies' needs and ability to make research proposals, but also on the basis of the information or facts the researchers have had access to. Another requirement has been some type of fundamental aim for the results to be made publicly accessible – albeit at a certain delay.



Distribution of downtimes in Swedish wind turbines, based on processed data from Ribrant and Bertling (2007).

Although research on gearbox problems would top the list, as it perhaps should do considering the above graph, the opportunities for R&D in this area are limited since this type of development work must be driven largely by manufacturers. In contrast, questions related to electrical systems, control assemblies and wind energy's role in the Swedish electricity market are all ideally suited for research within the Vindforsk program.

Consequently, it is urgent to seek answers to questions that are specific to the Swedish industrial sector, Swedish society or Nordic climate. Another key aspect is to prioritise research that not only solves technical problems but also

contributes to industrial development and job creation in Sweden. Examples of such areas are ideas that widen the scope for wind power to interact with electricity generation, transmission and/or consumption; innovative solutions for electrical systems in wind farms; turbine designs that enable new industrial solutions (such as towers, foundations, etc.); designs that are adapted to the Nordic climate and terrain (e.g. forest, cold, etc.) and so on.

IEA Wind Energy Annual Report 2007³⁷ presents a thought-provoking table in which the installed wind capacity in various countries is seen in relation to the estimated number of jobs created and economic impact.

Table 5 Wind Capacity, Jobs, and Economic Impact in 2007			
Country	"Capacity (MW)"	Estimated number of jobs	"Economic impact (Million EURO)"
Germany	22,247	84,300	11,729
United States	16,904	17,000	6,165
Spain	15,145	45,000	5,000
Denmark	3,124	28,000	4,690
Italy	2,726	10,600	1,000
United Kingdom	2,390	8,000	
Portugal	2,125		
Canada	1,845	3,340*	1,490*
Netherlands	1,745		230
Japan	1,538		
Austria**	982		
Greece	874		
Australia	824	978	180
Ireland	803		90
Sweden	788		
Norway	385		
Republic of Korea	193		
Finland	110		
Mexico	85		
Switzerland	12		100
* Numbers from 2006			
** Numbers from Wind Power Monthly			

Although the figures in the table contain a certain degree of uncertainty, they confirm that countries which have build up their own manufacturing capacity parallel to the deployment of wind power derive double benefits from these investments. Swedish R&D should therefore continue prioritising project proposals that offer opportunities to develop Swedish industries.

The other main objective behind Vindforsk is to promote the build-up of Swedish expertise in wind power technology at universities and technical institutes through R&D projects. All players in the Swedish wind energy sector

³⁷ IEA Wind Energy Annual Report 2007 page 18

also stand to benefit if the academic sphere is able to attract competent new young people by encouraging Ph.D. students to take on problems of both theoretical and industrial relevance.

Closing comments ahead of Vindforsk III

The program evaluation has found Vindforsk II to be of high quality and merit. This applies to both actual research results and the process behind the allocation of funds. The report points out several reasons to continue the program. These have been previously described in the applicable sections of Chapter 2, and are thereby handed over to the upcoming Vindforsk III (under development at the time this report was written). No total reevaluation of the direction and content of Vindforsk III appears necessary.

The Swedish wind energy sector is facing a daunting challenge. During the period 2009-2011 (and onward to 2015 when the planning target of around 10 TWh will perhaps be met), Sweden must expand its wind capacity by 600 to 700 MW per year in order to achieve an installed capacity of 4,000 to 4,500 MW by 2015. The necessary investments are estimated at SEK 8 billion annually³⁸. If government-funded research makes up 1%³⁹ of this amount, i.e. SEK 80 million, the funds would in such case be allocated not only to Vindforsk but also to Vindval and other government-supported initiatives. A level of SEK 15 -30 million per year in government R&D funding for technical wind energy research through a Vindforsk III program is equivalent to what many other governments invest.⁴⁰

Aside from the purely technical and knowledge-enhancing benefits of the Vindforsk programs, there are a few soft but no less important aspects:

- The first is to create greater visibility for the industry.
- More young people are needed in the sector, since the existing wind farms must be operated at the same time that the sector orders, builds and perhaps even delivers new turbines.

³⁸ In a newsletter from February 2008, the EWEA (European Wind Energy Association) states that some 20,000 MW of new wind generating capacity were installed during 2007. The investments are estimated at EUR 25 billion, which is equal to around SEK 12,000/kW (exchange rate of around SEK 10/EUR). For the USA, IEA Wind Energy Annual Report 2007, page 269, shows an installed project cost of USD 1,700/kW, which at an exchange rate of SEK 7.5/USD is equal to a cost of SEK 12,750/kW. This means $650 \times 10^3 \times 12,500 = 8,125 \times 10^9$ SEK.

³⁹ 1% of total investments is often regarded as a "reasonable" level of government R&D spending for this type of industry. Including industrial initiatives, total R&D investments often increase to 2% or more. Industrial sectors with shorter life cycles than the power industry, such as telecom, often have an R&D investment rate of 10%.

⁴⁰ In October 2008, Norway announced an 8-year co-funded wind research program through a new institute for offshore wind energy with a budget of NOK 40 million annually, or a total of NOK 320 million.

- Greater visibility also includes achieving an even inflow of qualified employees, particularly Ph.D. students. Some type of rolling financing scheme could possibly overcome the difficulties arising from the fact that research programs run for a fixed period that is not related to the normal Ph.D. period of three years.
- The second is to see and contribute to standardised solutions in order to cut costs and integrate players in the industry. This will require involvement in international groups.
- The third is to increase the industrial benefits of Sweden's wind energy deployment. New industrial players require support in order to take part in wind energy programs and develop new components. (At least one new wind turbine supplier was established in the summer of 2008 and there is potential to develop additional active industrial players.)

Innehåll

1	Vindforsk	1
1.1	Syfte	1
1.2	Mål.....	1
1.3	Budget och teknikområden mm	1
2	Internationell vindkraftsforskning	3
2.1	Vindkraften i världen.....	3
2.2	European Wind Energy Technology Platform	3
2.3	Forskning och utveckling inom EU och OECD	4
3	Stor andel vindkraft ur ett marknads- och teknikperspektiv	6
3.1	Resultat från Vindforskprogrammet.....	6
3.2	Omvärldsanalys	12
3.3	Framtida utveckling	13
4	Planering och tillstånd	17
4.1	Resultat från Vindforskprogrammet.....	17
4.2	Omvärldsanalys	17
4.3	Framtida utveckling	25
5	Meteorologi	27
5.1	Resultat från Vindforskprogrammet.....	27
5.2	Omvärldsanalys	28
5.3	Framtida utveckling	38
6	Miljöeffekter	40
6.1	Resultat från Vindforskprogrammet.....	40
6.2	Omvärldsanalys	40
6.3	Framtida utveckling	47
7	Ljud	50
7.1	Resultat från Vindforskprogrammet.....	50
7.2	Omvärldsanalys	53
7.3	Framtida utveckling	56
8	Effekter på flyg, radar, radiolänk och signalspaning	58
8.1	Resultat från Vindforskprogrammet.....	58
8.2	Omvärldsanalys	58
8.3	Framtida utveckling	65
9	Vindkraft i kallt klimat	67
9.1	Resultat från Vindforskprogrammet.....	67
9.2	Omvärldsanalys	68
9.3	Framtida utveckling	72
10	Vindkraft i skog	74
10.1	Resultat från Vindforskprogrammet.....	74
10.2	Omvärldsanalys	74
10.3	Framtida utveckling	81
11	Konstruktion av vindkraftverk	83
11.1	Resultat från Vindforskprogrammet.....	83

11.2	Omvärldsanalys	85
11.3	Framtida utveckling	86
12	Elsystem för vindkraftsanläggningar	88
12.1	Resultat från Vindforskprogrammet.....	88
12.2	Omvärldsanalys	93
12.3	Framtida utveckling	95
13	Anslutning av vindkraftsanläggningar	97
13.1	Resultat från Vindforskprogrammet.....	97
13.2	Omvärldsanalys	99
13.3	Framtida utveckling	101
14	Drift och underhåll	102
14.1	Resultat från Vindforskprogrammet.....	102
14.2	Omvärldsanalys	103
14.3	Framtida utveckling	109
Appendix 1A: Projektlista för det tillämpade programmet:		111
Appendix 1B Projektlista för det grundläggande programmet:		117

1 Vindforsk

1.1 Syfte⁴¹

Utbyggnaden av vindkraft innebär, liksom för annan infrastruktur, många överväganden om hur denna ska implementeras i befintlig miljö och bebyggelse. Utbyggnadstaken bestäms i stor utsträckning av de ekonomiska förutsättningarna. Elproduktion med vindkraft är en relativt ny teknik som innebär att nya problemställningar introduceras både med avseende på tekniken och för övriga delar av elsystemet.

Syftet med programmet är att få kunskap som underlättar utbyggnaden av vindkraft och integration med kraftsystemet.

1.2 Mål

Programmet delmål är att alla genomförda verksamheter inom programmets ram ska bidra till att

- sänka elproduktionskostnaderna för vindkraft,
- underlätta etablering av ny vindkraft,
- inom relevanta områden bibehålla och vidareutveckla kompetens inom etablerade forskargrupper, samt
- inom relevanta områden utveckla och stärka svensk vindkraftsindustri.

1.3 Budget och teknikområden mm

Vindforsk 06-08 löper under tre år med start den 1 januari 2006. Budgeten uppgår till 15 Mkr för 2006 och 16,25 Mkr för vardera av åren 2007 och 2008, totalt 47,5 Mkr. Energimyndigheten bekostar helt det grundläggande forskningsprogrammet och det tillämpade programmet med 40 procent. Resterande finansieras av industrin.

Förutom den forskning som finansieras via Vindforsk stöder Energimyndigheten även forskningsprojekt som berör vindkraft via andra kanaler, vilka inte berörs här.

Programmet är uppdelat i följande delområden:

- Tillstånd, miljö och acceptans.
- Projektering, drift och underhåll av vindkraftverk.
- Externa förutsättningar, standardisering.
- Samverkan mellan vindkraft och elnät.
- Teknikbevakning och informationsspridning.

⁴¹ Syfte, mål, budget och teknikområden enligt Programbeskrivning Vindforsk 06-08, version enligt tilläggsbeslut 2007-02-14. www.vindenergi.org

Beslutade projekt (t.o.m oktober 2008) är något mindre än den ursprungligt budgeterade . Totalt är beslutat stöd för 19,6 Mkr för det grundläggande programmet och 24,5 Mkr för det tillämpade programmet. Fördelningen av finansieringen av Vindforsk framgår av Tabell 1.

En lista på projekten finns i Appendix 1.

<i>Tabell 1. Finansiering av Vindforsk 2006 - 2008 (Mkr)</i>	
Energiföretag	10,2
Svenska Kraftnät	2,4
ABB	1,5
EBL-Kompetense	0,6
Energimyndigheten - tillämpat program	9,8
Energimyndigheten - grundläggande program	19,6
Summa	44,1

Programmet leds av en styrelse som beslutar om projekt inom det tillämpade programmet och ger råd till Energimyndigheten beträffande det grundläggande. Vid tiden för utgivningen av denna rapport hade styrelsen följande sammansättning:

Stig Göthe	Ordförande
Jan Ahlbäck	Skellefteå Kraft
Anna Bergek	LiTH
Linus Palmblad	Energimyndigheten
Mikael Dahlgren	ABB
Lene Mostue	EBL-Kompetense
Elisabet Norgren	Svenska Kraftnät
Martin Lindholm	E.ON
Sven-Erik Thor	Vattenfall Elproduktion
Anders Björck	Elforsk (programledare, adjungerad)

2 Internationell vindkraftsforskning

2.1 Vindkraften i världen

Sedan början av 1990-talet har vindkraften byggts ut till att i slutet av 2007 omfatta 94 000 MW i hela världen, vilket innebär att den då svarade för 1 procent av elproduktionen. I Sverige fanns vid samma tidpunkt 832 MW eller 0,9 procent av världens vindkraft. Tillskottet under 2007 uppgick till 20 000 MW och enligt en prognos beräknas den täcka 2,7 procent av elproduktionen år 2012.⁴² Huvuddelen av utbyggnaden har hittills skett i Europa där den under 2007 utbyggda effekten var större än för något annat kraftslag. Under 2000-talet är det bara gaskraftverk som hittills byggts ut i större omfattning.⁴³

2.2 European Wind Energy Technology Platform

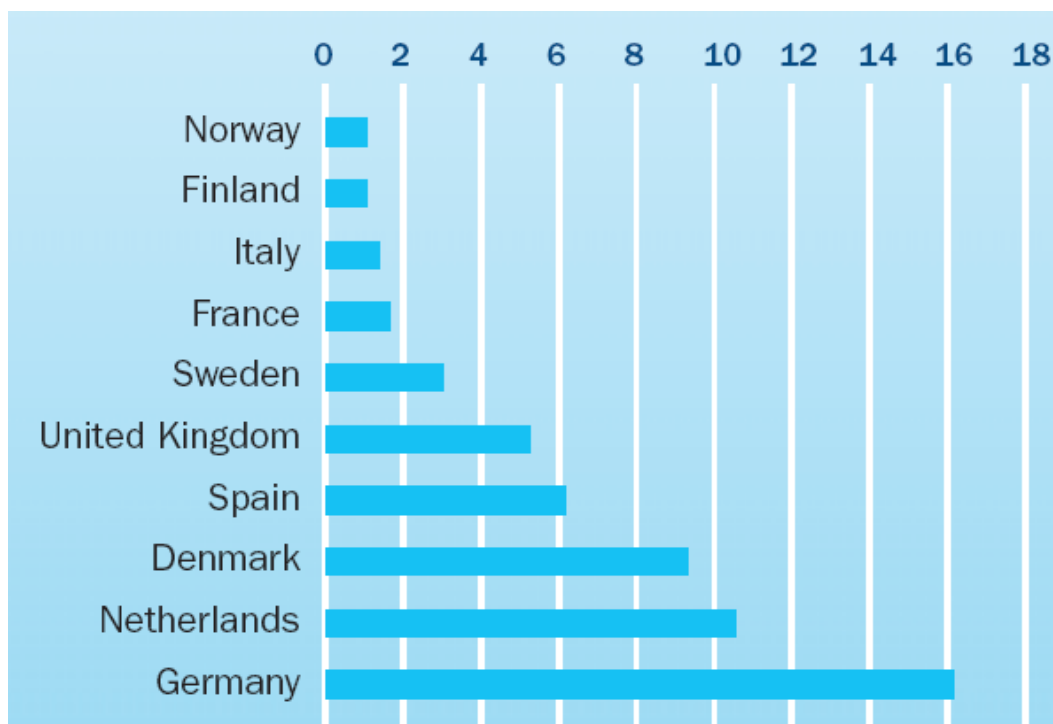
Som ett resultat av EUs ministerrådsmöte i Barcelona 2002 skapades "Technology Platforms" inom en rad områden i syfte att få företag, forskningsinstitutioner, finansvärlden och tillståndsgivande myndigheter att tillsammans formulera en dagordning för forskningen inom vart och ett av de aktuella områdena. För vindkraften bildades European Wind Energy Technology Platform, som idag består av omkring 170 personer fördelade på ett antal arbetsgrupper, ett sekretariat, en styrgrupp och en ledning. Det mest synliga resultatet av verksamheten är den "Strategic research agenda" som publicerades under 2008.⁴⁴ I denna behandlas forskning och forskningsbehov inom vindkraftsområdet med konkreta förslag till åtgärder. Sammansättningen och förankringen av gruppen gör att dokumentet väl återspeglar de dominerande uppfattningarna inom den europeiska vindkraftsvärlden.

I varje avsnitt av denna rapport har de aktuella förslagen från European Wind Energy Technology Platform sammanfattats. Tolkningen av graden av överensstämmelse får påverkas av förhållandena i de aktuella fallen och kan i hög grad bli läsarens egen. Exempelvis kan dokumentets starka framhållande av meteorologisk forskning leda till slutsatsen att vi borde satsa mer på detta område, där vi har en lång tradition och uppnått goda resultat. Dokumentets ointresse för vindkraft i kallt klimat kan också leda till behov av större egna insatser, eftersom större delen av Sverige är utsatt för isbildning och vi inte kan räkna med att få tillgång till tekniken utifrån.

⁴² BTM Consult ApS. International wind energy development. World market update 2007. Forecast 2008-2012. March 27, 2008. www.btm.dk

⁴³ EWEA. Wind energy leads EU power installations in 2007. News release 4 february 2008. www.ewea.org

⁴⁴ Strategic Research Agenda. Market deployment strategy from 2008 to 2030. European Wind Energy Technology Platform. www.windplatform.eu



Figur 1. Statlig vindkraftsforskning i genomsnitt 1998-2005 i europeiska länder med budget över 1 miljon euro per år. Miljoner euro i 2006 års penningvärde.⁴⁵

2.3 Forskning och utveckling inom EU och OECD

Den statliga forskningen i de "större" vindkraftsländerna inom EU framgår av Fig. 1, som är sammanställd av European Wind Energy Technology Platform. Sammanräknat uppgår den till motsvarande 520 Mkr per år. Länderna i OECD-området bedriver ett forskningssamarbete genom IEA, International

Tabell 2. Kostnad för forskning och utveckling hos olika vindkraftstillverkare 2006. Valutakurser 1 september 2008.		
Företag, land	FoU 2006 (Mkr) ⁴⁶	Marknadsandel, % ⁴⁷
Acciona, Spanien	216	2,8
Gamesa, Spanien	317	15,6
Nordex, Tyskland	108	3,4
Repower Systems, Tyskland	134	3,2
Vestas Wind Systems, Danmark	849	28,2
Summa	1624	53,2

⁴⁵ Strategic Research Agenda. Market deployment strategy from 2008 to 2030.

European Wind Energy Technology Platform. www.windplatform.eu

⁴⁶ Strategic Research Agenda. Market deployment strategy from 2008 to 2030.

European Wind Energy Technology Platform. www.windplatform.eu

⁴⁷ International wind energy development. World market update 2006. Forecast 2007-2011. BTM Consult Aps. March 2007.

Energy Agency. EU-forskningen enligt ovan ökad med forskning i USA, Canada, Japan samt EU centralt ger en total omfattning i världen motsvarande 940 Mkr per år.⁴⁸ Observera dock uppgifterna delvis avser olika tidsperioder. Med detta mått kommer den svenska statliga forskningen omfatta 3 procent av den totala, vilket kan jämföras med att Sverige har ungefär en procent av världens vindkraft.

Huvuddelen av utvecklingsarbetet sker inom industrin. I Tabell 2 framgår storleken av utvecklingssatsningen hos några vindkraftstillverkare, vilka tillsammans har drygt hälften av marknaden. Som ett medeltal uppgår kostnaden för FoU till två procent av nettoförsäljningen. Med antagandet att övriga tillverkare har procentuellt lika stor FoU skulle den totala omfattningen av utvecklingen hos världens vindkraftsindustri uppgå till motsvarande tre miljarder kronor per år eller drygt tre gånger så mycket som den statligt finansierade forskningen.

⁴⁸ IEA wind energy annual report 2006

3 Stor andel vindkraft ur ett marknads- och teknikperspektiv

3.1 Resultat från Vindforskprogrammet

Inom Vindforskprogrammet anslogs under perioden 2006/08 5,5 Mkr eller 14 procent av medlen till projekt inom området.

Potentialer för vindkraftsutbyggnad

*V-139 Vindkraft i framtiden*⁴⁹

Projektledare: Peter Blomqvist, Vattenfall Power Consultant

Potentialen för att bygga vindkraft i Sverige har studerats genom en omfattande inventering kombinerad med en analys av inverkan av olika ekonomiska och andra förutsättningar. Enligt rapporten är det fysiskt möjligt att bygga 510 TWh/år på land och betydligt mindre, 46 TWh/år, till havs. Hänsyn har tagits till vindförhållanden och andra fysiska begränsningar samt konflikter med andra intressen, till havs bland annat maximalt 40 meters vattendjup och 4 km som minsta avstånd till kust. I den fortsatta analysen behandlas endast en tiondel av den angivna potentialen, vilket också begränsar kritiken mot att den grundläggande studien placerade verken väl tätt.

På land sätts gränsen för den utbyggbara potentialen vid en medelvind om 6 meter per sekund på 71 meter, vilket medför att den övervägande delen hamnar i den södra delen av landet. En stor del består av skogsområden, där varje verk i kalkylen belastas med en extra kostnad om 2 Mkr för ett 20 meter högre torn. Skog kan i sig innebära en fördel därför att den ger möjlighet till utbyggnad i stora sammanhängande områden med få konflikter.

Det beräknade framtida elpriset räcker inte annat än undantagsvis för att göra vindkraften lönsam att bygga ut. Elcertifikatsystemet har därmed en avgörande inverkan på introduktionen av vindkraft. I referensfallet är elproduktionen från vindkraft år 2020 ca 10 TWh. Den övriga förnybara el som elcertifikaten tvingar fram täcks i beräkningarna av vattenkraft samt framförallt av kraftvärme och industriellt mottryck eldat med biobränslen.

Vindkraften kan begränsas av *låga biobränslepriser* (vilka ger biobränslekraftvärme bättre konkurrenskraft), *hög kalkylränta* (som slår mot den investeringstunga vindkraften), *mindre utbyggbar vindkraftspotential* (eftersom dyrare lokaliseringar då måste tas i anspråk för viss volym av vindkraftsutbyggnaden) och *högre investeringskostnader* för vindkraft (som indirekt ger ökad konkurrenskraft för annan förnybar elproduktion inom elcertifikatsystemet).

⁴⁹ Peter Blomqvist, Mats Nyborg, Daniel Simonsson, Håkan Sköldberg. Vindkraft i framtiden, möjlig utveckling i Sverige till 2020. Elforsk rapport 08:17, mars 2008.

Vindkraften gynnas om ovanstående faktorer utvecklas i motsatt riktning samt av en *större elcertifikatkvot* (som gynnar all förnybar elproduktion).

Med nuvarande nivå för elcertifikatkvoten ökar den förnybara elproduktionen med 17 TWh från 2003 till 2016 och nivån bibehålls därefter till 2030. Givet detta system så ger de flesta parametervariationer en elproduktion från vindkraft som år 2020 ligger i intervallet 7 – 12 TWh. Observera att detta bara är en liten del av den tekniska potentialen.

Om man ökar omfattningen av elcertifikatssystemet med ytterligare 15 TWh så ökar elproduktionen från vindkraft år 2020 med 11 TWh (från 10 till 21 TWh). Vindkraften står därmed för huvuddelen av ökningen, vilket innebär att potentialen för andra alternativ i detta kostnadsläge börjar bli uttömd.

Beräkningarna visar att havsbaserad vindkraft har dålig konkurrenskraft. Inom ramen för ett generellt certifikatsystem kommer den inte löna sig. Vill man påskynda teknikutvecklingen av den havsbaserade vindkraften måste alltså ett särskilt stödsystem införas för detta ändamål.

Inom projektet har också genomförts en enkät beträffande kvalitativa, icke-ekonomiska beslutsfaktorer, utöver den direkta lönsamheten. Av de negativa faktorerna har osäkerheter kring ekonomiska styrmedel och tillståndprocessen bedömts vara viktigast. Bland de positiva bedöms "goodwill" för företaget samt att vindkraften på sikt bedöms få bättre villkor som mest betydelsefulla. De negativa och de positiva uppskattas ha ungefär samma styrka, varför dessa kvalitativa faktorer inte verkar påverka slutresultatet.

Sammanfattningsvis konstateras att det är de politiskt beslutade stödsystemen som bestämmer hur mycket vindkraft som kommer att byggas i Sverige. Den tekniska potentialen är tillräckligt stor och begränsar inte omfattningen av vindkraftsutbyggnaden.

Påverkan på elnäten

*V-150 Konsekvenser av ökad andel distribuerad elproduktion på elkvalitet*⁵⁰

Projektledare: Math Bollen, STRI

Sedan begynnelsen har elkraftsbranschen levt med förutsättningen att elnäten och produktionsanläggningarna måste dimensioneras på ett sådant sätt att kunderna får en godtagbar elkvalitet. Det som rapporten behandlar är följdriktigt hur systemen kan påverkas och eventuellt behöva förstärkas vid en omfattande introduktion av distribuerad elproduktion. Informationen har hämtats från tillgänglig litteratur och rapporter, med fokus på den direkta inverkan en ökad mängd vindkraft har på elkvalitet och tillförlitlighet i distributionsnät.

Vid måttliga mängder vindkraft kommer risken för överlast att reduceras samtidigt som förlusterna minskar. Bara om den maximala vindkraftsproduktionen lokalt överstiger summan av maximal och minimal belastning i distributionsledet kan risken för överbelastning öka.

⁵⁰ Youngtao Yang and Math Bollen. Power quality and reliability in distribution networks with increased levels of distributed generation. Elforsk rapport V-150, March 2008.

När den maximala utbyggnaden av distribuerad elproduktion överstiger den dubbla minimala belastningen kan förlusterna i vissa nätområden komma att öka. Det behövs dock mycket större utbyggnader för att de totala förlusterna ska öka.

En stor utbyggnad av vindkraft kan föra med sig att andra, konventionella, produktionsanläggningar inte byggs. Detta skulle kunna leda till tillfälliga spänningssänkningar i stamnät, regionnät och distributionsnät som saknar synkrona distribuerade elproduktionsanläggningar. Detta bör dock inte gälla vid utbyggnad av vindkraftverk av modern typ med aktiva omriktare, vilka medverkar i spänningsregleringen.

Vindkraftens påverkan på flicker bedöms bli liten och vindkraften kommer troligen inte heller förvärra problemen med övertoner i elnäten.

Tillförlitligheten på användarnivå kommer inte att utvecklas negativt. Tvärtom kan distribuerad produktion komma att öka tillförlitligheten om inte annan produktion längre upp i systemet tas ur drift.

Vindkraftens inverkan på driftsäkerheten på transmissionsnivå är komplex. De två viktigaste frågorna är hur vindkraften inverkar vid en större nätstörning och hur nätet påverkas om större konventionella produktionsenheter ersätts med vindkraft. Slutsatsen är att det behövs mycket stora vindkraftsutbyggnader för att driftsäkerheten skulle kunna försämrats på transmissionsnivå. Eventuella problem med skyddssystem kommer i många fall att lösas på denna nivå.

V-216 Analys av dynamisk inverkan av stora vindkraftparker på kraftsystemets stabilitet⁵¹

Projektledare: Lennart Söder, Elektriska Energisystem KTH

När den installerade vindkraftseffekten ökar kommer dess påverkan på elnäten att bli tydlig. I detta projekt utvecklas analytiska hjälpmedel för att analysera nätstabiliteten och undersöka hur denna om möjligt kan förbättras med hjälp av smarta kontrollstrategier i vindturbinernas styrutrustningar. Projektet rapporteras under 2008.

V-104 IEA Task 25 System med stor andel vindkraft⁵²

Projektledare: Lennart Söder, Elektriska Energisystem KTH

Inom IEA Annex 25 "Design and operation of power systems with large integration of wind power" utbyter tretton deltagare från tio länder kunskaper på området genom egna studier och gemensamt arbete. Målet är att utveckla en metod för att uppskatta hur kraftsystem påverkas av en stor andel vindkraft i systemet, främst med avseende på tillförlitlighet och förluster.

⁵¹ Katherine Elkington. Analysis of the dynamic effect of large wind parks on power system stability. Elektriska Energisystem KTH, Lägesrapport 5 maj 2008.

⁵² Lennart Söder. System med stor andel vindkraft, IEA Annex 25. Elektriska Energisystem KTH, Lägesrapport 12 maj 2008.

Påverkan på elmarknaden

*V-132 Stora mängder vindkraft – förändrade marknadsförhållanden*⁵³

Projektledare: Viktoria Neimane, Vattenfall R&D

Variationer i elproduktion behöver inte orsaka några påtagliga merkostnader om de är kända i förväg. Problemet för vindkraften är att prognosfel på upp till 50 procent är ganska vanliga i det tidsperspektiv som gäller för Nordpool, 12-36 timmar. Det betyder att storskalig vindkraftsproduktion regelmässigt medför obalanser jämfört med de bud som placeras på Nordpool.

Den balansansvarige kan baserat på en senare prognos köpa eller sälja el på Elbas innan produktionstimmen för att minska sitt prognosfel. Det resterade felet får därefter klaras ut på balanskraftsmarknaden. Kommer en på grund av vindkraften mer omfattande handel på Elbas att leda till påtagligt ökade kostnader, såväl reella på grund av ökad produktionskostnader och förluster som transaktionskostnader föranledda av handelsförfarandet?

Ett alternativ för balansansvariga med stor och diversifierad produktion är att hantera sina obalanser internt. Om det till exempel blåser för lite och vindkraftsproduktionen blir lägre än väntat kan man öka effekten i vattenkraften. En annan aspekt är att en balansansvarig med geografiskt spridd vindkraft har fördelen av att korrelationen mellan prognosfelen för vindkraftsparker på avstånd från varandra är låg. Det betyder att prognosfelen tenderar att ta ut varandra. En balansansvarig med stor vindkraftsproduktion har därför ett lägre prognosfel relativt produktionen. Dessa faktorer innebär att balansansvariga med stor marknadsandel har skalfördelar. Därutöver kan man konstatera att det ur systemets synpunkt borde vara egalt om produktionen finns hos en aktör eller hos flera. Om det senare alternativet skulle ge merkostnader måste detta bero på att handeln är felaktigt organiserad, vilket i så fall bör rättas till.

Hur ska en avreglerad marknad utformas för att större kvantiteter vindkraft ska kunna införlivas i systemet? Kan och bör vindkraften själv bära påförda balanskostnader eller bör marknadens regelverk förändras? Målet för projektet är att beskriva konsekvenserna för olika balansansvariga vid introduktion av stora volymer vindkraft ur dessa två aspekter.

Därefter ska projektet överväga möjliga ändringar i det institutionella ramverket och i den infrastruktur som omger elmarknaden för att anpassa systemet till de nya förhållandena.

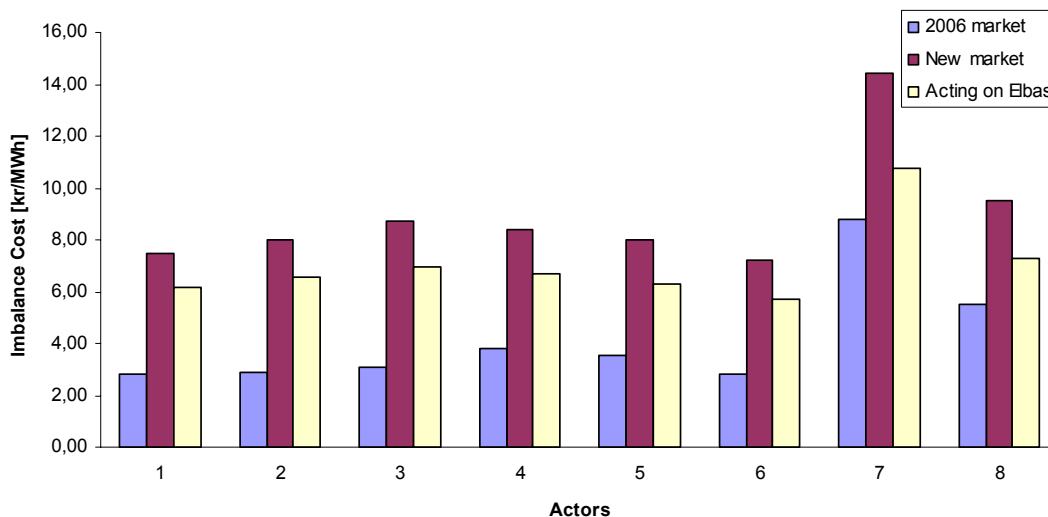
Hittills har beräkningar genomförts för ett scenario med 4 000 MW vindkraft som hanteras av åtta balansansvariga aktörer. Obalanserna beräknas baserat på statistiska data, analyser från Tyskland och korrelationssamband för vindkraftsparker på olika avstånd vid given framförhållning på 12-36 timmar. Framtida priser på reglermarknaden och på Elbas baseras på en modell av elmarknadens utveckling till 2020.

Beräkning av obalanskostnader för de åtta aktörerna har genomförts för följande fall:

⁵³ Viktoria Neimane. Stora mängder vindkraft – förändrade marknadsförhållanden? Vattenfall R&D, Lägesrapport maj 2008.

- Produktionsplaner lämnas till Nordpool 12-36 timmar innan aktuell produktionstimme. Inga justeringar görs, obalanser avräknas enligt aktuella reglerpriser. ("New market" i Fig. 2.)
- Som ovan, samt att aktörerna uppdaterar sina prognoser och om motiverat handlar på Elbas ca 3 timmar före varje aktuell produktionstimme. ("Acting on Elbas".)
- Historiska data för 2006 ("2006 market").

Man kan notera att beräkningarna omfattar ett totalt spann av 0,3-1,4 öre/kWh och att det lägsta alternativet, "2006 market", enligt författarna troligen innebär en underskattning av obalanskostnaderna och ses som en undre gräns.



Figur 2. Beräknade obalanskostnader för de åtta aktörerna i projekt V-132. Kategorier och aktörer enligt ovan.

V-107 Samkörning av vindkraft och vattenkraft⁵⁴

Projektledare: Stefan Skarp, Skellefteå Kraft

För ett vindkraftprojekt kan begränsad nätkapacitet medföra att anläggningen inte byggs på grund av de stora kostnader en nätförstärkning annars skulle medföra. Att samköra vind- och vattenkraft är ett möjligt alternativ som kan göra att nätet därmed inte behöver förstärkas. Samkörningen kan dock ge andra problem. Utredningen belyser en tänkt samkörning av den planerade vindkraftsanläggningen Uljabuouda med vattenkraftstationerna Rebnis och Sädva i de övre delarna av Skellefteälven.

Studien visar att samkörningen är möjlig. Eftersom storleken av vindkraftsanläggningen Uljabuouda inte är fastslagen har två olika fall

⁵⁴ Stefan Skarp. Samkörning av vindkraft och vattenkraft. Skellefteå Kraft.

undersökts. Det ena avser 24 MW och det andra 36 MW installerad vindkraft. I området finns en kapacitetsbegränsning i nätet på 95 MW och resultaten visar att denna kan komma att överskridas under 18 procent av året. Scenariot har varit att vattenkraftstationerna strikt ska regleras utifrån hur mycket vindkraften producerar. Varje gång effekttaket på maximalt 95 MW belastning i nätet nås, låter man någon av vattenkraftstationerna reglera ner effekten så att belastningen på nätet ryms under taket.

Resultaten visar att Sädva, som effektmässigt är den mindre stationen, bör kompensera vid små reglerbehov och att Rebnis bör ta de större variationerna. Vid de största reglerbehoven tas Sädva helt ur drift. Tack vare marginalen till dämpningsgränsen för magasinerna kan spill av vatten förbi stationerna helt undvikas även då en station stoppas. Vattnet "sparas" alltså då det blåser.

Det angivna körsättet kan maximalt resultera i det dubbla antalet regleringar av turbinerna jämfört med normal drift. För att skona turbinerna från vibrationer behöver begränsningar i körningen införas. Begränsningsnivåerna bestäms genom vibrationsmätningar.

Samkörningen kommer att medföra ett ökat arbete i driftcentralen, som planerar och styr anläggningarnas produktion. För att underlätta produktionsplaneringen behövs tillgång till vindprognoser. Effektnivån inom området måste hela tiden bevakas så att den inte överstiger effekttaket. Detta bör till viss del kunna styras automatiskt genom driftdatasystemet, där olika begränsningar kan läggas in. Till viss del behöver den dock styras manuellt. En samkörning kommer att medföra begränsningar och minskad frihet i regleringen. Därmed minskar även möjligheten för produktionsoptimering. Å andra sidan slipper man en kanske prohibitiv nätinvestering.

V-215 Lokal samkörning mellan vindkraft och vattenkraft⁵⁵

Projektledare: Lennart Söder, Elektriska energisystem KTH

I många områden med utmärkta vindförhållanden begränsas utbyggnaden av vindkraft av tillgänglig kraftledningskapacitet. Tidigare studier har visat att samkörning med lokala vattenkraftverk kan göra att mer vindkraft kan byggas i områden med begränsade exportmöjligheter. I ett doktorandprojekt utvecklades metoden för planering av vattenkraft på kort sikt med hänsyn till vindprognosers tillförlitlighet samt elprisets osäkerhet på spot- och reglermarknaden. Syftet är att fördjupa kunskapen för hur samkörning av vindkraft och vattenkraft kan ske, förbättra planeringsmetoden samt också analysera inverkan av olika faktorer på samkörningen. Projektgruppen har samverkat med föregående projekt (V-107) för att dra nytta av ett verkligt fall.

⁵⁵ Lennart Söder. Lokal samkörning mellan vindkraft och vattenkraft. Elektriska Energisystem KTH.

3.2 Omvärldsanalys

Utvecklingen inom EU

Inom EU täcks idag 3,8 procent av elkonsumtionen av vindkraft. Den installerade vindkraftseffekten var 56 700 MW år 2007 varav drygt 1 000 MW havsbaserad. Den årliga ökningen var 8 600 MW. Fördelningen varierar kraftigt. Danmark ligger i topp med 21,3 procent medan Sverige endast kommer upp i 1,2 procent. Den europeiska vindkraftsorganisationen EWEA bedömer⁵⁶ att vindkrafteffekten inom EU-27 kommer att vara 180 000 MW år 2020 varav 35 000 MW till havs.

EUs mål att till 2020 öka andelen förnybar energi till 20 procent innebär att Sverige ska uppnå 49 procent år 2020. Detta framgår av det direktivförslag⁵⁷ som EU-kommissionen lade fram i början av året. Ökningen från 39,8 procent till 49 procent för Sveriges del kommer att ställa stora krav på utbyggnad av förnybar el inklusive vindkraft.

Energimyndigheten

Energimyndigheten har tagit fram ett nytt planeringsmål⁵⁸ för vindkraftsutbygganden i Sverige om 30 TWh till år 2020. Av detta mål anser myndigheten att 10 TWh bör vara havsbaserad vindkraft.

I rapporten uttalar Energimyndigheten följande:

”Förutsättningar för en kraftig utbyggnad av vindkraften under den förhållandevis korta tidsperioden fram till 2020 är att regelverket och beslutsordningen förenklas, men att kvaliteten på prövningarna även i fortsättningen är hög. Tillståndprocessen tar idag alltför lång tid varför en gemensam beslutsordning bör inrättas. Vissa förslag från kommittén som ser över plan- och bygglagen (PBL-kommittén) bör införas så snart som möjligt. Remisstiderna i prövningsärenden bör regleras i syfte att minska de totala handläggningstiderna. Vindkraft bör tas bort ut förordningen om miljöfarlig verksamhet, eftersom vindkraften är utsläppsfri. Eventuella störningar bör regleras genom riktvärden.

Ett stort problem för de som vill investera i vindkraften är mängden av myndighetskontakter som måste tas innan investeringen kan genomföras. Ett sätt att förenkla det är om huvuddelen av kontakterna kan initieras och handläggas på ett ställe, genom en så kallad ’one-stop shop’. Energimyndigheten förslår att regeringen låter utreda förutsättningarna för en samlad beslutsordning för vindkraft.”

⁵⁶ Pure Power, Wind Energy Scenarios up to 2030, EWEA March 2008

⁵⁷ Förslag till Europaparlamentets och rådets direktiv om främjande av användningen av förnybar energi av den 23 januari 2008.

⁵⁸ Nytt planeringsmål för vindkraften 2020, Statens energimyndighet, ER 2007:45.

European Wind Energy Technology Platform

Ett av European Wind Energy Technology Platforms huvudområden är "wind energy integration", med målet att uppnå stora andelar vindkraft med låga integrationskostnader och med bibehållen leveranssäkerhet hos elsystemet. Exempel på föreslagna forskningsområden:

- Nätkrav på vindkraftverk vid stora andelar vindkraft samt metoder för att verifiera att dessa uppfylls.
- Utveckling av metoder som förbättrar driften, exempelvis genom överföring av driftsdata.
- Simuleringsverktyg för att undersöka den transienta stabiliteten hos det europeiska elnätet.
- Nya metoder för överföring av el från havsbaserade anläggningar.
- Inverkan av en stor andel vindkraft på drift och genereringskapacitet hos elsystemet.
- Studier av scenarior med 100 procent förnybar elproduktion.

Betydelsen av Vindforsks projekt

Tillgängligt och aktuellt svenskt vetande på området baseras till större delen på Vindforsks projekt.

3.3 Framtida utveckling

Delområdets titel "Stor andel vindkraft ur ett marknads- och teknikperspektiv" sammanfattar den energipolitiska ambitionen att få till stånd en omfattande elproduktion med vindkraft med rimliga tekniska lösningar och på ett sätt som marknaden kan samverka med. Utvecklingen förutsätter en förflyttning från dagens lilla produktion till en väsentligt större andel. Hur effektiva styrmedel för denna utbyggnad ska utformas, hur elmarknaden ska hantera behov av reglerkraft och energi för back-upp samt när och hur mycket stamnästkapaaciteten behöver ökas är alla centrala frågor för utbyggnaden. Nedan ges konkreta exempel på områden där insatser är speciellt angelägna.

Styrmedel

Elprisernas utveckling i Norden fram till 2020 kommer sannolikt inte bli tillräcklig för att ensam motivera den tänkta utbyggnaden av vindkraften. En omfattande utbyggnad av kärnkraft i Finland, naturgasbaserad elproduktion i Norge och i Sverige samt mycket större andelar förnybar elproduktion i hela Norden i kombination med en önskvärd energieffektivisering sannolikt kommer att pressa elpriserna i Norden. Det krävs alltså ekonomiska styrmedel för att finansiera en utbyggnad av ny förnybar elproduktion. Det är viktigt att dessa styrmedel utformas på ett sådant sätt att vindkraftsutbyggnaden blir kostnadseffektiv och så att fortsatt teknisk utveckling stimuleras.

I Sverige används i dag ett certifikatsystem för att stimulera ny elproduktion från förnybara energikällor. För att öka ambitionen i detta styrmedel måste kvoterna anpassas till en ny nivå. Detta är ett enkelt politiskt beslut men den svenska certifikatmarknaden är trots allt liten. En större marknad vore önskvärd. En gemensam nordisk certifikatmarknad skulle effektivisera prisbildning på certifikaten och därmed bidra till ytterligare kostnadseffektivitet.

Att på motsvarande grunder och med likartad metodik bedöma den ekonomiska potentialen för nordisk vindkraft under olika omvärldsförutsättningar borde vara av stort intresse för det nordiska elmarknadssamarbetet och för nordiska vindkraftsintressenter.

En fortsatt studie skulle också mer i detalj kunna inkludera EUs tre energipolitiska mål (klimatmålet, förnybarhetsmålet och effektiviseringsmålet) där två av dem nyligen preciserades mer ingående.

Vilken roll vindkraften i Sverige och Norden spelar och kan komma att spela för att uppnå dessa mål samt hur målen i sig kan komma att påverka vindkraftutbyggnaden är några av de frågeställningar man då skulle kunna belysa.

Styrmedel för havsbaserad vindkraft

Även om vi får en utvidgad nordisk certifikatmarknad kommer inte ersättningen bli tillräcklig för att det ska byggas havsbaserad vindkraft. Det beror på att verken och deras nätanslutningar än så länge är för dyra, tillgängligheten för låg samtidigt som potentialen för landbaserad vindkraft är tillräckligt stor för att möta en omfattande ambitionshöjning för utbyggnaden i Norden. Om man snabbt vill få igång utbyggnaden av havsbaserad vindkraft behövs det därför ytterligare styrmedel.

Skäl för att redan nu, trots den högre kostnaden, driva på teknikutvecklingen för havsbaserad vindkraft är att uppnå de högt ställda kraven på ny kapacitet redan till 2020. Man kan också räkna med att havsbaserad vindkraft på sikt blir allt viktigare.

Sverige är ett av länderna i Europa som har goda fysiska förutsättningar för att utveckla havsbaserad vindkraft. Redan idag finns identifierade projekt på över 10 TWh. Flera av dessa har redan de nödvändiga tillstånden eller kommer att få dessa inom kort.

Hur ett styrmedel för havsbaserad vindkraft bör utformas är av största betydelse och bör utredas omgående. Helst bör utformningen av ett sådant styrmedel stimulera nya tillverkare av vindkraftverk till att komma in på marknaden.

Kostnadseffektiv vindkraftsteknik

Vindkraften är som teknik fortfarande ung och har en potential för stora förbättringar i sina olika delsystem. Forskning och utveckling för att få fram ny kostnadseffektiv vindkraftsteknik är därför av största intresse. Bland utvärderingskriterierna för insatser på forskningssidan bör nyhetsvärdet på system och tekniknivå stå högt på listan. Bärkraftiga projekt ska kunna

kombinera nytänkande lösningar (exempelvis vertikalaxlade turbiner) med effektiv generatorteknik (som direktdrivna permanentmagnetiserade synkronmaskiner). Trovärdig systemlösning är meriterande för att säkerställa att den utvecklade tekniken är användbar. Eftersom det är brist på tillverkningskapacitet i världen, och eftersom befintliga konstruktioner generellt håller en för låg kvalitetsnivå, finns det goda möjligheter för nya tillverkare.

Reglerförmåga i produktions- och förbrukningsleden

En storskalig introduktion av vindkraft kommer att ställa stora krav på kraftsystemets reglerförmåga. I Norden finns mycket vattenkraft som är utmärkt för att kompensera vindkraftens naturliga variationer. Svenska Kraftnät har påpekat riskerna för att vattenkraftens reglerförmåga ska begränsas när villkoren i dagens vattendomar omprövas.

En studie bör genomföras som inte bara omfattar den befintliga vattenkraftens reglerförmåga utan även en analys av hur reglerförmågan i den svenska vattenkraften ska kunna utökas på ett kostnadseffektivt sätt.

En annan fråga som Svenska Kraftnät tagit upp är hur laddningssystemen till kommande el- och hybridbilar på ett intelligent sätt ska kunna användas för att reglera ut vindkraftens varierande produktion. Det finns även andra frågor som skulle kunna tas med i en sådan analys, exempelvis elpannor.

Tillståndsprocesser

Att förenkla tillståndsprocesserna och förstärka myndigheter och miljödomstolar är en viktig fråga för vindkraften, såväl vad gäller själva vindkraftverken som det anslutande ledningsnätet. Delar av området skulle också vinna på ytterligare vetenskapliga studier. Dit hör acceptansfrågorna. Konflikter relaterade till vindkraften har central betydelse för möjligheterna till fortsatt utbyggnad.

Balansansvar

I pågående projekt behandlas frågan om hur en avreglerad marknad med stor andel vindkraft ska utformas. Kan vindkraften själv bära sina balanskostnader eller krävs att marknadens regelverk förändras? Svenska Kraftnät har också tagit upp frågan om vilken roll systemoperatören ska på balansmarknaden.

I sammanhanget är det naturligt att ta upp den nuvarande utformningen av handeln på NordPool. En översyn måste naturligtvis ske i ett nordiskt samarbete.

Nätanslutningar av vindkraftsparker

Utbyggnad av vindkraft är en form av distribuerad elproduktion, vilket gör nätanslutningsfrågorna särskilt viktiga. Flera länder upplever i dag problem med att ansluta stora mängder vindkraft till befintliga elnät. Bland de frågor där fortsatta studier bör prioriteras kan nämnas följande:

- Spänningsvariationer i distributionsnät

- Högfrekventa övertoners utbredning i lokal- och regionnät
- Överlast i lokalnät
- Transmissionsnätets driftsäkerhet vid begränsad konventionell produktionskapacitet

För att genomföra dessa studier behöver stokastiska modeller av produktionssystemet utvecklas.

För utbyggnad av elnäten för att transportera elen från de nya vindkraftparkerna är det intressant att studera andra former av regelverk för koncessioner. Frågan om hur koncessionssystemet ska utvecklas för att på ett tekniskt och kostnadseffektivt sätt ansluta vindkraftsparker regionalt och lokalt har studerats av Elnätsutredningen.⁵⁹

En ytterligare möjlighet är att skapa en ny typ av koncession, produktionsnät, med uppgift att överföra el från vindkraftverken till elnätet. De nuvarande lokalnätens verksamhet att distribuera el till slutanvändare skulle inte behöva förändras eller utsättas för konkurrens från produktionsnäten. Införande av produktionsnät innebär att nätverksamheten "nedanför" regionnäten specialiseras. Områdeskoncessionerna svarar för distributionen från det nationella elnätet till slutanvändarna. Produktionsnätet svarar för överföringen från elproducenterna till det nationella elnätet. En viktig och angelägen uppgift är att utreda vilka kostnadsbesparingar som skulle kunna uppnås, hur näten ska dimensioneras tekniskt och ekonomiskt samt hur regelverket med en ny typ av koncession skulle kunna utformas.

Ökad stamnätskapacitet

Behovet av mer reglerkraft innebär att mer vattenkrafteffekt måste kunna transporteras från norr till söder, vilket ställer ökade krav på stamnätets kapacitet. Utbyggnaderna på den nordiska elmarknaden kommer att bli betydligt större än den samtidigt förväntade ökningen av elförbrukningen. Energimyndigheten har uppmärksammat detta för Sveriges del i en rapport angående Sveriges Energiförsörjning fram till 2010.⁶⁰ Denna utveckling pågår också i övriga Norden och kommer att ytterligare förstärkas när ny kärnkraft tas i drift i Finland. Detta leder till ett ökat behov av export av el. Därför måste även utlandsförbindelserna förstärkas för att göra det möjligt för nordisk koldioxidfri elproduktion att hjälpa till med koldioxidminskning på kontinenten.

Den nordiska elmarknadens omvandling från importområde till exportområde, med större behov av reglerkraft, utgör därför ett viktigt forskningsområde.

⁵⁹ Elnätsutredningens betänkande Bättre kontakt via nätet (SOU 2008:13)

⁶⁰ Sveriges Energiförsörjning, Kortsiktsprognos 2008-08-13, Energimyndigheten ER 2008:18

4 Planering och tillstånd

4.1 Resultat från Vindforskprogrammet

Forskning inom detta område har inte legat i Vindforsk IIs ambitioner och inga projekt har därför ägt rum inom området.

4.2 Omvärldsanalys

*Nytt planeringsmål för vindkraften år 2020*⁶¹

Energimyndigheten fick i regleringsbrevet för 2007 i uppdrag att efter samråd med Boverket utarbeta ett förslag till ett nytt nationellt planeringsmål för vindkraft till år 2020. Som framgår av föregående avsnitt föreslås detta utökas till 30 TWh per år för 2020.

Energimyndigheten tar även upp en rad andra faktorer som är avgörande för att planeringsmålet ska kunna uppfyllas, bl a att huvuddelen av myndighetskontakterna ska kunna handläggas genom en så kallad "one-stop shop". Även detta framgår av föregående avsnitt

Riksintresseområden

Ett område som Energimyndigheten bedömer som särskilt lämpligt för vindkraftsproduktion kan anges som riksintresse för vindbruk. Bedömningen görs bland annat med utgångspunkt från vindförhållandena i området.

Kommunerna har till uppgift att i sin översiktsplanering ta hänsyn till riksintressena, som ska vara vägledande vid tillståndsprövning för mark- eller vattenanvändning. Riksintresset för vindbruk bedöms då mot andra befintliga riksintressen, till exempel naturvård, kulturminnesvård, försvarsmaktens intressen och luftfart.

Ungefär 2 procent av Sveriges yta utgörs nu av riksintresseområden för vindkraft, vilket motsvarar en elproduktion av 20 TWh per år. Därtill finns även riksintresseområden angivna till havs inom svenskt territorialvatten och svensk ekonomisk zon. Energimyndigheten har en sökbar karttjänst på sin hemsida som visar var riksintresseområdena finns.

*Miljöprocessutredningen*⁶²

Miljöprocessutredningen tillsattes av regeringen år 2007 med uppdrag att föreslå de organisations- och författningsförändringar som behövs dels för vissa mål och ärenden enligt miljöbalken och plan- och bygglagen, dels för en samordning av miljödomstolarna och fastighetsdomstolarna.

Miljöprocessutredningen har fått tilläggsdirektiv⁶³ beträffande bland annat vindkraft. Syftet är att identifiera behov av förändringar som underlättar för en fortsatt utbyggnad. Förslagen ska innebära att handläggning samordnas,

⁶¹ Energimyndigheten 2007 ER 2007:45

⁶² Miljöprocessutredningen (M 2007:04)

⁶³ Kommittédirektiv Dir. 2007:184 Tilläggsdirektiv till Miljöprocessutredningen (M 2007:04)

går snabbare och blir mer effektiv, utan att det minskar rättsäkerheten. Ambitionen är att de föreslagna förändringarna ska leda till en bättre samordning mellan ärenden enligt plan- och bygglagen och miljöbalken.

*Erfarenheter av vindkraftsetablering – Förankring, acceptans och motstånd*⁶⁴

I rapporten sammanfattas erfarenheter från olika lokala etablerings- och planeringsprocesser runt om i Europa. Syftet är att identifiera vad som utmärker bra och dåliga projekt, så att man därigenom ska kunna åstadkomma etableringar med färre konflikter.

Författarna konstaterar att risken för lokalt motstånd är stor vid vindkraftsetableringar. Inställningen till ett specifikt projekt varierar beroende på exempelvis natur, rekreationsvärden och eventuell turismnäring, men även utifrån faktorer som organisationsform, delaktighet, beslutsprocess och möjligheten till ekonomiska förtjänster. Man framhåller att det finns strategier för att hörsamma ett eventuellt motstånd, och att dessa bör bygga på ett genuint deltagande och en öppen dialog, men även på att lokalbefolkningen ska kunna tjäna ekonomiskt på etableringen. Det är viktigt att etableringen inte tvingas igenom av någon utomstående aktör.

Rapporten skiljer mellan fyra typfall: *Förankring* – parken byggs och befolkningen är efteråt positiv till projektet och till vindkraft. *Resignation* – vindkraftverken byggs medan befolkningen är negativ. Risk finns för motstånd vid framtida etableringar. I det tredje finns hög acceptans hos lokalbefolkningen, men *andra hinder* gör att vindkraft inte etableras. Här finns potential för etablering, men förändrad strategi och planprocess eller dylikt kan krävas. I den fjärde situationen uppstår det som kallas *konflikt och avbrott*, det vill säga när befolkningens protester blir så kraftiga att möjligheterna att utveckla vindkraften inom överskådlig framtid är liten. De fyra situationerna studeras närmare i rapporten.

En potentiell exploitör bör börja med att utforska hela spännvidden av lokalbefolkningens inställning, samt vilka grupper som har dessa åsikter. Den lokala inställningen bör ses som en process som kan påverkas i ett flerårigt perspektiv: en positiv inställning behöver vårdas och en initialt negativ inställning kan ändras med tiden. Genom att skaffa en gedigen kunskap om lokalsamhällets historia, kultur och nutida utmaningar kan olika sätt att koppla detta till projektet identifieras.

Det gäller även att vara tydlig med vad processen handlar om. Vid översiktsplanering ska man berätta att denna är avgörande för placering, storlek och utformning av framtida projekt. Det bör finnas möjligheter till ekonomiskt deltagande även av blygsam omfattning. Slutligen framhåller författarna att i områden med stort motstånd ska projekten *inte* drivas igenom.

⁶⁴ Mikael Klintman och Åsa Waldo. Erfarenheter av vindkraftsetablering – Förankring, acceptans och motstånd. Sociologiska institutionen, Lunds Universitet. Under utgivning av Vindval.

*Etablering av vindkraft i Sverige – en kartläggning av miljötillståndsprocesser 1999-2004*⁶⁵

Rapporten redovisar en kartläggning av miljöprövningen i olika vindkraftsärenden, i syfte att belysa vilka omständigheter som påverkat den svenska utbyggnaden.

Centrala frågor för studien är hur många planerade projekt som leder till en uppförd anläggning och hur många som av någon anledning avslutas utan att något vindkraftverk uppförts. Den berör även orsakerna till varför projekt inte fullföljs och var i miljöprövningen stoppet sker.

En majoritet av de stoppade projekten avbröts av projektörerna själva, i merparten av fallen efter tidigt myndighetssamråd. Som orsaker framhölls utlåtanden från tjänstemän på länsstyrelser, motstående samhällliga intressen i närområdet samt förändrade ekonomiska villkor för projektet.

Ett annat resultat är att majoriteten av de projekt som lämnat in en formell ansökan om miljötillstånd också har beviljats detta. Enligt de berörda projektörerna är det ovanligt att projekt avbryts på grund av lokalbefolkningens negativa inställning, även om detta inte innebär att en negativ lokalopinion saknar betydelse. Det framgår dock att allmänhetens inställning till de planerade projekten inte påverkat projektörernas bedömning i någon större utsträckning.

Slutligen har endast en minoritet av beviljade miljötillstånd överklagats och det är sällan som ett överklagande leder till ändring.

*Finding the right place*⁶⁶

Avhandlingen påpekar att det är på kraftproducenterna som förväntningarna ligger att åstadkomma omställningen där vindkraften ska expandera med över 9 TWh till år 2015. Expansionen bromsas dock av svårigheterna att ena berörda myndigheter, kraftproducenter och kommuner samt allmänheten om var vindkraften ska byggas.

Nyligen ville Göteborg Energi bygga en vindkraftspark i storleksordningen 300 MW i Kattegatt utanför Varberg och Kungsbacka. Den skulle producera så mycket som 1 TWh. Utifrån ett producentperspektiv uppfyllde den föreslagna platsen alla behov. Trots detta stoppades projektet, främst genom nej från de inblandade kommunerna, vilka befarade en omfattande negativ miljöpåverkan. Processen pågick i fyra år och var resultatet av en omfattande kampanj inom företaget för att skapa acceptans såväl för teknologin som för det föreslagna projektet.

Syftet med studien var att ur en enskild elproducents perspektiv belysa ansökningsprocessen och söka svaret på tre frågor: Hur fattades beslutet? Vilka faktorer påverkade valet av plats och hur utvärderades dessa? Vilka var skälen till att man ville bygga anläggningen?

⁶⁵ Mats Bengtsson och Hervé Corvellec. Etablering av vindkraft i Sverige – en kartläggning av miljötillståndsprocesser 1999-2004. Centrum för forskning om offentlig sektor (CEFOS) respektive Gothenburg Research Institute (GRI)

⁶⁶ Petter Rönnborg. Finding the right place. Licentiatavhandling. Handelshögskolan vid Göteborgs universitet.

Resultaten av studien visar att beslutet att driva projektet snarare var ett resultat av omständigheterna än ett medvetet strategiskt val från ledningens sida. Idén föddes internt och nådde genom intern lobbying ledningen, som sporrades såväl av att den låg rätt i tiden som av en avog inställning från de berörda kommunerna. Den tidiga negativa inställningen från myndigheterna gjorde att processen kom att präglas av maktkamp snarare än av samråd. En av de avgörande frågorna vid utvärderingen av projektet kom att handla om dess lönsamhet ur ett samhällsekonomiskt perspektiv, vilket visade sig synnerligen svårt att fastställa.

Det fanns såväl direkt som indirekta skäl till att Göteborg Energi ville bygga anläggningen. Bland de direkta kan nämnas att företaget ville trygga elförsörjningen lokalt samt stärka företagets miljöprofil. Bland de indirekta kan nämnas projektets koppling till ett annat stort projekt. En provokativ förklaring till att driva vindkraftsprojektet var att det skapade utrymme att genomdriva Rya kraftvärmeverk.

Denna typ av processer utspelar sig i gränsområdet mellan olika organisatoriska logiker och rationalitetsnormer. Lokaliseringen engagerar en mängd olika aktörer, vilka representerar ett antal särintressen som de försöker värna vid tillståndsprövningen. Samhället förutsätter att dylika tillståndsärenden kan prövas rationellt, det vill säga att de olika särintressena kan vägas mot varandra på ett objektivt sätt.

Trots att lokaliseringen bedömdes vara den mest lämpade på västkusten gavs företräde åt de partsintressen som var emot en etablering, baserat på tolkningar av kommunal vetorätt, Natura-2000-regler och miljölagstiftning.

*Local Politics of Renewable Energy*⁶⁷

Avhandlingen analyserar kommuners och andra lokala aktörers agerande vid etablering av de två förnybara energislagen biogas och vindkraft. Den baseras på sex fallstudier där skriftliga dokument och delvis strukturerade intervjuer har varit de främsta källorna. I det första temat studeras planeringen och hanteringen av lokala förnybara energiprojekt. Särskilt för biogas kan projektplaneringen vara komplex och villkoren kan variera ordentligt. Planeringsförfarandet måste kunna anpassas efter förutsättningarna.

Det andra temat behandlar konflikter vid lokalisering av anläggningar för förnybar energi och hur dessa kan hanteras genom deltagande av lokalbefolkningen. Olika teoretiska perspektiv på lokaliseringskonflikter och medborgardeltagande diskuteras. Dessa kan ha olika och ibland motsatta mål för deltagandet. Förväntningarna måste vara realistiska. Specifikt visar fallstudierna att samrådsförfarandet, som är den vanligast förekommande formen av medborgardeltagande i Sverige, har stora begränsningar.

*Dialogos förstudie*⁶⁸

Förstudien ska belysa hur allt från enskilda projekt till strategiska frågor för energisystemet kan få en allsidig behandling med stort medborgerligt deltagande. Tillgång till en sådan metodik ska kunna leda till effektivare

⁶⁷ Jamil Khan. *Local Politics of Renewable Energy*. Doktorsavhandling. Miljö och energisystem, Lunds universitet.

⁶⁸ Andersson, Wene, Johansson. *Dialogos förstudie*. Information enligt Elforsks hemsida, www.elforsk.se.

tillståndsprocesser, bättre möjligheter att konkurrera med omvärlden och ökad trovärdighet för energibranschen, dess företag och myndigheter.

Rapporten redovisar resultat av tre fallstudier: Planerad utbyggnad av ny 400 kV-ledning vid Stenkullen i Lindome utanför Göteborg, ny panna för avfallsförbränning i Uppsala samt planerad utbyggnad av vindkraftspark vid Lillgrund i Öresund.

Under 2006 fortsatte arbetet med att identifiera lämpliga sätt för att föra frågan vidare.

Upplevelse av vindkraft ur ett miljöpsykologiskt perspektiv⁶⁹

Studien genomfördes i Trelleborg 2004 och baserades på arbeten inom området människa och miljö. Resultatet visade att de som bor inom 3 km från vindkraftverk trivs bättre än de som bor längre bort. En förklaring till detta kan enligt rapporten vara att de som bor nära har tagit till sig vindkraftverken som en del av den egna miljön. Författarna menar att attityden till vindkraft spelar mindre roll för upplevelsen än bostadsläget.

Möten mellan aktörer i vindkraftsprojekt⁷⁰

Projektet syftar att identifiera strategier för att överbrygga de sociala motsättningar som riskerar att uppstå när ett vindkraftverk byggs. En central förutsättning är att kommunikationen mellan parterna fungerar och leder till konstruktiva överenskommelser som kan erbjuda lokalbefolkningen nya möjligheter. Den modell som projektet utvecklar ska bidra till att underlätta myndigheternas framtida arbete. Projektet rapporteras i december 2008.

Lokala förankringsprocesser⁷¹

Syftet med projektet är att skapa förståelse för hur vindkraftsexploaterers, politikers och tjänstemäns olika sätt att arbeta kan påverka allmänhetens inställning till planer på vindkraftsetableringar i närliggande havsområden. Projektet har pågått sedan 2006 och väntas bli klart under 2009.

Tillståndsprocesser⁷²

Syftet med projektet är att analysera historiken bakom tillståndsprocesserna för att etablera elkraftsanläggningar i de nordiska länderna, samt att kartlägga skillnader och den ekonomiska betydelsen av dessa. Tanken är även att analysera förutsättningarna för en ökad harmonisering i Norden och hur tidigare erfarenheter kan användas för att uppnå en ökad effektivitet. Studien behandlar kombigaskraft, biokraftvärme, vindkraft, småskalig vattenkraft och även kärnkraft. Projektet beräknas bli klart i början av 2009.

⁶⁹ Johansson, M., och Laike, T. Acceptans av vindkraftverk – En psykologisk förstudie av perception och attityders inverkan. Avdelningen för Miljöpsykologi. Institutionen för Arkitektur och byggd miljö. Lunds Tekniska Högskola. 2004.

⁷⁰ Möten mellan aktörer i vindkraftsprojekt. Projekt inom Vindval. Projektledare: Mikael Klintman, Lunds universitet

⁷¹ Lokala förankringsprocesser, projekt inom Vindval. Projektledare: Lars Aronsson, Högskolan i Kalmar

⁷² Tillståndsprocesser, Projekt inom Market design. Projektledare: Patrik Söderholm, Luleå tekniska universitet

*Vindkraftslokalisering ur ett kommun- och länsstyrelseperspektiv*⁷³

Ett syfte med projektet är att kartlägga och analysera de faktorer som gör att vissa vindkraftsprojekt genomförs som planerat och andra inte. Ett annat är att analysera skillnader i offentliga myndigheters agerande i vindkraftsärenden och orsakerna till dessa samt betydelsen av allmänhetens deltagande. Projektet skulle varit klart 2007 men anges fortfarande som pågående.

*Idédokument*⁷⁴

Den följande sammanställningen bygger huvudsakligen på ett idédokument gjort inför Vindvals utlysning av forskningsmedel år 2007.

Strategier för att öka kunskap samt deltagande och samverkan

Nimby-syndromet (Not In My Back-yard) innebär att man kan vara positiv till vindkraft på abstrakt nivå men när vindkraft ska etableras på lokal nivå i speciella projekt så minskar acceptansen. Syndromet kan förekomma i många olika situationer, exempelvis när en motorväg eller en tunnel ska byggas. Detta begrepp kallas "sociala dilemman" av psykologer, miljöpsykologer och sociologer och "game theory" av ekonomer. Varför framhäver vi då den positiva attityden till vindkraft? Spelar det någon roll om vindkraft är populär? Ska man överhuvudtaget ta hänsyn till detta vid etablering av vindkraftverk. Wolsink⁷⁵ är kritisk mot Nimby-begreppet och menar att det bara till en liten del kan förklara människors beteende, som att skriva protestbrev och anlita juridisk hjälp. Attityden till vindkraft förklarar däremot en betydligt större del av beteendet. De flesta människor som har Nimby-känslor är inte positiva till vindkraft, medan Nimby-begreppet skulle innebära att individen har en positiv attityd till vindkraft generellt men en negativ attityd till etablering av vindkraft lokalt. Nimby-syndromet kan förekomma på individnivå såväl som på myndighetsnivå, vilket kan resultera i institutionella hinder.

Khan och Åstrand⁷⁶ har analyserat beslutsprocessen om vindkraft i några kommuner på västkusten. I Falkenbergs och Laholms kommuner har man velat underlätta för vindkraft genom att på olika sätt göra planeringen enklare och mer flexibel. Detta har fört med sig brister i regleringen av verkens lokalisering och allmänhetens möjligheter att delta i planeringen. I Halmstad har reglering av lokalisering och allmänhetens deltagande fått stort utrymme men beslutsprocessen varit onödigt lång. Detta kan bero på att kommunen varit skeptisk till vindkraft och i viss mån använt argument om vikten av genomarbetade beslutsprocesser som ett alibi för att minska vindkraftsutbyggnaden. Vad som behövs, menar författarna, är istället planeringsprocesser som lyckas förena kraven på deltagande och reglering med policyåtgärder som bidrar till en effektiv utbyggnad där den lokala befolkningen har möjligheter att delta i ägandet av vindkraftverk.

⁷³ Vindkraftslokalisering ur ett kommun- och länsstyrelseperspektiv, Projekt finansierat av CEFOS. Projektledare: Åsa Boholm, CEFOS

⁷⁴ Marianne Lindström, Miljöpsykolog, Ph D Miljövetenskap

⁷⁵ Wolsink, M. Wind power and the NIMBY myth; institutional capacity and the limited significance of public support. *Renewable Energy* 21, 49-64. 2000.

⁷⁶ Khan, J., och Åstrand, K. På väg mot ett hållbart energisystem. I: P. Wickenbert, A. Nilsson och M. Steneroth-Sillén. *Miljö och hållbar utveckling – samhällsvetenskapliga perspektiv från en lundahorisont*. Studentlitteratur. Lund. 2004.

Enligt Gardner and Stern⁷⁷ kan attityder och beteenden förändras genom information och utbildning, genom ekonomiska incitament och genom "community management", vilket innebär lokala grupper som deltar i samhällsprocesser. Utbildning och information kan förändra attityder till speciella frågor (som vindkraft) men utbildning och information kan inte på ett enkelt sätt förändra människors djupare värderingar. På kort sikt kan utbildning hjälpa människor att komma över vissa interna barriärer för handling, särskilt när det gäller sådant som grundar sig på missförstånd eller fel information. Om informationen stämmer med de egna värderingarna så har man lättare att ändra sin attityd och sitt beteende.

Ekonomiska incitament kan förändra människors beteende men förändrar inte attityder eller värderingar. Geller⁷⁸ utvecklade en modell, "empowerment-modellen", som lyfter fram några individuella och sociala faktorer som är nödvändiga för människor ska inspireras till att aktivt ta del av och bry sig om sitt dagliga liv. Dessa faktorer är självkänsla, känslan av att kunna påverka, optimism, tillhörighet och att man är delaktig i en grupp. En "community management"-grupp kan vara ett socialt nätverk som redan finns, exempelvis en intresseförening. När det gäller vindkraft kan sådana nätverk användas för information och utbildning, exempelvis genom att etablera studiecirkel om vindkraft. Ökad kunskap och ökat engagemang kan leda till ett större ansvar för en gemensam resurs⁷⁹.

Attityder och upplevda störningar av vindkraft

De vanligast upplevda störningarna är ljud och visuella störningar i landskapet. De främsta argumenten mot vindkraftsetablering lokalt är, enligt Wolsink⁸⁰, faktorer som buller, förstörd utsikt, konflikt med naturområden och att det är en opålitlig energikälla. Enligt Wolsink styrs den generella attityden till vindkraft av "Clean" (att det är en ren energikälla) och av "Visual" (utseendet i landskapet). Det finns däremot inte något direkt samband mellan "Annoy" (störning genom ljud, fåglar, natur etc) och attityd. Detta betyder att attityden till vindkraft inte är influerad av tankar om buller och av fara för fåglar. Den upplevda störningen inverkar däremot direkt på intentionen att motsätta sig ett vindkraftsprojekt. De visuella värdena av vindkraftverk har dubbel inverkan; indirekt via den generella attityden och direkt genom att den framkallar ett motstånd. Den generella attityden till vindkraft blir mest avgörande i planeringsfasen. Detta betyder att medvetenheten inte är av global natur utan är kopplad till lokala förhållanden. Forskning visar att politiker ofta koncentrerar sig på ljudstörningar medan media mer uppmärksammar den visuella aspekten. Generellt tycks protesterna mot vindkraft vara starkare bland fritidsboende, vilka ser landsbygden och naturen

⁷⁷Gardner, G.T., och Stern, P.C. Environmental Problems and Human Behavior, second edition. Pearson Custom Publishing Boston. 2002.

⁷⁸Geller, E.S., Winnett, R.A, and Everett, P.B. Preserving the environment. New strategies for behaviour change (New York Pergamon) samt Geller, S. (1995) Actively caring for environment. An integration of behaviorism and humanism, Environment and Behaviour, 27, p.p.184-195. 1982.

⁷⁹ Gardner, G.T., och Stern, P.C. Environmental Problems and Human Behavior, second edition. Pearson Custom Publishing Boston. 2002.

⁸⁰ Wolsink, M. Wind power and the NIMBY myth; institutional capacity and the limited significance of public support. *Renewable Energy* 21, 49-64. 2000.

som en källa till rekreation och avkoppling, än bland landsbygdsbor, som är beroende av naturen för sin försörjning⁸¹.

Kaldellis⁸² undersökte acceptansen för vindkraft i Grekland, på fastlandet och på öarna. Undersökningen visade att människor boende på öarna var mycket mer positiva till vindkraft än personer som bodde på fastlandet. Han tror att detta kan bero på att personer boende på öarna är mer öppna för förändringar och har större behov av el, eftersom många är beroende av turismen på somrarna. De som bor på fastlandet arbetar oftast med jordbruk och har en mer konservativ syn. Han menar vidare att det vid etableringen har saknats information till medborgarna. Information är en viktig aspekt som inte får ignoreras.

En irländsk studie om genomförandet av tre vindkraftsprojekt visade att människors största invändningar rörde ljud, därefter kom visuella och elektromagnetiska störningar. Acceptansen för vindkraft minskade under planeringsprocessen men utjämnades efter uppförandet av vindkraftverken till ungefär den nivå som fanns före etableringen. De 36 procent som var osäkra verkade något mer positiva efter uppförandet. En av fyra var fortfarande negativa till projekten.⁸³

Upplevelser av vindkraftens påverkan på landskapet

Värderingar och upplevelser av landskap har studerats av forskare som menar att en grön miljö har en avstressande effekt. Enligt Kaplan och Kaplan⁸⁴ söker man sig till naturen för att koppla av från stress, söka fascination och en helhet där man kan känna rekreation och lugn och ro.

Flera undersökningar visar att människor generellt har en positiv attityd till vindkraft. 72 procent i Canada, 80 procent i Nederländerna och 82 procent i Danmark har svarat att vindkraften ska ha hög prioritet i samhället. Samma förhållande gäller i Storbritannien. I Sydthy kommun i Danmark bor 12 000 invånare och mer än 98 procent av den totala elkonsumtionen kommer från vindkraft. Sydthy har därmed en av de högsta koncentrationerna av vindkraft i världen. En attitydundersökning i området visade att personer med stor kunskap om förnybar energi tenderade att vara mer positiva till vindkraft än de med mindre kunskap. Avståndet till närmaste turbin hade ingen effekt på människors attityder till vindkraft generellt. Dessa personer ansåg inte att ljud eller visuell påverkan var något problem. Studien visade att människor som bodde inom 500 meter från ett vindkraftverk var mer positiva än de som bodde längre ifrån.⁸⁵

Den typiske nej-sägaren är enligt författaren en person som tycker att förnybar energi inte kan lösa våra energiproblem, att vindkraftverk är opålitliga och beroende av vinden, att vindenergi är dyr, att vindturbiner

⁸¹ Hammarlund, K. Attityder till vindkraft. Avdelningen för Humanekologi. Göteborgs Universitet. 1997.

⁸² Kaldellis, J.K. Social attitudes towards wind energy applications in Greece. *Energy Policy*, 33, 595-602. 2005.

⁸³ Gipe, P. Tilting at windmills: Public opinion toward wind energy. <http://www.awea.org>. 1995.

⁸⁴ Kaplan, R., Kaplan, S. The Experience of Nature. A Psychological Perspective. Cambridge University Press. Cambridge. 1989.

⁸⁵ Damborg, S. Public attitudes Towards Wind Power. Danish Wind Industry Association. 1999.

förstör utsikten och att vindkraftverk bullrar. En typisk ja-sägare anser att förnybar energi är ett bra alternativ till andra energikällor, att klimatförändringar måste tas på allvar, att vindenergi är obegränsad till skillnad från fossila bränslen samt att vindenergi inte förorenar och är säker.

Personer som inte hade någon erfarenhet av vindkraftverk upplevde att ljudet från vindkraftverket var högre än de som bodde i närheten av vindkraftverket⁸⁶. Män upplever i högre grad än kvinnor att vindkraftverk bullrar. Medelålders är generellt mer kritiska till vindkraft än andra åldersgrupper.

European Wind Energy Technology Platform

European Wind Energy Technology Platform tar upp planeringsområdet i avsnittet om hur de administrativa procedurerna ska förbättras. Dokumentet förordar att EUs medlemsländer ska anta planer för hur vindkraften ska utvecklas både på land och till havs. Det föreslår också att länderna anordnar en "one-stop shop" för att administrera tillståndsansökningar. Inom följande områden föreslås studier som rör planering:

- Administrativa procedurer för att byta ut vindkraftverken inom en vindkraftstation mot större bör utvecklas.
- Förfarandet för att upprätta miljökonsekvensbeskrivningar bör ses över.

4.3 Framtida utveckling

Planering har hittills inte ingått som ett eget område i de svenska forskningsprogrammen om vindkraft. Det passar till en del inom Vindvals område men ryms inte i sin helhet inom begreppet "miljöeffekter". Flera av de reella hindren för vindkraftsetableringar kan härledas till "planeringsprocesser" i form av motstånd från närboende, politiker och lokala intresseorganisationer. En alltmer utbredd uppfattning är att det bästa sättet att uppnå lyckosamma vindkraftsetableringar (i bemärkelsen att så många som möjligt har en positiv inställning till projektet efter etableringen) är att denna föregås av en noggrann och transparent planerings- och tillståndsprocess där samrådsförfarandet spelar en vital roll.

Eftersom både Vindforsk och Vindval är tillämpade program, i bemärkelsen att de har ett tydligt användarperspektiv, bör planeringsområdet vara lämpligt att utveckla inom programmen. Det finns goda förutsättningar att skapa konkreta verktyg som kan underlätta kommande vindkraftsetableringar och bidra till en effektivare resursanvändning hos projekterande företag, myndigheter och intresseorganisationer samt, inte minst, mer nöjda medborgare.

Acceptansstudier

Behovet av acceptansstudier tas ofta upp i samband med planering av samråd och information för vindkraftsprojekt. Dessa har dock hittills inte haft ett tydligt hemvist i vindkraftsforskningen. Området som sådant är etablerat i

⁸⁶ Holding-undersökelse 1993

forskningsvärlden och metoder finns framtagna inom andra sektorer. Acceptansforskning med inriktning på vindkraft bör ske med tydligt angivna syften. Man bör redan vid starten av projektet ha en bild av hur projektörer och planerare i praktiken ska kunna tillgodogöra sig resultaten. Tänkbara resultat från sådana studier kan vara guider för hur och vilka man informerar om ett vindkraftsprojekt eller en handledning för projektörer om olika former som lokala intressenter kan erbjudas ekonomisk delaktighet i ett planerat projekt.

Planeringsprocessen

Många anser att utvecklingen av själva planeringsprocessen snarare bör ske genom metodutveckling och framtagande av goda exempel än genom traditionella forskningsprojekt. Exempel på behov är metoder för att arbeta med planering av större områden, vilket grundas på att det i Sverige, till skillnad från i Danmark, numera saknas en övergripande nationell planering. Ett helhetsgrepp på landets vindkraftsutbyggnad vore önskvärd av såväl tekniska som miljörelaterade skäl. Exempel på närliggande arbeten är Sydhavsvind och Utsjöbanksinventeringen.

Värderingsfrågor

De underliggande värderingarna påverkar uppfattningen om vad som är en god planering, och det är därför väsentligt att klarlägga dessa. Här kan bidrag hämtas från forskningen om värderingsfrågor. Studier om "natursyn" kan visa och kategorisera de djupare värderingarna avseende miljö- och utvecklingsfrågor. Enligt *antropocentrism* är naturen till för människan; *social altruism* betyder att man anser att naturen är till för alla (människor, växter, djur) inklusive framtida generationer, medan *ekocentrism* innebär att naturen anses ha ett eget värde, oberoende av människan. Kopplingar till dessa områden kan fördjupa förståelsen för vad dagens beslut får för konsekvenser på längre sikt. I en förlängning skulle även samordning kunna ske mellan exempelvis den fysiska planeringen och kommunernas energiplanering, för att ytterligare vidga den bild som ska ligga till grund för beslutsfattarnas samlade bedömning.

5 Meteorologi

5.1 Resultat från Vindforskprogrammet

Inom Vindforskprogrammet anslogs under perioden 2006/08 2,5 Mkr eller 7 procent av medlen till projekt inom området.

Regionala vindindex för Sverige

V-114 Vindindex

Projektledare: Hans Bergström, Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet.

Vindindex används för att relatera vindenergiproduktion under en begränsad tid till förhållanden under en längre tid. Man brukar tala om "normalårskorrigerings". Motsvarande normalårskorrigerings är också väsentlig att göra för att kunna utnyttja vindmätningar gjorda under kortare tider. Det naturliga har därvid varit försöka göra korrigerings grundat på vindindex enligt historiska produktionsdata för vindkraftverk enligt den svenska driftstatistiken. Den har dock begränsningen att endast ett värde på vindindex finns för hela Sverige, trots att de geografiska variationerna är stora. En jämförelse med motsvarande danska statistik visar också på mycket stora skillnader. Behovet av att ta fram vindindex för olika regioner i Sverige är därmed stort. Målet för projektet, som pågår till december 2008, är att utarbeta en ny metodik för att beräkna vindindex för Sverige samt att bestämma sådana index regionalt.

Större upplösning av vindkarteringen

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

Projektledare: Hans Bergström, Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet.

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 i projektet för att extrahera ytterligare statistisk information, som är väsentlig i vindenergisammanhang. Denna information utgörs av Weibull-parametrar totalt och sektorsvis för olika vindriktningar, extremvindar för 50-100-årsperioder avseende olika medelvärdestider från en sekund till en timme, turbulensintensiteten samt den vertikala vindskjuvnings (vindgradienten). Metoder att öka upplösningen i vindkarteringen från 1 km till 100 meter tas fram. Dessa kommer att bygga på information om vinden i 1 km skala, vilken appliceras i modeller som ger den högre upplösningen. Projektet pågår till december 2008. Den nya statistiska informationen kommer att finnas tillgänglig via internet.

Långtidsmätningar

V-120 Meteorologiska mätningar i höga master

Projektledare: Hans Bergström, Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet.

Meteorologiska långtidsmätningar i höga master är betydelsefulla för kunskapen om vindenergipotentialen och för vindens övriga statistiska egenskaper. Speciellt avseende vindunderlag för extrema förhållanden är det nödvändigt att mätningarna görs under långa tidsperioder för att man ska uppnå en tillfredställande kartläggning av de låga sannolikheterna för sällan förekommande extrema händelser. Att upprätthålla långtidsmätningar har också stor relevans rörande möjliga klimatförändringar och deras 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. Senast inledda projektperiod avslutades i december 2007, men mätningarna fortsätter tills vidare.

Utöver nämnda projekt har Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet, genomfört en vindkartering av Sverige på direkt uppdrag av Energimyndigheten.

5.2 Omvärldsanalys

Vindpotential

Efter ett pionjärbete i Sverige på 1970-talet utvecklade Risø National Laboratory i Danmark det PC-baserade datorprogrammet Wasp för kartering av vindarna inom de för vindkraft intressanta höjdsiktet. Det har sedan dess utnyttjats för att göra vindkarteringar i ett stort antal europeiska länder och även utanför Europa. Wasp 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 tas till variationer i jordytans skrovlighet, topografin och hinder som byggnader som kan påverka vinden i närområdet.

Generellt får man med en enkel modell av Wasps typ i medeltal en hygglig överensstämmelse med observationer, men riskerar i varje enskilt fall en osäkerhet på ± 20 -30 procent i den beräkna energipotentialen. 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 högst blandad sammansättning av topografi och olika markanvändning. Vid alltför komplex terräng, som i fjällen, eller då vindarna påverkas av temperaturskillnader mellan land och hav, kan den enkla modellen bli helt missvisande.

För öka tillförlitligheten i bedömningen av vindenergipotentialen finns det två principiella vägar. Den ena utgörs av direkta vindmätningar i master på höjder som är relevanta i vindenergisammanhang, dvs 50-100 meter.

Problemet med denna metod är att man inte kan täcka in hela landet med mätmaster. Den andra utvägen är att använda mer avancerade modeller.

Under de senaste tio åren har sådana mer avancerade modeller utvecklats bland annat vid Uppsala Universitet, MIUU-modellen. De är tidsberoende numeriska modeller (CFD, Computational Fluid Dynamics) och innehåller en kärna bestående av ekvationer som beskriver luftens rörelser baserat på 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. De benämns också mesoskalemodeller, vilket innebär att de täcker in den geografiska skalan mellan mikroklimat och de storskaliga vädersystemen. De är mycket beräkningsintensiva, vilket dock numera är ett mindre problem. Vid den nyligen genomförda vindkarteringen av Sverige med upplösningen 1 km beräknades ett antal scenarier för väderutvecklingen, vilka tillsammans gav en representativ bild av vindklimatet. Detta krävde totalt 55 års datortid, som levererades av 24 ordinära PC-datorer. Resultaten är tillgängliga via internet⁸⁷ och i en sammanfattande rapport.⁸⁸ Jämförelser med vindmätningar i höga master på 84 platser över hela Sverige visar för 87 procent av data en överensstämmelse mellan modell och mätning inom ± 0.4 m/s och en medeldifferens på 0,0 m/s.

Efter en vindkartering med upplösningen av 1 km, som utnyttjas för att identifiera vindmässigt intressanta områden, kommer ofta ett intresse för mer högupplösta resultat där projekteringar planeras. I pågående Vindforsk-projekt pågår arbete för att förtäta MIUU-modellens upplösning till 100 meter.

CFD, som alltså står för Computational Fluid Dynamics, är en generell benämning på olika typer av numeriska modeller som löser fluiddynamiska problem. De har alla det gemensamt att de numeriskt löser de samband som styr förhållandena i t.ex. atmosfären. De globala vädermodellerna är därmed också en typ av CFD-modeller. Ofta används benämningen mest för mycket högupplösande beräkningar, exempelvis av strömningen runt en bil eller ett flygplan. I meteorologiska sammanhang används CFD som benämning för detaljerade beräkningar, t.ex. strömningen mellan husen i ett bostadsområde.

Det är viktigt att sådana CFD-modeller som används i vindkraftssammanhang inkluderar effekterna av den termiska skiktningen. Att döma av presentationer och rapporter under de senaste årens vindkonferenser försummas detta ofta. På den mindre skalan i en vindpark anger man ofta att neutrala förhållanden antagits råda. Motiven för detta 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. 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 kontinuitetsvillkoret.

⁸⁷ <http://www.geo.uu.se/luva/default.aspx?pageid=13152&lan=0>

⁸⁸ Bergström, H. Wind resource mapping of Sweden using the MIUU-model, Wind Energy Report WE 2008:1, Department of Earth Sciences, Uppsala University, 34 pp. 2008.

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. 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 en begränsad tid och inga klimatologiska resultat kan erhållas.

En annan typ av modell som ibland används för att 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 i LES-modellerna varför endast den småskaliga delen av turbulensen behöver parameteriseras. Modellerna är dock datorkrävande och knappast realistiska att använda allmänt idag. De har dock potential att ge intressant information om speciella förhållanden, t.ex. turbulensen vid en klippkant.

Turbulens

Att en skrovlig markyta genererar mer turbulens än en slät är självklart. Över den skrovliga skogen ska man alltså vänta 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 ökar turbulensen, medan stabil skiktning minskar denna. Dessutom begränsar en stabil skiktning gränsskiktets höjd så att turbulensintensiteten avtar relativt sett snabbare med höjden jämfört med neutral eller instabil skiktning. Redan på 100 meter 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 sagts ovan är denna inte giltig över hög vegetation, åtminstone inte närmast vegetationsskiktet, varför osäkerhet råder om hur turbulensprofilen egentligen ser ut ovan en skog. Enligt similaritetsteorin skulle turbulensintensiteten avta från ca 25 procent på 50 meter höjd till drygt 20 procent på 100 meter höjd, men sannolikt är dessa värden för höga, framförallt för högre höjder.

Gjorda observationer visar en stor spridning för turbulensintensiteten mellan olika meteorologiska förhållanden. På 100 meter höjd kan strömningen variera mellan nästan laminär, med endast 2-3 procent turbulensintensitet, och kraftigt turbulent strömning, med värden på 30-40 procent. Medelförhållandena kanske därmed inte ger tillräcklig information. Toppen i fördelningen av turbulensintensiteten kan på 100 meter höjd ligga vid runt 15 procent, medan den på 50 meter höjd kan ligga vid 20-25 procent. Som påpekats tidigare kan similaritetsteorin även underskatta variationen med höjden.

Vind över skog

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 ser ut över skog. Framför allt är oron för hög turbulensintensitet stor. Det görs även studier över möjligheterna att använda enklare modeller som Wasp i skog.

Man har redan nu en hel del kunskaper om förhållandena i gränsskikt över skog. Jämfört med gränsskiktet över lägre vegetation har det s.k. ytskiktet inte samma egenskaper. I ytskiktet, som är de lägst liggande delarna av gränsskiktet, avtar de turbulenta flödena i vertikal led endast långsamt uppåt. Över lägre vegetation har man här kunnat visa att den s.k. Monin-Obukhovs similaritetsteori kan användas för att beräkna vindprofilens utseende. Detta gäller inte över skog. I de lägre delarna av gränsskiktet, det s.k. "roughness sublayer", är similaritetsteorin inte giltig. Turbulensen påverkas här av koherenta rörelser med skalor av samma storleksordning som vegetationsskiktet. Strömningen kan förklaras med teorier som behandlar skiljeytan mellan två fluider vilka rör sig med olika hastighet. I fallet med skog går 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 en turbulens av samma storleksordning som vegetationsskiktets djup.

Om ytskiktet når tillräckligt högt upp, över ca 40 meter för en 20 meter 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. Typiskt kan man anta att nollplansförskjutningen är $2/3 - 3/4$ av vegetationens höjd, så att den för en 20 meter hög skog blir 13-15 meter. Fysikaliskt kan nollplansförskjutningen tolkas som den nivå i vegetationen där sänkan för rörelseenergi har sin tyngdpunkt, eller, populärt uttryckt, att strömningen "börjar" på denna höjd, där friktionsbromsningen alltså är effektivast. En annan viktig parameter är skrovlighetslängden, som för skog ligger på 0,5-1 meter.

Vissa resultat pekar på att skrovlighetslängd och nollplansförskjutning inte bara beror av vegetationens utseende utan även av vindhastigheten. Vid ökande vind ökar skrovlighetslängden samtidigt som nollplansförskjutningen minskar. Effekten antas hänga samman med att vindbyar lättare tränger ned mellan träden i en skog vid kraftiga vindar. Resultatet blir då att friktionsbromsningen ökar (större skrovlighet) samtidigt som tyngdpunkten för rörelsemängdssänkan hamnar på lägre höjd (mindre nollplansförskjutning). Eftersom det ena fenomenet ökar vinden och det andra minskar denna kommer den sammanlagda effekten på vindhastigheten på en viss höjd inte bli så stor. Detta behöver undersökas närmare, vilket kompliceras av att effekterna av skogens höjd och täthet inte är enkla att kvantifiera.

Produktion i skog

Man har sedan tidigare vant sig vid att beräkna möjlig produktion 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 antyder skillnader om 10-20 procent. Det bör då noteras att de använda produktionsuppgifterna från vindkraftverken egentligen inte är tillräckligt bra för att göra en sådan jämförelse, eftersom drifttiden inte finns dokumenterad på ett tillfredställande sätt.

En anledning till den befarade avvikelserna kan vara en stor vindgradient, som medför att bladen under ett varv kommer att träffa luft med mycket olika vindhastigheter. Detta gäller särskilt för stora vindkraftverk med stor turbindiameter och medför att luftströmningens anfallsvinkel mot bladen under en stor del av turbinvarvet kommer att avvika från den optimala. Inverkan av detta är i princip enkel att beräkna med datormodeller som finns tillgängliga i Sverige, men några sådana beräkningar finns inte tillgängliga. De vind-effekt-samband som tas upp enligt gällande IEC-standard förutsätter öppen terräng och därmed måttlig vindgradient.

En annan anledning till att produktionen avviker kan vara en hög turbulensintensitet. Vid en viss medelvind innebär mer turbulens att luftens innehåll av rörelseenergi är större. Det finns studier som visar att en vindturbin faktiskt kan producera mer när turbulensintensiteten ökar. Men det är oklart hur generella resultaten är. Exempelvis medför mer turbulens också mer snedanblåsning av turbinen, vilket normalt sänker produktionen men som i något fall också visats kunna öka produktionen. Observationer i komplex terräng pekar på att det är kombinationen av turbulensintensitet och vindgradient som avgör för hur mycket effekt ett vindkraftverk ger vid olika vindförhållanden. Individuell bladvinkelreglering, som håller på att introduceras av andra skäl, kan även vara ett sätt att optimera driften vid stor vindgradient.

Man kan alltså konstatera att det inte räcker att känna till medelvinden på navhöjd. Den vindklimatologiska beskrivningen bör även innehålla statistisk information om vindgradient och turbulens.

Isbildning

I inre och norra Svealand och vidare norrut i landet är det normalt att vintertid ha perioder med nedisning av vindturbiner, vilket påverkar produktionen samt kan sätta ned livslängden och innebära risker för omgivningen.

Tidigare kopplades nedisning till enkla parametrar som temperatur och relativ luftfuktighet, men studier under senare år har visat att enbart dessa faktorer inte räcker. Numera framhålls mängd och eventuellt storlek av i luften fritt svävande vattendroppar som tillsammans med temperatur och vind avgörande för risken för isbildning.

I storskaliga vädermodeller finns sedan länge algoritmer för att ge prognoser för nedisning för flyget. Dessa modeller, exempelvis Hirlam hos SMHI, är dock inga gränsskiktsmodeller och parametriserar det atmosfäriska gränsskiktet ganska grovt. Därför riskerar man att med denna typ av modeller missa väsentlig information beträffande kopplingen mellan lokal terräng och gränsskiktet. Vid en kartering av risken för nedisning i landet bör man i stället använda en mesoskalemodell med s.k. "higher-order turbulence closure", som beräknar turbulensen. Exempel på sådana är MM5/WARF och MIUU-modellen.

Vakeffekter

Som en följd av energiuttaget finns det bakom ett vindkraftverk ett område med nedsatt vindhastighet och högre turbulens, vilket påverkar produktion och lastförhållanden för längre bort liggande vindkraftverk. Hur dessa vakar fylls ut och upplöses är ett viktigt område inom vindkraftsmeteorologin.

Vid upplösningen av vakarna samverkar den turbingenererade turbulensen med den naturliga atmosfärsturbulensen. Under förhållanden med liten naturlig turbulens kommer en vak att fyllas ut långsamt och leva kvar länge, medan en hög turbulensintensitet medför att vaken fylls ut snabbare.

I de idag allmänt använda enkla vakmodellerna (exempelvis Park) används turbindiametern som längdmått. Dessa ger en rimlig bild förloppet. Emellertid förutsätter de att sambanden är dimensionslösa, exempelvis att förloppet ser likadant ut för tiometers-turbiner, som står med 50 meters inbördes avstånd (fem turbindiametrar), som för hundrameters-turbiner på 500 meters avstånd (också fem diametrar). Så är emellertid inte fallet.

Gjorda undersökningar⁸⁹ visar att man får bättre resultat om delningen mellan turbinerna mäts i vindens transporttid. Det betyder att man tar hänsyn till de faktiska avstånden mellan turbinerna (med tio gånger större delning mellan turbinerna blir tiderna tio gånger längre). Det betyder också att vakupplösningen påverkas av vindhastigheten, så att vakarna vid hög vindhastighet lever kvar på längre avstånd bakom turbinen.

De enkla modellerna bortser även från turbulensintensiteten. Med hög turbulensintensitet kommer de turbulenta transporterna av rörelsemängd in i vaken från den omgivande luften att bli effektivare. De tar inte heller hänsyn till på vilket sätt temperaturen varierar med höjden i gränsskiktet, som är avgörande för stabiliteten. Det sambandet gör att vakeffekterna kan variera kraftigt med tid på dygnet och året.

Över hav är turbulensen normalt lägre än över land, vilket gör att vakeffekterna bör bli kraftigare i havsbaserade utbyggnader. Detta har bekräftats vid den stora danska vindparken Horns Rev, där vakarna enligt satellitobservationer kan leva kvar tiotals kilometer bortom vindparken.

Den andra ytterligheten är skogsterräng, där turbulensen normalt är hög. Det innebär att man kan vänta sig mindre vakeffekter än över öppen mark och speciellt hav.

⁸⁹ M. Magnusson and A-S. Smedman: Air Flow Behind Wind Turbines. J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. No. 80, 169-189, 1999.

En ytterligare brist hos de enkla modellerna är att de bortser från energiutbytet med omgivningen. Om turbinerna och de deras inbördes avstånd är små har detta liten betydelse. När vindkraftstationen omfattar tiotals kvadratkilometer är detta inte längre fallet.

Idag har det börjat användas avancerade modeller som löser Navier-Stokes ekvationer, vilka beskriver den turbulenta vinden, återger turbinbladens spetsvirvlar och vakarnas principiella struktur och utbredning.⁹⁰ Det är dock fortfarande osäkert i vilken utsträckning de ger tillräckligt underlag för en korrekt statistisk bild av vakarnas utbredning och utfyllnad. Jämför avsnittet om konstruktion, där arbetet på en sådan vakmodell refereras.

Sammanfattningsvis är de allmänt använda vakmodellerna mycket primitiva, medan tillämpbarheten för mer avancerade modeller ännu inte visats.

Ljudutbredning

Ljudutbredningen i atmosfären påverkas av de meteorologiska förhållandena. Främst är det de vertikala gradienterna av temperatur och vind som är betydelsefulla. I de modeller som används för beräkning av ljudutbredning tar man inte hänsyn till detta.

Normalt förutsätts ljudutbredningen ske sfäriskt. Om den i stället sker "cylindriskt" skulle man kunna få höga ljudnivåer även på långa avstånd. Naturvårdsverket rekommenderar en omdebatterad modell för ljudutbredning över hav som förutsätter cylindrisk utbredning. Mätningar har gjorts över Kalmarsund från Utgrundens fyr till Öland 9 km bort. Resultaten visar att modellen sannolikt överskattar ljudnivån från vindkraftverk till havs. Resultaten är dock enbart baserade på mätningar på 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.

Som ett resultat av vindkarteringen med MIUU-modellen finns en rikstäckande databas som kan utnyttjas för att ta fram statistik rörande vind- och temperaturgradients med 1 km horisontell upplösning. Denna skulle också kunna användas för en riksomfattande kartering av ljudutbredningen.

Extremvindar

Extrema vindbyar av olika varaktighet och för olika återkomsttider (ett eller 50 år) används som underlag för lastberäkningar för vindkraftverk. Att skapa ett sådant underlag rent experimentellt är i praktiken omöjligt.

Weibullfördelningen, som är en exponentialfördelning, har visat sig kunna beskriva medelvindhastighetens fördelning väl. Med en utvidgning av denna, den s.k. dubbelexponential-fördelningen, har man en teoretiskt stabil grund för att beräkna extremvindar. Den är väl beprövad och har använts i ett antal former under de senaste decennierna.

⁹⁰ Se t.ex. Ivanell et al.: Numerical analysis of the tip and root vortex position in the wake of a wind turbine, J. Physics, doi:10.1088/1742-6596/75/1/012035. 2007.

Den ökade betydelse av turbulens i samband med beräkning av extremvindar med allt kortare varaktighet kan inkluderas genom att använda sig av vindspektra, vilka visar fördelningen av olika frekvenser av vindens turbulenta kinetiska energi (variansen), d.v.s. fördelningen på olika stora turbulenselement. När extremvindar av allt kortare varaktighet ska beräknas bör alltså en ökande del av turbulensspektrats varians inkluderas. Denna metod har visats ge goda resultat vid jämförelser med mätningar.⁹¹

Vindprognoser

Den ökande mängden vindkraft i landet gör att behovet av bra lokala korttidsprognoser för vind och produktion kommer att öka. Detta har redan skett i Danmark och Tyskland, där det idag finns fungerande prognostjänster som utnyttjas i arbetet.

De lokala vindprognoserna bygger på prognoser gjorda med de storskaliga vädermodellerna. Om dessa visar sig felaktiga är det omöjligt att göra en bra lokal vindprognos. Detta problem är inte något specifikt för vindprognoserna, utan ett allmänt väderprognosproblem.

Den lokala vindprognosen utgår alltså från det storskaliga prognosutfallet, vilket enligt en lösning kan detaljeras genom att "lära upp" det lokala prognossystemet genom jämförelser med tidigare utfall. Tekniken är rent statistisk till sin natur och saknar en atmosfärfysikalisk koppling.

En alternativ metod är att göra lokala modellberäkningar där modellen innehåller den fysik som påverkar de lokala vindförhållandena. Genom att de storskaliga vädermodellerna får allt större upplösning, kommer även det primära underlaget att innehålla mer lokala faktorer. Men vädermodellerna är inga gränsskiktsmodeller och förenklar kraftigt de fysikaliska processer som styr vindarna lokalt. Bättre resultat kan man få med en mesoskalemodell, som MIUU-modellen, som kan kombineras med att utnyttja en databas av tidigare genererade lokala väderparametrar, t.ex. vind, temperatur och turbulens.

Ett system som bygger på denna teknik är redan i drift genom Alarm-systemet, som drivs av Luftvårdsförbundet för Västra Sverige.⁹² Det prövas nu även för vindprognoser. De första erfarenheterna tyder på att metoden ska kunna användas inom planeringen av produktionen.

Vindmätningar och vindindex

I större vindkraftprojekt kompletteras modellberäkningarna av vinden normalt med vindmätningar under 1-2 år. Eftersom resultaten från en sådan kort mätning normalt avviker från det långsiktiga vindklimatet måste resultaten normalårskorrigeras med hjälp av någon form av vindindex. Osäkerheten i ett sådan korrigerad mätning är typiskt av samma storleksordning som i en modellberäknad vindklimatologi som gjorts med en fysikaliskt bra gränsskiktsmodell.

⁹¹ Bergström H. Distribution of extreme wind speed. Wind Energy Report WE 92:2, Department of Meteorology, Uppsala University, 31 pp. 1992.

⁹² <http://liv.vg/alarm.htm>

Att mäta vinden är i sig inte heller trivialt. Anemometrar av skålkorstyp är idag de vanligaste instrumenten i vindenergisammanhang. Även om dessa är ganska robusta 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 ska göras finns i en IEC-standard. Det är också viktigt att betona risken för störningar från antenner och parabolerna som kan finnas om man hyr mätplats i en befintlig telemast. Det är viktigt att ha "mycket luft" mellan anemometer och mast/antenner. En bra tumregel är att bommen ska vara så lång att anemometern hamnar 6-7 mastsidor ut från masten, och att denna monteras i änden av ett vertikalt rör som placerar den 10-15 bomdiametrar över bommen.

Risk för nedisning och fastfrysning av anemometern tillkommer i områden med isbildningsrisk. Även lagren i anemometern kan vara temperaturkänsliga. I sådana fall behövs uppvärmda anemometrar.

Att rensa observationsserier som drabbats av nedisning är inte lätt. Perioder med fastfrosna skålkors är oftast enkla att identifiera, men mätningarna kan även påverkas av is eller frost utan att skålkorset stannar helt. Effekten kan även bli att mätningen ger för höga värden. I sådana fall är det näst intill omöjligt att identifiera felaktiga data.

I stället för de vanliga skålkorsen kan man använda en propelleranemometer eller en ultraljudsanemometer. Den förra har fördelen av att i ett instrument kombinera givare för vindhastighet och vindriktning. Den förekommer dock sällan i vindenergisammanhang, trots att det är ett mycket bra instrument.

Ultraljudsanemometer saknar rörliga delar och utsätts därmed inte för mekaniskt slitage. Utan uppvärmning påverkas den dock lika mycket av nedisning. Möjligen kan det vara lättare att identifiera beläggning med is och frost om denna är så tjock att ljudpulserna inte går igenom.

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 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 viktig faktor är hur anemometern fungerar i byig vind. Vissa reagerar snabbt på en ökande vind, men långsamt då vinden avtar. Detta kallas "over-speeding", och innebär att anemometern ger en för hög medelvindhastighet. Problemet var stort för 20-30 år sedan, då en over-speeding på 10 procent inte var ovanlig. Moderna anemometrar är dock bättre utformade. De sammanlagda skillnaderna i hur anemometrarna reagerar på snedanblåsning och turbulens ger idag ett totalt fel på någon procent i uppmätt medelvindhastighet. Detta kan låta som ett bra värde, men exempelvis 2 procent fel i medelvind innebär 6 procent fel i energi.

Genom att vindturbinerna blivit allt större och därmed högre har behoven av mätningar på högre höjder ökat. Men höga master är dyra. Idag finns fjärranalysteknik tillgänglig i form av sodar och lidar. Båda typerna bygger på

att en signal skickas upp i atmosfären, studsar tillbaka och kan detekteras av instrumentet.

Sodarn baseras på ljud medan lidarn använder laserljus. Ljudet reflekteras mot turbulensstrukturer med avvikande temperatur medan laserljuset studsar tillbaka mot jordytan mot stoft och liknande i atmosfären. Strukturer respektive stoft antas röra sig med vinden varför ekots frekvens kommer att dopplerförskjutas och man kan bestämma vindhastigheten. Genom att mäta hastigheten i olika riktningar kan vindens både hastighet och riktning bestämmas.

Idag finns det åtminstone några typer av sodar och lidar som håller en hög kvalitet och kan användas som alternativ eller snarare komplement till mastmätningar. Genom att kombinera en förhållandevis billig 60 meters mast med fjärranalys kan man på ett ekonomiskt sätt utsträcka mät höjden till långt över 100 meter.

En annan positiv aspekt av sodar och lidar är att utrustningen lätt kan flyttas. 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.

På senare tid har det utvecklats en ytskannande lidar, som från en punkt kan kartlägga vindförhållandena inom ett antal höjdsikt i ett 10x10 km stort område. Denna och liknande tekniker kan få stor betydelse vid projektering av vindkraftsanläggningar i framtiden.

European Wind Energy Technology Platform

"Wind conditions" är ett av European Wind Energy Technology Platforms huvudområden. Ambitionerna är bitvis extremt höga, exempelvis anges att såväl energitillgång och korttidsprognoser för denna som dimensionerande vindförhållanden ska kunna fastställas med 3 procents noggrannhet. Bland prioriterade forskningsområden för vindar över land och till havs märks:

- Detaljerade vindförhållanden i komplicerad terräng och skog, inklusive ett stort mätprojekt benämnt "Askervein II". (Data från det ursprungliga Askervein-projektet på 1980-talet har använts för att verifiera strömningsmodeller sedan dess.)
- Vindförhållanden till havs.
- Vakrar inom och mellan vindkraftstationer.
- Dimensionerande vindförhållanden.
- Vindgradienter på över 100 meters höjd.
- Korttidsprognoser.
- CFD-baserade modeller för resursbestämning och uppskattning av turbulens. (Jämför senaste svenska vindkartering, som utförts med en CFD-modell.)
- Utveckling av fjärranalys-tekniker.
- Standard för resursbestämning.

Betydelsen av Vindforsks projekt

Tillgängligt och aktuellt svenskt vetande på området baseras till större delen på projekt finansierade av Vindforsk och direkt av Energimyndigheten. De genomförda forskningsprojekten har gett tillämpbara resultat och förefaller stå sig väl internationellt. Genomgången av European Wind Energy Technology Platforms förslag tyder att en större satsning skulle vara motiverad.

5.3 Framtida utveckling

Kunskapen om vindenergitillgångarnas utbredning och karaktär har fortsatt en avgörande betydelse för att kunna utnyttja vindkraftverk för elproduktion. Möjligheterna till fortsatta framsteg bör utnyttjas inom aktuella traditionella och nya områden, exempelvis vind över skog.

Vindkartering

Metoder för vindkartering med hög rumslig upplösning över begränsade områden, exempelvis en vindpark. För verifieringen behövs tillgång till detaljerade vindmätningar (ett flertal master eller motsvarande).

Vind över skog

Fördjupning av kunskaperna om vind över skog. Osäkerhet finns avseende hur trädens höjd och inbördes avstånd påverkar vindarna genom nollplansförskjutning och skrovlighetslängd, speciellt avseende hur en regional bedömning kan göras i heterogena skogsområden.

Produktionsberäkningar baserade enbart på vindhastigheten i navhöjd kan vara otillräckliga. Bättre resultat kan eventuellt uppnås genom att i vind-effekt-sambanden inkludera turbulens och vindgradient.

Isbildning

Isbildning kan tidvis ge en kraftigt försämrad produktion inom vissa områden. En kartläggning av nedisningsklimatet behöver göras.

Vakeffekter

Produktionen från en vindpark påverkas av vakeffekter. Utbyggnad inom områden med annorlunda förhållanden, som hav, skog och områden med kuperad terräng ökar betydelsen av att vakmodellerna inkluderar de meteorologiska effekterna av atmosfärens stabilitet och turbulens. Detta innebär i praktiken användning av mesoskalemodeller, vilka också kan ta hänsyn till utbyte av energi med omgivande luftlager.

Ljudutbredning

Ljudutbredningen i atmosfären påverkas av gradienter av temperatur och vind. En kartläggning av utbredningsförhållandena i landet kan göras

utgående från den meteorologiska databas som finns tillgängliga efter den nationella vindkarteringen.

Långtidsmätningar

Långtidsmätningar av vind och andra meteorologiska parametrar med hög tidsupplösning utgör ett viktigt underlag för normalårskorrekationer, studier av förändringar i vindklimatet samt för studier av extrema vindhändelser och verifiering av teoretiska extremvärdesfördelningar.

Vindprognoser

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.

6 Miljöeffekter

6.1 Resultat från Vindforskprogrammet

Forskning inom detta område har inte legat i Vindforsk IIs ambitioner och inga projekt har därför ägt rum inom området.

6.2 Omvärldsanalys

Resultat från Vindval

Forskningsprogrammet Vindval sköts av Naturvårdsverket och finansieras av Energimyndigheten. Det har som syfte att samla in, bygga upp och sprida kunskap om vindkraftens miljöeffekter.

Målet är att underlätta en ökad utbyggnad av vindkraften genom att ta fram underlag för miljökonsekvensbeskrivningar och tillståndprocesser. Forskningen bedrivs inom vindkraftens påverkan på den marina miljön, växter, djur och människor, samt om människors upplevelser av vindkraft. I början av 2008 sammanfattades forskningsläget i en lägesrapport. Denna och övriga rapporter är tillgängliga via internet.⁹³

Inom forskningsprogrammet finns en mängd projekt, såväl pågående som avslutade. De sammanfattas nedan.

Människors upplevelser

Miljömedicinsk forskning visar att få människor blir störda av ljudet från vindkraftverk. En av de faktorer som påverkar i vilken grad man upplever sig störd är i vilken typ av boendemiljö man lever. Tätortsbefolkning tenderar att vara mindre störd än invånare i glesbygd.⁹⁴

Två forskningsprojekt pågår om människors attityder och acceptans av vindkraftsetableringar: ett om hur metoder och strategier för planering och kommunikation omkring en vindkraftsetablering påverkar lokalbefolkningens inställning, samt ett där olika aktörers strategier för att överbrygga motsättningar och nå en bättre förankring hos lokalbefolkningen beskrivs. Forskningsläget inom planering beskrivs närmare i ett särskilt kapitel.

Ljud i marina miljöer

Varken abborre, mört eller öring verkar vara särskilt känsliga för ljud från vindkraftverk. Arterna har valts därför att de representerar olika sätt för fiskar att uppfatta ljud. Inte heller limfjordmusslan tycks påverkas av ljud från vindkraftverk.

⁹³ Vindkraftens miljöpåverkan. Resultat från forskning 2005-2007 inom kunskapsprogrammet Vindval. www.naturvardsverket.se/vindval

⁹⁴ Eja Pedersen. Human response to wind turbine noise. Perception, annoyance and moderating factors. Doktorsavhandling. Göteborgs universitet. 2007.

Fisk

Med utgångspunkt från tidigare resultat om likström har en studie genomförts vid växelströmskablar i Kalmarsund. Studien visar att södergående ål passerade kabeln med en signifikant lägre hastighet. Detta ses inte som någon stor effekt och är snarare förbryllande än oroande. Liknande studier kommer att genomföras om torsk, plattfiskar och annan bottennära fisk. En kartläggning av fiskbeståndet i Kattegatt görs med GIS-modellering.

Fågel och fladdermus

Studier inom Vindval bekräftar att risken för att flyttande små- och sjöfåglar ska kollidera med havsbaserade vindkraftverk är mycket liten. Flockarna väjer i regel på stort avstånd.

Studier av hur fåglar med synen uppfattar vindkraftverk till havs visar att dagens färgsättning verkar vara väl anpassad för såväl fåglar som människor.

I ett pågående projekt undersöks hur fåglar i fjällmiljö påverkas av vindkraft. Dalripa, kungsörn och jaktfalk anses som särskilt viktiga att undersöka.

Fladdermöss söker sig till vindkraftverken vid lugnt och vackert väder, då insekter samlas kring dessa som därmed utsätter fladdermössen för en kollisionsrisk. Denna kan minskas genom att låta vindturbinerna stå stilla när risken är som störst, uppskattningsvis vid vindstyrkor under 4 m/s under den tid på året när fladdermössen är mest aktiva. Eftersom elproduktionen då är liten bör de ekonomiska konsekvenserna vara acceptabla. Man bör vidare undvika att placera vindkraftverken vid fladdermössens kända flyttstråk.⁹⁵

Ekosystem

Etablering av havsbaserade vindkraftsparker medför en introduktion av en ny typ av habitat, med hårbotten och vertikala ytor, vilket kan påverka balansen mellan olika levande organismer. Några studier inom området har genomförts, bland om hur man väljer en typ av fundament som är lämplig ur miljösynpunkt.⁹⁶

Inverkan av skuggor på människor

Jämte ljud är skuggor från vindkraftverk de enskilda faktorer som i praktiken avgör hur nära bostäder man kan bygga vindkraftverk. I Sverige har det blivit praxis att med stöd av en tysk opublicerad undersökning⁹⁷ tillåta maximalt åtta timmar verklig skuggtid per år, dvs en promille av kalendertiden. En svensk studie⁹⁸ kunde emellertid inte hitta något samband mellan skuggtid och graden av störning. I övrigt saknas forskningsresultat om hur skuggor från vindkraftverk inverkar på människor.

⁹⁵ Ingemar Ahlén et al. Fladdermöss och havsbaserade vindkraftverk studerade i södra Skandinavien. Rapport 5748. Naturvårdsverkets bokhandel.

⁹⁶ Rutger Rosenberg et al. Miljömässig optimering av fundament för havsbaserad vindkraft. Naturvårdsverkets bokhandel.

⁹⁷ J Pohl, F Faul, R Mausfeld. Belästigung durch periodischen Schattenwurf von Windenergieanlagen. Institut für Psychologie der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. 1999.

⁹⁸ E. Pedersen and K. Persson Waye. Audio-visual reactions to wind turbines. Euronoise Naples 2003.

Miljöeffekter av havsbaserad vindkraft – syntesrapport

Inom det tidigare vindkraftsprogrammet gav Elforsk år 2005 ut en syntesrapport om miljöfrågor kopplade till havsbaserad vindkraft⁹⁹. Ett stort antal svenska och utländska rapporter ligger till grund för syntesen, som även innehåller en genomgång av då aktuella utredningar och projekt (Fladen, Utgrunden II och Lillgrund), inklusive yttranden från remissinstanser och miljödomstolen.

Habitatförändringar

Fundamenten till de havsbaserade vindkraftverken utgör så kallade substrat för fastsittande organismer som alger och många ryggradslösa djur. Dessa koloniserar snabbt och små samhällen av marint liv, inklusive fiskar, skapas. Djuren lockas av den ökade tillgången på föda samt av det skydd som de artificiella reven utgör. Det går dock inte att avgöra huruvida effekten visar att fundamenten leder till en ökad population av de berörda arterna, eller endast ökar koncentrationen av dessa.

Fåglar och fladdermöss

Genomförda studier tyder på att fåglarna i hög grad undviker de havsbaserade vindkraftverken. Detta gäller även sträckande fåglar. Kollisioner är ovanliga, och den dödlighet som ändå förekommer har inte påverkat populationerna signifikant.

En teori om att fladdermössen attraheras av insekter som samlas vid verken anses hållbar (se mer nedan). Effekten väntas vara platsberoende, utifrån huruvida området är insektstätt eller ligger i ett flyttstråk för fladdermöss.

Ljud och vibrationer

Fiskar och marina däggdjur är de som främst är utsatta för undervattensljud. Av de ganska få rapporter som publicerats kan slutsatsen dras att fisken kan höra ljuden från vindkraftverken men att de troligtvis inte påverkas i någon större utsträckning. Danska studier har visat att tumlare och säl inte störs av vindparker till havs (se nedan).

Sediment och sedimentation

Under byggskedet kan uppgrumling av sediment medföra tillfälliga störningar på vattenorganismer, exempelvis genom övertäckning av vegetation och försämrad ljusinstrålning. Detta sker dock under en begränsad tid och är av övergående karaktär.

Elektriska och magnetiska fält omkring kablar

Då aktuella undersökningar var kopplade till likströmskablar (HVDC), runt vilka ett statiskt magnetfält induceras. Telemetriförsök pekar på att störningar av det jordmagnetiska fältet kan bringa ålar något hundratal meter ur kurs. Vid Baltic Cable påverkades inte den storskaliga vandringen.

I kontrollprogrammet för SwePol Link har även magnetisk påverkan på lax och öring studerats. Något belegg för att magnetfältet skulle påverka fiskens sätt att simma kunde inte upptäckas.

Sedan många år finns ett stort antal sjökablar med växelström bland annat i skärgårdarna. Växelströmskablar orsakar inte något statiskt magnetfält och

⁹⁹ Miljöeffekter för havsbaserad vindkraft. Elforsk ER 05:09

kan därmed inte inverka i detta hänseende. Någon inverkan på fiskbeståndet har inte heller kunnat påvisas.

Landskapsbilden

För vindkraftverk på land har studier visat att vindkraftverk med tilltalande formgivning stör mindre visuellt. Ett sätt att minska vindkraftanläggningens visuella påverkan på omgivningen är att sätta denna på tillräckligt avstånd från "känsliga karaktärsdrag" i landskapet.

Fiskeriverkets lägesrapport

Fiskeriverket är en av intressenterna i frågan om havsbaserad vindkraft och gjorde 2007 sammanställning av svenska och utländska forskningsresultat inom området.¹⁰⁰ I rapporten framhålls att antaganden om effekter på fisk främst kommer från annan marin verksamhet och indirekta bedömningar. Riskerna bedöms kunna reduceras genom lämpligt utförande.

Under byggskedet riskerar man i första hand att skada fisk i unga livsstadier. Effekterna kan minimeras genom att undvika etablering i särskilt känsliga områden eller under särskilt känsliga tider på året. Under driftsskedet anses risken för störningar vara låg, men man framhåller även att kunskapsläget på detta område behöver stärkas.

Fiskerinäringen kan även påverkas genom begränsningar av fisket i den aktuella parken. I stora parker kan fiskerestriktioner på längre sikt leda till en positiv utveckling av bestånden, förutsatt att fisken håller sig inom området och inte samtidigt störs negativt av parken. Exempelvis kan enskilda fiskarter reagera genom att ansamlas, antingen inom eller utanför parken, vilket i sin tur kan leda till ökade möjligheter till fångst.

Genom att följa de ekologiska skeendena inom parken kan man bestämma lämpliga åtgärder, om man skulle upptäcka negativa effekter. De lokala ekologiska förhållandena är betydelsefulla. Generellt är grunda bottenar mer produktiva, vilket medför att påverkan av dessa utgör den största kvantitativa risken.

Ornitologföreningens lägesrapport

Sveriges ornitologiska förening gav 2007 ut en sammanställning om vindkraftens inverkan på fågellivet.¹⁰¹ I rapporten konstateras att "fåglar är troligen den organismgrupp som tilldragit sig mest intresse när det gäller konflikter med vindkraften". De potentiella riskerna delas in i störning och barriäreffekter, dödlighet genom kollisioner samt habitatförstöring. Merparten av de studier som publicerats fokuserar på kollisionsrisker och visar på en låg eller mycket låg risk per verk.

Kollisionsrisken kommer vara ett större problem för långlivade arter som blir könsmogna sent och för stationära individer som regelbundet befinner sig i

¹⁰⁰ Revidering av kunskapsläget för vindkraftens effekter på fisket och fiskbestånden. Fiskeriverkets redovisning av regeringsuppdrag 121-3095-05.

¹⁰¹ Fredrik Widemo. Vindkraftens inverkan på fågelpopulationer– kunskap, kunskapsbehov och förslag till åtgärder. Rapport skriven på uppdrag av Sveriges ornitologiska förening (SOF). 2007.

området. Valet av plats för vindkraftsparken har stor betydelse för kollisionsrisken. Är parken eller verket olämpligt placerat kan det enligt rapporten tveklöst påverka fåglar negativt på populationsnivå genom kollisionsrisken. Som en förlängning av detta bör enligt föreningen ingen etablering av vindkraft ske på platser med områdesskydd, i områden där hotade arter förekommer eller i områden med ovanligt stor fågeltäthet.

Enligt rapporten varierar den effekt en vindkraftpark har på fågelpopulationer också beroende på det tekniska utförandet, områdets topografi, de enskilda verkens placering och på vilka fågelarter som förekommer i området.

Eftersom tidigare forskning varit koncentrerad på kollisionsriskerna anser föreningen att det är önskvärt med mer forskning på potentiella effekter på fågelpopulationer av att habitat störs och förstörs. Man bör även undersöka vad man kan göra för att minska de negativa effekterna, till exempel genom att ändra den inbördes placeringen av verken eller deras utseende.

Kontrollprogram

I ett tillstånd till att bygga vindkraftverk är det vanligt att exploitören åläggs ett kontrollprogram, det vill säga något som ska undersökas när och ibland även innan verken har byggts. Här följer några exempel på kontrollprogram.

Kontrollprogram omfattande arkeologi och naturvärden har ålagts vindkraftsprojekt i Krokoms kommun, Bergs kommun och Härjedalens kommun. Studier beträffande knubbsäl ingår i utbyggnadsvillkoren för det havsbaserade projektet Utgrunden II och vid projektet vid Gässlinge grund i Vänern måste fågelsträcken studeras. Fåglar och även rennäring ingår i villkoren för projekten vid Gabrielsberget och Storliden i Västerbottens län.

Det följande exemplet visar hur ett kontrollprogram kan inverka på det slutliga tillståndet. Inom programmet genomfördes en studie beträffande hur rastande gäss och tranor påverkades av vindkraftverk.¹⁰² Resultaten ledde till att myndigheten bedömde att vindkraftverkens avskräckande effekt på rastande tranor och gäss är svag till måttlig, då fåglarna konstaterades rasta mycket nära vindkraftverk i drift vid flera tillfällen. Man menade att framtida etableringar kan påverkas i och med att kumulativa effekter kan uppstå, men att andra faktorer, som förekomsten av begärliga grödor, uppfattades ha större inverkan på fåglarnas fältval.

Danska erfarenheter

I Danmark finns den största samlade erfarenheten av havsbaserad vindkraft. Ett omfattande forskningsprogram har bedrivits i samband med byggandet av de stora parkerna Nysted och Horns Rev. Resultaten sammanfattas i en rapport vars huvuddrag återges i det följande.¹⁰³ Forskningen har

¹⁰² Axelsson och Gezelius. Vindkraftsverks inverkan på rastande gäss och tranors fältval vid Tåkern 2002-2004. 2005.

¹⁰³ Danish offshore wind – Key environmental issues. Publicerad av Dong Energy, Vattenfall, Energistyrelsen och Skov- og naturstyrelsen. 2007.

koordinerats av en grupp bestående av Skov- och naturstyrelsen, Energistyrelsen, Vattenfall och Dong Energi. Resultaten har granskats av Internationella expertrådspanelen för marin ekologi (IAPEME) efter samråd med Världsnaturfonden (WWF) och Naturskyddsföreningen i Danmark.

Bottenlevande fauna och vegetation

Sammanlagt genomfördes sex studier av havsbottnens fauna och vegetation vid de båda parkerna. Den största effekten visade sig komma från introduktionen av hårda bottenstrukturer på en havsbotten som tidigare nästan uteslutande bestod av sandiga sediment. Detta har gjort habitatet mer heterogena och har ändrat den bottenlevande faunan vid turbinerna från ett typiskt infaunasamhälle (djur som lever under havsbotten) till ett typiskt hårbottensamhälle. Såväl artrikedom som biomassa ökade. Ingen eller försumbar påverkan skedde på bottenlevande fauna, havsbottenssediment och etablerade påväxtområden.

Fisk

Det har inte gått att statistiskt säkerställa att fisk dras till de artificiella rev som fundamenten utgör. Vid Horns Rev kan detta förklaras av att studierna gjorts under tidiga stadier av kolonisering. Processen förväntas fortskrida med kommande år. Det kan även bero på att en ensidig musselkultur inte attraherar fisk.

Även i Danmark har det utförts undersökningar av hur elkablar påverkar fisk. Observerade effekter, som inte var korrelerade med det elektromagnetiska fältets styrka, varierar från undvikande till attraktion beroende på art.

Vid Horns Rev är tobis vanlig. Eftersom det finns ett starkt samband mellan förekomsten av tobis och sedimentens sammansättning undersöktes bägge. Resultaten visar att det är osannolikt att vindparken kan påverka sedimentens sammansättning eller få negativ effekt på tobisförekomsten.

Marina däggdjur

Sälarna ändrade inte sitt beteende på land eller i vatten vare sig under byggtiden eller senare. Den enda påvisade effekten var att antalet sälar på land minskade under påldrivningen vid Nysted.

Vid Horns Rev iaktogs en liten minskning av antalet tumlare medan pålningen pågick. Under driften kunde ingen effekt upptäckas. Vid Nysted minskade antalet tumlare även under drift. Effekten har kvarstått under de två första driftsåren, med indikationer på en långsam återhämtning. Det är alltså svårt att generalisera kring effekterna.

Fåglar

Även vid Horns Rev och Nysted påverkades fåglarna av barriäreffekter, habitatförluster och kollisionsrisker. De vanliga arterna undvek vindkraftverken, även om reaktionerna varierade. Fåglar tenderade att undvika turbinernas närområden och förflyttade sig utmed parkernas periferi. Dessa aningen förlängda flyttstråk har sannolikt inga konsekvenser.

I ett par fall har arter helt försvunnit efter tillkomsten av vindkraftverken. I rapporten framhålls det dock att denna eventuella habitatförlust ska sättas i proportion till de områden som finns tillgängliga utanför vindparksområdena. För de flesta arter i studien utgör vindparkerna en liten del av det tillgängliga

området och har därför liten betydelse. Den samlade effekten av ett stort antal vindkraftsparker skulle dock kunna bli betydande i framtiden.

Socioekonomiska effekter

Både de närmast boende och den övriga befolkningen i landet är positiva till de båda vindkraftsparkerna. Skillnader finns dock i attityder såväl mellan de bägge områdena som mellan lokal och nationell nivå. Resultaten visade även att inställningen påverkades av det visuella intrycket från vindparkerna.

Generella slutsatser

De danska erfarenheterna visar alltså vindkraftverk till havs kan byggas och drivas utan påtagliga negativa effekter på den marina miljön och känsliga arter. Anläggningarna vid Horns Rev och Nysted har totalt haft en liten påverkan på miljön. Det finns positiva lokala effekter genom att fundamenten fungerar som artificiella rev. Effekterna är mer komplexa och mindre generaliserbara än vad man tidigare trott.

Erfarenheter från övriga länder

I Tyskland, som satsar stort på vindkraft, pågår ett omfattande forskningsarbete kring havsbaserade anläggningar, som inkluderar ett trettiotal olika projekt och är knutet till forskningsplattformen Fino 1. De två nya anläggningarna Fino 2 och 3 tas i bruk under 2007. Undersökningarna omfattar både tekniska och miljörelaterade aspekter av vindkraftsetablering.

Även i Storbritannien finns det planer att bygga ett flertal stora havsbaserade anläggningar, bland annat "The London Array" med en kapacitet om 1 000 MW. Forskning om miljöeffekterna av havsbaserad vindkraft pågår inom programmet Cowrie, som studerar ljud och vibrationer från vindkraftverk, effekter på fåglar samt elektromagnetiska fälts inverkan på marint liv.

European Wind Energy Technology Platform

Miljöfrågorna behandlas av European Wind Energy Technology Platform under rubriken "Integrating wind into the natural environment". Exempel på föreslagna forskningsområden:

- Inverkan generellt på miljön av elproduktion och elkonsumtion, särskilt med avseende på vindkraft till havs och de globala fördelar denna har framför andra elproduktionsformer.
- Värdering av den miljömässiga inverkan av vindkraft på lokal till global nivå.
- En databank för vindkraftens miljöpåverkan etableras i syfte att minska behovet av nya studier.
- Information från kontrollprogram samlas, särskilt med avseende på fågelstudier.
- Vindkraftens inverkan på fåglar, fladdermöss samt livet i hav och sötvatten.
- Utveckling av teknik för att övervaka vindkraftens inverkan på fåglar, fladdermöss och vattenlevande organismer.

- Utveckling av teknik för att minska inverkan på radar, flyg och telekommunikationer och värdering av dessa med avseende på ekonomi och finansiering.
- Utveckling av metoder för placering och värdering av vindkraft i landskapet.

6.3 Framtida utveckling

Under flera år har den allmänna tron varit att havsbaserad vindkraft kommer att svara för merparten av vindkraftsutbyggnaden. Den än så länge svaga ekonomin hos denna i kombination med att nya potentialer tillkommit i skogklädda områden har gjort att uppmärksamheten nu kommit att riktas mot vindkraft i skog och fjäll. Detta leder i sin tur till att en ny uppsättning potentiella problem behöver undersökas.

Fåglar

Som framhålls av bl a ornitologföreningen har mycket av den forskning som utförts hittills fokuserat på kollisionsriskerna. I fortsättningen ser man behov av mer kunskap beträffande störningar och eventuella förluster av habitat för fågelpopulationer. Det finns även förslag om ytterligare forskning för att undersöka vilka åtgärder som kan utföras för att minska vindkraftsverkens negativa effekter, till exempel genom att ändra den inbördes placeringen av verken eller deras utseende. Eftersom småfåglar, flyttfåglar och sjöfåglar redan har studerats tämligen ingående kommer det framtida intresset förmodligen riktas mot stora rovfåglar. Intresset för vindkraft i skog leder till ett behov av att undersöka vindkraftens eventuella inverkan på tjäder, orre och andra skogshöns. En kvarstående fråga för Vindval är om sjöfåglar återtar tidigare mönster för födosök i vindkraftsområdena, och i så fall hur lång tid detta tar.

Fjäll

Med det ökade intresset för vindkraftverk i fjäll och fjällnära områden uppstår ett behov av att veta hur dessa påverkar djurlivet i dessa områden. Exempel är rovdjur som björn och järv. Fjällmiljön medför även nya förutsättningar för att bedöma de markgrepp som krävs i samband med en vindkraftsetablering. Hur ska exempelvis vägar dras och fundamenten utföras för att ge minimal påverkan på fjällens ekosystem?

Fjällmiljön öppnar även för behov av ökade kunskaper om hur vindkraften och rennäringen fungerar tillsammans och hur de kan finna nya former att samverka. Forskningsbehovet om effekterna på olika näringsverksamheter beskrivs i kapitlet om planering av vindkraftsanläggningar.

Skog

Intresset för etablering av vindkraftsanläggningar i skog har gjort att studier av vindkraftens effekter på skogens djur har blivit aktuella. I sammanhanget nämns jaktbyten som älg och rådjur. Dessa djurs beteenden är dock relativt

väl kända, och det bedöms räcka med begränsade studier för att dra slutsatser om hur de reagerar på vindkraftverk.

Vägar och infrastruktur

Även kringaktiviteter som vägar och kabeldragning kan påverka miljön, vilket kan motivera studier. En annan effekt är ökad mänsklig aktivitet till följd av tillsyn av vindkraftverken och av den ökade tillgänglighet - som i sig kan vara positiv - av att nya vägar anläggs.

Ljud, ljus och skuggor

Frågan om hur människan upplever vindkraftverk kommer att vara fortsatt viktig att hantera. Möjligen kan en omsvängning mot just upplevelsen (av exempelvis olika typer av hinderbelysning) vara mer intressant än fördjupade attitydundersökningar.

Det bör även klargöras vad effekten avseende ljudbilden blir när man bygger ett stort antal verk över ett område. Det finns en osäkerhet om i vilken utsträckning dagens beräkningsprogram korrekt återger denna situation. Osäkerheten kan verka i båda riktningar.

Nuvarande praxis beträffande tillåten skuggtid vid bostäder mm baseras på en närmast obefintlig vetenskaplig grund. Forskning på området är därför starkt befogad.

Positiva miljöeffekter

För att vindkraftens möjligheter ska få en rättvis beskrivning kan det vara nödvändigt att göra jämförelser med alternativa sätt att producera el. Man kan också ifrågasätta att miljöeffekter per automatik ska ses som negativa. I vissa sammanhang kan en vindkraftsetablering vara av godo även på lokal nivå genom att den ger skydd eller nya habitat åt hotade arter av djur eller växter. Även sådana effekter bör belysas i ett objektivt beslutsunderlag.

Tvärvetenskapliga studier

En stor utmaning ligger i att avgöra hur den kunskap som kommer fram ur traditionella studier av miljöeffekter ska tillämpas för att komma till nytta. Exempelvis kan en studie som ger information om hur stor andel av en population som riskerar att påverkas på ett visst sätt resa fler frågor än den besvarar. Frågor som handläggare och beslutsfattare behöver ha svar på kan vara: Vad betyder detta? Är det mycket eller lite i sammanhanget? Är just denna påverkan allvarlig för populationens överlevnad? Vad är alternativen, vad händer om den föreslagna anläggningen inte byggs? Den typen av frågor besvaras oftast inte i traditionella forskningsrapporter.

Det finns kunskap inom andra vetenskapsområden som skulle kunna tillämpas på vindkraftens miljöeffekter. Exempel på sådana områden kan vara: riskvärdering, miljöetik samt systemoptimering och systemekologi.

Färdigforskat?

I diskussioner med företrädare från både myndigheter och bransch framförs ofta att det redan forskats mer på miljöeffekter av vindkraft än vad det finns fog för, och att merparten av alla studier visar att det rör sig om mindre problem och begränsade effekter. Därmed anser många att man borde kunna "sätta ned foten" och förklara att ett antal områden tills vidare är färdigforskade. Inom Vindval planerar man att i en eventuell förlängning hantera detta genom att samla befintlig kunskap och låta s.k. syntespaneler värdera och dra slutsatser så långt det går "utifrån det vi vet idag".

Ett påtagligt exempel är ljudet från havsbaserade vindkraftverk. Det finns inga klagomål, det finns inte ens något fall där någon kunnat höra dem på de aktuella avstånden. Ändå måste man lägga ned åtskilliga miljoner kronor på att undersöka hur ljudutbredningen fungerar, vilket dessutom visar sig vara teoretiskt och praktiskt svårt. I det aktuella fallet var grundorsaken att en statlig myndighet angivit att en viss modell för ljudspridningen skulle användas, vilken - om den varit korrekt - skulle både ge påtagliga ljudnivåer och anledning till klagomål.

Vissa upplever även att när en fråga är löst så väcks flera nya. När ett område hamnar i medieropet får enskilda intressen en oproportionerlig tyngd. Frågorna skulle möjligen bli lättare att hantera med en på förhand framtagen helhetsbild av vilka frågeställningar som är viktiga och vilka som kan antas vara mindre betydelsefulla i sammanhanget.

Till sist menar några att proceduren för tillstånd enligt miljöbalken medför en inbyggd obalans mellan fördelar och nackdelar med en etablering. Som exempel nämns att uppläggningsen av samrådsförfarande och miljökonsekvensbeskrivning innebär att de potentiella negativa effekterna framhävs medan det är svårt att ge vindkraftens miljöfördelar ett rättvist utrymme. Mot denna bakgrund borde inriktningen vara att finna former för att beskriva vindkraftens möjligheter till att exempelvis minska belastningen av koldioxid, snarare än att initiera ytterligare forskning inom mer eller mindre perifera områden.

7 Ljud

7.1 Resultat från Vindforskprogrammet

Inom Vindforskprogrammet anslogs under perioden 2006/08 3,6 Mkr eller 9 procent av medlen till projekt inom området.

Ljudspridning över hav

V-201 Ljudspridning kring havsbaserade vindkraftverk

Projektledare: Mats Åbom, Marcus Wallenberglaboratoriet, KTH

Projektets syfte var att ta fram underlag för en revision av Naturvårdsverkets beräkningsmodell för ljud från havsbaserad vindkraft. Denna förutsätter cylindrisk ljudutbredning, vilket betyder att dämpningen blir betydligt mindre än vid den sfäriska ljudspridning som annars antas gälla.

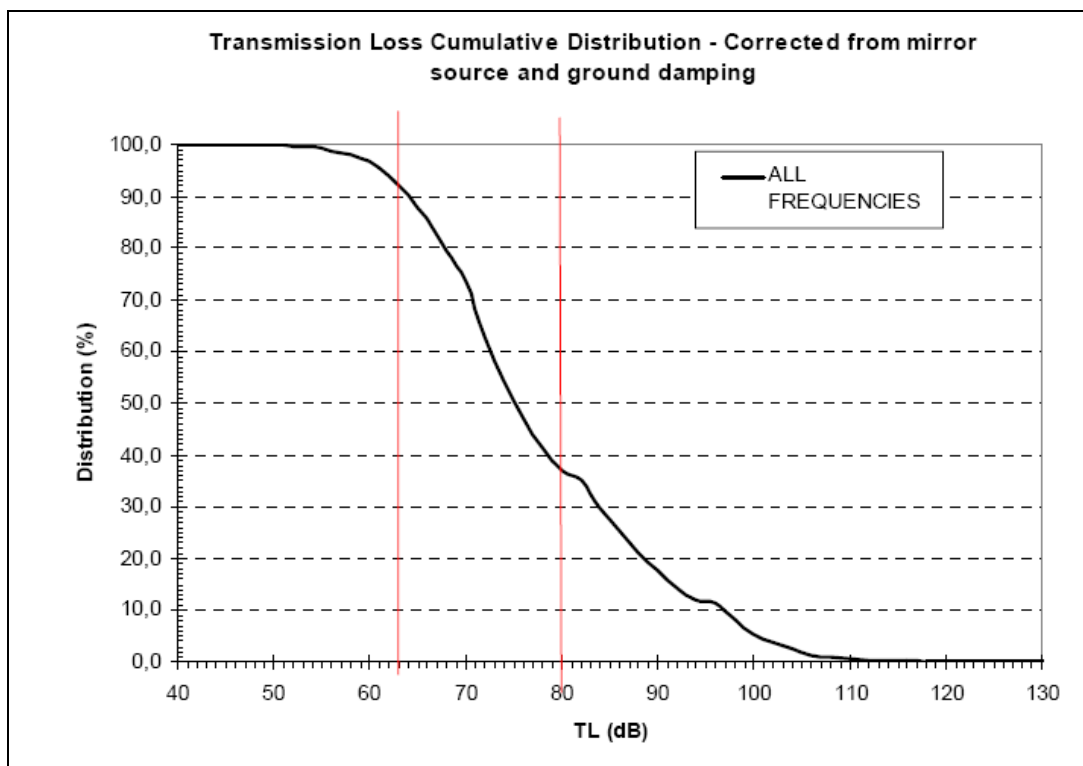
Den utvecklade mätmetodiken innebär att ljud av väl definierade frekvenser skickas ut från en högt belägen ljudkälla och registreras med ett antal mikrofoner placerade på en rät linje riktad mot ljudkällan. På så vis skapas en riktningskänslig mikrofon. Registreringsutrustningen placerades vid Hammarby på Öland. Som ljudkällor användes en Kockumstefon, med grundtonen 200 Hz och en överton vid 400 Hz, tillsammans med en högtalare med ett kvartsvågrör avstämt till 80 Hz. Tyfonen hade ljudeffektnivån eller källjudet 141 dB re 1 pW vid 200 Hz, inget värde angivet för 400 Hz. Ljudeffektnivån för 80 Hz-källan var 124 dB. De var placerade på höjden 30 meter över havsytan vid Utgrundens f.d. fyr. För analysen av signalen vid mottagaren användes en teknik bestående av medelvärdesbildning i tidsplanet, Kalman-filtrering och FFT i olika steg. Avståndet mellan ljudkälla och mikrofoner var 9,75 kilometer varav 0,75 kilometer över land.

De uppmätta värdena fick korrigeras på ett flertal sätt för att man skulle få fram värden för dämpningen på grund av den geometriska spridningen. Reflektionsförstärkningen i vattenytan sattes till 3 dB, luftabsorptionsdämpningen beräknades vid olika frekvenser enligt ISO 9613-1 utgående från lufttemperatur, relativ fuktighet och lufttryck vid källan och markdämpningen (för ljudtransporten över land) till 14 dB vid 200 Hz medan 80 Hz och 400 Hz-värdena inte förutsätts påverkas av markdämpning. De har därefter sammanvägts.

Markdämpning är ett interferensfenomen som brukar ge störst effekt kring 200 - 400 Hz för mjuk mark. Vid ljudutbredning över hårda ytor blir markdämpningen mindre och förskjuts mot högre frekvenser. Markdämpning kan beräknas med Nord2000¹⁰⁴. Ett alternativ hade varit att beräkna markdämpningen och därefter korrigera.

¹⁰⁴ Nordic environmental noise prediction methods, Nord2000. Summary report. General Nordic sound propagation model and applications in source-related predictions methods. Delta report AV 1719/01, Lyngby Denmark 2002

Med dessa korrigeringar får man en kumulativ fördelning av dämpningen enligt Fig. 2.¹⁰⁵ Det framgår av denna att dämpningen överskrider 64 dB, som motsvarar Naturvårdsverkets spridningsmodell, under drygt 90 procent av mättiden, och 80 dB, motsvarande sfärisk spridning, under knappt 40 procent av tiden. Dämpningen av den ekvivalenta ljudtrycksnivån motsvarar 68 dB. Författarna drar slutsatsen att Naturvårdsverkets modell överskattar ljudnivån med ca 5 dB i det aktuella fallet och att omslagspunkten till cylindrisk spridning i detta fall bör sättas till ca 700 meter.¹⁰⁶



Figur 2. Kumulativ fördelning av den geometriska ljudutbredningsdämpningen vid mätningarna i Kalmarsund, efter korrigering och sammanvägning. Det vertikala strecket vid 80 dB motsvarar rent sfärisk spridning. Det vertikala strecket vid 64 dB motsvarar sfärisk spridning i 200 m och därefter cylindrisk spridning (Naturvårdsverkets modell).

Mätningarna genomfördes under tio dagar i juni 2005 och en vecka i juni 2006. I en kommentar¹⁰⁷ framhåller författaren att resultaten endast gäller för den angivna årstiden och platsen.

¹⁰⁵ Boué, M. Long-range sound propagation over the sea with application to wind turbine noise. Technical report TRITA-AVE 2007:22 ISSN 1651-7660, MWL/KTH 2007

¹⁰⁶ Boué, M. & Åbom, M. Ljud från vindkraftverk. V-201 sammanfattning, www.vindenergi.org nedladdad juni 2008

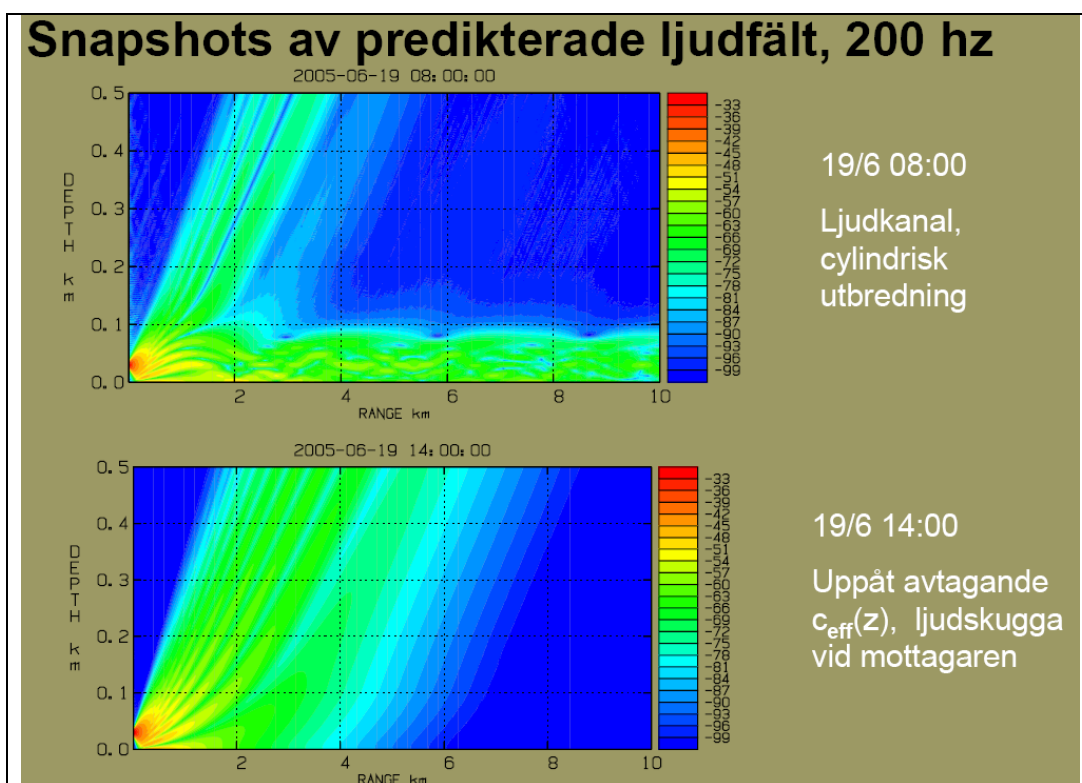
¹⁰⁷ Åbom, M. Personlig kommunikation till Martin Almgren. 2008-06-23

En anledning till att försöken genomförts vid så låga frekvenser är att de höga frekvenserna dämpas av luftabsorptionen vid så långa avstånd som det är fråga om här.

V-233 Prediktering av vindkraftbuller baserad på detaljerad meteorologisk och geografisk information

Projektledare: Ilkka Karasalo, avdelning Människa och teknik, FOI

Projektet avser analys av befintliga mätdata för ljudutbredning över Kalmarsund (projekt V-201) genom jämförelser med beräkningar med ljudutbredningsmodeller som utnyttjar detaljerade meteorologiska data under en vecka. Projektet finns redovisat i en lägesrapport.¹⁰⁸



Figur 3. Beräknad dämpning av ljudutbredningen vid försök i Kalmarsund i ett vertikalplan genom källan och mottagaren genom analys med FOIs beräkningsprogram XRAY

Registrerade data omfattade temperatur, vindhastighet och vindriktning vid en 90 meters mast på Utgrundens f.d. fyr, vindhastighet och riktning upp till 4,5 km höjd genom spårning av friballonger samt tryck, temperatur och luftfuktighet upp till maximalt 13 km höjd med hjälp av radiosonder. Friballonger och radiosonder släpptes upp vid ljudmätplatsen Hammarby på Öland. Data användes för att beräkna ljudhastigheten, absorptionen och tätheten för olika avstånd och höjder mellan ljudkällan och mätplatsen. Med

¹⁰⁸ Karasalo, I., Cederholm, A. & Andersson, B.L. Prediktering av vindkraftbuller. Lägesrapport. PM uppdragsnummer B21002, FOI 2008-05-05

hjälp av dessa kunde in sin tur dämpningen beräknas. Ett par ögonblicksbilder kan ses i Fig. 3, där den övre bilden visar ett fall av cylindrisk ljudutbredning och därmed liten dämpning medan den nedre visar ett fall av stor dämpning.

Den än så länge redovisade analysen visar en dålig överensstämmelse mellan ljudutbredning beräknad med XRAY och mätt ljudutbredning. Senare beräkningar med den så kallade normalmod-modellen och Parabolic equation har givit bättre överensstämmelse.^{109 110}

V-228 Maskering av ljud via vindinducerat bakgrundsbuller

Projektledare: Mats Åbom, Marcus Wallenberglaboratoriet, KTH

Syftet med projektet är att undersöka hur brus från havsvågor maskerar ljud från vindkraftverk och hur detta påverkar den upplevda störningen. Det utgör en fortsättning på ett tidigare projekt där bakgrundsljudet från vegetation studerades.^{111 112 113 114 115}

Vid försöken med bakgrundsljud från vegetation visade det sig att försökspersonerna fortfarande kunde urskilja ljudet från vindkraftverken då detta var 8 – 18 dB tystare än vegetationsljudet.

Projektet pågår. Slutmålet är en beräkningsmodell med vars hjälp möjligheterna att använda trädsus och vågbrus för att maskera vindkraftbuller kan bedömas.

7.2 Omvärldsanalys

Den tidigare förhållandevis restriktiva inställningen mot vindkraft i Sverige har bl a manifesterats i regler för ljud från vindkraftverk som generellt är strängare än i omvärlden och betydligt strängare än för liknande aktiviteter (flyg, vägtrafik, i viss mån industri). Detta kan vara en av förklaringarna till att svensk miljömedicinsk forskning enligt föregående kapitel visar att få människor blir störda av ljudet från vindkraftverk.

¹⁰⁹ Karasalo, I., Cederholm, A. & Andersson, B.L. Prediktering av vindkraftbuller (V-233). Presentation vid referensgruppsmöte och vid Vindforsks programkonferens på KTH 14-15 maj 2008

¹¹⁰ Åbom, M. Personlig kommunikation till Martin Almgren. 2008-06-23

¹¹¹ Bolin, K. Masking of wind turbine sound by ambient noise. TRITA-AVE 2006:86 ISSN 1651-7660, Licentiate thesis MWL/KTH 2006

¹¹² Bolin, K. MASK2 – Lägesrapport för för perioden mars 2007 – december 2007, MASK II P-nr. 20134-3, MWL/KTH 2008

¹¹³ Bolin, K. Investigating the audibility of wind turbines in the presence of vegetation noise. Second International Conference on Wind Turbine Noise, Lyon 20-21 September 2007

¹¹⁴ Appelqvist, P., Bolin, K., Almgren, M. & Åbom, M. Masking of wind turbine noise by sea waves. Second International Conference on Wind Turbine Noise, Lyon 20-21 September 2007

¹¹⁵ Appelqvist, P. Maskering av vindkraftljud via naturligt bakgrundsljud – särskilt havsbrus. Examensarbete vid ÅF-Ingemansson och KTH, TRITA-AVE 2006:100, MWL/KTH 2006

Elforsk-rapport 2006

I rapporten¹¹⁶ gjordes en litteratursammanställning över kunskapsläget 2005. Där konstaterades bland annat att om Naturvårdsverkets beräkningsmodell för ljudutbredning från vindkraftverk över hav vore generellt giltig borde klagomål beträffande ljudstörningar från havsbaserade vindkraftverk förekomma. Några sådana har vi inte kunnat få fram vare sig från Sverige (Bockstigen), Danmark (Middelgrunden, Nysteds havmöllepark och Horns Rev) eller Nederländerna. Vid Middelgrunden och Nysted blir ljudnivån beräknad med Naturvårdsverkets modell för havsbaserad vindkraft kring 48 dBA vid landområden på 4,5 respektive 7 km avstånd. Enligt störningsstudierna från Miljömedicin på Göteborgs Universitet uppfattas sådana nivåer som störande av många.

För att sätta riktvärden för ljud från vindkraftverk används internationellt två metoder. I den ena anges riktvärde för en ekvivalent ljudnivå. I den andra relateras ljudnivån till bakgrundsljudet. Naturvårdsverket planerar att ange ett riktvärde för ekvivalent ljudnivå i kombination med ett strängare riktvärde för platser med topografiskt ogynnsamma omständigheter. Anledningen är att det kan finnas platser med sådan topografi att vindalstrat bakgrundsljud blir lågt medan vindkraftverket hörs. Då bör man, enligt Elforsk-rapporten, också tillåta högre ljud från vindkraft i de fall ljudet maskeras av exempelvis havsbrus. Det alternativ som bedöms ge minst problem med klagomål i efterhand är ett riktvärde baserat på uppmätt bakgrundsljud i kombination med en övre nivågräns.

Maskering av vindkraftsljud av naturligt bakgrundsljud

Vindkraftsutbyggnaden i Sverige har åtminstone tidigare varit omdiskuterad till följd av potentiella ljudstörningar. I ett flertal länder, dock ej Sverige, relateras vindkraftsljudet till bakgrundsnivån. Maskering är möjlig då naturligt bakgrundsljud, som vindinducerat vegetationsljud eller ljud från vågor, till stor del liknar det dominerande bredbandiga vindkraftsljudet. När bakgrundsnivån är lägre än normalt, exempelvis där topografin skyddar bebyggelsen från vind, kan störningen bli större än normalt. Vid kustnära bebyggelse kan vågljudet minska störningen. Ett examensarbete utvecklar en modell för ljud från vågor vid stränder och belyser möjligheterna till maskering av vindkraftsljud.^{117 118}

Gällande vegetationsljud finns det väl utarbetade prediktionsmodeller. För att fastställa hur havsbrus kan maskera vindkraftsljud genomfördes en fältstudie där mätningar utfördes vid femton platser längs den svenska kusten. Analysen visar att för gällande svenska riktvärde på 40 dB(A) är maskeringseffekten vid strandlinjen god. Om däremot vindkraftsljudet uppgår till samma nivå som havsbruset, vilket innebär strax över 60 dB(A) för

¹¹⁶ Almgren, M. Ljud från vindkraft. Utredning inför Naturvårdsverkets allmänna råd. Elforsk rapport 06:02, mars 2006

¹¹⁷ Appelqvist, P., Bolin, K., Almgren, M. & Åbom, M. Masking of wind turbine noise by sea waves. Second International Conference on Wind Turbine Noise, Lyon 20-21 September 2007

¹¹⁸ Appelqvist, P. Maskering av vindkraftsljud via naturligt bakgrundsljud – särskilt havsbrus. Examensarbete vid ÅF-Ingemansson och KTH, TRITA-AVE 2006:100, MWL/KTH 2006

halvmeters-vågor, är maskeringseffekten mindre säker. Slutsatsen är att för platser med avvikande bakgrunds nivå bör man göra mätningar i kombination med beräkningar.

Lågfrekvent ljud och infraljud

Ljud i frekvensområdet 20 - 200 Hz benämns lågfrekvent och därunder som infraljud. Höga nivåer kan ge skadeverkningar, vilket lett till att både Socialstyrelsen och Arbetsmiljöverket utfärdat föreskrifter om maximala nivåer. Dessa överskrids i många sammanhang, som kontorsrum och lastbilshytter. En sjukdom benämnd vibro-acoustic disease (VAD) yttrar sig som en förtjockning av vävnad i hjärt-kärl-systemet och har drabbat flygtekniker, som utsätts för lågfrekventa ljudnivåer över 90 dB.

En referens¹¹⁹ hävdar att även de betydligt lägre nivåerna av infraljud och lågfrekvent ljud från vindkraftverk kan ge upphov till vibro-acoustic disease. I samband med ansökan om den planerade Andmyran vindpark i Norge utarbetades en rapport¹²⁰ som konstaterar att övriga forskare inte godtar referensens hypoteser. Det är inte rimligt med skador från ljud under känseltröskeln för lågfrekvent ljud eller infraljud. På 500 meters avstånd från den planerade vindparken underskrids den svenska socialstyrelsens riktvärden med 5 - 10 dB

I Danmark framfördes farhågor att den nya generationen av betydligt större vindkraftverk skulle kunna orsaka höga nivåer av lågfrekvent ljud. Frågan undersöktes genom mätningar vid Risøs försöksplats i Høvsøre, där de för närvarande största danska vindturbinerna finns uppställda. Slutsatsen blev att den nya generationen av vindkraftverk inte orsakar mer lågfrekvent ljud hos grannar än de tidigare mindre vindturbinerna. Sammanfattningsvis är infraljudet försumbart.¹²¹

Områden med lägre bakgrundsljud än normalt

Syftet med det refererade projektet¹²² är att utarbeta en metod för att mäta bakgrundsnivån på platser för planerade vindkraftverk. En tillämpning är att ta reda på om bakgrundsnivån vid närmaste bebyggelse är lägre än normalt, trots att det blåser ordentligt på navhöjd. Ett resultat är att mätningar bör utföras under ett par veckors tid under varje årstid. Därtill undersöks hur

¹¹⁹ In-home wind turbine noise is conducive to vibroacoustic disease.

Mariana Alves-Pereira, ERISA-Lusofona University, Lisbon, Portugal

Nuno A. A. Castelo Branco, Center for Human Performance, Alverca, Portugal. Second International Conference on Wind Turbine Noise, Lyon 20-21 September 2007

¹²⁰ Almgren, M. & Solberg, S. Andmyran vindpark, Norge. Riktvärde för lågfrekvent ljud. ÅF-Ingemansson AB och Kilde AS rapport 12-02917-07101600 på uppdrag av Andmyran vindpark AS

¹²¹ Low frequency noise from large wind turbines. Summary and conclusions on measurements and methods. EFP-06, Report AV 140/08. Client Danish Energy Authority, 2008

¹²² Appel, D. Kvantifiering av områden med lägre bakgrundsljud än normalt vid vindkraftsprojektering. Examensarbete vid ÅF-Ingemansson och KTH. Rapport under utarbetande 2008

bakgrundsljud påverkar hörbarheten av vindkraftsljud och hur detta kan användas i svenska riktlinjer för vindkraftsljud.

European Wind Energy Technology Platform

European Wind Energy Technology Platform tar upp ljudfrågorna i begränsad omfattning i avsnittet om hur vindkraftverken ska kunna integreras i den naturliga miljön. Verksamhet inom följande områden föreslås:

- Metoder för att beräkna, begränsa och övervaka ljudspridning från vindkraftverk.
- Miljökonsekvensbeskrivningar bör utvärderas i efterhand för att bestämma verklig bullerpåverkan i förhållande till den förhandsberäknade.

Betydelsen av Vindforsks projekt

Tillgängligt och aktuellt svenskt vetande på området baseras till större delen på projekt finansierade av Vindforsk och dess föregångare. De genomförda forskningsprojekten har gett tillämpbara resultat och förefaller stå sig väl internationellt. Det svenska intresset för ljudfrågor är större än som gäller internationellt. Detta gäller särskilt ljud från havsbaserade vindkraftverk.

7.3 Framtida utveckling

Ljud har traditionellt varit gränssättande för möjligheterna att placera vindkraftverk i Sverige, som har mycket spridd bebyggelse och därtill strängare regler beträffande vindkraftsljud än flertalet andra länder. Även om bullerfrågorna under senare år tenderat att minska i relativ betydelse behövs fortsatt verksamhet för att bli klargöra de speciella förutsättningarna för den "nya" tillämpningen vindkraft i skog. Ljudspridningen över hav har fortfarande inte klargjorts nöjaktigt, oavsett om den i realiteten är ett problem eller inte. Maskeringseffekter och deras motsats behöver studeras ytterligare.

Ljudemission från vindkraftverk i skogsterräng.

Är det mer turbulens i vinden i skogsterräng och hur inverkar det på ljudalstringen? Hur inverkar sned anströmning mot rotern på ljudalstring?

Ljudutbredning i skogsterräng

Naturvårdsverkets beräkningsmodell för spridning av vindkraftsljud över land förutsätter plan mark i öppen terräng. Den tar alltså inte hänsyn till skogsmark med porös yta, träd som sprider ljudet, vattensamlingar och bergsytor, ej heller till horisontella variationer av gradienter för vindhastighet och temperatur. Jämför med motsvarande beräkningsmodeller för väg, järnväg och industri, vilka tar hänsyn till markytans porositet och topografi. Nord 2000 är en sådan beräkningsmodell, men den är inte validerad för skogsterräng och stora avstånd. Behov finns därför att validera Nord 2000 för ljudutbredning över skog.

Ljudutbredning över hav

Markus Wallenberglaboratoriet har föreslagit att Naturvårdsverkets modell för spridning av vindkraftsljud över hav modifieras så att avståndet för omslag till cylindrisk spridning ändras från 200 till 700 meter. Det finns dock fortfarande kvar osäkerheter, se tidigare nämnda reservationer. Något svar bör FOIs modellering kunna ge. För att få en verifiering bör man göra beräkningar för några havsbaserade vindkraftsanläggningar, exempelvis Bockstigen, Lillgrund och någon dansk anläggning. I de fall ljudnivån blir 40 dBA eller mer bör uppföljande mätningar göras. Jämförande beräkningar bör även göras med Nord 2000¹²³, som togs fram gemensamt av de nordiska länderna. Den är en strålgångsakustisk modell där effekten av markdämpning modelleras med geometrisk strålgångsteori och effekten av skärmdämpning med geometrisk diffraktionsteori.

En annan osäkerhet är inverkan av källans höjd och utsträckning. Vid mätningarna i Kalmarsund var källhöjden 30 m, medan ett stort havsbaserat vindkraftverk har källan utspridd mellan storleksordningen 50 och 150 meters höjd.

Vid analysen av mätresultaten från Kalmarsund gjordes antagandet att signalen vid 200 Hz reducerades med 14 dB på grund av markdämpning, medan dämpningen vid 80 och 400 Hz sattes till noll. Frekvensområdet omkring 200 Hz har stor inverkan på dBA-nivån, vilket motiverar ytterligare undersökning.

Maskering av vindkraftsljud och hörbarhet

Om ljudet från ett vindkraftverk inte hörs vid en bostad på grund av maskerande ljud kan ljudet i sig inte heller vara störande. Frågan är, vid vilken nivå ljudet blir störande. Det finns flera olika undersökningar kring detta och en sammanställning bör ske.

Bakgrundsljud i vindskyddade lägen

Det behövs mer erfarenhet och mätresultat från redan byggda vindkraftverk där bostäder vid vindskyddade platser kan misstänkas få större risk för upplevd störning vid 40 dBA än platser med normal vind.

¹²³ Nordic environmental noise prediction methods, Nord2000. Summary report. General Nordic sound propagation model and applications in source-related predictions methods. Delta report AV 1719/01, Lyngby Denmark 2002

8 Effekter på flyg, radar, radiolänk och signalspaning

8.1 Resultat från Vindforskprogrammet

Forskning inom detta område har inte legat i Vindforsk IIs ambitioner och inga projekt har därför ägt rum inom området

8.2 Omvärldsanalys

Flygplatser

Med moderna civila och militära inflygningshjälpmedel blir restriktionerna mot att bygga vindkraftverk utanför flygplatsernas omedelbara närhet ganska små. Därtill är dessa restriktioner motiverade av de krav på hinderfrihet som finns för flyget, och därför i allmänhet inte förhandlingsbara. Från den allmänna regeln finns det ett par undantag, vilka behandlas nedan.

MSA-yltor

Omkring flygplatserna finns s k MSA-yltor (minimum sector altitude), vilka utnyttjas vid instrumentinflygning. I ett antal fall har höjden till dessa satts så lågt att vindkraftverk inte kunnat byggas. För flygtrafiken innebär en höjning i de flesta fall inget problem, utan det handlar om en administrativ procedur som måste genomföras. Vindkraftsbranschen har initierat en aktion för att generellt höja dessa höjder i landet.

Pejlinflygning

Ett kvardröjande problem är att försvarsmakten har behållit den s k pejlinflygningen som en reserv. Det är ett gammalt system med dålig precision, som därför har anspråk på mycket stora hinderfria ytor för att kunna användas fullt ut, i princip 650 km² vid vardera av 39 flygplatser i landet. I ett fall skulle utbyggnad av vindkraftverk göra att landning i den aktuella banriktningen skulle kunna genomföras under 80% av årets timmar mot 88% utan vindkraft. Med ett modernt system kan man landa under 99,7% av årets timmar.¹²⁴ Vindkraftsbranschen hävdar att det militära intresset av att eventuellt kunna använda detta system inte kan motivera att vindkraftsutbyggnad förhindras inom så stora landytor.¹²⁵ Ett aktuellt ärende kan komma att avgöras av regeringen.

¹²⁴ S. Engström. Molnbas och landningsbar tid med olika inflygningshjälpmedel vid Karlsborgs flygplats. Ägir Konsult AB. PM 2007-04-02.

¹²⁵ Konflikt mellan vindkraft och militär pejlinflygning. Skrivelse från Svensk Vindkraft till Miljö- och samhällsbyggnadsdepartementet 2006-12-15.

Hinderbelysning

Vindkraftverk kan i likhet med mobilmaster mm utgöra hinder för flygtrafiken, vilket föranleder krav på att de utmärks med målning och ljus. Ljusen kan störa omgivningen och medför därtill en kostnad. Nuvarande regler¹²⁶ innebär att vindkraftverk med 45-150 meters totalhöjd (till högsta bladspets) ska utmärkas genom att vindkraftverket är målat med vit färg samt under gryning, skymning och mörker med ett 2 000 candela rött blinkande ljus på maskinhuset, vilket under mörker får dämpas till 200 candela. Något krav på belysning under dagen finns alltså inte längre för vindkraftverk – erfarenheten visar att de syns ändå. Vid totalhöjd över 150 m ska ljuset vara 100 000 candela vitt blinkande och lysa hela dygnet. Under mörker får det dämpas till 2 000 candela. Enligt uppgift kommer nuvarande ljusa färger på vindkraftverk att accepteras som "vita". För grupper om minst fyra vindkraftverk medger förslaget en lättnad genom att de högintensiva ljusen endast behöver anordnas på de yttersta verken.

Nuvarande bestämmelser grundas på den internationella flygorganisationen ICAO:s rekommendationer, vilka inte är bindande. Inom en internationell arbetsgrupp håller förslag till tvingande gemensamma europeiska bestämmelser om hindermarkering på att tas fram.¹²⁷

Den mesta vindkraften i världen finns idag i Tyskland, som har tagit fram egna bestämmelser för markering av vindkraft. Dessa kan generellt beskrivas som ambitiösa. För verk med över 150 m höjd är de dock mildare än de nu gällande svenska.

I Tyskland markeras vindkraftverk enligt regler från 2007^{128, 129} oavsett höjd (även över 150 m) på dagen med målning alternativt medelintensivt vitt blinkljus om 20 000 candela och på natten med rött fast ljus 10 candela, alternativt rött blinkljus 2 000 candela. För att inte störa omkringboende medges kraftig avskärmning under horisontalplanet. I undantagsfall markeras vindkraftverk under 100 meters höjd.

De tyska bestämmelserna medger även att 20 000 och 2 000 candela ljusen dämpas till 30 procent vid sikt över 5 km och till 10 procent vid sikt över 10 km. För detta ändamål används kompakta siktmätare bestående av en enda enhet. Närliggande blinkljus ska synkroniseras, vilket kan ske med GPS-teknik utan interna kabelförbindelser.

Hinderbelysningen motiveras visserligen av hänsyn till flyget, men innebär också en konflikt med militär helikopterflygning där besättningarna använder

¹²⁶ Luftfartsstyrelsens föreskrifter och allmänna råd om markering av byggnader, master och andra föremål 2008:47. Tillgänglig på www.lfs.luftfartsstyrelsen.se.

¹²⁷ Protokoll från möte mellan vindkraftsbranschen, luftfartsstyrelsen och näringsdepartementet. 2008-03-06.

¹²⁸ Nachrichtliches Bekanntmachung der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Kennzeichnung von Luftfahrthindernissen. Nachrichten für Luftfahrer. NfL I 143/07.

¹²⁹ LED obstruction lighting for wind turbines. Honeywell Airport Systems GmbH, broschyr 2007. www-honeywell.de/airportssystem

ljusförstärkare, s k night vision goggles. Försvaret anser att dessa störs av vindkraftverkens hinderbelysning.¹³⁰

Vindkraftsbranschen har invänt mot att de nyligen införda svenska bestämmelserna är så långtgående, särskilt för verk med över 150 meters totalhöjd, vilka speciellt i skogsterräng ger en mer ekonomisk vindkraft. För nu aktuella vindkraftsutbyggnader rör det sig om mångmiljonbelopp i investeringar enbart för hinderljus. I första hand föreslår branschen att Sverige antar de tyska bestämmelserna. Med tanke på hur dominerande Tyskland är på vindkraftsområdet är det troligt att kommande gemensamma europeiska bestämmelser kommer att präglas av dessa. På sikt kan man diskutera om det alls behövs någon belysning av master utanför flygplatsernas närområden. För flertalet flygplan har hinderbelysningen bortom flygplatserna ingen betydelse – de flyger betydligt högre. Flygplan och helikoptrar som flyger lågt kan utnyttja GPS-utrustning som på instrumentpanelen i flygplanet indikerar närhet till hinder av olika slag. Sådan utrustning används redan idag.

Radar

Radar bygger på att radiovågor sänds ut från en antenn, reflekteras mot ett eventuellt föremål och tas emot av antennen igen. Därigenom kan man bestämma läge, hastighet och ev. höjd för föremål i luften, på vattnet och (från flygplan) på marken. Om en hög byggnad, en bro eller ett vindkraftverk befinner sig mellan föremålet och antennen kan detta hamna i radarskugga, bli osynligt för radarn. För vindkraftverk är det i första hand tornet som har betydelse för en normal radar, medan turbinblad och maskinhus har mindre betydelse, eftersom de har mindre geometrisk utsträckning. Ett sådant störande föremål kan också orsaka en extra reflektion av signalen och därigenom ge ett falskt eko. Om ett flygplan befinner sig över ett vindkraftverk kan det bli svårt att urskilja flygplansekot från det som kommer från vindkraftverket.

Problemen med bristande eller falsk indikering på radar är lika gammal som tekniken själv. Situationen att en stor mängd höga föremål tillkommer både på land och i vattnet är dock ny. I Sverige och i exempelvis Storbritannien har militära och civila myndigheter inledningsvis reagerat genom att vilja förbjuda de verksamheter man inte haft kontroll över och inte heller haft resurser för att undersöka. Efter hand har det i Sverige genomförts ett antal utredningar och undersökningar på området.^{131 132 133} En hel del internationellt arbete

¹³⁰ Försvarsmakten, Högkvarteret. Yttrande avseende planerad vindkraftspark på Lunnekullen belägen i Tibro och Karlsborgs kommuner. 2007-09-21. HKV beteckning 13920:73440.

¹³¹ Rapport 2 angående projektet "Vindkraften och försvaret" beträffande förstudie radar och förstudie radiolänk. Försvarsmakten Högkvarteret 1997-09-17, 13920:71892.

¹³² Rapport från Huvudstudie radar, vindkraftprojektet. Försvarsmakten Högkvarteret 2000-03-17, 13920:62916.

¹³³ Utredning av vindkraftens effekter på militära övervaknings- och kommunikationssystem mm – slutrapport. Försvarsmakten Högkvarteret 2004-02-11, 21863:61798.

pågår också.¹³⁴ På senare tid har Försvarsmakten genomfört ett projekt beträffande havsbaserade vindkraftverks inverkan på radartäckningen, sedan man upptäckt att tidigare analysverktyg varit alltför "trubbigt". Inom projektet genomfördes prov där det undersöktes i vilken utsträckning vindkraftverken vid Yttre Stengrund i Kalmarsund påverkade möjligheterna att med radar detektera ett flygbogserat mål, som utgjordes av en kula med 60 cm diameter. Dessutom utfördes en genomgripande teoretisk analys. En bärande slutsats är nu att "de flesta etableringarna av havsbaserad vindkraft kan lösas vad avser radarkonflikter".¹³⁵ Någon motsvarande undersökning av utbredningsförhållandena för radar över land finns inte.

Rapporten redovisar också en mer realistisk inställning till vad radar förmår och hur hinder som vindkraftverk kan påverka denna förmåga. Beträffande problemet med skuggning bakom vindkraftverk konstateras att det inom täckningsområdet finns ett överskott av signalstyrka, som gör att dämpningen bakom vindkraftverk, 6-10 dB, inte spelar någon roll då det rör sig om större mål. Därför påverkas inte möjligheterna att detektera normala fartyg och flygplan, se vänstra kolumnen i Tabell 4. Å andra sidan vet man att småbåtar inte säkert kan detekteras även utan vindkraftverk, därför att de försvinner bland reflexer från vågorna och döljs av radarhorisonten på längre avstånd. Av samma skäl syns inte heller flygplan och robotar på mycket låg höjd förrän de kommit nära – det är ett gammalt taktiskt knep att genom extrem lågflygning undgå radarupptäckt. Samma förhållande gäller fartyg och flygplan utförda med smygteknik, "stealth". Ett sådant flygplan kan ha en radarmålyta som en fågel, mot normalt några tiotal kvadratmeter. Det enda som faktiskt riskerar att döljas bakom vindkraftverken är robotar, som inte flyger lågt. Men förmodligen flyger även dessa lågt just för att undgå upptäckt.

Tabell 4. Effekter av vindkraftverk på radartäckning över hav. Vindkraftverk placerade mellan radar och föremål som ska detekteras.

<i>Syns trots vindkraftverk</i>	<i>Syns ej även utan vindkraftverk</i>	<i>Syns inte bakom vindkraftverk</i>
Fartyg Flygplan på normal höjd	Småbåtar Flygplan och robotar på mycket låg höjd Flygplan och fartyg utförda med smygteknik	Robotar på normal höjd

Problem, om det finns några, kan enklast undvikas genom att se till att det finns radartäckning för aktuellt område från flera radarstationer. I något fall i Sverige har risken för radarstörning kompenserats genom att exploatören

¹³⁴ Radar, radio and wind turbines. 53rd IEA Topical Expert Meeting. Organised by Department of Trade and Industry. Oxford, UK, March 2007. Scientific co-ordination Sven-Erik Thor, Vattenfall AB.

¹³⁵ HKV 2008-06-04 10 757:71038 Rapport från flygprov radar

bekostar en mindre radar, som i praktiken monteras på ett av vindkraftstornen till havs.

I den huvudsakliga spaningsriktningen från kustbaserade radarstationer inrättas ett skyddsområde intill 100 km över hav. Innebörden av detta är att ev. lokalisering av vindkraftverk måste utredas. Detta demonstrerar att störningen är störst av föremål som befinner sig relativt nära radarn. I andra riktningar och för radar som spanar över land sträcker sig skyddsområdet endast 2 km från radarstationen.

Försvarsmakten hävdar förbud mot att bygga vindkraftverk intill 5 km från väderradarstationer.¹³⁶ Det baseras på en europeisk rekommendation, som inte desto mindre kan ifrågasättas, eftersom väderradarns funktion inte kan vara lika kritisk som exempelvis den radar som övervakar flygtrafiken.

I Storbritannien har det ledande försvarsmaterielföretaget BAE Systems utvecklat programvara för att undertrycka vindkraftsekon och därigenom göra det möjligt att utan avbrott följa flygplan som passerar över vindkraftverk och därigenom riskerar att döljas.¹³⁷

Det har i olika sammanhang framförts att vindkraftverken skulle kunna utföras med smygteknik, vilket praktiskt skulle kunna innebära blad och torn utförda med skarpa kanter eller täckta av radarabsorberande material. Med en sådan lösning skulle man kunna minska ovan nämnt problem. Bättre programvara för radarn är dock förmodligen en billigare lösning. Skuggningen bakom vindkraftverk kan man principiellt inte påverka på detta sätt. Sjöfarten kan dessutom väntas ha betänkligheter mot vindkraftverk som inte syns på radarn.

Radar i flygplan

Fenomenet att flygplanradar kan låsa på vindkraftverk har varit känt sedan 1980-talet (Jakt-Viggen), men Försvarsmakten har tidigare inte prioriterat att lösa denna fråga. Problemet dök upp på nytt i samband med ett projekt i Västergötland¹³⁸, men är aktuellt vid alla flygplatser där man flyger med krigsflygplan.

Det aktuella problemet uppstår vid start av flera flygplan efter varandra där de bakomvarande använder radarn i "startmod" för att ha kontroll över framförvarande. Radarn är av s k dopplertyp, dvs den särskiljer rörliga föremål från stillastående. Ett vindkraftverks rotor uppfattas som ett rörligt föremål och det har hänt att radarn strax efter start har låst på ett vindkraftverk i stället för på framförvarande flygplan. Om detta skett får flygföraren initiera en ny sökning, varvid radarn normalt låser på rätt föremål. I ett flertal fall har sådana felaktiga låsningar skett med JAS 39 Gripen på två

¹³⁶ Information till länsstyrelserna samt kommunernas plan- och bygglovavdelningar (motsv.) avseende delar av riksintresse för totalförsvaret. Försvarsmakten, Högkvarteret. 2007-03-19

¹³⁷ Advanced digital tracker. Informationsblad från BAE Systems Integrated Technologies Ltd. BAE Systems 2007.

¹³⁸ Försvarsmakten, Högkvarteret. Yttrande avseende planerad vindkraftspark på Lunnekullen belägen i Tibro och Karlsborgs kommuner. 2007-09-21. HKV beteckning 13920:73440.

mindre vindkraftverk strax utanför Såtenäs flygflottilj, F7, där all skolning på JAS sker i Sverige. Inget sådant fall har rapporterats som en incident, dvs som en potentiellt farlig händelse. Det finns ett förslag¹³⁹ till ett projekt för att genom analys och flygprov närmare undersöka frågan och ge förslag till lösningar. I enklaste fall kan det räcka med att ställa upp den hastighetsgräns om 200 km/h som redan lagts in radarns programmering för att den inte skall låsa på bilar. För att man säkert skall utesluta vindkraftverk bör den ändras till 360 km/h (100 m/s, högsta idag förekommande spetshastighet plus en marginal). Också andra ändringar i parametrar och programvara kan bli aktuella. Några förändringar i den fysiska tekniska utrustningen i flygplanen eller på marken kommer inte att bli nödvändiga. Det har även förekommit att radarn låst på vindkraftverk då den använts för "normal" målspaning, men detta eventuella problem kan man inte komma åt med den nu föreslagna lösningen.

Radiolänk

Radiolänkar används för att överföra information med högfrekventa radiovågor som sänds ut och tas emot med riktade parabolantennor. Sändar- och mottagarantennor placeras normalt i master för att uppnå den fria sikt som krävs. Radiolänkar används både civilt och militärt. Civila brukare är exempelvis Teracom, för överföring av radio- och tv-program, samt Telia och övriga mobiloperatörer. Det militära systemet används även av "blåljusmyndigheterna". Moderna länkar använder digital teknik. Överföringen påverkas av väderförhållanden. Kapaciteten är lägre än för t ex optisk fiber.

Eftersom det krävs fri sikt mellan sändare och mottagare är det uppenbart att ett fysiskt hinder, t ex ett vindkraftverk, kan störa förbindelsen. Från exempelvis Teracoms sida hävdas att vindkraftverk ska placeras 350 m vid sidan av länkstråk.¹⁴⁰

En som det förefaller auktoritativ redogörelse finns i den s k Bacon-rapporten¹⁴¹ från det brittiska statliga Office of Communications (Ofcom). Gränsen för acceptabelt signal/stör-förhållande sätts till 70 respektive 50 dB i de bägge fall som beskrivs i det följande. För en 60 km förbindelse med frekvensen 1,5 GHz behövs enligt rapporten ett fritt utrymme av maximalt 300 m från siktlinjen i närområdet, vilket sträcker sig ut till 6 km avstånd från de bägge antennerna. Däremellan krävs maximalt 80 m. För en 20 km lång förbindelse med frekvensen 7 GHz anges att man utmed hela sträckan behöver ha maximalt 20 m fritt mellan siktlinjen och föremål som vindkraftverk. Generellt gäller att högre frekvens minskar behovet av fritt utrymme, samtidigt som känsligheten ökar i de fall då hinder finns inom "förbjudet" område.

¹³⁹ Ansökan om forskningsstöd, Försvarets Materielverk, Kjell-Åke Eriksson, utkast juni 2007.

¹⁴⁰ Jan-Peter Bengtsson, nätansvarig frekvenser, Teracom AB. Presentation vid VIND 2007.

¹⁴¹ D. F. Bacon. A proposed method for establishing an exclusion zone around a terrestrial fixed radio link outside of which a wind turbine will cause negligible degradation of the radio link performance. Tillgänglig på <http://www.ofcom.org.uk/radiocomms/ifi/licensing/classes/fixed/Windfarms/windfarmdavidbacon.pdf>

Inom SG-Vind (samverkansgrupp vind), som är Försvarmaktens och Energimyndighetens projekt för att utreda inverkan av vindkraft på olika tekniska system inom försvaret, har ett flerårigt forskningsarbete genomförts. Även innan dess har forskning ägnats åt vindkraftverks inverken på radiolänkar – första rapporten är från 1979 och de första mätningarna rapporteras 1988. I en rapport från Ericsson¹⁴² redovisas resultaten från mätningar genomförda 1997-2000 på digitala länkar med frekvenserna 2, 7 och 18 GHz med ett länkstråk vardera som passerar genom en samling gotländska vindkraftverk och med något kortare referenslänkar fria från vindkraftverk. "Vindkraftlänken" var i samtliga fall en 48 km sträcka med ett flertal vindkraftverk inom ett 5 km långt område med början 17 km från ena änden. Antal, typ och placering i övrigt i förhållande till länkstråket redovisas inte. För 2 GHz-bandet erhöles för värsta 30 dagars period under år 2000 en avbrottstid av 2 timmar och 12 minuter för "vindkraftslänken" medan avbrottstiden blev 39 respektive 8 minuter för de övriga. Tillgängligheten var alltså 99,7% respektive minst 99,9%, vilket ju låter ganska bra för att vara värsta period. För 7 GHz-bandet erhöles på samma sätt som värst 5 timmar och 46 minuters avbrott i vindkraftsfallet (tillgänglighet 99,2%) och 30 minuters avbrott i referensfallet. I 18 GHz-fallet märktes ingen skillnad. Försöken visar tydligt att funktionen hos radiolänkar påverkas märkbart av flera yttre faktorer, inte minst vädret. Rapportförfattaren drar själv en påtagligt svag slutsats, "man kan inte utesluta att vindkraftverk i länkstråken kan påverka funktionen hos digitala radiolänkar med frekvenserna 2 och 7 GHz", vilket förutsättningen då arbetet inleddes.

I den avslutande huvudrapporten¹⁴³ från SG-Vind presenteras det genomförda arbetet, vilket uppges ha resulterat i förbättrade beräkningsmodeller för beräkning av störning. Som slutsats konstateras att det är signal/störförhållandet som avgör om en viss vindkraftinstallation invid ett länkstråk utgör acceptabel störning eller inte. Vilket signal/stör-förhållande man valt, hur detta i så fall påverkar länkens funktion, påverkan på olika typer/frekvenser för länkar och eventuell koppling till genomförda försök och beräkningar redovisas dock inte.

I en Elforskrapport¹⁴⁴ utreds hur mobiltelefonutrustning kan utnyttja vindkraftverk. Mikrovågslänkarna för signalöverföring till basstationen placeras på vindkraftverkets torn under turbinplanet. Mobiltelefonantennerna placeras på tornet inom turbinplanet. Uppenbarligen anses placeringen direkt på ett vindkraftverk inte vara något hinder för radiolänkens funktion.

Ledningsrättslagen gäller endast fysiska ledningar och bygglovet för länkmaster ger inte någon rätt i förhållande till mellanliggande terräng. Militära installationer skyddas genom försvarsintressets företräde i Miljöbalken.

¹⁴² Joakim Riedel. Results for the 2, 7 and 18 GHz measurement extensions. Appendix B to Doc: ERA/SV-01:1049.

¹⁴³ Rapport avseende huvudstudie radiolänk i vindkraftsprojektet. Försvarets Materielverk PRO LED 13920:3436/04. 2004-04-17.

¹⁴⁴ Staffan Sandorf. 3G-utrustning i anslutning till vindkraftverk. Elforsk rapport 03:32. pdf

Signalspaning

Försvarsmakten använder fortfarande signalspaning från marken efter radiovågor för att övervaka främmande makt. Numera återstår endast två fasta signalspaningsstationer på land, på södra Gotland och i södra Skåne. Det finns även möjlighet att sätta ut mobila stationer. Sverige signalspanar även från flygplan och fartyg. Försvaret hävdar att det är för dyrt att i likhet med stormakterna enbart använda sådana metoder.

Eftersom tekniken går ut på att urskilja signaler nära bruströskeln hävdar försvaret att även marginella tillkommande störkällor är kritiska. I första hand är det lägesbestämningen av spaningsobjekten som försvåras, medan möjligheterna att ta del av informationen i signalen inte påverkas. Signalspaningen ger primärt restriktioner för vindkraft till havs. I ett projekt¹⁴⁵ kom man fram till att den nuvarande förbudszonen för var och en av (platserna för) de rörliga signalspaningsstationerna kan minskas från 200 km kuststräcka och 100 km ut från kusten till en tiondel av dessa värden (och därmed en hundradel av ytan) genom att modifiera programvaran, för 1 Mkr. För de två fasta stationerna hävdas fortfarande förbud mot havsbaserade vindkraftverk inom 100 km avstånd.

8.3 Framtida utveckling

Vindkraftverkens möjliga konflikter med flyg, radar, radiolänk och signalspaning utgör ett antal skilda områden där fortsatta forskningsinsatser kan vara ett nödvändigt led för att få till stånd en diskussion som kan leda till en rimligare avvägning mellan intressena.

Hinderbelysning

Praktiska prov behövs för att bestämma en nivå för hinderbelysning som tillgodoser flygtrafikens behov av säkerhet utan att i onödan störa omgivningen inklusive annan flygtrafik och utan att orsaka orimliga kostnader. På sikt kan flyghinderbelysningen till viss del komma att ersättas med exempelvis GPS-teknik.

Radar

En undersökning av utbredningsförhållandena för radar över land, som motsvarar den som genomförts för havsbaserade vindkraftverk, skulle kunna bringa större klarhet i vindkraftverks inverkan på radar under dessa förhållanden. Andra möjliga studieobjekt är vindturbinbladens inverkan på dopplerradar och uppkomsten av skenmål genom reflexer.

Radar i flygplan

Påvisad störning av JAS-radarn i startskedet kan med stor sannolikhet lösas genom en modifiering av inställningsparametrarna eller av programvaran.

¹⁴⁵ Utredning av vindkraftens effekter på militära övervaknings- och kommunikationssystem mm – slutrapport. Försvarsmakten Högkvarteret 2004-02-11, 21863:61798.

Radiolänk

De grundläggande fenomenen är klarlagda men de praktiska konsekvenserna är det inte, trots att problemområdet studerats sedan 1970-talet.

Signalspaning

Genomfört projekt visar att restriktionerna i åtminstone ett fall kunde minskas drastiskt. Generellt är området svåråtkomligt till följd av sekretessen. Ytterst handlar det om värderingen av civila krav mot militära.

9 Vindkraft i kallt klimat

9.1 Resultat från Vindforskprogrammet

Inom Vindforskprogrammet anslogs under perioden 2006/08 2,2 Mkr eller 6 procent av medlen till projekt inom området.

Mätning av isbildning i mast och vindkraftverk

V- 151 Synoptiska mätningar

Projektledare: Patrik Jonsson, Saab Security.

I en mast i Sveg mäts isbildning på fyra nivåer upp till 240 meter höjd. Resultaten jämförs med observationer på maskinhuset i intilliggande vindkraftverk samt med beräkningsresultat. Projektet ingår i EU-projektet Cost 727. Mätsystemet kom igång i februari 2008 och projektet ska rapporteras i december 2008, dvs efter inte fullt ett år. Isbildning har kunnat registreras vid flera tillfällen.

Prov med isindikatorer på vindkraftverk

V-153 Utbredning av is på vindkraftverk efter detektering

Projektledare: Rolf Westerlund, HoloOptics

Ett 600 kW vindkraftverk i Härnösand har utrustats med isindikatorer av optisk typ som utvecklats av företaget HoloOptics, Stockholm. Olika utföranden av indikatorerna provas. De stationära indikatorerna är av två typer vilka dels mäter påsning och dels förekomst av is, utan avisning. På bladen finns dessutom indikatorer för förekomst av is på dessa. Observationerna kan korreleras med effekt från vindkraftverket samt andra meteorologiska data från en mätmast. Utrustningen kom igång i början av 2008 och åtminstone vid ett tillfälle har förloppet av en isbildningsepisod kunnat dokumenteras med samtliga isindikatorer. Projektet ska pågå till december 2008.

Deltagande i IEA Task 19 Cold climate samt förstudie för kartering av isbildning

V-158 IEA Task 19 Cold climate samt förstudie nedisningskartering

Projektledar: Göran Ronsten, Windren AB

Sverige deltar sedan 2008 i samarbetet inom IEA Task 19 Cold climate, vilket bl a syftar till att se över internationella standarder avseende vindkraft i kallt klimat och rekommendera metoder för att fastställa inverkan av isbildning på produktion och laster. Övriga deltagare är USA, Canada, Norge, Finland, Tyskland och Schweiz. Inom projektet ska också genomföras en förstudie för en kartering av isbildning samt en vind-effektutvärdering av ett vindkraftverk i Aapua, Norrbotten.

Teknik som hindrar isbildning genom en kombination av bladytans egenskaper och avisning med mikrovågor

V-238 Ny teknologi för avisning av vingar

Projektledare: Lars Bååth, Sektionen för ekonomi och teknik, Högskolan i Halmstad

Högskolan i Halmstad bedriver en förstudie för att undersöka hur man genom att välja struktur och andra egenskaper hos vingytan samt med hjälp av mikrovågor kan hindra isbildning. Ett problem i sammanhanget är att rent vatten och is absorberar mikrovågor dåligt. Möjliga lösningar är att gå upp i frekvens till millimeter-vågor eller att absorbera mikrovågorna i bladets ytskikt.

Beräkning av laster från havsis på strukturer i havet

V-225 Kustnära fundament islaster

Projektledare: Lennart Fransson, Bygghälsan, Luleå Tekniska Universitet

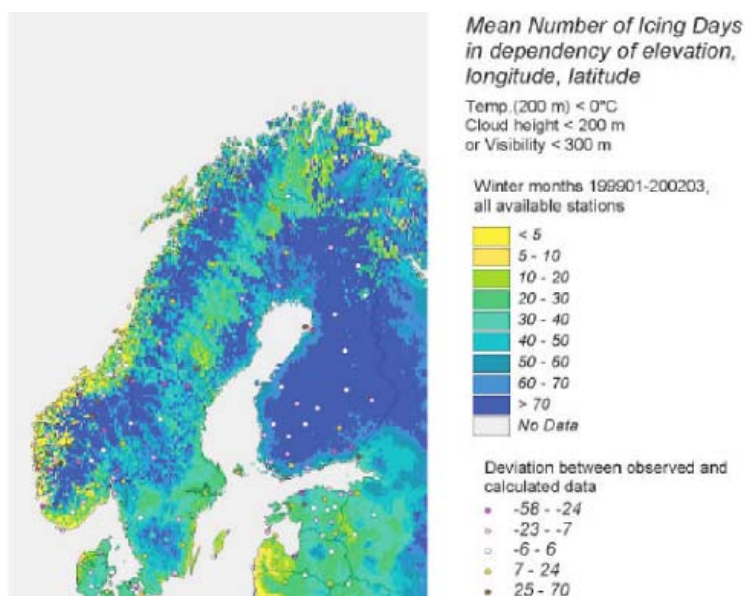
I ett från övriga projekt inom gruppen avvikande doktorandarbete undersöks hur havsis belastar strukturer i havet, exempelvis fundament för havsbaserade vindkraftverk. Data från utsjöfyren Norströmsgrund i Bottenviken har analyserats i relation till kontaktbredd samt tjocklek och temperatur på isen mm. Istryckets beroende av geometri och friktion har studerats med hjälp av numeriska simuleringar och isens tryckhållfasthet har provats vid olika temperaturer. I slutrapporten, som ska föreligga under 2008, kommer att ingå rekommendationer för dimensionering av vanligt förekommande fundament för olika zoner av Östersjön.

Förutom ovanstående projekt ingående i Vindforsks verksamhet stödjer Energimyndigheten utveckling av avisningsteknik hos företaget MW-Innovation, Boden och svenskt deltagande i EU-projektet Cost 727 Atmosfärisk nedisning av strukturer. Myndigheten har dessutom beviljat pilotprojektmedel till Skellefteå krafts utbyggnad av vindkraftverk på lågfjället Uljabuouda samt till utveckling och demonstration av ett avisningssystem som installeras på vardera två vindkraftverk i Aapua och Bliekevare samt på samtliga 30 vindkraftverk i Glötesvålen

9.2 Omvärldsanalys

Läget i stort

Vindkraftverk i kallt klimat och på platser med risk för isbildning på turbinbladen identifierades omkring 1990 som en förhållandevis stor tillämpning i Finland, Sverige och Kanada samt i de höglänta, inre delarna av Europa. Inledningsvis var turbintillverkarnas intresse betydande, men detta har avtagit med tiden. Att utföra verken så att de klarar låga temperaturer är förhållandevis enkelt, i huvudsak genom val av lämpliga stålqualiteter och genom att införa uppvärmning av strategiska komponenter. Detta kan nu de flesta tillverkare erbjuda. Principiellt rimliga lösningar för avisning, i form



Figur 4. Karta över isbildningsrisk enligt kriteriet temperatur under fryspunkten samt molnhöjd under 200 meter eller sikt under 300 meter.¹⁴⁶

elektriskt uppvärmda ytskikt på bladen, kom fram tidigt, men har fortfarande inte utvecklats till kommersiellt tillgängliga lösningar. Detta torde mindre bero på omfattningen av de tekniska problemen än på det stora marknadstrycket för "normala" lokaliseringar. En tillverkare, Enercon, erbjuder redan idag avisning med hjälp av varmluft som cirkuleras i bladen. Det finns även ett alternativ med elektrisk uppvärmning av framkanten. Avisning kan bara ske vid stillestånd och vid lätt påisning. Bortsett från dessa verk finns det alltså idag inte avisning på de vindkraftverk som sätts inom områden med isbildning.

Trots i några fall månadslånga stillestånd på grund av isbildning fortsätter utbyggnaden av vindkraftverk inom områden utsatta för is med accelererande takt. Uppenbarligen uppfattar inte exploitörerna isbildningen som något avgörande hinder. De uttrycker dock ett behov av att kunna bemästra problemen med att framför allt kunna beräkna laster och produktion.

Risk för isbildning och produktionsbortfall i Sverige

Enligt en gängse uppfattning finns det en påtaglig risk för isbildning på master och därmed vindkraftverk i Sverige norr om en linje Karlstad-Gävle. Detta innebär 70 procent av landytan. Trenden att bygga allt större, och därmed högre, vindkraftverk ökar ytterligare risken för isbildning. Senaste tillgänglig kartläggning av isbildningsrisk, i form av resultat från EU-projektet New Icetools, bestyrker i stort den refererade uppfattningen, se Fig. 4. Den har som urvalsgrund temperatur under fryspunkten samt molnhöjd under 200

¹⁴⁶ Dobesch et al, A new map of icing potentials in Europe – problems and results. Boreas VI, Pyhänturi, 2003.

meter eller sikt under 300 meter. Möjligen förvånande är att risk för is skulle föreligga på Sydsvenska höglandet, där kända belägg saknas, men däremot inte i Norrlands inland. Det framgår av figuren att avvikelserna mellan beräknade och observerade data är förhållandevis stora. Enligt senare erfarenheter är isbildning i första hand korrelerad till förekomst av vatten i vätskefas vid temperaturer under 0 grader¹⁴⁷. Moln eller nedsatt sikt beror ofta på fritt svävande vattendroppar men kan också orsakas av iskristaller, vilka således inte ger någon isbildningsrisk. Isbildning kan också ske genom sublimering, alltså direkt utfällning av is från vattenånga, rimfrost. Det är alltså plats för mer forskning och nya sammanställningar.

Någon systematisk kartläggning av produktionsförfallet på grund av isbildning för de åtminstone omkring hundra vindkraftverk som finns inom områden med isbildningsrisk i Sverige har inte gjorts, inte ens inom det speciella projektet för driftuppföljning. I samband med en inventering beträffande erfarenheter av vindkraftverk i skog erhöles även erfarenheter av isbildning för ett trettiotal vindkraftverk i de norra delarna av landet, se kapitel 10. För enstaka installationer, exempelvis Hunnflen vid Äppelbo i Dalarna och Aapua i Norrbotten, finns uppgifter om månadslånga stillestånd när verken varit nedisade. För olika verk i undersökningen uppskattades produktionsförfallet till mellan 4 och 10 procent av årsproduktionen. Det påpekades dock att det var fråga om grova uppskattningar, utan grund i mätningar.

Teknik för avisning

På flygplan används sedan 60-70 år avisning enligt en rad tekniker. Vanligt är uppvärmning såväl elektriskt som med varmluft. Som nämnts tidigare tillämpas dessa uppvärmningstekniker också på vindkraftverk. På flygplan används dessutom gummiblåsor vilka växelvis fylls och töms på luft, för att mekaniskt bryta sönder isen. Rätt omfattande försök med denna teknik har även gjorts för vindkraftverk, dock utan att tekniken kommit till användning, förmodligen på grund av stort underhållsbehov. Användning av material med ytegenskaper som hindrar att isen fastnar skulle vara attraktivt både på flygplan och vindkraftverk, men kan också hindras av att ytorna regelbundet måste förnyas

Användning av mikrovågor för avisning begränsas av att rent vatten eller is inte absorberar mikrovågor speciellt väl.

Tekniken med elektriska motståndselement i bladen betraktas alltså allmänt som den mest lovande. När avisning tidigare har erbjudits som en modifiering av redan tillverkade turbinblad har kostnaden blivit mycket hög, ungefär som bladkostnaden. I ett projekt direkt stött av Energimyndigheten arbetar företaget MW-Innovation, Boden, på en teknik för avisning med grafitbaserade motståndselement som man räknar med att kunna erbjuda både för inläggning i bladen i samband med tillverkningen och som modifiering i form av mattor som läggs på bladytan. F n pågår erosionsförsök på ett vindkraftverk vid Näsudden, utan avisning inkopplad.

¹⁴⁷ Dobesch H, Nikolov D, Makkonen L, Physical processes, modelling and measuring of icing effects in Europe, Oesterr. Beitr. zu Meteorologie und Geophysik, No 34, 2005.

Man skiljer mellan system för "anti-icing" och för "de-icing", varvid man i det förra fallet vill förhindra att is uppkommer och i det senare fallet avlägsnar den is som byggts upp. På grund av den effektiva värmeavgivningen från ett turbinblad under drift blir effektbehovet i det förra fallet betydligt större än i det senare. I bägge fallen påverkas dimensionering och effektbehov av vilka krav man ställer på systemet – ska man klara 90 eller 99procent av fallen? Hur mycket stilleståndstid vill man undvika? Möjligheten att göra dessa överväganden begränsas av att man idag vet föga om vad dagens redan byggda vindkraftverk utsätts för.

De vindkraftverk som sätts upp numera är utan undantag bladvinkelreglerade, vilket är en fördel även vid avisning, eftersom den stora flexibiliteten hos dessa blad hjälper till att bryta sönder och avlägsna isen. Vid avisning genom elektrisk uppvärmning uppges elåtgången i de flesta fall till högst några procent av verkens totala produktion.¹⁴⁸ I de refererade fallen var det frågan om verk med stallreglering, vilkas styva blad är svårare att avvisa än de bladvinkelreglerade verkens mer flexibla blad.

Indikering av isbildningsrisk

Om man har en vindturbin som är utrustad med avisning återstår problemet att veta när denna ska kopplas till. Sådana isindikatorer som sedan lång tid används på flygplan har sällan fungerat bra på vindkraftverk. Nyare typer är under utveckling, bl a med stöd från Vindforsk. Emellertid visar det sig att i praktiken fungerar även mycket enkla metoder väl. En sådan metod är att sätta turbinens effekt i relation till vindhastigheten. Om denna relation avviker från den normala, och temperaturen ligger inom ett område där isbildning kan förekomma, kan man pröva att genomföra en avisningscykel. En annan metod baseras på att isen i praktiken aldrig avsätter sig lika på de tre bladen och därför kommer att ge sig till känna genom variationer i eleffekt eller krafter på konstruktionen med frekvensen 1P, dvs ett per turbinvarv. Den enklaste indikeringen blir då att observera eleffektens variationer.

Draghjälp från omvärlden?

Kraftföretaget Hydro-Quebec genomför för närvarande en omfattande upphandling av 2 000 MW vindkraft i kallt klimat i Canada. Man skulle härvid kunna vänta sig att företaget utnyttjar tillfället till att ställa krav på exempelvis avisningssystem. Så förefaller emellertid inte bli fallet. En bidragande orsak är att isbildning inte är något problem vid de låga temperaturer (-30° C) som är dimensionerande för belastningen i elsystemet i området.¹⁴⁹

European Wind Energy Technology Platform

European Wind Energy Technology Platform nämner "cold climate" som ett exempel på en mer utmanande resurs som kommer i fråga när utbyggnaden ökar. Ingen verksamhet förelås.

¹⁴⁸ Göran Ronsten. Svenska erfarenheter av vindkraft i kallt klimat – nedisning, iskast och avisning. Elforsk rapport 04:13.

¹⁴⁹ E-post från Sören Krohn, konsult till Hydro-Quebec, till Göran Ronsten, 2008-05-08.

Betydelsen av Vindforsks projekt

Inget av projekten inom området har ännu rapporterats, varför det inte går att värdera resultaten. De ekonomiska insatserna är små även i relation till Vindforsks övriga projekt. Till följd av att avisning fortfarande betraktas som en rätt liten nischmarknad, och att aktörer i andra berörda länder inte ställer krav, kan Vindforsks pågående och fortsatta insatser få en i sammanhanget strategisk betydelse.

Det enda projektet inom området havsbaserad vindkraft kan sannolikt få betydelse för att skapa kriterier för dimensionering av fundament utsatta för havsis.

9.3 Framtida utveckling

För Sveriges del gäller att stora delar av landet är utsatta för isbildningsrisk under vinterhalvåret. Detta faktum i kombination med att de ledande vindturbinleverantörerna hittills varit påtagligt ointresserade av att tillhandahålla kraftverk med praktiskt fungerande avisning motiverar att fortsatta resurser ägnas åt området.

Driftserfarenheter

Insamling av erfarenheter från de omkring hundra vindkraftverken inom områden utsatta för isbildning. Målet är att klargöra hur mycket produktion som tappas till följd av isbildning av olika svårighetsgrad, för att därigenom kunna fastställa kraven för avisning inklusive indikering. Projektet kan läggas upp med en mer intensiv bevakning av ett mindre antal verk och en mer översiktlig av de övriga. På de förra kan särskild utrustning för indikering och övervakning behöva installeras. Projektet bör samordnas med den fortsatta driftsuppföljningen, se avsnittet Drift och underhåll.

Teknik för avisning

Fortsatt utveckling av teknik för avisning.

Teknikupphandling av vindkraftverk med avisning

Teknikupphandling av kompletta vindkraftverk med avisning enligt kravspecifikation. Eventuellt stöd ska avse merkostnaden.

Indikering av isbildning

Teknik för indikering av isbildning i mast på sätt som är relevant för isbildning på vindkraftverk. Avsikt att denna teknik ska kunna tillämpas i samband med vindmätningar i mast.

Mekanismer för isbildning samt laster

Mekanismer för uppkomst av is på vindturbinblad samt hur isen påverkar lasterna på konstruktionen, gärna genom deltagande i internationella projekt.

Kartering

Översiktlig kartläggning av förekomst av isbildning på vindkraftverk på aktuella höjder i Sverige.

10 Vindkraft i skog

10.1 Resultat från Vindforskprogrammet

Forskning inom detta område har inte legat i Vindforsk IIs ambitioner och inga projekt har därför ägt rum inom området.

10.2 Omvärldsanalys

Energimyndighetens inventering av erfarenheter

Intresset för att placera vindkraftverk i skogsmark har ökat påtagligt i Sverige och även i angränsande länder. En orsak är att senaste svenska vindkartering visar på goda vindresurser även inom skogbeklädda områden, förutsatt att man väljer vindkraftverk och torn som når tillräckligt högt. Därigenom kan man uppnå stora sammanhängande vindkraftsutbyggnader som samtidigt är förhållandevis okontroversiella tillståndsmässigt. Med hänsyn till produktion och laster på vindkraftverken är dock projekten delvis kontroversiella, huvudsakligen grundat på att verifierade erfarenheter saknas. Energimyndigheten genomförde därför under 2008 en inventering av kända erfarenheter av vindkraft i skog i Sverige.¹⁵⁰ Följande material är hämtat ur denna, vilken upptar kända erfarenheter från ett sextiototal vindkraftverk i Sverige och därtill några utländska exempel. Några av "skogsverken" står i öppen mark men är påverkade av skog i omgivningen. De allra flesta står dock i renodlade skogsområden, oftast på kullar och andra höjdsträckningar.

Exempel på utbyggnader

I de svenska exemplen överensstämmer *nummer* och *läge* med motsvarande i Elforsks driftuppföljning. *Verklig/beräknad* anger förhållandet mellan produktion de senaste tolv månaderna (t o m mars 2008) dividerad med förhandsberäknad produktion samt med korrigering för vindindex (1,15) och tillgänglighet, bägge för senaste tolv månaderna. *kWh/kW* har samma korrigering.

¹⁵⁰ Kring vindar och vindkraft i skog. Kunskapsinventering. Energimyndigheten ER 2008:21

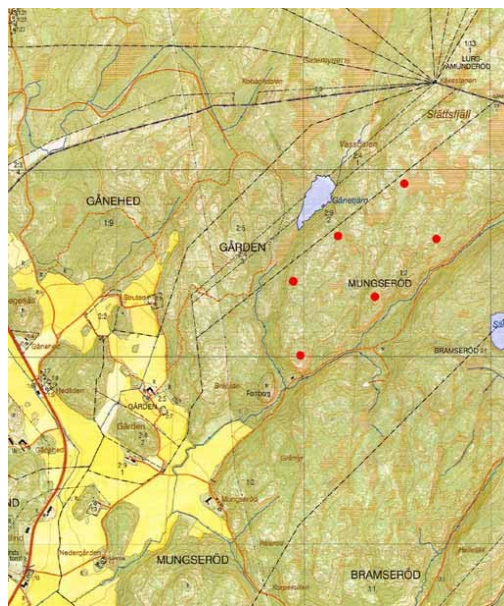
Mungseröd, Tanum, Västra Götalands län

Foto Eolus Vind

På en skogklädd bergsplatå i Tanums kommun, ca 75 m över omgivande terräng. Innehavare/representant Bengt Sernestrand. Projektör Eolus.

Nr	Läge	Typ	Effekt, kW	Rotordiam, m	Navhöjd, m
830-835	A9f	NEG Micon	1500	72	67

I drift	Beräkn, MWh	12 mån, MWh	Tillgängl.12 mån, procent	Verklig/Beräkn, procent	kWh/kW
Jan-06	2 800	3 237	100	101	1 877
Jan-06	2 800	3 114	100	97	1 805
Jan-06	2 800	3 145	100	98	1 823
Jan-06	2 800	2 767	100	86	1 604
Jan-06	2 800	3 278	100	102	1 900
Jan-06	2 800	3 092	100	96	1 792
Medel				96	1 800

Hunnflen, Äppelbo, Dalarnas län

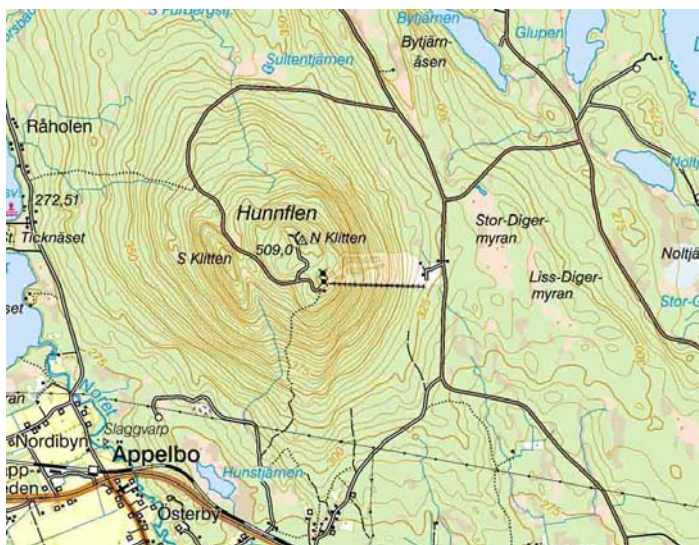


Foto Vindkompaniet



På markerad skogklädd bergkulle 509 m ö h, 200-250 m över omgivande terräng. Första vindvärdering grundad på mätning i 20 m mast olämpligt nära skogsbryn, vilket gav angiven beräknad produktion 1600 MWh. De två nyare verken bedömdes 1850 MWh per år med ledning av tidigare produktion samt vindmätningar vid Borlänge flygplats och lufttrycksdata från NCAR .

Anläggningen har varit utsatt för en betydande nedisning vid flera tillfällen, varav de värsta gav driftstopp i en respektive två månader. Verken saknar avisning. Produktionsbortfallet är svårt att kvantifiera men uppskattas till minst 5 procent. Innehavare/representant Äppelbovind ek för m fl. Projektör Vindkompaniet.

Nr	Läge	Typ	Effekt, kW	Rotordiam, m	Navhöjd, m
482	E13a	NEG Micon	900	52	49
800, 801	E13a	Vestas	850	52	65

I drift	Beräkn, MWh	12 mån, MWh	Tillgängl.12mån, procent	Verklig/Beräkn, procent	kWh/kW
Dec-00	1 600	2 365	99	130	2 308
Apr-05	1 800	2 443	98	120	2 550
Maj-05	1 800	2 071	94	106	2 254
Medel			97	119	2 371

Råshön, Offerdal, Jämtlands län

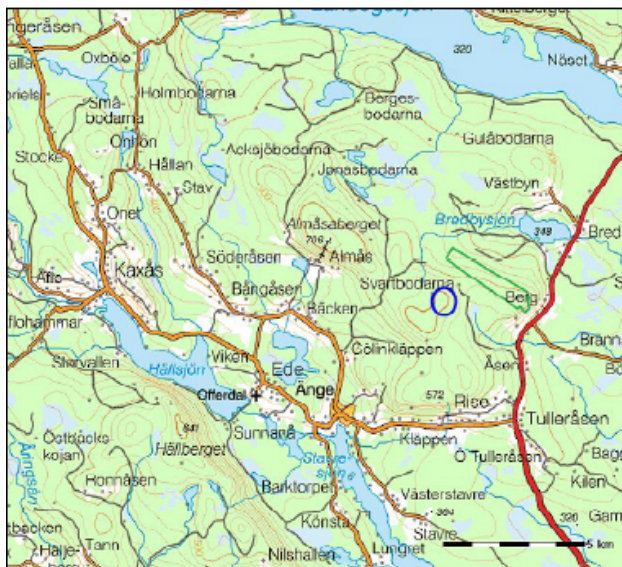


Foto Vindkompaniet.

På skogsklädd höjdrygg 3,5 km nordost om Änge samhälle i Krokoms kommun. Verken är byggda på omkring 700 m ö h och 300 till 400 m över omkringliggande terräng. Tillgänglighetsrapporteringen uppenbart felaktig för 782, varför denna inte räknas med i medelvärdesbildningen. Kraftigt utsatt för isbildning, bortfall uppskattas till 5–10 procent. Innehavare/representant Offerdals Ek. För., Skara Vindkraft m fl. Projektör Vindkompaniet.

Nr	Läge	Typ	Effekt, kW	Rotordiam, m	Navhöjd, m
777- 783	E12b	Vestas	2000	90	80

I drift	Beräkn, MWh	12 mån, MWh	Tillgängl. 12 mån, procent	Verklig/Beräkn, procent	kWh /kW
dec-04	4 031	4 178	100	90	2 422
dec-04	4 319	4 725	100	95	2 739
dec-04	3 613	4 180	100	101	2 423
dec-04	4 023	4 114	100	89	2 385
dec-04	4 032	4 115	100	89	2 386
dec-04	4 054	1 170	100	25	678
dec-04	3 955	4 356	100	96	2 525
Medel	(ej 782)		100	93	2 480

Aapua, Norrbottens län

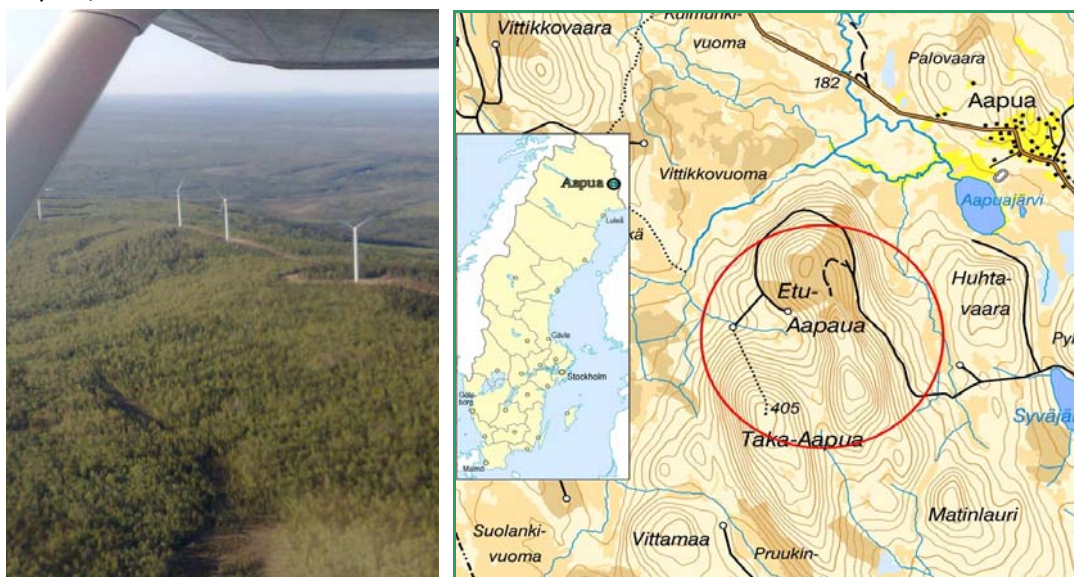


Foto Göran Ronsten

Etu-Aapua är en höjdrygg väster om byn Aapua i Övertorneå kommun. Vindkraftsanläggningen ligger på 350–400 m ö h och omkring 300 m över terrängen. Mätningar inleddes år 2000 med en 10 m mätmast som 2001 ersattes med 30 m mast. Vindberäkningar gjordes av EMD, Danmark. Kraftigt utsatt för nedisning, bortfall uppskattas till ca 10 procent. Innehavare/representant Sveriges Vindkraftkooperativ m fl. Projektör Vindkompaniet.

Nr	Läge	Typ	Effekt, kW	Rotordiam, m	Navhöjd m
809-815	M27i	Vestas	1500	82	78

I drift	Beräkn, MWh	12 mån, MWh	Tillgängl.12 mån, procent	Verklig/Beräkn, procent	kWh/kW
okt-05	4 465	5 061	96	103	3 056
sep-05	4 232	4 558	93	101	2 841
sep-05	4 140	4 339	95	96	2 648
sep-05	4 344	4 669	94	99	2 879
sep-05	4 397	4 490	86	103	3 027
sep-05	4 500	4 678	95	95	2 855
sep-05	4 613	4 990	97	97	2 982
Medel			94	98	2 898

Nordschwarzwald, Tyskland

Foto wat/MFG

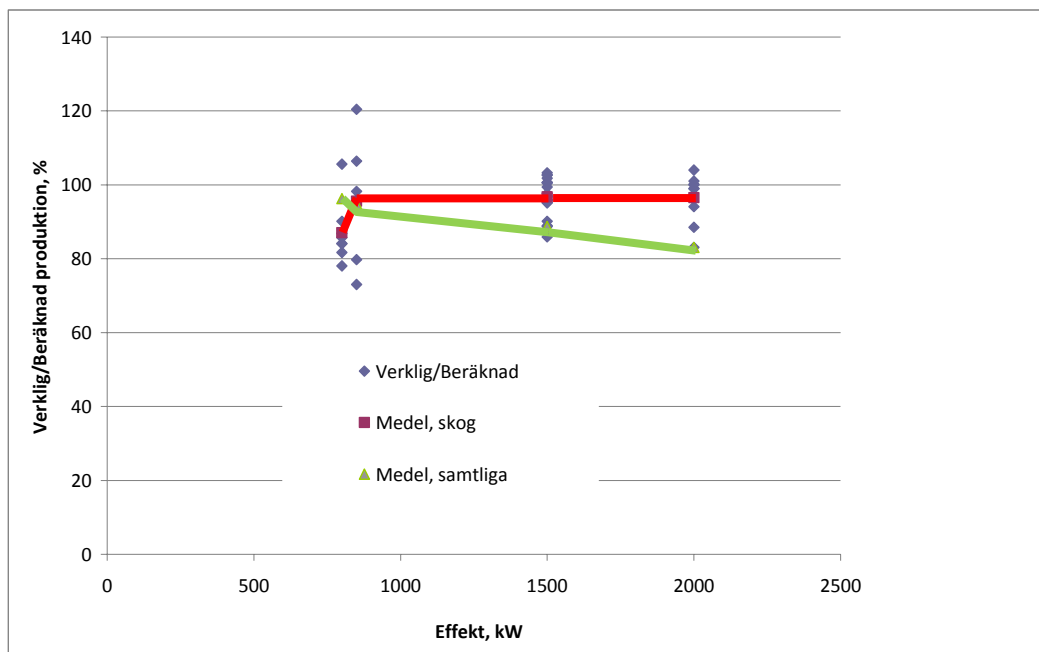
Drygt 40 km VSV Stuttgart i norra Schwarzwald mellan Pforzheim i nordost och Freudenstadt i syd. Platsen är belägen mellan 805 och 855 m ö h och 470 km från kusten.

Plats	Nordschwarzwald
Verktyp	10 st Vestas V90 (2000 kW) samt 4 st Vestas V80 (2000 kW)
Rotor / tornhöjd	90 m / 125 m 80 m / 100 m
Installerad effekt	28 MW
Beräknad produktion	61 GWh/år
Beräknad kWh/kW	2 179 kWh/kW
Driftstart	Juli/Augusti 2007

Ingen uppgift om faktisk produktion för dessa och övriga omkring 70 andra tyska vindkraftverk i skog, vilka tas upp i rapporten. Inte heller kunde produktionsdata för 25 brittiska vindkraftverk erhållas, däremot för tre finska verk, där det dock saknades förberäknad produktion. I inget av fallen var det alltså möjligt att utröna i vilken utsträckning som investerarnas förhoppningar infriades.

Produktion för svenska verk i skog

I rapporten systematiserades resultaten så att förhållandet mellan verklig och beräknad elproduktion samt utnyttjningstid jämfördes med olika parametrar som vindkraftverkets storlek, idrifttagningsår och navhöjd. De sextio verken i skog jämfördes även med motsvarande data för samtliga vindkraftverk i Sverige vid tidpunkten, omkring 800 stycken.



Figur 5. Förhållandet mellan verklig och beräknad elproduktion som funktion av verksstorleken (effekten) i kilowatt. Diagrammet tar upp värden för enskilda vindkraftverk i skog och medelvärden för dessa samt som jämförelse medelvärden för samtliga vindkraftverk i landet av angiven storlek. För skogsverken gäller tidsperioden april 2007-mars 2008, med korrigering för tillgänglighet och vindindex (1,15). För samtliga-kategorin är tidsperioden kalenderåret 2007, med korrigering för vindindex (1,10). Endast storlekar som finns i minst fem exemplar har tagits med. Grunddata från Elforsks Driftuppföljning.

I Fig. 5 visas förhållandet mellan verklig och beräknad elproduktion som funktion av verkets storlek mätt som dess generatoreffekt, för såväl verk i skog som samtliga vindkraftverk. Det kan noteras att värdena för de enskilda vindkraftverken i skog visar en ganska stor spridning, mellan ca 75 och 120 procent. Medelvärdena för respektive storleksklass visar ett mer samlat utfall, mellan 80 och 100 procent. Det är påtagligt att bortsett från den minsta behandlade storleksklassen är utfallet mycket jämnt och nära 100 procent för skogsprojekten, till skillnad från samtliga projekt. En förklaring kan vara att projekten i skogsterräng oftast är stora och därför kunnat genomgå en ambitiös projektering med avseende på exempelvis vindmätningar. Utfallet utgör också en effektiv argumentation mot påståendet att det inte skulle vara möjligt att beräkna utfallet i denna terrängtyp.

Reservation kan göras för att resultaten på olika sätt inte skulle vara representativa. Emellertid finns det ingen anledning att tro att dessa möjliga felkällor skulle inverka på ett selektivt sätt på verk som lokaliseras i skogsmark i jämförelse med verk som står i öppen terräng. Därför bör jämförelserna kunna försvaras.

Som en sammanfattande slutsats konstateras att det i materialet finns en tendens till att produktionsförutsägelserna för verk i skog är säkrare än för samtliga verk i landet och att de dessutom producerar lika bra som övriga. I de enskilda fallen är det en fråga om hur ambitiösa projektörerna har varit i sitt arbete, där det för de skogslokaliserade projekten gäller man till följd av deras storlek kunnat lägga ned större resurser på projekteringen.

Lastsituation, IEC-standard

Gällande internationell standard för vindkraftverk, IEC 614 00, är skriven för placeringar i öppen terräng. Över skog avviker normalt vindgradienten och ofta även turbulensintensiteten från vad som specificeras i standarden. Det enkla konstaterandet är därför att standarden, inklusive beräkningar av livslängd och vind-effekt-kurvor mm, inte gäller för skogsplacerade verk. Å andra sidan är de hittillsvarande erfarenheter när det gäller både produktion och livslängd generellt goda. Det finns exempel på vindkraftverk i skog som varit i drift i fem år eller mer. Ur utmattningssynpunkt är skillnaden i dimensionering för att klara fem år och 20 år marginell - ungefär samma verk som klarar fem år klarar också 20 år. Uppenbarligen behöver kunskapsläget förbättras så att man kan förklara varför det går bra, så att man i ett annat läge kan förutse när det inte kommer att gå bra. Ett sådant arbete kan på sikt resultera i en standard som täcker tillämpningen i skog.

European Wind Energy Technology Platform

European Wind Energy Technology Platform tar upp vindkraft i skog i avsnittet om vindförhållanden där man förordar arbete i anslutning till ett nytt stort mätförsök, "Askervein II".

10.3 Framtida utveckling

Vindkraftverk i skogsmark är en tillämpning som blivit möjlig under de senaste åren som en följd av den senaste vindkarteringen och av att stora vindkraftverk blivit tillgängliga på marknaden. Även om driftserfarenheterna hittills varit goda motiverar de höga nivåerna av turbulens och vindgradient att särskilda mät- och utvärderingsprogram genomförs. En möjlig följd är att en standard för vindkraftverk i skog utarbetas.

Vindar och vakeffekter i skog behandlas även i meteorologiavsnittet.

Mätning och utvärdering vid stort vindkraftverk

De grundläggande behoven för att öka kunskaperna om samspelet mellan vindkraftverk och vindar i skog kan täckas genom att mäta och utvärdera i anslutning till ett vindkraftverk av representativ storlek och utförande. Verket

bör ha storleken 2-3 MW och vara bladvinkelreglerat. I närheten bör det finnas minst en mätmast samt kompletterande utrustning för fjärranalys (sodar, lidar). Verket självt förses med mätgivare (trådtöjningsgivare, accelerometrar etc) samt insamlingsutrustning. För att lastmätningarna ska bli meningsfulla måste man ha full tillgång till verkets konstruktion, så att man genom simuleringar kan efterlikna och verifiera driftssituationer och mätresultat. Detta förutsätter att aggregatleverantören är införstådd med ett sådant samarbete, som alla parter vinner på, samtidigt som det inte avslöjar några större hemligheter – hur vindkraftverk generellt konstrueras tillhör idag allmännytt.

Vattenfall har idag ett projekt under utbyggnad i Småland som skulle lämpa sig för den föreslagna verksamheten. Det finns även andra möjliga samarbetsprojekt.

11 Konstruktion av vindkraftverk

11.1 Resultat från Vindforskprogrammet

Inom Vindforskprogrammet anslogs under perioden 2006/08 5,3 Mkr eller 15 procent av medlen till projekt inom området.

Optimering och styrning av vindkraftstation

V-123 Design tool optimization of wind farm topology and operation – Topfarm

Projektledare: Ingemar Carlén, Teknikgruppen AB

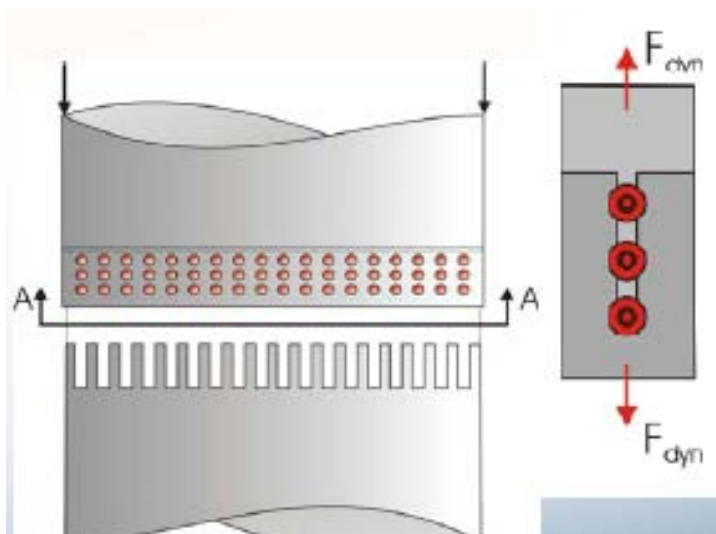
Detta EU-projekt delfinansieras av Elforsk och drivs av nio europeiska forskningsinstitutioner och företag vilka under två år ska utveckla metoder och beräkningsverktyg för att öka produktionen i grupper av vindkraftverk och samtidigt minska utmattningslasterna på vitala komponenter. Den svenska delen ska resultera i en ny generation mjukvara för att simulera turbulens inom vindkraftstationer samt reglerrutiner för generatorer, girdrifter och bladvinkelreglering.

Metod för skarvning av stålskaltorn

V-223 Höghållfasta ståltorn

Projektledare: Milan Veljkovic, Byggkonstruktion, Luleå Tekniska Universitet

Den konventionella metoden för att foga samman tornsektioner till vindkraftverk är med skruvförband mellan flänsar, vilka svetsats till sektionernas bågge ändar. Denna metod medför stora kostnader dels därför att flänsarna är dyra att tillverka, dels därför att areaförändringar och svetsar innebär extra anvisningar för utmattning, vilket leder till att man måste använda tjockare tornplåt än som annars skulle varit nödvändigt. Sammanfogning av tornsektionerna med överlappande skruvförband är en mer optimal lösning, men har fått begränsad tillämpning därför att det är svårt att komma åt tornet från utsidan under montaget. Den föreslagna metoden innebär att tungor skärs upp på i den nedre/inre tornsektionen och att övre/yttre tornsektionen alltså kan sättas på plats trots förmonterade



Figur 6. Principiellt utförande av tornskarv enligt Veljkovic.¹⁵¹

Skrivar, se Fig. 6. Inom projektet, som bedrivs i EU-samarbete och slutförs under 2008, utmattningsprovas sådana skarvar. I projektet ingår även certifieringsorganet Germanischer Lloyd, vilket ska klargöra möjligheterna att praktiskt använda skarvmetoden.

Beräkning av vakar med CFD-modell

V-219 Numeriska beräkningar vakar

Projektledare: Dan Henningson, KTH

Projektet ingår i ett doktorandarbete och syftar till att genom numeriska beräkningar i en CFD-modell (computational fluid dynamics) uppnå en beskrivning av vaken och dess successiva utfyllnad. Modellen ska kunna behandla upp till nio vindturbiner samtidigt. Arbetet har hittills resulterat i ett antal delrapporter¹⁵² ¹⁵³ och beräknas bli klart under året. Se även meteorologi-avsnittet där forskningsläget för bl a vakar beskrivs.

Deltagande i internationellt standardiseringsarbete

V-103 Standardisering

Projektledare: Jan Blix, Vattenfall AB

Den tekniska kommittén TK88 arbetar med standarder inom vindkraftsområdet i samarbete med motsvarande internationella organ IEC och Cenelec. IEC har givit ut ett antal standarder i serien 614 00.

¹⁵¹ Milan Veljkovic. Höghållfasta torn. Presentation vid Vindforsk-konferens, Stockholm, 2008-05-15.

¹⁵² Stefan Ivanell et al. Stability analysis of the tip vortices of a wind turbine. American Institute of Aeronautics and Astronautics.

¹⁵³ Stefan Ivanell et al. Three dimensional actuator disc modelling of wind farm wake interaction.

En arbetsgrupp ägnar sig åt säkerhetsfrågor avseende främst dimensionering. Under en vindturbin livslängd utsätts strukturen för ett stort antal belastningsväxlingar. För att uppnå en säker drift krävs en god beskrivning av vinden och lasterna. Ett tillägg till grunddokumentet och en genomarbetad version av ett dokument för vindkraftverk till havs väntas bli publicerade till årsskiftet 2008/09.

Möjligheten att uppföra vindkraftverk nära bebyggelse begränsas av kraven på låga ljudnivåer. Akustikstandarden reglerar hur man ska mäta och tolka resultat från mätningar av ljud från vindkraftverk. IEC-arbetsgruppen räknar med att publicera en ny version av dokumentet i slutet på år 2008.

Flera grupper arbetar med standarder för att mäta prestanda (uteffekt som funktion av vinden) både för enskilda turbiner och för grupper av turbiner. Här föreskrivs vilka metoder som är användbara och hur mätdata ska behandlas.

Standarden rörande elkvalitetsfrågor blir allt viktigare i och med att mängden vindkraft i elnätet ökar. Vindkraftverk ansluts ofta långt ut i elnätet, där ledningarna är klent dimensionerade, vilket ställer speciella krav. Under året har en revidering av standarden färdigställts. En viktig fråga i den nya standarden har varit att specificera kraven för att både enskilda vindkraftverk och grupper ska kunna klara av korta störningar på nätet utan att kopplas bort (fault ride-through).

Huvuddelen av en kommunikationsstandard för övervakning och styrning av vindkraftverk färdigställs under 2008. Det internationella arbetet under fem år har letts av Anders Johnsson, Vattenfall Research & Development AB. Standarden ska underlätta kommunikation med turbiner av olika fabrikat och typer. Detta är framför allt av värde för större vindkraftsägare. Publicering av av den återstående condition monitoring-delen sker 2009.

En ny arbetsgrupp behandlar definitionen av begreppet "availability", tillgänglighet. Arbetet ska vara färdigt i november 2010.

11.2 Omvärldsanalys

Omfattningen av forskning och utveckling inom vindkraftsområdet i världen är idag mycket stor. En ökande del av verksamheten sker hos de tillverkande företagen, utan offentlig publicering av resultaten. Detta gäller även en stor del av EU-projekten. Tidigare har Sverige haft en heltäckande forskning inom vindkraftsområdet, men i takt med att försöken att etablera tillverkning av vindkraftverk tynat bort har denna alltmer försvunnit. Fortfarande är dock tekniken långt ifrån mogen och innebär alltså rikliga tillfällen till forskning och utveckling som kan påverka utförandet hos de framtida vindkraftverken.

European Wind Energy Technology Platform

European Wind Energy Technology Platform (2008) ägnar en stor del av utrymmet åt konstruktionsområdet. Forskning föreslås inom följande områden:

- Grundläggande förståelse av vindturbinen som strömningsmaskin.

- Metoder för lastberäkning.
- Nya material.
- Optimerade konstruktioner .
- Verifiering.
- Tillförlitlighet hos komponenter som drivsystem (kuggväxlar), blad och torn.
- Förbättringar av elektriska högspänningskomponenter för ökad verkningsgrad och lägre kostnad.
- Vidareutveckling av elektriska omriktare för bl a högre verkningsgrad.
- Utveckling av nya, lätta direktdrivna generatorer med litet underhållsbehov.
- Reglersystem som ökar uteffekten och produktionen samt minskar lasterna.
- Kontrollalgoritmer som säkrar den aeroelastiska stabiliteten hos vindkraftverken.
- Sensorer, exempelvis lidar, för att kunna mäta vinden innan den träffar turbinen.
- System för reglering och underhåll baserade på tillståndskontroll.
- Innovativa vindturbiner och komponenter.
- Integrerade konstruktionsmetoder.
- Fortsatt utveckling av standarder för vindkraftverk, vilka utnyttjar möjligheterna till teknisk utveckling samtidigt som förtroendet för säkerhet och prestanda bevaras.

Betydelsen av Vindforsks projekt

I ett internationellt perspektiv är den svenska verksamheten på området mycket begränsad, vilket är förklarligt med hänsyn till den nuvarande avsaknaden av en egen vindturbintillverkning.

11.3 Framtida utveckling

Med undantag för standardiseringsområdet är fortsatta svenska insatser i stor utsträckning kopplade till i vilken utsträckning mer omfattande tillverkning av vindkraftverk och komponenter för dessa kommer till stånd i landet.

Standardisering

Ett självklart område för fortsatt svensk medverkan är det internationella standardiseringsarbetet. Skäl för detta är såväl möjligheterna till inflytande på arbetet och valet av områden (exempel skog och kallt klimat, vilka hittills saknats) som den tidiga information om resultaten som ett eget deltagande ger.

Övriga områden

Eftersom en fortsatt verksamhet inom konstruktionsområdet av resursskäl knappast kan bli heltäckande är den rimliga lösningen att inriktningen också i fortsättningen blir ad hoc-betonad, där sådan verksamhet stöds som det finns kompetens och intresse för i Sverige, särskilt i sådana fall där det krävs en kompletterande finansiering till projekt som delfinansieras av EU. För det fall att en egen utveckling av vindkraftverk tar fart i landet kan det därutöver finnas skäl att stödja forskning som innebär ett strategiskt stöd för denna.

12 Elsystem för vindkrafts- anläggningar

12.1 Resultat från Vindforskprogrammet

Inom Vindforskprogrammet anslogs under perioden 2006/08 10,9 Mkr eller 28 procent av medlen till projekt inom området.

Högfrekventa transienter i vindparker

*V-220 Analys av högfrekventa elektriska svängningar i parker Torbjörn
Projektledare: Thiringer, institution För Energi och Miljö, Chalmers*

V-110 Analys av transienter i kabelsystem

Projektledare: Ambra Sannino, ABB Corporate Research

V-108 Design av elsystem för havsbaserade vindkraftparker¹⁵⁴

Projektledare: Michael Lindgren, Vattenfall Power Consultant

Med ett enda undantag (7 MW-anläggningen Tjäreborg i Danmark) är dagens vindkraftstationer anslutna till traditionella växelströmssystem med fast frekvens 50 eller 60 Hz. Det är således samma frekvens utanför och inom parken. Flera av de havsbaserade stationerna, exempelvis Middelgrunden och Horns Rev, har drabbats av haverier i transformatorer och generatorer. Orsakerna är inte helt kända, åtminstone inte publikt. En angiven förklaring är dock att högfrekventa oscillationer orsakat haverierna. De numera vanliga vakuumbrytarna orsakar en mängd högfrekventa transienter vid tillslag och frånslag, genom att de återleder kortvarigt. Det vidsträckta kabelnätet inom en havsbaserad vindpark kan omfatta tiotals kilometer och skapar förutsättningar för att transienterna ska fortplanta sig. När turbinerna träffas av dessa skadas lindningarna i transformatorer och generatorer. Vakuumbrytarna införs därför att det är ett miljövänligt alternativ som klarar sig utan alltför mycket underhåll. Detta är temat för de tre vindforsksprojekten, vilka bedrivits i nära samarbete.

Arbetet innebar att de olika komponenterna modellerades och infördes i ett simuleringsprogram. Verifierande mätningar utfördes vid ABB Corporate research där en del av en vindparksradial byggts upp. En radial är en ledning som ansluter vindkraftverken till transformatorplattformen. Uppkopplingen bestod i detta fall av 600 m havskabel, en vindkraftstransformator, vakuumbrytare samt ett högpresterande datainsamlingssystem.

¹⁵⁴ Michael Lindgren, David Söderberg, Anton Dahlgren. Design av elsystem för havsbaserade vindkraftparker. Elforsk rapport 08:14, februari 2008.



Figur 7. Fasspänning vid första och sista verk i en radial vid tillslag av en vakuumbrytare vid simulering av Kriegers flak.

Inom ett av projekten (V108) studerades olika alternativ för utformningen av elsystemet för en riktigt stor havsbaserad vindkraftstation, 640 MW på Kriegers flak söder om Trelleborg. Här förloras en halv procent av effekten i det lokala uppsamlingsnätet och drygt en procent i exportkabeln in till land. De transienta simuleringarna visar att vid tillslag av en brytare kommer den momentana spänningen pendla mellan noll och dubbla nominella värdet 30 kV innan den stabiliserar sig vid, se Fig. 7. Detta innebär att ingående komponenter utsätts för häftiga laster.

Tillförlitlighet i uppsamlingselnätet

V-118 Tillförlitlighetsanalys av elsystemet inom en havsbaserad vindkraftpark med AC subtransmission

Projektledare: Bengt Frankén, STRI

Inom projektet har en metod för tillförlitlighetsberäkningar tagits fram. Den kan användas vid beslut om sjökabelsystem för vindkraftsparker till havs. Metoden tar hänsyn till aktuell kabelkonfiguration och utnyttjar data för ingående komponenter som felfrekvens, reparationstid och omkopplingstid.

Metoden består av tre huvuddelar:

I första delen beräknas energibortfallet på grund av fel för en baskonfiguration. Det är lämpligt att utgå från en konfiguration som saknar redundans.

I del två införs redundans i systemet. Valet av redundans baseras på de bidrag som varje ingående komponent ger till bortfallet. Skillnaden mellan den icke levererade energin i baskonfigurationen och i den nya är den extra energi som kan levereras.

Tredje delen är en ekonomisk utvärdering där den extra levererbara energin omräknas till en ökning av intäkten.

Erfarenheterna från fallstudierna kan summeras enligt följande:

Det största bortfallet beror på den långa reparationstiden för komponenter placerade ute till havs. Två nivåer av redundans kan urskiljas beroende på vilken typ av ställverk som används. Fjärrmanövrerade lastfrånskiljare i kombination med fjärrindikering av felande kabelsegment resulterar i återuppbyggnadstider från några minuter upp till en timme. Ytterligare förbättring skulle kunna åstadkommas genom att använda fulleffektsbrytare, som tillsammans med lämplig reläskyddsutrustning reducerar antalet avbrott. Den extra vinsten är dock begränsad eftersom kostnaden är hög och måste inkludera att ställverket ska tåla den högre felströmmen.

Verifikation av ride-through-funktion för nätstörning

V-144 Modellering av mätning på DFIG med Ride-thru-utrustning

Projektledare: Torbjörn Thiringer, Institutionen för Energi och Miljö, Chalmers

Till följd av att vindkraften nu börjar bli en betydande elproduktionskälla införs kravet att vindkraftverken i likhet med andra kraftverk ska tåla olika typer av nätstörningar utan att falla ifrån. Dubbelmatade asynkrongeneratorer (DFIG, doubly-fed induction generator) är idag vanligast i vindkraftverk, därför att kostnaden är låg, verkningsgraden hög och att de framför allt har en lämplig dynamik. En nackdel är att de inte i sin grundform klarar felfall med underspänning, eftersom det leder till större rotorströmmar än vad omriktaren dimensioneras för. Det går dock att komplettera elutrustningen så att den klarar ett sådant felfall. Ett vindkraftverk med ride-through-funktion samt särskild mätutrustning har installerats i Tvååker i Halland. Kompletteringen består av elektriska motstånd (bromsmotstånd) vilka anslutits till generatoromriktarens likströmsled via transistorer. Genom att koppla in dessa kan man undvika att omriktaren överbelastas.

Två registreringar gjordes då blixtnedslag i en kraftledning i närheten av vindkraftverket fick spänningen på vindturbinen att sjunka till halva respektive en bråkdel av normala värdet under en tiondels sekund, varefter felet automatiskt kopplades bort och spänningen återgick till sin ursprungliga nivå. Detta resulterade i kraftiga överströmmar i generatorns stator och rotor. Ride-through-funktionen fungerade dock som tänkt och vindkraftverket kopplades inte bort från nätet. Projektet pågår fram till årsskiftet 2008/2009 då resultaten kommer att finnas tillgängliga i en slutrapport.

Internationellt samarbete om elsystem för havsbaserad vindkraft

V-106 Annex 23 Havsbaserad vindenergiteknologi och utformning

Projektledare: Ola Carlson, Institutionen för Energi och Miljö, Chalmers
Sverige deltar i IEA-annexet 23, "Offshore wind energy technology deployment", där bl a elektriska system för havsbaserade vindparker studeras. Såväl klassiska växelströmssystem som överföring med högspänd likström behandlas. En övergripande ambition är att skapa ett internationellt forum för utbyte av kunskap och erfarenheter samt att etablera gemensamma anslutningsregler och standarder för vindkraft till havs. Konkreta samarbetsprojekt finns inom följande områden:

- Storskalig integration av vindkraft i det nordiska elnätet. Finansiärer: Nordisk energiforskning, Vattenfall och Svenska Kraftnät.

- Stabilitetsfrågor i transmissionsnätet i samband med vindkraft.
- Modeller av vindkraft för elsystemstudier, Sydkrafts forskningsstiftelse.
- DC/DC-omriktare i vindkraftsparker, Vindforsk.
- DC-vindpark med serieanslutna vindkraftverk, Sydkraft och Energimyndigheten (avslutat)
- Styrmetoder för vindkraftverksgeneratorer och vindkraftverk, Vindforsk (avslutat)

Inom EUs Interreg IV-program för Nordsjöregionen har projektet "Power Cluster" beviljats bidrag med deltagare från Norge, Sverige, Danmark, Tyskland, Nederländerna och Storbritannien. Projektets mål är att vidareutveckla affärsmöjligheter, utbildning och information om vindkraft. Chalmers ansvarar för utbildningsdelen, som kommer att genomföras i samarbete med Västra Götalands-regionen.¹⁵⁵

Användning av likströmsöverföring för att styra spänning och minska flicker

V-157 Optimal lösning för DC-koppling i HVDC Vindpark

Projektledare: Fainan Hassan, STRI

Inom projektet studeras hur en likströmsöverföring kan användas för att styra spänningen i anslutningspunkten samt för att reducera flickerhalten på det anslutande elnätet. Detta är möjligt med växelriktare, som använder kraftelektronik i form av IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) med PWM (pulsviddmodulering), och därmed kan reglera både de aktiva och reaktiva effektflödena från vindkraftverken till elnätet. I projektet framkom att det finns begränsningar för hur metoden kan användas. En begränsning är tillgången på reaktiv effekt, en annan är nätets reaktans och en tredje finns i regleringssystemets bandbredd.

De två första begränsningarna medför att betydande spänningsdippar inte kan regleras. Det innebär att det finns en risk att vindparken kopplas bort om spänningen sjunker under ett visst värde. Den tredje begränsningen innebär att snabba spänningsvariationer, vilka ger sig till känna som flicker, inte kan motverkas. Flicker innebär att man får synliga och därmed störande variationer i ljusstyrkan hos glödlampor.

Användning av en ström-chopper-enhet på likströmslänken (samma idé som tidigare nämnts i samband med ride-through-system för DFIG-verk) gör det även möjligt att variera det aktiva effektflödet. En strömbegränsningsalgoritm, som verkar genom att reducera den aktiva effekten i de fall den reaktiva effekten inte är tillräcklig för att reglera spänningen, har introducerats. Detta ger en bättre reglerförmåga. Dessutom är tidskonstanten för chopper-enheten betydligt kortare än för den reaktiva regleringen, vilket gör att även snabba spänningsvariationer kan motverkas. Flickersituationen mäts i P_{ST} -värdet (short-term flicker severity). Vid simuleringar framkom att enbart reaktiv effektereglering kunde sänka

¹⁵⁵ www.power-cluster.net samt

<http://www.chalmers.se/ee/SV/forskning/forskargrupper/elteknik/forskningsprojekt>

flickervärdet med 15 procent medan en kombination av reaktiv och aktiv effektregering sänkte värdet med 23 procent.

Inom projektet återstår att genomföra simuleringar för att komma fram till vilka kombinationer av reaktiv och aktiv effektregering som ger den bästa elkvaliteten till lägsta kostnad. Även olika sätt att lagra energi för regleringen ska provas.

Internt växelspänningsnät samt AC/DC-omriktare

V-208 Ny topologi för mer effektiva AC/DC-omriktare till framtida havsbaserade vindkraftparker

Projektledare: Hans-Peter Nee, EKC, KTH

Om en vindkraftstation är ansluten till det allmänna elnätet via likström finns det ingen anledning att inom denna återbilda ett elnät med frekvenser i närheten av 50 Hz. Ett starkt skäl för detta är att enheterna för spänningsomvandling kan göras mindre om man går upp i frekvens, eftersom storleken på nyckelkomponenten, transformatorn, är omvänt proportionell mot frekvensen. Poängteras bör att högfrekvenstransformatorer används i DC/DC-omformare.

Inom projektet har en teknik för att överföra elektrisk effekt från en stor vindkraftspark till en lämplig inkopplingspunkt i nätet undersökts. Tekniken bygger på likströmsöverföring, som utmärks av full styrbarhet även vid felfall, vilket ökar leveranssäkerheten. Eftersom tekniken bygger på s.k. soft-switching och att omvandlarna i vindkraftverken är bestyckade med tyristorer erhålls avsevärt lägre förluster än med dagens likströmsteknik. Dessutom blir initialkostnaden lägre eftersom färre krafthalvledare behövs, samt att storleken på transformatorerna minskar avsevärt genom användningen av ett mellanfrekvensnät inom vindkraftsparken.

Det har visats att kommuteringen för den nya AC/DC omriktaren kan realiseras inom hela driftområdet med tyristorer som inte aktivt kan släckas.¹⁵⁶ Mätningar och resultat från en ny modulationsstrategi har visat dess lämplighet i den nya AC/DC omriktaren.¹⁵⁷

Att den nya tekniken fungerar experimentellt med omvandlare bestyckade med tyristorer har visats vid laboratieförsök med en 20 kVA prototyp som togs fram inom projektet.¹⁵⁸

En preliminär sammanställning pekar på att det med den nya tekniken är möjligt att förbättra ekonomin för vindkraftsparker på stort avstånd från en stark punkt i nätet. En slutlig rapport om det ekonomiska resultatet väntas bli i slutet av året 2008.

¹⁵⁶ S. Norrga, S. Nee, H.-P. "Modulation Strategies for a Mutually Commutated Converter System in Wind Farms". European Power Electronic conference 2007, 2-5 Sept. 2007, Ålborg, Danmark, P. 1-10.

¹⁵⁷ Meier, Stephan, Kuschke, Maren, Norrga, Staffan. Space Vector Modulation for Mutually Commutated Isolated Three-Phase Converter Systems. Power Electronics Specialists Conference, 2008, Rhodes, Greece, 15-19 June 2008, P. 4465 – 4471.

¹⁵⁸ Stephan Meier, Staffan Norrga and Hans-Peter Nee. Control Strategies for Mutually Commutated Converter Systems without Cycloconverter Turn-off Capability. Power Electronics Specialists Conference, 2008, Rhodes, Greece, 15-19 June 2008, P. 1344 - 1350

En pågående studie behandlar mellanfrekvensnät inom vindkraftsparker med målet att visa att det går att konstruera ett sådant utan alltför stor förekomst av hög- och mellanfrekventa elektriska oscillationer i området från 1 kHz upp till några MHz. Studien omfattar numeriska simuleringar i PSCAD, analytiska beräkningar av mellanfrekvenstransformatörer samt praktiska mätningar på kablar hos ABB Corporate Research i Västerås. Studien väntas bli klar i slutet av året 2008.

Internt likspänningsnät med DC/DC-omvandlare

V-204 DC/DC-omriktare

Projektledare: Ola Carlson, Institutionen för Energi och Miljö, Chalmers

Den mest långtgående lösningen är att utföra en vindkraftstation där generatorerna genererar växelström men där såväl det interna nätet som landförbindelsen baseras på likström, vid olika spänningsnivåer. Det innebär att det såväl vid de enskilda vindkraftverken som vid "transformatorstationen" behövs DC/DC-omvandlare, vilka kan ändra spänningsnivån. I projektet har olika typer av omvandlare och spänningsnivåer undersökts. Det mest attraktiva valet har visat sig vara en s.k. fullbridge-omvandlare med fasvinkelstyrning där man låter spänningsvariationerna tas upp i första ledet. I projektet studeras nu olika transienta förlopp och felfall. Projektet beräknas vara klart senhösten 2009.

12.2 Omvärldsanalys

Tekniska trender för eltekniken inom vindkraften

I dagsläget har industristandarden för stora vindturbiner nått 3-4 MW och ambitionen tycks i första hand vara en välbehövlig förbättring av tillförlitligheten. Forskningsfronten, representerad av det mycket omfattande EU-projektet Upwind, arbetar vidare mot vindturbiner på 10 MW.

Växellådor går fortfarande sönder och intresset för direktdrivna lösningar är stort. Förutom Enercon har nu även tyska Vensys nått volymproduktion av direktdrivna vindturbiner genom licens till kinesiska Goldwind.

Nätägarnas krav på anslutna vindkraftverk har höjts i takt med att vindkraften svarar för en allt större del av elproduktionen. Krav på reaktiv effektutmatning vid felfall har kommit in i alltfler nätägars bestämmelser. Hydro Quebec fordrar att vindkraften ska kunna medverka i frekvensregleringen genom att tillfälligt kunna öka effekten med 10 procent.

Elteknisk vindkraftsforskning i utlandet

Risö energiforskningscenter, som numera är sammanslaget med DTU, Danmarks tekniska högskola, har på senare tid kraftigt expanderat verksamheten inom vindenergiområdet. Mycket av forskningen rör vindkraftverks samverkan med elnätet. Ett intressant tema är att utnyttja hybrid/elfordons batterier för att jämna ut effekten från vindkraftverk. En supraleddande vindkraftsgenerator skulle kunna bli betydligt mindre än en

vanlig generator. Även integration av mindre vindkraftsutbyggnader i lokala elnät behandlas. Industrikopplingen illustreras av att vindkraftstillverkaren Vestas har ett kontor inom Risös område.

Ett annat viktigt lärosäte är Ålborg, som långsiktigt sponsras av Vestas. En delförklaring är vindkraftstillverkarnas svårigheter att rekrytera tillräckligt mycket kompetent personal. Forskningen i Ålborg har traditionellt varit inriktad på kraftelektronik och drivsystem, vilket fortfarande avspeglar sig i pågående forskningsprojekt. Projekt rörande dynamisk samverkan mellan elnät och vindkraftsanläggningar har inletts även där.

Påpekas bör att man i Danmark har en helt annan struktur för forskningsfinansiering än i Sverige, med en betydligt bättre tillgång till interna medel. I Ålborg finns t.ex. tio seniora forskare på vindkraft, vilket är mer än totalt på högskolorna i Sverige på samma tema.

I Finland tillverkas såväl släpringade asynkrongeneratorer (DFIG) som permanentmagnetiserade direktdrivna, medelvarviga och snabbgående generatorer samt elsystem för dessa. Detta har lett till ett tätt samarbete mellan ABB och de tekniska högskolorna i speciellt Helsingfors och Lappenraanta. Vidare tillverkas vindkraftverk i Finland med medelvarviga generatorer, bl.a. en levereras om 30 MW till Skellefteå Kraftverk. Finland är starkt när det gäller maskinkonstruktion och styrmetoder. En viktig faktor är att ABB i slutet av 1980-talet förlade sin drivsystemverksamhet till Helsingfors. Verksamheten har även lett till lyckosamma avknoppningar med tillverkning av generatorer och omriktare.

Norges Tekniska Naturvitenskaplige Universitet (NTNU) i Trondheim har satsat på experimentell förankring och byggt ett påkostat forskningslaboratorium. Ett spår är direktdrivna PM-generatorer, som man nyligen börjat prova experimentellt i storleken 50 kW. Nämnas kan att den numera svenskägda vindkraftstillverkaren Scanwind använder sig av denna teknologi och har haft god nytta av högskolans kunskap. Även forskning på styrning av DFIG-vindkraftverk bedrivs. Samverkan mellan elnät och vindkraftverk studeras framförallt vid energiforskningsinstitutet Sintef, vägg i vägg med högskolan.

Den tekniska högskolan i Aachen, Tyskland, bör nämnas särskilt därför att Eon förlagt sitt nya forskningscenter dit. Inom kraftelektronik och drivsystem finns sedan tidigare omkring 25 doktorander.

Det nederländska energiforskningsinstitutet ECN bedriver sedan många år en bred forskning om vindkraft, beträffande elsystem tillsammans med högskolan i Delft.

European Wind Energy Technology Platform

Behovet av elteknisk forskning är inte så uttalat i European Wind Energy Technology Platform, möjligen beroende på att denna fortfarande är relativt ny i vindkraftssammanhang. Exempel på föreslagna forskningsområden:

- Förbättringar av elektronik för hög spänning i avsikt att höja verkningsgrad och sänka kostnad.

- Vidareutveckling av omriktare i syfte att höja verkningsgraden och förbättra styrbarhet samt elkvalitet.
- Utveckling av nya, lätta direktdrivna generatorer med litet underhållsbehov, inklusive användning av högttemperatursupraleddare.
- Vidareutveckling av standarder för vindturbiner med hänsyn tagen till nätägarnas krav.

Betydelsen av Vindforsks projekt

Av såväl historiska som industriella skäl upprätthåller landet en omfattande aktivitet inom de vindkraftstekniska tillämpningarna av elkraftstekniken, där Vindforsks verksamhet utgjort en naturlig fortsättning på den tidigare. I takt med att anläggningarna, överföringsavstånden och täckningsgraden blir allt större ökar även kraven på vad eltekniken ska kunna åstadkomma. Potentialen för fortsatta förbättringar är stor, vilket gör att projekten också får stor betydelse.

12.3 Framtida utveckling

Utveckling av kraftelektronik och teknik för elsystem i vindkraftverken kan som ovan berörts ge fördelar i form av billigare installationer, lägre underhållskostnader och ökad styrbarhet av effekt och spänning. För att detta ska kunna realiseras krävs dock att såväl grundläggande som mer tillämpad forskning ges resurser. Nedan ges exempel på områden som bör utvecklas.

Interna vindkraftsnät för likström och mellanfrekvens

Utformningen av de interna elnäten inom vindkraftsparkerna och komponenter för dessa har stor ekonomisk betydelse och har blivit ett betydande forskningsområde. Forskningsstöd är motiverat bl a för att vidareutveckla olika lösningar för DC/DC och DC/MF-omriktare.

Högfrekvensmodellering av elnät till havs och på land

Tidigare relaterade undersökningar av orsakerna till haverier på generatorer och transformatorer har lett till ett stort intresse för hur transienter uppkommer och utbreder sig i de interna näten inom havsbaserade vindkraftstationer. I distributionssystemen har det förekommit liknande problem där vindkraftverk och annan kraftelektronisk utrustning har stört utrustning för elnätskommunikation. Fokus är i första hand på luftledning, transformatorer och laster anslutna till elnätet.

Frekvensreglerande vindkraftverk

Med vindkraftens ökande utbredning har det även uppkommit ett behov av att kunna använda den för frekvensreglering. Det finns två varianter. I den ena kör man som vanligt på högsta möjliga effekt. Vid behov kan turbinen bromsas under ett tiotal sekunder, vilket ger den extra energi som krävs för frekvensregleringen. I ett samarbete mellan DTU, Vestas och Östkraft provas denna teknik på Bornholm. I den andra varianten måste verken hållas på en

lägre effekt än den tillgängliga, vilket innebär att effekten vid behov kan ändras, uppåt eller nedåt. Att hålla denna beredskap innebär en förlust av energi och är alltså mindre tilltalande.

Modellering av elsystem för växellådsstudier

I och med att växellådor fortfarande går sönder förefaller det finnas ett behov av att förbättra de tillgängliga drivlinemodellerna. Notera att högfrekventa transienter enligt ovan förefaller att vara den troligaste förklaringen till haverier i generatorer och transformatorer - de påverkar sannolikt även vindkraftverkens kuggväxlar.

Användning av el- och elhybridfordon för att tillfällig lagring av vindkraftsel

Hybridfordon håller på att introduceras och renodlade elbilar väntas följa därefter. Bilarna laddas från elnätet men kan även tillfälligt utnyttjas som energilager för att jämna ut produktionen från exempelvis vindkraftverk. Hur detta ska ske är ännu ett utforskat område. Redan är Vattenfall, Göteborg Energi samt fordonstillverkare aktiva inom plug-in-hybridområdet.

Integration av vindenergi i befintliga distributionssystem

Såvitt kan bedömas kommer storleksordningen några tusen megawatt av den svenska vindkraften att byggas i mindre grupper som ansluts till det befintliga distributionssystemet. Det finns därför ett betydande intresse från nätägare, projektörer m fl att undersöka hur detta kan ske på ett ekonomiskt och miljömässigt tillfredsställande sätt.

Supergrid i Nordsjön och Östersjön

Ett tema som rönt stort intresse är att bygga ett "supergrid" för sammankoppling och nätanslutning av havsbaserad vindkraft. Det skulle vara jättelika likströmsnät i Nordsjön och Östersjön som matar energi till de olika länderna samtidigt som länderna kopplas samman på ett starkare sätt än i dag. Förmodligen kommer denna utbyggnad att ske successivt. För samhället är det viktigt finns en plan för hur det ska se ut om 30-40 år.

13 Anslutning av vindkrafts- anläggningar

13.1 Resultat från Vindforskprogrammet

Inom Vindforskprogrammet anslogs under perioden 2006/08 5,2 Mkr eller 14 procent av medlen till projekt inom området.

Värdering av vindkraftsparker med olika elsystem

V 218 Vindkraftdesign för HVDC-ansluten vindkraftspark.

Projektledare: Torbjörn Thiringer, Institutionen för Energi och Miljö, Chalmers

Målet för projektet är att undersöka om en vindpark med vindkraftverk med enkel elutrustning (DFIG med särskilt liten rotoromriktare, eventuellt endast med rotorresistansstyrning, "optislip"), i kombination med överföring med högspänd likström (HVDC) kan få samma prestanda som motsvarande anläggning utrustad med fulleffektomriktare, samt att värdera totalkostnaden. Verken antas även sakna "fault ride-through"-system, vilket innebär att de inte ensamma klarar nätkraven.

Det studerade grundkonceptet utgörs av en havsbaserad vindpark ansluten till elnätet på land via en HVDC-överföring. Normalt motiveras HVDC av att avståndet till en lämplig nätanslutningspunkt är mer än omkring 50 km eller att anslutningen sker till ett svagt nät. Omriktarna förutsätts vara spänningsstyva, vilket ger en god styrbarhet. Trots att enklare vindkraftverk är tänkta att användas kan systemet ändå uppfylla de krav som Svenska Kraftnät och andra nätoperatörer ställer.

Referenssystemet utgörs av vindkraftverk med fulleffektomriktare. Den tekniken används vid Vattenfalls vindkraftstation Lillgrund utanför Malmö i kombination med växelströmsöverföring. I denna studie förutsätts dock att HVDC används för överföringen till land, vilket innebär att hela eleffekten kommer att passera fyra omriktarsteg (från AC till DC och tvärtom) innan den når anslutningspunkten. I de inom detta projekt studerade "rotoromriktarsystemen" passerar huvuddelen av effekten endast två omriktare, vilket begränsar investering och förluster. Projektet pågår fram till sommaren 2009.

V 138 "Dynamisk prestanda för HVDC-ansluten vindkraftspark

Projektledare: Andreas Petersson, Gothia Power

Syftet med projektet är att undersöka möjligheten att utnyttja en HVDC-anläggning med transistorteknik (VSC-HVDC) för att reglera de anslutna vindkraftverken i en vindkraftpark. I stället för att varje vindkraftverk regleras individuellt utnyttjas alltså HVDC-anläggningens omriktare för att styra vindkraftverkens varvtal genom att reglera frekvensen i vindkraftsparkens elnät. Med en sådan lösning behövs ej omriktare i vindkraftverken för att uppnå ett långsamt variabelt varvtal. Det blir således principiellt möjligt att

använda direktanslutna generatorer. För vindkraftverk i MW-klassen och uppåt kan det ändå vara fördelaktigt med ett DFIG-vindkraftverk med en mindre omriktare för att reducera den mekaniska belastningen i vindkraftverket och därmed minska kostnaden för drivlinan. Projektet kommer att slutrapporteras under hösten 2008.

Krav för nätanslutning

V-129 och V-143 Framtagning av metod för att testa vindkraftverks förmåga att uppfylla svenska nätanslutningskrav

Projektledare: Evert Agneholm, Gothia Power

De svenska nätkraven för vindkraftverk är dokumenterade i AMP¹⁵⁹, ASP¹⁶⁰ samt Svenska Kraftnäts föreskrifter för produktionsanläggningar.¹⁶¹ För närvarande saknas däremot riktlinjer för att verifiera att kraven uppfylls. Detta är allvarligt, eftersom det finns en risk att nätägare och vindkraftsägare inte kan bedöma tillverkarnas provresultat. I projekt V-143 vidareutvecklas den verifieringsmetod med försök på skalmodeller som togs fram inom det tidigare projektet V-129. Projekt V-143 slutförs under 2008.

Projektet ska utveckla skalmodeller av vindkraftverk kopplade till en frekvensomformare vars mjukvara kan programmeras för att modellera stationära avvikelser i spänning och frekvens, nätstörningar samt variera nätets kortslutningseffekt och impedans. Resultat från nätsimuleringar ska kunna användas för att styra omformaren. Skalmodellerna utsätts för de prov som utvecklas. Denna process ska ge svar på hur metoderna fungerar i praktiken och kan även ge återkoppling till AMP, ASP och Svenska Kraftnäts föreskrifter. Projektet ska dessutom summera de krav som gäller för vindkraftverk i Danmark, Tyskland, Spanien och Irland, och metodiken för att verifiera att dessa uppfylls.

Fördelen med provning på skalmodeller är att vindkraftsparkens samverkan med elnätet kan provas för extrema störningar i elnätet, vilka sällan uppstår. Man kan därmed identifiera eventuella stabilitetsproblem eller oönskad urkoppling av vindparken. Generellt måste leverantören ansvara för att vindkraftverken uppfyller kraven som ställs för nätanslutning. Endast vindkraftverk som certifierats enligt gällande prov bör få anslutas till elnätet.

Stora kommersiella vindkraftsparker bör utrustas med utrustning som medger loggning av vindparkens beteende vid verkiga störningar i elnätet. En sådan utrustning är installerad i Lillgrunds vindkraftspark.

Projekt V-101 ASP Anslutning av stora produktionsanläggningar¹⁶²

Projektledare: Åke Larsson, Vattenfall Power Consultant

¹⁵⁹ AMP, Anslutning av mindre produktionsanläggningar till elnätet, Svensk Energi, 2002.

¹⁶⁰ ASP, Anslutning av större produktionsanläggningar till elnätet, Elforsk rapport 06:79, 2006.

¹⁶¹ Affärsverket Svenska Kraftnäts föreskrifter och allmänna råd om driftsäkerhetsteknisk utformning av produktionsanläggningar, SvKFS 2005:2, 2005.

¹⁶² ASP, Anslutning av större produktionsanläggningar till elnätet, Elforsk rapport 06:79, 2006.

Då större vindkraftsanläggningar ska anslutas till elnätet uppstår frågor om nätets överföringsförmåga, spänningsvariationer, förluster, felströmmar, reläskydd, dynamisk stabilitet etc. Eftersom få större vindkraftsanläggningar byggts i Sverige finns en begränsad erfarenhet. Det är svårt att avgöra vad som bör undersökas. För både nätägare och elproducenter är det viktigt att det finns tydliga krav och rekommendationer för hur nätanslutningen ska utföras, vilka studier som bör genomföras och vilka krav som en vindkraftsanläggning ska uppfylla.

Syftet med projekt V-101 är att belysa hur nätanslutning av stora vindkraftsanläggningar ska utföras och vilka krav som ska uppfylla. Rapporten behandlar generellt hur produktionsanläggningar större än 25 MW ska anslutas till regionnätet. I rapporten redogörs för de krav som Svenska Kraftnät ställer på produktionsanläggningar samt vilka krav en nätägare bör ställa. Vidare beskrivs elkvalitet, vilka nätstudier som bör utföras i samband med nätplaneringen, relevanta skydd för felbortkoppling, checklista för nätägaren och vilken information som bör utbytas mellan nätägare och elproducent. Exempel ges på några stora byggda eller planerade vindparker på land och till havs. Idag finns behov av en reviderad ASP-rapport som fokuserar på vindkraftsanläggningar anslutna till regionnätet. Även de administrativa rutinerna för att underlätta kontakten mellan nätföretag och elproducenter skulle kunna inarbetas i en reviderad version av ASP-rapporten.

13.2 Omvärldsanalys

Region- och stamnät

Vindkraftverken måste placeras på ställen med goda vindtillgångar. Dessa platser på land och till havs sammanfaller sällan med tillgång till ett region- och stamnät med tillräcklig styrka.

Det ekonomiska ansvaret för elnäten varierar mellan länderna och är naturligtvis en politisk fråga. I Tyskland är det sedan december 2006 stamnätsägaren (TSO, Transmission System Operator) som är skyldig att bygga och driva elnät även till havs. I Sverige berörs den ekonomiska frågan i Nätutredningen.¹⁶³

Nätstruktur och teknikval

Frågan om nätstruktur kan resultera i behov av att bygga nya transmissionsledningar för att samla ihop och överföra vindkraftsproduktionen till stamnäten och även att öka överföringskapaciteten mellan olika länder. På detta sätt kan man jämna ut vindkraftens variationer och därmed minska reglerbehovet.

Frågan om teknikval berör konventionell växelströmsteknik (AC) kontra högspänd likström (HVDC). Likström har många fördelar jämfört med växelström och en rad olika applikationer med HVDC-teknik studeras runt om i världen, se projekten V-218 och V-138. Forskningen inom växelströmsteknik

¹⁶³ Bättre kontakt via nätet – om anslutning av förnybar elproduktion, SOU 2008:13.

handlar till stor del om kablar där forcerad vattenkylning medger omkring 50 procent ökad effektöverföring jämfört med en konventionell kabel.¹⁶⁴ En annan variant är gasisolerade ledningar (GIL, Gas-Insulated Lines) som har större kapacitet och lägre kapacitans än konventionella kablar.¹⁶⁵ Ytterligare en variant är kabel med fyra ledare för ett fyr-fas system, vilket ger mindre magnetfält och temperaturökning jämfört med en ordinär trefaskabel.¹⁶⁶

Elnätets krav på produktionsanläggningarna

Som en följd av den snabba och storskaliga utbyggnaden av vindkraft har allt fler länder utarbetat krav, s.k. "grid codes", som gäller för vindparker som ska anslutas till nätet. Tidigare anslutningskrav behandlade i första hand vindkraftverkens påverkan på det lokala distributionsnätet. I Sverige finns sådana i AMP.¹⁶⁷

Kraven ställs av ägarna av transmissions- och stamnäten (TSO), i Sverige av Svenska Kraftnät.¹⁶⁸ Exempel är störningstålighet, reaktiv effektereglering, kommunikation och styrbarhet. Med störningstålighet avses att en vindpark ska upprätthålla produktion trots avvikelser i frekvens och spänning samt förbli inkopplad till nätet även då spänningen i det anslutande nätet kortvarigt går mot noll, vilket benämns fault ride-through. I Spanien har man gått ännu längre och kräver att vindparker ska kunna bidra till spänningsregleringen.

Dessa "grid codes" skiljer sig än så länge mellan olika länder. Vissa krav är svåra för vindkraftstillverkarna att uppfylla, vilket innebär att de påverkar teknikvalet.¹⁶⁹ Tillverkarna försöker anpassa konstruktionerna för en internationell marknad. Om kraven skiljer sig åt mellan olika länder finns risk att man antingen anpassar sig efter värsta fallet, vilket ger en dyrare produkt, alternativt att man slopar vissa marknader. Inom EU har man identifierat behovet av harmonisering och ett flertal program har inletts i detta syfte.

¹⁶⁴ H. Brakelmann, D. Zhang, "HVAC cable systems with forced water cooling for wind energy transmission", 7th International Workshop on Large Scale Integration of Wind Power and on Transmission Networks for Offshore Wind Farms, 26-27 May, 2008, Madrid, Spain.

¹⁶⁵ C. Rathke, M. Siebert, L. Hofmann, "Grid integration of offshore wind farms using gas-insulated transmission lines", 7th International Workshop on Large Scale Integration of Wind Power and on Transmission Networks for Offshore Wind Farms, 26-27 May, 2008, Madrid, Spain.

¹⁶⁶ H. Brakelmann, J. Brüggmann, J. Stammen, "Connection of Wind Energy to the Grid by an Optimized HVAC Cable Concept", 7th International Workshop on Large Scale Integration of Wind Power and on Transmission Networks for Offshore Wind Farms, 26-27 May, 2008, Madrid, Spain.

¹⁶⁷ AMP, Anslutning av mindre produktionsanläggningar till elnätet, Svensk Energi, 2002.

¹⁶⁸ Affärsverket svenska Kraftnäts föreskrifter och allmänna råd om driftsäkerhetsteknisk utformning av produktionsanläggningar, SvKFS 2005:2.

¹⁶⁹ S. Bolik, "The impact of Grid Codes on the development of wind turbine technologies", 7th International Workshop on Large Scale Integration of Wind Power and on Transmission Networks for Offshore Wind Farms, 26-27 May, 2008, Madrid, Spain.

European Wind Energy Technology Platform

European Wind Energy Technology Platform behandlar detta ämnesområde huvudsakligen under "wind energy integration", som tidigare beskrivits under avsnitt 2, Stora andelar vindkraft ur ett marknads- och teknikperspektiv.

Betydelsen av Vindforsks projekt

Se motsvarande för avsnitt 10 Anslutning av vindkraftstation.

13.3 Framtida utveckling

Fortsatt arbete är motiverat för att uppdatera kraven för nätanslutning av vindkraftsparker både allmänt och vad gäller exempelvis isolationsnivåer för utrustningen.

Uppdatering av krav för nätanslutning

En uppdatering av de nuvarande kraven för nätanslutning av större produktionsanläggningar, ASP, är behövlig. Där bör ingå rekommendationer på utformning av anslutningen mot regionnät samt exempel på hur Svenska Kraftnäts bestämmelser ska tillämpas.

Vindparkers samverkan med elnätet

Bland nätägarna finns det en osäkerhet om hur vindparkerna samverkar med elnätet. Det skulle därför vara av värde att i ett antal vindkraftstationer göra mätningar i samband med störningar i det anslutande elnätet och presentera dessa tillsammans med simuleringar. Stora kommersiella vindkraftsparker bör utrustas med utrustning som medger loggning av dess beteende vid verkliga störningar. En sådan utrustning finns i Lillgrunds vindkraftspark.

Alternativa lösningar för att uppfylla isolationsmarginaler

I dag saknas en standard för val av isolationsnivåer och utrustning för överspänningsskydd. Behov finns att utvärdera alternativa lösningar för att säkerställa att isolationsmarginalerna i elsystemet uppfylls. Resultatet bör innehålla rekommenderade isolationsnivåer samt hur marginaler för kopplingsöverspänningar (SIWL) och åsköverspänningar (LIWL) ska bedömas med hjälp av beräkningar eller simuleringar. Detta har tidigare berörts i ett Elforskprojekt¹⁷⁰ men kräver ytterligare behandling. I samband med detta bör man beskriva hur elsystemets uppbyggnad och dimensionering inverkar på storlek av överströmmar och överspänningar i systemets olika delar.

¹⁷⁰ Design av elsystem för havsbaserade vindkraftparker, Elforsk projekt 08:14, 2008.

14 Drift och underhåll

14.1 Resultat från Vindforsksprogrammet

Inom Vindforsksprogrammet anslogs under perioden 2006/08 3,4 Mkr eller 9 procent av medlen till projekt inom området.

Driftsuppföljning

V-102 Vindkraftsstatistik – driftsuppföljning

Projektledare: Nils-Eric Carlstedt, Vattenfall Power Consultant AB

Inom projektet insamlas och bearbetas driftsdata för vindkraftverk inom landet. Under den tid som investeringsbidrag utgick till vindkraftverk var rapporteringen obligatorisk. Övergången till stöd via elcertifikat tog bort detta obligatorium, vilket för nya verk lett till ett bortfall i statistiken. Denna fråga omprövas nu. Rapportering sker genom månads- och årsrapporter tillgängliga via internet¹⁷¹. Det finns också en automatisk inrapportering till vilken omkring hälften av vindkraftverken nu är anslutna. Även dessa resultat är tillgängliga via internet. Statistiken kommenteras nedan.

Optimal underhållsstyrning för havsbaserade vindkraftverk

V-210 Optimal underhållsstyrning

Projektledare: Lina Bertling, Elektroteknisk teori och konstruktion, KTH

Detta doktorandarbete syftar till att utveckla metoder för att optimera underhållet av vindkraftverk, med särskild inriktning på havsbaserade verk där beroendet av transporter och väder ökar kostnaderna. I den första fasen av projektet identifierades de viktigaste insatsområdena vid underhåll av vindkraftverk där kuggväxeln och mer generellt drivlinan är den främsta källan till problem. Utrustning för vibrationsövervakning installeras numera för att tidigt upptäcka fel. Kostnaderna för exempelvis transporter skulle kunna minskas om man säkrare kunde bestämma hur länge den felaktiga komponenten kan användas före byte.

Mycket produktionsbortfall orsakas också av mindre komponenter med hög felfrekvens, som exempelvis hydraulkolvar och elmotorer. Tillgängligheten skulle kunna höjas genom att byta sådana komponenter i förebyggande syfte. Införandet av en sådan underhållsfilosofi hindras dock av att man hittills inte på ett strukturerat sätt har hållit reda på komponenter som bytts och tidpunkter för detta.

Rutinunderhållet av vindkraftverk innebär typiskt inspektioner, oljeprov, smörjning och dragning av skruvförband. Det sker schemalagt en eller två gånger per år. Genom att i stället förlägga det till "opportunistiska" tillfällen, då verket ändå inte producerar därför att vädret är lugnt eller då man måste besöka det för att avhjälpa fel, skulle man både kunna sänka kostnaden och

¹⁷¹ www.vindenergi.org/driftuppf.htm

höja produktionen. En optimeringsmodell för opportunistiskt underhåll av vindkraftverk utarbetas inom projektet. Denna kan också utvidgas till att omfatta förebyggande komponentbyten. En fallstudie genomförs vid den havsförlagda vindkraftstationen Lillgrund i samarbete med Vattenfall.

Driftsäkerhet för vindturbiner

V-121 Optimal underhållsstyrning av vindkraftverk med tillståndskontrollsystem med avseende på tillförlitlighet och kostnad

Projektledare: Arnt Eggen, Sintef Energiforskning AS

Detta norska projekt, som delfinansieras av Vindforsk, tar sin utgångspunkt i de metoder som tillämpas vid underhåll av vattenkraftverk, vilket kan vara lämpligt både för att de är systematiska och för att de är kända i berörda organisationer. Mål för projektet är att utarbeta en handbok för tillståndskontroll i vindturbiner, en modell för hur komponenter i vindturbiner havererar med bl a beräkning av kvarstående livslängd, en metod för registrering av driftshistorik för vindturbiner samt anvisningar för hur underhållsmässiga aspekter ska hanteras i leveranskontrakt.¹⁷² Det ska slutföras under 2008.

14.2 Omvärldsanalys

Tillgänglighet hos vindkraftverk

Vindkraftverk har sedan länge ansetts ha en hög och jämn tillgänglighet, där denna definieras som tiden då anläggningen är beredd att producera (vare sig det finns vind eller inte), dividerad med den totala tiden. Förutsatt att felen fördelas slumpmässigt över tiden kommer därmed tillgängligheten att ange möjlig produktion som andel av produktionen för en anläggning med 100 procent tillgänglighet. För perioden 2002-2007 rapporteras för svenska vindkraftverk ett högsta årsvärde av 99,8 procent och som lägsta 98,1 procent.¹⁷³ För 2007 blev värdet 98,7 procent tillgänglighet för 810 deltagande verk. Dessa uppgifter baseras på de rapporter som aggregatägarna manuellt sammanställer och sänder in månadsvis.

Emellertid har det även byggts upp ett automatiskt rapporteringssystem, som varje natt ringer upp vindkraftverken och automatiskt hämtar uppgifter om produktion mm senaste dygn. I samma rapport anges att för 2007 blev tillgängligheten enligt denna metod 94,7 procent, baserat på de då anslutna 444 verken med möjlighet att rapportera driftstillstånd. Också denna uppgift är inte helt säker, eftersom kontrollsystemen för de olika fabrikaten skiljer sig åt och att även en automatiskt rapporterad uppgift om att anläggningen är tillgänglig för produktion inte nödvändigtvis innebär att så är fallet.

¹⁷² Arnt O. Eggen: Driftsikkerhet for vindturbiner. Forskning om vindkraft i fokus. KTH, 2008-05-15.

¹⁷³ Elforsk Driftuppföljning för vindkraftverk, 2007.

Exempelvis rapporterar vissa fabrikat nätbortfall som fel medan andra inte gör det.¹⁷⁴ Enligt gällande definition ska de räknas som fel.

Ett detaljstudium av Vattenfall ABs vindkraftverk i den citerade årsrapporten ger en ytterligare nyanserad bild. De 46 vindkraftverken på land hade under 2007 i genomsnitt en tillgänglighet av 91,8 procent och de tolv verken till havs 76,4 procent. De havsbaserade verken vid Lillgrund utanför Malmö, som togs i drift i slutet av 2007, ingick inte i dessa uppgifter. Ett av verken på land var avställt hela året, Näsudden II. Det har nu skrotats. Likaså var ett av de havsbaserade verken vid Yttre Stengrund avställt, i väntan på en ny kuggväxel. Det kunde vara rimligt att ta bort Näsudden II ur statistiken, varvid Vattenfalls land-värde skulle öka till 93,8 procent. Däremot bör Yttre Stengrund-verket belasta statistiken, eftersom avsikten är att ta det i drift igen.

Sammanfattningsvis finner man att den gängse bilden av tillgängligheten hos vindkraftverk inte är korrekt. En ytterligare granskning av statistiken visar att för hela 57 av verken uppgavs att de inte producerat alls under året, men tydligen togs dessa inte med i sammanräkningen. Även om alla andra varit felfria – vilket de inte var – hade tillgängligheten då sjunkit till 93 procent. För hela 630 av verken uppgav den manuella rapporteringen 100 procent tillgänglighet, vilket inte går ihop med uppgifterna enligt den automatiska rapporteringen. En mer trolig siffra är att tillgängligheten ligger vid 90 - 95 procent. Detta därmed rätt dåliga värde ger alltså en potential till väsentliga förbättringar i vindkraftens resultat.

Tillgängligheten är en kombinerad effekt av hur ofta fel inträffar och av hur lång tid det tar att åtgärda dem. Stilleståndstiden påverkas av hur fort det går att få fram reservdelar, tillgången på underhållspersonal och transportmöjligheter, särskilt till havs. Det är naturligt att de havsbaserade verken även vid samma felfrekvens har en lägre tillgänglighet, eftersom dåligt väder kan hindra tillträdet och att det tar längre tid (och är väsentligt dyrare!) att få fram lyftanordningar mm.

Inverkan av totalhaverier

På senare tid har uppmärksamheten riktats mot ett antal fall där vindkraftverk totalhavererat. Detta kan innebära ett avsevärt problem för bilden av vindkraften som en säker och miljövänlig energikälla. Därtill är det naturligt att göra ett överslag om sådana haverier kan ha någon betydelse för vindkraftens ekonomi.

En framträdande haveriorsak är brand, ofta på grund av blixtnedslag eller elfel. Om det börjar brinna i ett vindkraftverk på ett sådant sätt att automatiska släckningssystem inte är räcker för att släcka elden, finns det inga praktiska möjligheter att komma åt branden utifrån. Verken får därför brinna ut, vilket är en spektakulär upplevelse. I Tyskland totalförstördes under det hittills värsta året 2002 åtta vindkraftverk av brand¹⁷⁵. Då var det totala antalet tyska verk omkring 12 000 och frekvensen alltså 0,07 procent.

¹⁷⁴ Anders Andersson, Styr- och mätteknik Sverige AB, personligt meddelande 2008-04-18.

¹⁷⁵ Wind Kraft Journal 3/2005

Med en normalt tjugoårig livslängd för anläggningarna motsvarar det en sänkning av tillgängligheten med i genomsnitt 0,7 procent, alltså ett inte obetydligt värde. Hittills har 2-3 vindkraftverk förstörts genom brand i Sverige (av totalt 850 år 2008), vilket ger en liknande frekvens. Ett sätt att minska effekten av en brand är att använda maskinhus av metall i stället för de gängse av glasfiberarmerad plast. På senare år har det märkts en tendens till en sådan övergång. Detta innebär även förbättringar av åskskydd och kylning.

Vindkraftsbranschen har ingen egen uppföljning av haverier med vindkraftverk i världen. Enligt en hemsida tillhörig en anti-vindkraftorganisation¹⁷⁶ inträffade mellan 1975 och 2006 sammanlagt 301 totalhaverier med vindkraftverk. Idag finns omkring 100 000 större vindkraftverk i världen. Eftersom flertalet av dessa tillkommit under senare år kan det vara rimligt att fördela haverierna på säg fem år, vilket då ger en haverifrekvens om 0,06 procent, alltså ungefär som tidigare omtalat värsta-värde för bränder.

Man kan därmed dra slutsatsen att totalhaverier på grund av brand och andra orsaker på ett märkbart sätt påverkar vindkraftens ekonomi. Förhållandet att skaderisken täcks av försäkring minskar naturligtvis inte problemet – det innebär endast en omfördelning av kostnaderna.

Felfrekvens och feltid hos olika komponenter

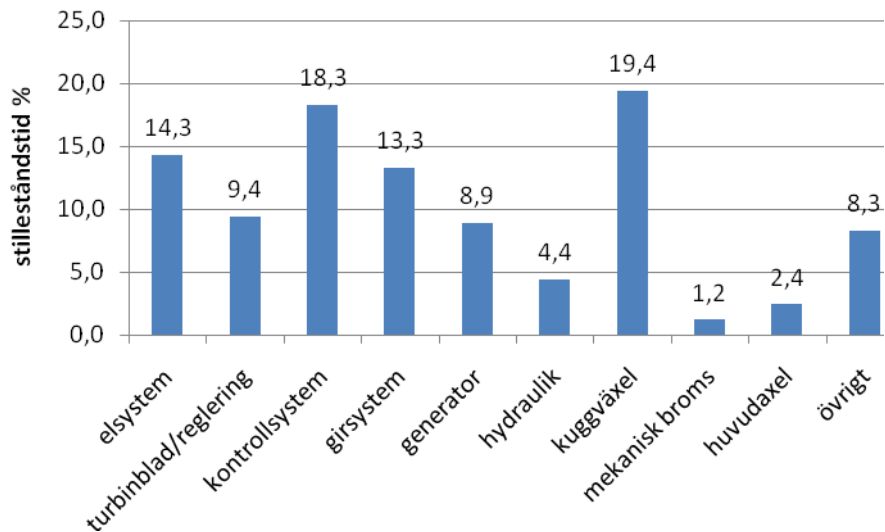
Ett vindkraftverk består av ett antal komponenter och system. Eftersom tillgängligheten avgörs av deras kombinerade felfrekvenser är det naturligt att undersöka verken komponent för komponent.

En nyligen framlagd rapport¹⁷⁷ baseras på två tyska och en dansk databas som omfattar rapportering av driften av totalt 7 000 vindkraftverk under elva år. Felfrekvensen för de olika komponenterna är, ordnat efter fallande frekvens: elnät och övrigt elsystem, turbinblad, kontrollsystem, girsystem, generator, hydraulik, kuggväxel, bladvinkelreglering, luftbromsar, mekanisk broms, huvudaxel samt slutligen övriga icke specificerade fel. Frekvensen varierar mellan 0,32 och 0,02 fel per komponent och år.

När man studerar utfallet för de olika databaserna kan man notera att komponenterna hos de äldre danska verken har den lägsta felfrekvensen. Det kan förklaras av att de är mindre komplicerat uppbyggda och av att dessa mindre verk kunde dimensioneras generöst utan större inverkan på ekonomin. Vidare ser man att generatorer, hydraulik och bromsar i vindkraftverk har en högre felfrekvens än när motsvarande komponenter används inom annan industri. En tänkbar förklaring är den svåra miljön i vindkraftverken. Räknat för hela vindkraftskollektivet hade däremot kuggväxlarna en något lägre felfrekvens än i industrin.

¹⁷⁶ www.windaction.org

¹⁷⁷ P J Tavner et al. Reliability of different wind turbine concepts with relevance to offshore application. EWEC 2008, Bryssel 30/3 – 4/4 2008.



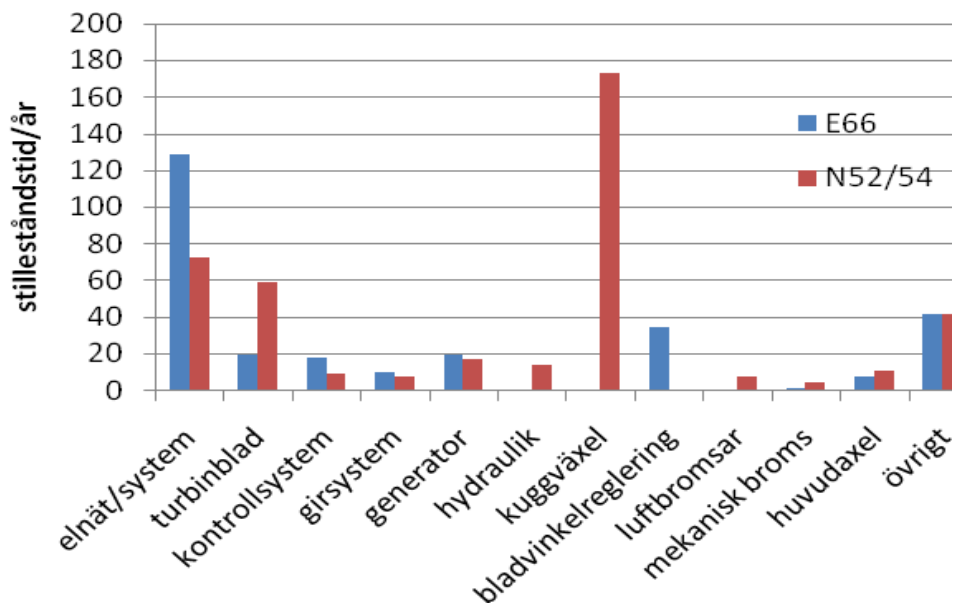
Figur 8. Procentuell fördelning av stilleståndstid för svenska vindkraftverk, grundat på bearbetade data från Ribrant och Bertling (2007).

I en annan studie¹⁷⁸ har KTH-forskarna Johan Ribrant och Lina Bertling undersökt felfrekvenser och stilleståndstider för svenska vindkraftverk, vilka under den studerade perioden 2000 – 2004 ökade i antal från 527 till 723. Resultatet sammanfattas i Fig. 8. För flertalet system är tendenserna likartade i de bägge undersökningarna. Kuggväxeln framstår som en dominerande felkälla, med 19 procent andel av stilleståndstiden. När man bedömer kuggväxlarnas betydelse ska man även ta hänsyn till att en del av verken (30 procent av de tyska¹⁷⁹, 11 procent av de svenska¹⁸⁰) består av direktdrivna vindkraftverk utan kuggväxel, vilket innebär att motsvarande bestånd utan sådana skulle få felprocenten 27 procent resp. 21 procent. Det svenska resultat påverkas också av att marknaden haft en liten tillväxt, vilket innebär att de mer tillförlitliga mindre och äldre verken svarar för en större andel av beståndet. Man kan här jämföra med resultatet från den danska databasen. I den tyska undersökningen framstår elnätet som en stor felkälla, men denna tendens finns inte i det svenska eller i det tidigare redovisade danska materialet. Denna felkälla ligger f ö huvudsakligen utanför vindkraftsteknikens inflytande.

¹⁷⁸ Johan Ribrant and Lina Margareta Bertling. Survey of failures in wind power systems with focus on Swedish wind power plants during 1997 – 2005. IEEE Transactions on energy conversion. Vol. 22, No 1, March 2007.

¹⁷⁹ C. Ender. Windenergienutzung in der Bundesrepublik Deutschland – Stand 31.12 2002. DEWI Magazin. Nr. 22, Februar 2003.

¹⁸⁰ Elforsk. Driftuppföljning för vindkraftverk, 2002.



Figur 9. Årlig stilleståndstid i timmar på grund av fel i olika komponenter för det direktdrivna E66 (blått) och det växlade N52/54 (rött), grundat på resultat enligt Tavner (2008).

Jämförelse växlat - direktdrivet

I en detaljerad undersökning studeras data ur en av de tyska databaserna avseende dels ett direktdrivet 1,5 MW vindkraftverk och dels ett 1 MW växlat. Felfrekvensen för kuggväxeln har nu ökat till drygt 0,5, dvs att den i genomsnitt håller i inte fullt två år. I det tidigare redovisade fullständiga undersökningsmaterialet var felfrekvensen 0,13 och tiden till fel därmed närmare åtta år. Värt att notera är att det aktuella fabrikatet inte figurerat påtagligt i debatten om växelskador. Genom att kombinera data för felfrekvenser och data för stilleståndstid per fel erhålls Fig. 9, där den närmast totala dominansen för kuggväxeln i stilleståndstiden framgår.

Tabell 5. Fel i kuggväxlar i vindkraftverk i Sverige 1997-2004. Enligt Ribrant och Bertling (2007).									
År	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	1997-2004
Antal fel	21	41	52	26	30	42	13	7	232
Total feltid, h	4031	2518	5061	6172	5228	12589	3987	2309	41895
Medeltid per fel, h	192	61	97	237	174	300	307	330	181
Andel av stilleståndstid, procent	9,4	5,3	7,3	15,5	13,6	33,5	14,8	17,4	14,6

Även Ribrant och Bertling har fördjupat analysen av kuggväxlar i vindkraftverk. Sammanställningen i Tabell 5 visar att 232 fel inträffade i kuggväxlar i svenska vindkraftverk under perioden 1997-2004, dvs i medeltal drabbades nästen hälften av verken. Man kan se en tendens till en nedgång av antal fel och feltid mot slutet av perioden, men medeltiden per fel har snarast ökat. Detta kan hänga samman med ökande storlekar och svårigheten att få fram nya växlar.

Storlekens inverkan

Vindkraftverken har med åren stadigt blivit allt större. Enligt Tavner (2008) har detta medfört en konsekvent ökad felfrekvens, från ett fel per år för verken på 225-250 kW till 3,5 fel per år för 1,5 MW-verken. De direktdrivna verken på 0,5 respektive 1,5 MW ligger på samma felfrekvens, 2,5 fel per år. Å andra sidan undgår de kuggväxlarnas långa feltider.

Ökningen i storlek har skett parallellt med stora forsknings- och utvecklingsinsatser. Den alltmer ökande felfrekvensen måste därmed ses som ett misslyckande.

Jämförelse med vattenkraftsteknik

För de elektriska generatorerna i vindkraftverken, såväl snabbgående (växlade) som direktdrivna, är felfrekvensen i det tyska materialet drygt 0,1 fel per år, enligt Tavner (2008). I industritillämpningar har snabbgående generatorer en felfrekvens av 0,05 fel per år. Detta kan jämföras med statistiken för generatorer i vattenkraftverk. Enligt en sammanställning¹⁸¹ inträffade under en tioårsperiod 69 felfall för 1 199 generatorer om totalt 48 692 MVA (medelstorlek alltså ca 40 MW). Detta innebär en felfrekvens om 0,006 fel per år och generator eller omkring en tjugonedel av motsvarande för vindkraftverkens generatorer och en tiondel av felfrekvensen för generatorer i industrin. Uppenbarligen har vindkraften en lång väg att vandra innan dess anläggningar kommer i närheten av den tillförlitlighet som tas för given inom vattenkraften.

Vindkraft liknar vattenkraft på det sättet att processen sker vid normala temperaturer och låga hastigheter, om än att vindkraften utmärks av ett stort antal belastningsvariationer som orsakar utmattning. På sikt borde vindkraftstekniken kunna utvecklas till samma låga felfrekvens och höga tillgänglighet som sedan lång tid gäller för vattenkraften.

Tillståndsbaserat underhåll

Underhåll kan vara förebyggande eller avhjälpande (reparation). Typiskt genomförs ett planerat förebyggande underhåll av vindkraftverk två gånger per år. Som ett alternativ eller komplement framförs numera möjligheten att basera underhållet på det faktiska tillståndet hos enheten. För en kuggväxel kan man tänka sig att övervaka vibrationsnivå och oljans kondition, partikelhalt mm. Potentiella fördelar är att man kan upptäcka och åtgärda en

¹⁸¹ J L Garcia Araco (Spain). Cigré Working group A1.02. Survey of hydrogenerator failures. Study committee SC 11, EG11.02 Hydrogenerator failures. 14/08/03.

skada innan den gått för långt och att man även kan undvika onödiga underhållsinsatser. Inom ett Elforsk-projekt¹⁸² har en förstudie beträffande förutsättningarna för ett tillförlitlighetsbaserat underhåll av vindkraftverk genomförts. System för tillståndsovervakning, Condition Monitoring System (CMS) finns i praktisk drift i vindkraftverk i speciellt Tyskland men ännu inte i Sverige. De flesta har utvecklats av företag fristående från vindturbinleverantörerna. En slutsats från projektet är att det lönar sig att införa system för tillståndsovervakning om man därmed kan höja tillgängligheten med 0,4 procent.

European Wind Energy Technology Platform

European Wind Energy Technology Platform understryker att drift och underhåll blir alltmer kritiskt med större verk och vindkraft till havs. Som mål för området anges att optimera underhållsstrategierna i syfte att höja tillgänglighet och tillförlitlighet. Exempel på föreslagna forskningsområden:

- Identifiering av fel genom indikering av de fysiska effekterna av fel i vindturbinens komponenter.
- Integrering av tillståndsovervakning och felprediktering i turbinernas kontrollsystem.
- Utveckling av underhållsstrategier som inbegriper förebyggande, felfrekvensbaserade inspektioner med användning av tillståndsovervakning.

Betydelsen av Vindforsks projekt

Utfallet av drift och underhåll har stor ekonomisk betydelse för ägaren av vindkraftverken, direkt genom kostnaderna det representerar och indirekt genom potentialen att öka produktionen genom förbättrad tillgänglighet.

Trots de påtalade bristerna utgör Elforsks projekt för driftsuppföljning en betydande källa till information om hur vindkraftverken fungerar i praktiken. Anslutningsgraden är fortfarande hög om än sjunkande till följd av att den obligatoriska rapporteringen har upphört för nya verk. I ett flertal andra länder förekommer ingen öppen rapportering, till nackdel för alla.

De genomförda forskningsprojekten har gett tillämpbara resultat och förefaller stå sig väl internationellt.

14.3 Framtida utveckling

Oavsett i vilken utsträckning man anser att en uppföljning av driftsresultaten hos de befintliga vindkraftsanläggningarna har en vetenskaplig karaktär är den en helt nödvändig grund för att man ska kunna utveckla vindkraftstekniken mot ökad tillgänglighet och sänkta underhållskostnader.

¹⁸² Lina Bertling, Thomas Ackermann, Julia Nilsson och Johan Ribrant. Förstudie om tillförlitlighetsbaserat underhåll för vindkraftsystem. Fokus på metoder för tillståndskontroll. Elforsk rapport 06:39. Maj 2006.

Ytterligare sådant arbete kan innebära vidareutveckling av underhållsmetoder och att specifikt utveckla metoderna för att dimensionera kuggväxlar.

Driftsuppföljning

Den självklara grunden för att genomföra åtgärder som förbättrar driftsresultatet och begränsar underhållskostnaderna är sålunda att känna till hur verkligheten ser ut. Uppföljningen av produktion, tillgänglighet och felorsaker hos de befintliga vindkraftverken är därför central. Erfarenheten visar att rapportering och resultatbearbetning inte har fungerat tillfredsställande. Dessa måste därför förbättras, troligen så att alla vindkraftsägare via certifikatsystemet åläggs att rapportera produktion, lämpligen via det automatiska rapporteringssystemet, och att därutöver en mer begränsad krets särskilt motiverade ägare delger de mer detaljerade driftserfarenheterna.

Underhållsmetoder

Den tidigare översikten visar att det finns goda möjligheter att genom olika systematiskt utformade underhållsmetoder förbättra driftsresultaten och begränsa kostnaderna. Detta arbete bör fortsätta.

Dimensionering av kuggväxlar

Kuggväxlarna svarar för en stor och därtill ökande andel av feltiden hos vindkraftverk. Även om ansvaret primärt ligger hos leverantörer av växlar och vindkraftverk är det motiverat att på olika sätt försöka förbättra situationen. Man bör undersöka tidigare förbisedda orsaker till stora laster och därmed förtida förslitning. Ett exempel är de spänningspendlingar som orsakas av vakuumbrytare och som i elsystemavsnittet anges som en trolig orsak till haverier hos generatorer och transformatorer.

Appendix 1A: Projektlista för det tillämpade programmet:

Projekt-nummer	Projekttitel	Utförare	Projektledare	Övriga deltagare i projektet (ej fullständig lista)	Utgiven rapport
V-101	ASP-Anslutning av vindkraftverk	Elforsk	Åke Larsson, Vattenfall power Consultant	Richard Larsson, Vattenfall power Consultant	ASP, Anslutning av större produktionsanläggningar till elnätet, Elforsk rapport 06:79
V-102	Vindkraftstatistik – Driftuppföljning 06-07	Vattenfall power Consultant	Nils Eric Carlstedt		Elforsk rapport 07:14, Elforsk rapport 08:26
V-103	Standardisering IEC TC88	Vattenfall Vindkraft AB	Jan Blix		
V-104	System med stor andel vindkraft – IEA-A25	Elektriska Energisystem KTH	Lennart Söder	Mikel Amelin m.fl.	
V-106	Havsbaserad vindkraftsteknologi – IEA-A23	Chalmers, Institutionen för energi och miljö	Ola Carlson		
V-107	Samkörning av vindkraft och vattenkraft	Skellefteå Kraft	Stefan Skarp	Fredrik Öhrvall	Samkörning av vindkraft och vattenkraft i Skellefteälven, Rebnis och Sädva vattenkraftstationer samt Uljabuouda vindkraftpark, Elforsk rapport 07:18

Projekt-nummer	Projekttitel	Utförare	Projektledare	Övriga deltagare i projektet (ej fullständig lista)	Utgiven rapport
V-108	Design av elsystem havsbaserade vindkraftparker	Vattenfall power Consultant	Michael Lindgren	David Söderberg, Anton Dahlgren	Design av elsystem för havsbaserade vindkraftparker, Elforsk rapport 08:14
V-110	Analys av transienter i kabelsystem - del 2	ABB	Ambra Sannino	Henrik Breder	
V-114	Vindindex	Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet	Hans Bergström		
V-115	Analys av vindkarteringen, nedskalning av resultaten	Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet	Hans Bergström		
V-118	Tillförlitlighetsanalys av elsystemet inom en havsbaserad vindkraftpark med AC subtransmission	STRI	Bengt Frankén		Elforsk rapport 07:65 Reliability Study, Analysis of Electrical Systems within Offshore Wind Parks

Projekt-nummer	Projekttitel	Utförare	Projektledare	Övriga deltagare i projektet (ej fullständig lista)	Utgiven rapport
V-120	Meteorologiska mätningar i höga master	Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet	Hans Bergström		Meteorologiska mätningar i höga master Vindforsk teknikrapport 1:08
V-121	Driftsikkerhet for vindturbiner	SINTEF, Norge	Arnt Ove Eggen		
V-123	Next generation design tool for optimization of wind farm topology and operation - TOPFARM	Teknikgruppen AB	Ingemar Carlén		
V-129	Metod för att testa vindkraftverks förmåga att uppfylla krav från nätägare och systemansv.	Gothia Power AB	Evert Agneholm	R. Ottersten, A. Petersson, L. Messing	Framtagning av metod för att prova vindkraftverks förmåga att uppfylla svenska nätanslutningskrav, Elforsk rapport 07:41
V-132	Stora mängder vindkraft, - förändrade marknadsförhållanden?	Vattenfall Research and Development	Viktoria Neimane	Fredrik Carlsson	A massive introduction of wind power Changed market conditions?, Elforsk report 08:41
V-135	Framtagning av en enhetlig metodik för beräkning av nätnytta från vindkraftverk	Gothia Power AB	Daniel Karlsson	Morten Hemmingsson	Nätnytta från vindkraft, Elforsk rapport 07:42

Projekt-nummer	Projekttitel	Utförare	Projektledare	Övriga deltagare i projektet (ej fullständig lista)	Utgiven rapport
V-138	Dynamiska prestanda för en HVDC-ansluten vindkraftpark	Gothia Power AB	Andreas Peterson	Massimo Bongiorno	DC Connected Wind Farm Evaluation of Dynamic Performance, Elforsk rapport 08:44
V-139	Vindkraft i framtiden	Vattenfall power Consultant/Profu	Peter Blomqvist	Mats Nyborg och Daniel Simonsson, Vattenfall Power Consultant, Håkan Sköldberg, Thomas Unger, PROFU	Vindkraft i framtiden, Möjlig utveckling i Sverige till 2020 Elforsk rapport 08:17
V-140	Policy - kallt klimat	WindRen	Göran Ronsten		
V-143	Framtagning av metod för att testa vindkraftverks förmåga att uppfyllasvenska nätanslutningskrav	Gothia Power AB	Evert Agneholm		
V-144	Modellering och mätning på 2MW DFIG-verk med Ride-Throughutrustning (tidigare V-234)	Chalmers, Institutionen för energi och miljö	Torbjörn Thiringer		
V-150	Konsekvenser av ökande andel DG på elkvalitet	STRI	Math Bollen	Yongtao Yang	Power quality and reliability in distribution networks with increased levels of distributed generation, Elforsk report 08:39
V-151	Synoptiska nedisningsmätningar	Saab Security	Patrik Jonsson		

Projekt-nummer	Projekttitel	Utförare	Projektledare	Övriga deltagare i projektet (ej fullständig lista)	Utgiven rapport
V-153	Utbredning av is på vindkraftverk efter detektering	HoloOptics	Rolf Westerlund		
V-157	Optimal Lösning för DC-koppling i HVDC Vindpark för att Etablera Aktiva Gränssnitt till Elnätet	STRI	Fainan Hassan	Mikael Wämundson	
V-158	IEA Kallt klimat + förstudie nedisningskartering	WindREN	Göran Ronsten		Mapping of Icing for Wind Turbine Applications, A Feasibility Study, Elforsk rapport 2008:75
V-164	Ljudemission och ljudutbredning för vindkraftverk i skogsterräng	ÅF-Ingemansson AB	Martin Almgren		

Appendix 1B Projektlista för det grundläggande programmet:

Projekt-nummer	Titel	Utförare	Projektledare/ Handledare	Doktorand/ Forskare	Rapport
V-201	Ljudspridning kring havsbaserade vindkraftverdel 2	KTH	Mats Åbom	Mathieu Boué	KTH-rapport. LONG-RANGE SOUND PROPAGATION OVER THE SEA WITH APPLICATION TO WIND TURBINE NOISE, TRITA-AVE 2007:22 ISSN 1651-7660, Mathieu Boué
V-202	Minimering av kostnaderna för reservkraft i integrerade kraftsystem med mycket vindkraft	KTH	Lennart Söder	Elin Lindgren	
V-204	DC/DC-omriktare i vindkraftparker	Chalmers	Ola Carlson	Lena Max	Lic-rapport: Energy Evaluation for DC/DC Converters in DC-Based Wind Farms, LENA MAX, 2007
V-208	Ny topologi för mer effektiva AC/DC omriktare till framtida havsbaserade vindkraftparker	KTH	Hans-Peter Nee	Stephan Meier	
V-210	Optimal underhållsstyrning med tillståndskontroll- system med avseende på tillförlitlighet och kostnad	KTH	Lina Bertling	Francois Besnard	
V-215	Strategier för lokal samkörning mellan vindkraft och vattenkraft	KTH	Lennart Söder	Julija Matevosyan	Avhandling: Windpower integration in power systems with transmission botleneks JULIJAMATEVOSYAN, 2006

Projekt-nummer	Titel	Utförare	Projektledare/ Handledare	Doktorand/ Forskare	Rapport
V-216	Analys av dynamiska inverkan av stora vindparker på kraftsystemets stabilitet	KTH	Lennart Söder	Katherine Elkington	
V-218	Vindparksdesign för HVDC-ansluten vindpark	Chalmers	Torbjörn Thiringer	Stefan Lundberg	
V-219	Numeriska beräkningar av vakar bakom vindturbiner	KTH	Dan Henningson	Stefan Ivanell	
V-220	Analys av högfrekventa elektriska svängningar i parker	Chalmers	Torbjörn Thiringer	Tarik Abdulohovic	
V-223	Höghållfasta torn vindkraftverk	Luleå Tekniska Universitet	Milan Veljkovic	Milan Veljkovic	
V-225	Konstruktiv utformning av kustnära fundament utsatta för islaster	Luleå Tekniska Universitet	Lennart Fransson	Björnar Sand	
V-228	Maskering av ljud via vindinducerat bakgrundsbuller	KTH	Mats Åbom	Karl Bolin	Lic-rapport: Masking of Wind Turbine Sound, by Ambient Noise, Karl Bolin, KTH 2006
V-233	Prediktering av vindkraftbuller baserad på detaljerad meteorologisk och geografisk information	FOI	Ilkka Karasalo	Mats Åbom, Karl Bolin KTH, Alex Cederholm Brodd Leif Andersson, FOI	
V-238	Ny teknologi för avisning av vindkraftvingar	Högskolan Halmstad	Lars Bååth	Hans Löfgren	