



# Vindkraft

## till lands och till sjöss

EN FAKTARAPPORT INOM IVA-PROJEKTET ENERGIFRAMSYN SVERIGE I EUROPA

# Innehåll

Sammanfattning . . . . .	I
Vindkraften – ett värdefullt komplement . . . . .	2
De viktigaste drivkrafterna . . . . .	2
Vindkraftens fysikaliska svaghet . . . . .	4
Vindkraften i dag och i morgon . . . . .	6
Mer vindkraft till havs . . . . .	7
Teknik och principiell uppbyggnad . . . . .	8
Utvecklingstrender och ny teknik . . . . .	11
Högre och lättare . . . . .	11
Högre verkningsgrad . . . . .	12
Likström prövas . . . . .	13
Vindkraftens prestanda . . . . .	14
Begränsat utnyttjande . . . . .	14
Vindkraftens kostnader och subventioner . . . . .	17
Kostnaderna kan pressas . . . . .	17
Skatter, bidrag och subventioner . . . . .	18
På eget fundament . . . . .	18
Referenser . . . . .	20
Klarare budskap om vindkraft Kommentar av Staffan Engström . . . . .	21

**Utgivare** Kungliga ingenjörsvetenskapsakademien, IVA

**Bearbetning** Maria Holm och Miljöordet, Anne Laquist

**Grafisk form** Stefan Lundström, Blue media AB

**Omslagsfoto** Gunnar Britse

**Tryck** Multitryck, Eskilstuna, 2002.

**För tryckning och distribution** ansvarar Statens energimyndighet.

**Rapporterna kan beställas** från Energimyndigheten, Box 310, 631 04 Eskilstuna och via hemsidan [www.stem.se](http://www.stem.se)

# Sammanfattning

Vinden är gratis, förnybar och tekniskt tillgänglig för elproduktion. Rätt placerad och genomtänkt konstruerad kommer vindkraften utgöra ett betydelsefullt komplement i elförsörjningssystemet.

Vindkrafttekniken har tydliga skalfördelar. Stora vindkraftverk har väsentligt högre elproduktion än mindre verk vid samma installerade effekt.

Genom teknisk nyutveckling går det att konstruera robusta, enkla och driftsäkra vindkraftverk som kan placeras såväl ute till havs som i fjällen. Där är vindförhållandena särskilt gynnsamma, vilket underlättar för verken att leverera el till kommersiellt konkurrenskraftiga priser.

Vindkraften är beroende av andra energikällor om den ska kunna utnyttjas effektivt. Vindkraftverk eller vindkraftsparker är inte isolerade enheter, utan delar av och i samspel med ett större energisystem.

Dagens lösningar är varken ekonomiskt eller fysikaliskt optimala. Genom nya innovationer och djärvare forskning än dagens, finns det plats för stora tekniksprång.

Vindkraften är miljövänlig men inte oproblematiske. Vid uppförande av vindkraftverk eller vindkraftparker bör deras direkta och indirekta påverkan på växt- och djurliv minimeras. Människors synpunkter på placeringar bör beaktas nog.

Vindkraften kan aldrig vara ett alternativ till reglerbar kraft, men den kan ingå som en viktig del i ett modernt elkraftsystem. En ökad andel vindkraftproduktion inom Nordel (det nordiska elsystemet) innebär att framför allt produktionsanläggningar som producerar elenergi med ett prissatt bränsle blir utkonkurrerade.

Vid en stor utbyggnad av ej reglerbara förnybara

ra källor, såsom vindkraft, är vattenkraften med dess lagringskapacitet en utomordentligt viktig nyckel för hela elkraftsystemet.

**Rapporten är framtagen** för IVA-projektet Energi-framsyn av professor Mats Leijon, Uppsala universitet. Den har granskats av departementsrådet Kjell Svensson, miljödepartementet, och civilingenjör Staffan Engström, Nordic Windpower AB. Staffan Engström har skrivit en särskild kommentar.

Synpunkter på rapporten har inhämtats via projektets hemsida.

Mats Leijon är tekn. dr från Chalmers och sedan år 2000 professor i elektricitetslära vid Uppsala universitet. Under 13 år arbetade han i industrin på ABB Corporate Research. Under slutet av 1990-talet utvecklade han tillsammans med sitt team en rad elektromagnetiska produkter.

Kjell Svensson är departementsråd på miljödepartementet och har där bland annat ett övergripande ansvar för vindkraftsfrågor. Han är ordförande i en interdepartemental arbetsgrupp för behandling av förutsättningarna för lokalisering av vindkraftverk i havs- och fjällområden och har som särskild utredare haft regeringens uppdrag att studera lokaliseringsförutsättningarna för vindkraftverk.

Staffan Engström är civilingenjör, maskinteknik, KTH, och har sedan 1975 arbetat med vindkraft vid Nämnden för energiproduktionsforskning, Statens Energiverk, Nordic Windpower samt som konsult. Han har varit ordförande för IEA R&D Wind, verkat som expert åt EU samt deltagit i en rad utredningar och styrelser.

# VINDKRAFTEN

## – ett värdefullt komplement

Vinden är förnybar och gratis men dagens teknik för att omvandla den till elenergi är fortfarande relativt dyr. Om kostnaderna minskas, kan vindkraften bli ett värdefullt komplement till övrig elproduktion i ett framtida ekonomiskt och ekologiskt uthålligt energisystem. Den kommer tidsmässigt lämpligt in i det svenska elsystemet när efterfrågan på el växer.

**Oron för** avtagande naturresurser, miljöpåverkan och problem med lagring av bränsle och avfall har länge riktat intresset mot teknik som utnyttjar förnybara energikällor. Av dessa växer vindkraften i särklass snabbast men vad beträffar energiproduktion ligger den fortfarande långt efter alla andra kommersiellt utnyttjade energislag.

**Vindenergi uppkommer** genom att i genomsnitt 0,7 procent av solinstrålningen mot jorden omvandlas till rörelser i luftmassan. Jordens vindar innehåller väldiga mängder energi. Rent teoretiskt skulle de årligen kunna leverera 15 gånger världens nuvarande energibehov.

Liksom för övriga förnybara energikällor – med undantag för vattenkraft som naturligtvis också är förnybar men som räknas i en egen kategori i internationell statistik – är elproduktionen från vindkraft ännu försumbar i ett globalt perspektiv. Om vindkraften år 2020 ska sörja för 10 procent av världens elbehov, uppskattar IEA att kostnaderna måste minskas med 30-50 procent jämfört med dagens nivåer. Det behövs därför mer forskning och utveckling, mer nytänkande och mer av teknisk effektivisering.

Utvecklingen har dock gått mycket fort. I praktiken har vindkraftsutbyggnaden bara pågått sedan början av 1990-talet, men:

- i Danmark svarade den 2001 för cirka 16 procent av landets elproduktion och målsättningen till år 2030 är 50 procent;

- i Tyskland, som har den särklassigt största utbyggnaden av vindkraft i absoluta tal, kommer 2 procent av dagens el från vindkraft;
- på Gotland är motsvarande siffra så hög som 18 procent (medan vindkraftens andel av den totala svensk elproduktionen år 2001 bara var 0,29 procent eller 0,45 TWh);
- i den energipolitiska proposition som regeringen i mars 2002 lämnade till riksdagen föreslås ett nationellt planeringsmål för vindkraften om 10 TWh till år 2015.

**Utbyggnaden styrs** av ekonomiska faktorer och de viktigaste drivkrafterna bakom den mycket snabba utbyggnad som just nu pågår är:

- stigande bränslepriser för andra energikällor som olja och gas,
- fallande produktionskostnader för vindel (80 procent sedan mitten på 1980-talet),
- olika former av subventioner, vilka i sin tur är ett ekonomiskt uttryck för politiska åtaganden om kärnkraftsavveckling och koldioxidtak.

Vindkraften har en fördel i att vinden är gratis. Bränslepriset är noll och kommer så att förbli och det finns ingen risk för framtida prishöjningar. Vinden medför heller inte några transport- eller avfallshanteringskostnader.

Andra faktorer som styr utbyggnaden är miljö- och byggnadstillstånd m m, liksom medborgarnas inställning och andra aspekter som berör förhållandet mellan teknik och samhälle.

Den speciella omständigheten att vinden inte kan styras påverkar också dess konkurrenskraft eftersom det ger den en särställning bland kommersiella tekniker för elproduktion.

**Miljöhänsyn och** stigande bränslepriser, eller åtminstone oron för på sikt kraftigt höjda priser för



**Vindkraft kan påverka djurlivet men mer forskning på området krävs. Särskilt gäller det förhållandena till havs. Foto: Gunnar Britse.**

fossila bränslen, var även historiskt de viktigaste faktorerna bakom den moderna utvecklingen av vindkraftverk. När det gäller miljöprestanda har vindkraftverk större fördelar än någon annan i dag tillgänglig kommersiell energiteknik.

Vinden förnyas ständigt och vid normal drift förekommer inga utsläpp till omgivningen. Efter demontering lämnar ett vindkraftverk i stort sett inga fysiska spår efter sig och kan återvinnas som skrot (en kvarvarande påverkan kan dock finnas till följd av följdinvesteringar i form av vägar och kraftledningar). I detta sammanhang brukar man kalla vindkraften »ärlig«, eftersom den inte har några dolda miljökonsekvenser som t ex koldioxidutsläpp eller radioaktivt avfall.

**Men vindkraften är inte problemfri** vad gäller ef-

fekter på omgivningen. Närmiljön påverkas av ljudemissioner från vindkraftverken och landskapsbilden förändras till följd av verkens ofta dominerande storlek. Kraftverkens blad kan ge reflexer och skuggeffekter. Torn och rotorblad kan i vissa fall störa tv, radio, radiolänk, radar, försvarets signalspanningssystem och satellitkommunikation.

Genom väl vald lokalisering kan de flesta av dessa olägenheter och störningar undvikas, särskilt om vindkraftverken förläggs till havs.

Generellt är det många frågor och intressen som behöver beaktas vid överväganden om lokalisering av vindkraft. Förutom de krav anläggningarna ställer på bl a geografiska förutsättningar och infrastruktur, måste olika natur- och kulturintressen, annan mark- och vattenanvändning och

störningar för andra verksamheter vägas in i beslutet.

**Flera internationella** undersökningar ger stöd för påståendet att vindkraften inte allvarligt stör fågel- eller annat djurliv. En viss påverkan kan dock i många fall konstateras, varför mer forskning på området är motiverad.

Undersökningarna rör främst vindkraftverk på land. Ett nyttjande av vindkraften i stor skala i Sverige innebär att utbyggnad i fjäll- och havsområden kommer att aktualiseras i allt större utsträckning. Här finns goda vindförutsättningar men erfarenheterna av storskalig utbyggnad i dessa områden är ringa och kunskaperna om stora vindkraftsanläggningars effekter på omgivningen långt ifrån tillräckliga.

För att kunna bedöma effekterna på flora och fauna behöver systematiska studier göras i anslutning till uppförda anläggningar. Särskilt gäller detta havsbaserade vindkraftverk, för vilka erfarenheterna ännu är mycket begränsade. De kunskaper som förvärvats inom annan offshoreindustri är ofta inte relevanta.

**Fallande produktionskostnader** och subventioner är de mer påtagliga ekonomiska faktorer som i dag driver utvecklingen framåt. Produktionskostnaden för vindel har fallit med cirka 80 procent från mitten av 1980-talet. Teknisk utveckling, till-

verkning i långa serier och större anläggningar ligger bakom kostnadsminskningarna.

För nyinstallerad vindkraft brukar elproduktionskostnaden utan skatter och bidrag anges till 30-40 öre/kWh beroende på lokalisering och vindläge. Ett ofta angivet pris är 36 öre/kWh (2001). Det är mer än i äldre kol- eller naturgasbaserade kraftverk och väsentligt mer än vad vattenkraft kostar att producera i befintliga verk. Jämfört med produktionskostnaden i nya anläggningar för vattenkraft, biobränsle, kol och naturgas är dock 36 öre/kWh konkurrensdugligt.

När skatter och bidrag tas med i beräkningen, förändras bilden radikalt. Då blir vindkraft klart billigast. Om alla subventioner tas med, också de som sällan uppmärksammas, hamnar produktionskostnaderna till och med under noll (se vidare sid 18).

Detta avser specifikt svenska förhållanden, som enligt regeringens energiproposition (prop. 2001/02:143) kommer att ändras fr o m 1 januari 2003 då nya stödregler föreslås träda i kraft. I USA är ersättningen per producerad kilowattimme (kWh) vindel lägre än den nu gällande i Sverige. I Tyskland och Spanien är såväl ersättningen som elpriserna väsentligt högre, varför det inte är förvånande att vindkraften för närvarande växer snabbast i just dessa länder.

#### **VINDKRAFTENS FYSIKALISKA SVAGHET**

Vinden från en blåsig period kan inte lagras för att släppas på igen när vinden mojar. Därmed är vindkraften inte heller reglerbar under årets alla timmar, vilket är vindkraftens (och andra oreglerbara energikällors) stora svaghet i förhållande till vattenkraft, biobränsle, fossila bränslen och kärnkraft.

Elbehovet kan således aldrig garanteras med vindproducerad el. Dock blåser det mer under den kalla årstiden (oktober-april) då elbehovet är som störst.

Därtill är vinden nyckfull. Med dagens tekniska lösningar kan man inte utnyttja vindenergin vid vindstyrkor under ca 3-4 m/s eller över ca 25-26 m/s. Också när det blåser ändrar vinden hela

#### **Elproduktion och maxeffekt**

Årsproduktionen från ett vindkraftverk eller en grupp av vindkraftverk är väsentligt mycket lägre än för andra tekniker vid samma maximala effekt, s k märkeffekt. Förenklat uttryckt betyder detta att man per år får ut mycket mer elektricitet till nätet av 1 000 MW installerad vattenkraft än av 1 000 MW installerad vindkraft, och jämförelsevis ännu mycket mer från 1 000 MW installerad naturgasbaserad kondenskraft.

Kärnkraften är dyrast att reglera, varför all kärnkraft går som »basproduktion« och därför producerar el vid maximal effekt under flest timmar per år. Det krävs ungefär 4 MW installerad effekt vindkraft för att producera lika mycket energi under ett år som 1 MW installerad effekt kärnkraft, och siffran är densamma för naturgas. För vattenkraften är samma förhållande ca 3:1 under ett år med normala nederbörds-mängder.

tiden styrka och riktning lite grand, varför elproduktionen från ett vindkraftverk i princip alltid varierar. Det finns elektriska anslutningskrav föreslagna för parker upp till 150 MW, men inte däröver.

**Vindkraften måste** alltså samverka med en stabil lagrings- och reglerbar energikälla. Detta är fullt möjligt i ett större energisystem, förutsatt att vindkraften utgör en mindre del av det totala systemet. Vindkraften kan då lagras indirekt genom att man drar ner på produktionen av t ex vattenkraft,

kolkondens eller naturgasbaserad kraft när vindförhållandena är gynnsamma.

Med avseende på resursförbrukning och utsläpp till miljön är vindkraft och vattenkraft en ideal kombination. Vattenkraft är den enda energikälla som är både regler- och förnybar. Sverige har gott om vattenkraft som till viss del kan regleras och som sannolikt skulle kunna utnyttjas betydligt bättre om befintliga anläggningar anpassades och uppgraderades med modern teknik. Även pumpkraftverk kan i framtiden bli viktiga komplement i Sverige.



### Liten tillbakablick

Drömmen om att behärska naturkrafterna är djupt rotad hos människan. Solen och elden, vinden och vattnet är centrala motiv i gudasagor och skapelsemyter från hela världen.

Vindens rörelseenergi har länge varit i människans tjänst. Redan 3 000 år före vår tideräkning seglade egyptierna med odäckade och spantlösa, kravellbyggda råseglare. Omkring 1 000 år senare togs de första kända väderkvarnarna i bruk i Kina och Japan. Till Europa kom de på 1200-talet och till Sverige på 1330-talet.

I USA introducerades på 1880-talet vindhjulet eller vindrosen – en mångbladig vindsnurra bekant från otaliga västernfilmer – som användes för att driva vattenpumpar. Vindhjulet har tillverkats i många miljoner exemplar och är i viss utsträckning fortfarande i bruk.

Den vetenskapligt baserade utvecklingen av vindkraftverk för produktion av elektricitet inleddes på 1890-talet. Föregångsman var den danske fysikern Poul la Cour (1846-1908) och på 1910-talet var flera hundra vindkraftverk i drift i Danmark. Märkeffekten låg på 5-25 kW, att jämföra med dagens kommersiella vindkraftverk som har en märkeffekt på upp till 2 MW.

Även i Tyskland och andra europeiska länder utvecklades vindkraftverk fram till 1960-talet. Efter oljekrisen 1973 återupptogs forskningen och efterhand började allt större vindkraftverk produceras för kommersiellt bruk.

Det svenska vindkraftsprogrammet startade år 1975. I Sverige byggdes de stora försöksanläggningarna vid Maglarp i Skåne (3 MW) och Näsudden på Gotland (2 MW) som togs i drift år 1982-1983. Näsudden II (3 MW) togs i drift år 1993.

**Gotländska Matilda, eller Näsudden II som verket formellt heter, är med sina 3 megawatts märkeffekt ett av världens största vindkraftverk. Verken i förgrunden är på 660 kW vardera. Foto: Gunnar Britse.**

# Vindkraften i dag och i morgon

**Under 1990-talets andra hälft fick vindkraften på allvar kommersiell vind i bladen. Den starka tillväxten bedöms fortsätta under det kommande decenniet. Europa har dominerat utvecklingen och denna dominans kommer sannolikt att bestå. Mycket talar för en framtida utbyggnad till havs.**

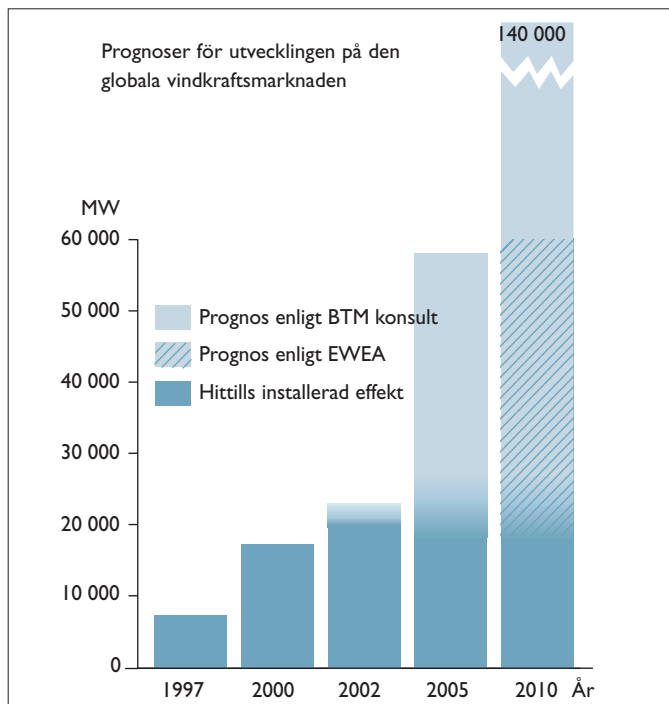
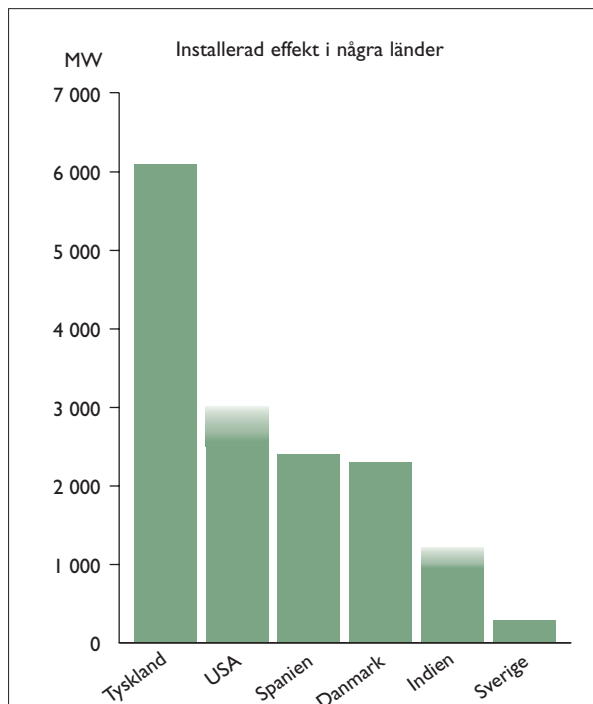
Den kommersiellt inriktade utbyggnaden av vindkraften har främst skett under 1990-talets andra hälft. Sedan dess har den årliga tillväxten legat på 30-40 procent. Vid utgången av år 2000 var den installerade vindkrafteffekten i världen (dvs den sammanlagda märkeffekten hos samtliga vindkraftverk) 17 300 MW och vid utgången av år 2001 över 24 000 MW. År 1997 var motsvarande siffra endast 7 400 MW.

Europa dominerar fortfarande utvecklingen. Danmark är i dag ledande på vindkraftsteknologi och

trea i världen beträffande installerad effekt. Den i särklass största kapaciteten har Tyskland till följd av en mycket snabb utbyggnad på senare år. Utbyggnaden har drivits på hårt politiskt med hjälp av generösa prisgarantier.

Tillväxten på den europeiska vindkraftsmarknaden har varit så stabil och stark att de europeiska vindkraftsintressenternas organisation, European Wind Energy Association (EWEA), i september år 2000 reviderade sitt tillväxtmål för år 2010 uppåt med 50 procent, från 40 000 MW installerad effekt i Europa till 60 000 MW. I den uppjusterade prognosen förväntas havsbaserade vindkraftverk eller vindparker svara för 5 000 MW. Motsvarande siffror för år 2020 är 150 000 MW installerad effekt varav 50 000 MW i havsbaserade vindkraftverk eller vindparker.

I en prognos för utvecklingen på den globala vindkraftsmarknaden under perioden 2001-2005







De sju verken vid Utgrunden byggdes år 2000. Foto: Gunnar Britse.

anser danska BTM Consult att den europeiska dominansen kommer att fortsätta. År 2005 förväntas den installerade vindkrafteffekten i världen vara 58 000 MW, där EU-länderna står för 42 000 MW. Det innebär en årlig tillväxttakt för perioden 2001-2005 på cirka 18 procent, således en fortsatt kraftig tillväxt om än inte lika stor som under 1990-talets senare hälft. Den installerade effekten i världen år 2010 uppskattas till 140 000 MW, dock med relativt stor osäkerhet.

#### **MER VINDKRAFT TILL HAVS**

När det gäller havsbaserad vindkraft är BTM Consults prognos relativt försiktig med en uppskattning av den totala installerade effekten offshore till 2 400 MW år 2005. Man påpekar dock att tillväxttakten för havsbaserad vindkraft kan

bli starkare om de första projekten faller väl ut. I det sammanhanget är den danska satsningen vid Horns Rev med planerad start våren 2002 särskilt intressant. Projektet är det första riktigt storskaliga och avser en vindpark med totalt 160 MW installerad effekt. Det kan jämföras med den ackumulerade installerade effekten i Sverige som i april 2002 var 306 MW. Den fortsatta danska utbyggnaden är i dag stoppad av den nya regeringen, då man anser att uppställda mål enligt tidsplan redan nåtts.

Erfarenheterna från de få existerande kustnära grupperna av vindkraftverk, bl a svenska Bockstigen (2,5 MW), Utgrunden (10 MW) och Yttre Stengrund (10 MW) samt danska Middelgrunden (40 MW), har visat på vissa problem. Både anläggningen vid Yttre Stengrunden och anläggning-



Utbyggnaden av vindkraft till havs befinner sig ännu i sin linda, men förutsättningarna bedöms vara gynnsamma om rätt teknik används. Här ska ett av fem verk om 2 MW upp vid Yttre Stengrund i Kalmarsund. Foto: Gunnar Britse.

en vid Middelgrunden har haft elektriska haverier.

Även om prognoserna för havsbaserad vindkraft i dagsläget måste bli ganska osäkra, råder det ingen tvekan om att intresset för att i framtiden lokalisera vindkraftsanläggningar till havs är mycket stort. Speciellt gäller detta Danmark, Sverige, Tyskland, Nederländerna och Storbritannien.

**Det finns många** vinster med en havsutbyggnad. Verken kan skalas upp kraftigt och därmed utnyttjas bättre, en fördel som kan tas tillvara utan de störningar och olägenheter som i dag är förknippade med land- eller kustnära baserade vindkraftverk.

Vindförhållandena till havs är i regel bättre än över land. Det blåser i genomsnitt hårdare, vilket gör att verken kan utnyttjas i högre grad. På land finns goda vindförutsättningar i vissa fjällområden. Möjligheterna till ett betydligt bättre utnyttjande är en av flera faktorer som tillsammans förväntas uppväga de ökade investeringskostnader det innebär att bygga vindkraftverken till havs och i fjällen. Andra faktorer är exempelvis ny elproduktionsteknik som ökar anläggningarnas verkningsgrad och sänker kostnaderna för drift

och underhåll, samt tillverkning i längre serier.

Vilken omgivningspåverkan vindkraftsparker till havs kan medföra är dock förhållandevis lite kända. Här behövs studier i anslutning till uppförda verk i olika slags havsmiljöer, främst vad gäller flora och fauna.

Energimyndigheten, Stem, bedömer förutsättningarna för havsutbyggnad som så goda att vindkraften i Sverige år 2050 skulle kunna leverera 29 TWh varav 7 TWh till lands och 22 TWh till havs. Detta kan jämföras med elkonsumtionen i Sverige som år 2001 var 150 TWh.

#### TEKNIK OCH PRINCIPIELL UPPBYGGNAD

Den vanligaste typen av moderna vindkraftverk i storleksklassen 200-1 500 kW har en vindturbin med horisontell axel och två eller tre smala blad monterade i ett nav. Den kallas »snabbblöpande», eftersom bladspetsarna rör sig med 50-100 m/s vilket är 5-10 gånger vindhastigheten.

Vinden innehåller relativt lite energi per ytenhet. Därför måste den fångas in från en relativt stor yta. Det jobbet gör vindkraftverkets turbinblad. Långa blad ger en stor svept yta och ju

större svept yta desto högre möjlig märkeffekt. Om bladen roterar relativt snabbt kan få blad täcka in den svepta ytan. Med få blad kan konstruktionen göras lättare och materialåtgången blir mindre.

Vindturbinens varvtal måste normalt ökas för att passa standardgeneratorer som oftast är gjorda för drift vid 1 500 varv per minut. Varvtalet ökas med hjälp av en växellåda. Ibland är generatorerna försedda med dubbla lindningar som gör det möjligt att även köra vid dellast och bibehålla en acceptabel verkningsgrad.

**Konventionella** vindkraftverk kräver även en transformator för att skapa den högspänning som behövs när växelströmmen som generatoren alstrar matas ut mot nätet. Transformatorn är i vissa fall inbyggd i maskinhuset.

Brytare, fränskiljare, jordare samt hjälpkraftsystem med matare och kringutrustning vid fel ingår liksom givare och sensorer för både energimätning och systemövervakning normalt i en modern energigenereringsanläggning.

Driften sköts automatiskt med hjälp av en datorutrustning, som startar anläggningen då vinden är tillräcklig och stoppar den vid storm eller om fel uppstår.

Typiskt för vindturbiner är att effekten ökar mycket snabbt med tilltagande vind. En fördubbling av vindhastigheten ger åtta gånger högre effekt. Av säkerhetsskäl måste alla vindkraftverk ha två oberoende bromssystem, t ex en aerodynamisk broms och en mekanisk skivbroms. Bromsarna ska förhindra att generatoren och verket i övrigt överbelastas vid högre vindstyrkor än de dimensionerats för effektmässigt, vanligen en bestämd hastighet i intervallet 12-14 m/s.

Verket effektbegränsas aerodynamiskt antingen med »pitch-reglering« eller »stall-reglering«. Vid pitch- eller bladvinkelreglering vrids hela eller en-

bart de yttre delarna av turbinbladen. Det medför att mer vind »blåser förbi« bladen och effekttappningen stabiliseras. Regleringen används också för att underlätta start och stopp.

**Vid stall- eller överstegringsreglering** är bladen fästa stumt i navet i en given vinkel som medför att bladen successivt tappar sin dragkraft vid högre vindhastigheter. Stallreglering kombineras vanligen med vridbara bladspetsar. De aktiveras av centrifugalkraften och ger därigenom en säker aerodynamisk nödbromsning.

På toppen av tornet sitter en elmotor för att vrida maskinhuset så att det alltid pekar mot vinden (s k girdrift). Längst upp på maskinhuset finns vindhastighetsmätare och vindriktningssgivare. De lämnar information till datorutrustningen som ställer in bladvinklar, vindriktning och bromssystem. Via datakommunikation går det att övervaka och kontrollera verket på distans.

**En horisontalaxlad** vindturbin av konventionell typ omvandlar som mest cirka 50 procent av den totala energitillgången inom den (tvådimensionella) cirkelarea som turbinen sveper till den roterande axeln. Betz' lag, som ofta citeras i detta sammanhang, anger 59 procent som ett teoretiskt högsta värde.

Verkningsgrad enligt ovan avser sålunda hur mycket av vindens energi som turbinbladen kan fånga upp. Intressantare är dock verkningsgraden vid anslutningspunkten till nätet, d v s där ägaren får betalt för levererad energi. Dagens normer anger tornbotten som mätpunkt, vilket får anses som hämmande för teknikutvecklingen och suboptimalt ur ett vindkraftperspektiv. Här kan såväl verkningsgraden höjas som kostnaderna för drift och underhåll sänkas genom att ny elproduktionsteknik utvecklas som tar utgångspunkt i helheten och inte i det enskilda vindkraftverket.

## Hur mycket el levererar egentligen vindkraftverket?

Verkningsgraden hos olika typer av vindkraftverk är i dag ett föga diskuterat område, som ännu saknar praxis. I alla andra typer av genereringsanläggningar ger leverantören normalt såväl en ekonomisk förlustvärdering som uppgifter om verkningsgrader på ingående delar och totalt. Genom att ge förlustvärdering och verkningsgradsinformation för helheten skapas klara incitament för ekonomiskt drivna tekniska effektiviseringar.

Vindkraftverkets storlek och placering har stor betydelse för hur mycket el det kan leverera. Verkets konstruktion spelar också en viktig roll för effektiviteten.

Vindkraftverkets verkningsgrad vid anslutningspunkten till nätet är en funktion av de ingående delarnas verkningsgrader och ett mått på hur mycket elenergi som generas till nätet när alla mekaniska och elektriska förluster räknats bort. Förenklat blir verkningsgraden lägre ju fler rörliga och elektriska delar som behövs för att en konstruktion ska fungera, eftersom varje sådan del i systemet alstrar mer eller mindre förluster i form av värme.

Typiska delsystem och komponenter i ett vindkraftverk är förutom turbinen: växellåda (VX), generator, halvledare och transformator (TR). Två sorters generatorer förekommer, asynkrongenerator (AG) och synkrongenerator (SG).

Synkrongeneratoren kan ha permanenta magneter (PM) och är långsamtgående. Delarnas verkningsgrader är nedan angivna i sämsta respektive bästa fall och gäller vid fullast. Såväl sämsta som bästa värdet är under stor diskussion. Det finns dessutom en rad andra generatorer och lösningar som inte diskuteras här.

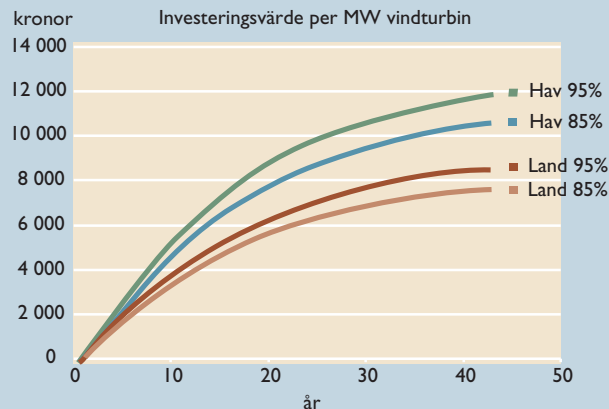
Växellåda	95-97 procent
Asynkrongenerator	88-95 procent
Synkrongenerator långsamtgående	93-95 procent
Synkrongenerator (PM) långsamtgående	97-98 procent
Halvledare:	
Diod (DI) 2001	99,5 procent
Tyristor (TY) 2001	98,5 procent
IGBT-brygga (IGBT) 2001	97 procent
Transformator (TR)	99 procent (kan vara lägre)

Ett vanligt konstruktionskoncept är växellåda, asynkrongenerator och transformator. Detta ger verkningsgraden  $VX \times AG \times TR$ , vilket i sämsta fallet innebär  $0,95 \times 0,91 \times 0,99 = 85,5$  procent. Energiförlusterna i konstruktionen är således 14,5 procent vid fullast. I bästa fall är verkningsgraden 91,2 procent, vilket innebär förluster på 8,8 procent.

Ett annat förekommande konstruktionskoncept saknar växellåda och använder sig av en synkrongenerator, två IGBT-bryggor samt transformator.  $SG \times IGBT \times IGBT \times TR$  ger i sämsta fall verkningsgraden 86,6 procent och i bästa fall 88,4 procent.

Det enklaste konstruktionskonceptet använder endast en synkrongenerator med permanenta magneter och en uppsättning dioder.  $SG/PM \times DI$  ger i sämsta och bästa fall verkningsgraderna 96,5 respektive 97,5 procent.

Även underhållskostnaderna påverkas positivt, eftersom växellåda och transformator saknas. Ett större antal ingående komponenter medför normalt högre underhållskostnader.



**Vid ett osubventionerat elpris på 30 öre/kWh, 6 procent ränta och 3 öre/kWh i underhåll (lika i alla fallen) påverkas investeringskalkylen kraftigt av verkens placering och verkningsgrad.**

# Utvecklingstrender och ny teknik

**Vindkraftverken blir större och anläggningsdelarna görs lättare för att minska material- och hanteringskostnader. Verkningsgraden förbättras successivt. Ett svenskt system byggt på likström integrerar elgenerering och kraftöverföring.**

Den kraftiga utbyggnaden under senare år har medfört att flera tillverkare i dag producerar verk i långa rationella serier. Det ökande intresset för vindkraft till havs, där det generellt sett blåser mer och jämnare än över land, är en väsentlig drivkraft i utvecklingen mot större och högre vindkraftverk. Viktigt är också att det synliga intrånget blir mindre med färre stora verk än med många små. Med verk förlagda på grunda bankar långt ute till havs, bortom horisonten, elimineras detta intrång helt i förhållande till land.

## HÖGRE OCH LÄTTARE

Vindkraftverken blir allt större. De första serietillverkade verken hade en effekt på 22 kW, i början av 1990-talet var 200 kW en typisk effekt och

numer är 500-1000 kW ett representativt värde för landbaserade vindkraftverk. Men även vindkraftverk med en märkeffekt på upp till 2 000 kW (2 MW) marknadsförs i dag av de flesta europeiska tillverkare, och någon gång efter 2005 förväntas effektstorlekar på upp till 3 MW serietillverkas. På försök har verk med upp till 4 MW effekt byggts, och flera tillverkare har utveckling på gång mot än högre effekter.

Skalfördelarna är tydliga. Verk med högre effekt kräver större turbindiametrar (svept yta), vilket i sig innebär att vindenergin kan utnyttjas bättre men också att hela konstruktionen måste göras högre. Högre verk har bättre vind och kan utnyttjas ännu effektivare, vilket i sin tur sänker elproduktionskostnaden. Att bygga kraftfullare anläggningar kommer på sikt att sänka investeringskostnaden per megawatt, vilket bidrar till lägre kapitalkostnader.

**Utvecklingen har** drivits mot lättare anläggningar. Lättare vindkraftverk minskar material- och han-



**Lättare anläggningar minskar material- och hanteringskostnader. Maskinhuset till ett av Yttre Stengrunds 2-megawattsverk väger 85 ton.**  
**Foto: Gunnar Britse.**



De havsbaserade verken kan skalas upp kraftigt. Foto: Gunnar Britse.

förhoppningar om att konstruktionen ska bli en kommersiell framgång inom kort. Dock är det svårare att få en tvåbladig turbin att uppträda på ett dynamiskt acceptabelt sätt, eftersom effekten inte är konstant i varje tidsögonblick.

Ett effektivare sätt att undvika kostnader kan vara att minska antalet ingående komponenter, vilket skulle bidra till att minska produktionskostnaderna för själva vindkraftverket och de i dag jämförelsevis mycket höga underhållskostnaderna.

#### **HÖGRE VERKNINGSGRAD**

Aggregatens verkningsgrad kommer att förbättras genom teknisk utveckling men också genom att betydelsen av högeffektiva verk synliggörs i långsiktiga kostnads- och intäktskalkyler.

Aerodynamik och vingprofiler kan göras effektivare och totala förluster i systemet minskas i en jämn men

teringskostnaderna. Ett sätt att göra verken lättare är att använda två blad i stället för tre i turbinen och att göra infästningen av turbinen till huvudaxeln ledad, s k gungbrädesnav. Vindkraftverk med två blad och inbyggda flexibla element har provats i stora vindkraftverk men tekniken har ännu inte kunnat kommersialiseras i större skala. Den svenska tillverkaren hyser emellertid stora

ganska maklig takt som pågått sedan slutet av 1980-talet.

Under de senaste åren har direktdrivna generatorer börjat introduceras. De gör att den underhållskrävande växellådan inte behövs. Generatorerna kan drivas med variabelt varvtal, vilket bl a kan minska bullret och dessutom höja elproduktionen något.

Ett svenskt systemkoncept, lanserat år 2000, bryter mer radikalt med de dominerande konstruktionsprinciperna. Systemet har tagits fram med sikte på stora havsbaserade vindkraftsparker. Det bygger på ny svensk teknik – dels överföring till kraftnätet med likström (DC), dels en helt ny typ av generator som använder rund högspänningskabel i lindningen i stället för de fyrkantiga isolerade kopparledarna som finns i en konventionell generator.

Kabellindningstekniken påverkar hela generatorns konstruktion. Mycket förenklat ger den möjligheter till att förbättra generatorns ingående delar oberoende av varandra, vilket inte är möjligt med konventionell lindning.

Även i detta fall drivs generatorn direkt vid alla varvtal utan behov av en mellanliggande kuggväxel. Direktomvandlingen av den växelström generatorn alstrar sker med halvledare (dioder) till likström. Denna används för överföringen av el mellan gruppen av verk och landstationen. Eftersom spänningen redan har höjts i generatorn behövs ingen transformator.

Generatorn är permanentmagnetiserad. Därför behövs ingen hjälpkraftmatning med tillhörande komponenter för att åstadkomma det nödvändiga magnetiska flödet.

Maskinhuset har med den nya tekniken få komponenter, vilket innebär att energiförlusterna är små och underhållet mindre samt att livslängden ökar. Kablarna gör dessutom lindningen hårdare mot hårda miljöförhållanden, något som tydligen behövs att döma av den senaste tidens kraftverkshaverier i havsmiljö.

För tillfället är projektet lagt på is.

## **LIKSTRÖM PRÖVAS**

Likströmstekniken (och även växelströmstekniken) samordnar elkraftgenerering och energiöverföring i ett system. Likström är en väl beprövad teknik och dessutom en svensk specialitet. Dess huvudsakliga fördel är att avståndet mellan statio-

nerna i princip kan var hur långt som helst, vilket inte är möjligt med växelström. Speciellt viktigt är detta vid utsjöplacering av exempelvis vindkraftverk eller vågkraftverk då sjökabel används. När normal växelspanning om 50 Hz används för överföring till landstationen, medför kabelns kapacitans (dess förmåga att lagra elektriska laddningar) att vindkraftverken i praktiken inte kan placeras längre ut från land än 10 km även om 20 km är det teoretiskt största avståndet.

Denna begränsning har således inte likströmstekniken. Tidigare har den dock bara varit ekonomiskt rimlig för överföring av stora effekter och för stora avstånd. Utveckling av likströmstekniken har emellertid lett fram till kompaktare lösningar som är kostnadseffektiva vid överföring på såväl kortare avstånd (10-150 km) som lägre belastning (40 MW och uppåt beroende på spänning). Det innebär att energianläggningar för t ex vind och vågor kan placeras enligt andra värderingsgrunder än tidigare.

**Kraftnät kan försättas** ur balans på grund av frekvensvariationer orsakade av vindkraftsparker. Eftersom vindstyrkan av naturen varierar kraftigt är sådana variationer oundvikliga. Likströmstekniken löser det problemet genom att använda just högspänd likström som ju inte har någon frekvens.

I stället för att växelströmmen matas direkt från generatorerna till kraftnätet, som i konventionella system, omvandlas den av generatorns likriktare till likström. Likströmmen matas sedan vid hög spänning via en kabel till en nätstation på land. Där omriktas den till växelström med stabil frekvens, vilket ger kraftnätet en jämnare och säkrare funktion.

Utmärkande för denna teknik är att den är väsentligt enklare och robustare än konventionell överföringsteknik och att den bygger på ett systemtänkande som tar hänsyn till vindkraftens karakteristiska variationer.

# Vindkraftens prestanda

**Om vindkraften används för basproduktion tillsammans med lagrings- och reglerbara energikällor kan den bli ett värdefullt komplement i elförsörjningssystemet.**

**Dagens vindkraftverk producerar dock högst en fjärdedel av vad som är teoretiskt möjligt. Framtida multi-MW verk, främst havsbaserade, kan komma att bli väsentligt effektiva.**

**Varken installerad** effekt eller märkeffekt säger något om hur mycket energi som de installerade vindkraftverken, tillsammans eller vart och ett för sig faktiskt producerar över en given tid. Detta gäller alla kraftverk, oavsett vilken energikälla som nyttjas, och måste således alltid vägas in när olika kraftverkstyper jämförs.

Som tidigare påpekats är elproduktionen från ett vindkraftverk ojämn och i praktiken inte möjlig att reglera. I ett större energisystem är vindkraften därför intressant enbart som ett komplement till reglerbar kraft. Med i övrigt samma förutsättningar är den »mängd« elenergi som ett vindkraftverk klarar att leverera till nätet under ett år väsentligt lägre än för reglerbar kraft. IEA uttrycker ett forskningsbehov inom området nätanslutningar och prestanda. För svenska system framför t ex Elforsk i rapporten Vindkraft 2/01 att vårt nät klarar ett bortfall av ett kärnkraftsaggregat, varför den storskaliga vindkraften – om den är geografiskt utspridd – inte är något problem.

## **BEGRÄNSAT UTNYTTJANDE**

Vindkraftverk producerar normalt el vid vindhastigheter mellan 3-4 och 25-26 m/s. Om det blåser svagare eller hårdare än så får man inte ut någon effekt alls. Maximal effekt, s k märkeffekt, brukar ligga vid en given vindhastighet i intervallet 12-14 m/s. Bara när det blåser så pass hårt att även stora träd börjar svaja, ger ett 600 kilowatts vindkraftverk 600 kW (reducerat med dess förluster) till nätet. Under eller över den för verket

optimala vindhastigheten avtar effekten ut till nätet påtagligt.

Det framhålls ofta att de svenska vindkraftverkens tillgänglighet i allmänhet är hög, drygt 98 procent, och att de producerar el upp till 7 000 timmar eller cirka 80 procent av årets 8 760 timmar. Men dessa värden är bara ett indirekt mått på vindkraftverkens energiproduktion. Det förra värdet anger de svenska standardverkens tekniska funktionsduglighet under ett år, dvs den tid turbinerna genomsnittligt inte står stilla på grund av tekniska fel. Det senare anger den tid turbinen verkligen snurrar under ett år, dvs den tid turbinen inte står stilla på grund av tekniskt fel, olämpliga vindförhållanden, inplanerat underhåll eller annat.

**Det verkligt** intressanta måttet, dvs det som gör vindkraften möjlig att jämföra med andra energikällor, är den elenergi verket levererar till nätet under ett år i förhållande till det teoretiskt högsta möjliga värdet. I den svenska vindkraftsstatistiken används måttet elenergi per installerad effektenhet (kWh/kW), vilket är samma sak men uttryckt som ett absolut tal.

Under perioden 1996-2000 utgjorde det lägsta respektive högsta årsmedelvärdet drygt 20 respektive drygt 24 procent av det teoretiskt högsta möjliga utnyttjandet.

**Vindkraftverk på land** kan normalt utnyttjas till 20-25 procent. I särskilt goda vindlägen i fjällen (Sourvadammen) är utnyttjandegraden 29 procent. Det är väsentligt mindre än vad som går att ta ut av andra kommersiellt tillgängliga energikällor. Till havs förväntas produktionen öka till uppemot 35 procent.

Kärnkraft kan utnyttjas till mer än 80 procent, naturgasbaserad kraft till omkring 80 procent och vattenkraft till omkring 60 procent under ett nor-



malår för de anläggningar som har energiproduktion som primär uppgift. Vad gäller vattenkraften varierar graden av utnyttjande med nederbörds-mängderna. Torrår kan vattenkraften inte köras lika mycket som år med mycket regn och snö. Även vindtillgången varierar från år till år på en given plats med så mycket som +/- 20 procent.

**När elbehovet stiger** utöver vad vindkraften kan leverera, måste förbrukningen balanseras med el från någon annan produktionsresurs, t ex vattenkraft. När vindkraften tvärtom levererar el till nätet utöver vad som konsumeras, balanseras effekttillskottet med en motsvarande effektminskning från den reglerbara källan i energiförsörjningssystemet som för tillfället är dyrast. På en perfekt marknad med oändliga förbindelser innebär detta en nedreglering av olje-, kol- eller naturgaseldade kraftverk eftersom just dessa blir ekonomisk utkonkurrerade på marginalen av vindkraften.

Nedreglering av vindkraften är egentligen det enda man inte kan tänka sig. Vinden är ju gratis. Eller annorlunda uttryckt: Vindkraften och vattenkraften har de lägsta rörliga kostnaderna i Nordel, vilket visar den ekonomiskt positiva sidan av förnybara källor utan bränslekostnader.

**Samkörning** är en svårighet på en fri elmarknad där de skilda kraftslagen ofta har skilda ägare. I teorin skall en avreglerad marknad klara detta. Nu finns det dock fysikaliska begränsningar i systemet i form av sk flaskhalsar med begränsad effektöverföringsförmåga.

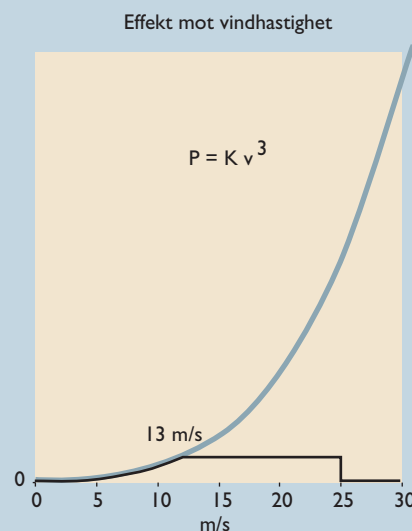
Balansering är dock helt nödvändig i elkraftsystemet. Fysikaliskt måste produktion och konsumtion i varje givet ögonblick vara lika stora för att elenergisystemet ska fungera. Denna tvingande omständighet betyder dock att vatten kan sparas i magasinen – eller olja/gas/kol sparas i lagren – när vindkraften producerar el.

Det är rent principiellt svårare att hantera situationen när vindstyrkan går över 25–26 m/s, eftersom vindkraftverken då producerar nära märkeffekten när de stoppas, än när det blåser runt 3–4 m/s och den bortfallna produktionen är liten.

## Läget avgörande

Tillgången på vindenergi är den enskilt viktigaste faktorn för ett vindkraftverks årliga elproduktion och skillnaden mellan bra och dåliga lägen är mycket stor.

Tilltagande vind ger mycket snabbt ökande effekt. En fördubbling av vindhastigheten ökar effekten åtta gånger, så om medelvindstyrkan ökar från 7 till 8 m/s kan det ge 25 procent mer el. Det är alltså viktigt att hitta platser med höga vindhastigheter utan hinder som kan orsaka turbulens, där stora anläggningar kan byggas helst utom syn- och hörhåll från bebyggelse.

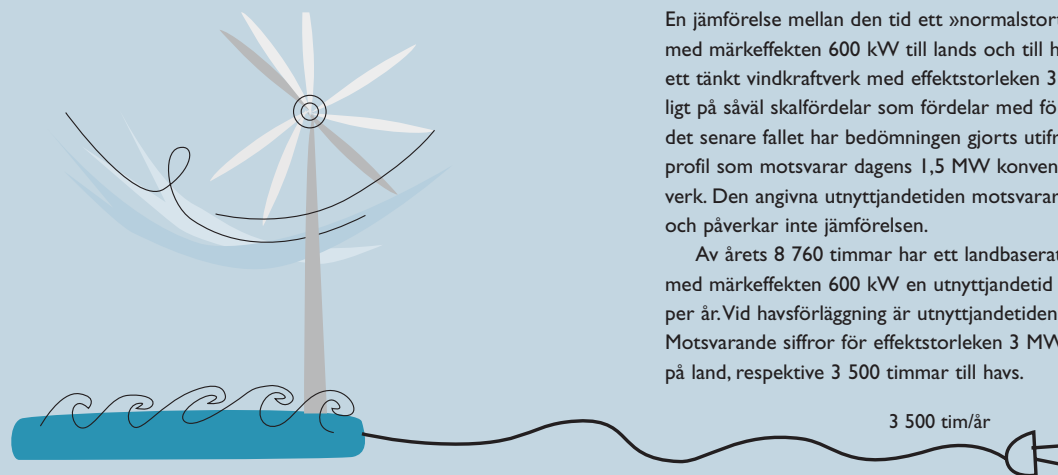


Vindenergi som funktion av vindhastighet. Den röda kurvan visar det vindhastighetsområde som i dag används inom landbaserad vindkraftstekniker. Den blå kurvan visar vindens effektinnehåll.

Hur stort detta problem kommer att bli i praktiken beror dock på lokaliseringen och omfattningen av utbyggnaden.

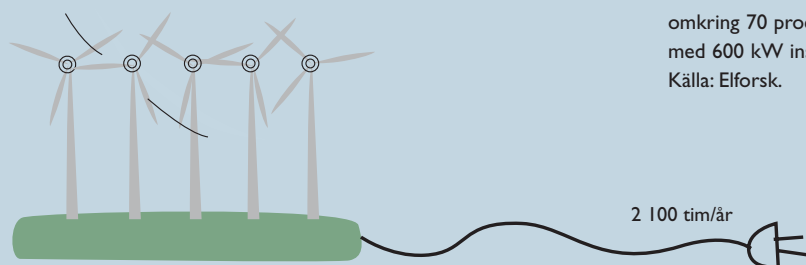
**I dag används** både vattenkraft och kärnkraft för Nordens basproduktion av el. Vattenkraften används även för effektregering på toppen. I Sverige har kärnkraften och vattenkraften till stor del samma ägare. Ett tillskott hos dessa ägare av vindkraftens elproduktion skulle antagligen kunna utnyttjas mer optimalt rent ekonomiskt än om en ägare utan andra energikällor investerar i produktionsanläggningar för vindkraft.

## Högre effekt ger bättre utnyttjande



En jämförelse mellan den tid ett »normalstort« vindkraftverk med märkeffekten 600 kW till lands och till havs utnyttjas och ett tänkt vindkraftverk med effektstorleken 3 MW går, visar tydligt på såväl skalfördelar som fördelar med förläggning till havs. I det senare fallet har bedömningen gjorts utifrån en vindeffektprofil som motsvarar dagens 1,5 MW konventionella vindkraftverk. Den angivna utnyttjandetiden motsvarar utnyttjandegraden och påverkar inte jämförelsen.

Av årets 8 760 timmar har ett landbaserat vindkraftverk med märkeffekten 600 kW en utnyttjandetid om 2 100 timmar per år. Vid havsförläggning är utnyttjandetiden 3 000 timmar. Motsvarande siffror för effektstorleken 3 MW är 2 800 timmar på land, respektive 3 500 timmar till havs.



Ett havsbaserat vindkraftverk med 3 MW märkeffekt har således omkring 70 procent högre utnyttjandegrad än fem vindkraftverk med 600 kW installerad effekt på land.

Källa: Elforsk.

# Vindkraftens kostnader och subventioner

Vid nyinstallation av elproduktion är vindkraften redan i dag ett konkurrensdugligt alternativ, något som bör kunna förbättras avsevärt under de kommande åren. Med stora, havsbaserade verk bör produktionskostnaderna kunna pressas till nivåer där vindelen blir kommersiellt attraktiv utan stöd.

**Produktionskostnaden** för vindel har fallit med cirka 80 procent från mitten av 1980-talet till i dag och kostnadsminskningarna har varit särskilt stora från 1990-talets början och framåt.

Produktionskostnaden per kilowattimme utan bidrag eller andra subventioner ligger i dag i om-

rådet 30-50 öre/kWh, beroende på lokalisering och vindförhållanden.

## KOSTNADERNA KAN PRESSAS

Generellt faller produktionskostnaderna ju mer konkurrens som finns på marknaden och ju fler stordriftsfördelar fabrikerna kan tillgodogöra sig. Eftersom utbyggnaden hittills (trots allt) varit liten, förväntas kostnaderna fortsätta att minska under de närmaste åren. För att vindkraften ska kunna stå för 10 procent av elenergiproduktionen i världen tror IEA att kostnaderna behöver sänkas med 30-50 procent från dagens läge. Kraftiga subventioner motverkar dock denna effektivisering.

**Underhållskostnaderna** för vindkraft är högre än för vattenkraft och kärnkraft. Kostnaden för vindkraft ligger i spannet 5-7 öre/kWh, medan samma siffror för vattenkraft är 0,5-1 öre/kWh och för kärnkraft 1-2 öre/kWh.

Utveckling av nya material, smörjmedel m m samt framför allt konstruktioner med färre känsliga och/eller underhållsintensiva delsystem och komponenter kommer att kunna pressa drifts- och underhållskostnaderna väsentligt och på sikt kanske även förlänga avskrivningstiden. Om den tekniska utvecklingen samtidigt kan bidra till att höja vindkraftanläggningarnas verkningsgrad, går det att pressa produktionskostnaderna ytterligare.

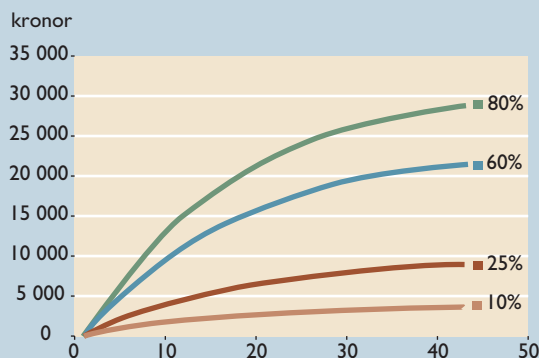
**För havsförlagda** vindkraftverk förväntas såväl installationskostnaderna som drifts- och underhållskostnaderna bli större än för landbaserade verk, och öka med avståndet till land. Flera faktorer kommer emellertid med största sannolikhet att göra också den havsbaserade vindkraften klart konkurrenskraftig.

Kraftigare medelvind till havs, i kombination med de skalfördelar större verk med högre effekt ger, kommer att kompensera för detta liksom

## Investeringsvärde per MW

Några mer exakta siffror på produktionskostnader eller jämförelsetal med andra energislag lämnas inte här pga osäkerhet beträffande beräkningsgrunder. Det finns dock siffror att tillgå, bl a hos Elforsk.

Däremot kan man beräkna investeringsvärdet per MW för olika energikällor givet ränta, underhållskostnader, tillgänglighet och utnyttjandegrad över året.



Beräkningsexempel på investeringsvärde per MW installerad effekt vid olika utnyttjandegrader för från ovan termisk kraft, vattenkraft, landbaserad vindkraft och solenergi vid ett osubventionerat elpris på 30 öre/kWh, 6 procent ränta och 3 öre/kWh i underhåll samt 100 procent tillgänglighet. Bränslekostnaden för den termiska kraften – gas, olja, kol, biobränsle samt kärnkraft – är inte medräknad.

gruppering av verk i vindkraftsparker. På samma sätt kommer teknisk utveckling av specialanpassade, mycket robusta »havsvindkraftverk« som tillverkas i längre serier gynna vindkraftens konkurrenskraft. Inom en tioårsperiod kan produktionskostnaden för en storskalig havsbaserad anläggning ligga under 30 öre/kWh.

### SKATTER, BIDRAG OCH SUBVENTIONER

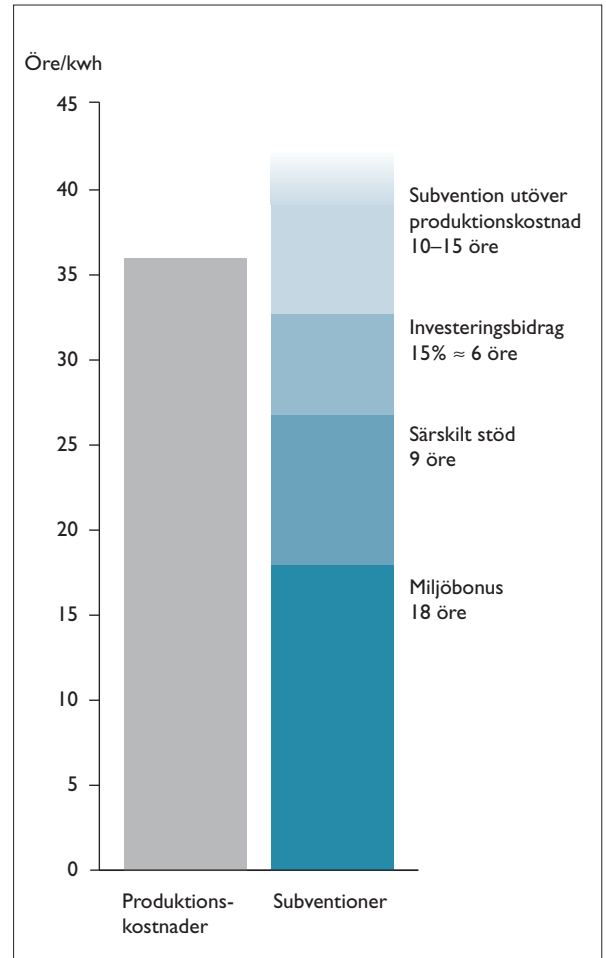
När skatter, bidrag och andra politiska styrmedel tas med i beräkningen är vindkraftens produktionskostnader klart lägst jämfört med andra kraftslags. Observera att följande resonemang gäller svenska förhållanden, och att samtliga länder förutom USA stöder vindkraften med större summor per kilowattimme än Sverige.

Om alla subventioner tas med, också de som sällan uppmärksammas, hamnar produktionskostnaderna för svensk vindkraft i dag faktiskt under noll. Förutom en miljöbonus på 18 öre/kWh utgår ett särskilt stöd på 9 öre/kWh. Nya vindkraftverk får dessutom ett investeringsbidrag på 15 procent av den totala investeringskostnaden. Det motsvarar ungefär ytterligare 6 öre/kWh i direkt stöd. Sammanlagt alltså 33 öre/kWh. Det har alltså fram till nu varit extremt lönsamt att investera i vindkraft.

**Till detta kommer** en betydligt mindre känd »dold« subvention. Enligt ellagen ska kraftverk på mindre än 1,5 MW effekt bara betala avgift för anslutning till elnätet och en mindre avgift för mätning och avräkning. Kraftverken slipper således det lokala nätbolagets kostnader för drift, underhåll och förnyelse av elnätet – i de flesta fall motsvarande 10–15 öre/kWh – en osäker och mycket varierande siffra.

Det gäller också för vindkraftsparker under försättning att de ingående verken var för sig inte är större än 1,5 MW. Enligt en särskild regel räknas nämligen varje verk i parken som en individuell anslutning. Därför befrias grupper av mindre verk från dessa kostnader, som i stället får bäras av större kraftstationer samt av alla elkonsumenter i området.

**Merparten av dessa** subventioner försvinner helt från 1 januari 2003 om regeringens energipolitiska proposition får riksdagens gehör. Kvar blir miljöbonusen på ca 18 öre/kWh, som dock successivt kommer att fasas ut till år 2008. Tillkommer gör de s k gröna certifikaten eller miljöcertifikaten, vilka i praktiken utgör en sorts subventioner som får bäras av konsumenten. Det



### Vindkraftens subventioner i förhållande till produktionskostnader.

ekonomiska stöd som vindkraften på detta vis får föreslås i propositionen bli lägst 10 öre/kWh.

### PÅ EGET FUNDAMENT

Enligt de flesta bedömare kommer vindkraften att behöva stöd även under det närmsta decenniet.

Direkta stödinsatser bör framför allt ges till nytänkande och demonstrationsprojekt som avser att sänka produktionskostnaden för el, och i mindre omfattning gå till kommersiella bolag som under lång tid erhållit subventioner.

Subventioner är, och har tveklöst varit, en av de viktigaste drivkrafterna bakom vindkraftens snabba utveckling de senaste åren. Det måste dock påpekas att subventioner kan vara direkt kontraproduktiva för såväl utvecklingen av ny teknik som konkurrensen på marknaden. Såsom subventionerna har varit utformade i Sverige har dessa enbart gynnat utvecklingen av vindkraftverk med märkeffekter i spannet 100 kW – 1500 kW. Följden är bl a att en rad goda lösningar vid utveckling av större eller mindre verk ignoreras.

**Med avsikt att** befrämja utveckling av ny teknik och större och rationellare vindkraftverk är marknadslika stödformer som »gröna« certifikat att föredra. Det är dock viktigt att certifikaten och övriga regler utformas så att vindkraften inte missgynnas i förhållande till annan »grön« el. Hur detta ska ske ligger utom ramen för denna rapport.

Det torde dock vara helt ofrånkomligt att den enda garantin för vindkraftens fortlevnad är att den på sikt, och då inte alltför lång sikt, blir fullt konkurrenskraftig utan subventioner också på marknader med lågt elpris.

**En annan viktig fråga** för vindkraftens framtid gäller överföringskapaciteten i näten. Precis som när vattenkraften och kärnkraften byggdes ut måste transmissionsnätens status ses över också vid en utbyggnad av vindkraften.

Effektbrist kan uppstå pga bristande produktionskapacitet, men även genom att effekten inte kan överföras från ett område till ett annat därför att kapaciteten i ledningsnätet redan är fullt utnyttjad. Det senare är redan i dag ett problem beträffande det svenska stamnätet.

Särskilt bekymmersam är situationen i södra Sverige. En mycket tydlig flaskhals delar Sverige i två delar med ett snitt strax norr om Gävle. Hela



**Vindkraften behöver stöd även framdeles för att inom tio år kunna stå på eget fundament. Foto: Gunnar Britse.**

södra Sverige, där merparten av befolkningen bor och arbetar, kan därmed bli ett bristområde. Detta trots att det kan finnas mycket gott om vattenkraft, och enligt de framtida planerna även mycket vindkraft, i landets norra delar.

Vindkraftens utbyggnad kommer även att kräva förstärkningar av de lokala transmissionsnäten såväl i norra som i södra Sverige om stora, havsbaserade vindkraftsparker skall kunna anslutas. Transmissionsnätens överföringskapacitet behandlas närmare i rapporten »Överföring och lagring av energi«. Frågan om transmissionsnätens överföringskapacitet är emellertid grundläggande och måste lösas oavsett hur, när eller var vindkraften byggs ut.

# Referenser

- »Long Term Research And Development Needs For Wind Energy For The Time Frame 2000-2020« Global Windpower Conference , Paris, 2002  
IEA R&D Wind 2002  
»Driftuppföljning av Vindkraftverk«  
Årsrapport 2001 Elforsk  
[www.elforsk.se/varme/varm-vind\\_drift.html](http://www.elforsk.se/varme/varm-vind_drift.html)  
M.Törnkvist  
»European Wind Energy Conference EWEC 2001«  
Köpenhamn 2001, Elforsk rapporter 2001 – Vindkraft 2/01  
R.Gasch  
»Windkraftanlagen«  
Stuttgart 1996  
P.Gipe  
»Wind Power for home and business, Renewable Energy for the 1990s and beyond«  
Vermont, USA, 1993  
Å.Larsson  
»Kartläggning av krav för anslutning av stora vindparker till elnätet«  
Elforsk rapporter – Vindkraft 2/01  
»Kraftläget i Sverige«  
Svensk Energi Veckostatistik – [www.svenskenergi.se/statistik/kraftlaget.htm](http://www.svenskenergi.se/statistik/kraftlaget.htm)  
»Hydropower in Sweden«  
The Swedish Power Association and The Swedish State Power Board  
ISBN 91-7186-064-9 1981  
American Wind Energy Association/AWEA/  
»Global Wind Energy Report 2001« –  
[www.awea.org](http://www.awea.org)  
Mars 2002  
Å. Larsson och G. Ronsten  
»Rapport från EWEA Offshore Wind Energy Special Topic conference«  
Elforsk rapporter – Vindkraft 2/02
- E. Hau  
»Windturbines«  
Springer-Verlag 2000.  
T. Wizelius och O. Karlsson  
»Vind del 1 1992«  
T. Wizelius  
»Vind del 2 1993 och 3 1994«  
A. Betz  
»Windenergi und ihre Ausnutzung durch Windmolen«  
Göttingen: Vandenhoeck und Rupprecht 1926  
Leijon, M.; Dahlgren, M.; Walfridsson, L.; Li Ming; Jaksts, A.  
»A recent development in the electrical insulation systems of generators and transformers«  
IEEE Electrical Insulation Magazine, Volume: 17  
Issue: 3, May-June 2001  
»Energifakta«  
Svensk Energi – [www.svenskenergi.se/energifakta](http://www.svenskenergi.se/energifakta)  
»El från nya anläggningar«  
Elforsk rapport 00/01  
»Vindforsk«  
Energimyndighetens forskningsprogram 2003-2005 – [www.windenergi.foi.se](http://www.windenergi.foi.se)  
2002
- Förutom referenserna ovan kan man bl a läsa vidare på:  
BTM Consultants  
[www.btm.dk](http://www.btm.dk)  
Dansk Vindmø ølleindustri  
[www.windpower.dk](http://www.windpower.dk)  
Energimyndigheten  
[www.stem.se](http://www.stem.se)  
FOI – Totalförsvarets Forskningsinstitut/  
[www.vindenergi.foi.se](http://www.vindenergi.foi.se)  
Svensk Vindkraft  
[www.svensk-vindkraft.org](http://www.svensk-vindkraft.org)  
IEA Wind Energy Annual Report

# Klarare budskap om vindkraft

Kommentar av Staffan Engström

Mats Leijon och jag delar en positiv grundsyn om vindkraftens möjligheter. Efter att ha granskat hans artikel i flera versioner har jag dock fortfarande ett stort antal påpekanden, av vilka flertalet är av teknisk art. Se min teknikgenomgång i *Mekanisten* nr 2002:2 som även finns på [www.algo-net.se/~agir](http://www.algo-net.se/~agir).

I ett fall är avvikelsen av principiell betydelse, varför detta refereras här: »...För att vindkraften ska kunna stå för 10 procent av elenergiproduktionen i världen tror IEA att kostnaderna behöver sänkas med 30-50 procent från dagens läge.« (Sid. 18 i rapporten; samma påstående återkommer på flera ställen.) Kommentar: Den refererade publikationen från IEA R&D WIND accepterar prognoser från European Wind Energy Association beträffande såväl utbyggnad som framtida kostnader för vindkraft (uppdaterade som Wind Force 12, finns på [www.ewea.org](http://www.ewea.org)). Att utbyggnaden skulle villkoras av en kostnadsänkning förs alltså inte fram. Citatet är därmed felaktigt.

Därutöver vill jag i följande kommentar försöka framföra ett mer renodlat budskap.

**Dagens teknik** är tillräcklig för fortsatt expansion. Vindkraften håller för närvarande på att slå igenom i världen på ett sätt som saknar sentida motstycke. Den har under de senaste fem åren vuxit med i genomsnitt en tredjedel varje år. I slutet av 2001 motsvarade den 50 TWh i årlig elproduktion och en tillväxt av 15 TWh. I den ovan nämnda Wind Force 12 svarar vindkraften år 2020 för 12 procent av världens elproduktion och får därmed samma betydelse som kärnkraft och vattenkraft.

Vindkraften är fortfarande en ung teknik, inte många teknikgenerationer gammal. Flertalet vindkraftverk, som skall byggas under de närmaste decennierna, är ännu inte konstruerade. Expansionen och den nya tekniken gör att det fortfarande

är möjligt för nya företag att slå igenom, även om etableringskostnaden blir allt högre. Den nödvändiga hemmamarknaden ser dock ut att saknas i Sverige även i fortsättningen.

Vindkraftens speciella produktionsmässiga egenskaper är hanterbara. Vindkraftverk producerar bara när det blåser, och då med en starkt varierande effekt. Dessa egenskaper, som lekmännen älskar att slå ned på, är emellertid hanterbara då vindkraften sätts in för att komplettera befintliga elsystem, som är den allena rådande marknaden för nya kraftverk oavsett sort.

**Vindkraften kräver** samhällelig planering. Vindkraften ger inga utsläpp och har goda miljöegenskaper i övrigt. Den kan samexistera med andra areella näringar, som jordbruk. Den innebär dock en restriktion för annat markutnyttjande och kräver därför samhällelig planering. Planeringsmålet om 10 TWh vindkraft enligt energipropositionen är ett steg framåt, därför att det ger ett nödvändigt motiv för kommunernas planering – varför skulle kommunerna planera för vindkraft om samhället inte behöver den? Införande av riksintresse för vindkraft är en annan grund för planeringen. Till havs är Danmark ett bra exempel – fem danska havsområden är avsatta för vindkraft.

**De gröna certifikaten** införs från årsskiftet i Sverige för att till lägsta kostnad införa 10 TWh förnybar elenergi till år 2010, att jämföra med att Sverige i EU-direktivet för förnybar el påtagit sig att till detta år bygga ut ca 25 TWh. Certifikaten kommer att under ett antal år utnyttjas för bränslebyten i befintliga kraftverk och andra billiga åtgärder, som nybyggnad av kraftverk – vindkraft eller annat – aldrig kan konkurrera med. Observera att bränslebytena inte ger någon ökad elproduktion. Efter en övergångstid försvinner den s k miljöbonusen för vindkraft. Under de närmaste

åren kan man vänta sig en mindre utbyggnad på attraktiva platser på land och att särskilda insatser för pilotanläggningar resulterar i några begränsade havsprojekt.

Förnybar el kan användas för att begränsa elprishöjningar. En mer omfattande utbyggnad av förnybar elproduktion upp till EU-målet skulle kunna utnyttjas i ett energipolitiskt syfte, nämligen att hålla nere det generella elpriset, till båtnad

för konsumenterna, industri och samhället i övrigt. Ett ökat utbud av el inom Nordpool ger nämligen till resultat att elpriset trycks ner. För samhället blir det därmed billigare att betala förhållandevis mycket för en marginell, ökad elproduktion från förnybara källor än att invänta att det generella marknadspriset går upp på grund av den allmänna bristen som redan råder i Norden under normala vattenår.





## Vindkraft till lands och till sjöss

Denna faktaöversikt behandlar de närmaste decenniernas utveckling för vindkraften, som rätt placerad och genomtänkt konstruerad kommer att kunna utgöra ett betydelsefullt komplement i landets elförsörjningssystem.

Stora vindkraftverk har väsentligt högre elproduktion än mindre vid samma installerade effekt. Teknisk nyutveckling gör det möjligt att konstruera robusta, enkla och driftsäkra vindkraftverk som kan placeras såväl ute till havs som i fjällen, där vindförhållandena är särskilt gynnsamma.

Vindkraften är miljövänlig men inte oproblematisk. Vid uppförande av vindkraftverk eller vindkraftparker bör deras direkta och indirekta påverkan på växt- och djurliv minimeras, och på dessa områden behövs mer forskning.

Eftersom vinden inte kan lagras, måste vindkraften samspela med andra energikällor om den ska kunna utnyttjas effektivt. Vid en stor utbyggnad av vindkraften är vattenkraften med dess lagringskapacitet en utomordentligt viktig nyckelkomponent för hela elkraftsystemet.

## Energiframsyn Sverige i Europa

Kungliga Ingenjörsvetenskapsakademien, IVA, är en oberoende arena för kunskapsutbyte. Genom att initiera och stimulera kontakter mellan olika kompetensområden och över nationsgränser fungerar akademien som gränsöverskridande brobyggare mellan näringsliv, forskning, förvaltning och olika intressegrupper.

IVA-projektet »Energiframsyn Sverige i Europa« belyser det svenska energisystemet ur framför allt ett europeiskt men även ett globalt perspektiv. Det europeiska är viktigt mot bakgrund av pågående avregleringar och genom att el- och gasnät knyts samman i allt större regioner. Klimatfrågan motiverar ett globalt perspektiv.

Genom att blicka framåt i tiden vill IVA stimulera till intressanta och balanserade diskussioner genom att ge nya insikter och tankeväckande men trovärdiga och realistiska framtidsbilder av det svenska energisystemet som en del av Europas.

Energiframsyn vänder sig till beslutsfattare inom förvaltning, näringsliv och forskning men också till en vidare krets av personer, som arbetar med eller intresserar sig för energifrågor.

I detta arbete har en skriftserie om ett antal populärt hållna rapporter med dagens fakta och med en bedömning av utvecklingen i ett 20-årsperspektiv tagits fram för att ge underlag till Energiframsyns framtidsbilder. Denna skrift ingår i serien Energiframsyns Faktarapporter.

