

MÄLARDALENS HÖGSKOLA

Akademien för hållbar samhälls- och teknikutveckling

EXAMENSARBETE 30 HP

Utvärdering av svensk vindkraft

Skillnaden mellan skogs- och traditionella placeringar

Examensarbete vid Mälardalens Högskola
i samarbete med Södra Vindkraft AB, Växjö.

Utfört av: Andreas Lindahl

Västerås 2009-05-20

Abstract

During the last years commercial Wind Power Turbines (WPT) has become larger regarding to the generator sizes and hub heights. Available hub heights around 100 meters is now common, which has led to profitability for WPT located in forests where there normally are to low wind speeds. The current knowledgement regarding turbulence and the variation in the wind profile for the outcome of the power production for the WPT in forests is limited.

In this Master of Science thesis an investigation concerning forest located wind power plants has been made. The purpose has been to investigate if plants located in forest perform less compared to wind power turbines located at more common locations. The analyses are based on statically material for determining the availability, production/generator size, production/hub height, production/swept area and how the topography affect the production results.

The analyses show that the variation in production result for WPT located in forest compared to turbines located at other locations is small. The availability is high and the production results are good.

Keywords: Wind power, turbulence, production result, hub height, rotor diameter

Förord

Det här examensarbetet omfattar 30 Hp inom ämnesområdet energiteknik, programmet för samhällsteknik, akademien för hållbar samhälls- och teknikutveckling, Mälardalens högskola. Arbetet har genomförts i samarbete med Södra Vindkraft AB, Växjö.

Jag vill passa på att ge ett extra stort tack till min handledare på Södra Vindkraft AB, Anders Fredriksson, som avsatt avsevärd tid åt arbetet i form av problemformulering, förslag till rapportens disposition, diskussioner och allmänt stöd under arbetets gång. Vill även passa på att tacka min handledare, Jan Sandberg, lärare på akademien för hållbar samhälls- och teknikutveckling, samt min examinator Erik Dahlquist, professor på akademien för hållbar samhälls- och teknikutveckling. Avslutningsvis vill jag tacka Gustav Tibblin, VD för Södra Vindkraft AB som möjliggjort arbetet.

Västerås, 2009-04-20

Andreas Lindahl

Sammanfattning

Landets energipolitik angående förnybara energikällor har lett till ett ökat intresse för vindkraft. Incitament som elcertifikatsystemet och miljöbonusar har gjort vindkraftinvesteringar lönsammare och möjliggjort konkurrens mot landets traditionella elförsörjningskällor, kärn- och vattenkraft. Den tekniska utvecklingen under de senaste åren inom vindkraftindustrin med avseende på generatoreffekt och navhöjd, har möjliggjort att nå lönsamma vindar även i skogen till skillnad från tidigare.

Vid en vindkartering utförd av Uppsala universitet i samarbete med Energimyndigheten (2007) enligt den s.k. MIUU-modellen, framkom det att energipotentialen över skog är högre än väntat. Kombinerat med den tekniska utvecklingen har därför intresset ökat för vindkraftprojekteringar i skogen.

Då kunskapsläget är begränsat angående gränsskiktets utseende i fråga om vindgradient och turbulens och vindens intensitet över skog, är det därför av intresse att utreda hur väl de skogsetablerade vindkraftverken står sig i förhållande till mer traditionella lokaliseringar. I arbetet har därför verk med en effekt om 1,5-3,5 MW analyserats för att främst försöka utröna hur väl skogsetableringarna står sig med avseende på: Tillgänglighet, produktionsutfall/ installerad effekt, produktionsutfall/navhöjd, produktionsutfall/rotordiameter samt produktionsutfall/topografin. Till hjälp har statistiskt material hämtats från "driftuppföljning vindkraft", där automatisk inrapportering sker för ca 800 av landets 900 verk. Vissa verk har nyligen tagits i drift, vilket medför att det statistiska materialet är begränsat för dessa verk. För att få med så många verk som möjligt i analysen har därför statistik för 12 månader granskats och normalårskorrigerats med avseende på energiinnehållet. Totalt har 94 verk valts ut varav flera tillhör gruppstationer vilket medför att den förväntade produktionen är något lägre (5-10 %) jämfört med ensamplacerade verk.

Slutsatsen av analysen är att skogsplacerade verk står sig väl i förhållande till övriga placeringar. Tillgängligheten är hög och det går inte på kort sikt att se någon trend att den högre turbulensen över skog medför ett sämre produktionsresultat. Av analysen att döma är det lämpligt att kombinera en högre navhöjd och en större rotordiameter för att erhålla ett bra produktionsresultat för skogsplacerade verk.

Innehållsförteckning

ABSTRACT	I
FÖRORD	II
SAMMANFATTNING	III
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	IV
BETECKNINGAR/DEFINITIONER	1
1 INLEDNING	2
1.1 BAKGRUND	2
1.2 PROBLEMFÖRMULERING	3
1.1 SYFTE	3
1.2 MÅL	3
1.3 AVGRÄNSNING	3
1.4 METOD	3
2 TEORI OCH AKTUELLT KUNSKAPSLÄGE	4
2.1 VINDENS ENERGI	4
2.2 VINDKRAFTVERKETS PRODUKTION	6
2.3 OKÄND VINDFÖRDELNING	7
2.3.1 JÄMFÖRELSE MELLAN EXISTERANDE VINDKRAFTVERK	8
2.4 VINDPROFIL OCH LANDSKAPETS PÅVERKAN	8
2.5 VIND OCH TURBULENS ÖVER SKOG	9
2.6 RÅHETSKLASSER	11
2.7 JÄMFÖRELSE MELLAN SKOG- OCH SLÄTTLANDSKAP	12
2.8 VINDPOTENTIAL	15
2.8.1 ENKLARE MODELL	15
2.8.2 MESOSKALE-MODELLER	16
2.9 BERÄKNINGSPROGRAMMET WINDPRO	16
2.9.1 BERÄKNINGSMODULER	16
2.9.2 RÅHETSKLASSNING	17
2.9.3 KÄNSLIGHETSANALYS	17
2.10 STATISTISKT MATERIAL OCH TIDIGARE KUNSKAPSVINVENTERING	19
3 ANALYS AV VALDA VERK	22
3.1 VALDA VERK	22
3.2 DETALJSTUDIE	22
3.3 SAMTLIGA VERK	23
3.4 BERÄKNINGAR	23
3.4.1 LINJÄR REGRESSION	23
3.4.2 POLYNOMISK REGRESSION	24
3.4.3 NORMALÅRSKORRIGERING	24
3.4.4 PRODUKTION SOM FUNKTION AV BERÄKNAD PRODUKTION	25
3.4.5 UTNYTTJNINGSTID	25
3.4.6 PRODUKTION SOM FUNKTION AV SVEPYTAN	26
3.4.7 JÄMFÖRELSE MELLAN VERKLIG OCH TEORETISK PRODUKTION	26

3.4.8	TOPOGRAFI OCH RÅHETSKLASSNING	27
4	RESULTAT	29
4.1	DETALJSTUDIE	29
4.2	SAMTLIGA VERK	35
5	DISKUSSION OCH SLUTSATSER	41
5.1	DETALJSTUDIE	41
5.2	SAMTLIGA VERK	41
5.2.1	TILLGÄNGLIGHET	42
5.2.2	PRODUKTION I FÖRHÅLLANDE TILL INSTALLERAD EFFEKT	42
5.2.3	PRODUKTION I FÖRHÅLLANDE TILL NAVHÖJD OCH ROTORDIAMETER	42
5.2.4	RÅHETENS PÅVERKAN PÅ PRODUKTIONSUTFALLET	43
5.2.5	FÖRHÅLLET MELLAN TEORETISK OCH VERKLIGT PRODUKTIONSUTFALL	43
5.2.6	VERKLIG/BERÄKNAD PRODUKTION	43
6	FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE	44
7	REFERENSER	45
	BILAGA 1. UTVALDA VERK	47
	BILAGA 2. HUVUDRESULTAT	51
	BILAGA 2. HUVUDRESULTAT, FORTSÄTTNING	55
	BILAGA 3. KARTA ÖVER SVERIGES SAMTLIGA VERK MED EN EFFEKT ÖVER 60 KW.	59
	BILAGA 4. EFFEKTKURVOR	60
	BILAGA 5. SAMMANSTÄLLNING I EXCEL	62

Beteckningar/definitioner

A	Area
c	Skalfaktor, Weibull
d	Nollplaneförskjutning, höjd ovan mark.
D	Rotordiameter
E	Energi
E_{prod}	Förväntad produktion från ett vindkraftverk, baserat på vindfördelning och effektkurva.
$E_{\text{prod},12\text{mån}}$	Verkens produktion för 12 månader enligt statistik.
$E_{\text{prod},12\text{mån},\text{korrigerad}}$	Verkens produktion för 12 månader enligt statistik, normalårskorrigerad.
$E_{\text{teo},\text{WindPro}}$	Teoretisk årlig produktion beräknat enligt WindPro.
E_{vind}	Vindens energi per m^2 och år.
h	Antal timmar
H	Navhöjd
In.vind	Lägsta vindhastighet för att verket ska aktiveras
k	Formfaktor, Weibull
m	Massflöde
Märkvind	Vid den vindhastighet verket producerar maximal effekt.
P	Effekt
R	Råhetsklass
u_*	Friktionshastigheten, karakteristiska hastighetsskalan för turbulensen genom hela gränsskiktet.
Ur.vind	Uppnådd vindhastighet då vindkraftverket kopplas ur.
v	Vindhastighet vid angiven höjd.
v_m	Medelhastighet vid angiven höjd.
z	Höjd ovan mark
z_0	Råhetslängd
ρ	Densitet
τ	Skjuvspänning

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Behovet av förnybara energikällor har aldrig varit så stort som i dagsläget, inte minst för landets elproduktion. De globala och lokala miljökonsekvenserna har lett fram till ökad medvetenhet med förnyad energipolitik till följd för att försöka få bukt på den alltmer accelererande miljöbelastningen.

Som ett av många steg till en grönare energipolitik har riksdagen formulerat mål angående landets vindkraftproduktion, vilket innebär att dagens produktion på ca 2,0 TWh (år 2008) ska öka till 15 TWh år 2015. Energimyndigheten har i sin tur gått steget längre och gett förslag till regeringen om att målet bör höjas till 30 TWh till år 2020. Av dessa 30 TWh är förhoppningarna om att 20 TWh ska produceras av landbaserade verk och 10 TWh från havsbaserade verk.

För att nå målen krävs en storskalig utbyggnad på kort tid. För att påskynda processen har regeringen avsatt 350 miljoner kronor till pilotprojekt under perioden 2008-2012 vars syfte även är ökad kunskap. Det finns incitament för att stärka konkurrenskraften för el producerad från vindkraftverk såsom elcertifikatsystemet och miljöbonusar. Andelen vindkraftproducerad el är relativt liten i Sverige jämfört med många länder, endast 1,4 % av den totala elproduktionen (2008).

För att få vindkraftanläggningar lönsamma är vindhastigheten avgörande. En återkommande siffra i sammanhanget är en minsta årsmedelhastighet på 6,5 m/s. Regeringen har därför låtit kartlägga landet för att hitta lämpliga etableringsplatser.

Kartläggningen har lett fram till att 423 områden (2008) har klassificerats som riksintresse för vindkraft, vars syfte är att stärka vindkraftsanläggningarnas prioritering vid tillståndsprövningen gentemot andra intressen. Dessa områden motsvarar ca 2,2 procent av landets totala yta. De gynnsammaste förhållandena anses finnas vid kusterna, öppna landskap såsom i Skåne och höga fjäll. Upprättandet vid dessa platser är dock besvärlig många gånger, dels av juridiska skäl med komplicerande tillståndsansökningar pga. motverkande intressen, och dels av teknisk ogynnsamhet (långa kabeldragningar och vägetableringar exempelvis).

Vid en nyligen utförd vindkartering, utförd av Uppsala universitet på uppdrag av Energimyndigheten, framgår det att energipotentialen i skogen är tämligen god. I kombination med den teknikutveckling som skett under de senaste åren med avseende på navhöjd och generatoreffekt, är det nu möjligt att nå upp till gynnsamma vindförhållanden även i skogen. Många projektörer har därför fått upp ögonen för skogsetableringar med stora investeringar till följd.

Av existerande verk är de flesta uppsatta i icke skogsmiljö, vilket medför att kunskapsläget är begränsat. För att utröna hur väl skogsetablerade verk står sig i förhållande till övriga lokaliseringar krävs det därför ökad kunskapsinventering och forskning inom ämnet.

1.2 Problemformulering

Examensarbetet har utförts åt Södra Vindkraft AB (Södra), som är ett av flera företag som i dagsläget projekterar vindkraftverk i skogen. Som en del i deras upphandlingsprocess av vindkraftverk har examensarbetet utförts för att försöka utröna samband mellan tillverkare/modell och faktorer som:

- Tillgänglighet
- Produktion i förhållande installerad effekt
- Navhöjd
- Rotordiameter
- Topografi och omkringliggande landskapets påverkan av produktionsutfallet

1.1 Syfte

Syftet med examensarbetet har varit att analysera hur väl de skogsetablerade vindkraftverken står sig i förhållande till verk i övriga lokaliseringar. Vidare har syftet varit att utreda vilken/vilka tillverkare/modeller som fungerar mest tillfredställande i skogsmiljö.

1.2 Mål

Examensarbetet är tänkt att fungera som ett av många beslutsunderlag åt Södra vid deras upphandlingsprocess. Rapporten redogör för de samband och slutsatser som kan dras av aktuella verk runtom i landet. En del av arbetet har varit att ta fram exakta koordinater för de utvalda verken.

Målet med arbetet har även varit att ta fram en tydlig och välprogrammerad Excel-fil där sambanden ovan redovisas på ett lätt och överskådligt vis.

1.3 Avgränsning

Arbetet begränsas till svensketablerade verk lokaliserade på land med en effekt om 1,5-3,5 MW. Avgränsningen är gjord utifrån tillgänglig tid för uppgiftsinsamling av koordinater, beräkningar och analys samt att Södra projekterar inom den här effekten.

Det finns i dagsläget ca 900 registrerade vindkraftverk i Sverige. Av dessa har ca 800 anmälts sig för automatiskt rapportering till ”driftuppföljning vindkraft” (www.vindstat.nu), dvs. det sker kontinuerlig avläsning av bl.a. effekt, produktion, tillgänglighet och vindhastighet. Uppgifterna återfinns på och utgör basmaterial för Energimyndighetens och Elforsks årliga driftuppföljning av landets vindkraftverk.

Av de 800 verken som automatiskt rapporterar in driftinformation är 94 stycken av dessa i storleksordning 1,5–3,5 MW. Flertalet av dessa verk är nyligen drifttagna, vilket innebär att statistiskt material under en begränsad tid endast finns att tillgå.

1.4 Metod

Utvärderingen baseras i första hand på statistik sammanställd av Energimyndigheten och Elforsk i deras årliga driftuppföljning av landets samtliga vindkraftverk. I driftuppföljningen

av energimyndigheten och Elforsk ges uppgifter om verken i form av tillverkare/modell, effekt, förväntad produktion, verkligt produktionsutfall, tillgänglighet, energitäthet och produktion i förhållande till installerad effekt. Dessa uppgifter har granskats och bearbetats i Excel för att försöka hitta samband som nämns under problemformulering (Excel-filen finns beskriven i bilaga 5).

För information om exakt lokalisering av vindkraftverken och omgivande topografi har i första hand verksamhetsutövarens tillstånd/anmälningshandlingar använts. Dessa har hämtats från berörda länsstyrelser (Lst) och kommuner runt om i landet.

Uppgifter om den förväntade produktionen är inrapporterad av verksamhetsutövaren (VU). Det framgår således inte vilken beräkningsmetod de använt sig av för att komma fram till det angivna resultatet, samt om hänsyn tagits till exempelvis gruppstationer vars energiproduktion blir något lägre jämfört med enstaka verk, vakeffekter och eventuell isbildning. Det har även visat sig att de verk som projekterats längre tillbaka haft en överdriven optimistisk produktionsmängd vid beräkningar. För ett ytterligare referensvärde till hur väl verken presterar har därför beräkningsprogrammet WindPro 2.6 använts. Programmet ger en teoretisk energiproduktion för de utvalda verken, samt information om årsmedelhastigheter.

2 Teori och aktuellt kunskapsläge

Följande del i rapporten redogör för det mest fundamentala samband som ligger till grund för energiberäkningar kring vindar och vindkraftverk. Det är tänkt som en introduktion där de viktigaste sambanden nämns för att ge ökad förståelse för övriga delar av arbetet.

I denna del av arbetet görs även en sammanställning av kunskapsläget för vindkraftetableringar i skog, statistiskt material, utredningar och den osäkerhet skogen anses medföra vid projekteringar.

2.1 Vindens energi

Då vindens energi är kinetisk definieras dess effekt på följande vis (Sathyajith 2006, s. 80):

$$P = \frac{\dot{m}v^2}{2} = \frac{\rho Av \cdot v^2}{2} = \frac{\rho Av^3}{2} \quad [W/m^2] \quad \text{Ekvation 1}$$

där

\dot{m} , massflödet [kg/s]

v , vindhastighet [m/s]

ρ , luftens densitet [kg/m³]

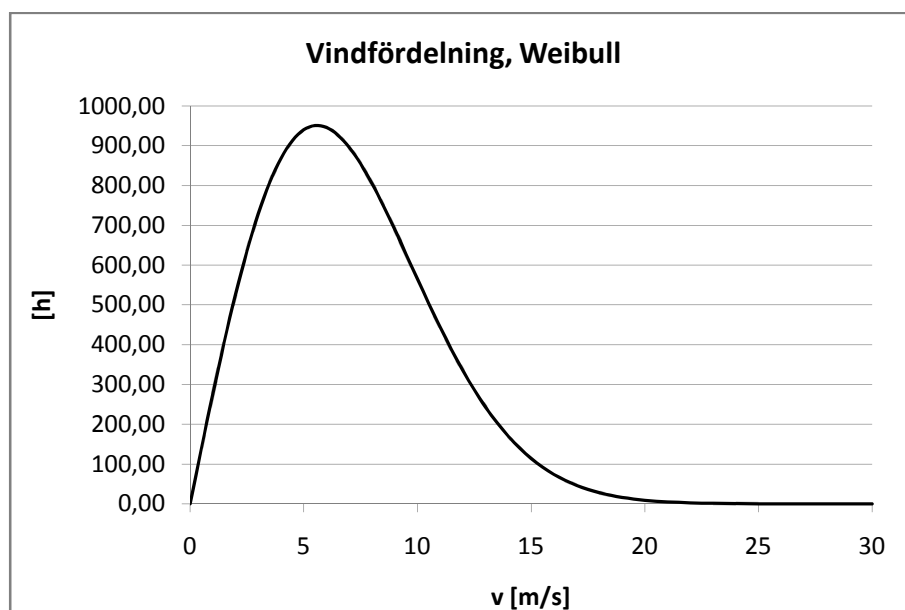
A , utsatt area [m²]

Värt att ha i åtanke är att effekten är proportionerlig mot vindhastigheten i kubik. Förhållandet innebär att en ökning av vindhastigheten från 6,0 m/s till 6,5 m/s ger en effektskillnad på ca. 27 %

$$P \propto v^3 \quad [W/m^2]$$

För att ta tillvara på så stor del av vindens energiinnehåll som möjligt är det en förutsättning att lämpligt verk väljs. Vindkraftverken utformas i första hand efter vindens årsmedelhastighet, max- och min hastighet, turbulens och vindens intensitet men även om verket ska placeras ensamt eller i gruppstation (Vindkraft 2007, s. 6). Det krävs därför noggranna utredningar om vindhastighet och vindgradientens egenskaper för att kunna välja ett lämpligt verk. Mätningar på plats under varierande tid brukar därför tillämpas som därefter kompletteras med vindkarteringsmodeller liknande MIUU-modellen (behandlas i stycke 2.7.2).

Om mätningarna fortgår under en längre tid, minst ett år, fås vindfördelningen för den aktuella platsen. Vindfördelningen beskriver hur många timmar det blåser med en viss vindhastighet varje år. Denna fördelning har i de flesta fallen visat sig stämma överens med Weibull-fördelningen.



Figur 1. Exempel på vindfördelning uppmätt på plats.

Weibull-fördelningen definieras på följande vis

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad [-] \quad \text{Ekvation 2}$$

Där k är formfaktorn och c skalfaktorn. Normala värden på dessa är ca 2 respektive 6-8. Formfaktorn är relativt konstant jämfört med skalfaktorn (Sathyajith 2006, s. 68).

Potentiella energin för varje vindhastighet fås av

$$E = P \cdot h = \frac{1}{2} \rho_{luft} v^3 \cdot h \cdot 10^{-3} \quad [kWh/m^2, \text{år}] \quad \text{Ekvation 3}$$

där

$$P, \text{ effekt} \quad [W]$$

$$h = f(v) \cdot \delta v \cdot 8760 \quad [h]$$

$$\rho, \text{ luftens densitet} \quad [kg/m^3]$$

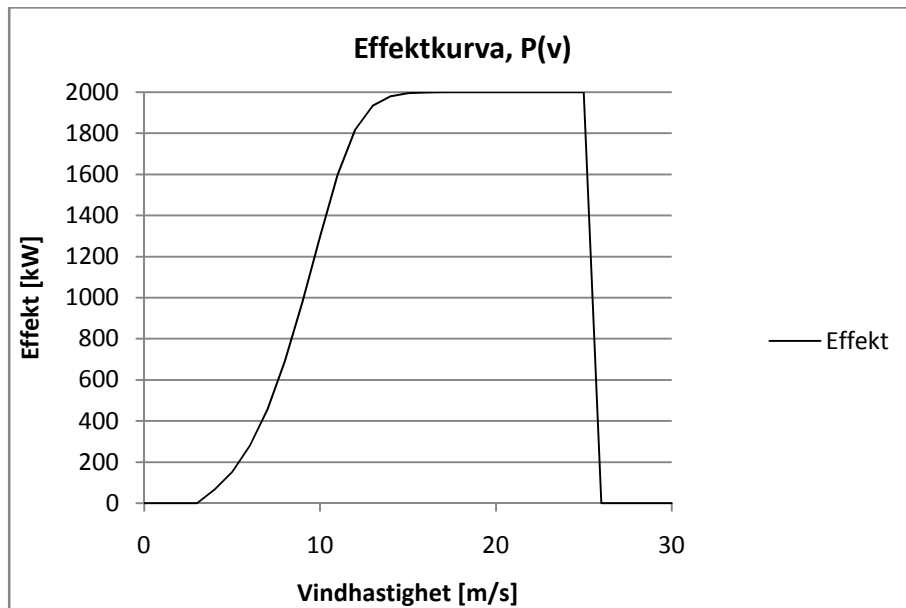
Den potentiella energin i vinden för hela året fås genom att integrera, eller summera över alla vindhastigheter.

$$E_{vind} = 8760 \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{luft} \int_0^{30} f(v) \cdot \delta v^3 \quad [kWh/m^2, \text{år}] \quad \text{Ekvation 4}$$

2.2 Vindkraftverkets produktion

För att beräkna hur väl vindenergin utnyttjas av ett vindkraftverk jämförs Weibullfördelningen med vindkraftverkets effektkurva. Effektkurvan ger information om vilken effekt som generas vid en viss vindhastighet. Det varierar för olika verk pga. generatorns effekt och olika tekniska utformningar. Exempel på effektkurva ges nedan för ett Vestas 2000 kW verk. Kurvan ger information om "cut-in" hastigheten, märkvinden samt "cut-out" hastigheten. Vilket betyder vid vilken vindhastighet vindkraftverket börjar producera el, vid vilken hastighet maximal effekt genereras samt vid vilken hastighet vindkraftverket kopplar ur p.g.a. för hög belastning.

Det är därför ett optimeringsproblem att välja rätt vindkraftverk så att vindens energi tas tillvara i så stor utsträckning som möjligt.



Figur 2. Effektkurva för Vestas V80-2,0 MW (uppgifter från Vestas).

Genom att multiplicera effektkurvan med vindfördelningen över hela intervallet, integration eller summation, fås den teoretiska energiproduktionen:

$$E_{prod} = \int_0^{30} f(v) \cdot p(v) dv \quad [kWh/m^2, \text{år}] \quad \text{Ekvation 5}$$

2.3 Okänd vindfördelning

När vindfördelningen är okänd och exempelvis MIUU-modellen används för information om årsmedelhastigheten för aktuell navhöjd, kan energiproduktionen uppskattas genom att anta att vindfördelningen är Weibullfördelad. Uppskattningen ger en ungefärlig uppfattning om den förväntade produktionen.

Som nämnts ovan beror Weibull-fördelningens utseende av två konstanter: form- och skalfaktorn, k respektive c . Skalfaktorn antas därför för att kunna bestämma formfaktorn.

Formfaktorn kan beräknas enligt (Manwell et al 2002, s. 59):

$$c = \frac{v_{med}}{\Gamma\left(\frac{1}{k} + 1\right)} = \frac{v_{med}}{\Gamma\left(\frac{1}{2} + 1\right)} = \frac{v_{med}}{\frac{\sqrt{\pi}}{2}} \quad [kWh/m^2, \text{år}] \quad \text{Ekvation 6}$$

$$= \frac{2 \cdot v_{med}}{\sqrt{\pi}}$$

Vindfördelningen är därmed klar och energiberäkningarna följer samma beräkningsgång som ovan.

Då vindens energiinnehåll summerat över hela året är beroende av Weibull-fördelningen är det motiverat att redovisa hur stor påverkan den antagna formfaktorn k har på

energiinnehållet och verkligt produktionsutfall. Med ett antaget k -värde på 1,7, vindmedelhastighet på 6,0 m/s fås en skalfaktor c på 6,72 enligt ekvation 6.

Energitätheten uppgår då årligen till 2710 kWh/m², år enligt ekvation 4. Om k -värdet istället ökas till 2,3 fås en skalfaktor på 6,77 och ett energiinnehåll på 1990 kWh/m². Vilket motsvarar en energi skillnad på ca 36 %.

För att reducera denna osäkerhet är det därför bättre att jämföra det verkliga produktionsutfallet för ett känt vindkraftverk med tillhörande effektkurva (Bergström 2007, s. 6). I exemplet nedan används Enercon E70-2,3 MW.

Tabell 1. Jämförelse mellan tre antagna k -värden och vad produktionsutfallet blir som följd.

V_{med} [m/s]	$k=1,7$			$k=2$			$k=2,3$		
	c [m/s]	E [kWh/m ² , år]	E70 [MWh]	c [m/s]	E [kWh/m ² , år]	E70 [MWh]	c [m/s]	E [kWh/m ² , år]	E70 [MWh]
6	6,72	3205	4168	6,77	2259	3874	6,77	1865	3595
7	7,85	5024	5718	7,90	3587	5563	7,90	2962	5369
8	8,97	7264	7190	9,03	5352	7228	9,03	4422	7187

Enligt beräkningarna minskar felmarginalen vid ökande vindhastighet: Vid en årsmedelhastighet på 6,0 m/s uppgår felet som mest till 16 % och vid 8,0 m/s har felet minskat till mindre än 1 %. Genom att därför anta formfaktorn vid beräkningar till 2,0 reduceras felet till som högst 7,8 %.

2.3.1 Jämförelse mellan existerande vindkraftverk

Det finns jämförelser gjorda mellan den uppskattade produktionen baserad på årsmedelhastigheten vid navhöjd (enligt beräkningar ovan) och det verkliga produktionsutfallet (Bergström 2008b, s. 14). Det har då visat sig att skillnader på ± 10 -20 % förekommer. Förklaringen tycks i första hand bero på att vind-effekt sambanden ovan inte fungerar i praktiken. En tänkbar förklaring är att vindkraftverk med stor rotordiameter kommer i kontakt med vindhastigheter som varierar kraftigt mellan lägsta och högsta läget. Bladvinkeln kommer därmed vara optimerad endast under en del av varvet. En annan förklaring till avvikelserna kan vara den inrapporterade statistiken som i många fall saknar trovärdiga siffror för vindkraftverkets hindertid. Ytterligare förklaring som kan ligga till grund för avvikelserna är den turbulens vindkraftverket utsätts för. Två platser med samma medelvind men med olika turbulens ger upphov till olika energimängd i vinden.

Vissa studier tyder på att ett vindkraftverkens produktion ökar då turbulensintensiteten är större. Det är dock oklart hur mycket och vid vilken punkt turbulens övergår till en negativ påverkan för produktionsutfallet (Bergström 2008b, s. 15).

2.4 Vindprofil och landskapets påverkan

Landskapets utseende har stor påverkan på vinden i fråga om vindprofilens egenskaper. Beroende på markens skrovlighet bromsas vinden olika mycket pga. friktionen. I ett öppet landskap, exempelvis slätliknande landskap som i Skåne är friktionen låg jämfört med ett skogslandskap. Vindens variation med höjden är därför som störst i landskap med stor skrovlighet. Då vindprofilens egenskaper beror av ytans beskaffenhet anpassas vindprofilen

vid en landskapsövergång. Hur lång sträcka som krävs för anpassningen beror bl.a. på typ av övergång och den termiska skiktningen.

Variationer i topografin ändrar vindfältet beroende på terrängens höjd och den termiska skiktningen. Det finns enklare samband för att uppskatta ett hinders påverkan på vindens strömning utseende. Dock gäller dessa enbart under ideala förhållande och bör därför användas med försiktighet. Oftast samverkar kullar, dalgångar och lokala hinder till vindens strömning vilket gör att de sambanden är för komplexa för att kunna hanteras av de enklare matematiska modellerna.

Den termiska skiktningen påverkar vindens variation med höjden och därmed vindstyrkan i marknära skiktet. Skiktet varierar bl.a. med årstid och landskapstyp, vilket innebär att information om den vertikala vindgradienten är av betydelse då vinden ska beräknas på 50-100 m höjd utifrån t.ex. tillgänglig statistik från mätmaster på 10 m höjd (Bergstöm 2008b, s. 3-4).

För en genomsnittlig vindprofil över låg vegetation har Monin-Obukhovs similaritetsteori visat sig stämma (Manwell et al 2002, s. 43)

$$v = \left(\frac{u_*}{k}\right) \ln \left(\frac{z}{z_0}\right) \quad [m/s] \quad \text{Ekvation 7}$$

Där u_* är friktionshastigheten, den karakteristiska hastighetsskalan för turbulensen genom hela gränsskiktet.

$$u_* = \sqrt{\tau/\rho} \quad [m/s]$$

$$\tau, \text{skjuvspänning} \quad [N/m^2]$$

$$\rho, \text{luftens densitet} \quad [kg/m^3]$$

k =von Karmans konstant=0,41, z_0 är råhetslängden och z höjd ovan mark. Z_0 definieras som den teoretiska höjd ovan mark där vindhastigheten är noll.

2.5 Vind och turbulens över skog

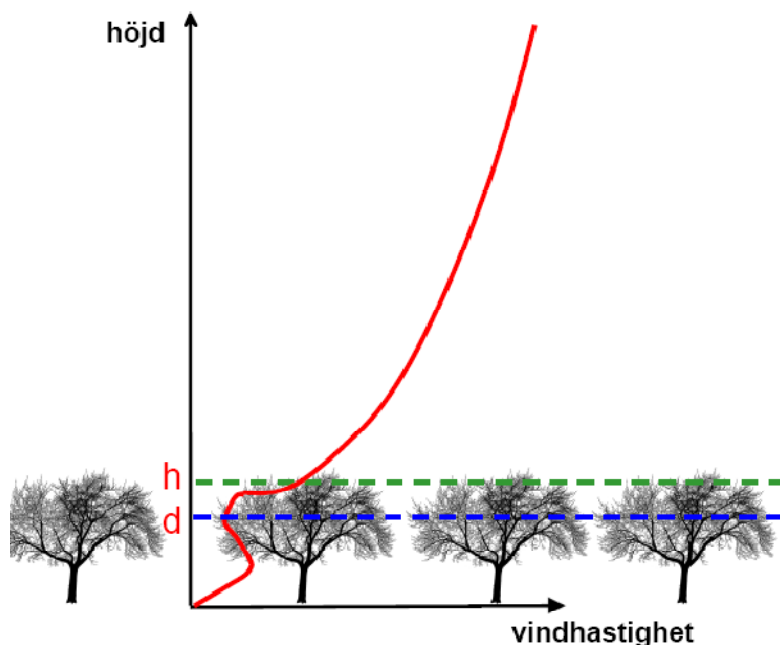
Ytskiktets egenskaper över hög vegetation skiljer sig åt i fråga om turbulensen jämfört med låg vegetation. Över låg vegetation minskar de turbulenta flödena vertikalt med höjden, vilket inte är fallet för hög vegetation där turbulensen avtar långsammare. Skillnaden förklaras med att luften strömmar med låg hastighet i vegetationsskiktet och med hög hastighet ovanför trädtopparna. Skillnaden ger upphov till en stor vindgradient ovan vegetationen och en inflexionspunkt i vindprofilen, turbulens uppstår då som är i storleksordning som vegetationsskiktets djup. Similaritetsteorin stämmer därför inte för vegetationer av denna typ.

För att fortfarande kunna använda det logaritmiska sambandet för att beskriva vindprofilen över skog så används en "nollplaneförskjutning", vilket innebär att höjdskalen förflyttas för

att kunna bortse från vindens uppförande i vegetationen. Normala värden för nollplaneförskjutningen är 2/3-3/4 av vegetationens höjd. Uttrycken ovan skrivs då om till (Bergström 2008b, s. 11):

$$v = \left(\frac{u_*}{k}\right) \ln \left(\frac{z-d}{z_0}\right) \quad [m/s] \quad \text{Ekvation 8}$$

Där d är nollplaneförskjutningen (övrigt samma som ovan).



Figur 3. Vindprofil över skog med nollplaneförskjutningen d . (Källa: Hans Bergström)

Turbulensintensiteten avgörs förutom av vegetationens beskaffenhet av termiska förhållanden i atmosfären och instabil skiktning. Instabil skiktning ökar turbulensgraden, medan stabil skiktning sänker turbulensgraden. Gränsskitets höjd avgörs av om det är stabil eller instabil skiktning, vilket i sin tur betyder att turbulensen avtar olika mycket med avseende på höjden ovan mark. Redan vid 100 m kan turbulensen reducerats kraftigt jämfört med förhållandena närmare trädtopparna.

Enligt similaritetsteorin (ekvation 7) sjunker turbulensintensiteten från ca 25 % på 50 m höjd till drygt 20 % på 100 m höjd, vilket mest troligen är för höga medeltal. Observationer tyder på stor spridning, allt från 2-3 % till 30-40 % turbulensintensitet vid 100 m höjd. Medelförhållanden är därför osäkrar att använda vid beräkningar (Bergström 2008, s. 12).

2.6 Råhetsklasser

För att enklare kunna beskriva topografin jämfört med råhetslängden z_0 har råhetsklasser definierats enligt European Wind Atlas (Danish Wind Industry Concept 2009a):

$$z_0 \leq 0,03$$

$$R = 1,699823015 + \frac{\ln(z_0)}{\ln(150)} \quad \text{Ekvation 9}$$

$$z_0 \leq 0,03$$

$$R = 3,912489289 + \frac{\ln(z_0)}{\ln(1/3)} \quad \text{Ekvation 10}$$

Tabell 2. Motsvarande råhetsklasser, definition enligt WASP och beskrivning av terräng (Danish Wind Industry Concepts, 2009b)

Råhetklass	Råhetslängd	Landskapsbeskrivning
0	0.0002	Vattenyta
0,5	0.0024	Helt öppen terräng med jämn yta, ex. betongen på en flygplats, klippt gräs etc.
1	0.03	Öppen åkermark med staket, buskage, utspridda byggnader. Endast små höjdskillnader
1,5	0.055	Jordbruksmark med en del hus, 8m hög skyddande buskhäck med ett avstånd på ca 1250m.
2	0.1	Jordbruksmark med en del hus, 8m hög skyddande buskhäck med ett avstånd på ca 500m.
2,5	0.2	Jordbruksmark med många byggnader, buskar och växter, 8m hög skyddande buskhäck med ett avstånd på ca 250m.
3	0.4	Byar, små städer, jordbruksmark med många/höga skyddande buskhäcker, skogar och väldigt grov och ojämn terräng.
3,5	0.8	Större städer med höga byggnader.
4	1.6	Väldigt stora städer med höga byggnader och skysrapor.

2.7 Jämförelse mellan skog- och slättlandskap

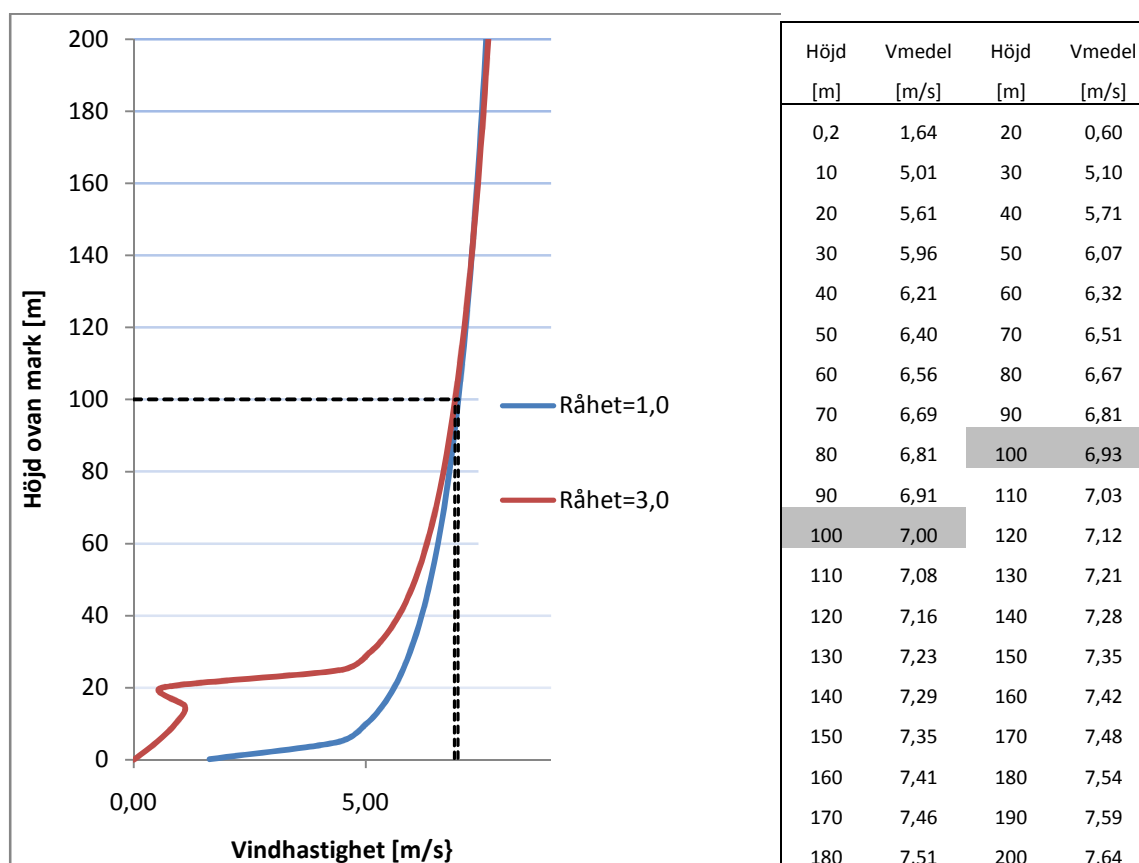
En jämförelse mellan vindprofilens utseende över slättlandskap respektive skogslandskap har gjorts med hjälp av den nämnda similiaritetsteorin (ekvation 7 och 8). I exemplet antas skogen bestå mestadels av träd vars toppar når en höjd på 25 meter. Ekvation 7 och 8 har använts för beräkningar i Excel där

$$u_* = 0,35$$

$$z_0 = 0,03$$

$$k = 0,41$$

Utvärderingen finns beskriven nedan.

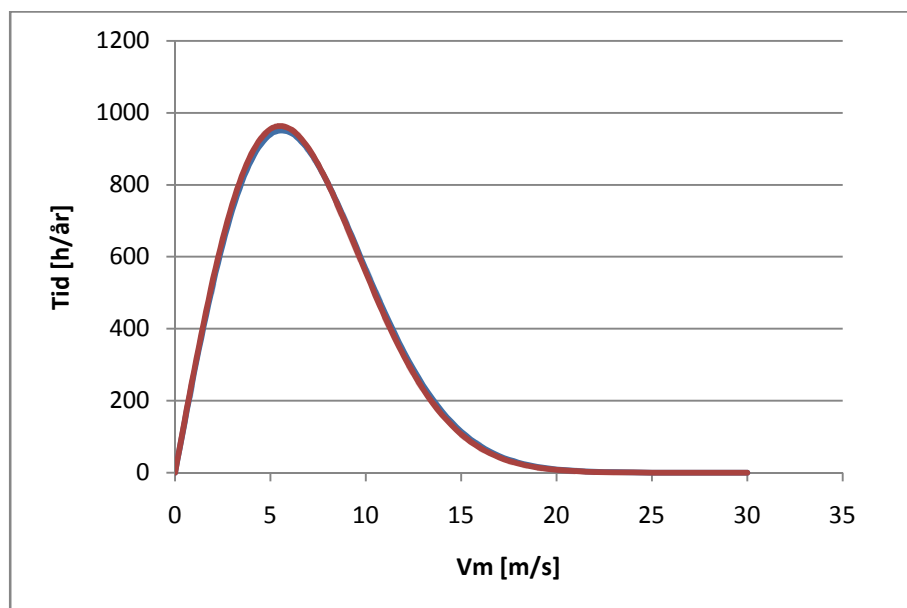


Figur 4. Två uppskattade vindprofiler utifrån similiaritetsteorin. Råhet=1,0 ($z_0 = 0,03$) motsvarar ett slättlandskap medans råhet=3,0 ($z_0 = 0,4$) motsvarar skogslandskap. Nollplaneförskjutning används där hänsyn tas till ca. 3/4 av vegetationens höjd (20m) för vindprofilen över vegetationen med råheten 3,0.

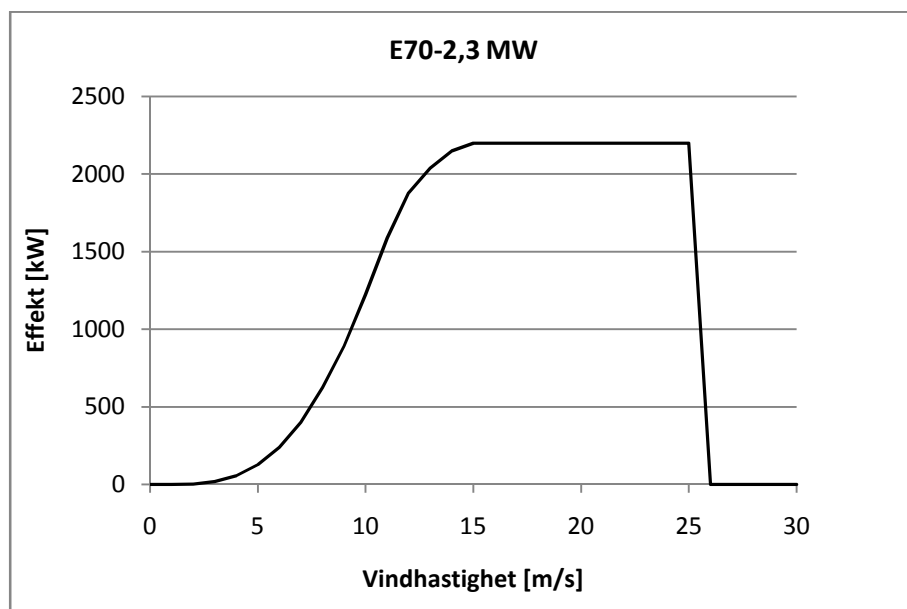
100 m över mark erhålls en vindhastighet på 7,0 m/s över slättlandskapet, medans vindhastigheten över skog 6,93 m/s vid samma höjd. För att nå samma årsmedelhastighet krävs det därför högre navhöjd för skogsetableringen.

En högre navhöjd innebär större anläggningskostnad och är därmed ej önskvärt. För att kompensera för den lägre vindhastigheten är en möjlighet att förse verken med längre vingblad. Verkets utnyttjningstid blir då högre men med en lägre energitäthet som följd. För att utreda vilken areaökning som krävs för att uppnå samma energiproduktion har ett Enercon E70, 2,3 MW verk med en rotordiameter på 71 m använts i exemplet. Årsmedelhastigheten

vid 100 m över mark har använts för att uppskatta två Weibull-kurvor som sedan jämförts med verkets effektkurva. Formfaktorn, k , är antagen i båda fallen till 2,0 som därefter givit skalfaktorn c (se ekvation 2-6). Beräkningar är utförda i Excel.



Figur 5. Uppskattade Weibull-fördelningar för årsmedelhastigheterna vid 100m höjd över slätt- respektive skog med råheten 1,0 och 3,0. Formfaktorn 2,0 i båda fallen, skalfaktorn 7,9 för råheten 1,0 samt skalfaktorn 7,8 för råheten 3,0.



Figur 6. Effektkurva tillhörande Enercon E70, 2,3 MW, rotordiameter=71m.

Den förväntade energiproduktionen beräknas därefter enligt ekvation 5, där integrationen har utförts genom att dela upp vindhastigheten i intervall om 1 m/s och därefter multiplicerat effektkurvan med de båda Weibull-fördelningarna.

Tabell 3. De båda Weibull-fördelningarna multipliceras med verkets effektkurva. Epot = vindens potentiella energi/m², år. E70-2,3=Total årlig energiproduktion för aktuell vindhastighet.

		Vmedel 7 [m/s]		Vmedel 6,91 [m/s]			
		k, formfaktor 2 [-]		k, formfaktor 2 [-]			
		c, skalfaktor 7,9 [m/s]		c, skalfaktor 7,8 [m/s]			
Vindhastighet [m/s]	Tid [h]	Evind [kWh/m ² , år]	E70-2,3 [MWh,år]	Tid [h]	Evind [kWh/m ² , år]	E70-2,3 [MWh,år]	
0	0	0	0	0	0	0	
1	276	0	0	283	0	0	
2	527	3	0	540	3	0	
3	729	12	12	746	13	12	
4	869	35	37	886	35	37	
5	941	73	104	955	75	106	
6	946	128	220	956	129	222	
7	896	192	369	901	193	371	
8	805	258	520	805	257	520	
9	690	314	640	684	312	635	
10	565	353	702	556	348	690	
11	444	369	695	433	360	678	
12	335	362	628	324	350	606	
13	243	334	559	232	319	535	
14	170	291	391	161	275	369	
15	114	241	263	107	225	246	
16	74	190	171	68	175	157	
17	46	143	107	42	130	97	
18	28	102	65	25	92	58	
19	16	70	38	14	62	33	
20	9	46	21	8	40	18	
21	5	29	12	4	25	10	
22	3	18	6	2	15	5	
23	1	10	3	1	8	3	
24	1	6	2	1	5	1	
25	0	3	1	0	2	1	
26	0	2	0	0	1	0	
27	0	1	0	0	1	0	
28	0	0	0	0	0	0	
29	0	0	0	0	0	0	
30	0	0	0	0	0	0	
Summa	8737	3587	5563	8735	3450	5410	

Produktionsutfallet blir som väntat mindre vid den lägre vindhastigheten (5410 MWh jämfört med 5563 MWh). Den aningen lägre energiproduktionen kan antingen kompenseras med högre navhöjd eller större rotordiameter. För att kompensera med högra navhöjd krävs det i det här exemplet ca. 10 m högre navhöjd.

För att kompensera med en större rotordiameter används sambandet i ekvation 1, $P \propto v^3$. Vilket då innebär att erforderlig diameter blir:

$$\frac{\rho A_2 v_2^3}{2} = \frac{\rho A_1 v_1^3}{2}$$

$$\frac{\rho \pi d_2^2 v_2^3}{4 \cdot 2} = \frac{\rho \pi d_1^2 v_1^3}{4 \cdot 2}$$

Som efter förkortning ger

$$d_2 = \sqrt{\frac{d_1^2 v_1^3}{v_2^3}} = \sqrt{\frac{71^2 \cdot 7,0^3}{6,91^3}} = 72,4 \text{ m}$$

2.8 Vindpotential

Nedan ges en kortfattad beskrivning av de modeller som används/har använts vid olika sammanhang för vindkartering. Fokus läggs på modeller som använts i Sverige, liknande modeller har använts i ett flertal andra länder men kommer ej behandlas i det här arbetet.

2.8.1 Enklare modell

I slutet av 1970-talet inledde SMHI ett samarbete med MIUU (Meteorologiska institutionen vid Uppsala universitet) för att försöka uppskatta medelvindarna på 50 och 100 m höjd i södra Sveriges kustområden. Statistik från vindmätningar på 10 m höjd, främst från flygplatser, användes tillsammans med enklare exponentiella samband för att beskriva vindens variation med höjden. Exponenterna var beroende av markens råhet och den atmosfäriska stabiliteten.

I ett senare skede kom en metod vanligtvis att användas utvecklat av Risø National Laboratory i Danmark. Den bygger på datorprogrammet WAsP och har använts för vindkarteringar främst i Europa. Modellen använder fysikaliska samband rörande vindprofilens variation med höjden i det atmosfäriska gränsskikt som påverkas av underliggande vegetation. Hänsyn tas i parametrisk form till topografin, råhet och eventuella hinder som byggnader och kullar. WAsP fungerar på liknande vis som den modell utvecklad av SMHI och MIUU, dock beskrivs vindprofilen annorlunda samt att den svenska modellen ej tar hänsyn till topografin.

Statistik från vindmätningarna som nämns ovan ligger därefter till grund för att beräkna en vindatlas, vilket beskriver vindklimatet för olika råheter och höjder. Atlasen antas vara giltig för ett större område, och används därefter för att skapa en ny vindfördelning för områden som saknar vindmätningar. Beräkningarna utförs i sektorer om 30 °, där hänsyn i varje sektor tas till råhet, topografi och eventuella hinder.

Modellen har visat sig i medeltal ge en rimlig bild av rådande vindförhållanden över ett större område. Nackdelen är att den inte kan hantera de fall som är av komplexare karaktär, exempelvis högländ som fjällområden utgör. Modellen tar inte heller hänsyn till den termiska skiktning som påverkar vindprofilens utseende mer än på ett förenklat vis. För det enskilda fallet är därför modellen svår att använda med någon större säkerhet, även i enklare terräng. En osäkerhet med $\pm 20\text{-}30\%$ är därför inget ovanligt. För att kunna använda modellen med

högre säkerhet krävs det alltså bättre kännedom om klimatets variationer inom skalan 1-100 km än vad som finns att tillgå från de 10 m höga mätpunkterna vid flygplatserna (Bergström 2008b, s. 4-5).

2.8.2 Mesoskale-modeller

För ökad säkerhet där terrängen är mer komplex, så som i skog där WAsP modellen medför för osäkra resultat har mer avancerade modeller utvecklats. Mesoskale-modeller är numeriska fluiddynamiska modeller med ekvationer som beskriver vind, temperatur, luftfuktighet och turbulens.

Bland annat har en mesoskale-model på Uppsala universitets utvecklats, den s.k. MIUU-modellen (Metrologi Uppsala Universitet). Modellen har använts för vindkartering över hela Sverige med en kommersiell tillgänglig upplösning på 1x1 km för vindkartorna. Kartorna återfinns bl.a. på Energimyndighetens hemsida och Uppsala universitet för tre höjder 49 m, 72 m, 103 m ovan nollplaneförskjutningen. Karteringen ingår i Energimyndighetens "Kartläggning av vindpotential i Sverige". Syftet är att finna intressanta platser ur ett vindkraftperspektiv. Den nuvarande modellen (2007) har möjlighet att kartera vinden med en upplösning om 0,5 x 0,5 km (Bergström 2007, s. 1-2).

Mesoskale-modeller är datorkrävande och därmed tidskrävande. Vindkarteringen i Sverige har därför genomförts med ett begränsat antal modellkörningar (192 stycken) som är tänkt att representera klimatets variation över året. Landet har delats upp i 14 delområden, vardera med 29 beräkningsnivåer i höjdd. Beräkningsnivåerna använder logaritmisk skala för ökad noggrannhet för det turbulenta gränsskiktet och sträcker sig upp till ca. 10 000 m. Modellen kräver indata i form av vindens styrka och riktning, hav och marktemperatur, topografi, råhet och markanvändning.

Verifiering av modellen har gjorts med hjälp av vindmätningar från 66 platser 20-145 m höga mätmaster. Av 88 % av jämförelsen ligger differensen mellan $\pm 0,4$ m/s. Medeldifferensen av medelhastigheten mellan modell och verklighet visade sig uppgå till $-0,02$ m/s. Den har även visat sig ta hänsyn till vindens avtagande hastighet med avståndet från kustlinjerna (Bergström 2008b, s. 6-9).

2.9 Beräkningsprogrammet WindPro

Ett beräkningsprogram som används flitigt av vindkraftprojektörer är WindPro. Programmet är utvecklat av företaget EMD (i Danmark). Programvaran är tänkt att användas vid energi, ljud, skugg- och landskapsbilda-beräkningar. Det finns även en del i programmet som går att använda för ekonomiberäkningar (Nielsen et al 2001, s 13-39).

2.9.1 Beräkningsmoduler

Till programmet går det att köpa olika moduler beroende på tänkt användningsområdet. En enkel modul, *Atlas*, fungerar endast för enklare landskapsförhållanden, såsom vegetation med små höjdskillnader (högst 50 m) och med endast några få hinder i varje sektor. Modulen har en begränsning i form av att endast ett vindkraftverk kan analyseras åt gången. I övrigt fungerar beräkningsmodellen ungefär som WAsP (avsnitt 2.7.1). Atlasmodulen använder befintlig statistik från mätstationer, oftast på 10 m höjd, som räknas om till en aktuell vindatlas för den givna platsen. För energiberäkningar jämförs därefter vindatlasen mot valda verk ur ett vindkraftsbibliotek som medföljer programvaran. Information om effektkurva och

ljudduppkomst finns inlagda i registret. Saknas något verk i biblioteket finns det möjlighet att manuellt lägga till uppgifter.

För mer komplex terräng där Atlas modulen inte är tillämpbar finns en mer avancerad beräkningsmodul vars kärna består av *WAsP* programmet, utvecklat av Risø i Danmark. Förutom att modulen är tillämpbar i större utsträckning finns även möjlighet till vindparksberäkningar. Statistik från befintliga mätstationer används även i *WAsP* modulen och beräkningsmetoden är densamma i övrigt.

I de fall projektören låtit göra vindmätningar på plats finns det möjlighet att föra in värdena i en beräkningsmodul kallad *METEO*. Beräkningarna utförs därefter antingen genom att anpassa de uppmätta värden till en Weibull fördelning som därefter jämförs med effektkurvan, eller använda de uppmätta värdena direkt mot effektkurvan.

För generering av vindkartor finns en modul kallad *Resource* att tillgå. Den arbetar utifrån statistik och använder samma beräkningsmetod som *WAsP* modulen. Kartorna redovisas med upplösningen 1x1 km.

För beräkningar av energiproduktionen av vindparker finns en modul kallad *PARK*, som även tar hänsyn till den något försämrade produktionen grupplacerade verk medför jämfört med verk placerade separat. Beräkningarna baseras i övrigt på någon av de ovanstående modulerna där vindatlasen anpassas enligt en park-modell utvecklad av N.O. Jensen, Risø.

2.9.2 Råhetsklassning

Oavsett vilken av modulerna som används för beräkningarna behöver vindstatistiken kombineras med omgivningsbeskrivning för ett rimligt beräkningsresultat. Uppgifter om markens vegetation (råhetsklass), höjdskillnader och eventuella hinder måste föras in i programmet. Råhetsklassningen förs in för varje sektor. Råheten anges antingen med råhetsklasser, eller den s.k. råhetslängden z_0 , som definieras som den teoretiska höjd ovan mark där vindhastigheten är lika med noll (se tabell 2). Varje sektor kan delas in i områden för att ta hänsyn till eventuella förändringar i markens beskaffenhet. Enligt EMD påverkas produktionsutfallet som mest av vegetationen med radien 20 km från vindkraftverkets centrum. Radien närmast verket har störst påverkan, och bör därför inverteras på plats för att bedöma vegetationen.

2.9.3 Känslighetsanalys

För att avgöra hur stor påverkan landskapet har med avseende på avståndet från vindkraftverkets centrum har en känslighetsanalys genomförts. I analysen utvärderas ett Vestas V80-2,0 MW med tre olika navhöjder: 60 m, 78 m och 100 m. Verket valdes då det är en vanligt förekommande modell och effekt, samt att verket har tre lämpliga navhöjder som bör vara representativ för övriga verk.

Verket placerades strax utanför Offerdal, Råshön, samma placering som verk nr 781. Koordinaterna är enligt RT90: X=7043 070, Y=1416 414. Närmaste vindstatistik som finns att tillgå är från Östersund/Frösön, 38,6 km från verket.

Vegetationen kan kortfattat beskrivas som kuperad skogsterräng med ganska besvärlig råhetsindelning. Detta påverkar dock inte slutsatserna i analysen, utan råheten är angiven till 0,0 för radien 0-20 km från vindkraftverket. Antagandet ger referensvärden som

fortsättningsvis kallas ”verkliga produktionen” för de tre olika navhöjderna. I samtliga beräkningar har luftens densitet antagits till 1,25 kg/m³.

Tabell 4. Produktionen för Vestas V80-2,0 MW. Råhet 0-4 för radien 0-20 km från verket. E = årlig energiproduktion. V_m = årsmedelhastighet vid angiven navhöjd.

Navhöjd [m]	Råhet 0,0		Råhet 1,0		Råhet 2,0		Råhet 3,0		Råhet 4,0	
	E [MWh/år]	V _m [m/s]	E [MWh/år]	V _m [m/s]	E [MWh/år]	V _m [m/s]	E [MWh/år]	V _m [m/s]	E [MWh/år]	V _m [m/s]
60,0	4725,0	6,7	3328,0	5,6	2703,0	5,1	1879,0	4,5	1189,0	3,8
78,0	5007,0	6,9	3822,0	6,0	3133,0	5,5	2215,0	4,8	1427,0	4,1
100,0	5266,0	7,1	4302,0	6,4	3561,0	5,8	2563,0	5,1	1683,0	4,4
120,0	5513,0	7,3	4864,0	6,8	4066,0	6,2	2971,0	5,4	1970,0	4,7

Av värdena att döma krävs det betydligt högre navhöjd då råheten ökar. Exempelvis krävs det ca 30 m högre navhöjd vid en övergång från råheten 1,0 till 2,0 från ursprungliga 60 m hög navhöjd för att erhålla samma energiproduktion:

$$Navhöjd = 78 + \frac{(3561 - 3328)(100 - 78)}{(3561 - 3133)} = 89,97 \approx 90m$$

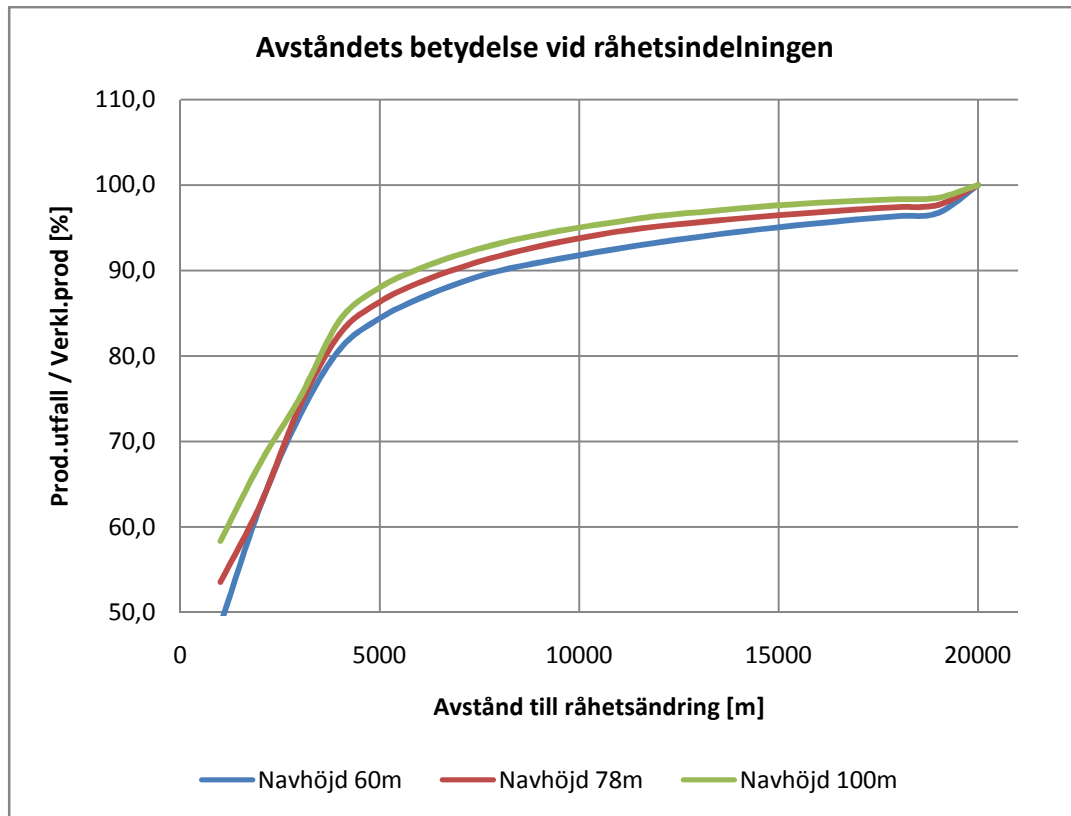
Ekvation 11

Genom att dela upp radien (0-20 km från verket) i två råhetsklasser går det att bedöma hur stor vikt olika avstånd har för produktionsutfallet. Vid beräkningarna i WindPro har råheten närmast verket antagits till 0,0 och i den andra råhetsklassen 3,0.

Tabell 5. Resultat och beräkningar av WindPro analysen. Avståndet i vänstra kolumnen avser avståndet från vindkraftverket till råhetsändringen.

Avstånd [m]	Prod.utfall 60m [MWh]	Verkl.prod / Prod.utfall 60m [%]	Prod.utfall 78m [MWh]	Verkl.prod / Prod.utfall 78m [%]	Prod.utfall 100m [MWh]	Verkl.prod / Prod.utfall 100m [%]
1000	2295	48,6	2682	53,6	3074	58,4
2000	2951	62,5	3135	62,6	3555	67,5
3000	3455	73,1	3716	74,2	3960	75,2
4000	3819	80,8	4138	82,6	4436	84,2
5000	3989	84,4	4324	86,4	4636	88,0
6000	4099	86,8	4437	88,6	4752	90,2
7000	4185	88,6	4523	90,3	4839	91,9
8000	4252	90,0	4592	91,7	4907	93,2
9000	4297	90,9	4649	92,9	4961	94,2
10000	4338	91,8	4696	93,8	5005	95,0
11000	4375	92,6	4736	94,6	5042	95,7
12000	4408	93,3	4766	95,2	5077	96,4
13000	4439	93,9	4790	95,7	5099	96,8
14000	4467	94,5	4811	96,1	5122	97,3
15000	4492	95,1	4830	96,5	5141	97,6

16000	4514	95,5	4848	96,8	5157	97,9
17000	4535	96,0	4864	97,1	5169	98,2
18000	4554	96,4	4878	97,4	5179	98,3
19000	4571	96,7	4891	97,7	5188	98,5
20000	4725	100,0	5007	100,0	5266	100,0



Figur 7. Vegetationens betydelse för produktionsutfallet som funktion av avståndet från verkets centrum.

Av analysen att döma är det viktigast att råhetsindelningen blir så korrekt som möjligt 0-5000 m från verket. Kurvan planar därefter ut och efter 10 000 m är landskapets påverkan betydligt mindre.

Landskapets inverkan på produktionsresultatet avtar även med höjden. I beräkningsexemplet ovan krävs det ca 8000 meter av korrekt råhetsindelning för att resultatet ska överensstämma till 90 % för ett verk med en navhöjd på 60 m, medans vid navhöjden 100 m räcker det med ca 6000 meter korrekt råhetsindelning.

2.10 Statistiskt material och tidigare kunskapsinventering

Elforsk har i samarbete med Energimyndigheten årsvis från 1997 genomfört driftuppföljning av landets samtliga vindkraftverk vars effekt överstiger 60 kW. I uppföljningen ingår förutom driftresultat för det angivna året även analys, beräkningar och sammanställning av:

- Vindens energiinnehåll jämfört med normalåret
- Total installerad effekt
- Den totala produktionen fördelat över året.

Tabell där samtliga verk finns sammanställda med information om

- Fabrikat
- Effekt
- Beräknad produktion
- Verklig produktion
- Generatortid
- Hindertid
- Tillgänglighet
- Produktion/installerad effekt
- Produktion/svepyta
- Kapacitetsfaktor
- Driftstart

Energimyndigheten har även under 2008 utgivit en kunskapsinventering kring vindar och vindkraft i skog (Dahlström, 2008). Här finns intressant information om vilka metoder aktörerna använder sig av för att utreda platsernas lämplighet. Generellt går det att säga att samtliga projektörer känner en viss osäkerhet kring etableringen i skog pga. bristande erfarenhet sen tidigare.

För att hitta intressanta platser används i många fall MIUU-modellen (se avsnitt 2.7.2). Därefter görs vindmätningar på plats på olika höjder under varierande tid för att försöka utröna hur vindförhållandena i fråga om hur vindgradienten och turbulensen avviker från mer traditionella platser.

Inventeringen redogör därefter för de skogsetablerade verk som finns redovisade i Elforsks driftuppföljning, vilket är drygt 50 stycken med varierande effektstorlek. De flesta av verken står i renodlade skogsområden, oftast på kullar och andra höjdsträckningar. Vissa av de valda verken står dock i öppen mark men är påverkade av skog i omgivningen. Syftet är att försöka klargöra samband mellan parametrar som:

- Förhållandet mellan verklig och beräknad elproduktion som funktion av installerad effekt.
- Utnyttjningstid som funktion av installerad effekt.
- Produktion per kvadratmeter svepyta som funktion av effekt.
- Förhållandet mellan verklig och beräknad elproduktion som funktion av drifttagningsåret.
- Förhållandet mellan verklig och beräknad elproduktion som funktion av navhöjden.
- Utnyttjningstiden som funktion av lokalisering (länsvis).

I punkterna ovan jämförs de valda vindkraftverken mot landets samtliga vindkraftverk i form av medelvärde. De två sista punkterna har dock ingen jämförelse mot övriga verk.

En av slutsatserna som görs i studien är att produktionsutfallet för skogsetablerade verk är så när som 100 % av beräknad, dock är avvikelserna betydligt större för de mindre verken. En förklaring som ges är att projekten är stora och troligen genomgått en seriös och ambitiös

projektering, exempelvis för vindmätningar. En av slutsatserna är att det verkligen är möjligt att beräkna utfallet i denna terrängtyp.

Utnyttjningstiden, årsproduktionen i kWh dividerat med generatoreffekten, som funktion av verkens storlek visar sig vara högre än genomsnittet. Utnyttjningstiden är ett mått på hur väl lämpat det valda verket är för den valda platsen. Även här dras slutsatsen att de större verken i skog är bättre placerade än genomsnittet.

Jämförelsen av produktionen per kvadratmeter svepyta som funktion av installerad effekt, klargör att det bästa resultatet ges av de större rotordiametererna. Projektörerna för verken i skog har valt förhållandevis större rotordiameter/effekt jämfört med medel. Utnyttjningstiden blir då högre med begränsad produktion/kvadratmeter som följd.

Den beräknade produktionen visar sig bli allt säkrare med åren. Ökad erfarenhet och noggrannare utredningar är en trolig förklaring.

Det går inte att dra några slutsatser mellan förhållandet av verklig och beräknad produktion som funktion av navhöjden. Värdena är alltför spridda.

Utnyttjningstiden som funktion av lokaliseringen tyder på att produktionsutfallet är högre i de nordliga delarna av landet jämfört med sydliga.

En sammanfattande slutsats som kan dras är att produktionsförutsägelserna för verk i skog är säkrare än för övriga verk och att de dessutom presterar lika bra. Orsaken tros vara seriösa projekteringar.

3 Analys av valda verk

3.1 Valda verk

Av landets totalt ca 900 vindkraftverk finns det inrapporterad statistik för ca 800 av verken. 94 av dessa verk har valts ut för vidare analys då de uppfyller kraven på en märkeffekt på 1,5-3,5 MW, är landbaserade och det finns statistiskt underlag om sträcker sig minst 12 månader bakåt i tiden. Verken är spridda över stora delar av landet i varierande terräng. Flera av verken tillhör gruppstationer vilket medför att den förväntade produktionen är ca 5-10 % lägre jämfört med ensamplacerade verk.

Verken som är utvalda för analys finns redovisade i bilaga 1, utvalda verk. Tabell 6 och 7 nedan redovisar förekommande verk i studien. För att hamna i kategorin ”skog” krävs det att verken är lokaliserade i eller i närheten av renodlade skogsområden. För indelningen har kartor från Lantmäteriet samt satellitbilder från Eniro använts.

Tabell 6. Vilka tillverkare som finns representerade i arbetet, samt hur många av dessa som är lokaliserade i skogen.

Tillverkare	Totalt	Skog	Andel, %
Vestas	49	22	45
Enercon	35	5	14
GE Wind	3	0	0
NEG Micon	7	7	100
Summa	94	34	36

Tabell 7. Teknisk beskrivning över vindkraftverken som behandlas i arbetet. In.vind = inkopplingsvind, Ur.vind = urkopplingsvind.

Beskrivning	Effekt [kW]	Rotordiameter [m]	Navhöjd [m]	In.vind [m/s]	Ur.vind [m/s]	Märkvind [m/s]
Vestas V82-1,5 MW	1500	82	67, 78	3,5	22	13
Vestas V90-1,8 MW	1800	90	95	3,5	25	12
Vestas V90-2,0 MW	2000	90	80, 95	2,5	25	13
Vestas V80-2,0 MW	2000	80	78	4	25	15
Vestas V90-3,0 MW	3000	90	80	4	25	15
Enercon E66-1,5 MW	1500	66, 70	65, 67, 86	2,5	25	15
Enercon E82-2,0 MW	2000	82	64, 65, 78, 79, 85	2,5	25	12
Enercon E70-2,3 MW	2300	71	70	2,5	31	12,5
NEG Micon -1,5 MW	1500	72	62, 67	4	25	15
GE - 2,5 MW	2500	100	65	3,5	25	12,5

3.2 Detaljstudie

En detaljstudie har genomförts för att försöka utröna om den teori som diskuterats i avsnitt 2.7 överensstämmer med verkligheten. Genom att använda det statistiska materialet, vindstatistik från WindPro samt offentliga handlingar har teorin som diskuterats under avsnitt 2.7, jämförelse mellan skog- och slättlandskap verifierats. Resonemanget utgår från att det

enligt teorin går att kompensera för de sämre förhållandena som generellt råder i skogen med högre navhöjd och större rotordiameter.

Genom att använda sex stycken vindkraftverk, varav tre är etablerade i skogen och tre på slättliknande vegetation har en jämförelse gjorts. Verken är indelade i tre grupper, där första vindkraftverket i varje grupp används som referensverk.

Tabell 8. Utvalda verk för detaljstudien. D=Rotordiameter, H=navhöjd.

Grupp	Nr	Beskrivning	Lokalisering, RT-90		Landskapstyp	Fabrikat	Effekt [kW]	D [m]	H [m]
			X	Y					
1	386	Gotland, Slitevind, Smöjen	6405270	1686840	Slätt	Vestas	1500	66	67
	777	Jämtland, Offerdal Råshön	7043151	1415634	Skog	Vestas	1500	82	78
2	738	Gotland, Skåls Näs	6328995	1646682	Slätt	Vestas	2000	80	78
	878	Västerbotten, Malå, Hornberget	7223101	1631439	Skog	Vestas	2000	90	80
3	868	Öland, Stora Istad	6313174	1562210	Slätt	Enercon	2000	82	78
	822	Härjedalen, Långå	6930800	1369600	Skog	Enercon	2000	70	85

3.3 Samtliga verk

Förutom detaljstudien ovan görs en utvärdering av samtliga vindkraftverk baserad på den tillgängliga statistiken. Statistik för de aktuella verken är sammanställda på www.vindstat.nu, och ligger till grund för Elforsk och Energimyndighetens driftuppföljning som görs varje år. Uppgifterna är bearbetade i Excel.

Statistiken för de olika verken sträcker sig olika långt bakåt i tiden. I flera fall, framförallt för relativt nya verk saknas det statistik för mer än 12 månader. För att få med ett så stort antal verk som möjligt har därför statistik mellan 2008-02 till 2009-02 använts vid beräkningarna.

3.4 Beräkningar

Nedan ges beskrivningar av de beräkningar som gjorts av den tillgängliga statistiken.

3.4.1 Linjär regression

För att hitta trender mellan två parametrar har linjär regression används. Metoden är av stor betydelse och används bl.a. när trenden mellan produktion och installerad effekt ska utrönas.

Regressionsanalysen har till syfte att skapa en trendlinje för en uppsättning data genom att skatta dess utseende med den s.k. minsta-kvadrat-metoden (MK-metoden). Beräkningarna görs i Excel som använder den nedan beskrivna metoden.

MK-metoden bestämmer ett minimum för

$$Q(a, b) = \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2 \quad \text{Ekvation 12}$$

vilket är summan av kvadraterna av avstånden mellan varje punkt och linjen kan minimeras. Skattningarna för a och b fås genom att sätta nedanstående derivator lika med noll för att hitta minimipunkterna.

$$\frac{\delta Q}{\delta a} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i) = 0$$

Ekvation 13

$$\frac{\delta Q}{\delta b} = -2 \sum_{i=1}^n x(y_i - a - bx_i) = 0$$

Ekvation 14

Skattningarna till a och b blir då

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i y_i - n \bar{x} \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Ekvation 15

$$a = \bar{y} - b \bar{x}$$

Ekvation 16

Den skattade regressionslinjen fås då av att sätta in a och b i räta linjens ekvation

$$y = a + bx$$

Ekvation 17

3.4.2 Polynomisk regression

På samma vis kan polynom av högre grad skattas. I arbetet används polynom för att beskriva markens råhet. För ett andragradspolynom blir uttrycket ovan då

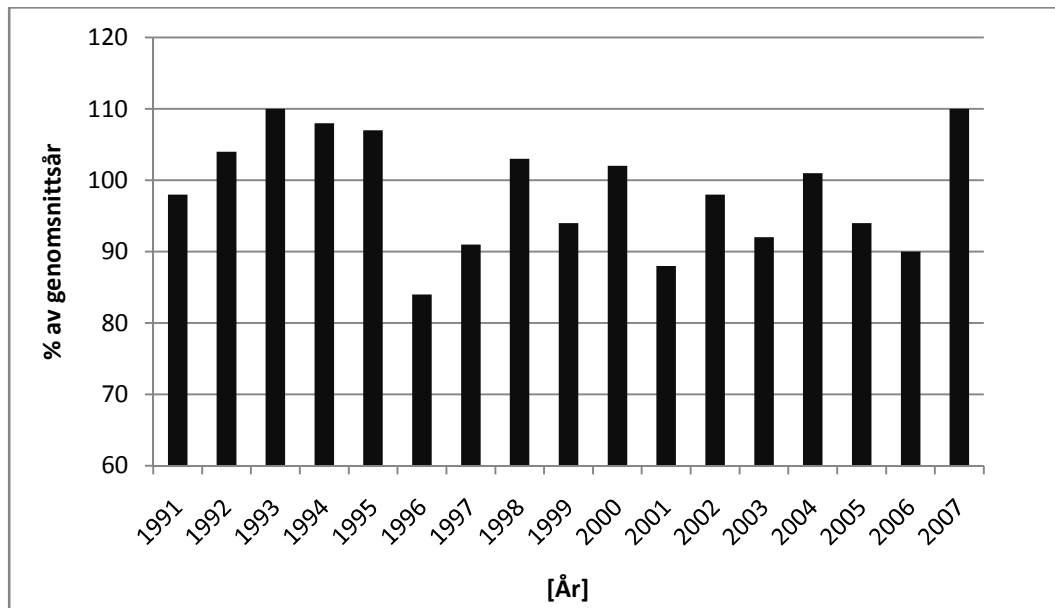
$$Q(a, b, c) = \sum_{i=1}^n (y_i - ax - bx_i - c)^2$$

Ekvation 18

och behandlas i övrigt på samma vis som för första gradens polynom.

3.4.3 Normalårskorrigerigering

Då resultat och slutsatser som görs i arbetet grundas på statistik som enbart sträcker sig 12 månader bakåt i tiden, krävs det normalårskorrigerigering för att resultaten ska vara jämförbara med tidigare och framtida år. Normalårskorrigeringsfaktorn, eller "vindindex" som den brukar kallas, är ett generellt värde för hela landet som anges av Energimyndigheten. Mer önskvärt hade varit med lokala, eller åtminstone länsvisa vindindex för att ge en mer korrekt korrigerigering.



Figur 8. Vindens energiinnehåll mellan 1991-2007. 100 % utgör medelvärdet för de redovisade åren. (Källa: Energimyndigheten).

Värdena i figur 8 ovan är beräknade utifrån inrapporterad statistik för landets vindkraftverk. Produktionen är korrigerat med avseende på hindertid för att återspegla vindförhållandena snarare än produktionsförhållandena.

I arbetet har därför samtliga verk normalårskorrigerats enligt:

$$E_{prod,12mån,korrigerad} = \frac{E_{prod,12mån}}{Index} \quad [MWh] \quad \text{Ekvation 19}$$

Där vindindexen är korrigerad efter 1,04 enligt Energimyndigheten för de aktuella månaderna studien behandlar.

3.4.4 Produktion som funktion av beräknad produktion

För att utröna om projekteringar i skog är svårare jämfört med övrig topografi i fråga om beräknad produktion, har det verkliga produktionsutfallet jämförts med det beräknade värdet. Den beräknade produktionen är angiven av verksamhetsutövaren/projektören.

$$Utfall = \frac{E_{prod,12mån,korrigerad}}{E_{beräknad}} \quad [-] \quad \text{Ekvation 20}$$

3.4.5 Utnyttjningstid

Ett mått på hur lämplig plats, alternativt hur lämpligt verk projektören lyckats hitta är utnyttjningstiden, vilket är det verkliga produktionsutfallet dividerat med installerad generatoreffekt (kWh/kW). Förutom normalårskorrigeringen har även energiproduktionen korrigerats efter tillgängligheten. Utnyttjningstiden blir ett mått på hur väl skogsetablerade verk står sig i förhållande till övriga lokaliseringar.

$$Utnyttjningstid = \frac{E/T}{P_{gen}} \quad [h] \quad \text{Ekvation 21}$$

där

$$E, \text{normalårskorrigerad, 12mån} \quad [kWh/\text{år}]$$

$$T, \text{tillgänglighet} \quad [\%]$$

$$P_{generator}, \text{Installerad generatoreffekt} \quad [\%]$$

Utnyttjningstiden har därefter jämförts mot verkens navhöjd, tillverkare och lokaliseringens råhet för att försöka hitta trender kring dessa parametrar.

3.4.6 Produktion som funktion av svepytan

Ett annat mått på platsens lämplighet, samt hur väl det valda verket presterar på aktuell plats är förhållandet mellan produktionsutfallet och svepytan. Även vid den här beräkningen har produktionen korrigerats med avseende på tillgängligheten.

$$\begin{aligned} E_{prod,12mån,korrigerad} / A &= \frac{E/T}{A} = \frac{E/T}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}} \quad [h] \quad \text{Ekvation 22} \\ &= \frac{E \cdot 4}{T \cdot D^2 \cdot \pi} \end{aligned}$$

där

$$E, \text{normalårskorrigerad, 12mån} \quad [kWh/\text{år}]$$

$$T, \text{tillgänglighet} \quad [\%]$$

$$A, \text{svepyta} = \frac{\pi D^2}{4} \quad [m^2]$$

$$D, \text{rotordiameter} \quad [m]$$

3.4.7 Jämförelse mellan verklig och teoretisk produktion

För att få ett mått på hur topografin påverkar produktionsutfallet har den verkliga produktionen jämförts med en teoretisk produktion. Den teoretiska produktionen är beräknad med hjälp av WindPro 2.6 och dess tillhörande Atlas modul. Modulen är främst avsedd för energiberäkningar för slättliknande landskap utan större avvikelser i terräng i fråga om vegetation och höjdskillnader. Modulen har därför främst använts för att få fram en teoretisk produktion då topografin kan jämföras med ett flackt landskap med råhetsklass 0 (vilket normalt är topografiklassificeringen för hav och sjöar). Fördelen har varit att kunna använda den vindstatistik som finns tillgänglig i programmet och utföra energiberäkningar direkt mot inlagda effektkurvor för aktuella verk.

Den teoretiska produktionen är beräknat genom att placera angivet verk på den verkliga platsen enligt koordinaterna i bilaga 1, och därefter ange att råheten är 0.0 åt alla väderstreck. Den teoretiskt beräknade produktionen utifrån dessa förhållanden fungerar som ett referensvärde för att bedöma om förhållandena som råder i skogen påverkar produktionsutfallet i större utsträckning jämfört med övriga placeringar.

3.4.8 Topografi och råhetsklassning

Den teoretiska produktionen som finns beskriven i 3.4.7 ligger även till grund för en råhetsklassning för varje verk. Topografin påverkar produktionsutfallet i olika grad beroende på verkets utformning, navhöjd, rotordiameter och installerad effekt. Med högre navhöjd och mindre rotordiameter blir påverkan mindre från bl.a. det turbulenta gränsskiktet.

Genom att använda tre verk som är representativa för studien har råhetens påverkan på produktionsutfallet beräknats i WindPro. Valda referensverk är: Enercon 1500 kW, rotordiameter 66 m, navhöjd 65 m (Enercon 1,5-66/65, nr 645), Vestas 2000 kW, rotordiameter 90 m, navhöjd 80 m (V80-2,0 90/80, nr 783) och Vestas 3000 kW, rotordiameter 90 m, navhöjd 105 m (V90-3,0 90/105, nr 763). För beskrivning och lokalisering för de valda verken se Bilaga 1- utvalda verk.

Produktionsutfallet har beräknats genom att variera råheten mellan 0-4 med avståndet 0-20 km från vindkraftverkets centrum för de valda verken. Värdena i tabell 9 används därefter till tre polynom för att beräkna den ekvivalenta råheten längre fram.

Den ekvivalenta råheten ger ett mått på hur stor påverkan topografin har på produktionsutfallet. Statistiken tyder på att även vid en topografi som klassats som 0-1 enligt definition blir produktionsutfallet betydligt lägre. Detta kan förklaras med lokala avvikelser som varit svåra att förutse vid projekteringen. Ekvivalenta råheten ger därför snarare ett mått på om skogsprojekteringar kan anses vara svårare at projektera.

Tabell 9. Råhetens påverkan av produktionsutfallet för tre vindkraftverk på olika lokaliseringar. E [%] definieras som årsproduktion vid vald råhetsklass dividerat med produktionsutfallet vid råheten 0,0.

Råhet	Nr 645 Enercon 1,5-66/65		Nr 783 V80-2,0 90/80		Nr 763 V90-3,0 90/105	
	E [MWh]	E [%]	E [MWh]	E [%]	E [MWh]	E [%]
0,0	5145	100,0	6214	100,0	11945	100,0
0,5	4471	86,9	5542	89,2	11108	93,0
1,0	3772	73,3	4863	78,3	10182	85,2
1,5	3433	66,7	4446	71,6	9399	78,7
2,0	3097	60,2	4032	64,9	8594	72,0
2,5	2633	51,2	3461	55,7	7474	62,6
3,0	2187	42,5	2907	46,8	6351	53,2
3,5	1767	34,3	2382	38,3	5253	44,0
4,0	1382	26,9	1898	30,5	4213	35,3

Polynom

Värdena i tabell 9 används därefter för att skapa tre polynom som används för att råketsklassificera de utvalda verken i studien:

R_1 används för verk med en effekt på 1500 kW och med en navhöjd på ca 65 m

R_2 används för verk med en installerad effekt på ca 2000 kW och en navhöjd på ca 80 m.

R_3 används för verk med en installerad effekt på ca 3000 kW och en navhöjd på ca 105 m.

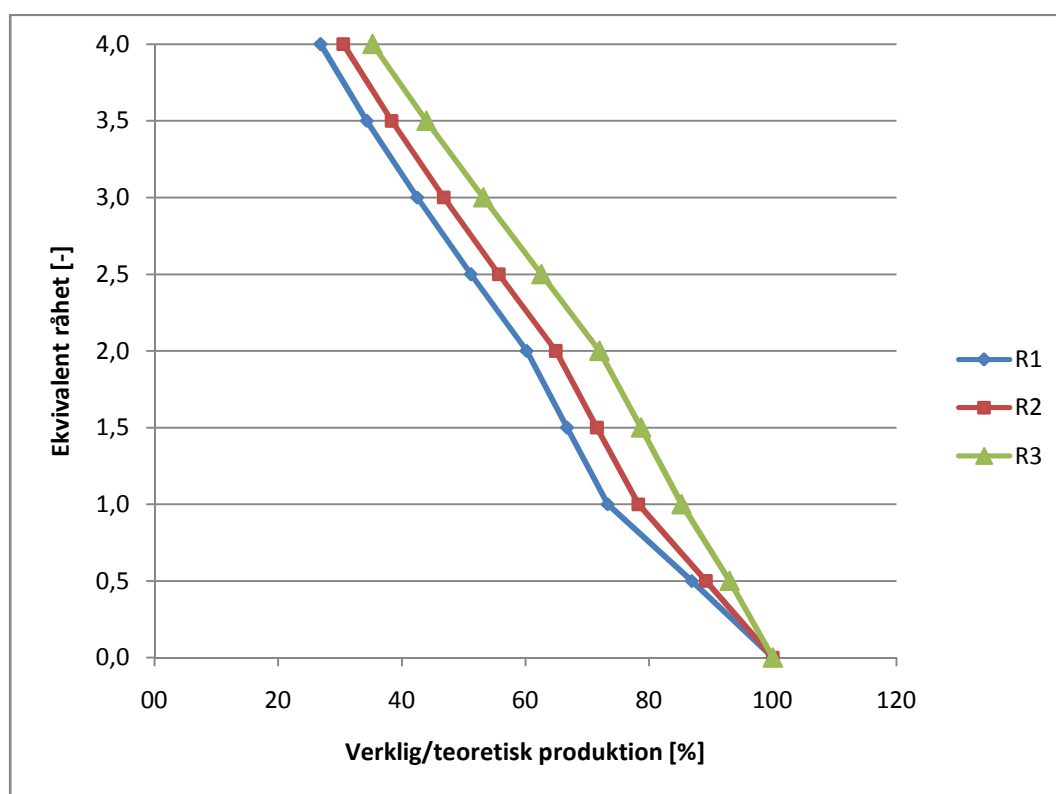
$$R_1 = -150,80x^5 + 480,70x^4 - 581,30x^3 + 332,60x^2 - 95,94x + 14,75$$

$$R_2 = -94,44x^5 + 327,10x^4 - 432,50x^3 + 271,70x^2 - 86,84x + 14,91$$

$$R_3 = -24,80x^4 + 68,65x^3 - 66,50x^2 + 32,46x - 9,809$$

R = Ekvivalent råhet [-]

x = Verklig/teoretisk produktion [-]



Figur 9. "Verklig"/teoretisk produktion som funktion av den ekvivalenta råheten enligt beräkningar i WindPro 2.6.

4 Resultat

I den här delen av arbetet redovisas resultaten med hjälp av diagram och tabeller. Första delen redovisar resultaten för detaljstudien som utförts med hjälp av sex vindkraftverk. I andra delen återfinns resultaten över beräkningar utförda av all tillgänglig statistik.

4.1 Detaljstudie

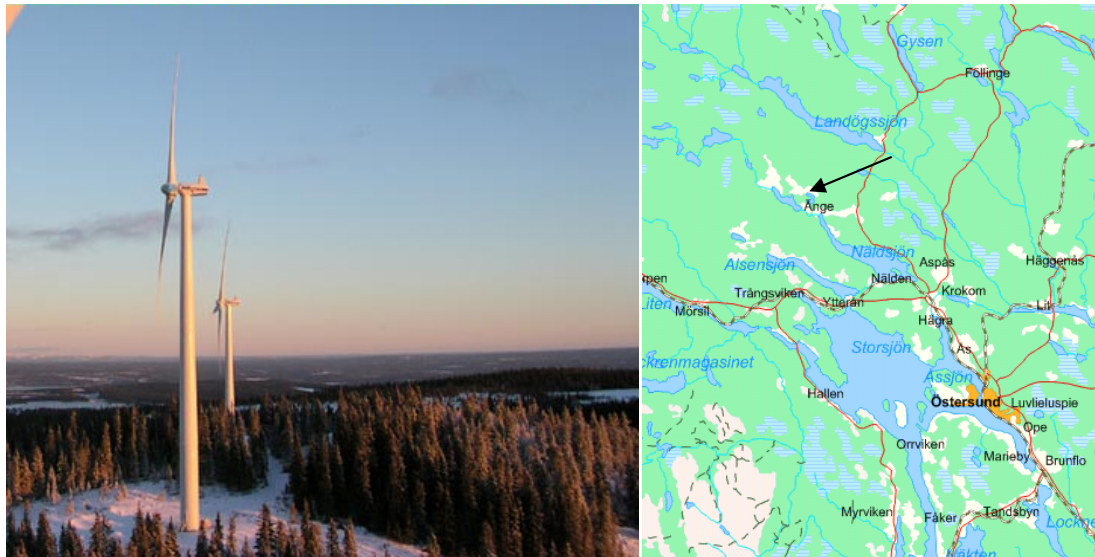
Nedan redovisas detaljstudien av de sex utvalda vindkraftverken. Dessa är indelade i tre grupper där det ges en kort beskrivning av varje grupp i form av vegetation och höjdplicering. Detaljstudien syftar till att verifiera den teori som diskuteras i 2.7. I varje grupp finns det ett verk placerat i skogsmiljö och ett på slättlandskap. Det vindkraftverk som är placerat på slätten används som referensverk för skogsverket.

Grupp 1



Figur 10. Gotland, Smöjen. Pil markerar lokalisering (Källa: *Slitevind* respektive www.hitta.se).

Vindkraftverket på Gotland är lokaliserat på Smöjen strax ovan havsnivå där det tidigare bröts kalksten från ett dagbrott. Området beskrivs som flackt med väldigt lite variation i vegetationen med Östersjön strax åt öster. Mot väster och norr är brottet omgärdat av lågväxt tallskog.



Figur 11. Jämtland, Råshön. Pil markerar lokalisering (Källa: Offerdalsvind respektive www.hitta.se)

Vindkraftverket vid Råshön tillhör en park om sju verk med samma fabrikat och effekt. Verken är upprättade ca 3,5 km nordost om samhället Änge i Krokhoms kommun, ca 650 m ö.h. på en skogsbevärd bergsrygg. Öster om verken finns ett sankområde och söder om verket finns sumpskog. I övrigt beskrivs omgivningen som varierad skoglig växtlighet

Tabell 10. Information om vindkraftverken i grupp 1. D=rotordiameter, H=navhöjd,

Grupp	Nr	Beskrivning	Lokalisering, RT-90		Landskapstyp	Fabrikat	Effekt [kW]	D [m]	H [m]
			X	Y					
1	386	Gotland, Slitevind, Smöjen	6405270	1686840	Slätt	Vestas	1500	66	67
	777	Jämtland, Offerdal Råshön	7043151	1415634	Skog	Vestas	1500	82	78

Tabell 11. Produktionen för vindkraftverken i grupp 1. E=produktion i förhållande till referensverket. A=angiven som svepytan i förhållande till referensverket. A_{erf} anger erforderlig area för att producera likvärdigt med referensverket på slätten (verk nr 386).

Grupp	Nr	E12mån, korrigerad [MWh]	E [%]	A [m ²]	A [%]	A _{erf} [m ²]
	777	3681	125,1	5281,0	154,4	4220,8

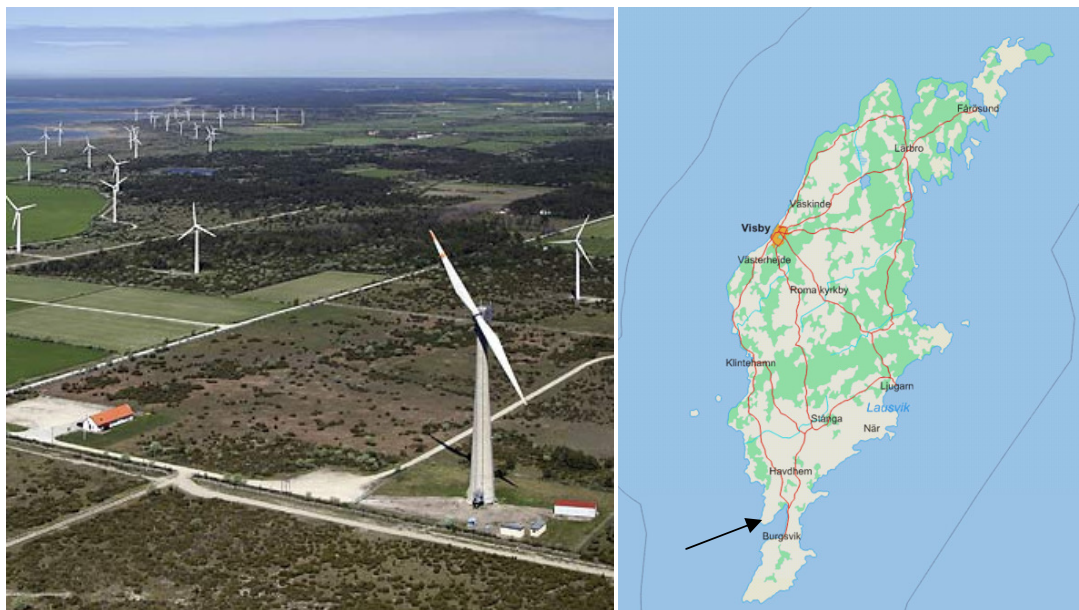
Tabell 12. V_m är angiven från statistik i WindPro 2.6. A_{teo} anger den teoretiska svepytan som krävs för att nå motsvarande resultat som referensvärdet (verk nr 386).

Grupp	Nr	V _m [m/s]	E _{vind} [%]	A _{teo} [%]	A _{teo} [m ²]
	777	5,9	78,3	127,6	4366,8

Det skogsetablerade verket i grupp 1, Råshön, är försedd med 11 m högre navhöjd samt 16 m större rotordiameter, motsvarande 54,4 % större svepyta än referensverket på Gotland, Smöjen. Produktionsresultatet uppgår till 25,1 % mer än referensverket.

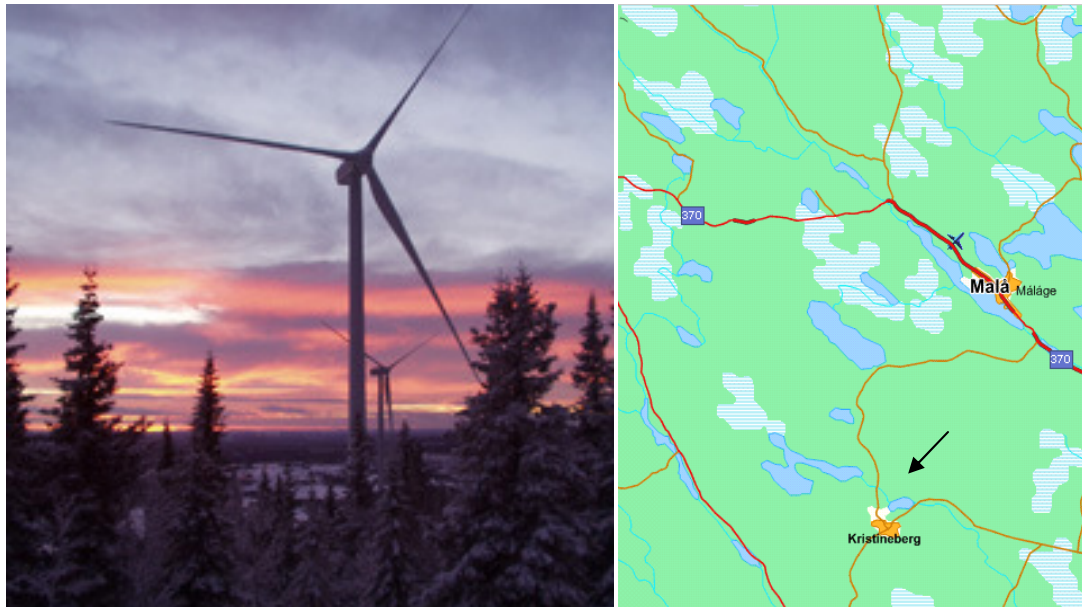
Vindstatistiken från WindPro visar att det krävs en areaökning med ca. 27,6 % för att nå upp till samma produktionsresultat som referensverket på Gotland. Vilket i sin tur överensstämmer med inrapporterat produktionsresultat.

Grupp 2



Figur 12. Gotland, Näsudden. Pil markerar lokalisering (Källa NE respektive www.hitta.se)

Vindkraftverket är ett av många på Näsudden. Projektörer har länge valt den här platsen då vindförhållandena är goda tack vare den västliga placeringen och intilliggande öppna hav. Vindkraftverket är beläget strax över havsnivå omgärdat av ett flackt landskap utan större variationer i terrängen.



Figur 13. Västerbotten, Hornberget. Pil markerar lokalisering (Källa www.aspliden.se respektive www.hitta.se)

Vindkraftverket på Hornberget, Västerbotten, tillhör en gruppstation om fem stycken Vestas 2 MW verk. Dessa är lokaliserat ca. 3,5 km norr om Kristineberg och ca 2 km nordväst om Aspliden i Malå kommun. Hornberget reser sig ca. 200 m över omgivningen och ca. 560 m ö.h. Omgivningen består mestadels av skog varav toppen utgörs av glesvuxen tallskog.

Tabell 13. Information om vindkraftverken i grupp 2. D=rotordiameter, H=navhöjd,

Grupp	Nr	Beskrivning	Lokalisering, RT-90		Landskapstyp	Fabrikat	Effekt [kW]	D [m]	H [m]
			X	Y					
2	738	Gotland, Skåls Näs	6328995	1646682	Slätt	Vestas	2000	80	78
	878	Västerbotten, Malå, Hornberget	7223101	1631439	Skog	Vestas	2000	90	80

Tabell 14. Produktionen för vindkraftverken i grupp 2. E=produktion i förhållande till referensverket. A=angiven som svepytan i förhållande till referensverket. A_{erf} anger erforderlig area för att producera likvärdigt med referensverket på slätten (verk nr 738).

Grupp	Nr	E12mån, korrigerad [MWh]	E [%]	A [m ²]	A [%]	A _{erf} [m ²]
2	738	5290	100,0	5026,5	100,0	5026,5
	878	5073	95,9	6361,7	126,6	6633,9

Tabell 15. V_m är angiven från statistik i WindPro 2.6. A_{teo} anger den teoretiska svepytan som krävs för att nå motsvarande resultat som referensvärdet (verk nr 738).

Grupp	Nr	V _m [m/s]	E _{vind} [%]	A _{teo} [%]	A _{teo} [m ²]
2	738	7,1	100,0	100,0	5026,5
	878	5,5	46,5	215,1	11380,0

Det skogsetablerade verket i grupp 2, Hornberget är försedd med 2 m lägre navhöjd samt 10 m större rotordiameter, motsvarande 26,6 % större svepyta än referensverket på Gotland, Skåls Näs. Produktionsresultatet uppgår till 4,1 % mindre än referensverket.

Enligt statistiken i WindPro är årsmedelhastigheten vid verk nr 878 betydligt lägre, vilket resulterar i att den teoretiska areaökningen blir avsevärt större.

Grupp 3



Figur 14. Öland, Stora Istad. Pil markerar lokalisering (Källa: Eolus Vind AB respektive www.hitta.se)

Det utvalda verket på Öland ingår i en park om fem stycken Vestas 2,0 MW. Förutsättningarna för vindkraftetableringar på Öland är goda med ett flackt landskap med ett avstånd som störst på 10 km till hav. Vegetationen vid Stora Istad är flackt med få hinder i terrängen och inga nämnvärda höjdskillnader i omgivningen. Etableringen är nära havsnivå.



Figur 15. Jämtland, Långå. Pil markerar lokalisering (Källa: Ledsjö Vind AB respektive www.hitta.se)

Vindkraftverket i Långå tillhör en gruppstation om fem stycken Enercon 2,0 MW. Verken är upprättade 863 m ö.h. på en flack höjdrygg. Vegetationen nedanför höjdryggen består av skogsbeklädd mark.

Tabell 16. Information om vindkraftverken i grupp 2. D=rotordiameter, H=navhöjd.

Grupp	Nr	Beskrivning	Lokalisering, RT-90		Landskapstyp	Fabrikat	Effekt [kW]	D [m]	H [m]
			X	Y					
3	868	Öland, Stora Istad	6313174	1562210	Slätt	Enercon	2000	82	78
	822	Härjedalen, Långå	6930800	1369600	Skog	Enercon	2000	70	85

Tabell 17. Produktionen för vindkraftverken i grupp 3. E=produktion i förhållande till referensverket. A=angiven som svepytan i förhållande till referensverket. A_{erf} anger erforderlig area för att producera likvärdigt med referensverket på slätten (verk nr 868).

Grupp	Nr	E12mån, korrigerad [MWh]	E	A	A	A _{erf}
			[%]	[m ²]	[%]	[m ²]
3	868	5453	100,0	5281,0	100,0	5281,0
	822	3688	67,6	3848,5	72,9	5690,2

Tabell 18. Tabell 19. V_m är angiven från statistik i WindPro 2.6. A_{teo} anger den teoretiska svepyta som krävs för att nå motsvarande resultat som referensvärdet (verk nr 738).

Grupp	Nr	V _m	E _{vind}	A _{teo}	A _{teo}
		[m/s]	[%]	[%]	[m ²]
3	868	6,8	100,0	100,0	5281,0
	822	6,6	91,4	109,4	5775,8

Det skogsetablerade verket i grupp 3, Långå är försedd med 8 m högre navhöjd samt 12 m mindre rotordiameter, motsvarande 27,1 % mindre svepyta än referensverket på Öland, Stora Istad. Produktionsresultatet uppgår till 32,4 % mindre än referensverket.

Av produktionsutfallet att döma och vald rotordiameter tycks vindförhållandena för de två placeringarna vara snarlika. Vilket bekräftas med vindstatistiken i WindPro som ger en teoretisk areökning motsvarande 9,4 %.

4.2 Samtliga verk

I den här delen av arbetet redovisas resultaten för de beräkningar som gjorts för den tillgängliga statistiken för tolv månader.

Det har inte gjorts någon indelning mellan tillverkarnas olika modeller då statistiska materialet inte varit tillräckligt omfattande. För detaljerad information hänvisas till bilaga 2.

Tabell 20. Huvudresultat i medeltal sorterat efter tillverkare. V=verklig, b=beräknad, t=teoretisk, OU=Otillräckligt underlag.

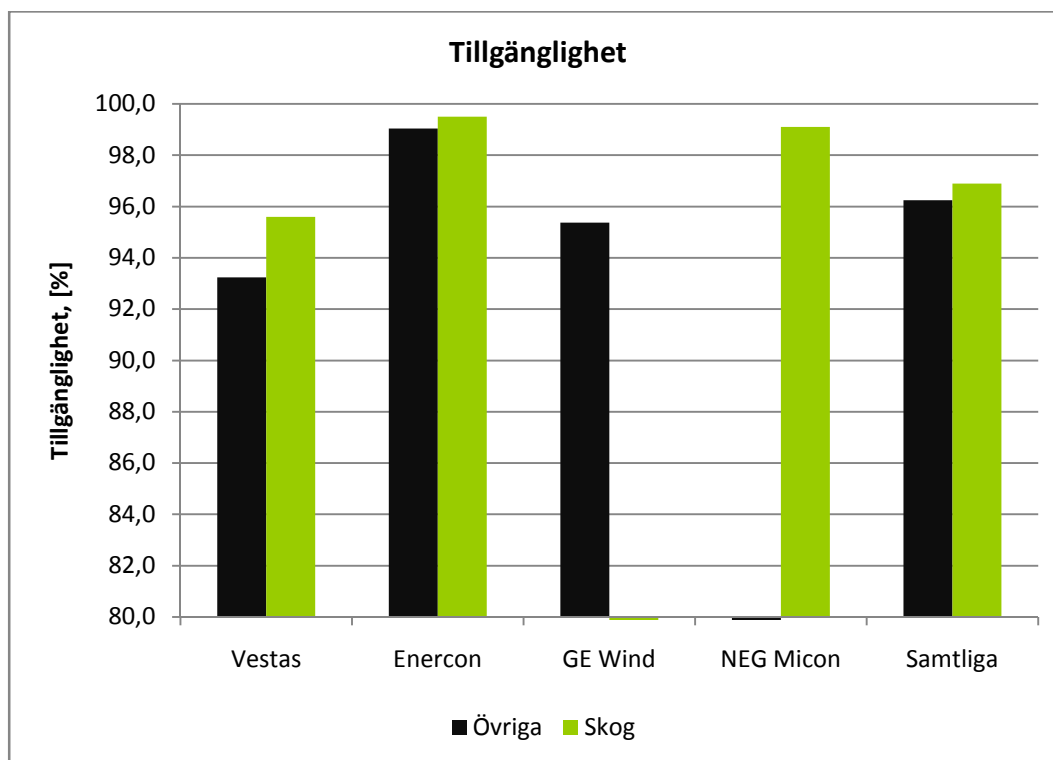
Fabrikat	Antal	Antal, skog	Andel skog [%]	Tillgänglighet, övriga [%]	Tillgängligt, skog [%]
Vestas	49	22	44,9	93,2	95,6
Enercon	35	5	14,3	99,0	99,5
GE Wind	3	0	0,0	95,4	OU
NEG Micon	7	7	100,0	OU	99,1
Samtliga	94	34	36,2	98,8	96,9

Tabell 21. Huvudresultat i medeltal, fortsättning.

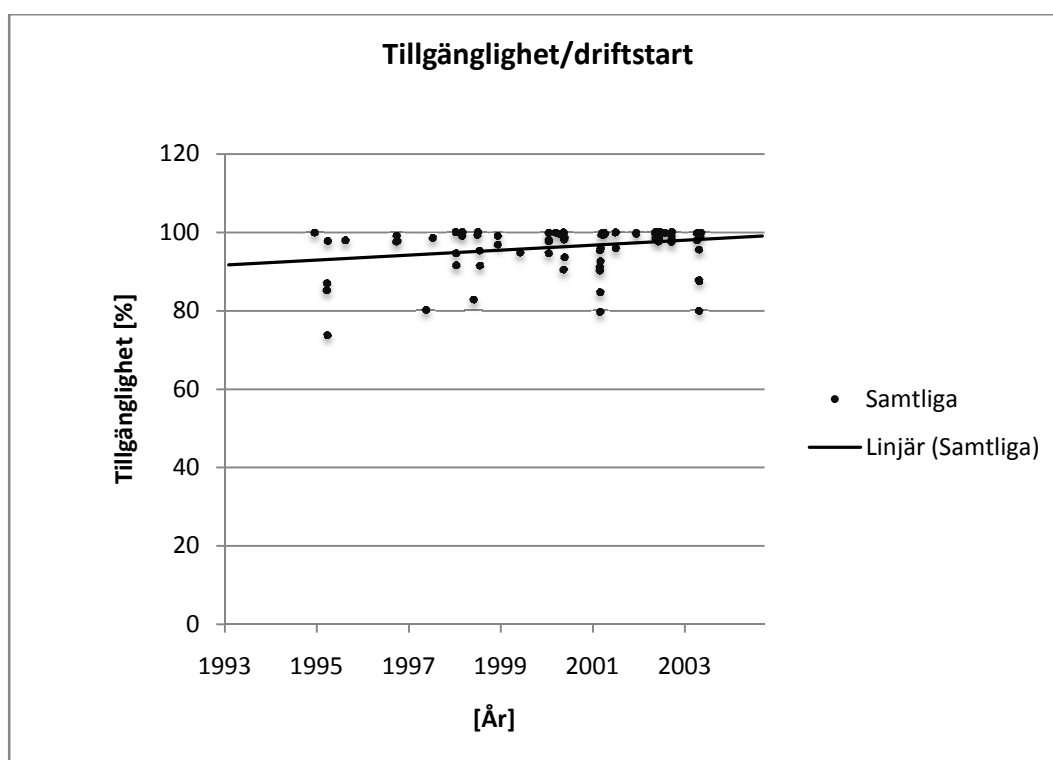
Fabrikat	Prod/effekt, övriga [h]	Prod/effekt, skog [kWh/kW]	Prod/Svepyta, övriga [kWh/m ²]	Prod/svepyta, skog [kWh/m ²]	Verklig.prod/beräknad.prod, övriga [%]
Vestas	2469,6	2431,3	942,9	731,6	86,1
Enercon	2348,8	1860,8	1044,6	967,0	89,8
GE Wind	1770,4	OU	680,3	OU	72,7
NEG Micon	OU	1729,2	OU	637,1	89,3
Samtliga	2374,3	2202,9	980,6	746,7	87,3

Tabell 22. Huvudresultat i medeltal, fortsättning.

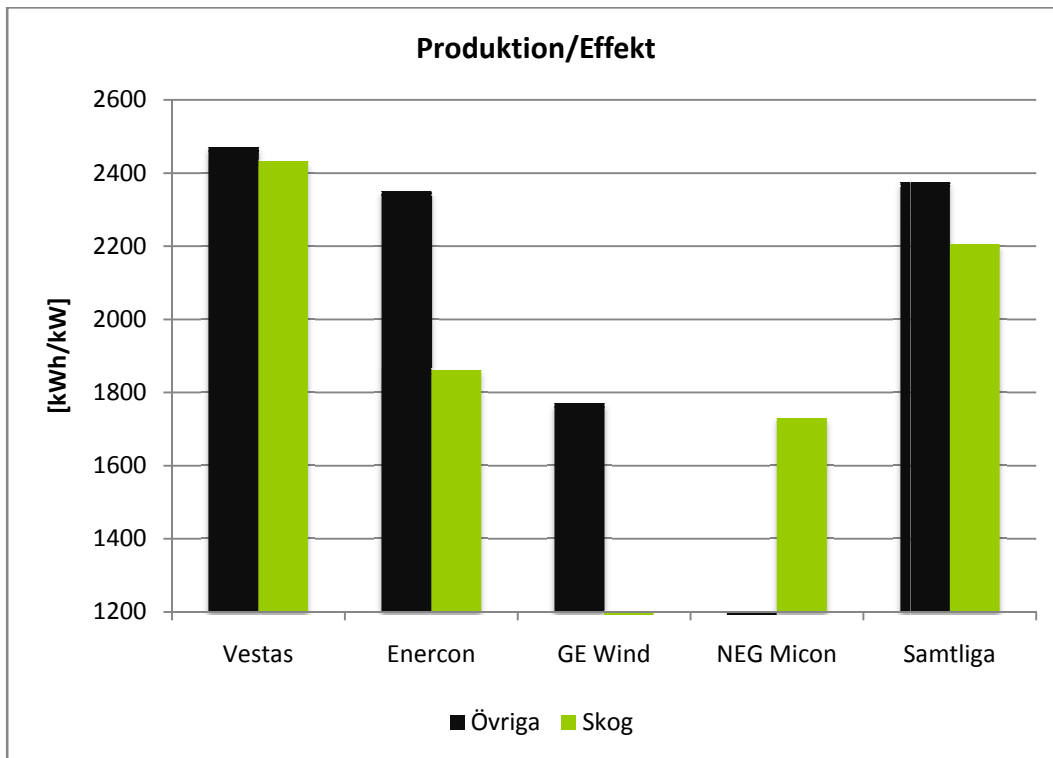
Fabrikat	Verklig.prod/beräknad.prod, skog [%]	Verklig.prod/teoretisk.prod, övriga [%]	Verklig.prod/teoretisk.prod, skog [%]	Prod/Navhöjd, övriga [kWh/m]	Prod/navhöjd, skog [kWh/m]
Vestas	84,4	57,5	73,0	31,8	30,7
Enercon	68,6	63,5	71,7	33,3	21,9
GE Wind	OU	44,9	OU	27,2	OU
NEG Micon	89,3	OU	45,8	OU	26,0
Samtliga	83,1	59,8	67,8	32,3	28,5



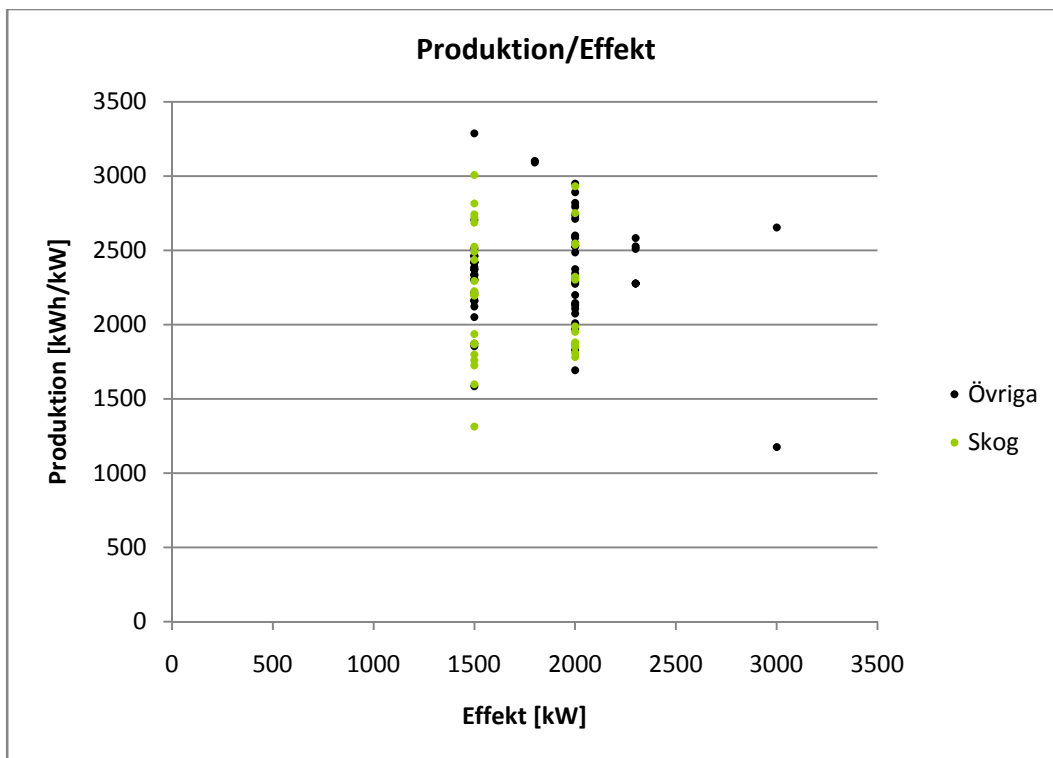
Figur 16. Tillgängligheten i medeltal angivet i procent för de olika tillverkarna, redovisade för skog och samtliga placeringar.



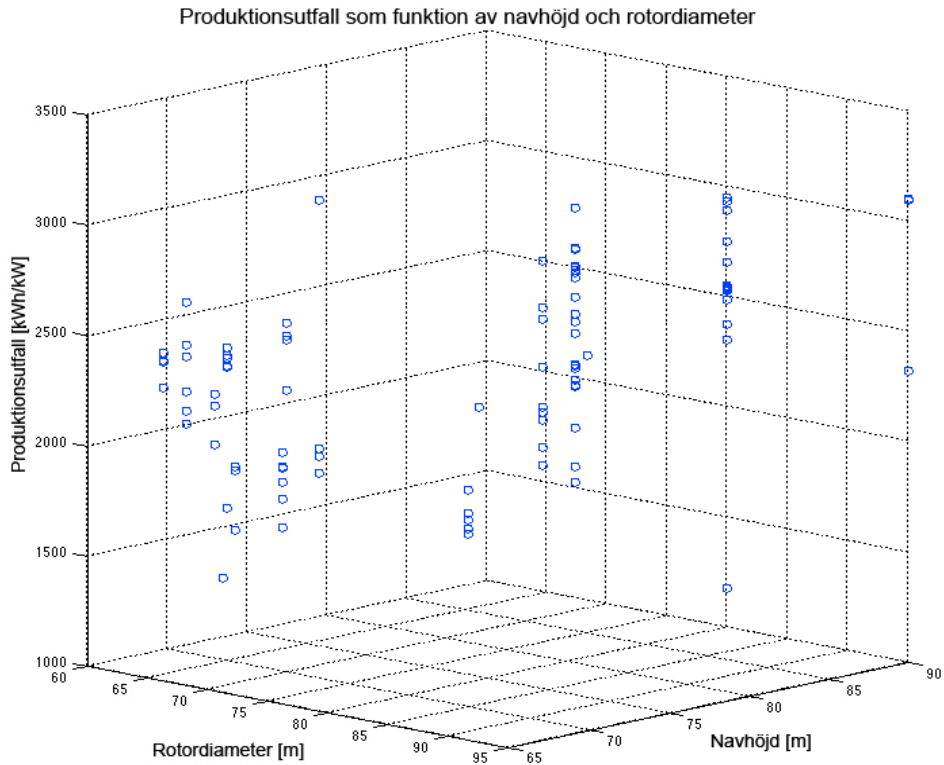
Figur 17. Tillgängligheten angivet i procent i förhållande till drifttagningsåret.



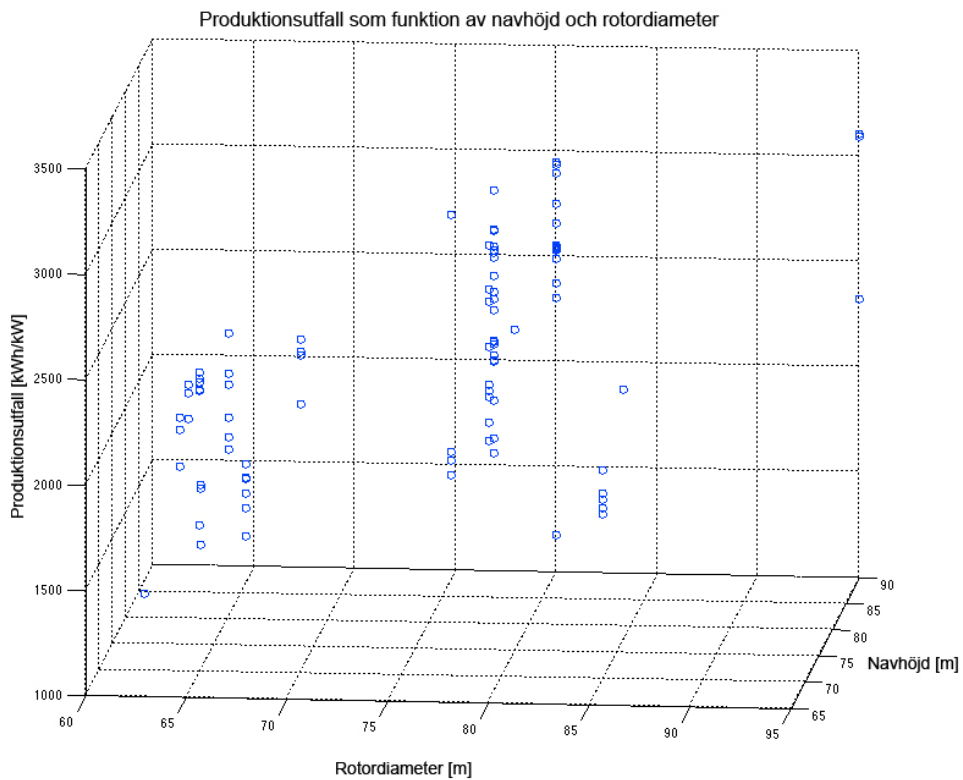
Figur 18. Utnyttjningstiden, produktionen i förhållande till installerad generatoreffekt, kWh/kW, medeltal.



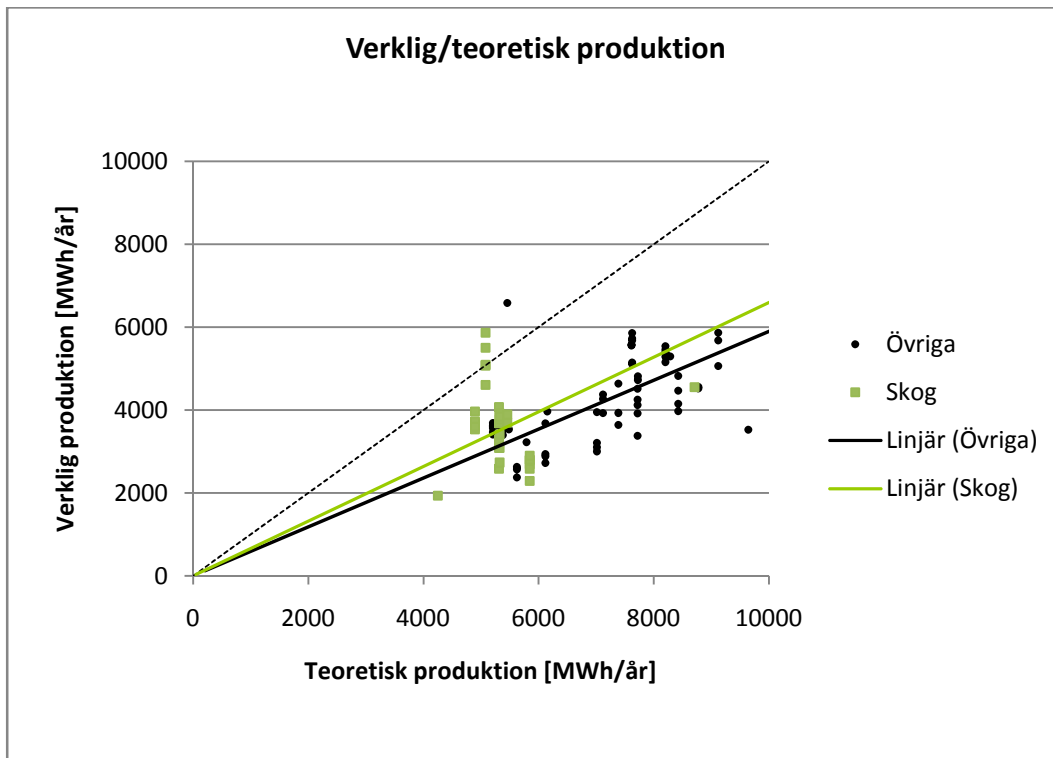
Figur 19. Utnyttjningstiden, produktionen i förhållande till installerad generatoreffekt, kWh/kW.



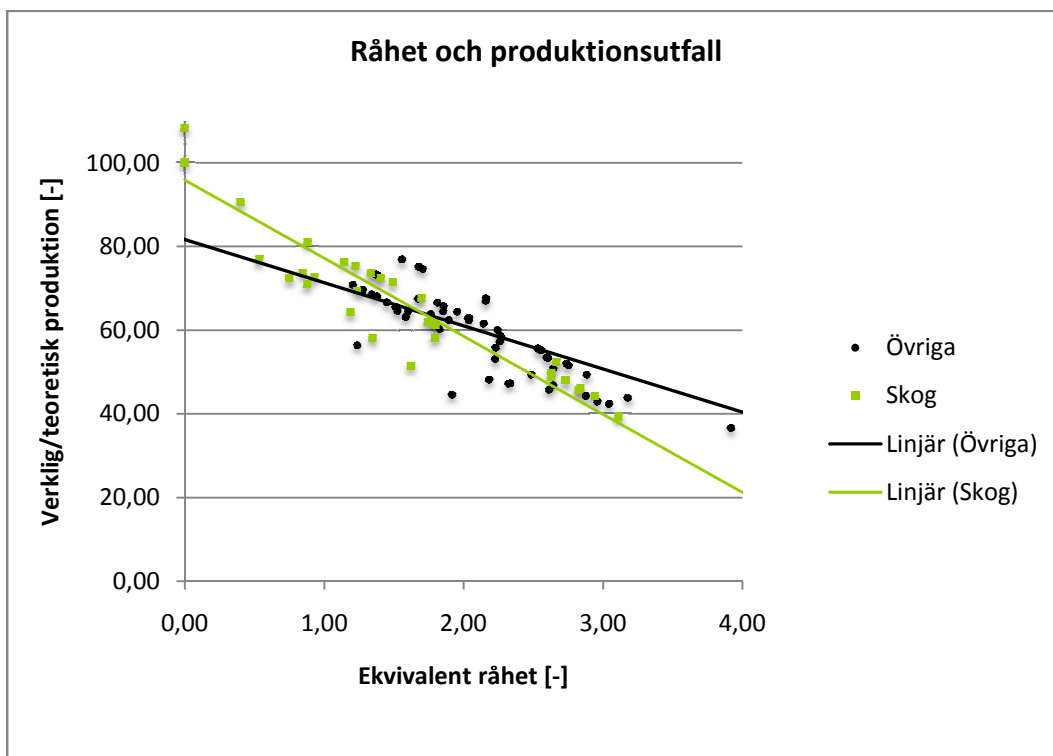
Figur 20. Utnyttningstiden, (kWh/kW), som funktion av navhöjd och rotordiameter för samtliga verk (1 av 2).



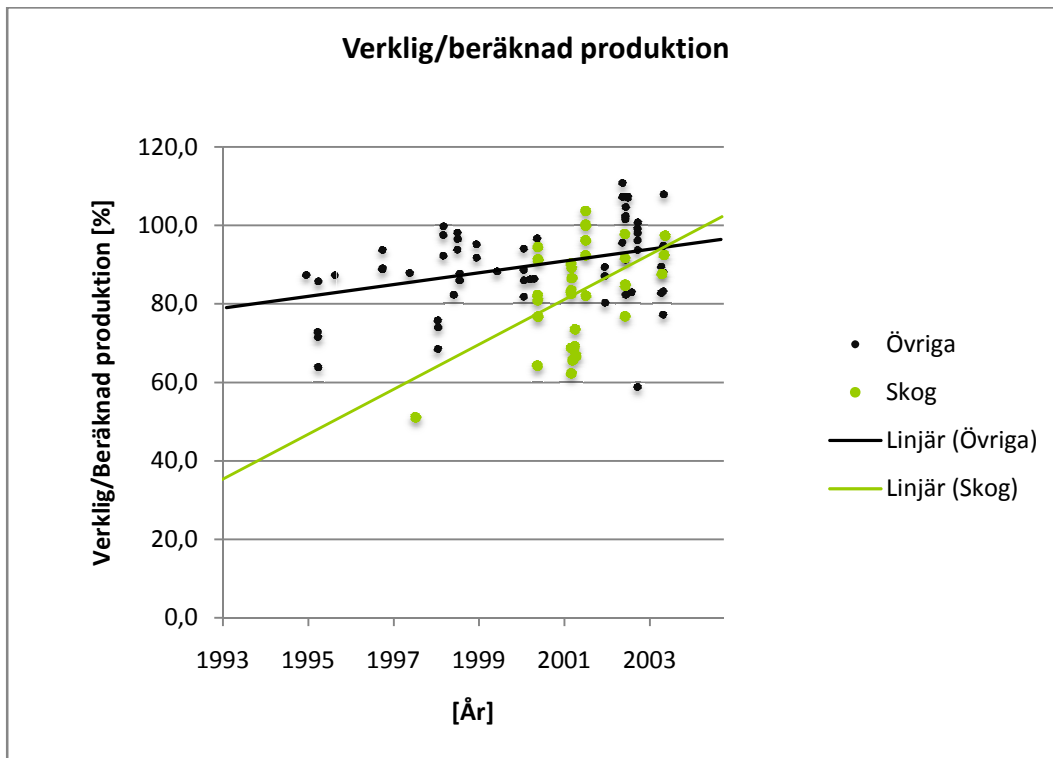
Figur 21. Utnyttningstiden, (kWh/kW) som funktion av navhöjd och rotordiameter för samtliga verk (2 av 2).



Figur 22. Verklig produktion enligt statistik dividerat med teoretisk produktion enligt WindPro med råheten 0,0.



Figur 23. Råhetsklassificering efter den teoretiska produktionen beräknat med WindPro med råheten 0,0.



Figur 24. Verklig produktion enligt statistiken dividerat med den beräknade produktionen enligt projektörerna.

5 Diskussion och slutsatser

Den här delen i arbetet dras slutsatser av det behandlade statistiska materialet. Värt att ha i åtanke är att statistiken endast behandlar 94 verk, sträcker sig 12 månader bakåt i tiden och är normalårskorrigerad enligt Energimyndighetens rikstäckande korrigeringsfaktor (1,04). Mer önskvärt hade varit med lokala korrektionsfaktorer för ett säkrare resultat. Ytterligare felkälla som är av stor vikt är den inrapporterade statistiken. Det har visat sig att hindertiden som är inrapporterad i många fall är felaktig, vilket förstås ger resulterar i en missvisande statistik.

En tidig slutsats som gjort utifrån ovan nämnda faktorer är att det inte går att dra några säkra slutsatser angående vilken/vilka modeller som presterar bäst i skogsmiljö. Underlaget är helt enkelt för otillräckligt. Det krävs även bättre kännedom om rådande förhållanden för varje plats för att kunna göra en bra jämförelse mellan verken. Mer information om topografin och vindförhållanden är önskvärt för att kunna dra säkra slutsatser angående parametrar som navhöjd och rotordiameter.

5.1 Detaljstudie

Grupp 1 består av två vindkraftverk vars navhöjd och rotordiameter skiljer sig från varandra. Svepytan för det skogsetablerade verket uppgår till 54,4 % mer än referensverket, vars placering är på ett slättlandskap. Navhöjden är 11 m högre för det skogsetablerade verket och kombinerat med den större rotordiametern är det därför rimligt att anta att skogsverket har möjlighet att producera lika bra som referensverket. Statistiken bekräftar antagandet och produktionen för det skogsplacerade verket är 25,1 % högre än för referensverket.

Grupp 2 består av två vindkraftverk där största skillnaden utgörs av rotordiametern. Det skogsplacerade verket har 10 m större rotordiameter och 2 m högre navhöjd. Rotordiametern är endast 26,6 % större än för referensverket. Årsmedelhastigheten angiven med hjälp av WindPro är betydligt lägre vid det skogsetablerade verket. Mest troligt är medelhastigheten högre än 5,5 m/s.

Grupp 3 består av två verk där både rotordiameter och navhöjd skiljer sig åt. Navhöjden är 7 m högre för det skogsetablerade verket vars rotordiameter är 12 m kortare än referensverket. Den 12 m kortare diametern på bladen utgör 27,1 % mindre svepyta jämfört med referensverket. Kombinationen av högre navhöjd och en mindre rotordiameter gör jämförelsen lite svårare jämfört med grupp 1 och 2. Dock bör den mindre svepytan ge ett lägre produktionsresultat till följd. Statistiken visar att det skogsetablerade verket presterar 32,4 % sämre än det slättplacerade verket.

Slutsatsen som görs av detaljstudien är att det går att kompensera för generellt sämre förhållandena som råder i skogen. Med en kombination av högre navhöjd och större rotordiameter går det att uppnå ett bra produktionsresultat även i dessa miljöer. MIUU-modellen som har nämnts i arbetet uppvisar dessutom att det på många platser råder bra vindförhållanden över skogen.

5.2 Samtliga verk

Jämförelsen fokuserar främst på verk från Enercon och Vestas då det finns mest statistik att tillgå från dessa tillverkare. Trender och slutsatser tenderar till att bli alltför osäkra för övriga verk och kommenteras därför inte i någon större utsträckning. Det går dock inte att dra några slutsatser angående tillverkare/modell som är att föredra vid skogsetableringar.

Statistiken tyder på att verk med traditionell placering presterar sämre än vad som är väntat enligt råhetsklassificering samt årsmedelhastigheten som råder på plats. En tänkbar förklaring tycks vara att vindgradienten inte uppför sig så "idealt" som det antas vid projekteringar,

exempelvis vid beräkningar med hjälp av WindPro. En annan tänkbar förklaring kan vara överdrivet optimistiska effektkurvor angivna av tillverkarna vilka försämrar då vindgradientens egenskaper avviker från de antagna.

Sammanfattande slutsats är dock att skogsetablerade verk presterar väl jämfört med övriga lokaliseringar.

- Tillgängligheten är hög (97 %).
- Bra produktionsutfall (2203 kWh/kW) med förklaringen att projektörerna valt förhållandevis stor rotordiameter för att kompensera för de lägre vindhastigheterna som råder i skogen.
- Topografin tycks inte påverka produktionen negativt i så stor utsträckning som det tidigare befarats, troligtvis pga. teknisk anpassning av verken för rådande förhållanden (rotordiameter och navhöjd).
- En hög navhöjd kombinerat med en stor rotordiameter tycks vara optimalt för vindkraftverk i skog.

5.2.1 Tillgänglighet

Tillgängligheten för de skogsetablerade verken är hög, t.om. högre än för övriga placeringar. Det här kan troligtvis förklaras med att de flesta skogsetablerade verken nyligen är drifttagna vilket innebär att tillgängligheten är högre.

Lägst tillgänglighet har Vestas verken med en tillgänglighet på ca. 94,4 %. Vindkraftverken från Enercon har högst tillgänglighet på mellan 99,3 %. Dock utgörs de skogsetablerade Enercon verken endast av fem stycken verk som dessutom är tillhör en och samma gruppstation, vilket gör omöjligt att dra några slutsatser av statistiken.

En annan trend som går att utvärdera är att tillgängligheten sjunker då verken blir äldre, vilket är en rimlig förklaring då underhåll- och reparationsarbetet ökar. Dock har samtliga verk generellt en hög genomsnittlig tillgänglighet (96,5 %).

5.2.2 Produktion i förhållande till installerad effekt

Skogsetablerade verk har lägre produktion i förhållande till installerad effekt jämfört med övriga platser. De skogsetablerade Enercon verken har däremot betydligt lägre produktion, vilket kan förklaras med att dessa verk har mindre svepyta. Vestas och NEG Micon producerar lika väl i skog, vilket därför leder till en slutsats att skogsplacerade verk har goda möjligheter till ett bra produktionsutfall.

5.2.3 Produktion i förhållande till navhöjd och rotordiameter

Den valda navhöjden avgörs förstas av vindförhållandena på platsen. Är årsmedelvinden hög på en lägre höjd är det ekonomiskt fördelaktigt att bygga vindkraftverk med en lägre tornhöjd.

Produktionsutfallet är något lägre för de skogsplacerade Vestas verken. Detta förklaras med att projektörerna som valt Vestas verk använt samma navhöjd för skogsetableringarna vilket i sin tur innebär att årsmedelhastigheten vid navhöjden generellt blir något lägre. De skogsplacerade Enercon verken har betydligt lägre produktion i förhållande till (kWh/m navhöjd), vilket förklaras med att verken utrustats med högre navhöjder än övriga Enercon verk.

Produktion/svepyta, visar att produktionsresultatet är lägre per svept yta för skogsetableringar. Förklaringen har sin grund i det något lägre produktionsresultatet samt den större variationen i vindprofilen som råder över skogen. Lägst variation mellan skog- och vanliga placeringar uppvisar Enercon verken. Förklaringen tycks vara att projektörerna valt mindre rotordiameter som resulterar i en högre energitäthet.

Produktion/installerad effekt (kWh/kW) som funktion av navhöjd och rotordiameter, tyder på att det är mer lönsamt med en större rotordiameter i förhållande till navhöjden för skogsetableringar än vad som traditionellt väljs. Då en högre rotordiameter väljs kommer verket att komma upp i maximal effekt vid en lägre vindhastighet som då leder till högt produktionsresultat trots de lägre vindhastigheterna som råder i skogen. Det är dock oklart hur den ökande turbulensen och dess intensitet påverkar slitage och livslängd på verken.

5.2.4 Råhetens påverkan på produktionsutfallet

Råhetsklassificeringen kan förstås inte jämföras helt och hållet med standarden. Indelningen är snarare ett uttryck för lokala omständigheters påverkan på produktionen och om rätt verk har valts för rådande förhållanden. Indelningen gör det möjligt att uppskatta om det är svårare att projektera för skogen.

Produktionsutfallet (kWh/kW) avviker mellan skog och övriga platser. Skillnaden är dock mindre än vad den traditionella råhetsindelningen brukar innebära. Platser som normalt anses vara av låg råhetsklass har visat sig ge betydligt sämre produktion än förväntat. Mest handlar det om en teknisk fråga, där det gäller att välja rätt verk för rätt plats. Slutsatsen som dras av statistiken är att genom att välja en lämplig generatorstorlek (1,5-2,0 MW) och förse verket med tillräckligt hög navhöjd och rotordiameter går det att nå höga produktionsresultat även för skogen.

5.2.5 Förhållandet mellan teoretisk och verkligt produktionsutfall

Ett liknande mått som råhetsklassningen är förhållandet mellan verkligt och teoretiskt produktionsutfall. Teoretiska produktionen är som nämnts beräknad utifrån vindstatistik i WindPro med en råhetsklass 0 för att simulera ideala förhållanden där omgivningen har obefintlig påverkan för utfallet. Det ger information om hur väl vindkraftverket kan ta tillvara på vindens energi samt lokala förhållandens påverkan på produktionen.

Beräkningarna tyder på att verkligt/teoretisk produktion i skog t.o.m. är bättre än genomsnittet. Någon bra förklaring kan inte ges för tillfället, mer än som nämns ovan att det troligtvis råder sämre förhållanden på övriga platser mot väntat. Det går även att resonera kring om vindförhållandena i skogen är bättre än vad som tidigare uppskattats.

5.2.6 Verklig/beräknad produktion

Den beräknade produktionen är angiven av projektören, bl.a. vid tillstånd/anmälningsansökan till länsstyrelsen/kommunen. Förhållandet mellan verklig/beräknad produktion ger då ett mått på hur väl projektören lyckats med sin utredning, samt om det är svårare att förutse produktionen för skogsetableringar.

Trenden visar att projektörerna lyckats förutse produktionen bättre för skogsverk jämfört med genomsnittet för samtliga verk. En förklaring kan vara att projekten genomgått seriösa utredningar med avseende på vindmätningar och topografiutredning. Ytterligare förklaring som ges är att de flesta skogsetablerade verken nyligen tagit i drift, då erfarenheten och kunskapsläget är större än längre tillbaka.

6 Förslag till fortsatt arbete

Eftersom utvärderingen begränsats till verk med en märkeffekt om 1,5-3,5 MW, är det av intresse att göra motsvarande utredning för samtliga verk i landet. Trenderna borde därmed bli tydligare och säkrare slutsatser kan göras. Det hade även varit intressant att sträcka utredningen utanför landets gränser och jämföra med länder med liknande topografi och vegetation.

Intressant vore utredning och forskning angående optimal rotordiameter för skogsetablerade verk. Enligt jämförelsen som görs i arbetet tycks det vara mer lämpligt att använda större rotordiameter/effekt än vad som det traditionellt görs.

Frågan ovan leder till följdfrågor:

- Hur påverkar vald rotordiameter slitage och livslängd för verken då vindgradienten uppvisar större variation över skog?
- Hur skogens högre turbulensintensitet jämfört med mer traditionella placeringar påverkar produktionsutfall och slitage på verken.
- Hur bladens vinkel ska kunna optimeras över skog för att anpassas till vindgradienten.
- Utvecklingsarbete för att kunna reglera bladen separat. När bladen är närmast trädkronorna är vinkeln ställd med annan vinkel jämfört med när bladet passerar högsta punkten för att kompensera för den stora variationen i vindgradienten?

7 Referenser

- Aspliden. Tillgänglig:< <http://aspliden.se/vind.html>> (2009-03-20)
- Blomqvist, Peter, Nyborg, Mats, Simonsson, Daniel, Sköldberg, Håkan & Unger, Thomas (2008). *Vindkraft i framtiden – Möjlig utveckling i Sverige till 2020*. Elforsk (Elforsk rapport 08:17).
- Bergström, Hans (2007). *Vindpotentialen i Sverige på 1 km-skala. Beräkningar med MIUU-modellen*. Uppsala :Institutionen för geovetenskaper, luft och vattenlära.
- Bergström, Hans (2008a). *Wind Resource Mapping of Sweden Using the MIUU-model*, Statens Energimyndighet, Air, Water and Landscape Sciences, Department of Earth Sciences, Uppsala university (Wind Energy Report WE2008:1).
- Bergström, Hans (2008b). *Metrologi för vindkraft- Underlag till Vindforsks syntesrapport: Vindforsk, Energimyndigheten, Elforsk (Vindforsk teknikrapport 8:08)*.
- Carlstedt, Nils-Eric (2003). *Driftuppföljning av vindkraftverk – Årsrapport 2002*, Statens Energimyndighet, Elforsk (Elforsk rapport 03:12).
- Carlstedt, Nils-Eric (2004). *Driftuppföljning av vindkraftverk – Årsrapport 2003*, Statens Energimyndighet, Elforsk, (Elforsk rapport 04:19).
- Carlstedt, Nils-Eric (2005). *Driftuppföljning av vindkraftverk – Årsrapport 2004*, Statens Energimyndighet, Elforsk, (Elforsk rapport 05:11).
- Carlstedt, Nils-Eric (2006). *Driftuppföljning av vindkraftverk – Årsrapport 2005*, Statens Energimyndighet, Elforsk, (Elforsk rapport 06:30).
- Carlstedt, Nils-Eric (2007). *Driftuppföljning av vindkraftverk – Årsrapport 2006*, Statens Energimyndighet, Elforsk (Elforsk rapport 07:14).
- Carlstedt, Nils-Eric (2008). *Driftuppföljning av vindkraftverk – Årsrapport 2007*, Statens Energimyndighet, Elforsk (Elforsk rapport 08:26).
- Dahlström, Fredrik (2008). *Kunskapsinventering – Kring vindar och vindkraft i skog*. Energimyndigheten (Energimyndigheten rapport 2008:21).
- Danish Wind Industry Concepts (2009a). *Wind Energy Reference Manual Part 1: Wind Energy Concepts*. Tillgänglig: < <http://www.windpower.org/en/stat/unitsw.htm> > (2009-04-21)
- Danish Wind Industry Concepts (2009b). *Wind Energy Reference Manual Part 1: Wind Energy Concepts*. Tillgänglig: < <http://www.windpower.org/en/stat/unitsw.htm#lengths> > (2009-04-21)
- Driftuppföljning av vindkraft. Tillgänglig< <http://www.vindstat.nu/>> (2008-01-10)
- Eolus Vind AB. Tillgänglig:< <http://www.eolusvind.com/projekt.php?complete=1&project=59®ion=3>> (2009-03-10)
- Hitta. se. Tillgänglig:<<http://www.hitta.se>> (2009-05-15)
- Högström, Martin (2007). *Wind climate Estimates- Validation of Modelled Wind Climate and Normal Year Correction*. Examensarbete. Uppsala universitet, Uppsala.

Kåberger, Tomas (2008). *Energiläget 2008*. Energimyndigheten (Energimyndigheten rapport 2008:15).

Manwell, J.F, McGowan J.G, Rogers A.L (2002). *Wind energy explained – Theory, design and application*: University of Massachusetts, Amherst, USA

Nationalencyklopedin (2009). Tillgänglig:<
http://www.ne.se/kort/n%C3%A4sudden?i_h_word=gotland+n%C3%A4sudden> (2009-05-15)

Nielsen, Per, Villadsen, Jens, Chun, Stefan & Ritter, Peter (2001). *WindPro-2 Manual. 1. ed.* Danmark: EMD

Offerdalsvind Ek. Fören. Tillgänglig:< <http://www.offerdalsvind.se/bilder.html>> (2009-05-15)

Sathyajith, Mathew (2006). *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics*: Springer.

Slitevind AB. Tillgänglig:< <http://www.slitevind.se/index.html>> (2009-03-20)

Vindkraft (2007). *Bygga och ansluta större vindkraftverk – projektör*. Energimyndigheten (Energimyndigheten broschyr 2007:32)

Westin, Paul (2008). *Vindkraftstatistik 2007*. Statens Energimyndighet, (Energimyndigheten statistik 2008:02).

Westin, Paul (2009). *Vindkraftstatistik 2008*. Statens Energimyndighet, (Energimyndigheten statistik 2009:03).

Wizelius, Tore (2007). *Vindkraft i teori och praktik. 2. uppl.* Lund: Studentlitteratur

Bilaga 1. Utvalda verk

Nr	Fabrikat	Effekt (kW)	D/H (m)	Driftstart	Län	Beskrivning	Kart-placering	Koordinater, RT-90	
								X	Y
381	Enercon	1500	66/67	1999-05-15	Skåne	Trolleberg, Trollebergs Gård	C2e	6177779	1331952
386	Vestas	1500	66/67	1999-08-24	Gotland	Slitevind XXIV, Smöjen	J7c	6405270	1686840
387	Vestas	1500	66/67	1999-08-24	Gotland	Slitevind XXV, Smöjen	J7c	6405018	1686992
388	Vestas	1500	66/67	1999-08-28	Gotland	Slitevind XXVI, Smöjen	J7c	6404749	1687157
389	Vestas	1500	66/67	1999-08-26	Gotland	Slitevind XXVII, Smöjen	J7c	6404506	1687303
422	Vestas	1500	66/67	2000-01-21	Gotland	Svireg, Skåls 12, Näs	I5f	6329122	1646300
474	Vestas	1500	66/78	2001-03-17	Gotland	Storugns 7, Lärbro	J7e	6416872	1680459
475	Vestas	1500	66/78	2001-03-13	Gotland	Storugns 8, Lärbro	J7e	6416953	1679943
476	Vestas	1500	66/78	2001-03-10	Gotland	Storugns 9, Lärbro	J7e	6416738	1679714
617	Vestas	1500	66/80	2001-11-08	Gotland	Sigvards 3, Näs	I5f	6329621	1647157
642	GE Wind Energy	1500	70,5/65	2002-07-12	Skåne	Assmåsa 1, Assmåsa	D2b	6159800	1370835
643	GE Wind Energy	1500	70,5/65	2002-07-12	Skåne	Assmåsa 2, Assmåsa	D2b	6159765	1371070
644	GE Wind Energy	1500	70,5/65	2002-07-12	Skåne	Assmåsa 3, Assmåsa	D2b	6159640	1371265
645	Enercon	1500	66/65	2002-09-01	Skåne	Hedagården 1, Hedagården	C3b	6202221	1323589
646	Enercon	1500	66/65	2002-09-01	Skåne	Hedagården 4, Hedagården	C3b	6201771	1324308
647	Enercon	1500	66/65	2002-09-01	Skåne	Hedagården 5, Hedagården	C3b	6201259	1323340
675	Enercon	1500	70/65	2003-01-01	Skåne	Hedagården 2, Hedagården	C3b	6202225	1324095
676	Enercon	1500	70/65	2003-01-01	Skåne	Hedagården 3, Hedagården	C3b	6201761	1323827
677	Enercon	1500	70/65	2003-01-01	Skåne	Hedagården 6, Hedagården	C3b	6201249	1323850
699	NEG Micon	1500	72/62	2002-01-01	Jämtland	Digerberget, Digerberget	D17c	6914018	1396024
714	Enercon	1500	70/65	2003-06-15	Skåne	Annevind 1, Annelöv	C2h	6194208	1326401
715	Enercon	1500	70/65	2003-06-15	Skåne	Annevind 2, Annelöv	C2h	6193890	1326566
777	Vestas	1500	82/78	2004-12-07	Jämtland	Offerdal Råshön 1, Änge	E19g	7043151	1415634
778	Vestas	1500	82/78	2004-12-05	Jämtland	Offerdal Råshön 2, Änge	E19g	7043364	1415778
779	Vestas	1500	82/78	2004-12-08	Jämtland	Offerdal Råshön 3, Änge	E19g	7043546	1415935

Nr	Fabrikat	Effekt (kW)	D/H (m)	Driftstart	Län	Beskrivning	Kart-placering	Koordinater, RT-90	
								X	Y
780	Vestas	1500	82/78	2004-12-08	Jämtland	Offerdal Råshön 4, Änge	E19g	7042855	1416277
781	Vestas	1500	82/78	2004-12-03	Jämtland	Offerdal Råshön 5, Änge	E19g	7043068	1416407
782	Vestas	1500	82/78	2004-12-05	Jämtland	Offerdal Råshön 6, Änge	E19g	7043374	1416567
783	Vestas	1500	82/78	2004-12-03	Jämtland	Offerdal Råshön 7, Änge	E1287h	7043587	1416697
809	Vestas	1500	82/78	2005-10-03	Norrbottnens län	Aapua 1, Aapua	M27i	7435399	1835720
810	Vestas	1500	82/78	2005-09-29	Norrbottnens län	Aapua 2, Aapua	M27i	7435665	1835601
811	Vestas	1500	82/78	2005-09-28	Norrbottnens län	Aapua 3, Aapua	M27i	7436252	1835541
812	Vestas	1500	82/78	2005-09-28	Norrbottnens län	Aapua 4, Aapua	M27i	7436524	1835470
813	Vestas	1500	82/78	2005-09-28	Norrbottnens län	Aapua 5, Aapua	M27i	7436993	1835215
814	Vestas	1500	82/78	2005-09-28	Norrbottnens län	Aapua 6, Aapua	M27i	7437236	1835161
815	Vestas	1500	82/78	2005-09-28	Norrbottnens län	Aapua 7, Aapua	M27i	7437396	1834932
830	NEG Micon	1500	72/67	2006-01-31	Västra Götaland	Mungseröd 1, Mungseröd	A9f	1243940	6525408
831	NEG Micon	1500	72/67	2006-01-31	Västra Götaland	Mungseröd 2, Mungseröd	A9f	1244162	6525655
832	NEG Micon	1500	72/67	2006-01-31	Västra Götaland	Mungseröd 3, Mungseröd	A9f	1244502	6525971
833	NEG Micon	1500	72/67	2006-01-31	Västra Götaland	Mungseröd 4, Mungseröd	A9f	1243981	6525022
834	NEG Micon	1500	72/67	2006-01-31	Västra Götaland	Mungseröd 5, Mungseröd	A9f	1244377	6525301
835	NEG Micon	1500	72/67	2006-01-31	Västra Götaland	Mungseröd 6, Mungseröd	A9f	1244636	6525536
888	Enercon	1500	66/65	2004-10-01	Skåne	Nygårdshus 2, Eslöv	-	6191611	1351589
889	Enercon	1500	70/86	2004-11-01	Skåne	Nygårdshus 5, p.Olofssoon Energi, Eslöv	D2g	6192437	1351624
858	Vestas	1800	90/95	2007-02-04	Västra Götaland	Stenbrona 1, Stenbrona-Saleby	C8f	6474028	1344914
859	Vestas	1800	90/95	2007-02-04	Västra Götaland	Stenbrona 2, Stenbrona-Saleby	C8f	6473738	1345194
683	Vestas	2000	80/78	2003-01-20	Skåne	Lundåkra, LU1, Landskrona	C2g	6196112	1315932
684	Vestas	2000	80/78	2003-01-20	Skåne	Lundåkra, LU2, Landskrona	C2g	6196467	1316115
738	Vestas	2000	80/78	2003-12-14	Gotland	Skåls Näs, Slitevind XXIX, Skåls, Näsudden	I5f	6328995	1646682
774	Enercon	2000	70/65	2004-12-01	Skåne	Orup 1, Rolsberga , Jordboen	D2g	6189475	1356075
790	Vestas	2000	80/78	2004-08-06	Skåne	Västraby 1 SV, Löberöd, Västraby Gård	D2g	6187831	1358108
791	Vestas	2000	80/78	2004-08-06	Skåne	Västraby 2 NV, Västraby, Västraby Gård	D2g	6188232	1358110
792	Vestas	2000	80/78	2004-08-06	Skåne	Västraby 3 SO, Västraby, Västraby Gård	D2g	6188022	1358408
793	Vestas	2000	80/78	2004-08-06	Skåne	Västraby 4 NO, Västraby, Västraby Gård	D2g	6188423	1358411

Nr	Fabrikat	Effekt (kW)	D/H (m)	Driftstart	Län	Beskrivning	Kart-placering	Koordinater, RT-90	
								X	Y
821	Enercon	2000	70/85	2005-10-07	Jämtland	Långå 1, Långå	D17e	6930500	1369700
822	Enercon	2000	70/85	2005-10-17	Jämtland	Långå 2, Långå	D17e	6930800	1369600
823	Enercon	2000	70/85	2005-10-24	Jämtland	Långå 3, Långå	D17e	6931780	1369500
824	Enercon	2000	70/85	2005-10-31	Jämtland	Långå 4, Långå	D17e	6930500	1370100
825	Enercon	2000	70/85	2005-11-08	Jämtland	Långå 5, Långå	D17e	6931270	1369850
845	Enercon	2000	70/64	2006-07-20	Skåne	Odarslöv 1, Eslöv	C2f	6183425	1342141
846	Enercon	2000	70/64	2006-07-20	Skåne	Odarslöv 2, Eslöv	C2i	6183967	1342580
847	Enercon	2000	70/64	2006-07-20	Skåne	Odarslöv 3, Eslöv	C2i	6184306	1341772
856	Enercon	2000	82/78	2007-01-19	Skåne	Värilinge 1, Stehag	C2i	6198159	1348777
857	Enercon	2000	82/78	2007-03-09	Skåne	Värilinge 2, Stehag	C2i	6198071	1349058
868	Enercon	2000	82/78	2007-05-01	Kalmar	Stora Istad 1, Stora Istad	H5a	6313174	1562210
869	Enercon	2000	82/78	2007-05-01	Kalmar	Stora Istad 2, Stora Istad	H5a	6312894	1562010
870	Enercon	2000	82/78	2007-05-01	Kalmar	Stora Istad 3, Stora Istad	H5a	6312594	1561808
871	Enercon	2000	82/78	2007-05-01	Kalmar	Stora Istad 4, Stora Istad	H5a	6312334	1561610
872	Enercon	2000	82/78	2007-05-01	Kalmar	Stora Istad 5, Stora Istad	H5a	6312054	1561410
878	Vestas	2000	90/80	2007-01-11	Västerbotten	Hornberget 1, Aspliden	I23e	7223101	1631439
879	Vestas	2000	90/80	2007-01-11	Västerbotten	Hornberget 2, Aspliden	I23e	7223323	1631648
880	Vestas	2000	90/80	2007-01-11	Västerbotten	Hornberget 3, Aspliden	I23e	7223521	1631946
881	Vestas	2000	90/80	2007-01-11	Västerbotten	Hornberget 4, Aspliden	I23e	7223839	1632069
882	Vestas	2000	90/80	2007-01-11	Västerbotten	Hornberget 5, Aspliden	I23e	7223917	1632069
939	Vestas	2000	90/95	2007-12-01	Skåne	Stortrappen, Lyngby	D2i	6195845	1397344
957	Enercon	2000	82/78	2007-11-26	Västra Götaland	Entorp 1, Ardala	D8d	6475504	1353822
958	Enercon	2000	82/78	2007-11-26	Västra Götaland	Entorp 2, Ardala	D8d	6475584	1353448
959	Vestas	2000	90/80	2007-12-14	Halland	Långås vindpark 1, Långnäs	B5f	6318738	1297540
960	Vestas	2000	90/80	2007-12-14	Halland	Långås vindpark 2, Långnäs	B5f	6318738	1297540
961	Vestas	2000	90/80	2007-12-14	Halland	Långås vindpark 3, Långnäs	B5f	6318738	1297540
962	Vestas	2000	90/80	2007-12-14	Halland	Långås vindpark 4, Långnäs	B5f	6318738	1297540
969	Vestas	2000	90/80	2006-12-20	Halland	Munkagård 1, Tvååker	B5f	6327335	1289836
970	Vestas	2000	90/80	2006-12-20	Halland	Munkagård 2, Tvååker	B5f	6327527	1289728

Nr	Fabrikat	Effekt (kW)	D/H (m)	Driftstart	Län	Beskrivning	Kart-placering	Koordinater, RT-90	
								X	Y
971	Vestas	2000	90/80	2006-12-20	Halland	Munkagård 3, Tvååker	B5f	6327527	1289619
978	Enercon	2300	70/70	2007-01-15	Halland	Lövstaviken V1	B5c	6312019	1296842
979	Enercon	2300	70/70	2007-01-15	Halland	Lövstaviken V2	B5c	6312098	1296314
980	Enercon	2300	70/70	2007-01-15	Halland	Lövstaviken V4	B5c	6311769	1296461
981	Enercon	2300	70/70	2007-01-15	Halland	Lövstaviken V5	B5c	6311730	1296725
982	Enercon	2300	70/70	2007-01-15	Halland	Lövstaviken V6	B5c	6311441	1296609
972	Enercon	2000	82/78	2007-12-19	Västra Götaland	Sundsholm, Luttra	D7h	6447924	1365456
973	Vestas	2000	80/78	2007-12-22	Dalarna	Byråsen, Marika, Malung	D13e	6729778	1382212
974	Vestas	2000	80/78	2007-12-29	Dalarna	Byråsen, Virola, Malung	D13e	6729637	1382354
763	Vestas	3000	90/80	2002-12-01	Gotland	Olsvenne 2, Näs	I5f	6330014	1646706
867	Vestas	3000	90/80	2007-05-03	Västerbotten	Holmsund 2, Holmsund	K20e	7070710	1724284

Bilaga 2. Huvudresultat

Nr	Fabrikat	Effekt (kW)	Driftstart	Beräknad prod. (MWh)	D (m)	H (m)	Prod (MWh)	Prod, k (MWh)	V.prod/B.prod (%)	Gen.tid (h)	Hindertid (h)
381	Enercon	1500	1999-05-15	3700	66	67	3352	3230	87,3	7972	18
386	Vestas	1500	1999-08-24	4119	66	67	3060	2942	71,4	5957	1305
387	Vestas	1500	1999-08-24	3970	66	67	3003	2888	72,7	5869	1148
388	Vestas	1500	1999-08-28	4266	66	67	2832	2723	63,8	6482	2304
389	Vestas	1500	1999-08-26	4298	66	67	3830	3683	85,7	5869	201
422	Vestas	1500	2000-01-21	4550	66	67	4127	3968	87,2	6658	193
474	Vestas	1500	2001-03-17	3377	66	78	3125	3005	89	7358	201
475	Vestas	1500	2001-03-13	3430	66	78	3342	3213	93,7	7621	79
476	Vestas	1500	2001-03-10	3497	66	78	3227	3103	88,7	7534	219
617	Vestas	1500	2001-11-08	4500	66	80	4108	3950	87,8	0	1743
642	GE Wind Energy	1500	2002-07-12	3475	70,5	65	2474	2379	68,5	6220	0
643	GE Wind Energy	1500	2002-07-12	3475	70,5	65	2736	2631	75,7	5957	473
644	GE Wind Energy	1500	2002-07-12	3475	70,5	65	2671	2568	73,9	6307	745
645	Enercon	1500	2002-09-01	3700	66	65	3835	3688	99,7	7621	0
646	Enercon	1500	2002-09-01	3700	66	65	3750	3606	97,5	7709	61
647	Enercon	1500	2002-09-01	3700	66	65	3548	3412	92,2	7271	88
675	Enercon	1500	2003-01-01	3700	70	65	3606	3467	93,7	7271	70
676	Enercon	1500	2003-01-01	3700	70	65	3773	3628	98,1	7709	0
677	Enercon	1500	2003-01-01	3700	70	65	3711	3568	96,4	7621	26
699	NEG Micon	1500	2002-01-01	3800	72	62	2016	1938	51	5431	131
714	Enercon	1500	2003-06-15	3700	70	65	3529	3393	91,7	5782	280
715	Enercon	1500	2003-06-15	3700	70	65	3661	3520	95,1	7534	88

Nr	Fabrikat	Effekt (kW)	Driftstart	Beräknad prod. (MWh)	D (m)	H (m)	Prod (MWh)	Prod, k (MWh)	V.prod/B.prod (%)	Gen.tid (h)	Hindertid (h)
777	Vestas	1500	2004-12-07	4031	82	78	3828	3681	91,3	6482	123
778	Vestas	1500	2004-12-05	4319	82	78	4240	4077	94,4	6395	841
779	Vestas	1500	2004-12-08	3613	82	78	3420	3288	91	6395	123
780	Vestas	1500	2004-12-08	4023	82	78	3208	3085	76,7	6395	569
781	Vestas	1500	2004-12-03	4032	82	78	2691	2588	64,2	88	166
782	Vestas	1500	2004-12-05	4054	82	78	3409	3278	80,9	6132	61
783	Vestas	1500	2004-12-03	3955	82	78	3379	3249	82,2	6132	114
809	Vestas	1500	2005-10-03	4465	82	78	4014	3860	86,4	6132	368
810	Vestas	1500	2005-09-29	4232	82	78	3926	3775	89,2	6044	657
811	Vestas	1500	2005-09-28	4140	82	78	3551	3414	82,5	5694	858
812	Vestas	1500	2005-09-28	4344	82	78	4076	3919	90,2	5431	412
813	Vestas	1500	2005-09-28	4397	82	78	2846	2737	62,2	5168	1787
814	Vestas	1500	2005-09-28	4500	82	78	3215	3091	68,7	4643	1349
815	Vestas	1500	2005-09-28	4613	82	78	4000	3846	83,4	3592	780
830	NEG Micon	1500	2006-01-31	2800	72	67	2909	2797	99,9	7446	9
831	NEG Micon	1500	2006-01-31	2800	72	67	2799	2691	96,1	7534	18
832	NEG Micon	1500	2006-01-31	2800	72	67	2914	2802	100,1	7446	18
833	NEG Micon	1500	2006-01-31	2800	72	67	2388	2296	82	4730	359
834	NEG Micon	1500	2006-01-31	2800	72	67	3016	2900	103,6	7621	9
835	NEG Micon	1500	2006-01-31	2800	72	67	2688	2585	92,3	7534	9
888	Enercon	1500	2004-10-01	4200	66	65	3763	3618	86,1	7972	18
889	Enercon	1500	2004-11-01	4100	70	86	3681	3539	86,3	7884	44
858	Vestas	1800	2007-02-04	5200	90	95	5782	5560	106,9	7534	9
859	Vestas	1800	2007-02-04	5200	90	95	5802	5579	107,3	7534	9
683	Vestas	2000	2003-01-20	5500	80	78	5011	4818	87,6	7008	420

Nr	Fabrikat	Effekt (kW)	Driftstart	Beräknad prod. (MWh)	D (m)	H (m)	Prod (MWh)	Prod, k (MWh)	V.prod/B.prod (%)	Gen.tid (h)	Hindertid (h)
684	Vestas	2000	2003-01-20	5500	80	78	4913	4724	85,9	7096	753
738	Vestas	2000	2003-12-14	6000	80	78	5502	5290	88,2	6307	464
774	Enercon	2000	2004-12-01	3500	70	65	3515	3380	96,6	7621	9
790	Vestas	2000	2004-08-06	4800	80	78	4693	4513	94	5869	210
791	Vestas	2000	2004-08-06	4800	80	78	4423	4253	88,6	6658	18
792	Vestas	2000	2004-08-06	4800	80	78	4080	3923	81,7	6658	473
793	Vestas	2000	2004-08-06	4800	80	78	4288	4123	85,9	5344	184
821	Enercon	2000	2005-10-07	5400	70	85	3678	3537	65,5	6658	61
822	Enercon	2000	2005-10-17	5400	70	85	3835	3688	68,3	6658	26
823	Enercon	2000	2005-10-24	5400	70	85	3879	3730	69,1	7096	70
824	Enercon	2000	2005-10-31	5400	70	85	4123	3964	73,4	7008	18
825	Enercon	2000	2005-11-08	5400	70	85	3741	3597	66,6	6920	44
845	Enercon	2000	2006-07-20	4900	70	64	4552	4377	89,3	7796	44
846	Enercon	2000	2006-07-20	4900	70	64	4438	4267	87,1	7709	44
847	Enercon	2000	2006-07-20	4900	70	64	4087	3930	80,2	7621	26
856	Enercon	2000	2007-01-19	5500	82	78	4702	4521	82,2	8059	53
857	Enercon	2000	2007-03-09	5500	82	78	4741	4559	82,9	8147	26
868	Enercon	2000	2007-05-01	5500	82	78	5671	5453	99,1	8497	35
869	Enercon	2000	2007-05-01	5500	82	78	5606	5390	98	8234	53
870	Enercon	2000	2007-05-01	5500	82	78	5496	5285	96,1	8147	228
871	Enercon	2000	2007-05-01	5500	82	78	5358	5152	93,7	8585	79
872	Enercon	2000	2007-05-01	5500	82	78	5759	5538	100,7	7621	158
878	Vestas	2000	2007-01-11	6000	90	80	5276	5073	84,6	5694	0
879	Vestas	2000	2007-01-11	6000	90	80	5294	5090	84,8	5344	0
880	Vestas	2000	2007-01-11	6000	90	80	6098	5863	97,7	5081	0

Nr	Fabrikat	Effekt (kW)	Driftstart	Beräknad prod. (MWh)	D (m)	H (m)	Prod (MWh)	Prod, k (MWh)	V.prod/B.prod (%)	Gen.tid (h)	Hindertid (h)
881	Vestas	2000	2007-01-11	6000	90	80	5718	5498	91,6	5081	0
882	Vestas	2000	2007-01-11	6000	90	80	4788	4604	76,7	2278	0
939	Vestas	2000	2007-12-01	5200	90	95	4733	4551	87,5	6833	175
957	Enercon	2000	2007-11-26	4400	82	78	4090	3933	89,4	7972	184
958	Enercon	2000	2007-11-26	4400	82	78	3787	3641	82,8	8147	35
959	Vestas	2000	2007-12-14	5082	90	80	4648	4469	87,9	6570	1077
960	Vestas	2000	2007-12-14	5150	90	80	4132	3973	77,1	6570	1761
961	Vestas	2000	2007-12-14	4995	90	80	4319	4153	83,1	3592	1095
962	Vestas	2000	2007-12-14	5091	90	80	5017	4824	94,8	6658	394
969	Vestas	2000	2006-12-20	5300	90	80	5909	5682	107,2	6745	149
970	Vestas	2000	2006-12-20	5300	90	80	5264	5062	95,5	0	9
971	Vestas	2000	2006-12-20	5300	90	80	6102	5867	110,7	7183	44
978	Enercon	2300	2007-01-15	5600	70	70	5909	5682	101,5	7796	140
979	Enercon	2300	2007-01-16	5600	70	70	5310	5106	91,2	7358	219
980	Enercon	2300	2007-01-17	5600	70	70	6090	5856	104,6	7621	123
981	Enercon	2300	2007-01-18	5600	70	70	5355	5149	91,9	7534	149
982	Enercon	2300	2007-01-19	5600	70	70	5957	5728	102,3	7621	123
972	Enercon	2000	2007-12-19	4300	82	79	4823	4638	107,8	8234,4	96
973	Vestas	2000	2007-12-22	4000	80	78	3843	3695	92,4	6307	88
974	Vestas	2000	2007-12-29	4000	80	78	4049	3893	97,3	7271	18
763	Vestas	3000	2002-12-01	8000	90	80	6845	6582	82,3	4993	1515
867	Vestas	3000	2007-05-03	6000	90	80	3667	3526	58,8		0

Bilaga 2. Huvudresultat, fortsättning

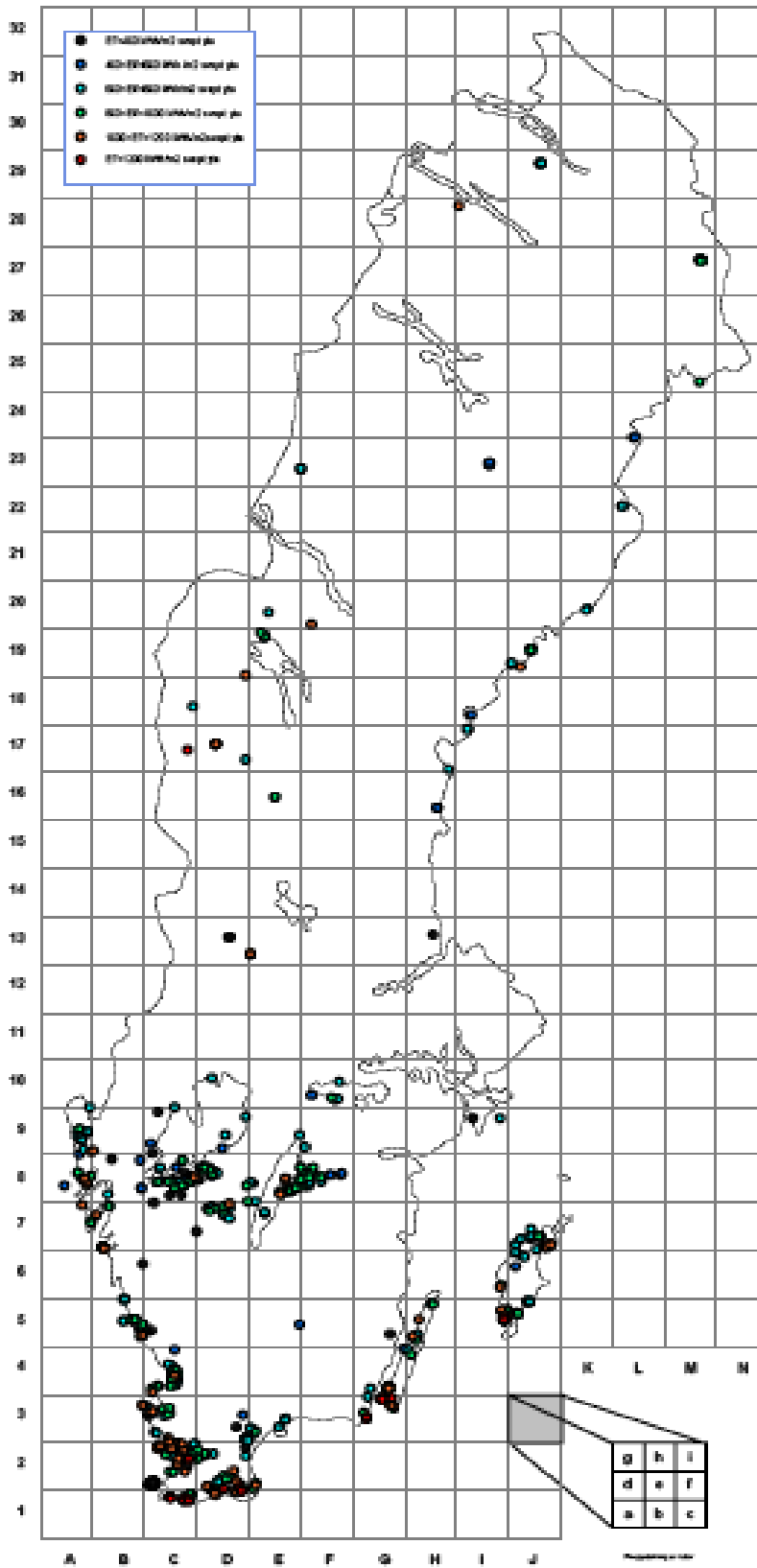
Nr	Tillgänglighet (%)	(kWh/kW).k	(kWh/m2)	(kWh/h)	Kap.faktor (-)	Eteo, WindPro (MWh)	Ekvivalent råhet 0<r<4	F1	F2	F3	Everkl/Eteo (%)
381	99,8	2157	946	32	0,282	5793	2,23	2,23	2,5	2,9	55,8
386	85,1	2305	1011	34	0,313	6117	2,19	2,19	2,5	2,8	48,1
387	86,9	2215	971	33	0,302	6117	2,33	2,33	2,6	3	47,2
388	73,7	2463	1080	37	0,325	6117	1,92	1,92	2,2	2,6	44,5
389	97,7	2513	1102	38	0,327	6117	1,83	1,83	2,2	2,6	60,2
422	97,8	2705	1186	40	0,346	6151	1,53	1,53	1,9	2,3	64,5
474	97,7	2050	899	26	0,257	7013	2,96	2,96	3,2	3,5	42,9
475	99,1	2162	948	28	0,261	7013	2,83	2,83	3,1	3,4	45,8
476	97,5	2122	930	27	0,266	7013	2,88	2,88	3,1	3,4	44,2
617	80,1	3288	1441	41	0,342	7013	1,24	1,24	1,6	2,1	56,3
642	100	1586	609	24	0,264	5625	3,04	3,04	3,3	3,6	42,3
643	94,6	1854	712	29	0,264	5625	2,64	2,64	2,9	3,2	46,8
644	91,5	1871	719	29	0,264	5625	2,62	2,62	2,9	3,2	45,7
645	100	2458	1078	38	0,282	5207	1,21	1,21	1,5	2	70,8
646	99,3	2421	1061	37	0,282	5207	1,28	1,28	1,6	2,1	69,3
647	99	2297	1007	35	0,282	5207	1,51	1,51	1,8	2,3	65,5
675	99,2	2330	908	36	0,282	5207	1,45	1,45	1,8	2,3	66,6
676	100	2419	943	37	0,282	5207	1,28	1,28	1,6	2,1	69,7
677	99,7	2386	930	37	0,282	5207	1,34	1,34	1,7	2,2	68,5
699	98,5	1312	483	21	0,289	4249	2,82	2,82	3	3,4	45,6
714	96,8	2337	911	36	0,282	5380	1,58	1,58	1,9	2,4	63,1
715	99	2370	924	36	0,282	5380	1,52	1,52	1,9	2,3	65,4
777	98,6	2489	707	32	0,307	5309	1,24	1,24	1,6	2,1	69,3

Nr	Tillgänglighet (%)	(kWh/kW).k	(kWh/m2)	(kWh/h)	Kap.faktor (-)	Eteo, WindPro (MWh)	Ekvivalent råhet $0 < r < 4$	F1	F2	F3	Everkl/Eteo (%)
778	90,4	3007	854	39	0,329	5309	0,53	0,53	0,7	1,1	76,8
779	98,6	2223	632	29	0,275	5309	1,75	1,75	2,1	2,5	61,9
780	93,5	2199	625	28	0,306	5309	1,79	1,79	2,1	2,5	58,1
781	98,1	1758	499	23	0,307	5309	2,63	2,63	2,9	3,2	48,7
782	99,3	2201	625	28	0,309	5309	1,79	1,79	2,1	2,5	61,7
783	98,7	2195	623	28	0,301	5309	1,8	1,8	2,1	2,6	61,2
809	95,8	2686	763	34	0,34	5322	0,93	0,93	1,2	1,7	72,5
810	92,5	2721	773	35	0,322	5322	0,88	0,88	1,2	1,6	70,9
811	90,2	2524	717	32	0,315	5322	1,19	1,19	1,5	2	64,2
812	95,3	2742	779	35	0,331	5322	0,85	0,85	1,1	1,6	73,6
813	79,6	2292	651	29	0,335	5322	1,62	1,62	2	2,4	51,4
814	84,6	2436	692	31	0,342	5322	1,35	1,35	1,7	2,2	58,1
815	91,1	2815	799	36	0,351	5322	0,75	0,75	1	1,5	72,3
830	99,9	1867	688	28	0,213	5847	2,73	2,73	3	3,3	47,8
831	99,8	1798	662	27	0,213	5847	2,84	2,84	3,1	3,4	46,0
832	99,8	1872	690	28	0,213	5847	2,73	2,73	3	3,3	47,9
833	95,9	1596	588	24	0,213	5847	3,11	3,11	3,3	3,7	39,3
834	99,9	1935	713	29	0,213	5847	2,63	2,63	2,9	3,2	49,6
835	99,9	1725	635	26	0,213	5847	2,94	2,94	3,2	3,5	44,2
888	99,8	2417	1060	37	0,32	5320	1,38	1,38	1,7	2,2	68,0
889	99,5	2371	924	28	0,312	5485	1,6	1,6	1,9	2,4	64,5
858	99,9	3092	875	33	0,33	7611	1,38	1,07	1,4	1,9	73,1
859	99,9	3102	878	33	0,33	7611	1,37	1,06	1,4	1,9	73,3
683	95,2	2531	1007	32	0,314	7722	1,89	1,56	1,9	2,3	62,4
684	91,4	2584	1028	33	0,314	7722	1,8	1,46	1,8	2,3	61,2

Nr	Tillgänglighet (%)	(kWh/kW).k	(kWh/m2)	(kWh/h)	Kap.faktor (-)	Eteo, WindPro (MWh)	Ekvivalent råhet 0<r<4	F1	F2	F3	Everkl/Eteo (%)
738	94,7	2793	1111	36	0,342	8286	1,77	1,43	1,8	2,2	63,9
774	99,9	1692	879	26	0,2	7721	3,18	2,96	3,2	3,5	43,8
790	97,6	2312	920	30	0,274	7721	2,27	1,95	2,3	2,7	58,4
791	99,8	2131	848	27	0,274	7721	2,56	2,28	2,6	2,9	55,1
792	94,6	2074	825	27	0,274	7721	2,64	2,37	2,6	3	50,8
793	97,9	2106	838	27	0,274	7721	2,6	2,32	2,6	2,9	53,4
821	99,3	1781	925	21	0,308	4893	1,4	1,09	1,4	1,9	72,3
822	99,7	1849	961	22	0,308	4893	1,22	0,93	1,2	1,7	75,4
823	99,2	1880	977	22	0,308	4893	1,14	0,87	1,1	1,6	76,2
824	99,8	1986	1032	23	0,308	4893	0,88	0,67	0,9	1,3	81,0
825	99,5	1808	939	21	0,308	4893	1,33	1,03	1,3	1,8	73,5
845	99,5	2199	1143	34	0,28	7116	2,14	1,82	2,1	2,6	61,5
846	99,5	2144	1114	34	0,28	7116	2,24	1,93	2,2	2,6	60,0
847	99,7	1971	1024	31	0,28	7116	2,55	2,26	2,5	2,9	55,2
856	99,4	2274	861	29	0,314	8775	2,75	2,5	2,8	3,1	51,5
857	99,7	2286	866	29	0,314	8775	2,74	2,48	2,7	3,1	52,0
868	99,6	2737	1037	35	0,314	8202	1,81	1,47	1,8	2,3	66,5
869	99,4	2711	1027	35	0,314	8202	1,85	1,52	1,9	2,3	65,7
870	97,4	2713	1027	35	0,314	8202	1,85	1,51	1,9	2,3	64,4
871	99,1	2599	984	33	0,314	8202	2,04	1,71	2	2,5	62,8
872	98,2	2820	1068	36	0,314	8202	1,68	1,34	1,7	2,2	67,5
878	100	2537	797	32	0,342	5078	0	0	0	0	99,9
879	100	2545	800	32	0,342	5078	0	-0,02	0	0	100,2
880	100	2932	922	37	0,342	5078	0	-2,58	-1,2	-0,6	115,5
881	100	2749	864	34	0,342	5078	0	-0,86	-0,5	-0,4	108,3

Nr	Tillgänglighet (%)	(kWh/kW).k	(kWh/m2)	(kWh/h)	Kap.faktor (-)	Eteo, WindPro (MWh)	Ekvivalent råhet 0<r<4	F1	F2	F3	Everkl/Eteo (%)
882	100	2302	724	29	0,342	5078	0,4	0,36	0,4	0,6	90,7
939	98	2322	730	24	0,297	8707	2,67	2,4	2,7	3	52,3
957	97,9	2009	761	26	0,251	7387	2,6	2,33	2,6	3	53,2
958	99,6	1828	692	23	0,251	7387	2,88	2,64	2,9	3,2	49,3
959	87,7	2548	801	32	0,29	8423	2,23	1,91	2,2	2,6	53,1
960	79,9	2486	782	31	0,294	8423	2,32	2,01	2,3	2,7	47,2
961	87,5	2373	746	30	0,285	8423	2,49	2,2	2,5	2,9	49,3
962	95,5	2526	794	32	0,291	8423	2,26	1,95	2,3	2,7	57,3
969	98,3	2890	909	36	0,303	9116	2,04	1,7	2	2,5	62,3
970	99,9	2533	796	32	0,303	9116	2,53	2,25	2,5	2,9	55,5
971	99,5	2948	927	37	0,303	9116	1,95	1,62	1,9	2,4	64,4
978	98,4	2510	1500	36	0,278	7622	1,71	0,92	1,2	1,7	74,5
979	97,5	2277	1361	33	0,278	7622	2,16	1,34	1,7	2,2	67,0
980	98,6	2582	1543	37	0,278	7622	1,56	0,82	1,1	1,6	76,8
981	98,3	2277	1361	33	0,278	7622	2,16	1,34	1,7	2,2	67,6
982	98,6	2526	1509	36	0,278	7622	1,67	0,9	1,2	1,7	75,2
972	98,9	2345	888	30	0,245	7384	2,03	1,7	2	2,5	62,8
973	99	1866	743	24	0,228	5457	1,7	1,36	1,7	2,2	67,7
974	99,8	1951	776	25	0,228	5457	1,49	1,17	1,5	2	71,3
763	82,7	2653	1251	33	0,304	5457	3,19	-41,46	-18,5	3,2	120,6
867	100	1175	554	15	0,228	9641	3,92	3,34	3,6	3,9	36,6

Bilaga 3. Karta över Sveriges samtliga verk med en effekt över 60 kW.

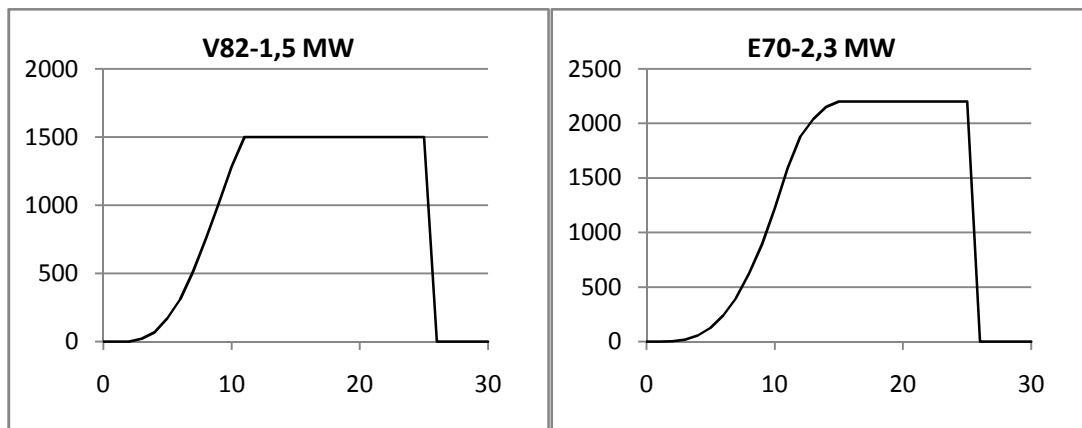
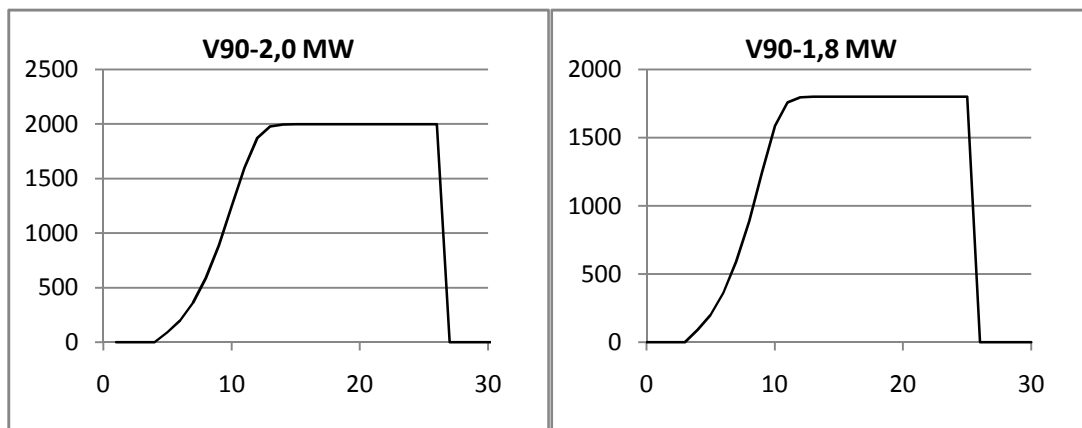
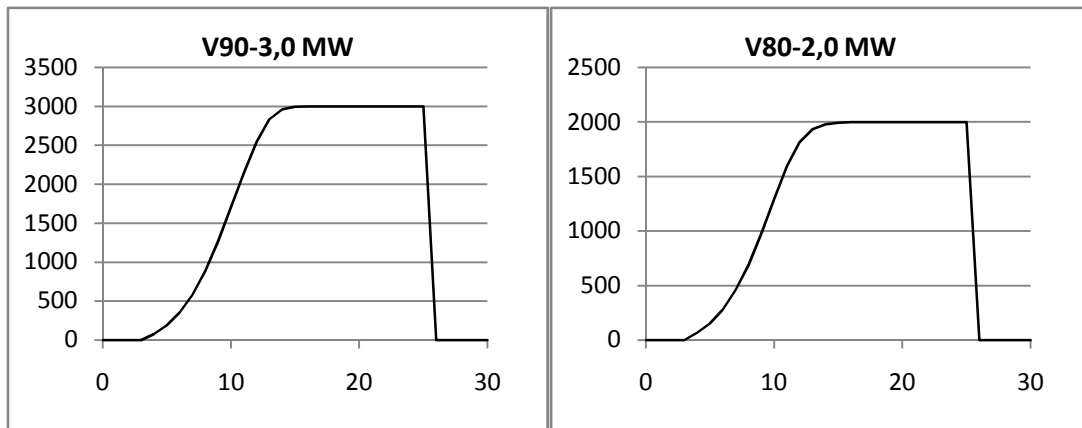


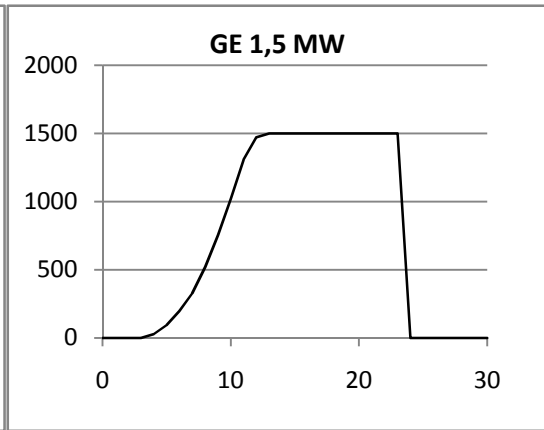
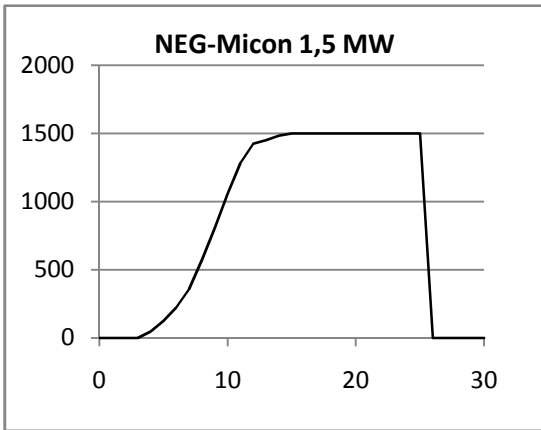
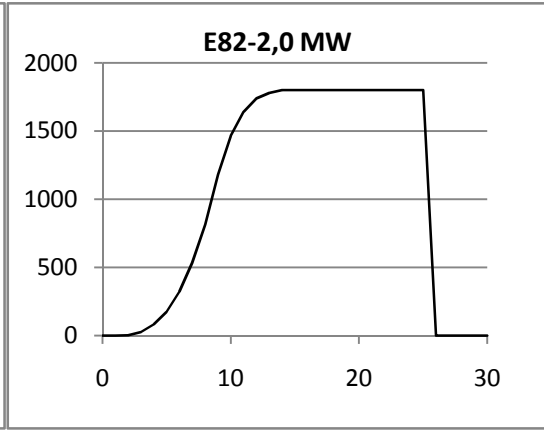
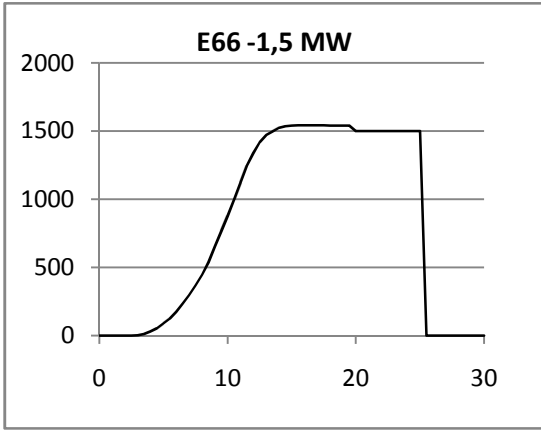
Översiktskarta för vindkraftverkens lokalisering. (Källa: Energimyndigheten, Vindforsk)

Bilaga 4. Effektkurvor

För samtliga effektkurvor gäller: x-axeln = vindhastighet [m/s] y-axeln = effekt [kW].

V=Vestas, E=Enercon, GE = General Electric Wind.





Bilaga 5. Sammanställning i Excel

Det här dokumentet syftar till att förklara den Excel-fil som skapats för att enkelt sammanfatta det statistiska materialet som återfinns i examensarbetet. Filen är tänkt att på ett enkelt och överskådligt vis redovisa resultaten för de vindkraftverk som behandlats, samt ge möjlighet att sortera informationen med avseende på installerad effekt.

Struktur

Excel-filen består av tre delar: En sammanfattande resultatdel baserat på det angivna urvalet (nr 1 i figur 1), en huvuddel för det statistiska materialet (nr 2 i figur 1) samt sammanfattande resultat indelat efter effekt (nr 3 i figur 1).

The image shows a screenshot of an Excel spreadsheet. The main part of the spreadsheet is a large table with many columns and rows, representing statistical data for wind turbines. A red '1.' is placed over a small summary table in the top left corner. A red '2.' is placed over the large data table. On the right side, there are several smaller summary tables, each with a red '3.' placed over it. The tables contain various numerical data points and are organized into sections.

Figur 2. Bild över Excel-filen. 1: Sammanfattande resultat efter angivet urval (effekt). Resultaten anges i medeltal för skogsplaceringar samt övriga placeringar. 2: Statistiskt material för varje enskilt verk. 3: De olika rutorna anger sammanfattande resultat i medeltal för skogsplacerade verk samt övriga placeringar. Varje ruta motsvarar en angiven effekt.

Statistiskt material

Den viktigaste komponenten i Excel-filen är huvudresultatet (nr 2 i figur 1). I den här delen återfinns de beräknade resultaten för varje enskilt vindkraftverk som behandlats i examensarbetet. Uppgifter om lokalisering (ort och koordinater), installerad effekt, förväntad produktion, erhållen produktion, tillgänglighet m.m. finns angivet.

Sammanfattande resultat

För att hantera och sortera ut den information som finns i huvudresultatet finns det sammanfattande resultat (nr 3 i figur 1). Sammanfattningen ger information om hur många verk det finns av en viss tillverkare och hur många av dessa som är placerade i skogen. Vidare ges det information i medeltal om tillgänglighet, produktion i förhållande till installerad effekt (kWh/kW), produktion i förhållande till svepyta (kWh/m²), produktion i förhållande till navhöjd (kWh/m), produktion i förhållande till beräknad produktion samt verklig produktion i förhållande till teoretisk produktion.

Samtliga	Enhet	Tillverkare					Max		Min	
		Samtliga	Vestas	Enercon	GE Wind	NEG Micon	Tillverkare	Utfall	Tillverkare	Utfall
Antal,övriga	-	60,0	27,0	30,0	3,0	0,0	Enercon	30,0	NEG Micon	0,0
Antal, skog	-	34,0	22,0	5,0	0,0	7,0	Vestas	22,0	GE Wind	0,0
Antal, totalt	-	94,0	49,0	35,0	3,0	7,0	Vestas	49,0	GE Wind	3,0
Tillgänglighet, övriga	(%)	96,5	93,2	99,0	95,4	OU	Enercon	99,0	Vestas	93,2
Tillgänglighet, skog	(%)	96,9	95,6	99,5	OU	99,1	Enercon	99,5	Vestas	95,6
Skillnad (Skog-övriga)	(%)	0,4	2,4	0,5	OU	OU	Vestas	2,4	Enercon	0,5
Prod/effekt, övriga	(kWh/kW)	2312,3	2469,6	2748,8	1770,4	OU	Vestas	2469,6	GE Wind	1770,4
Prod/effekt, skog	(kWh/kW)	2202,9	2431,3	2449,8	OU	1729,2	Vestas	2431,3	NEG Micon	1729,2
Skillnad (Skog-övriga)	(kWh/kW)	-109,4	-38,3	-488,1	OU	OU	Vestas	-38,3	Enercon	-488,1
Prod/svepyta, övriga	(kWh/m ²)	896,0	942,9	1044,6	680,3	OU	Enercon	1044,6	GE Wind	680,3
Prod/svepyta, skog	(kWh/m ²)	746,7	731,6	967,0	OU	637,1	Enercon	967,0	NEG Micon	637,1
Skillnad (Skog-övriga)	(kWh/m ²)	-149,3	-211,3	-77,6	OU	OU	Enercon	-77,6	Vestas	-211,3
Prod/navhöjd, övriga	(kWh/m)	30,9	31,8	33,3	27,2	OU	Enercon	33,3	GE Wind	27,2
Prod/navhöjd, skog	(kWh/m)	28,5	30,7	21,9	OU	26,0	Vestas	30,7	Enercon	21,9
Skillnad (Skog-övriga)	(kWh/m)	-2,5	-1,0	-11,4	OU	OU	Vestas	-1,0	Enercon	-11,4
Verklig.prod/beräknad.prod, övriga	(%)	87,3	93,4	72,7	72,7	OU	Vestas	93,4	Enercon	72,7
Verklig.prod/beräknad.prod, skog	(%)	83,1	84,4	68,6	OU	89,3	NEG Micon	89,3	Enercon	68,6
Skillnad (Skog-övriga)	(%)	-4,3	-9,0	-4,1	OU	OU	Enercon	-4,1	Vestas	-9,0
Verklig.prod/teoretisk.prod, övriga	(%)	63	57	63	45	OU	Enercon	63,5	GE Wind	44,9
Verklig.prod/teoretisk.prod, skog	(%)	68	73	76	OU	46	Enercon	75,7	NEG Micon	45,8
Skillnad (Skog-övriga)	(%)	5,1	15,6	12,2	OU	OU	Vestas	15,6	Enercon	12,2

Figur 3. Exempel på sammanfattande resultat. I det här fallet efter samtliga effekter.

I första delen (nr 1 i figur 2) ges beskrivning över vad som redovisas. I andra delen (nr 2 i figur 2) anges resultaten för olika delarna indelat efter tillverkare samt samtliga verk. I tredje delen (nr 3 i figur 2) anges max och min värde för de olika beräkningarna, samt vilken tillverkare som uppnått resultatet. I de fall då det statistiska materialet är otillräckligt anges detta med "OU".

Beräkningarna är utförda genom funktioner med villkor: Exempelvis är första raden i figur 2 ovan, "Antal, övriga", beräknad genom att använda funktionen "ANTAL.OM" i Excel. Där "OM" anger ett villkor som i det här fallet innebär att övriga verk (ej skogsetablerade verk) ska behandlas. På liknande vis är samtliga beräkningar i nr 2 i figur 2 genomförda, dvs med en angiven beräkning med ett tillhörande villkor. För att kunna använda sig av dessa villkor har därför varje verk försetts med olika index.

Sortering efter index

För att kunna hantera villkoren har vissa index använts som finns beskrivna nedan.

	Beskrivning	Index	Lokalisering (-)	Lokal, tillverk	Lokal, tillv, effekt	Effekt, tillv	Effekt, lokal	Fabri
p	Trolleberg, Trollebergs Gärd	2	10	12	1512	1502	1490	Enercon
	Slitevind XXIV, Smöjen	1	10	11	1511	1501	1490	Vestas
	Slitevind XXV, Smöjen	1	10	11	1511	1501	1490	Vestas
	Slitevind XXVI, Smöjen	1	10	11	1511	1501	1490	Vestas
	Slitevind XXVII, Smöjen	1	10	11	1511	1501	1490	Vestas
	Svireg, Skåls 12, Näs	1	10	11	1511	1501	1490	Vestas
	Storugns 7, Lärbro	1	10	11	1511	1501	1490	Vestas
	Storugns 8, Lärbro	1	10	11	1511	1501	1490	Vestas
	Storugns 9, Lärbro	1	10	11	1511	1501	1490	Vestas
	Sigvards 3, Näs	1	10	11	1511	1501	1490	Vestas
	Assmäsa 1, Assmäsa	3	10	13	1513	1503	1490	GE Wind
	Assmäsa 2, Assmäsa	3	10	13	1513	1503	1490	GE Wind
	Assmäsa 3, Assmäsa	3	10	13	1513	1503	1490	GE Wind
1	Hedagården 1, Hedagården	2	10	12	1512	1502	1490	Enercon
1	Hedagården 4, Hedagården	2	10	12	1512	1502	1490	Enercon
1	Hedagården 5, Hedagården	2	10	12	1512	1502	1490	Enercon
1	Hedagården 2, Hedagården	2	10	12	1512	1502	1490	Enercon
1	Hedagården 3, Hedagården	2	10	12	1512	1502	1490	Enercon
1	Hedagården 6, Hedagården	2	10	12	1512	1502	1490	Enercon
t	Digerberget, Digerberget	4	20	24	1524	1504	1480	NEG Micon
	Annevind 1, Annelöv	2	10	12	1512	1502	1490	Enercon
	Annevind 2, Annelöv	2	10	12	1512	1502	1490	Enercon
	Offerdal Råshön 1, Ånge	1	20	21	1521	1501	1480	Vestas
	Offerdal Råshön 2, Ånge	1	20	21	1521	1501	1480	Vestas
	Offerdal Råshön 3, Ånge	1	20	21	1521	1501	1480	Vestas
	Offerdal Råshön 4, Ånge	1	20	21	1521	1501	1480	Vestas
	Offerdal Råshön 5, Ånge	1	20	21	1521	1501	1480	Vestas

Figur 4. Urklipp ur det statistiska materialet där olika index finns angivna.

I kolumnen ”Index” anges tillverkaren med siffror:

Index	Tillverkare
1	Vestas
2	Enercon
3	GE Wind Energy
4	NEG Micon

För att möjliggöra indelningen efter lokalisering har ”skogsplacering” och ”övriga placeringar” angivits med nummer, 20 respektive 10. Indelning efter tillverkare samt lokalisering ligger därefter till grund för övriga indelningar som:

- Indelning efter lokalisering och tillverkare
- Indelning efter lokalisering, tillverkare och effekt.
- Indelning efter effekt och tillverkare
- Indelning efter effekt och lokalisering.

Exempel på hur beräkningen för ”Tillgänglighet, skog” är utförd för samtliga verk i figur 2:

=OM(AN39=0;"OU";MEDEL.OM(\$H\$35:\$H\$128;20;\$Y\$35:\$Y\$128))

Första OM funktionen kontrollerar om det finns några verk att beräkna, om inte så returneras svaret ”OU”. Om det däremot finns verk att tillgå kontrolleras då ett område (index) efter ett villkor som i det här fallet har värdet 20 (motsvarar skogsplaceringar). Tillgängligheten beräknas då för samtliga skogsplacerade verk. På motsvarande vis beräknas medelvärdet för de olika tillverkarna.

Urval och resultat

Excel-filen är utrustad med en urvalsfunktion som möjliggör sortering efter installerad effekt (nr 1 i figur 1). I arbetet behandlas effekterna: 1500, 1800, 2000 och 3000 kW. I urvalet går det även att ange att samtliga verk ska redovisas.

Sammanställning av tillgänglig statistik från 2008-02 t.om. 2009-02. Normalårskorrigerad enl. Energimyndigheten, faktor 1,04							
Urval, märkeffekt:	Samtliga		Tillverkare				Til
	Samtliga	1500	Samtliga	Vestas	Enercon	GE Wind	
Antal,övriga	60,0	27,0	30,0				0,0
Antal, skog	34,0	22,0	5,0				7,0
Antal, totalt	94,0	49,0	35,0				7,0
Tillgänglighet , övriga	(%)	96,5	93,2	99,0			95,4
Tillgänglighet, skog	(%)	96,9	95,5	99,5			99,1
Skillnad (Skog-övriga)	(%)	0,4	2,4	0,5			OU
Prod/effekt, övriga	(kWh/kW)	2312,3	2469,6	2348,8			1770,4
Prod/effekt, skog	(kWh/kW)	2202,9	2431,3	1860,8			1729,2
Skillnad (Skog-övriga)	(kWh/kW)	-109,4	-38,3	-488,1			OU
Prod/svepyta, övriga	(kWh/m ²)	896,0	942,9	1044,6			680,3
Prod/svepyta, skog	(kWh/m ²)	746,7	731,6	967,0			637,1
Skillnad (Skog-övriga)	(kWh/m ²)	-149,3	-211,3	-77,6			OU
Prod/navhöjd, övriga	(kWh/m)	30,9	31,8	33,3			27,2
Prod/navhöjd, skog	(kWh/m)	28,5	30,7	21,9			26,0
Skillnad (Skog-övriga)	(kWh/m)	-2,5	-1,0	-11,4			OU
Verklg.prod/beräknad.prod, övriga	(%)	87,3	93,4	72,7			72,7
Verklg.prod/beräknad.prod, skog	(%)	83,1	84,4	68,6			85,3
Skillnad (Skog-övriga)	(%)	-4,3	-9,0	-4,1			OU
Verklg.prod/teoretisk.prod, övriga	(%)	63	57	63			45
Verklg.prod/teoretisk.prod, skog	(%)	68	73	76			46
Skillnad (Skog-övriga)	(%)	5,1	15,6	12,2			OU

Sammanställningen redovisar samtliga värden i medeltal.
OU = Otillräckligt underlag

Figur 5. Urklipp ur huvudresultatet baserat på urvalet (märkeffekt)

Beroende på vilket alternativ som väljs så redovisas information från de olika beräkningarna som utförts (nr 3 i figur 1). Det här regleras med en rad "OM" funktioner för att hämta rätt information.

Exempel på hur en cellen "Prod/svepyta, skog" för Vestas verk med 1500 kW installerad effekt ser ut:

=OM(\$B\$5="Samtliga";AO47;OM(\$B\$5=1500;AO74;OM(\$B\$5=1800;AO101;OM(\$B\$5=2000;AO129;OM(\$B\$5=2300;AO156;OM(\$B\$5=3000;AO183))))))

Genom att kontrollera "urvalsrutan" returneras rätt värde. I det här fallet hittar den rätt vid (**\$B\$5=1500;AO74**) vilket betyder att information från cellen AO74 ska visas.