

Seminarieuppsatser nr 163

# Landskapets påverkan på vinden

## *-sett ur ett vindkraftperspektiv*



**Johanna Engström**

---

2009  
Centrum för Geobiosfärvetenskap  
Naturgeografi och Ekosystemanalys  
Lunds Universitet  
Sölvegatan 12  
223 62 Lund





Landskapets påverkan på vinden  
*-sett ur ett vindkraftperspektiv*

*en kandidatuppsats av*

Johanna Engström

Handledare:

Maj-Lena Linderson, Institutionen för Naturgeografi och  
Ekosystemanalys

Anton Andersson, E.ON Vind Sverige AB

Våren 2009

Institutionen för Naturgeografi och Ekosystemanalys  
Lunds Universitet



## **Förord**

Detta är en kandidatuppsats i naturgeografi omfattande 15 högskolepoäng, skriven vid Institutionen för naturgeografi och ekosystemanalys vid Lunds Universitet i samarbete med E.ON Vind Sverige AB.

Ett tack riktas till samtliga på E.ON Vind för stöd och uppmuntran. Ett stort tack även till handledare Maj-Lena Linderson vid Lunds Universitet för tips och råd.



## **Abstract**

### ***How the landscape affects the wind - from a wind power perspective***

This is a bachelor thesis written at Lund University in cooperation with E.ON Vind Sverige AB. The thesis is a study that investigates how the surrounding landscape affects the wind climate at a specific site.

The wind data used comes from three different met masts situated in the ocean, on plain land and in woodland respectively. The wind analysis is based on five parameters: turbulence intensity, the wind shear, wind direction, wind frequency distribution and extreme winds. These are considered as the most important wind factors to analyse when planning a new park of wind turbines. All analysis is made in Microsoft Excel and WindPro 9.2.

The result confirms that plain land and oceans, that this far has been the dominant environment for wind turbines, still can be considered as the most suitable. Here it is easy and safe to calculate the wind speed at different heights and here is the turbulence intensity low. To build wind turbines in woodland is a relatively new idea. The winds here have lower energy content and very high turbulence intensity. The investigations concerning woodlands suitability for wind turbines are ongoing and are an important question for most of the big energy producing companies in Sweden.

Most of the results suite well with the wind theory presented. In those cases when the results are not representative this is above all due to the placements of the met masts.

**Key words:** Geography, physical geography, wind, wind power, Weibull, wind direction, wind shear, turbulence.





## **Sammanfattning**

### ***Landskapets påverkan på vinden -sett ur ett vindkraftperspektiv***

Detta är en kandidatuppsats skriven vid Lunds Universitet i samarbete med E.ON Vind Sverige AB. Uppsatsen är en studie i hur det omgivande landskapet påverkar vindklimatet på en specifik plats.

För att undersöka teorin om landskapets påverkan på vinden har tre olika mätmaster valts ut: en placerad i havet, en på slättland och en i skogsmiljö. Samtliga är landskapstyper representerade inom den svenska vindkraftsindustrin. Vinden analyseras på fem olika sätt: turbulensintensitet, vindskjuvning, vindriktning, vindens frekvensfördelning samt extrema vindar. Dessa är de viktigaste parametrarna att ta hänsyn till vid projektering av nya vindkraftsanläggningar. Samtliga analyser görs i WindPro 9.2 och Microsoft Excel.

Resultatet bekräftar att slättland och hav, som hittills varit de dominanta miljöerna för vindkraft, fortfarande kan ses som de mest lämpliga. Här kan man räkna ut vindarna på olika höjder på ett enkelt och säkert sätt och här är turbulensintensiteten också lägre. Att bygga vindkraft i skogsmiljö är en relativt ny idé. Vindarna här visar ett lägre energiinnehåll och en mycket hög turbulensintensitet. Huruvida skogen är en lämplig miljö för vindkraft undersöks i dagsläget och är en viktig fråga för de flesta av Sveriges elproducenter.

De flesta resultaten stämmer väl överens med teorin. I de fall då verkligheten skiljer sig från teorin beror detta antagligen främst på mätmasternas placering.

**Nyckelord:** Geografi, naturgeografi, vind, vindkraft, Weibull, vindriktning, vindskjuvning, turbulens.



## Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>INLEDNING .....</b>	<b>1</b>
1.1	AVGRÄNSNING.....	2
<b>2</b>	<b>METOD OCH DATA.....</b>	<b>2</b>
2.1	PROGRAM FÖR BEHANDLING AV DATA.....	2
2.2	MÄTPLATSER .....	2
2.2.1	<i>Ocean</i> .....	3
2.2.2	<i>Plain</i> .....	3
2.2.3	<i>Woodland</i> .....	4
<b>3</b>	<b>VINDTEORI .....</b>	<b>5</b>
3.1	VINDENS UPPKOMST .....	5
3.2	LOKALA TRYCKSKILLNADER.....	6
3.3	TOPOGRAFINS INVERKAN .....	6
3.4	MARKYTANS RÅHET .....	7
3.5	MÄTBARA PARAMETRAR: .....	7
3.5.1	<i>Turbulensintensitet</i> .....	8
3.5.2	<i>Vindskjuvning (eng. Wind Shear)</i> .....	9
3.5.3	<i>Vindriktning</i> .....	10
3.5.4	<i>Vindens frekvensfördelning</i> .....	11
3.5.5	<i>Extrema vindar</i> .....	14
3.6	NORMALÅRSKORRIGERING AV MÄTDATA .....	14
<b>4</b>	<b>RESULTAT.....</b>	<b>15</b>
4.1	NORMALÅRSKORRIGERING .....	15
4.2	TURBULENSINTENSITET .....	16
4.3	VINDSKJUVDNING .....	17
4.4	VINDRIKTNING.....	17
4.5	FREKVENSFÖRDELNING .....	19
4.6	EXTREMA VINDAR.....	19
<b>5</b>	<b>DISKUSSION.....</b>	<b>20</b>
<b>6</b>	<b>SLUTSATS .....</b>	<b>21</b>
<b>7</b>	<b>REFERENSER.....</b>	<b>22</b>
7.1	TRYCKTA KÄLLOR .....	22
7.2	MUNTliga REFERENSER: .....	23
7.3	INTERNET:.....	23
7.4	KARTOR .....	24
7.5	PROGRAM FÖR BEHANDLING AV DATA:.....	24



## 1 Inledning

Av den energi som jorden tar emot från solen omvandlas cirka 0,7 % till vindenergi (Nationalencyklopedin, 2009). Vinden tar aldrig slut, vilket gör den till en perfekt energikälla. Till skillnad från många andra energikällor som används globalt idag släpper vindkraften inte heller ut några ämnen som bidrar till växthuseffekten, detta är viktigt i en tid då de antropogent skapade klimatförändringarna gör sig allt mer påmind.

Vinden har varit en viktig kraftkälla för människan i hundratals år, i allt från segling till malning av mjöl och vattenpumpning. Sedan slutet av 1900-talet tas dess energi främst tillvara genom vindkraftverk som omvandlar luftens rörelser till elektrisk energi. Hur väl vindkraften utvecklats i olika länder beror främst ländernas energipolitik. Sverige ligger exempelvis långt efter Danmark, där vindkraften 2007 stod för drygt 20 % av landets energiproduktion (Danish Wind Industry Association, 2009), men även Tyskland och Spanien är framstående inom vindkraft. Finland och Norge ligger däremot en bra bit efter Sverige.

Sveriges riksdag har satt upp målet att år 2015 ska 10 TWh av Sveriges energiproduktion komma från vindkraft. Energimyndigheten har föreslagit att målet ska ändras till 30 TWh till år 2020, varav 20 TWh då skulle vara landbaserad vindkraft och 10 TWh havsbaserad. I dagsläget produceras 1,4 TWh (2007) el av vindkraft, vilket motsvarar cirka 1 % av Sveriges totala nettoproduktion av elektricitet (Energimyndigheten, 2009). Se bilaga för produktionsstatistik.

Om man endast ser till energitillgången i vinden i Sverige så räcker den gott och väl till för att täcka hela landets energibehov. Det är dock inte nödvändigt att utnyttja all denna energi, eftersom 50 % av Sveriges elektricitet kommer från förnybar vattenkraft. Dessutom skulle en stor överkapacitet behövas som kompensation för de gånger då vindarna är svaga (Wizelius, 2008). Tidigare har exploateringen främst skett på slättland, där vindsituationen är relativt välkänd, samt till havs. I takt med att utbyggnaden av vindkraft ökar i Sverige har vindkraftsprojektörerna nu även börjat undersöka alternativa placeringar, till exempel i skogsmiljö. Hur vindkraft i skog kommer att fungera är ännu inte helt utrett, men undersökning och projektering pågår. Denna uppsats syftar därför till att göra en grundläggande studie av vindens karaktär över skogsmark, men även över slättland och till havs som hittills varit de dominerande vindkraftsmiljöerna.

Denna uppsats skrivs i samarbete med E.ON Vind Sverige AB, som har sitt huvudkontor i Malmö och är en del av E.ON Climate and Renewables i Düsseldorf, Tyskland. Moderbolaget E.ON AG har totalt 88 000 anställda i nitton olika länder (E.ON, 2008). På kontoret i Malmö har man arbetat med vindkraft sedan 1996, då de första vindkraftverken sattes upp i Landskrona. Vad som då var ett pilotprojekt på utvecklingsavdelningen har nu omvandlats till en ständigt växande mångmiljonindustri med en omsättning på 103 miljoner svenska kronor 2008 (E.ON, 2008) (Edholm 2009).

## **1.1 Avgränsning**

Detta är en grundläggande studie av hur vindsituationen i skog, på slättland och till havs kan skilja sig. Tyngden läggs på teorin kring landskapets påverkan och teorin undersöks sedan genom en enkel analys av vinddata från de tre olika landskapstyperna. Tre platser som anses lämpliga för att representera respektive landskapstyp är med i jämförelsen. De mätdata som använts i analysen kommer från en sammanhängande period under åren 2007 och 2008. Läsaren bör ha i åtanke att både teorin och de formler som följer i denna uppsats endast berör det atmosfäriska gränsskiktet där landskapet inverkar på vinden såväl direkt som indirekt.

## **2 Metod och data**

I denna uppsats presenteras de punkter som är viktigast att ta hänsyn till vid vindanalys för projektering av vindkraft (Andersson 2009). Det handlar främst om:

- Turbulens -allt för turbulent vind sliter på vindkraftverket,
- Vindskjvning - det vill säga hur vinden förändras med höjden över markytan,
- Förhärskande vindriktning -för att bestämma vindparkens layout,
- Vindfrekvensfördelning -för beräkning av produktion och för val av rätt typ av vindkraftverk,
- Extrema vindar -vid allt för kraftiga vindar riskerar vindkraftverket att haverera.

De olika faktorerna presenteras först teoretiskt innan de tillämpas på respektive mätstation och dessa jämförs.

### **2.1 Program för behandling av data**

Vid bearbetning av data har Microsoft Word, Microsoft Excel, ArcGIS och WindPRO använts. De båda Microsoft-programmen antas vara väl kända av läsaren.

ArcGIS är ett datorprogram för behandling av digitalt kartmaterial. Kartorna är uppdelade i skikt, och användaren kan själv välja vilka lager som ska visas beroende på vilket behov som finns.

WindPRO är ett så kallat *vindatlasprogram* och används mycket inom vindkraftsbranschen. Här lägger användaren in samtliga mätdata för den period som ska analyseras och får sedan ut grafer och diagram om vindriktningar, vindhastigheter m.m. I detta program kan även noggranna ljud- och skuggberäkningar göras, och sedan man valt vilken typ av vindkraftverk som passar bäst för platsen ifråga kan även produktionsberäkningar utföras.

### **2.2 Mätplatser**

Tre olika platser har valts ut för analys: en ute till havs, en på slättland och en i skogsmiljö. De tre mätpunkterna anses vara representativa för sina respektive platser och är samtliga representerade inom den svenska vindkraftsindustrin.

Uppsatsen syftar till att jämföra vindförhållandena i de tre olika landskapstyperna sett ur en vindkraftsprojektörs synvinkel. Resultatet förväntas bli att slättland som länge varit det dominerande vindkraftslandskapet är lämpligt, men att vindarna till havs kanske passar ännu bättre för vindkraft. Att bygga vindkraftsparker i skogslandskap är en relativt ny tanke som uppkommit delvis genom platsbrist på land. Men idén är också en följd av utvecklingen av större och kraftigare vindkraftverk vars navhöjd uppgår till tre-fyra gånger skogens höjd (Andersson, 2009), vilka antas passa bättre i skogsmiljö än de äldre vindkraftverken som är lägre. Det som verkligen satt fart på utvecklingen av vindkraftsetablering i skog är Energimyndighetens lansering av MIUU-vindkarteringen 2006. Denna kartering beskrivs närmare avsnitt 3.5.4. Fördelar med vindkraft i skogsmiljö är till exempel att vindkraftparkerna ofta kan byggas större än på slättland, eftersom det generellt finns färre närboende som riskerar att störas i skogsområden. Landskapsbilden påverkas också mindre då vindkraftverken placeras i skogsmiljö eftersom träden skymmer dem (Norlund, 2009).

Man kan tycka att mätdatan bör tas från platser som geografiskt ligger så nära varandra som möjligt. I denna uppsats fokuseras dock mest på hur den omgivande terrängen påverkar vinden, och det läggs därför ingen avgörande vikt vid mätmasternas geografiska placeringar. Mätningarna som används i denna analys är från en sammanhängande period under åren 2007 och 2008.

Av sekretesskäl kommer ingen av de tre mätmaster som presenteras nedan att nämnas vid namn, utan de benämns istället Ocean, Plain, och Woodland efter sina respektive placeringar.

### **2.2.1 Ocean**

Mätmast Ocean återfinns i havet utanför södra Sverige. Eftersom de havsområden som omger Sverige är relativt små, gäller dessa mätningar och de resultat som presenteras här också främst vindsituationen i de områdena och kanske inte all havsbaserad vindkraft. Här sker vindmätningar på tre olika höjder med hjälp av en koppanemometer (nedan anemometer) samt en vindflöjel och redovisas i medelvärde per minut. De mätningar som resultatet nedan är baserat på kommer från vindmätarna på 38 respektive 50 meters höjd.

### **2.2.2 Plain**

På grund av brist på tillgång av mätdata från slättland i Sverige används slättlandsdata från en mätmast i USA. Mätmast Plain står i de centrala delarna av norra USA, närmare bestämt i North Dakota, se Figur 1. Vinddatan består av en timmes medelvärden från höjderna 10, 30 respektive 40 meter.



Figur 1. Pilen på kartan indikerar Plains placering. (Karta från ArcGIS)

### 2.2.3 Woodland

Woodland ligger i ett skogsområde i sydvästra Sverige. Det är svårt, för att inte säga omöjligt, att hitta ett skogsområde i södra Sverige som ligger långt ifrån havet och där det dessutom blåser. Woodland ligger i ett kuperat skogbeklätt område, se Figur 2. Masten står på en höjd och omges av en blandning av kalhyggen och cirka 20 meter hög granskog. Eftersom granarna behåller sina barr året om antas skogens påverkan på vinden inte ändras efter säsong utan vara konstant.

I Woodland har vindmätningar pågått med anemometer sedan år 2007 på 35 och 50 meters höjd. Vinddatan redovisas som ett medelvärde för varje 10-minuters period dygnet runt. Dessa mätningar kompletteras med vindmätningar med SODAR, en typ av mätutrustning som mäter vindförhållandena på upp till 150 meters höjd med hjälp av ljudpulser (Clive *et al*, 2007).





Figur 2. Den röda stjärnan indikerar mätmastens placering.  
(© Lantmäteriet Gävle 2009. Medgivande I 2008/ 1951) Bearbetad av Daniel Lindholm

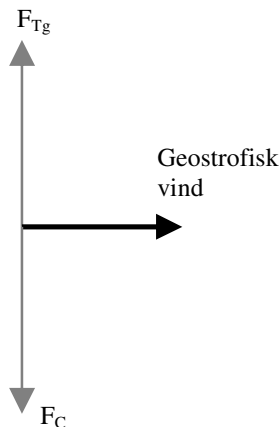
### 3 Vindteori

#### 3.1 Vindens uppkomst

I södra Sverige är det främst en sydvästlig vind som dominerar. Den stammar ur den geostrofiska vinden som är ett resultat av det ständiga lågtryck som råder vid polarfronten kring Grönland och Island, i kombination med det subtropiska högtryck som återfinns över nordmellersta Atlanten. En strömmning sker alltså i grunden från söder och norrut, men denna vind böjs av mot höger av Corioliskraften, en kraft som uppkommer till följd av jordens rotation, se Figur 3 (Ahrens 2003).

I USA, där en utav mätmasterna står, är den dominanta vindriktningen under vinterhalvåret istället nordlig. Detta förklaras av ett kraftigt termalt högtryck över Kanada vilket leder till att kalla vindar sveper söderut mot USA.

Man räknar med en geostrofisk vind ner till cirka en kilometer över jordens yta. Men det är vinden i den nedersta delen av atmosfären som är mest intressant i vindkraftsammanhang. Detta nedre lager kallas för friktionslagret eller det atmosfäriska gränsskiktet (eng. *Atmospheric boundary layer*), och där gör sig markytan påmind genom lokala tryckskillnader och sin friktion. Gränsskiktet sträcker sig från marken upp till omkring 100 meter under klara, vindstilla nätter och till mer än två kilometer under varma sommardagar (Petersen *et al* 1998).



Figur 3. Den geostrofiska vinden påverkas främst av två faktorer. Grunden till dess uppkomst är tryckgradient-kraften ( $F_{Tg}$ ), som gör att det blåser ut från högtrycksområden mot områden med lägre tryck. Men vindarna blåser inte rakt emellan dessa områden, utan istället böjs de av mot höger (på norra halvklotet) på grund av Corioliskraften ( $F_C$ ) en kraft som uppkommer genom av jordens rotation. (Efter Barring et al 2008)

### 3.2 Lokala tryckskillnader

Lokala tryckskillnader uppstår främst till följd av att markytan värms upp olika mycket på olika platser. Där markytan har ett lågt albedo värms den upp och därmed också luften ovanför den vilket leder till att luften stiger och ett lågtryck skapas. Ett av de vanligaste exemplen på vindar skapade genom lokala tryckskillnader är kanske sjöbrisen. Sjöbrisen uppkommer längs med kusten under varma dagar. Luften över land värms upp mer än den över havet, dels på grund av markytans albedo, men också för att vattnet i havet har en avkylande effekt. På eftermiddagen har luften över land blivit så varm att den börjar stiga vilket skapar ett lokalt lågtryck. Detta lågtryck kompenseras med att ny, svalare luft blåser in från havet.

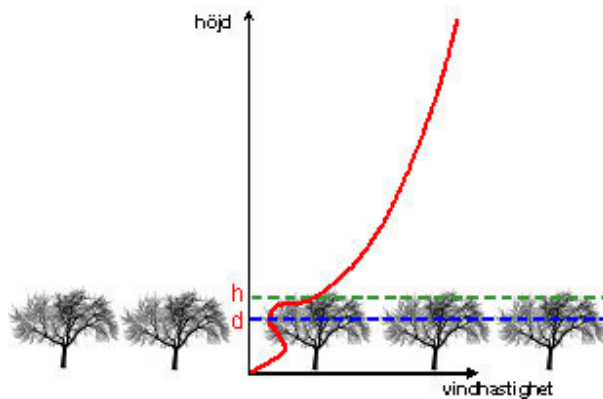
### 3.3 Topografins inverkan

Topografien påverkar vinden genom att avleda den i olika riktningar, men också genom att bromsa den och göra den mer turbulent. Anledningen till att vindkraftverk ofta placeras på höjder beror inte bara på att vinden där generellt är jämnare och dess hastighet högre. En annan viktig faktor är *backeffekten*, som uppstår då vinden stöter på en backe med max 40 graders lutning. Stigningen höjer vindens hastighet och därmed också dess energiinnehåll. På liknande sätt accelererar vinden längs sidorna på en isolerad höjd. På höjdens läsida sjunker vindhastigheten och vinden blir ofta turbulent. (Wizelius, 2008)

Vanligt i kuperad terräng med berg/kullar och dalar är att dalarna blir likt vindtunnlar med mycket höga vindhastigheter trots markytans låga nivå. Sådant är till exempel fallet vid Suorvadammen i svenska fjällen (Norrbottens län), där ett av Sveriges bäst producerande vindkraftverk står (Wizelius, 2008).

### 3.4 Markytans råhet

Markytans råhet beror på markanvändningen och klassas från 0 till 4, där 0 motsvarar öppet vatten och 4 hög skog och större städer. Ju högre råhet, desto högre blir friktionen mellan vinden och markytan (Wizelius, 2008). Då vinden blåser över ett växtbestånd bromsas den och dess normala logaritmiska profil förskjuts uppåt, detta kallas nollplansförskjutning, se Figur 4. Hur mycket markytan "höjs" beror på växtligheten. I granskog sätts nollplansförskjutningen normalt till 75 % av trädens höjd, medan nollplansförskjutningen över ett potatisfält är lägre, cirka 60 % av plantornas höjd, eftersom de mjuka potatisplantorna lätt böjer sig för vinden (Mattsson 1979).



Figur 4. Nollplansförskjutningen (i bilden markerat med  $d$ ) uppskattas normalt till 75 % av skogens höjd ( $h$ ). (Hans Bergström, Uppsala Universitet)

### 3.5 Mätbara parametrar:

Vid val av vindkraftverk finns det flera olika faktorer att ta hänsyn till. Verken klassas från I-III efter vilka vindhastigheter de är bäst anpassade för, men också från A-C efter hur stark turbulensintensitet de kan stå emot.  $V_{ref}$  är den uppskattade extremvinden med 50 års intervall.  $V_{avg}$  är medelvinden på platsen. De angivna turbulensintensiteterna gäller på navhöjd då det blåser 15 m/s. Nedan beskrivs samtliga av dessa parametrar mer ingående.

Tabell 1. Faktorer att ta hänsyn till vid val av vindkraftverk enligt IEC standard.

Wind turbine class	I	II	III	S
$V_{avg}$ (m/s)	10	8,5	7,5	Values specified by the designer
$V_{ref}$ (m/s)	50	42,5	37,5	
A $I_{ref}$		0,16		
B $I_{ref}$		0,14		
C $I_{ref}$		0,12		

Livstiden för vindkraftverk producerade enligt Tabell 1 nedan ska enligt IEC standarden vara minst 20 år. Av de olika modellerna i tabellen producerar 1 C bäst, denna typ av vindkraftverk placeras i mycket blåsiga miljöer med låg turbulens. Att ha ett verk som tål högre turbulens sker på bekostnad av dess produktion. (IEC)

### 3.5.1 Turbulensintensitet

Då vindmätningar pågår på en plats är det viktigt att undersöka vindens turbulens. Allt för turbulenta vindar ger ojämn drift och sliter mycket på kraftverken, vilket reducerar deras livslängd.

Turbulens skulle kunna beskrivas som motsatsen till laminär vind, vilken är en jämn vind i horisontalplanet som passar mycket bra för vindkraft. Turbulens innebär att luften virvlar i olika riktningar kring den huvudsakliga vindriktningen. All vind är i grunden laminär men genom yttre påverkan uppkommer turbulens. Det finns två olika typer av turbulens: dynamisk och termisk. Dynamisk turbulens uppkommer till följd av markytans friktion. Hur kraftig denna turbulens är beror således mycket på det omgivande landskapets komplexitet (Bärring *et al* 2008). Ju högre komplexitet och friktion, desto högre turbulens. Generellt kan man säga att turbulensintensiteten över hav är runt 8 %, över flackt slättland 13 % och i komplex terräng såsom till exempel skog, 20 %, men det skiljer sig naturligtvis från plats till plats. (Petersen *et al* 1998) Termisk turbulens uppstår då varm luft stiger uppåt från markytan och därmed skapar luft rörelser i vertikalled (Bärring *et al* 2008).

Det finns flera olika sätt att räkna ut om ett luftflöde är laminärt eller turbulent samt vindens turbulensintensitet. Vanligt inom vindforskningen är till exempel användningen av *Reynolds tal*.

$$Re = \frac{u \cdot l}{\nu} \quad (1)$$

Re är Reynolds tal,  $u$  är vindhastigheten (m/s),  $l$  är sträckan luftflödet mäts över och  $\nu$  är luftens kinematiska viskositet (1,51 m<sup>2</sup>/s vid 20 °C). Beroende på hur högt Reynolds tal blir, är luftflödet laminärt eller turbulent. Det kritiska Reynoldstalet ( $Re_{krit}$ , då flödet övergår från laminärt till turbulent) är inte fast utan varierar med sträcka och vindhastighet. Ju längre sträcka, desto snabbare måste det blåsa för att vara turbulent. (Bärring *et al*, 2008) För att använda denna metod räcker det inte med anemometermätningar, istället måste vindförhållandena mätas över en vertikal sträcka. Detta görs vanligtvis med en SODAR eller LIDAR. SODAR:n mäter vindens hastighet upp till 150 meter över marknivån med hjälp av ljudpulser. Vid mycket kraftiga vindar är risken för bortfall av data mycket stor och då passar LIDAR bättre. LIDAR-mätning fungerar på ett snarlikt sätt, fast använder ljuspulser istället för ljud, och mätfrekvensen blir därmed högre (Clive *et al* 2007).

Vid turbulensberäkningar för vindkraft mäts sällan turbulensintensiteten (TI) direkt utan räknas ut med hjälp av medelvinden  $v$  och dess standardavvikelse  $\sigma$  enligt rekommendationer från IEC:

$$TI = \frac{\sigma}{v} \quad (2)$$

(IEC)

Vindkraftverken skapar även turbulens genom sina rörelser genom luften, så kallad vak-genererad turbulens eller endast vindvak, vilken kan noteras upp till 10 rotordiameter bakom verket (Wizelius, 2008). Detta är viktigt att tänka på då vindkraftsparken planeras, så att verken inte placeras för nära varandra och på så sätt stör varandras vind.

### 3.5.2 Vindskjuvning (eng. Wind Shear)

För slättprojekt är kunskapen om vindförhållandena relativt god och mätningar med en 50 meter hög mätmast anses vara tillräckligt för att få en uppfattning om vindförhållandena på 80 meters navhöjd. När det gällande skogsprojekt används en 100 meter hög mätmast där vindarna mäts på minst tre olika höjder (Andersson, 2009). Om mätningar inte sker på tänkt navhöjd räknas vindhastigheterna på denna ut med hjälp av så kallade Wind Shear Coefficients (WSC).

WSC skulle kunna definieras som förändringen i vindens hastighet och riktning i vertikalled och kan räknas ut med följande ekvation:

$$\alpha = \frac{\ln(v_2) - \ln(v_1)}{\ln(z_2) - \ln(z_1)} \quad (3 a)$$

vilken är en version av den så kallade *power law*:

$$\frac{v_2}{v_1} = \left( \frac{z_2}{z_1} \right)^\alpha \quad (3 b)$$

(Manwell *et al* 2003)

$v_1$  är vindhastigheten på utgångshöjden,  $v_2$  vindhastigheten på den nya höjden,  $z_1$  originalhöjden och  $z_2$  den nya höjden.  $\alpha$  är vindskjuvningsexponenten (WSC).

För att få hastigheten på en viss höjd, vilket ofta är det som efterfrågas, kan formeln skrivas om:

$$v_2 = v_1 \cdot \left( \frac{z_2}{z_1} \right)^\alpha \quad (3 c)$$

Inom vindkraftsbranschen är det denna ekvation som främst är vedertagen eftersom den rekommenderas av IEC. Det dock finns även andra metoder för att få fram vindprofilen, mest känd är den logaritmiska vindprofilen:

$$U(z) = \frac{U^*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (4)$$

$U(z)$  är hastigheten på höjden  $z$  som är den höjden man undersöker.  $z_0$  är råhetslängden,  $U^*$  är friktionshastigheten som delas med  $k$ , von Kármáns konstant ( $\sim 0,4$ ) (Mattsson, 1979)

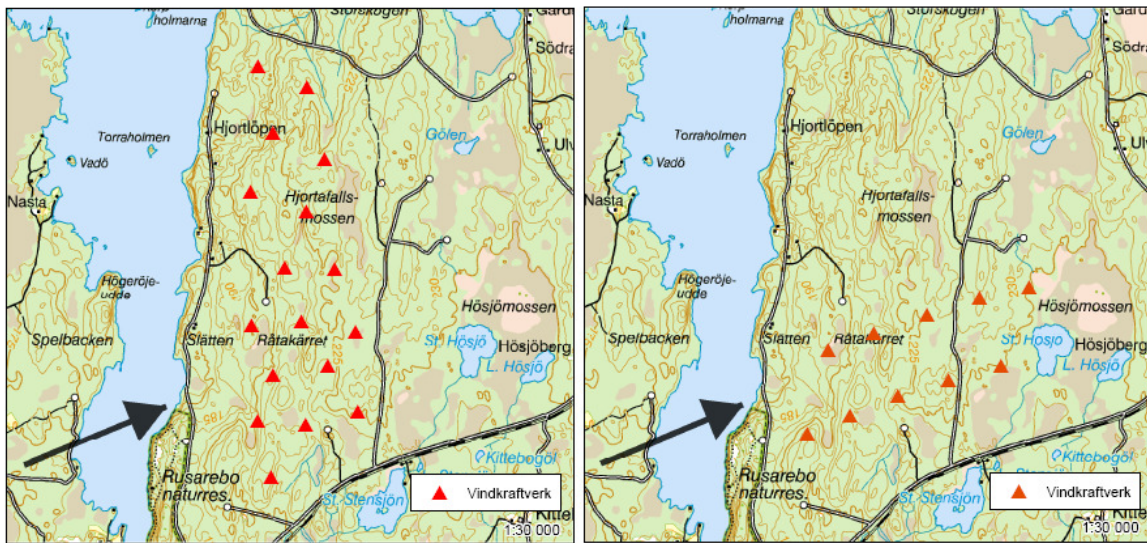
Flera olika faktorer påverkar WSC: markytans råhet och tid på dagen –då markytan värms upp under dagtid blir luften mer turbulent och vindprofilen mer konstant med höjden, men även säsong och atmosfärens stabilitet. Det som kanske har mest påverkan och som det talas mest om är det omgivande landskapets råhet. WSC är som lägst när det är få eller inga objekt som stör vindens väg och varierar mellan 0,00001 (is) och drygt 0,4 (skogslandskap) (Manwell *et al* 2003). Vid analys av det omgivande landskapet i ett vindatlasprogram som till exempel WindPRO delas marken in i olika råhetsklasser från 0 till 4 beroende på hur stora variationer det är i markytans höjd till följd av olika markanvändning (Wizelius, 2008).

Tiden på dygnet påverkar som sagt också vindskjuvningen. Under natten när temperaturen sjunker minskar turbulensen och vindskjuvningen tenderar att bli högre. Under dagen är vindprofilen mer konstant, då turbulensen är mer påtaglig på grund av en uppvärmd markyta (Petersen *et al* 1998).

Vindklimatet, och därmed också vindskjuvningen, på en plats varierar med årstiderna. Generellt sett är det blåsigare under vinterhalvåret. Då är vindskjuvningen också ofta lägre eftersom växtligheten är begränsad under vintern, vilket minskar markens råhet (Petersen *et al* 1998; Rehman och Al-Abbadi, 2008).

### 3.5.3 Vindriktning

Vindens huvudsakliga riktning är viktig att ha kunskap om då vindparkens layout planeras. Målet är att så många verk som möjligt ska stå mot vinden, så att säga på bred front, istället för på rad efter varandra i vindens riktning (Andersson, 2009).



*Figur 5. Den dominerande vindriktningen spelar en nyckelroll då vindparkens layout planeras. Bilden till vänster visar ett exempel på lämplig parklayout med tanke på vindriktningen (den stora svarta pilen). Bilden till höger visar en mindre lämplig placering av verken; i vindens riktning. (© Lantmäteriet Gävle 2009. Medgivande I 2008/ 1951). Bearbetad av författaren.*

Åt vilket håll vinden blåser är ofta välkänt på slättland och över havet, där få hinder påverkar den. I skogen är vindriktningarna ofta mer varierande och komplexa på grund av markens råhet.

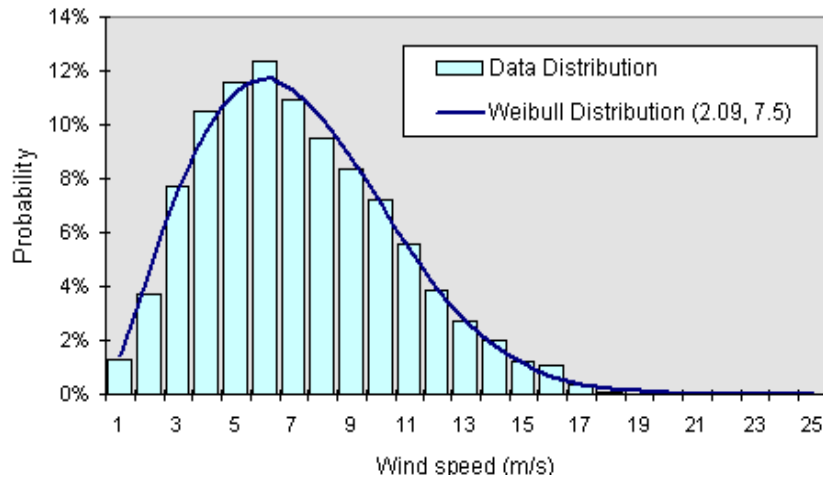
Uppmätta vindriktningar redovisas med fördel genom en vindros. Vindrosens 360° är normalt uppdelade i 12 (varierar mellan 8 och 16) olika sektorer om 30° var. Mer givande än en enkel vindros som redovisar förhärskande vindriktning är en så kallad energiros (Andersson 2009). Denna är uppbyggd på samma sätt som vindrosen, fast redovisar istället hur den inkommande vindenergin är distribuerad.

### 3.5.4 Vindens frekvensfördelning

Att känna till vindens frekvensfördelning, det vill säga hur mycket det blåser och hur ofta, är viktigt för att kunna räkna ut vindens energiinnehåll. Frekvensfördelningen redovisas i ett diagram, som sedan kan komma att ligga till grund för beslut om vilken typ av vindkraftverk som ska sättas upp på platsen. Effekten är proportionell mot vindhastigheterna i kubik ( $v_1^3 + v_2^3 + v_3^3 + \dots + v_n^3$ ), vilket skiljer sig från summan av vindhastigheterna i kubik ( $(v_1 + v_2 + v_3 + \dots + v_n)^3$ ). Det gör därför skillnad i produktionsberäkningen om medelvinden är 8 m/s men det blåser 6 m/s halva tiden och 10 m/s resten, jämfört med om vinden skulle blåsa konstant 8 m/s hela tiden (Wizelius 2008). Tillgången på vindenergi kan variera med  $\pm 20\%$  från år till år (Nationalencyklopedin, 2009).

Vindfrekvensfördelningen skiljer sig mellan olika platser, men har visat sig stämma bra överens med en sannolikhetsfördelning som kallas Weibull och som definieras av två

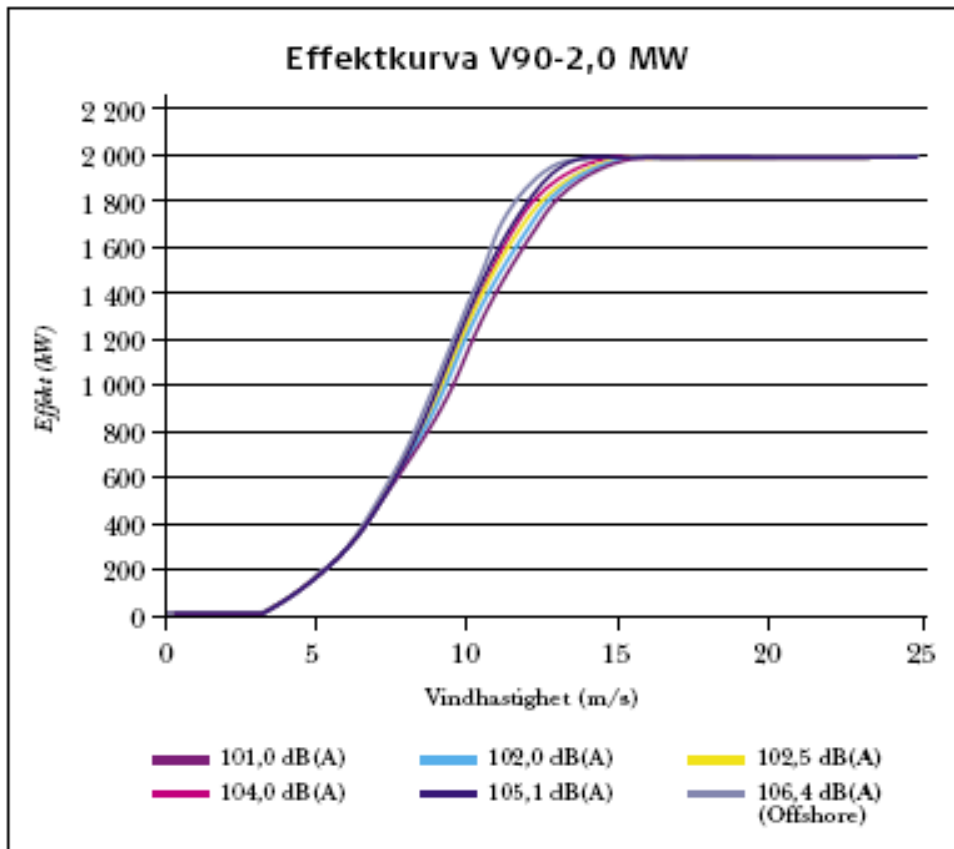
parametrar: skalfaktorn  $c$  som representerar vindens hastighet och formparametern  $A$  som reglerar grafens form och "toppighet". Ett mindre värde på  $A$  resulterar i större spridning kring medelvärdet (Stull, 1999). Ibland införs även medelvindhastigheten ( $\bar{U}$ ) som en tredje parameter (Wizelius, 2008; WindPRO). För en som är van vid vindanalys räcker en blick på dessa tre parametrar för att få en god uppfattning om vindsituationen på en plats. Weibullfördelningen är en sannolikhetsfördelning som skapas ur ett vindfördelningshistogram med uppmätta vindfrekvenser och ligger ofta till grund för vidare beräkning och analys av vindförhållandena, se Figur 6.



Figur 6. Exempel på hur vindens frekvensfördelning kan se ut samt en Weibullgraf anpassad till denna. (The Center For Renewable Energy Sources).

Weibullfördelningen jämförs ofta med olika typer av vindkraftverks så kallade *effektkurvor* (hur mycket verket producerar vid olika vindhastigheter) för att få en uppfattning om hur stor del av tiden som vindkraftverket kan gå på full effekt samt om dess förväntade produktion (Åslund, 2009). I Figur 7 presenteras ett exempel på hur en effektkurva kan se ut.





Figur 7: Effektkurva för Vestas V90. I figuren framgår också hur produktionen påverkas av effektsänkning för att hålla olika ljudkrav (Vestas, 2008)

## MIUU

Vid vindkraftsprojektering används ofta så kallade MIUU (Meteorological Institute of Uppsala University) – punkter som utvecklats vid Uppsala Universitet (Energimyndigheten, 2009) för att få en uppfattning om vindsituationen på en plats. MIUU-punkterna anger medelvindhastigheten på 49, 72 och 103 meters höjd över nollplansförskjutningen, vilken dock inte alltid är samma sak som markytan, se avsnitt 3.4. I många fall visas därför medelvindhastigheten på en betydligt högre höjd. I MIUU-modellen har nollplansförskjutningen satts till 75 % i skogsmiljö, dels på grund av modellens storskalighet, men också på grund av växtlighetens karaktär. Stora träd i en skog böjer sig inte så lätt för vinden (Bergström, 2007).

MIUU-punkternas värde är baserat på mätdata från samtliga tillgängliga mätmaster i Sverige och med hänsyn till den omgivande markytans råhet. Värdena stämmer inte lika bra överens i hela Sverige. Exempelvis är värdena mer korrekta i södra och sydvästra Sverige eftersom vindkraften är mer utbredd i dessa områden och fler vindmätningar därmed har gjorts här än till exempel i Norrland. Detta i kombination med att upplösningen på vindkarteringen är 1 km<sup>2</sup> gör att MIUU-punkterna endast bör användas

som en första vägledning vid vindkraftsprojektering. För säkrare värden bör vindmätningar göras på plats. (Energimyndigheten, 2009)

### 3.5.5 Extrema vindar

Om ett vindkraftverk utsatt för en allt för stark vind riskerar det att haverera. Detta kan få dramatiska konsekvenser, särskilt då de flesta vindkraftverk som byggs idag är över 100 meter höga. Det är därför av största vikt att känna till hur stor risken för extremvindar är på den plats där vindkraftsparken planeras. Av dagens serietillverkade vindkraftverk klarar de flesta vindar t.o.m. 60 m/s i cirka två sekunder. (Wizelius, 2008) Dessa hastigheter är inte särskilt vanligt förekommande i Sverige, men vid storm händer det att vindbyarna når dessa styrkor. Ett alternativ skulle naturligtvis kunna vara att skaffa ett kraftigare vindkraftverk som klarar högre vindhastigheter, men eftersom normalt närmare 100 % av vindarna är under 25 m/s lämpar det sig bättre med vindkraftverk som kan utnyttja dessa lägre vindhastigheter bättre än ett kraftigare verk skulle kunna. Man kan med följande ekvation räkna ut sannolikheten ( $Pr$ ) för en viss extremvindhastighet:

$$Pr = 1 - \left( 1 - e^{-\left(\frac{U_n}{A}\right)^c} \right)^N \quad (5)$$

$U_n$  är den eftersökta vindhastigheten,  $A$  formparametern och  $c$  skalparametern.  $N$  är antalet stickprov, här antalet uppmätta data (Bergström, 1992).

För att göra en beräkning av extrema vindar i WindPRO krävs minst 10 års data. Tyvärr är det väldigt sällan det finns tillgång till så mycket data från just den plats som ska undersökas.

### 3.6 Normalårskorrigerering av mätdata

Normalårskorrigerering innebär att de mätdata som man har från en viss plats jämförs med mätdata från en närbelägen mätmast som har varit i bruk längre. Den nya mätdata justeras så att den motsvarar ett normalår för området. Normalårskorrigereringar görs med fördel i dataprogrammet WindPRO, men kräver vinddata från flera år för att ge en korrekt bild av vindens karaktär på en plats.

## 4 Resultat

### 4.1 Normalårskorrigerig

Eftersom det inte fanns tillräckligt mycket mätdata för att göra en normalårskorrigerig såsom den beskrevs i avsnitt 3.6, jämfördes datan istället med närliggande MIUU-punkter, vinddata från Danmark, samt undersöktes statistiskt för att få en uppfattning om ifall den var representativ.

Räknar man ut vindhastigheten på 72 meters höjd med hjälp av WSC och jämför svaret med medelvärdet av de fyra geografiskt närmaste MIUU-punkten är skillnaden knappt 0,1 m/s i Woodland. Motsvarande siffra för Ocean är 0,07 m/s. Båda visar alltså god överensstämmelse med vindkarteringen.

Även statistiska test har gjorts för Woodland och Ocean för att undersöka om det finns någon signifikant skillnad mellan de mätdata som används i analysen nedan och den genomsnittliga vinden 1961-1990 vilken mätts av SMHI på 10 meters höjd. (Alexandersson, 2006) Ett tvåsidigt parat t-test visar att det inte finns någon signifikant skillnad mellan mätperioderna.

Risø National Laboratory är en del av Danmarks Tekniske Universitet och världsledande inom vindkraftsforskning. På deras hemsida presenteras vindens energiinnehåll över Danmark fem år tillbaka i tiden. Energiinnehållet anges i procent av ett medelår, vilket i sin tur är ett medelvärde för en 30 års period, se Tabell 2. Dessa värden kan även ge oss en uppfattning om hur vindsituationen skiftat generellt i södra Sverige under samma period. Längst till höger i Tabell 2 visas genomsnittet för året och varken 2007 eller 2008 ligger långt ifrån medelvärdet.

*Tabell 2: Vindens energiinnehåll över Danmark månadsvis under de senaste fem åren. Tabellen kan användas för att få en uppfattning av vindklimatet över södra Sverige under samma tid. (EMD, 2009)*

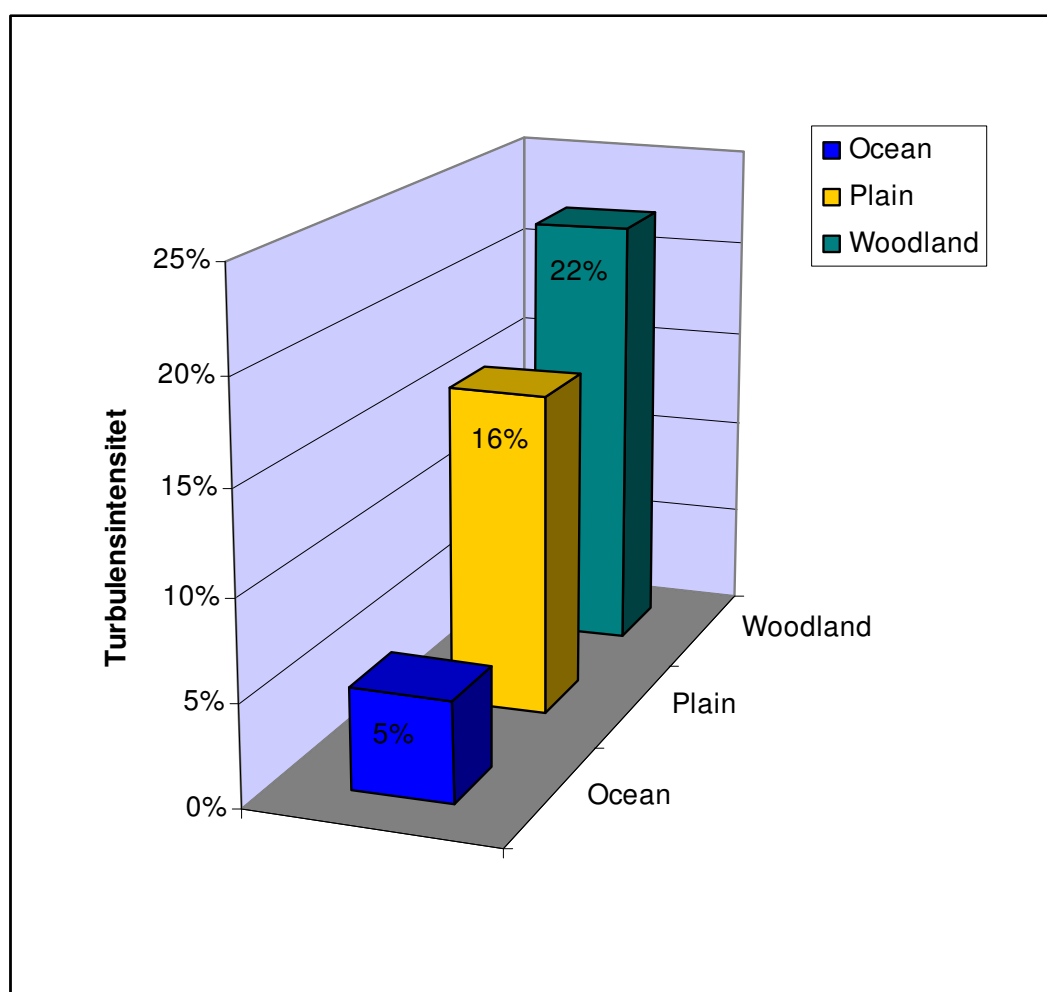
### Vindens energiindhold på landsplan

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Maj.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dec.	Gns.
2004	92	93	117	81	99	99	65	63	113	116	106	129	97,8
2005	193	112	97	84	72	76	53	74	65	71	100	121	93,2
2006	81	62	86	85	100	54	32	43	83	84	146	168	85,2
2007	224	117	129	103	72	51	96	79	126	56	122	104	106,5
2008	192	159	140	49	40	95	60	82	61	120	133	72	100,2
2009	104												104,0

Även för Plain har ett tvåsidigt parat t-test gjorts med jämförelsevärden tagna från en mätmast i närheten. Även dessa värden visade sig representativa och skiljde sig inte signifikant från medelvärdena tagna från åren 1930-1996.

## 4.2 Turbulensintensitet

För att redovisa turbulensintensiteten har tre medelvärden från mätperioden räknats ut som presenteras i Figur 8. Mätvärdena uppgår till 5, 16 respektive 22 % för de olika landskapstyperna.

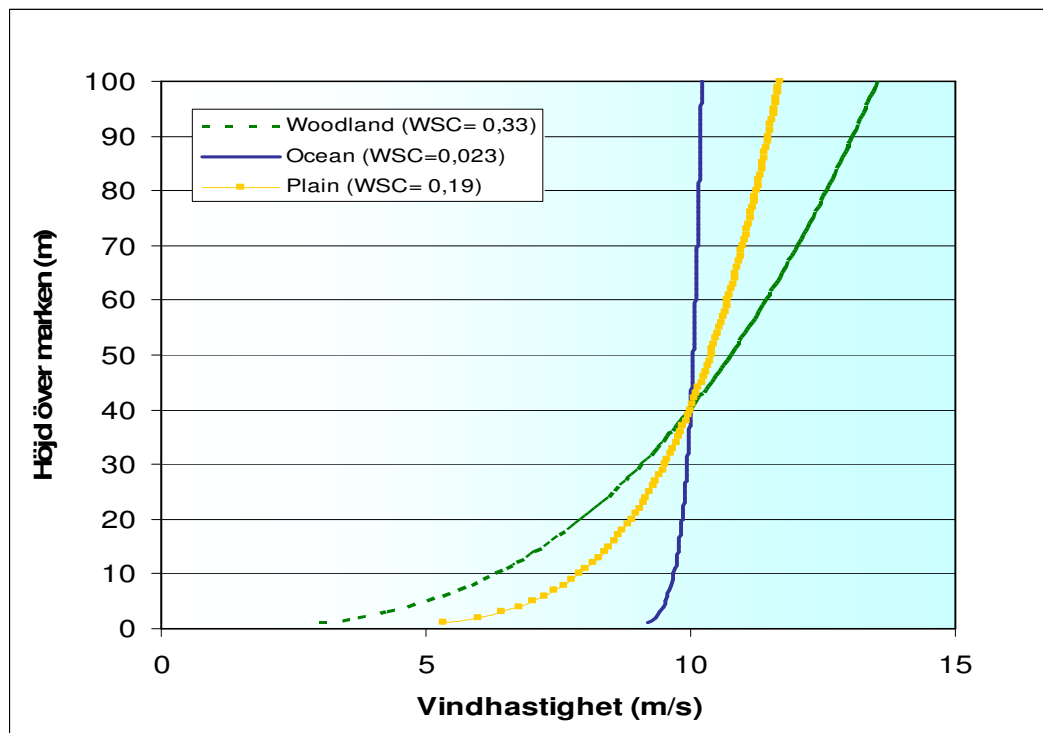


Figur 8. Den genomsnittliga turbulensintensiteten uppgick under mätperioden till 5 % för Ocean, 16 % för Plain och 22 % för Woodland.

### 4.3 Vindskjuvning

Hur vinden förändras med höjden beror på landskapets karaktär. Desto mer kuperat det är desto mer "störs vinden" vid marknivå, och vindskjuvningskoefficienten (WSC) blir därmed större. För att tydligt få fram skillnaderna i vindprofil mellan de tre landskapstyperna har hastigheten på 40 m höjd satts till 10 m/s i Figur 9.

Vindhastigheterna på övriga höjder har räknats ut med hjälp av WSC, se teori i avsnitt 3.5.2 för formel. I Figur 9 presenteras endast en medelvindskjuvning för hela mätperioden, normalt skiftar den med tid på dygnet och säsongens variationer.

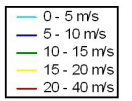
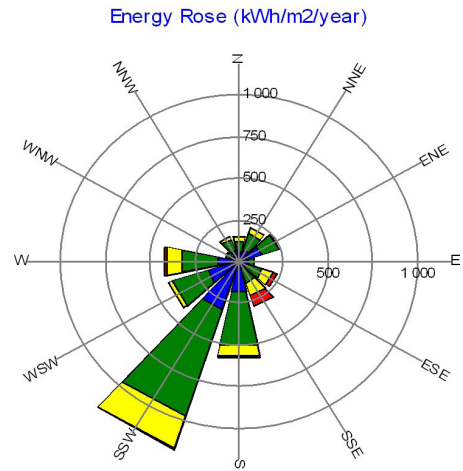
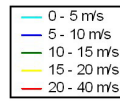
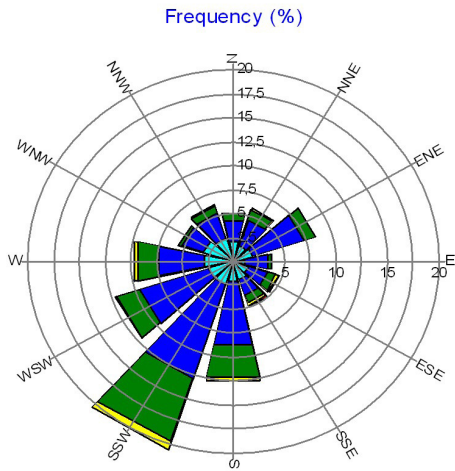


Figur 9. Vindskjuvning i Ocean, Plain och Woodland. För att tydligt få fram skillnaderna i vindprofil mellan de tre landskapstyperna har vindhastigheten på 40 meters höjd satts till 10 m/s och övriga värden räknats ut med hjälp av WSC.

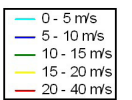
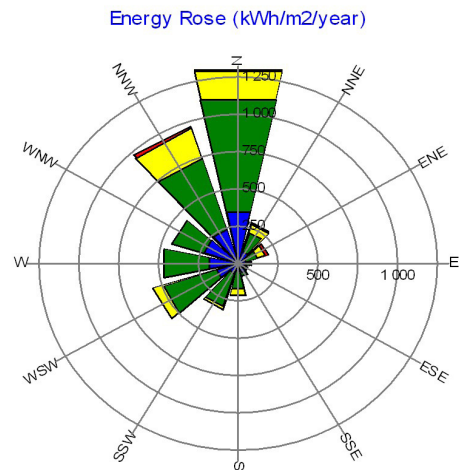
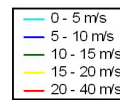
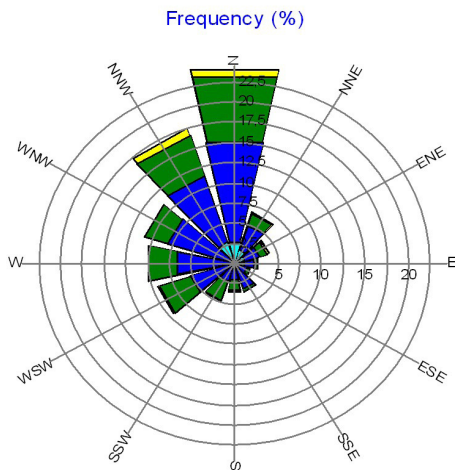
### 4.4 Vindriktning

Vindrosorna i Figur 10 visar förhärskande vindriktning (t. v.) samt hur den inkommande vindenergin är distribuerad mellan väderstrecken (t. h.). Den förhärskande vindriktningen i Woodland och Ocean kommer från sydväst. I Plain kommer vinden främst från nord/nordväst. De bägge rosorna påminner mycket om varandra, men det är den så kallade *energirosen* (nedan *Energy Rose*) som spelar mest roll vid planeringen av vindkraftsparkens layout. Tittar man noga på energirosorna ser man skalan för hur många kWh/ m<sup>2</sup>/år vinden levererar från just den vindriktningen. Mest energi innehåller vinden över Plain och Ocean, drygt 1000 kWh/m<sup>2</sup>/år. Över Woodland ligger vindens energiinnehåll istället strax över 250 kWh/m<sup>2</sup>/år. De olika färgerna på sektorerna visar vindhastigheternas fördelning.

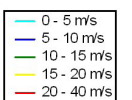
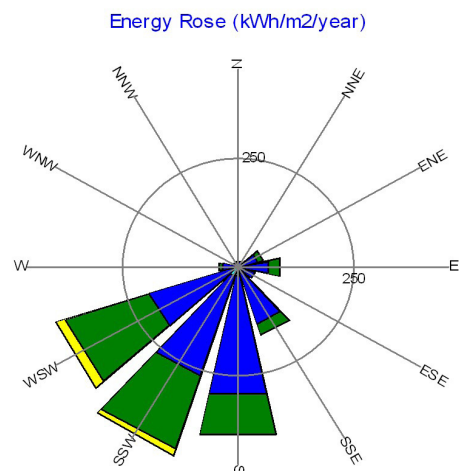
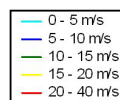
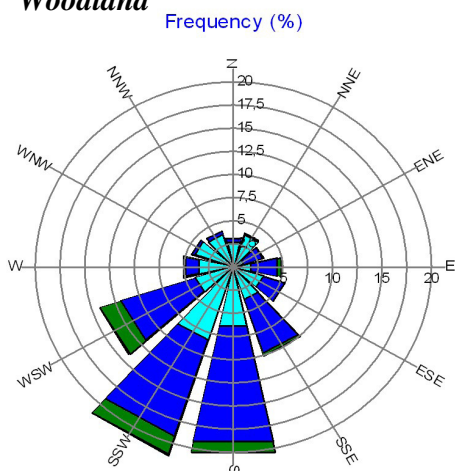
**Ocean**



**Plain**



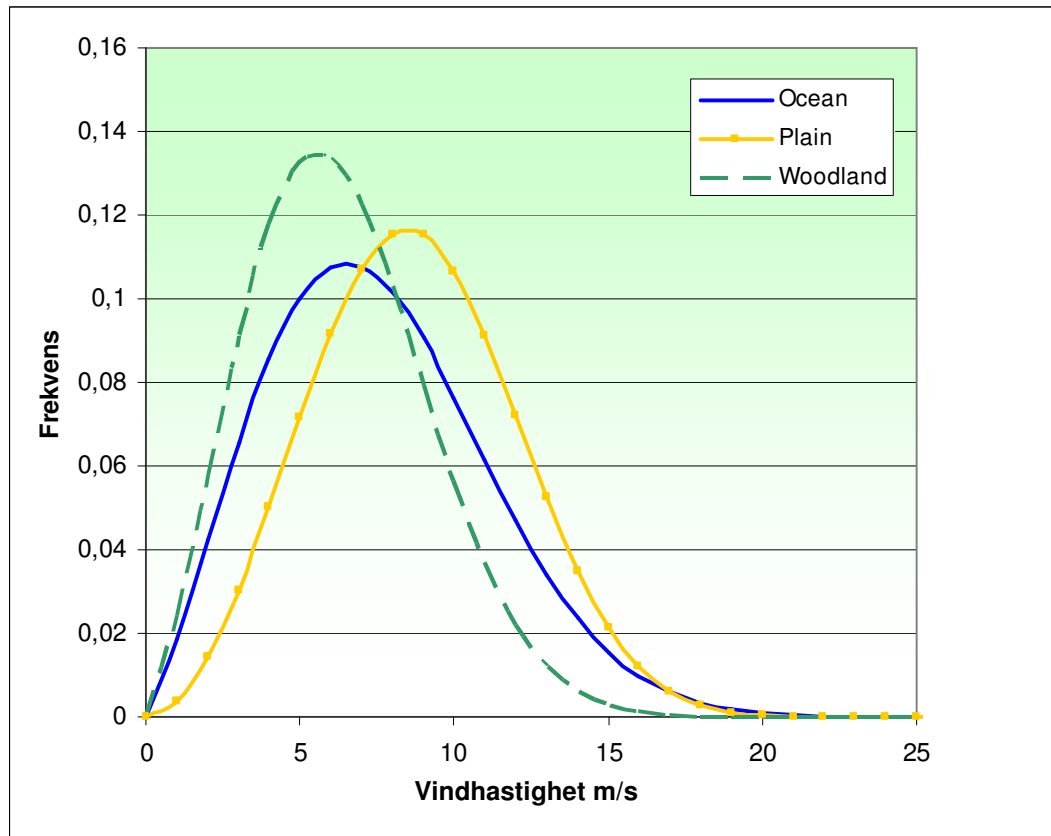
**Woodland**



Figur 10. Vind- och energirosor

#### 4.5 Frekvensfördelning

Vindens frekvensfördelning redovisas i Figur 11 med en Weibullgraf för varje mätplats. Mätmasterna är inte identiska. Weibullfördelningarna nedan gäller dock så närliggande mätpunkter som möjligt: 38 m för Ocean, 40 m för Plain och 35 m för Woodland.



Figur11: Ocean:  $A=8,5$   $k=2,2$  Mean wind: 7,6 m/s  
Plain:  $A=9,8$   $k=2,9$  Mean wind: 8,7 m/s  
Woodland:  $A=7,1$   $k=2,3$  Mean wind: 6,28 m/s

#### 4.6 Extrema vindar

För att kunna förutsäga risken för extrema vindar rekommenderas åtminstone 10 års mätdata. Då detta inte finns att tillgå har istället ekvation (5) använts.

Den extrema vinden sattes till 50 m/s som är den högsta specificerade extrema vinden som presenteras i Tabell 1. Resultatet är svårigen jämförbart eftersom mätdatan från samtliga master har olika intervall. Svaren blev dock enligt följande:

- **Ocean:** Sannolikhet för en 1 min medelvind på 50 m/s: 24 %
- **Plain:** Sannolikhet för en 1 h medelvind på 50 m/s: 0 %
- **Woodland:** Sannolikhet för en 10 min medelvind på 50 m/s: 0,098 %

Under den mätperiod som undersökts i denna uppsats når vindhastigheterna på mätplats Ocean maximalt upp till dryga 58 m/s, medan den högsta uppmätta vindhastigheten i Woodland är knappa 19 m/s och i Plain 24 m/s.

## 5 Diskussion

Någon menar kanske att det faktum att en av mätmasterna ligger så pass avlägset från de andra minskar resultatets trovärdighet. De analyser som har gjorts i denna uppsats gäller dock vindklimatet i det så kallade atmosfäriska gränsskiktet, och där är det främst landskapet som påverkar vinden karaktär. Trots Plains avlägsna placering ser resultatet från mätningarna på denna plats i stort sett ut som förväntat. Vissa parametrar avviker dock lite från det förväntade resultatet. Det gäller främst vindriktningen, vilken vid de svenska mätmasterna är från sydväst, medan den förhärskande vindriktningen för mätmasten Plain främst är från norr. Anledningen till den dominerande nordliga vinden i USA beror på att större delen av mätdatan i analysen kommer från vinterhalvåret, då vindarna i området främst påverkas av ett kraftigt högtryck över Kanada. Att vinden då främst är nordlig bekräftas då av en jämförelse med andra närliggande mätstationer i North Dakota under mätperioden 1930-1996 (National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 1998).

Att turbulensen över slättland skulle vara så pass hög (16 %) var oväntat, särskilt med tanke på att större delen av mätdatan kommer från vinterhalvåret då växtlighetens inverkan på vinden är mer begränsad, samt att området då tidvis kan vara snötäckt vilket minskar markytans råhet avsevärt. Samtliga turbulensstal kan tyckas höga då man jämför med de tal som anges i IEC-tabellen (Tabell 1), men då får man inte glömma att tabelltal avser navhöjd och de turbulensstal som presenteras här i resultatet gäller omkring 35-40 m, alltså betydligt lägre än navhöjden på de flesta vindkraftverk som byggs idag. Normal turbulensintensitet för de olika landskapstyperna är 8% till havs, 13 % över slättlandskap samt 22 % i skogsmiljö (Petersen *et al*, 1998). Dessa värden skiljer sig inte alltför mycket från de turbulensintensiteter som presenterades här i resultatet: 5 % till havs, 16 % över slättlandskapet samt 22 % i skogsmiljö. Över havet var turbulensen alltså något lägre, medan den över slättland var något högre. Ett högre turbulensvärde förklaras enligt Petersen *et al* av en stor andel svaga vindar (författarens undersökningar visar att turbulensintensiteten kan uppgå till drygt 50 % vid 2 m/s) och till följd av detta är medelvärden för turbulensintensitet omkring 25 % inte ovanliga över slättmark. Den turbulens som uppstår vid dessa låga vindhastigheter är dock så pass svag att det inte skadar vindkraftverken som generellt inte börjar snurra förrän vid ca 3 m/s. (Norlund, 2009)

Energirosorna skulle kunna ses som en förstärkning av vindrosorna. Detta är naturligt eftersom energin är densamma som vindens hastighet i kubik. För att skapa energirosen har alltså samtliga vindhastigheter upphöjts till tre.

Om man ser till energin i vinden såsom presenteras i rosorna på i Figur 10 framgår det tydligt att mätmasterna är placerade långt ifrån varandra. Plain är den mast som visar högst energiinnehåll, en mast på slättland i södra Sverige skulle sannolikt inte leverera



motsvarande värden. Jämför man de andra två mätmasterna kan man se att vinden har ett högt energiinnehåll även över Ocean, men ganska mycket lägre över Woodland. En fråga skulle naturligtvis kunna vara varför man då bygger i skogen och inte mer i havet. Detta är i mångt och mycket en kostnadsfråga. Det är mycket dyrare att bygga vindkraft till havs, behovet av kabeldragning blir oftast mycket stort, dessutom är det mer tidskrävande och omständligare. Hypotesen var dock, och är fortfarande, att vindenergin över slättland ligger mitt emellan den till havs och i skogen. För att få detta bekräftat skulle dock mätdata från mer närliggande stationer behöva användas.

Gällande vindskjuvningen ser resultatet ut precis som förväntat. Skog innebär en högre markrähet, vilket i sin tur leder till en högre WSC. Något som inte framkommer i denna studie är dock hur vindskjuvningen ser ut *ovanför* trädkropparna. Man kan tänka sig att WSC är lägre där. Detta kunde inte undersökas närmare, eftersom mätdata kom från en 50 meter hög mast.

Weibullgrafens form påverkar valet av vindkraftverk. Ser man till Weibullfördelningarna som presenteras i Figur 11 ser man att Weibullfördelningen blir spetsigare ju högre råhet marken har. Spetsigast är Woodland, vilket innebär att vindens frekvensfördelning inte är lika spridd här. I anslutning till Weibullgraferna nämns även medelvinden på de olika platserna. Förväntningen var att medelvinden skulle vara starkast till havs, men i denna analys är det Plain som har högst medelvind med 8,7 m/s. Även detta förklaras med mastens avlägsna placering.

Beräkningen av extrema vindar är baserad på Weibullfördelningarna. Då dessa visar vindklimatet under vinterhalvåret då vindarna är som starkast kan man anta att de sannolikhetstal som presenteras ovan är något högre än de varit ifall beräkningen vore grundad på mätdata från ett eller flera år. 24 % sannolikhet för en medelvind på 50 m/s under en minut över Ocean ger intrycket av att vara mycket högt, men ändå rimligt. För Ocean räcker det alltså inte med något av de vindkraftverk som är specificerade i Tabell 1, utan det krävs ett verk av "S-typ". Att medelvärdet för en timme inte överstiger 50 m/s i Plain är säkert alla invånare i North Dakota tacksamma för. Resultatet hade sett annorlunda ut och varit intressantare ifall mätfrekvensen vore högre.

För att ge en mer exakt och pålitlig analys av vinden skulle en längre mätperiod behövas. De statistiska test som gjorts av mätdata är grundläggande, men visar dock på att mätdata inte skiljer sig signifikant från tidigare mätdata från samma område. Även en jämförelse med närliggande MIUU-punkter ger ett tillfredställande svar. Att den vindhastighet som räknats ut i denna uppsats är 0,07-0,1 m/s högre kan förklaras med att mätvärdena kommer från vinterhalvåret. Resultaten ser dessutom i stort sett ut som förväntat, vilket måste innebära att mätdata är representativ.

## 6 Slutsats

Visst påverkas vindens karaktär mycket av det omgivande landskapet. I analysen framkommer det dock att även platsens geografiska placering på jordklotet påverkar vindriktning och energiinnehållet i vinden, det hjälper inte alltid att platserna ligger på

ungefär samma breddgrad. I detta fall då mätdata från USA varit en del av analysen ser man dock att det inte bara är det närliggande landskapet och de stora systemen så som de geostrofiska vindarna som påverkar vinden i det atmosfäriska gränslagret. Där påverkar istället hela kontinenten vindklimatet med sina dominanta hög- och lågtryck och det som enligt teorin skulle vara en vind från sydväst blev en näst intill rakt nordlig vind. Det är därför den geostrofiska vinden ibland säga vara endast en teoretisk vind, över stora landmassor skapas det istället hög- och lågtryck som styr vindklimatet olika, beroende på säsong.

Syftet med denna uppsats var att undersöka hur vindens karaktär skiljer sig mellan de tre olika landskapstyperna. Resultatet visar att de miljöer som hittills varit dominanta inom vindkraftindustrin, slättland och hav, också är de med bäst förutsättningar. Där är turbulensen lägre, vilket leder till mindre slitningar på verken och en högre energiproduktion. Där är det också enklare att förutse vindhastigheterna på navhöjd med hjälp av WSC, eftersom motståndet från marken inte förändras lika mycket med höjden som i skogsmiljö. Idén med vindkraftverk i skogsmiljö ska dock inte förkastas, men man bör nog mäta vindens egenskaper på plats och planerad navhöjd, eftersom skog är en mycket komplex terräng där alla, i övrigt vedertagna formler för vindens karaktär, inte alltid ger ett korrekt svar.

## 7 Referenser

### 7.1 Tryckta källor

Ahrens, C. D., (2003) *Meteorology Today*, 7 ed, Thomson, China, pp. 544

Bergström, H., (1992) Distribution of extreme wind speed, *Wind Energy Report WE 92:3*

Bergström, H., (2007) *Vindpotentialen i Sverige på 1-km skala: Beräkningar med MIUU-modellen*, Uppsala universitet, Uppsala, pp. 18

Bärring, L., Eklundh, L., Harrie, L., Lankreijer, H., Lindroth, A., Mårtensson U., Mölder, M., Schubert, P., och Smith, B., (2008) *Naturgeografisk Teori och Metodik*, Lunds Universitet, Lund, pp. 203

Clive, P. J. M., Chindurza, I., Ravey, I., Bass, J., Boyle, R. J., Jones, P., Lang, S. J., Bradley, S., Hay, L., Oldroyd, A., Stickland, M., (2007) *The Myres Hill remote sensing intercomparison study: preliminary results*, Sgurr Energy ([www.sgurrenergy.com](http://www.sgurrenergy.com))

IEC International standard 61400-12-1 Ed.1.0 (2005) *Wind turbines –Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines*, Geneve, pp. 94

IEC International standard 61400-1 Ed.3 (2005), *Wind turbines – Part 1: Design requirements*, Geneve

Manwell, J. F., McGowan, J. G., Rogers, A. L., (2003) *Wind energy explained*, Wiley and Sons, UK, pp. 567

Mattsson, Jan.O., (1979) *Introduktion till Mikro- och lokalklimatologin*, första upplagan, Liber Läromedel Malmö, Malmö, pp. 199

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), (1998) *Climatic wind for the United States*, Asheville, pp. 23

Petersen, E. L., Mortensen, N. G., Landberg, L., Højstrup, J. och Frank, H. P., (1998) *Wind Power Meteorology. Part I: Climate and Turbulence*, *Wind Energy*, **1** 2-22

Rehman, S., Al-Abadi, N. M., (2008) Wind shear coefficient, turbulence intensity and wind power potential assessment for Dhulom, Saudi Arabia, *Renewable Energy* **33** 2653-2660

Stull, R.B., (2000) *Meteorology for scientists and engineers*, West Publishing Co., 2 ed, USA, pp. 502

Wizelius, T., (2008) *Vindkraft i teori och praktik*, Studentlitteratur, Polen, p.p. 399  
Alexandersson, H., (2006) Vindstatistik för Sverige 1961-2004, *Meteorologi*, Nr 121

## **7.2 Muntliga referenser:**

Anton Andersson, E.ON Vind Sverige AB

Barbro Edholm, E.ON Vind Sverige AB

Christofer Åslund, E.ON Vind Sverige AB

Martin Norlund, E.ON Vind Sverige AB

## **7.3 Internet:**

### **Danish Wind Industry Association:**

Vindkraftens elproduktion

<http://www.windpower.org/da/stats/shareofconsumption.htm> 2009-03-12

### **EMD International:**

Vindstatistik

[http://www.vindstat.dk/PDF\\_sider/Vindindex\\_aktuel.pdf](http://www.vindstat.dk/PDF_sider/Vindindex_aktuel.pdf) 2009-03-16

### **Energimyndigheten:**

Mål, utbyggnad och drift av vindkraft

<http://www.energimyndigheten.se/sv/Om-oss/Var-verksamhet/Framjande-av-vindkraft1/Utbyggnad-och-drift/> 2009-01-21

Vindkartering/MIUU

<http://www.energimyndigheten.se/sv/Om-oss/Var-verksamhet/Framjande-av-vindkraft1/Bygga-vindkraftverk-/Vindkartering/> 2009-01-27

**E.ON:**

E.ON Internationellt

<http://www.eon.com/de/unternehmen/20920.jsp> 2009-03-12

E.ON Vind Sverige AB

<http://www.eon.se/templates/Eon2CompanyPage.aspx?id=48508&epslanguage=SV>  
2009-03-12

**Nationalencyklopedin:**

Sökord: Vindenergi

<http://www.ne.se/artikel/343668> 2009-01-28

Sökord: Vindkraftverk

<http://www.ne.se/artikel/343706> 2009-01-28

**The Centre for Renewable Energy Sources (CRES):**

Weibullfördelning

<http://www.cres.gr/windrose/joomla/images/weibull.png> 2009-03-11

**Vestas:**

Produktinformation

[http://www.vestas.com/Admin/Public/Download.aspx?file=Files/Filer/SE/Brochures/V80\\_SV.pdf](http://www.vestas.com/Admin/Public/Download.aspx?file=Files/Filer/SE/Brochures/V80_SV.pdf) 2008-03-12

**Vindforsk**

<http://www.vindenergi.org/driftuppfolj.htm> 2009-02-02

## **7.4 Kartor**

ArcGIS 9.2, USA.mxd

Lantmäteriets Terrängkarta

## **7.5 Program för behandling av data:**

ArcGIS 9.2

Microsoft Excel

Microsoft Word

WindPRO 2.6

Lunds Universitets Naturgeografiska institution. Seminarieuppsatser. Uppsatserna finns tillgängliga på Naturgeografiska institutionens bibliotek, Sölvegatan 12, 223 62 LUND. Serien startade 1985. Uppsatserna är även tillgängliga på <http://www.geobib.lu.se/>

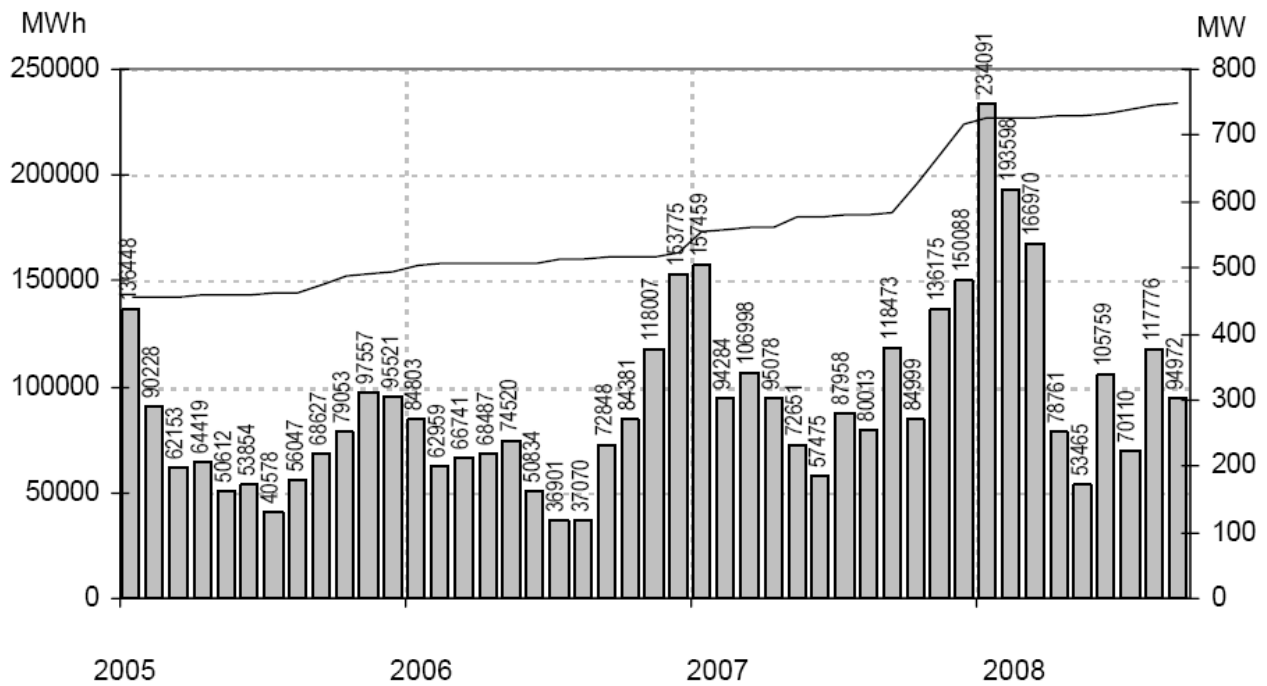
The reports are available at the Geo-Library, Department of Physical Geography, University of Lund, Sölvegatan 12, S-223 62 Lund, Sweden.  
Report series started 1985. Also available at <http://www.geobib.lu.se/>

111. Tränk, L., (2005): Kadmium i skånska vattendrag – en metodstudie i föroreningsmodellering.
112. Nilsson, E., Svensson, A.-K., (2005): Agro-Ecological Assessment of Phonxay District, Luang Phrabang Province, Lao PDR. A Minor Field Study.
113. Svensson, S., (2005): Snowcover dynamics and plant phenology extraction using digital camera images and its relation to CO<sub>2</sub> fluxes at Stordalen mire, Northern Sweden.
114. Barth, P. von., (2005): Småvatten då och nu. En förändringsstudie av småvatten och deras kväveretentionsförmåga.
115. Areskoug, M., (2005): Planering av dagsutflykter på Island med nätverkanalys
116. Lund, M., (2005): Winter dynamics of the greenhouse gas exchange in a natural bog.
117. Persson, E., (2005): Effect of leaf optical properties on remote sensing of leaf area index in deciduous forest.
118. Mjöfors, K., (2005): How does elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration affect vegetation productivity?
119. Tolleback, E., (2005): Modellering av kväveavskiljningen under fyra år i en anlagd våtmark på Lilla Böslid, Halland
120. Isacson, C., (2005): Empiriska samband mellan fältdata och satellitdata – för olika bokskogsområden i södra Sverige.
121. Bergström, D., Malmros, C., (2005): Finding potential sites for small-scale Hydro Power in Uganda: a step to assist the rural electrification by the use of GIS
122. Magnusson, A., (2005): Kartering av skogsskador hos bok och ek i södra Sverige med hjälp av satellitdata.
123. Levallius, J., (2005): Green roofs on municipal buildings in Lund – Modeling potential environmental benefits.
124. Florén, K., Olsson, M., (2006): Glacifluviala avlagrings- och erosionsformer i sydöstra Skåne – en sedimentologisk och geomorfologisk undersökning.
125. Liljewalch-Fogelmark, K., (2006): Tågbuller i Skåne – befolkningens exponering.
126. Irminger Street, T., (2006): The effects of landscape configuration on species richness and diversity in semi-natural grasslands on Öland – a preliminary study.
127. Karlberg, H., (2006): Vegetationsinventering med rumsligt högupplösande satellitdata – en studie av QuickBird-data för kartläggning av gräsmark och konnektivitet i landskapet.

- 128 Malmgren, A., (2006): Stormskador. En fjärranalytisk studie av stormen  
Gudruns skogsskador och dess orsaker.
- 129 Olofsson, J., (2006): Effects of human land-use on the global carbon cycle  
during the last 6000 years.
- 130 Johansson, T., (2006): Uppskattning av nettoprimärproduktionen (NPP) i  
stormfällan efter stormen Gudrun med hjälp av satellitdata.
- 131 Eckeskog, M., (2006): Spatial distribution of hydraulic conductivity in the Rio  
Sucio drainage basin, Nicaragua.
- 132 Lagerstedt, J., (2006): The effects of managed ruminants grazing on the global  
carbon cycle and greenhouse gas forcing.
- 133 Persson, P., (2007): Investigating the Impact of Ground Reflectance on  
Satellite Estimates of Forest Leaf Area Index
- 134 Valoczi, P. (2007): Koldioxidbalans och koldioxidinnehållsimulering av  
barrskog i Kristianstads län, samt klimatförändringens inverkan på skogen.
- 135 Johansson, H. (2007): Dalby Söderskog - en studie av trädarternas  
sammansättning 1921 jämfört med 2005
- 137 Kalén, V. (2007): Analysing temporal and spatial variations in DOC  
concentrations in Scanian lakes and streams, using GIS and Remote Sensing
- 138 Maichel, V. (2007): Kvalitetsbedömning av kväveretentionen i nyanlagda  
våtmarker i Skåne
- 139 Agardh, M. (2007): Koldioxidbudget för Högestad – utsläpp/upptag och  
åtgärdsförslag
- 140 Peterz, S. (2007): Do landscape properties influence the migration of Ospreys?
- 141 Hendrikson, K. (2007): Småvatten och groddjur i Täby kommun
- 142 Carlsson, A. (2008): Antropogen påverkan i Sahel – påverkar människans  
aktivitet NDVI uppmätt med satellit.
- 143 Paulsson, R. (2008): Analysing climate effect of agriculture and forestry in  
southern Sweden at Högestad & Christinehof Estate
- 144 Ahlstrom, A. (2008): Accessibility, Poverty and Land Cover in Hambantota  
District, Sri Lanka. Incorporating local knowledge into a GIS based  
accessibility model.
- 145 Svensson T. (2008): Increasing ground temperatures at Abisko in Subarctic  
Sweden 1956-2006
- 146 af Wåhlberg, O. (2008): Tillämpning av GIS inom planering och naturvård -  
En metodstudie i Malmö kommun.
- 147 Eriksson, E. och Mattisson, K. (2008): Metod för vindkraftslokalisering med  
hjälp av GIS och oskarp logik.
- 148 Thorstensson, Helen (2008): Effekterna av ett varmare klimat på fenologin hos  
växter och djur i Europa sedan 1950.
- 149 Raguz, Veronika (2008): Karst and Waters in it – A Literature Study on Karst  
in General and on Problems and Possibilities of Water Management in Karst in  
Particular.
- 150 Karlsson, Peggy (2008): Klimatförändringarnas inverkan på de svenska  
vägarna.
- 151 Lyschede, Bjarne Munk (2008): Rapeseed Biodiesel and Climate Change  
Mitigation in the EU.

- 152 Sandell, Johan (2008): Detecting land cover change in Hambantota district, Sri Lanka, using remote sensing & GIS.
- 153 Elgh Dalgren, Sanna (2008): vattennivåförändringar i Väneren och dess inverkan på samhällsbyggnaden i utsatta städer
- 154 Karlgård, Julia (2008): Degrading peat mires in northern Europe: changing vegetation in an altering climate and its potential impact on greenhouse gas fluxes.
- 155 Dubber, Wilhelm and Hedbom, Mari (2008) Soil erosion in northern Loa PDR – An evaluation of the RUSLE erosion model
- 156 Cederlund, Emma (2009): Metodgranskning av Klimatkommunernas lathund för inventering av växthusgasutsläpp från en kommun
- 157 Öberg, Hanna (2009): GIS-användning i katastrofdrabbade utvecklingsländer
- 158 Marion Früchtl & Miriam Hurkuck (2009): Reproduction of methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions
- 159 Florian Sallaba (2009): Potential of a Post-Classification Change Detection Analysis to Identify Land Use and Land Cover Changes. A Case Study in Northern Greece
- 160 Sara Odellius (2009): Analys av stadsluftens kvalitet med hjälp av geografiska informationssystem.
- 161 Carl Bergman (2009): En undersökning av samband mellan förändringar i fenologi och temperatur 1982-2005 med hjälp av GIMMS datasetet och klimatdata från SMHI.
- 162 Per Ola Olsson (2009): Digitala höjdmodeller och höjdsystem. Insamling av höjddata med fokus på flygburen laserskanning.
- 163 Johanna Engström (2009): Landskapets påverkan på vinden -sett ur ett vindkraftperspektiv.
- 164 Andrea Johansson (2009): Olika våtmarkstypers påverkan på CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O och CO<sub>2</sub> utsläpp, och upptag av N<sub>2</sub>.
- 165 Linn Elmlund (2009): The Threat of Climate Change to Coral Reefs
- 166 Hanna Forssman (2009): Avsmältningen av isen på Arktis - mätmetoder, orsaker och effekter.
- 167 Julia Olsson (2009): Alpina trädgränsens förändring över 100 år.

## Vindproducerad el



Linjen visar installerad effekt i MW, staplarna visar producerad energi per månad i MWh (Sverige).  
(Vindforsk, 2009)