

SKOGS PÅVERKAN PÅ VINDKRAFTSPRODUKTION

- en fallstudie av vindkraftverk vid Andersfält

Gustav Egerup

Examensarbete

Avdelning för Energihushållning
Institutionen för Energivetenskaper
Lunds Tekniska Högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund



Skogs påverkan på vindkraftsproduktion

- en fallstudie av vindkraftverk vid Andersfält



Gustav Egerup

Lund 2007

Titel/title:

Skogs påverkan på vindkraftsproduktion
- en fallstudie av vindkraftverk vid Andersfält

Författare/author:

Gustav Egerup

ISSN: LUTMDN/TMHP --07/5121--SE

ISRN: 0282-1990

Antal sidor/number of pages:

77

Keywords:

Wind turbine, Forest, Windpower Meteorolgy, WAsP, MIUU

Sökord:

Vindkraft, Skog, Vindkraftsmeteorologi, WAsP, MIUU

Abstract:

The purpose of this master thesis is to investigate how nearby forests affect the energy production in wind turbines. To reach the purpose a case study is performed on three wind turbines sited on a field in a north-south line at Andersfält in the municipality of Halmstad, Sweden. Approximately 100 meters south of the southern wind turbine a forest is situated. The case study is divided into three sub studies where the difference in energy production, the affect of the forest and a wind meteorology model, WAsP, is studied. The result show that the forest have a significant influence and that the WAsP-model gives an incorrect result of the energy production in wind turbines sited near a forest.

Sammanfattning

I Sverige finns det på statlig nivå en hög ambition att utöka andelen vindkraft i det svenska energisystemet. Målsättningen är att öka vindkraftproducerad el från dagens nivå på cirka en terawattimme till tio terawattimmar år 2015. Sveriges cirka 800 vindkraftverk är till stor del placerade i slättlandskap och om målet ska kunna uppnås måste vindkraft etableras i nya samt obeprövade miljöer. Eftersom Sverige till stora delar består av skogsmark är det av intresse att undersöka vilken inverkan närliggande skog har på elproduktionen i ett vindkraftverk, vilket är syftet med detta examensarbete. För att uppnå syftet utförs en fallstudie av tre vindkraftverk som är placerade på en åker i en nord-sydlig rad vid Andersfält i Halmstad kommun. Terrängen kring verken är ett typiskt sydsvenskt öppet åkerlandskap, med en skog cirka 100 meter söder om det sydliga vindkraftverket. Detta gör det intressant att studera just denna vindkraftspark.

Fallstudien delas upp i tre delstudier som utreds i tur och ordning. I den första delstudien, *Skillnad i energiproduktion*, undersöks med hjälp av en statistisk metod skillnaden i energiproduktion mellan de tre vindkraftverken. För att jämförelsen ska bli rättvis görs en driftstoppskorrigerig genom att utesluta de värden som är kraftigt avvikande. Syftet med den andra delstudien, *Skogens påverkan*, är att undersöka i vilken omfattning skogen påverkar energiproduktionen. Med hjälp av vindriktning från en mätstation på Hallands Väderö undersöks om skillnaden i energiproduktion mellan de tre verken är större då det blåser över skogen, så kallad *störd vind*, jämfört med när det blåser över slätten, så kallad *ostörd vind*. I den tredje delstudien, *Modellering*, utreds hur väl en befintlig modell, WAsP-modellen, beskriver energiproduktionen för de tre vindkraftverken vid Andersfält.

Utöver fallstudien utförs även en litteraturstudie där de meteorologiska fenomen som uppstår när vindar transporteras över markytan studeras. Det kan konstateras att vinden vid en specifik plats påverkas av en mängd olika faktorer, som till exempel: den geostrofiska vindhastigheten, topografin, markytans råhet, atmosfärens stabilitet samt närliggande hinder. Vid projektering av vindkraftverk är det viktigt att på förhand kunna uppskatta energiproduktionen, eftersom den är avgörande för verkets ekonomiska lönsamhet. Energiproduktionen kan beräknas genom att sammanlänka vindhastighetsfördelningen för den aktuella platsen med effektkurvan för det specifika verket. Det är då av vikt att vindhastigheten samt effektkurvan är representativa för den aktuella platsen.

Resultatet från den första delstudien, *Skillnad i energiproduktion*, visar att det södra vindkraftverket har en betydligt lägre energiproduktion än det mellersta och norra. Efter driftstoppskorrigerig är skillnaden mellan de södra och mellersta verken cirka nio procent samt skillnaden mellan de södra och norra är cirka tio procent. Det norra vindkraftverket producerar således något mer än det mellersta, i storleksordningen en procent.

Datamängden till den andra delstudien, *Skogens påverkan*, är betydligt mer knapphändig och osäker än datamängden till den första delstudien. Detta beror på att den närmsta vindmätare som var i drift under den aktuella perioden var stationerad på Hallands Väderö, cirka 30 kilometer från vindkraftverken vid Andersfält. Trots denna osäkerhet visar resultatet att skillnaden i energiproduktion mellan verken är lägre när det är ostörd vind, jämfört när det är störd vind. Således kan det konstateras att det är skogen i söder som bidrar till den skillnad i energiproduktion som den första delstudien påvisade.

Resultatet från den tredje delstudien, *Modellering*, visar att WAsP-modellen ger en felaktig bild av energiproduktionen för vindkraftverk placerade intill skog. Trots att hänsyn tas till högre råhetsgrad samt nollplansförskjutning klarar inte modellen av att beskriva de komplexa meteorologiska fenomen som uppstår över skog.

Resultatet från detta examensarbete visar att den kunskap som idag finns när det gäller vindkraft i skogsmiljö är ytterst begränsad. Trots detta projekteras det idag i stor omfattning för vindkraft i dessa miljöer. Således kan det konstateras att vindkraftsbranschen ligger före vetenskapen när det gäller vindkraft i skog, vilket innebär ett risktagande, både för enskilda projekt samt för vindkraften i stort.

Summary

The Swedish government has a high ambition to increase the share of electricity produced from wind turbines in. The goal is to increase wind turbine produced electricity from today's level of approximately one terawatt hour to ten terawatt hours year 2015. Sweden's approximately 800 wind turbines are mainly sited in an open landscape. To reach the goal wind turbines must be sited in environments where turbines previously have not been established. Since large areas of Sweden are covered with forests is it interesting to study how a nearby forest affects the energy production in a wind turbine, which is the purpose of this master thesis. To reach the purpose a case study is performed on three wind turbines sited on a field in a north-south line at Andersfält in the municipality of Halmstad. The terrain around the wind turbines is typical for a southern Swedish open landscape, except for a forest situated approximately 100 meters south of the southern wind turbine. The prescense of the forest makes it interesting to study this specific park of wind turbines.

The case study is divided into three sub studies which are analysed in chronological order. In the first sub study, *Difference in energy production*, the difference in energy production between the three wind turbines is studied using a statistic method. Stoppage is taken into account by excluding outliers. The purpose of the second sub study, *Affect of the forest*, is to examine to which extent the forest affects the energy production. Using wind direction data from a meteorological station on the island Hallands Väderö, the difference in energy production between the three turbines is studied. A comparison of the energy production when wind is blowing over the field, so called *undisturbed wind*, with the energy production when wind is blowing over the forest, so called *disturbed wind*, is performed. In the third sub study, *Modelling*, the well known wind meteorology model, WAsP, is analysed. The purpose is to study if the model is capable of describing the energy production for the three wind turbines at Andersfält.

Beside the case study, a literature study is carried out, where the meteorology phenomenon that appears when winds are flowing over the ground is studied. It can be established that the wind at a specific location is influenced by numerous variables, for example: the geostrophic wind speed, terrain orography, surface roughness, atmospheric stability and physical obstacles. It is important to estimate the energy production in a wind turbine in advance, since the energy production is a determining economic factor for the profitability. The energy production can be estimated by considering the distribution of the wind for the specific site along with the power curve for the specific turbine. Hence, it is important that the wind and the power curve are representative of the local nature at a site.

The results of the first sub study, *Difference in energy production*, show that the southern wind turbine have a significantly lower energy production than the middle and northern wind turbines. When stoppage is taken into account, the difference between the southern and middle turbine is approximately nine percent and the difference between the southern and northern turbine is approximately ten percent. The middle wind turbine is consequently producing approximately one percent less electricity then the northern turbine.

The amount of data to the second sub study, *Affect of the forest*, is less and therefore more unreliable then the first sub study. The shortage of data is a result of the long distance to the nearest meteorological station at Hallands Väderö, approximately 30 kilometres from Andersfält. Despite the uncertainty the results show that the difference in energy production

between the wind turbines is less during undisturbed wind, compared to during disturbed wind. This result proves that it is influence from the forest that creates the difference in energy production between the turbines at Andersfält.

The results from the third sub study, *Modelling*, show that the WASP-model gives an incorrect result of the energy production in wind turbines sited near a forest. Even if higher surface roughness and displacement height is taken into account, the model is not capable of describing the complex phenomenon that appears above the canopies.

The result of this master thesis shows that the knowledge when it comes to wind turbine sited near or in forests is limited. Despite this, companies in Sweden are projecting wind turbines in this environment. The main conclusion is that the wind turbine industry is ahead of the science. This is a risk both for single projects and for the industry in general.

Förord

Denna rapport är ett resultat av ett examensarbete på 20 poäng vid Lunds Tekniska Högskola, institutionen för Energivetenskaper. Examensarbetet är en del av civilingenjörsutbildningen Environmental Engineering/Ekosystemteknik med inriktning mot energiteknik. Parallellt med examensarbetet har jag arbetat som vindkraftsprojektör på *Eolus Vind AB*, ett företag som etablerar och driver vindkraftverk. Arbetet på *Eolus* har gett mig en ovärderlig inblick i vindkraftsbranschen och jag är övertygad om att examensarbetet inte hade blivit lika bra om jag inte getts möjlighet till insyn i branschens komplexa problemställningar. Därför är jag djupt tacksam över att *Eolus Vind AB* har ställt upp på mina flexibla arbetstider, vilket har varit en förutsättning för att färdigställa detta examensarbete. Även Johannes Lundvall på *Triventus Consulting AB* har varit till stor hjälp då han har försatt mig med nödvändig programvara till modelleringen. Jag vill också rikta ett tack till min handledare, Lennart Thörnqvist, som engagerat har tagit del av och stöttat mig i mitt arbete. Eftersom jag har skrivit detta examensarbete själv har jag också haft stor hjälp av mina vänner och min flickvän som under arbetets gång gett mig tips och idéer.

Trevlig läsning!

/Gustav Egerup

Innehåll

SAMMANFATTNING	III
SUMMARY	V
FÖRORD	VII
1. INLEDNING	1
1.1 BAKGRUND.....	1
1.1.1 Vindkraft i Sverige, kortfattad historik.....	1
1.1.2 Hinder vid nyetablering av vindkraftverk.....	2
1.1.3 Vindkraftverken vid Andersfält	3
1.2 SYFTE.....	4
1.3 FRÅGESTÄLLNINGAR.....	4
1.4 MÅLGRUPP	4
1.5 DISPOSITION OCH LÄSHÄNVISNINGAR	4
2. METOD OCH BEGRÄNSNINGAR	7
2.1 VAL AV FALLSTUDIE	7
2.2 LITTERATURSTUDIE	7
2.2.1 Metod.....	7
2.2.2 Begränsningar.....	8
2.3 SKILLNAD I ENERGIPRODUKTION	8
2.3.1 Metod.....	9
2.3.2 Begränsningar.....	10
2.4 SKOGENS PÅVERKAN.....	10
2.4.1 Metod.....	11
2.4.2 Begränsningar.....	11
2.5 MODELLERING.....	12
2.5.1 Val av modell	12
2.5.2 Metod.....	12
2.5.3 Begränsningar.....	16
3. VINDKRAFTSMETEOROLOGI OCH WASP	18
3.1 VINDARS UPPKOMST	18
3.2 VINDAR NÄRA MARKYTAN	20
3.2.1 Turbulens	20
3.2.2 Topografi	22
3.2.3 Vindprofil och markytans råhet	22
3.2.4 Övergångseffekter mellan olika råheter.....	25
3.2.5 Lä bakom hinder	27
3.2.6 Luftens stabilitet.....	28
3.2.7 Vindar över skog.....	29
3.3 PARKEFFEKT.....	30

3.4	ENERGIPRODUKTION	30
3.4.1	Vindens energiinnehåll	31
3.4.2	Vindens riktning	31
3.4.3	Vindkraftverken vid Andersfält	32
3.4.4	Beräkning av energiproduktion för ett vindkraftverk.....	33
3.5	TIDIGARE STUDIER MED WASP	35
3.5.1	WAsP i skogsmiljö.....	35
3.5.2	Övriga studier med WASP	36
4.	MIUU-MODELLEN.....	37
4.1	MODELLENS METODIK	37
4.2	VERIFIERING AV MODELLEN	39
4.3	TIDIGARE STUDIER MED MIUU-MODELLEN	40
5.	RESULTAT	41
5.1	SKILLNAD I ENERGIPRODUKTION	41
5.1.1	Månadsstatistik	41
5.1.2	Dygnstatistik	43
5.2	SKOGENS PÅVERKAN.....	47
5.3	MODELLERING.....	49
5.3.1	Områdesbeskrivning.....	49
5.3.2	Topografi	49
5.3.3	Råhet.....	50
5.3.4	Närliggande hinder	53
5.3.5	Modellering.....	53
6.	DISKUSSION	57
6.1	VINDKRAFT OCH SKOG	57
6.1.1	Stort intresse för vindkraft i skog.....	57
6.1.2	Vindkraftsmarknaden	58
6.1.3	Branschen är före vetenskapen.....	58
6.2	SKILLNAD I ENERGIPRODUKTION	59
6.2.1	Lönsamhet.....	59
6.2.2	Uppskattning av energiproduktionen	60
6.2.3	Driftstopp.....	61
6.2.4	Ägandeförhållanden	63
6.3	SKOGS PÅVERKAN.....	63
6.3.1	Turbulens	63
6.3.2	Vindriktning	65
6.4	MODELLERING.....	65
6.4.1	Resultat och felkällor.....	65
6.4.2	Resultatets förankring med tidigare studier	66
6.5	STUDIENS GENERALISERBARHET.....	67
6.5.1	Metodiken.....	67
6.5.2	Resultatet	67

7. SLUTSATSER	69
7.1 REKOMMENDATIONER.....	70
7.2 FÖRSLAG PÅ VIDARE ARBETE.....	71
7.3 ARBETETS SYFTE	71
8. KÄLLFÖRTECKNING	73
8.1 SKRIFTLIGA KÄLLOR	73
8.2 KONTAKTPERSONER.....	76
BILAGOR	77

1. Inledning

Vindkraft i Sverige har under bara några år gått från att vara ett orealistiskt alternativt energislag till att idag ses som framtidens energikälla som staten, energiföretag och näringslivet lägger ner stora resurser på. Idag finns ambitioner att vindkraft ska kunna bli ett betydande energislag i det svenska energisystemet och det känns därför relevant samt intressant att ägna utbildningens avslutande arbete åt detta ämne.

De omkring 800 vindkraftverk som under år 2005 bidrog med cirka 0,6 procent av den svenska elproduktionen är i stor utsträckning placerade i slättlandskap (Energimyndigheten 2006). Om vindkraft ska kunna bli ett betydande energislag i Sverige måste nya synsätt tillföras. Eftersom Sverige har 22,9 miljoner hektar skogsmark och endast 3,4 miljoner hektar åker- och betesmark är det av intresse att undersöka skogs påverkan på vindkraftsproduktionen (Skogsstyrelsen 2006). Därför har jag under en begränsad tid ägnat mig åt detta ämne och denna rapport är ett resultat av detta arbete.

I det inledande kapitlet beskrivs först bakgrunden till arbetet och därefter presenteras rapportens syfte och vilka frågeställningar som ska besvaras. Därefter förklaras vilken målgrupp arbetet vänder sig till och slutligen beskrivs rapportens disposition.

1.1 Bakgrund

Nedan följer en kortfattad redogörelse över hur vindkraft har vuxit fram i Sverige samt vilka hinder som idag finns vid nyetablering.

1.1.1 Vindkraft i Sverige, kortfattad historik

Vindkraft i Sverige har under 30 år utvecklats från att vara en försöksverksamhet till att idag vara en realistisk alternativ energikälla. Vindkraften introducerades på allvar i den politiska debatten år 1973 då *Folkpartiet* presenterade en vindkraftsproposition för riksdagen som beslutade att möjligheten för vindkraft i Sverige skulle utredas. *Energiprognosutredningen (EPU)* fick i uppdrag att undersöka möjligheterna och de kom fram till att vindkraft för tillfället inte var en lämplig energiform. År 1975 etablerade *Styrelsen för Teknisk Utveckling (STU)* ett vindenergiprogram som resulterade i att *Saab-Scania* utvecklade det första svenska vindkraftverket, *Kalkugnen*. Under slutet på 1970-talet och början på 1980-talet fanns en stor optimism och det satsades stora belopp på att utveckla turbiner i megawatt-klassen. Under åren 1982 och 1983 konstruerades två prototyper, som var dåtidens största verk, och Sverige tog därmed på sig rollen som ledande inom vindkraftsindustrin. Samtidigt skedde en kraftig utveckling av den svenska kärnkraften och energi blev under en tid inte längre en bristvara. Trots utebliven efterfråga på elkraft fortsatte den statliga satsningen på att utveckla vindkraftverk i megawatt-klassen. (Rönnborg 2006)

Den förutspådda industriella vindkraftsutvecklingen tog aldrig fart. Istället skedde under 1990-talet en småskalig utveckling och ett flertal mindre vindkraftverk, finansierade av kooperativ etablerades främst på landsbygden på Öland, Gotland, i Skåne och i Halland. År 2000 stod kooperativ och lantbrukare för 60 procent av den totala vindkraftsproduktionen. Den småskaliga etableringen som byggde på privata initiativ ledde till en förhållandevis kraftig expansion under 1990-talets första hälft. Efter 1996 avstannade dock utvecklingen och en bidragande faktor sägs vara den osäkerhet som skapades på grund av politisk inkonsekvens. På platser där expansionen varit kraftig växte en allmän opinion mot vindkraft

då vindkraftverken ansågs förstöra vyn i slättlandskapet. Detta ledde till att beslutande myndigheter blev mer försiktiga och ett flertal kommuner valde att helt ta avstånd från vindkraftsetablering. (Rönnborg 2006)

Sedan den socialdemokratiska regeringen beslutade att påbörja en avveckling av den svenska kärnkraften och istället satsa mer på förnybar energi har möjligheterna för vindkraft förbättrats. År 2002 antog riksdagen en energiproposition (prop 2001/02:143) som bland annat innehöll ett produktionsmål för vindkraft på 10 TWh till år 2015, vilket kan jämföras med 2005 års produktion på knappt 1 TWh. Året därpå infördes ett marknadsbaserat och långsiktigt styrmedel, det så kallade elcertifikatsystemet, vars syfte är att öka den förnybara elproduktionen med 10 TWh till år 2010 (Energimyndigheten 2005). Under våren 2006 lades ytterligare en proposition (prop 2005/06:143) där regeringen uppmanade myndigheter och organisationer att se över sin verksamhet i syfte att underlätta utbyggnaden av vindkraft.

1.1.2 Hinder vid nyetablering av vindkraftverk

Trots den statliga ambitionen att utöka elproduktionen från vindkraft uppkommer oftast lokala motstående intressen som hindrar utbyggnaden. För att kringgå dessa hinder måste ständigt nya lokaliseringsplatser hittas där de motstående intressena är begränsade. I Sverige är det, enligt *Plan- och bygglagen*, upp till kommunen att besluta huruvida vindkraftverk ska få etableras eller inte (Plan- och Bygglagen). Därför kan de skånska kommunerna Vellinge, Lomma, Sjöbo, Bjuv, Kävlinge med flera trots mycket goda vindförhållande ha en restriktiv hållning till vindkraftsetablering. Laholms kommun satsade tidigt på vindkraft och idag målas kommunen ofta upp som ett skräckexempel då det finns omkring 45 mindre vindkraftverk utspridda på Laholmslätten. Detta upplevs av många kommuninvånare som störande och vindkraftverken har skapat konflikter i Laholms kommun (Laholms kommun 2006). Därför ska kommunen i fortsättningen noggrant planera vindkraftsutbyggnaden så att påverkan för allmänheten begränsas och ingen nyetablering av vindkraft kommer att tillåtas förrän en ny vindkraftsplan tagits fram. Under hösten 2006 presenterades ett förslag till en vindkraftsplan i Laholms kommun där fem större områden i skogsmiljö pekades ut som lämpliga för vindkraft (Laholms kommun 2006).

Svenskar är enligt Ek (2005) generellt positiva till vindkraft, men enligt Hammarlund (1997) finns det i Sverige en utbredd skepsis på lokal nivå då det projekteras för vindkraft. Det är främst påverkan från ljud, skuggor samt förändringen av landskapsbilden som begränsar nyetablering av landbaserad vindkraft. För att minimera miljöpåverkan grupperas ofta vindkraftverk i parker om minst tre verk. Detta anses vara mindre störande än att sprida ut samma antal verk i landskapet (Wizelius 2003). För att etableringen av parker på land ska bli möjlig krävs stora obebodda ytor, vilket är svårt att finna i jordbrukslandskap. Allt eftersom nya och större vindkraftverk utvecklats, med tornhöjder över 100 meter, övervägs möjligheter att etablera vindkraft på platser som tidigare inte ansågs lämpliga. I södra Sverige finns det förutom i Laholm även ett stort intresse att projektera vindkraft i skogsmiljö på småländska höglandet. Detta stora intresse för vindkraft i skogslandskap grundas i den vindkartering som Hans Bergström från Uppsala universitet presenterade under våren 2006 (Bergström 2006a). I den karteringen beskrivs nämligen vindläget på omkring 100 meters höjd vid till exempel småländska höglandet och skogarna i Halland som lika bra som vid de skånska och halländska slätterna (Bergström 2006a). Detta har lett till att investerare ser möjlighet att få god lönsamhet i vindkraftsproduktion i områden som tidigare inte ansågs lämpliga för vindkraft. Det finns dock inom vindkraftsbranschen en osäkerhet i vilken omfattning skog påverkar energiproduktionen och det är därför av intresse att studera de fenomen som uppstår då det blåser över skog.

1.1.3 Vindkraftverken vid Andersfält

Under årsskiftet 2003/2004 byggdes tre vindkraftverk i en grupp vid Andersfält, cirka tio kilometer norr om Laholm. Verken placerades i nord-sydlig riktning i ett flackt åkerlandskap. Cirka hundra meter söder om det sydliga verket ligger Tönnersaskogen. Kartan i *Figur 1* visar vindkraftverkens placering samt Tönnersaskogen i söder. De tre vindkraftverken är av modellen V52 och har byggts av Vestas. De har en tornhöjd på 65 meter och en rotordiameter på 52 meter.



Figur 1. Ovanstående kartor visar vindkraftverkens placering vid Andersfält. I kartan till höger är de tre vindkraftverkens placering utmärkt med röda stjärnor.

Utifrån erfarenhet antogs skogen söder om verken påverka energiproduktionen. Vid projekteringen uppskattades därför den årliga energiproduktionen för det södra verket till 1700 MWh och årsproduktionen för de övriga två uppskattades till 1750 MWh (Energimyndigheten 2006). Uppskattningen av energiproduktionen är ett av de viktigaste momenten vid projektering, eftersom den siffran är utgångspunkten när vindkraftverkets lönsamhet beräknas. Det är därför av vikt att försöka få klarhet i hur Tönnersaskogen påverkar energiproduktionen för respektive vindkraftverk, så att framtida uppskattningar av energiproduktionen i liknande miljöer kan göras med större säkerhet.

Det finns indikationer, från ägare samt projekterare till vindkraftverken, att det södra verket producerar minst energi och det norra producerar mest. Detta gör givetvis att just vindkraftverken vid Andersfält blir intressanta att studera närmare, då det troligtvis är skogen som är den bidragande faktorn till skillnaderna i energiproduktion.

1.2 Syfte

Det övergripande syftet med denna rapport är att förklara vilken inverkan närliggande skog har på elproduktionen i vindkraftverk. Syftet är även att bringa klarhet i hur skogen vid Andersfält påverkar vindkraftproduktionen så att en säkrare uppskattning av energiproduktionen kan göras vid liknande framtida vindkraftsetableringar.

1.3 Frågeställningar

För att uppnå syftet kan tre frågeställningar, som måste besvaras i tur och ordning, ställas upp:

- Producerar det södra vindkraftverket minst och det norra verket mest energi?
- Om så är fallet, är det skogen som är bidragande faktor till skillnaden i energiproduktion?
- Om det är skogen som bidrar till minskningen i energiproduktion, finns det någon modell som beskriver de fenomen som uppstår och som ger ett rättvisande resultat på energiproduktionen?

1.4 Målgrupp

Detta examensarbete vänder sig främst till personer som jobbar inom vindkraftsbranschen. Därför kommer inte vindkraft i allmänhet att beskrivas, då det i målgruppen redan finns en allmän kunskap om detta ämne. Eftersom det inom branschen finns en mängd olika akademiska bakgrunder görs ett försök att beskriva den ytterst komplexa teorin på ett förhållandevis enkelt och inte allt för matematiskt vis. Dock krävs en del grundläggande kunskaper om matematiska begrepp för att all teori ska kunna förstås.

1.5 Disposition och läshänvisningar

Det praktiska arbetet delas in i två övergripande studier, litteraturstudie och fallstudie, som genomförs parallellt. Eftersom frågeställningarna måste besvaras i tur och ordning samt för att läsaren ska kunna följa arbetsgången delas fallstudien in i ytterligare tre delstudier:

- *Skillnad i energiproduktion.* I denna studie undersöks huruvida de tre verken vid Andersfält producerar olika mycket el. Detta görs genom att jämföra den dagliga energiproduktionen från de tre verken och med hjälp av en statistisk metod urskiljs de dagar verken inte har varit i drift.
- *Skogens påverkan.* Med hjälp av vindriktning från en mätstation på Hallands Väderö undersöks om skillnaden i energiproduktion mellan de tre verken är större då det blåser över skogen jämfört med när det blåser över slätten. Resultatet från denna studie visar i vilken omfattning skogen påverkar energiproduktionen.
- *Modellering.* Slutligen undersöks hur väl en befintlig modell, den så kallade WAsP-modellen, beskriver energiproduktionen för de tre verken vid Andersfält. Eftersom denna modell används vid projektering för att beräkna energiproduktionen ger resultatet från denna studie ett mått på huruvida modellen kan appliceras vid projektering intill skog.

Även i rapporten följs ovanstående indelning genomgående där litteraturstudien främst presenteras i kapitel tre samt fyra och resultatet från de olika fallstudierna presenteras i kapitel fem. I den efterföljande diskussionen sammanlänkas teorin med resultatet och utifrån det dras slutsatser. För att läsaren lättare ska finna det som är av intresse följer nedan en kortfattad genomgång av rapportens olika kapitel och bilagor, samt vilket syfte de ska uppfylla:

I *Kapitel 1 Inledning* ges dels en bakgrund till examensarbetet och dels en beskrivning till arbetets syfte samt upplägg för hur syftet ska uppnås.

Kapitel 2 Metod och Begränsningar beskriver den metod som har används för att besvara arbetets frågeställningar. Metoden beskrivs dels för litteraturstudien och dels för fallstudien. Detta görs för att läsaren kritiskt ska kunna granska de resultat som de olika studierna lett fram till samt för att framtida undersökningar liknande detta examensarbete ska kunna genomföras.

Kapitel 3 Vindkraftsmeteorologi och WAsP behandlar den teori som ligger bakom de meteorologiska fenomen som uppstår när det blåser nära jordytan. Syftet med kapitlet är dels att ge läsaren en allmän kunskap om vad som påverkar energiproduktionen i ett vindkraftverk och dels att beskriva teorin bakom modellen som används i fallstudien. I kapitlet beskrivs inledningsvis hur vindar uppkommer och ett antal för arbetet relevanta meteorologiska begrepp definieras. I efterföljande delar beskrivs de fenomen som påverkar energiproduktionen i ett vindkraftverk samt hur elproduktionen på förhand kan uppskattas.

Kapitel 4 MIUU-modellen tar upp en alternativ modell för att beräkna vindhastigheten. Denna så kallade MIUU-modellen har fått stor uppmärksamhet då den visar på goda vindförhållanden över till exempel skogsområden, som tidigare inte ansetts lämpliga för vindkraft. Därför anses denna modell relevant för detta examensarbete och beskrivs kortfattat i detta kapitel.

I *Kapitel 5* presenteras *resultatet* från de tre delstudierna: *Skillnad i energiproduktion, Skogens påverkan samt Modellering*. Resultatet förmedlas via diagram samt tabeller och det analyseras kontinuerligt i den löpande texten.

Kapitel 6 innehåller en *diskussion* angående resultatet från delstudierna samt hur det kan knytas till teorin. Även en mer allmän diskussion hålls, där problematiken kring vindkraft i skogsmiljö belyses. För att diskussionen ska bli mer fyllig kontaktas och intervjuas personer som är sakkunniga inom området.

I *Kapitel 7* sammanfattas de slutsatser som detta examensarbete har lett fram till. Eftersom detta arbete i första hand vänder sig till personer inom vindkraftsbranschen formuleras även rekommendationer som kan vara bra att beakta då det projekteras för vindkraft i eller intill skogsmiljöer.

För att inte texten ska stoppas upp allt för mycket av matematiska uttryck och definitioner beskrivs de modeller som använts i detta examensarbete i separata bilagor. Nedan presenteras kortfattat bilagornas innehåll:

Bilaga A Statistiska nyckeltal och modeller syftar till att ge läsaren en mer utförlig beskrivning av de statistiska nyckeltal samt modeller som används i den första samt andra delstudien. Detta är en viktig bilaga om den metodik som använts till detta examensarbete ska återanvändas.

I Bilaga B WAsP-modellen presenteras de linjära samband som används då energiproduktionen i vindkraftverken vid Andersfält modelleras med hjälp av WAsP. Dock saknas fullständiga härledningar av ekvationerna, men informationen bedöms trots det värdefull eftersom den ger en viss matematisk förklaring till modellen. Denna bilaga är av intresse om en djupare förståelse om WAsP önskas. Dock är det inte nödvändigt att sätta sig in i sambanden för att genomföra modelleringen eftersom modellen finns förprogrammerad i ett lätthanterligt datorprogram (WindPRO 2 2006).

Bilaga C Vakmodell beskriver bakgrunden till en enkel modell för att beräkna den energiförlust som uppstår nedströms ett vindkraftverk och som påverkar bakomvarande vindkraftverk. Även denna modell används vid modelleringen och finns förprogrammerad i WindPRO 2 (2006).

I Bilaga D Modelleringsresultat presenteras huvudresultatet från WAsP-modelleringen.

2. Metod och begränsningar

I detta kapitel beskrivs den metodik samt de begränsningar som använts i detta examensarbete. Eftersom metoden för litteraturstudien är generell och enkel beskrivs detta kortfattat medan metodiken för fallstudiens olika delstudier beskrivs mer omfattande. Först motiveras varför vindkraftverken vid Andersfält valts ut till fallstudien.

2.1 Val av fallstudie

De tre vindkraftverken vid Andersfält har valts som fallstudie till detta examensarbete på grund av dess vinkelräta placering intill Tönnersaskogen, se *Figur 1*. Denna placering gör att de tre identiska verken har olika avstånd till skogen i söder och skogens inverkan på energiproduktionen på olika avstånd kan då studeras. När studien påbörjas har vindkraftverken varit i drift under cirka två och ett halvt år, vilket bedöms vara tillräckligt för att kunna göra en rättvis bedömning av bland annat energiproduktionen. Trots att det ständigt utvecklas nya större vindkraftverk kan verken vid Andersfält anses vara moderna. I princip är de större verken som idag finns på marknaden endast en uppskalning av den modell som byggdes vid Andersfält och därför bedöms de studerade verken vara representativa även för de nyare modellerna. Dock bör det påpekas att vindkraftverken vid Andersfält är av fabrikatet Vestas och olika fabrikat har olika tekniska lösningar för att generera elektricitet. Det är även viktigt att belysa det faktum att nyare modeller byggs på högre torn, vilket i allra högsta grad påverkar vindkraftsproduktionen.

Vindkraftverken vid Andersfält är även intressanta att studera eftersom de förutom skogen i söder är lokaliserade i ett öppet jordbrukslandskap, se *Figur 1*. På så sätt kan verken beroende på vindriktning ses både som verk placerade i ett åkerlandskap och som verk placerade i skogsmiljö.

2.2 Litteraturstudie

Nedan beskrivs den metod som används för att finna relevant information till examensarbetet samt hur hänvisning till dessa källor presenteras. Även de begränsningar som finns i en litteraturstudie diskuteras kortfattat.

2.2.1 Metod

Litteraturstudien genomförs främst under hösten 2006. Material till studien inhämtas från Lunds universitets litteraturlandbanker: *Elin@Lund* och *Lovisa*, handledare Lennart Thörnqvist samt genom samtal med sakkunniga inom området. Dessa samtal sker dels via telefon och dels via möten. Personerna i fråga blir informerade om att de uppgifter som de lämnar eventuellt kommer att användas i ett examensarbete. Kontakt med utomstående upprättas även via email.

Relevanta artiklar söks upp genom databasen *Elin@Lund (Electronic Library Information Navigator)* och tryckt litteratur söks med hjälp av Lunds universitetsbiblioteks sökmotor *Lovisa*. Följande sökord används:

- *Turbulence och wind power*
- *Wind power och forest*
- *WAsP och forest*
- *MIUU*

I *Elin@Lund* saknas artiklar om MIUU-modellen skrivna av Hans Bergström från Uppsala universitet och dessa inhämtas via kontakt med Bergström. Ytterligare information inhämtas genom att studera och sammanfatta referenser till artiklar samt böcker. Slutligen sammanställs de mest intressanta uppgifterna från skriftliga och muntliga källor och presenteras främst i det tredje och fjärde kapitlet.

I rapporten används genomgående *Harvardsystemet* för källhänvisningar (Svenska språknämnden 2000). Fotnoter används för att ge förklaring till ord och uttryck samt för att hänvisa till andra delar av denna rapport. Källorna presenteras mer utförligt i bokstavsordning längst bak i rapporten.

Under teoriavsnittet presenteras i den löpande texten de mest relevanta ekvationerna. För att underlätta förståelsen till ekvationen ges i direkt anslutning en förklaring till ekvationens parametrar.

Under diskussionen i det sjätte kapitlet har sakkunniga inom området kontaktas. Information från dessa personer inhämtas via samtal eller email. Intervjuformen är öppen samt kvalitativ och stor fokus läggs på vad respondenten vill förmedla om vindkraft i skogsmiljö. Respondenten blir innan intervjun informerad om intervjuens syfte samt att uppgifterna som framkommer eventuellt kommer att användas i ett offentligt examensarbete.

2.2.2 Begränsningar

Det faktum att Hans Bergströms artiklar, som i allra högsta grad är relevanta för ämnet, inte finns med i Lunds universitetsbiblioteks databaser visar på en begränsning med litteraturstudien. Det finns nämligen ingen möjlighet att finna all relevant information eftersom ingen databas är fullständig.

I teorikapiteln beskrivs endast två modeller för vindberäkningar. WAsP-modellen har valts eftersom den under en längre tid har använts av branschen i flertalet länder vid projektering. Den andra modellen, MIUU, har på senare tid fått stor uppmärksamhet i Sverige, då den använts för att bedöma landets vindkraftspotential. Det finns ytterligare modeller som beskriver vindens energiinnehåll men dessa används inte i samma omfattning inom den svenska vindkraftsbranschen och därför beskrivs enbart två modeller i denna rapport.

2.3 Skillnad i energiproduktion

Den första fallstudien som utförs är att undersöka huruvida det är någon skillnad i energiproduktion mellan de tre verken vid Andersfält. Detta görs genom en statistisk analys av energiproduktion baserad dels på månadsvärden och dels på dygnsvärden.

2.3.1 Metod

Sedan år 1988 har det pågått en kontinuerlig driftsuppföljning av Sveriges vindkraftverk. Från år 1994 är det Elforsk samt Statens Energimyndighet som tillsammans ansvarar för driftsuppföljningen. Det praktiska arbetet med att samla in och förmedla information har under den senaste tiden utförts av Vattenfalls vindkraftsavdelning på Gotland samt Vattenfall Power Consultant (Energimyndigheten 2006).

Till en början utfördes uppföljningen manuellt genom att ägarna till vindkraftsverken läste av driftsuppgifter och därefter skickade in dem till Energimyndigheten. Sedan år 2002 sker avläsningen automatiskt genom att verken en gång per dygns rings upp via ett modem och uppgifter om effekt, vindhastighet, temperatur samt energiproduktion inhämtas från verkets kontrollsystem. Insamlade uppgifter lagras i en databas och tre dygns driftshistorik, från i stort sett samtliga vindkraftverk i Sverige, förmedlas till allmänheten via en hemsida¹. Uppföljningen bygger på att ägarna till vindkraftsverken frivilligt anmäler verket till Vattenfall, vilket är fallet för vindkraftverken vid Andersfält. (Vattenfall 2006)

Varje månad och år sammanställs driftsinformationen, som Vattenfall inhämtat, i en månads- respektive årsrapport. Enligt Elforsk är förhoppningen att uppföljningen ska möjliggöra ett ökat erfarenhetsutbyte mellan vindkraftsintressenter. Detta kan på längre sikt leda till en effektivare samt bättre elproduktion från vindkraft i Sverige, både ur ekonomisk och teknisk synvinkel. (Energimyndigheten 2006)

En statistisk analys av energiproduktionen från vindkraftverken vid Andersfält görs först utifrån driftsstatistik från 32 månadsrapporter, februari 2004 till och med september 2006, hämtade från Vindforsks hemsida (Energimyndigheten 2006). Därefter görs ytterligare en analys av den dagliga driftstatistik som inhämtas via kontakt med Vattenfalls vindkraftsavdelning på Gotland (Andersson 2006). Den dagliga driftsinformationen består utav 999 dygnsrapporter mellan den 15 januari 2004 till den 10 oktober 2006. Vattenfall har valt att samla dygnsvärdena genom att den totala energiproduktionen från driftsstart läses av vid midnatt varje dygn och lagras i en databas. Detta görs för att en eventuell utebliven avläsning inte ska ge en felaktig månadsproduktion. Vid utebliven avläsning beräknas och lagras ett medelvärde för energiproduktionen under de dygn avläsningen inte har skett.

Driftsinformationen sammanställs och presenteras i diagram och huruvida det föreligger någon skillnad i energiproduktion mellan de tre verken kontrolleras med statistiska beräkningar. Eftersom det är stor skillnad i energiproduktionen mellan olika månader och dagar ger en direkt jämförelse mellan medelvärden inte ett godtagbart resultat. Istället utförs en jämförelse mellan skillnaderna i energiproduktion mellan två verk månad för månad respektive dag för dag genom så kallad *stickprov i par*. För genomgång av metodiken samt modellen av denna statistiska undersökning hänvisas till *Bilaga A*.

Tekniken i moderna vindkraftverk är mycket avancerad och då minsta fel uppstår stannar verken per automatik. Normalt rapporteras driftstopp automatiskt till servicepersonal som därefter åtgärdar felet. De dygn som något av vindkraftverken har stått stilla är inte representativa och därför är det önskvärt att dessa värden uteblir från den statistiska jämförelsen.

¹ Driftsstatistik tre dygn tillbaka i tiden går att finna på hemsidan: www.vindstat.nu

Ett sätt att sortera bort de dygn då något av verken inte har fungerat är att inte ta med de värden som är kraftigt avvikande, så kallade *outliers*. Om till exempel det norra vindkraftverket en dag producerar hälften jämfört med de andra två verken är det högst troligt att det norra verket har varit ur drift och jämförelsen för den dagen blir då felaktig. För att avgöra huruvida ett värde är en *outlier* används en enkel definition som presenteras i *Bilaga A*. De värden som återstår efter att *outliers* har uteslutits benämns i detta examensarbete *driftstoppskorrigerade*.

2.3.2 Begränsningar

Vindkraftverken vid Andersfält har varit i drift sedan februari 2004, vilket innebär att när examensarbetet påbörjades hade de varit i drift under nästan 1000 dygn. Dock har den automatiska inrapporteringen inte fungerat perfekt och under långa perioder finns inga dygnsvärden på energiproduktionen. Till exempel fungerade inte rapporteringen under de första månaderna då vindkraftverken varit i drift och det var först 2004-08-10 som inrapporteringen startade. Även under en längre period mellan 2006-05-31 till 2006-07-17 var inrapporteringen för samtliga tre verk ur funktion.

Det är även möjligt att den automatiska avläsningen inte är exakt, men felmarginalen torde då vara liten samt likartad för samtliga vindkraftverk och därför försummas detta eventuella fel.

Eftersom Vestas inte för någon statistik på driftstopp finns det ingen tillgänglig information om vilka dygn vindkraftverken vid Andersfält varit ur drift (Helmersson 2007). Även om Vestas hade lämnat ut uppgifter om när verken varit ur drift är det inte säkert att dessa uppgifter hade varit mer tillförlitliga. Vindkraftverkens tillgänglighet på nätet är nämligen ett känsligt ämne eftersom det visar hur väl vindkraftverken fungerar. Den statistiska metod som används i detta examensarbete för att urskilja de dygn något av verken inte fungerat ger inte ett exakt resultat över driftstopp. Till exempel tas inte de dygn bort då ett verk varit ur drift en kortare tid. Skillnaden i energiproduktionen blir då inte så omfattande att värdet inte blir kraftigt avvikande enligt definitionen i *Bilaga A*. När de dygn, som den automatiska avläsningen inte fungerade samt när något värde var en *outlier*, tagits bort återstår 665 dygn. Detta är mer än tillräckligt för att statistiskt kunna säkerställa resultatet vid jämförelse av energiproduktionen mellan vindkraftverken.

Den så kallade parkeffekten² försummas i denna första delstudie. För att parkeffekten inte ska bli allt för omfattande rekommenderar Vestas ett minsta avstånd mellan vindkraftverken på fem gånger rotordiametern (Vestas 2004). Rotordiametern på vindkraftverken vid Andersfält är 52 meter och avståndet mellan verken är cirka 250 meter. Därför görs bedömningen att förändringen i energiproduktion på grund av parkeffekt för vindkraftverken vid Andersfält i sammanhanget är marginell.

2.4 Skogens påverkan

I den andra delstudien undersöks huruvida det är skogen som skapar skillnader i produktion genom att sammanlänka energiproduktionen per dygn med vindriktning från en mätstation. Därefter studeras och jämförs energiproduktionen då det blåser över skogen, så kallad *störd vind*, med energiproduktion när det blåser över åkern, så kallad *ostörd vind*. På så sätt fås en förklaring i vilken omfattning skogen påverkar energiproduktionen.

² Parkeffekt kallas det fenomen som uppstår då vindkraftverk är placerade i en grupp eller park och läar varandra, se kapitel 3.3.

2.4.1 Metod

Den närmsta mätstationen som var i drift under den aktuella perioden ligger på Hallands Väderö cirka 30 kilometer sydväst om vindkraftverken, se karta i *Figur 1*. Mätvärden på vindriktning under perioden 2004-01-15 till 2006-07-31 inhämtas från SMHI. I mätstationen på Hallands Väderö noteras var tredje timma en medelvindriktning i grader, där nordlig vind anges som 360 grader. När det är vindstilla anges värdet 0 och när det är växlande vindriktning och samtidigt svag vind får riktningen värdet 990. Då det av någon annan anledning inte går att mäta vindriktningen anges värdet -999. (Flarup 2006)

För att en jämförelse ska kunna göras måste vindriktningen vid Hallands Väderö antas vara den samma som vid vindkraftverken vid Andersfält. Detta är dock inte troligt eftersom det söder och öster om vindkraftverken finns höjder som antagligen påverkar vindriktningen. Mellan verken och mätstationen finns det endast hav och vindens riktning förändras troligtvis inte i samma omfattning över ett hav. Därför görs antagandet att då vindriktningen vid Hallands Väderö är mellan 225 och 315 grader är det samma vindriktning på Hallands Väderö som vid Andersfält.

Störd vind, det vill säga då det blåser över skogen, definieras som vindar med vindriktning mellan 225 och 260 grader. Den *ostörda vinden* över åkerlandskapet definieras som vindar med vindriktning mellan 270 och 315 grader. Eftersom vindriktningen ska sammanlänkas med dygnsproduktionen måste även vindriktningen ges i ett dygnsvärde. Det är önskvärt att endast studera de dygn då vindriktningen varit förhållandevis stabil. Därför görs följande definitioner:

- *För att en vind ska vara störd ska sex av de åtta dygnsmätvärdena på vindriktningen vara mellan 225 och 260 grader.*
- *För att vinden ska vara ostörd ska sex av de åtta dygnsmätvärdena på vindriktningen vara mellan 270 och 315 grader.*

Tidigare beräknade skillnader i energiproduktion mellan de tre verken under de *störda* och *ostörda* dygnen noteras. Huruvida skillnaden i energiproduktion mellan verken är större då det är *störd vind* jämfört med *ostörd vind* undersöks statistiskt med hjälp av ett så kallat *tvåsidigt konfidensintervall av två oberoende stickprov*. De statistiska samband som används i denna analys presenteras närmre i *Bilaga A*. Liksom i analysen av energiproduktionen stryks värden som är kraftigt avvikande enligt definitionen för *outliers* i *Bilaga A*.

2.4.2 Begränsningar

Mätdata på vindriktningen kommer från SMHI:s väderstation på Hallands Väderö och kan antas vara korrekta. Dock finns det ett par osäkerhetsfaktorer som måste beaktas då resultatet från denna delstudie analyseras. För det första ligger mätstationen vid Hallands Väderö cirka 30 kilometer från vindkraftverken vid Andersfält. Även då enbart de vindar som blåser över havet studeras är det inte säkert att vindriktningen alltid är den samma vid mätstationen och Andersfält. För det andra är vindriktningen sällan stabil vilket leder till att enbart 22 dygn med *störda vindar* och 35 dygn med *ostörda vindar* fås ut från mätdata, enligt definitionen ovan. Detta medför att resultatet från den statistiska jämförelsen i denna delstudie inte är lika pålitligt som resultatet i förgående delstudie, där 665 mätvärden jämfördes.

2.5 Modellering

Efter genomförd litteraturstudie visade det sig att det i Sverige främst används två olika modeller för att beskriva vindens energi på en bestämd höjd. En av dessa modeller, den så kallade WAsP-modellen tillämpas i detta examensarbete för att beskriva energiproduktionen för vindkraftverken vid Andersfält. Nedan motiveras först varför denna modell valts och därefter beskrivs metodiken som använts vid modellering av energiproduktionen. Slutligen presenteras modellens begränsningar.

2.5.1 Val av modell

Under teoriavsnittet i *kapitel 3* och *kapitel 4* presenteras två olika modeller för att bestämma vindens energi på en bestämd höjd. Den första modellen kallas WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program) och är framtagen av Risö National Laboratory i Danmark. Den andra modellen benämns MIUU (Meteorologi Uppsala Universitet) och är framarbetad av forskare på Uppsala universitet. Den senare modellen har fått stor uppmärksamhet då det visar på mycket goda vindförhållande i områden som tidigare inte ansetts vara lämpliga för vindkraft. Till exempel visar beräkningar med MIUU-modellen att småländska höglandet har tillräckligt stark vind för att etablera vindkraft. MIUU-modellens beskrivs närmre i *Kapitel 4*.

Trots att MIUU-modellen är en avancerad numerisk modell är den inte applicerbar i detta examensarbete eftersom den inte tar hänsyn till lokala variationer. Beräkningar med MIUU-modellen görs med en upplösning på 500 eller 1000 meter vilket innebär att skillnader i energiproduktion mellan vindkraftverken vid Andersfält inte går att urskilja med denna modell.

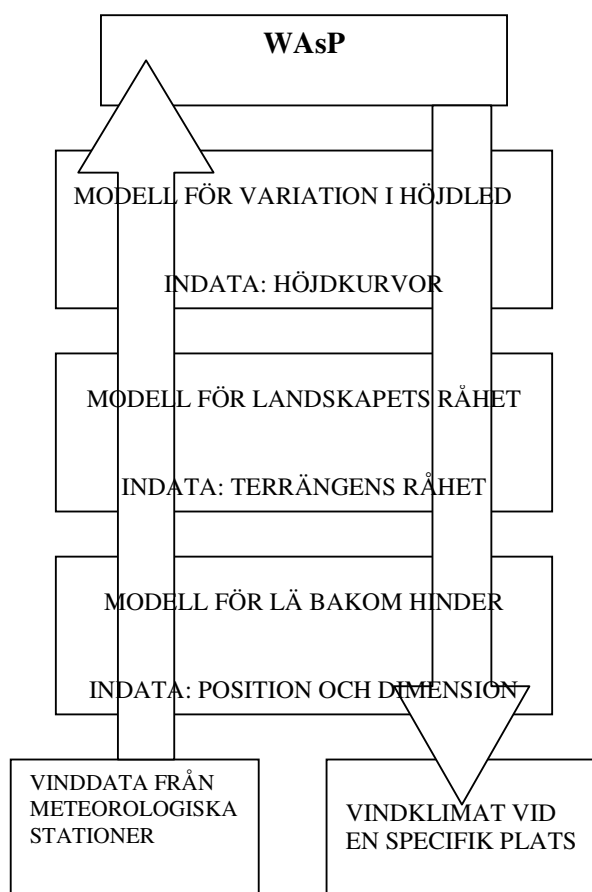
Vindanalysmodellen WAsP togs fram under 1980-talet av forskare på Risö i Danmark. Beräkningarna blev tillgängliga för en bred allmänhet då modellen 1988 presenterades i ett användarvänligt datorprogram. Ett år senare publicerades en vindkartering över delar av Europa, *European Wind Atlas* (Troen 1989) som bygger på WAsP-modellen. Därefter utfördes liknande projekt av Norge, Jordanien, Australien, Schweiz, Algeriet, Finland, Tyskland, Egypten och 1995 gjorde SMHI en vindkartering med hjälp av WAsP-modellen över Sverige (Petersen 1998a). Utöver landsomfattande vindkarteringar används beräkningsprogrammet vid projektering av vindkraft för att uppskatta energiproduktionen.

År 2001 hade WAsP-modellen använts vid energianalyser för mer än 6000 vindkraftverk i Danmark och enligt utgivaren av datorprogrammet har modellen visat sig stämma bra överens med verkligheten (Nielsen 2001). Eftersom programmet finns lättillgängligt på marknaden och har använts för vindkraftsprojektering under en längre tid, är det av intresse att undersöka hur väl den uppskattar energiproduktionen för vindkraftverken vid Andersfält. Därför koncentreras modelleringar i detta examensarbete till WAsP-modellen.

2.5.2 Metod

Danmark har länge varit ledande inom vindkraftsteknologi och under 1980-talet arbetade forskare på Risö fram en metod att utifrån data från vindstationer uppskatta vindens energiinnehåll på en specifik plats. Arbetet resulterade bland annat i ett datorprogram, WAsP som blev tillgängligt på marknaden år 1988. Syftet med programmet är att utifrån meteorologiska data kartlägga vindens energiinnehåll för att kunna ge goda förutsättningar att uppskatta potentialen att etablera vindkraftverk på en specifik plats. (Troen 1989)

Vid projektering av vindkraft är det ytterst viktigt att en korrekt bedömning av vindhastigheten görs eftersom vindens energiinnehåll är proportionell mot vindens hastighet i kubik³. En vindmätare ger en bild av vindens energiinnehåll, men för att den ska bli fullständig krävs att vindens egenskaper analyseras under en längre tid eftersom vinden varierar under året och mellan olika år. Beräkningsprogrammet WASP utgår från befintliga vindstationer som har samlat in data under ett flertal år. För att mätdata över vindhastigheten från en befintlig vindstation ska kunna användas måste de faktorer som påverkar vinden intill stationen karakteriseras. Vindhastigheten vid en specifik plats beror först och främst på hur vädersystemet i området ser ut. Detta system gäller för ett stort område flera hundratals kilometer runt omkring stationen. En annan faktor som påverkar vindens hastighet är den närliggande markens karaktär. Om en vindhastighet ska beräknas på annan plats måste det finnas en metod att jämföra och värdera dessa två faktors påverkan på vinden. Då WASP togs fram lades det ner stora resurser på att utveckla en sådan metod och det resulterade i ett antal modeller som tar hänsyn till luftens strömning beroende på jordytans karaktär. I *Figur 2* beskrivs översiktligt metodiken bakom WASP.



Figur 2. En schematisk beskrivning av metodiken bakom WASP-modellen.

Utgångspunkten vid beräkningar med hjälp av WASP-modellen är mätdata från befintliga vindstationer. Dessa data värderas utifrån de specifika faktorer som råder kring mätstationen. Hänsyn tas bland annat till närliggande hinder, landskapets råhet samt topografin. Med hjälp av modeller för dessa faktorer beräknas "neutrala" vinddata som används för att bestämma vindhastigheten vid en specifik plats, där det projekteras för vindkraft. Återigen tas hänsyn till de specifika faktorer som råder kring platsen där vindkraftverket ska etableras och nya beräkningar görs för att få fram vindhastigheten vid det tänkta vindkraftverket.

Därefter kan energiproduktionen för vindkraftverket beräknas med hjälp av vindhastighetens fördelning⁴ över tiden samt vindkraftverkets specifika effektkurva⁵.

De faktorer som påverkar vindens hastighet samt hur energiproduktionen beräknas beskrivs närmre i *Kapitel 3*. De matematiska ekvationer som används i WASP-modellen presenteras mer ingående i *Bilaga B*.

³ Se härledning i *Kapitel 3.4.1*.

⁴ Vindens hastighetsfördelning, eller vindens frekvens över tiden presenteras i *Kapitel 3.4.4*.

⁵ Effektkurvan för ett vindkraftverk visar vindens hastighet i förhållande till effektuttag, se *Kapitel 3.4.3*.

Programvaran som används vid modellering till detta examensarbete är en del av datorprogrammet *WindPRO 2*, som även det är framtaget av forskare på Risö National Laboratory (*WindPRO 2 2006*). I programmet finns färdiginstallerad vinddata från SMHI:s vindstationer i Sverige. Även området kring stationerna är karakteriserat och finns färdigprogrammerat. Därför behövs enbart området kring Andersfält beskrivas och digitaliseras vid modelleringen till detta examensarbete.

Nedan följer först en genomgång av den metod som användes för att beskriva området kring Andersfält, utifrån topografi, råhet samt närliggande hinder. Därefter beskrivs metoden för att utföra WASP-modelleringen med hjälp av programvaran *WindPRO 2*.

Områdesbeskrivning

För att kunna genomföra modelleringen av energiproduktionen vid Andersfält krävs att området kring vindkraftverken beskrivs utifrån rådande topografi, råhet samt närliggande hinder. Enligt Troen (1989) rekommenderas att ett område kring vindkraftverken med radien 20 kilometer karakteriseras, men det är dock viktigast att beskriva området närmast vindkraftverken. Därför definieras i detta examensarbete ett *yterområde* och ett *närområde*, där markens karaktär studeras extra ingående.

Närområdet kring vindkraftverken vid Andersfält definieras som området mellan kusten i väster, Eldsberga i norr, Genevad i öster och den södra delen av Tönnersaskogen i söder.

Yterområdet kring vindkraftverken vid Andersfält tar vid där närområdet slutar och begränsas av en radie på 20 kilometer från vindkraftverken.

Ovanstående begränsningar är relevanta eftersom markens karaktär utanför *yterområdet* inte i någon större utsträckning anses påverka produktionen för ett enskilt verk. Till exempel ligger Hallandsåsen drygt tjugo kilometer söder om vindkraftverken vid Andersfält. Troligtvis påverkar denna kraftiga landupphöjning vindhastigheten och vindriktningen vid vindkraftverken. Dock görs bedömningen att denna påverkan är lika stor för samtliga tre verk och alltså är det inte intressant att närmare studera åsens påverkan på energiproduktionen i denna studie.

För att kunna beräkna markytans påverkan på vindhastigheten studeras markens och vegetationens beskaffenhet kring vindkraftverken. *Närområdet* beskrivs utifrån information hämtad dels från kartor och dels från visuella observationer på plats. För att de visuella observationerna ska kunna granskas i efterhand fotograferas tänkbara hinder och dess koordinater noteras. När det inte finns några referenspunkter intill skog placeras en två meter hög skylt ut i terrängen. På så sätt kan skogens höjd i efterhand uppskattas. Koordinater för hinder och vegetation avläses med hjälp av en GPS (Etrex Venture). Noggrannheten för koordinaterna är beroende på hur många satellitstationer som kan nås. Till exempel minskar noggrannheten i skogsterräng då träden skymmer GPS-mottagaren. Dock görs avläsningar endast då tillräckligt många satellitstationer nås för att felmarginalen ska bli mindre än tio meter. *Yterområdet* karakteriseras enbart utifrån kartmaterial.

Närområdet och ytterområdet delas därefter in i olika områden beroende på markytans råhet utifrån de tabeller som presenteras i *kapitel 3.2.3*. För att närliggande hinder, så som skogsdungar eller enstaka byggnader, ska ha signifikant påverkan på energiproduktionen ska de vara minst en fjärdedel av navhöjden och finnas inom 1000 meter från vindkraftverket (Nielsen 2001). Områdets topografi bestäms dels utifrån höjdkurvor på kartmaterial och dels utifrån topografiska mätningar från satellit (SRTM 2000).

Modellering

Modelleringen utförs med hjälp av datorprogrammet WindPRO 2, framtaget av det danska företaget EMD (WindPRO 2 2006). Genom att utföra energiberäkningar med hjälp av beräkningsmodulen PARK beaktas även den parkeffekt⁶ som uppstår på vindkraftverken vid Andersfält. I PARK-modulen används WASP för beräkningar av energiproduktionen. WindPRO 2 är ett användarvänligt program där topografi, råhet och hinder på ett enkelt sätt digitaliseras på en kartbild i olika lager. Utgångspunkten för digitaliseringen är den områdesbeskrivning som genomförs dels på plats och dels utifrån kartmaterial. Följande kriterier gäller för digitaliseringen:

- Markens råhet beskrivs i en radie på 20 kilometer kring vindkraftverken.
- Topografi i området beskrivs med hjälp av höjdkurvor med fem meters ekvidistans i en radie på fem kilometer runt vindkraftverken.
- Närliggande hinder inom en kilometer från vindkraftverken samt högre än en fjärdedel av vindkraftverkens navhöjd (cirka sexton meter) beaktas.

Höjdkurvor över området kring Andersfält hämtas från *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*, där höjden över havet har registrerats med hjälp av satellitradar (SRTM 2000). SRTM-data är framtaget av NASA tillsammans med *National Geospatial-Intelligence Agency (NGA)* i syfte att kartlägga topografin för stora delar av jorden. De digitaliserade SRTM-höjdkurvorna jämförs och kontrolleras med höjdkurvorna från lantmäteriets *gula karta*. För att undersöka huruvida en nollplansförskjutning⁷ av skogen påverkar energiberäkningen görs en manuell digitalisering. Med hjälp av höjdkurvor höjs markytan vid Tönnersaskogen med cirka tre fjärdedelar av skogens höjd.

Utgångspunkten för alla WASP-beräkningar är vinddata från befintliga vindstationer. Vid modellering av energiproduktionen för vindkraftverken vid Andersfält används vinddata från Halmstads flygplats. Denna mätstation var i drift mellan åren 1966 till 1977 och således finns enbart data från denna period. Beräkningarna blir mer tillförlitliga om vinddata hämtas från en vindstation nära de aktuella vindkraftverken. Enligt Troen (1989) ska en mätstation inte vara längre än 100 kilometer från de aktuella vindkraftverken. Flygplatsen i Halmstad ligger cirka sexton kilometer från Andersfält och därför kan vinddata från denna station antas ge en god bild av vindens karaktär vid Andersfält.

⁶ Parkeffekten beskrivs i *Kapitel 3.3*.

⁷ Nollplansförskjutning beskrivs i *Kapitel 3.2.7*.

Förutom vinden och marken måste även de specifika vindkraftverken beskrivas. Detta görs genom att definiera vindkraftverkens koordinater, navhöjd samt vilken specifik effektkurva som är aktuell. Produktionskurvor hämtas från vindkrafttillverkarna som i detta fall är Vestas. Vid lokalisering av vindkraftverk är det ofta ljudnivån vid närboende som är begränsande för hur många vindkraftverk som kan etableras i en grupp. Vid Andersfält finns ett fåtal närliggande bostadshus och för att minimera ljudpåverkan för dessa har vindkraftverkens källjud minskats på bekostnad av energiproduktionen. Källjudet för vindkraftverken vid Andersfält är 100,0 dB(A) och därför används den specifika effektkurvan för detta källjud vid energiberäkningarna (Vestas 2004).

När samtliga kriterier har definieras i programmet utförs energiberäkningar för de tre vindkraftverken vid Andersfält. Beräkningar görs för olika råketsklasser på skogen samt med och utan nollplansförskjutning. Huvudresultatet från beräkningarna presenteras i form av årlig energiproduktion för varje vindkraftverk. I *Kapitel 3* beskrivs den teori som ligger till grund för WAsP-modellen. För en närmre genomgång av WAsP samt PARK-modellen hänvisas till *Bilaga B* och *Bilaga C*.

2.5.3 Begränsningar

WAsP-modellen är en enkel analytisk modell som baseras på en mängd förenklingar och antaganden, vilket krävs för att analysen ska bli lätthanterlig. Den *geotrofiska kraftlagen*⁸ är applicerbar under begränsade förhållande. Då detta samband används för att beräkna den geotrofiska vindhastigheten utifrån vindar nära markytan kan en osäkerhet på femton procent eller mer uppstå. Dock har det visat sig, genom verifieringar av utförda beräkningar, att osäkerheten i praktiken inte blir så stor. (Troen 1989)

Den modell som används för att beskriva hinders påverkan på vindkraftsproduktionen bygger på tvådimensionella beräkningar och det finns en osäkerhet då den appliceras på verkliga tredimensionella objekt. Dock brukar de effekter som uppstår på grund av hinder endast påverka slutresultatet med ett fåtal procent och därför har relativt stora fel vid hinderberäkningar en marginell inverkan på modellens resultat. I områden med mycket läeffekt finns ytterligare en felmarginal som har sitt ursprung i att de instrument som används för vindmätningar ofta har en begränsad pålitlighet vid låga vindhastigheter. (Troen 1989)

I modellen som beräknar vindprofilen utifrån råketslängd finns en osäkerhet som blir större för de högre råketsklasserna. I terräng som till stor del är öppen kan ett fel i storleksordningen fem procent av medelvindhastigheten uppstå medan felmarginalen kan bli upp till femton procent i terräng med råketsklass tre. (Troen 1989)

Enligt Troen (1989) förväntas störst felmarginal uppstå vid beräkningar i komplex terräng med djupa dalar och höga berg. Till exempel underskattar modellen den reduktion av vindhastigheten som uppstår i branta slutningar.

De flesta vinddata som finns tillgänglig är hämtade från låga höjder, ofta tio meter över markplan. På höjder över 50 meter påverkas vinden i större utsträckning av den värmetransport som sker mellan markytan och olika luftskikt. Därför förväntas pålitligheten av modellens resultat att minska då beräkningar av vindhastigheter görs på högre höjder. (Troen 1989)

⁸ Den *geotrofiska kraftlagen* finns beskriven i *Bilaga B*.

Bergströms studier pekar på ett flertal begränsningar med den enklare WAsP-modellen. Till exempel klarar modellen inte av att beskriva vindklimatet i komplex terräng i det svenska fjällskapet. Även då en jämförelse mellan uppmätta resultat och beräknade med hjälp av WAsP görs vid Kalmarsund uppstår relativt stora differenser. (Bergström 2007)

Eftersom syftet med detta examensarbete delvis är att undersöka hur väl en befintlig modell beskriver vindklimatet vid Andersfält är det viktigt att beakta ovanstående begränsningar när resultatet från modelleringen utvärderas. Därför kommer begränsningarna diskuteras ytterligare i de avslutande kapitlen till detta examensarbete.

3. Vindkraftsmeteorologi och WAsP

Vindens riktning och styrka kan verka slumpartad, men i själva verket är det stora meteorologiska system som transporterar luftmassor mellan länder och kontinenter. Den kraft som finns i vinden har använts av människor för att utvinna energi under lång tid. Den första dokumenterade väderkvarnen fanns i Persien och byggdes 947 e.Kr (Wizelius 2003). Sedan dess har det varit intressant att finna platser där det blåser mycket och därför har med tiden vindkraftsmeteorologin utvecklats.

För att uppnå arbetets syfte med att utreda huruvida skog påverkar energiproduktionen måste även andra faktorer studeras. I följande kapitel beskrivs därför utifrån ett vindkraftsperspektiv vindars uppkomst, samt de fenomen som uppstår nära markytan och som påverkar vindens karaktär. Därefter beskrivs vilka aspekter som beaktas då uppskattningar av energiproduktionen i ett vindkraftverk görs. Slutligen presenteras några tidigare studier där WAsP har använts. I detta kapitel definieras även de olika meteorologiska begrepp som använts i examensarbetet. Eftersom WAsP valts ut i denna studie för att beskriva energiproduktionen vid Andersfält är utgångspunkten den teori som ligger till grund för denna modell.

3.1 Vindars uppkomst

Rörelser i atmosfären sker inom en bred skala. Det kan vara allt ifrån små millimeterstora virvlar till enorma världsomspännande vindar. Normalt sett delas meteorologin in i tre olika klasser: *mikro-*, *meso-* och *makrometeorologi*. Ibland används termerna lokal, regional och global för att kategorisera de olika skalorna och de fenomen som associeras med dem. (Arya 2001)

Luftens rörelse i atmosfären styrs i princip av tre krafter: *gravitation*, *tryckgradient* och *Coriolis*. Eftersom vindar i huvudsak rör sig i horisontal led kan gravitationskraften uteslutas och kvar återstår endast två krafter, som båda verkar på global och till viss mån regional nivå. Drivkraften för alla vindar är den tryckgradient som uppstår när jorden värms upp olika mycket på olika platser och under olika tidsperioder, vilket är ett resultat av jordens rotation kring sin egen axel samt runt solen. Även det faktum att jordens axel lutar gör att uppvärmningen av jordytan inte är konstant över tid och rum. Då atmosfären ständigt strävar efter att jämna ut tryckskillnaderna transporteras luftmassor från områden med högt tryck till områden med lågt tryck. Då luftmassorna rör sig över stora områden påverkas de av *Coriolis-kraften* som är ett resultat av jordens rotation kring sin egen axel och nedan beskrivs detta fenomen. (Jacob 1999)

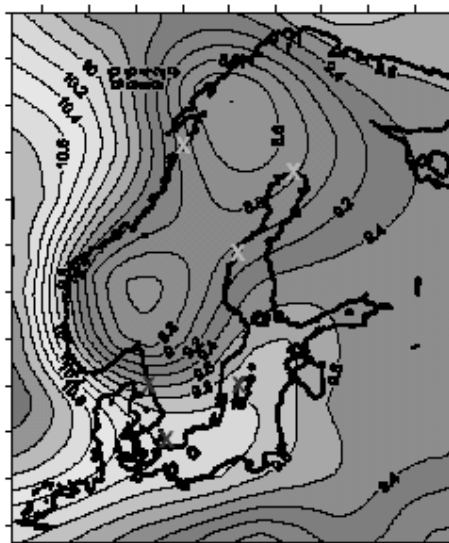
Om jordens rotation studeras från ett rymdperspektiv cirkulerar ett tänkt objekt på en bestämd latitud ett varv på 24 timmar. Eftersom rotationstiden är den samma cirkulerar ett objekt med högre hastighet vid polerna jämfört med ekvatorn och det är denna skillnad i hastighet som ger upphov till *Coriolis-kraften*. Om en person står på ekvatorn och kastar en boll till en annan person som står i Sverige kommer bollens bana från ett rymdperspektiv inte vara rak. Från rymden kommer nämligen personen i Sverige röra sig runt jorden med en högre hastighet än personen vid ekvatorn, vilket får till följd att bollens bana viker av åt höger, med jordens rotation. (Jacob 1999)

Coriolis-kraften är noll vid ekvatorn och ökar med latituden. Den påverkar bara transporter som sker över stora avstånd som till exempel när luftmassor rör sig från en region till en annan. Då ett högtryck bildas på det norra halvklotet transporteras vindarna ut från högtryckets centrum samtidigt som de viks av mot höger av *Coriolis-kraften*. Vid ett lågtryck transporteras vindarna mot centrum samtidigt som de viks av åt höger. Detta får till följd att på det norra halvklotet transporteras vindar medurs runt ett högtryck och moturs runt ett lågtryck. Det motsatta gäller för det södra halvklotet. (Jacob 1999)

De vindar som uppstår av tryckskillnader och som påverkas av *Coriolis-kraften* kallas *geostrofiska vindar*. På makronivå styrs dessa vindar av stora vädersystem som i Europa präglas av tre faktorer: (Troen 1989)

- Den stora temperaturskillnaden mellan polarluften i norr och den subtropiska luften i söder.
- Värmeöverföringen mellan hav och land med Atlanten i väst, Asien i öst och Medelhavet inklusive Afrika i söder.
- De kraftiga landupphöjningarna som utgörs av Alpena, Pyrenéerna och den skandinaviska bergskedjan.

I Sverige präglas klimatet av de lågtryck som bildas över Atlanten och som sedan rör sig österut över Storbritannien och Skandinavien. Medelhastigheten för de *geostrofiska vindarna* över Sverige är cirka tio meter per sekund. Dock varierar medelvindhastigheten över året och under vintermånaderna kan den uppgå till tolv meter per sekund för att under sommarmånaderna sjunka till åtta sekundmeter. I Sverige är den *geostrofiska* vindhastigheten högst i söder, vilket åskådliggörs i *Figur 3*. (Troen 1989)



Figur 3. Årliga medelvindhastigheten för den geostrofiska vinden över Norden. Ljusare nyans innebär högre vindhastighet. Vindhastigheten är beräknad utifrån observationer gjorda i Lund, Visby, Göteborg, Bodö, Härnösand och Haparanda mellan år 1957 och 2002. (Bergström 2004)

3.2 Vindar nära markytan

Nära markytan påverkas den *geostrofiska* vinden av en motstående friktionskraft, som är resultatet av markens ojämnheter, den så kallade råheten. Även vertikala lufrörelser, som skapas då jordytan värms upp av solens instrålning, påverkar vindens hastighet nära markytan. Det luftlager där atmosfäriska fenomen samt processer påverkas av jordens ytskikt benämns i engelsk litteratur *Planetary Boundary Layer* (PBL) och enligt Arya (2001) är definitionen av *boundary layer* följande:

A boundary layer is defined as the layer of a fluid (liquid or gas) in the immediate vicinity of a material surface in which significant exchange of momentum, heat, or mass takes place between the surface and the fluid. (Arya 2001)

PBL:s tjocklek kan variera från ett tiotal meter till flera kilometer och beror bland annat på jordytans topografi, markens råhet, vindstyrka samt i vilken omfattning ytan värms upp respektive kyls ner (Arya 2001). Vindkraftverk har normalt en totalhöjd i storleksordningen 80 till 150 meter, vilket innebär att de effekter som uppstår i PBL måste beaktas då vindkraftverk etableras.

Vindhastigheten i PBL påverkas av en mängd olika fysikaliska fenomen som beskrivs i kapitlen nedan. Först definieras grundbegreppet turbulens.

3.2.1 Turbulens

År 1883 visade *Osborne Reynold*, genom att studera strömningar i vatten, att det finns två olika typer av flöden, *laminärt* och *turbulent*. Det turbulenta flödet är, i motsats till det laminära, oregelbundet och rörelserna följer inte något bestämt mönster. De fysiska lagarna inom strömningslära skiljer inte på vatten- och luftströmmar. Eftersom syftet med detta arbete är att studera vindens egenskaper beskrivs nedan turbulensen utifrån luftflöden. (Finnemore 2002)

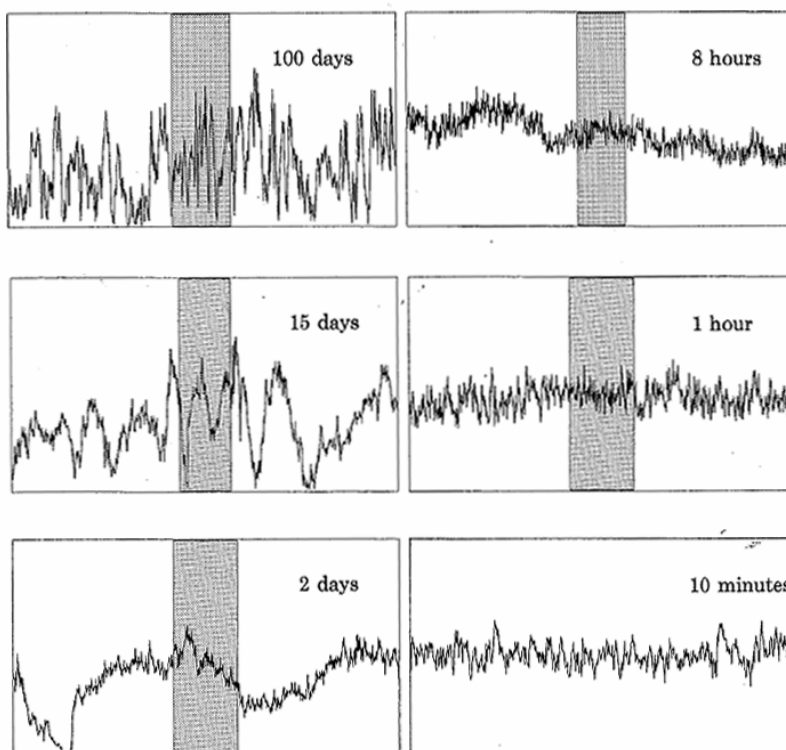
Turbulent flöde karakteriseras av ständiga variationer av flödes hastigheten vid alla punkter i luftmassan. Dessa variationer i hastighet uppkommer av att många små luftpartiklar eller luftpaket stöter i varandra på ett tillsyns slumpartat sätt, samtidigt som de rör sig i vindens riktning. Luftpaketens individuella rörelse har orsakats av integrationer mellan andra luftpaket eller mellan andra skikt, som till exempel markytan. Då luftpaketet hakar i varandra skapas ofta en rotationsrörelse och små virvlar uppkommer. Rörelseenergin i en virvel överförs till dess omgivning för att till sist försvinna. Nya virvlar uppstår ständigt och dess storlek och form varierar med tiden. Den ständiga oregelbundna rörelsen i ett turbulent flöde gör det mycket svårt att till exempel beräkna energiinnehållet i en kraftigt turbulent luftmassa. De små variationerna i vindhastighet kan oftast enbart mätas med en snabbreagerande instrument som till exempel en *hot-film anemometer*⁹. (Finnemore 2002)

Vid mätningar av vinddata visar det sig att både vindhastigheten och vindriktningen kraftigt varierar med tiden, vilket åskådliggörs i *Figur 4*. Den första grafen i *Figur 4* illustrerar variationer i vindhastighet över 100 dagar. Därefter zoomas grafen in till en mindre och

⁹ En hot-film anemometer är ett ytterst känsligt instrument som kan mäta de små hastighetsvariationerna som råder i turbulent flöde. Anemometern består av en metallfilm som elektroniskt känner av vindens hastighet. (Finnemore 2002)

mindre del av serien och slutligen visar vindhastigheten uppmätt med tio minuters medelvärde. Figuren visar tydligt att den relativa variationen är mycket större vid en längre tidsskala än då en tidsskala på en timme eller mindre används. (Troen 1989)

De mekanismer som styr vindens framfart förändras långsamt med variationer i väder och detta kan alltså inte förklara de hastiga variationer av vindhastighet och vindriktning som uppkommer vid en specifik plats. Dessa variationer är istället ett resultat av den turbulens som skapas på grund av bland annat markens ojämnheter. (Troen 1989)



Figur 4. Mätning av vindhastigheten på 30 meters höjd i slät homogen terräng i Danmark. Varje graf visar den uppmätta vindhastigheten för olika tidsperioder. (Troen 1989)

Turbulensens intensitet I_u definieras som kvoten mellan vindhastighetens standardavvikelse, σ_u , och tiominuters medelvindhastighet, U_{10} (Thögersen 2005).

$$I_u = \sigma_u / U_{10} \quad (1)$$

Intensiteten är noggrant studerat och för *neutrala förhållanden*¹⁰ med en *logaritmisk vindprofil*¹¹ över slät terräng kan intensiteten approximativt uppskattas med hjälp av följande samband: (Petersen 1998a)

$$I_u = 1 / \ln(z/z_0) \quad (2)$$

¹⁰ Neutrala förhållanden beskrivs i Kapitel 3.2.6.

¹¹ Olika vindprofiler presenteras i Kapitel 3.2.3.

där z är höjden över marken och z_0 är råhetslängden¹². Typiska värden för intensiteten på 50 meters höjd är; för öppna fält cirka tretton procent, hav cirka åtta procent och komplex terräng eller skog kan intensiteten vara tjugo procent eller mer (Thøgersen 2005).

Turbulensens intensitet är beroende av jordytans topografi, höjden över markytan, råhetslängden och luftens stabilitet (Thøgersen 2005). För att ge en bild av hur dessa faktorer påverkar vinden beskrivs var och en i kommande kapitel.

3.2.2 Topografi

Termen topografi används i detta examensarbete för att beskriva terrängens variationer i höjddled, i förhållande till havsnivån. I kartmaterial används oftast höjdkurvor för att visualisera landskapets topografi. För att beskriva hur topografien påverkar vindhastigheten delar Petersen (1998b) in landskapet i tre enkla klasser: *slättlandskap*, *kuperat landskap* och *bergslandskap*. I slättlandskap, långt från bergsområden, kan de topografiska effekterna försummas och terrängens råhet är därmed den viktigaste faktor då vindens egenskaper ska bestämmas. Kuperat landskap karakteriseras av mestadels mjuka kullar vars sluttningar lutar mindre än 30 procent. Typiska horisontella dimensioner på kullarna är några kilometer eller mindre. Om kullarna är mjuka i sin utformning kan det vara en fördel att placera vindkraftverk på toppen av en kulle eftersom vindhastigheten där är högre än i dalen. Detta kan enkelt förklaras med att samma mängd luft som transporteras över slätten ska transporteras över en upphöjning, vilket enbart kan ske om transporten över upphöjningen sker snabbare och således blir vindhastigheten högre på en kulle (Troen 1989). När terrängen övergår till brantare sluttningar och kraftiga höjdskillnaderna mellan berg och dal blir det betydligt svårare att uppskatta vindens utbredning med enklare linjära modeller som till exempel WASP. Bergslandskap karakteriseras av att sluttningar är brantare än 30 procent och den horisontella dimensionen på upphöjningarna är flera kilometer. De topografiska variationerna påverkar då i allra högsta grad vindens framfart i PBL. Oftast används begreppet *komplex terräng* för att beskriva ett landskap vars topografi består av djupa dalar och berg med branta sluttningar. Uppskattningar av vindens hastighet i komplex terräng kräver avancerade modeller, som till exempel MIUU-modellen. (Pedersen 1997)

3.2.3 Vindprofil och markytans råhet

Vindens hastighet i PBL ökar från markytan där den i princip är noll till toppen av PBL där vindhastigheten inte längre påverkas av markens karaktär. Detta kan på ett enkelt sätt förklaras genom att turbulenta virvlar uppstår vid markytan då vinden blåser över ett landskap. Virvlarnas storlek beror på hur markytan är formad samt den vegetation eller bebyggelse som finns i området. Dessa virvlar närmast markytan påverkar vinden ovanför, där nya och något mindre turbulenta virvlar skapas och som i sin tur påverkar vinden ovanför. På så sätt ökar den horisontella vindhastigheten med ökad höjd över markplan. I PBL beskrivs vindens variation i höjddled bäst med en så kallad *vindprofil* och enligt van Lieshout (2004) finns det två olika matematiska uttryck som beskriver vindens hastighet i höjddled:

Exponentiell vindprofil:

$$v_{hub} = v_{ref} \left(\frac{h_{hub}}{h_{ref}} \right)^\alpha \quad (3)$$

¹² Råhetslängd finns beskriven i *Kapitel 3.2.3*.

där v är vindhastigheten vid referenspunkt (*ref*) samt navhöjd (*hub*) och h är höjden över havet. För ett böljande landskaps sätts konstanten α normalt till en sjundedel. För skogsområden, förorter och mindre städer kan detta värde vara upp till 0,3 medan det kan vara så lågt som 0,1 över öppna hav.

Vindprofil där hänsyn tas till markytans råhet:

$$v_{hub} = v_{ref} \frac{\ln\left(\frac{z_{hub}}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \quad (4)$$

I ovanstående matematiska uttryck används beteckningen råhet för att beskriva i vilken omfattning markytan bromsar vinden. Råheten beskrivs normalt med en råhetslängd z_0 i enheten meter och beskriver den teoretiska höjd över ytan där vindhastigheten är noll. Den ger ett mått på den vertikala turbulensen som uppstår när det blåser över en skrovlig yta. Ju större råhetslängd desto mer turbulens bildas när vinden passerar över markytan. För en alldeles slät yta är råhetslängden noll och det uppstår då ingen turbulens på grund av markytans ojämnheter. Råhetslängden kan empiriskt tas fram för en specifik plats genom att mäta vindhastigheten på ett antal höjder över markytan. Därefter plottas den naturliga logaritmen av höjden mot vindhastigheten och råhetslängden är där den linjära kurvan skär y-axeln. I *Tabell 1* presenteras ett antal uppmätta råhetslängder för olika marktyper. (Jacobson 1999)

Tabell 1. Råhetslängden (z_0) för olika marktyper samt råhetselementens höjd (h). (Jacobson 1999)

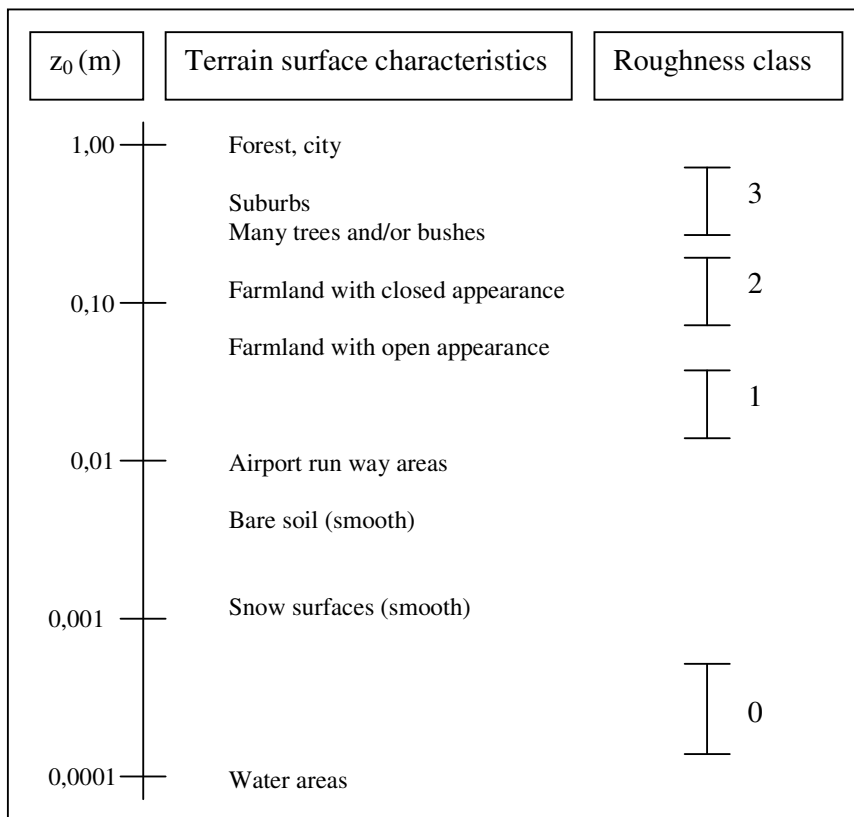
Markyta	Råhetslängd z_0 (m)	Råhetselementens höjd (m)
Slät sjö	0,00001	
Grov sjö	0,000015-0,0015	
Is	0,00001	
Snö	0,00005-0,0001	
Öken	0,0003	
Kort gräs	0,03-0,01	0,02-0,1
Långt gräs	0,04-0,1	0,25-1,0
Savann	0,4	8
Odling med grödor	0,04-0,2	0,4-2
Fruktodling	0,5-1,0	5-10
Barrskog	0,28-3,9	10,4-27,5
Tropisk skog	2,2	35

Råhetslängden kan även beskrivas utifrån ett empiriskt samband som tar hänsyn till råhetselementets höjd h och den yta av elementet som är riktad mot vinden S . Vidare är råhetslängden beroende på hur tätt elementen står och detta beskrivs genom den genomsnittliga horisontella ytan A_H , som finns mellan elementen. (Troen 1989)

$$z_0 = 0,5 \cdot \frac{h \cdot S}{A_H} \quad (5)$$

Detta samband har visat sig ge en god uppskattning av z_0 om A_H är mycket större än S . Dock tenderar sambandet att överskatta z_0 när A_H är i samma storleksordning som S . Detta beror på att vindens karaktär förändras kraftigt då råhets-elementen står tätt, som till exempel i en skog. De fenomen som uppstår då det blåser över skog beskrivs i *Kapitel 3.2.7*. (Troen 1989)

När WASP-modellen applicerades för vindkartering över Europa var forskarna på Risö tvungna att på ett enkelt sätt, ofta utifrån kartmaterial, kunna avgöra vilken råhet markytan hade. Därför definierades fyra olika *råhetsklasser*. I *Figur 5* visas relationen mellan råhetslängd, landskapstyp och råhetsklass. (Troen 1989)



Figur 5. Relationen mellan råhetslängd (z_0), landskapstyp samt råhetsklass. (Troen 1989)

Ett landskaps karaktär förändras med tiden vilket innebär att råheten inte är konstant. I till exempel ett jordbrukslandskap sker en långsam förändring under våren samt sommaren då grödor växer och på hösten blir förändringen drastisk då de skördas. Under vintern täcks landskapet eventuellt av ett snötäcke som även det ändrar betingelserna för markens påverkan

på vinden. I ett skogsbruk varierar råheten också över tiden då träd växer och områden slutavverkas. Råhetslängden är även beroende på vindhastigheten då till exempel trädens toppar böjds vid hård vind. Ett liknande fenomen kan uppstå över vatten då vinden påverkar vågornas höjd och form. Råhetslängden över vatten kan beskrivas med *Charnocks samband*: (Troen 1989)

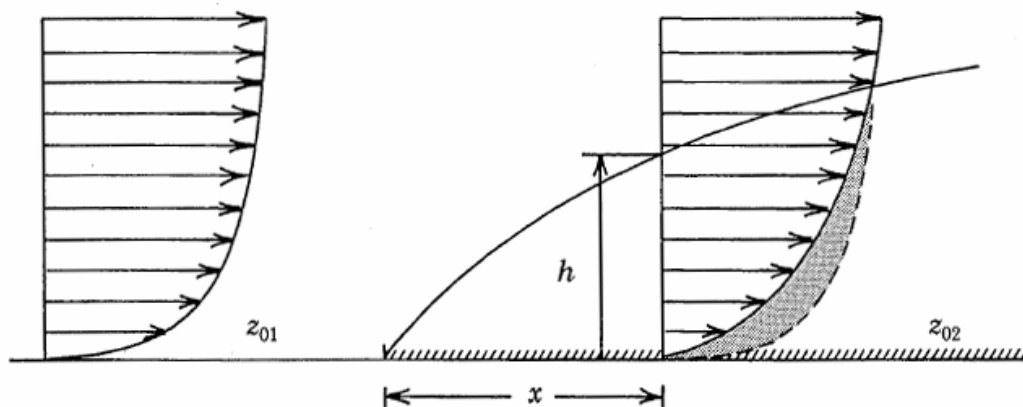
$$z_0 = b \frac{u_*^2}{g} \quad (6)$$

där b är en konstant ($b = 0,014$), g är gravitationskonstanten ($g = 9,81$) och u_* är den så kallade *friktionshastigheten*¹³.

Under arbetet med att ta fram en vindatlas över Europa prövades dels *Ekvation 6* för att bestämma råheten över vatten och dels ett bestämt värde på råhetslängden. För normal till hög vindhastighet visade det sig att råhetslängden 0,0002 meter gav ett lika bra resultat som *Ekvation 6* och därför användes detta bestämda värde för råheten över vatten vid vindkartering över Europa. (Troen 1989)

3.2.4 Övergångseffekter mellan olika råheter

I verkligheten är ett landskap inte homogent utan det sker ständiga övergångar mellan olika råheter då vinden transporteras över ett landskap. När en luftmassa färdas över ett öppet fält infinner sig en viss balans mellan markens friktion och den *geostrofiska* vinden. Denna balans kan åskådliggöras med en vindprofil för den specifika råheten. När markens karaktär förändras, till exempel om det efter fältet växer en skog, rubbas denna balans eftersom skogen ger upphov till större friktion. De turbulenta virvlarna som uppstår förändrar vindens hastighet, vilket kan åskådliggöras med en ny vindprofil. Efter ett tag infinner sig en ny balans mellan skogens friktion samt den *geotrofiska* vinden och denna balans råder tills markens karaktär på nytt förändras. I *Figur 6* illustreras det fenomen som beskrivits ovan. (Troen 1989)



Figur 6. Illustration över hur vindprofilen förändras vid en råhetsövergång. (Troen 1989)

¹³ Friktionshastigheten beskrivs närmre i *Bilaga B*.

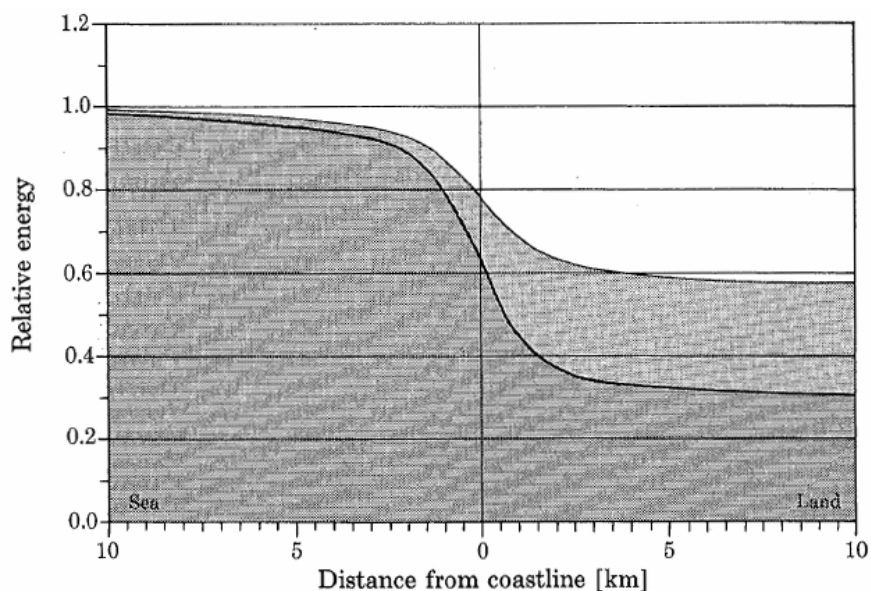
Det luftlager där det sker en förändring av vindhastigheten benämns i engelsk litteratur som *Internal Boundary Layer* (IBL). I *Figur 6* beskriver beteckningen h IBL:s höjd som är beroende på avståndet från råhetsövergången, x och kan beräknas utifrån följande ekvationer: (Troen 1989)

$$\frac{h}{z'_0} \left(\frac{h}{z'_0} - 1 \right) = konst \cdot \frac{x}{z'_0} \quad (7)$$

$$z'_0 = \max(z_{01}, z_{02}) \quad (8)$$

Om ett vindkraftverks navhöjd är högre än h kan terrängen antas vara homogen eftersom vindhastigheten vid navhöjden då inte har förändrats och råhetsövergången kan då försummas. Om däremot navhöjden är lägre än h måste hänsyn tas till den förändrade råheten vid beräkning av energiproduktionen. (Troen 1989)

När luftmassor transporteras från hav till land och vice versa uppstår effekter som har stor betydelse för vindens energiinnehåll. Utöver skillnaden i råhet påverkas vindens hastighet även av de termiska skillnader som finns mellan land- och havsområden. Långt ifrån kusten är det antingen marint- eller inlandsklimat. I kustnära områden är det en mix av de båda klimaterna och denna mix uppstår inom ett område cirka tio kilometer från kusten. *Figur 7* visar i vilken omfattning vindens relativa energiinnehåll minskar vid en kust i Nederländerna. (Troen 1989)



Figur 7. Grafen visar den relativa energiproduktionen på 50 meters höjd beräknad som en funktion av avståndet till den norra havskusten i Nederländerna. Landskapet har råhetsklass 1 (den övre kurvan) och råhetsklass 3 (den nedre kurvan). (Troen 1989)

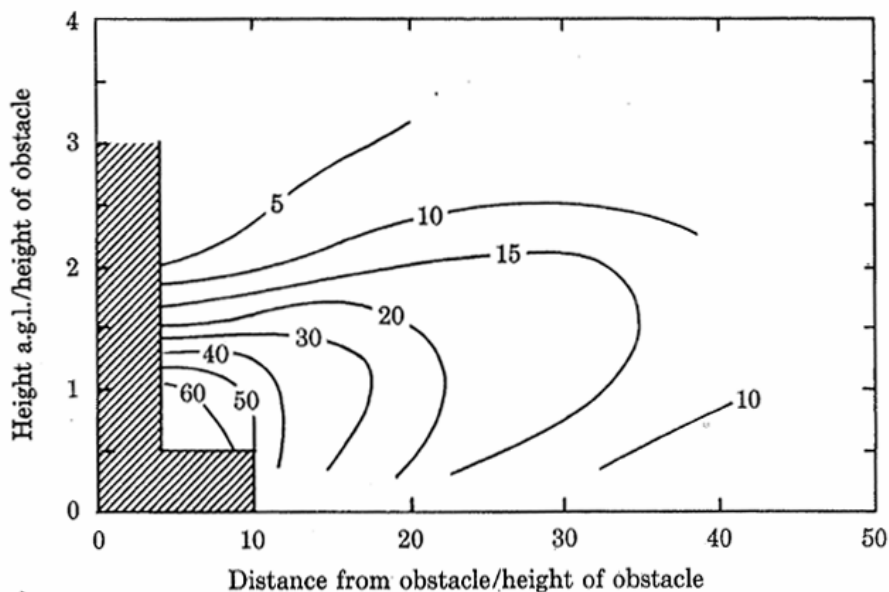
3.2.5 Lä bakom hinder

Skogsdungar och enstaka hus i en för övrigt öppen terräng fungerar som hinder för vindens framfart. Bakom dessa hinder förändras vindens karaktär drastiskt och en placering av vindkraftverk i ett hindrets direkta närhet påverkar tillika vindkraftverkens energiproduktion. Approximativt sker en märkbar förändring av vindens energiinnehåll i vertikalled tre gånger hindrets höjd och nedströms 30 till 40 gånger hindrets höjd. (Troen 1989)

Lä definieras som en relativ reduktion av vindhastigheten orsakad av ett hinder i terrängen. Huruvida ett hinder skapar lä på en specifik plats beror på fem faktorer: (Troen 1989)

- Avståndet mellan hindret och den studerade platsen, x .
- Hindrets höjd, h .
- Den studerade platsens höjd, H .
- Hindrets längd, L .
- Hindrets porositet, P .

Figur 8 visar den procentuella minskningen av vindens hastighet bakom ett oändligt långt, två-dimensionellt hinder som inte släpper igenom någon vind, det vill säga porositeten är noll. Ett sådant hinder skulle kunna vara en byggnad medan ett enstaka träd har en ungefärlig porositet på 0,5. Den effekt porositeten har på vinden bestäms genom att multiplicera vindens hastighet med $(1-P)$. Ytterligare en viktig aspekt är hindrets längd. De empiriska samband som är framtagna utgår från ett två-dimensionellt och oändligt långt hinder. Läeffekten från verkliga hinder med begränsad längd blir mindre eftersom vinden då mixas bakom hindret. (Troen 1989)



Figur 8. Reduktion av vindhastighet (R_1) i procent från ett enstaka hinder i landskapet. I det skuggade området är vindhastigheten kraftigt beroende på hindrets specifika utseende och därför går det ej att ge en generell bild av påverkan. (Troen 1989)

Den på grund av hinder korrigerade medelvindhastigheten, v_{cor} kan approximativt uppskattas med hjälp av *Figur 8*, *Ekvation 8* samt *Ekvation 9*. (Troen 1989)

$$v_{cor} = v \cdot (1 - R_2 \cdot R_1(1 - P)) \quad (9)$$

där v är medelvindhastigheten utan hinder, R_1 är reduktionen av vindhastigheten och avläses i *Figur 8*. R_2 beror på avståndet till hindret, x , och hindrets höjd, L , enligt *Ekvation 10*, som är framtagen utifrån enkla geometriska samband. (Troen 1989)

$$R_2 = \begin{cases} \left(1 + 0,2 \frac{x}{L}\right)^{-1} & \text{för } \frac{L}{x} \geq 0,3 \\ 2 \frac{L}{x} & \text{för } \frac{L}{x} \leq 0,3 \end{cases} \quad (10)$$

3.2.6 Luftens stabilitet

Luftmassor rör sig inte bara i horisontal led utan de stiger och sjunker också beroende på vilken temperatur de har i förhållande till omgivningen. Denna vertikala rörelse påverkar i allra högsta grad uppkomsten av turbulens och det är därför av vikt att beakta dessa effekter vid modellering av vindhastighet. Nedan beskrivs den vertikala rörelsen i stabila, instabila och neutrala förhållanden:

A representerar ett luftpaket på höjden z i atmosfären. Anta att en utomstående kraft lyfter paketet A från höjden z till $z + dz$. Eftersom lufttrycket avtar med höjden expanderar luftpaketet A då det stiger. Om luftpaketet antas vara adiabatiskt, det vill säga inget värmeutbyte sker med omgivningen, kyls luftpaketet ner enligt termodynamikens allmänna gaslag¹⁴. Det kan tyckas att luftpaketet borde sjunka tillbaks till dess utgångsposition då det kyls ner och blir tyngre, men detta är inte självklart eftersom temperaturen på den omgivande luftmassan också normalt sätt minskar med höjden. Huruvida luftpaketet fortsätter att stiga beror alltså på hur omfattande den adiabatiska nedkylningen är i förhållande till den omgivande atmosfärens temperaturskillnad i höjdd. Om temperaturen i luftpaketet är högre än temperaturen i den omgivande atmosfären leder det till en lägre densitet i luftpaketet som då stiger upp. Atmosfären sägs då vara *instabil*. Då motsatta förhållande råder, det vill säga temperaturen i luftpaketet är lägre än temperaturen i den omgivande atmosfären på höjden $z + dz$, innebär det att luftpaketet sjunker tillbaks till sin ursprungsposition och atmosfären sägs då vara *stabil*. (Jacob 1999)

Atmosfären kan teoretiskt också vara *neutral*, men detta är mycket ovanligt och förekommer endast korta stunder när atmosfären går från *stabil* till *instabil* eller vice versa. Dock kan *nära neutrala* förhållanden uppkomma vid tät molnighet eller vid höga vindhastigheter. (Petersen 1998a)

¹⁴ $pV_m = R_a T$ där p är absolut tryck, V_m är molvolym, R_a är allmänna gaskonstanten som är 8314 J/kmolK och T är temperaturen (Näslund 2003).

Speciellt vid låga vindhastigheter har atmosfärens stabilitet stor betydelse för uppkomsten av turbulens. Jämfört med neutrala förhållanden bildas mindre turbulenta strömmar då atmosfären är *stabil* och vinden blir mer turbulent då atmosfären är *instabil*. Över slät och öppen terräng kan turbulensens intensitet öka med mer än tio procentenheter då atmosfären går från neutral till instabil. (Petersen 1998a)

3.2.7 Vindar över skog

Vindprofilen över skog skiljer sig åt från vindprofilen över till exempel slättlandskap. Det har visat sig att en högre råhetsgrad inte är tillräckligt för att beskriva vindprofilen över skogsområden. (Dellwik 2006)

Genom att införa en så kallad nollplansförskjutning lyfts markytan till en virtuell nivå mellan trädtopparna och den verkliga markytan. Vid grov approximering antas nollplansförskjutningen vara cirka tre fjärdedelar av skogens höjd (Bergström 2004). I *Figur 9* illustreras en ungefärlig vindprofil över en lövskog, där d är nollplansförskjutningen och z_0 är råhetslängden.



Figur 9. En schematisk bild över hur vindprofilen kan se ut över en lövskog. Beteckningen d visar nollplansförskjutningen och z_0 är råhetslängden. (van Lieshout 2004)

Det uppstår även andra mer komplexa fenomen när det blåser ovanför skog. Dessa fenomen uppstår eftersom det över skog finns ett lager där ett signifikant utbyte till turbulent rörelse kommer ifrån sammanhängande virvlar i samma storleksordning som trädtopparna. Detta lager kallas i engelsk litteratur *roughness sublayer* och där gäller inte de kända teorier som beskriver luftens stabilitet samt vindprofil. Ett flertal av de fenomen som uppkommer i *roughness sublayer* kan förklaras med att det uppstår ett så kallat *analogt till plant mixlager* vilket karakteriseras av två flöden med olika hastigheter. I fallet med skog uppstår ett flöde med låg hastighet under trädtopparna och ett flöde med högre hastighet ovanför. De olika flödes hastigheterna ger upphov till en kraftig gradient och vindprofilens karaktär förändras plötsligt nära trädtopparna, vilket i sin tur ger upphov till de större turbulenta virvlarna i storleksordningen av trädtoppar. Höjden på *roughness sublayer* är beroende på hur tätt träden står samt trädtopparnas karaktär, till exempel om det är löv eller barr. Trädtopparnas täthet definieras i allmänhet med ett index λ , som definieras med följande samband: (Dellwik 2006)

$$\lambda = bh/D^2 \quad (11)$$

där b är trädens bredd, h är trädens höjd och D är det typiska avståndet till närliggande träd.

3.3 Parkeffekt

Många länsstyrelser och kommuner förordar att vindkraftverk placeras i grupper om tre eller fler. Det anses nämligen påverka landskapsbilden mindre om verken placeras i grupper och myndigheter ser gärna att områden där det projekteras för vindkraft utnyttjas maximalt. (Simmingsköld 2007)

I princip skulle vindkraftverken kunna placeras med en rotordiameters avstånd från varandra. Det skulle då kunna etableras en stor mängd vindkraftverk på en mindre yta, men samtidigt skulle energiproduktionen per verk bli lägre eftersom vindkraftverken i gruppen lär varandra. Det fenomen som uppstår bakom rotorbladen på ett vindkraftverk och som påverkar energiproduktionen för bakomvarande verk kallas *parkeffekt*. Närliggande vindkraftverk har en märkbar påverkan på vindens egenskaper på ett avstånd av tio rotordiametrar (Petersen 1998a). Vid etablering av vindkraftsgrupper rekommenderas normalt sett ett minsta avstånd mellan verken på fem gånger rotordiametern (Vestas 2004). På detta avstånd beräknas vinden ha återhämtat sig från den turbulens som uppstår nedströms rotorbladen.

Påfrestningarna på mekaniken i ett vindkraftverk blir mer omfattande när vinden är turbulent. För att komponenterna i ett vindkraftverk ska kunna designas på ett optimalt sätt har det under en tid funnits intresse att studera hur vindkraftverk påverkar varandra. Ett flertal modeller, som beskriver de fenomen som uppstår bakom ett vindkraftverk, har tagits fram (till exempel: Verheij 1992, Mann 1998, Veers 2001 och Thøgersen 2005).

I detta examensarbete används en enkel vakmodell framtagen av N.O Jensen. Utgångspunkten för modellen är *Bernoullis ekvation* som fastslår att energin i en ideal ström är konstant enligt följande samband: (Thøgersen 2005)

$$\frac{\rho V^2}{2} + P = H$$

där ρ är luftens densitet, V är vindhastigheten, P är trycket och H är den totala energin som är konstant längs med en luftström. Då vinden transporteras genom en ideal turbin är således energin uppströms turbinen lika med energin nedströms då den energi turbinen tagit upp subtraherats. Genom att applicera *Bernoullis ekvation* framför och bakom rotern kan vindhastigheten nedströms vindturbinen beräknas. En mer utförlig beskrivning av N.O Jensens vakmodell återfinns i *Bilaga C*.

3.4 Energiproduktion

Lönsamheten för ett vindkraftverk är beroende på hur mycket energi som verket kan producera samt till vilket pris energin kan säljas. Eftersom elpriset bestäms utifrån tillgång och efterfrågan på en gemensam nordisk marknad¹⁵ är det enbart energiproduktionen som kan beaktas vid projektering. Energiproduktionen är i sin tur beroende av två huvudfaktorer: vindens energiinnehåll och vindkraftverkets förmåga att ta upp denna energi. I kommande avsnitt beskrivs hur energiproduktionen för vindkraftverk kan uppskattas.

¹⁵ Det svenska elpriset kan följas på *Nord Pools* hemsida www.nordpool.se.

3.4.1 Vindens energiinnehåll

Ett vindkraftverks elproduktion är helt beroende av hur mycket energi det finns i vinden vid den specifika platsen. För att karakterisera vinden används ofta en genomsnittlig vindhastighet för en viss period. Med utgångspunkt av *Newtons andra lag* samt definitionen för arbete kan rörelseenergin W_k som funktion av vindhastigheten v beskrivas med följande samband: (Reistad 2002)

$$W_k = mv^2/2 \quad (12)$$

där m är massflödet som enligt definition är:

$$m = \rho Av \quad (13)$$

där ρ är luftens densitet och A är arean. Således kan vindens rörelseenergi med *Ekvation 12* och *13* uttryckas som:

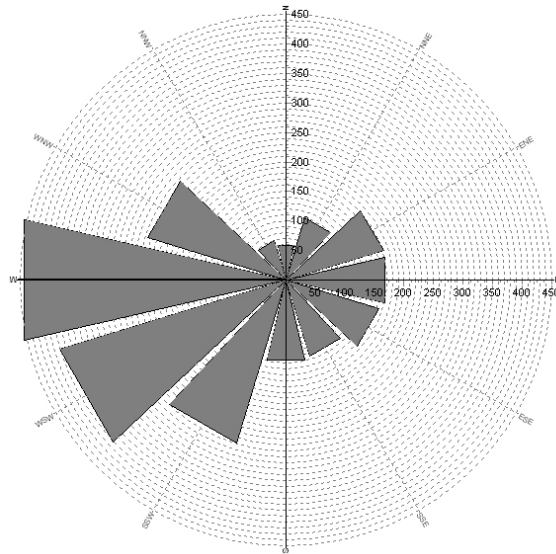
$$W_k = \rho Av^3/2 \quad (14)$$

Utifrån ovanstående resonemang framgår det att vindens rörelseenergi är proportionell mot vindens hastighet i kubik, vilket innebär att när vindens hastighet fördubblas ökar dess energiinnehåll åtta gånger. Vid lokalisering av vindkraftverk är det alltså av yttersta vikt att finna den plats där vindens hastighet är som högst.

Aerodynamiska och fysiska lagar gör att det inte går att utnyttja all energi i vinden. Enligt *Betz lag* kan maximalt 59 procent av vindens energi tas tillvara i en vindgenerator (Reistad 2002). En enkel förklaring till detta fenomen är att om mer energi skulle tas ut från vinden skulle det inte finnas energi kvar att transportera bort luften bakom rotorbladen och verket skulle då inte rotera.

3.4.2 Vindens riktning

Om vindens riktning och hastighet mäts under en längre tid kan vindens energiinnehåll från olika vädersträck kartläggas. Uppgifter om vindens riktning i ett tänkt vindkraftsområde är av betydelse vid projektering eftersom det är utgångspunkten för hur vindkraftverken placeras. Om den förhärskande vindriktningen är västlig är det lämpligast att placera vindkraftverken i en syd-nordlig rad, eftersom parkeffekten då minimeras. Det är även viktigt att placera vindkraftverken så att vinden från väster kan transporteras ostört till vindkraftverken. Till exempel bör vindkraftverken placeras väster om en skogsdunge om den förhärskande vindriktningen är västlig. Vindens riktning vid en specifik plats kan på ett enkelt sätt åskådliggöras med hjälp av en vindros. Bilden i *Figur 10* visar en vindros från vindmätningar utförda vid Halmstads flygplats mellan 1966 och 1977 (SMHI 2007). Vindrosen i *Figur 10* visar vindens energiinnehåll vilket innebär att både vindens styrka samt riktning har beaktats.

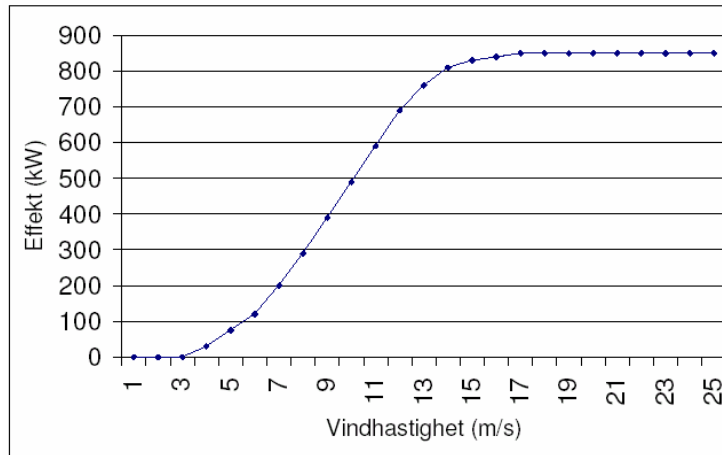


Figur 10. En vindros som visar vindens energiinnehåll (kWh/m^2) från tolv väderstreck. Mätningarna är gjorda vid Halmstad flygplats mellan åren 1966 – 1977 (SMHI 2007).

3.4.3 Vindkraftverken vid Andersfält

De tre vindkraftverken vid Andersfält är av typen Vestas V52-850 kW. Tornhöjden är 65 meter och rotordiametern är 52 meter. Vindkraftverkets rotor kan arbeta med variabelt varvtal vilket innebär att rotorbladen roterar snabbare vid höga vindhastigheter och långsammare vid låga. För att ytterligare optimera energiproduktionen finns ett så kallat *pitchreglersystem* som automatiskt reglerar rotorbladens vinkel vid olika vindhastigheter. Två elmotorer, som är kopplade till en stor kuggkrans på tornets topp, roterar maskinhuset efter vindriktningen. (Vestas 2004)

Energiproduktionen för ett specifikt vindkraftverk är helt beroende av energiinnehållet i vinden som träffar rotorbladen. Normalt används vindhastigheten vid navhöjden som en referens på vindhastigheten för hela vindkraftverket. Energiproduktionen för ett vindkraftverk som funktion av vindhastigheten kallas effektkurva. I *Figur 11* visas effektkurvan för vindkraftverken vid Andersfält.



Figur 11. Effektkurva för vindkraftverken vid Andersfält. Kurvan är specifik för Vestas V52 850 kW med källjudnivån 100,0 dB(A).

Utifrån *Figur 11* går det att avläsa att vindkraftverkens blad börjar rotera då det blåser mer än tre meter per sekund. Därefter ökar effektuttaget tills märkeffekten 850 kW uppnås, vilket sker då vindhastigheten är omkring femton meter per sekund. Vid högre vindhastigheter bibehålls en effektproduktion vid märkeffekten tack vare varvtalsregleringen samt möjligheten att *pitchreglera* rotorbladen. För att inte påfrestningen på maskindelar ska bli alltför stor kantställs bladen då vindhastigheten överstiger 25 sekundmeter och därmed upphör elproduktionen. Verket är dimensionerat för omgivningstemperaturer mellan -20 till $+40$ °C. Utanför detta temperaturintervall stoppas verken för att automatiskt startas upp då temperaturen åter hamnar inom intervallet. Samtliga dessa funktioner övervakas och regleras med hjälp av ett antal mikroprocessbaserade styrenheter som är placerade i maskinhuset. (Vestas 2004)

Produktionen i ett vindkraftverk är beroende av luftens densitet som varierar med temperatur och lufttryck. Då en effektkurva tas fram används normalt ett standardvärde på $1,225 \text{ kg/m}^3$ som är luftens densitet vid havsytan och temperaturen 15°C . Detta måste beaktas vid uppskattning av energiproduktion från vindkraftverk som är placerade på en plats där standarddensiteten inte råder. (Vestas 2004)

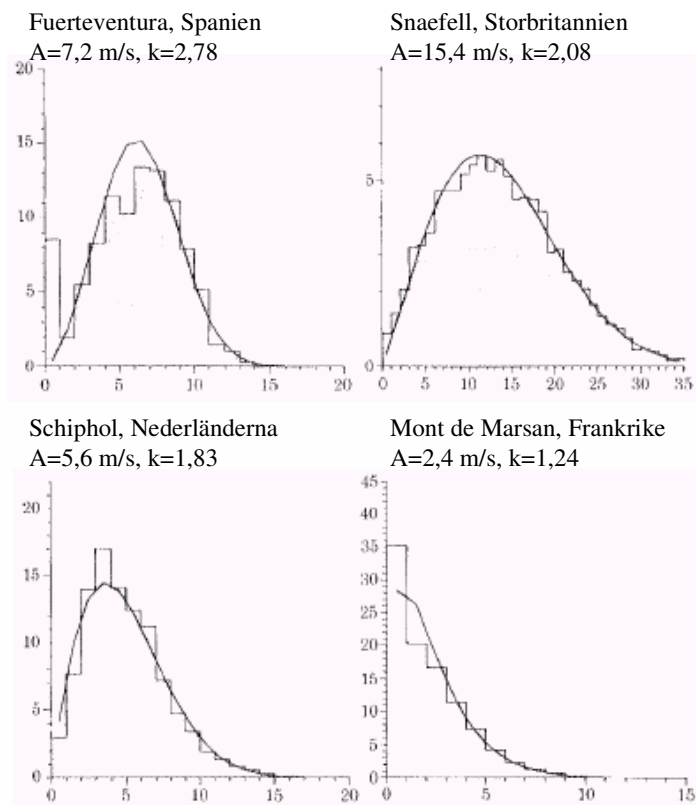
3.4.4 Beräkning av energiproduktion för ett vindkraftverk

Vid uppskattning av den årliga energiproduktionen för ett specifikt vindkraftverk vid en specifik plats sammanlänkas effektkurvan för vindkraftverket med vindens hastighet vid navhöjden. Eftersom energiproduktionen är proportionell med vindhastigheten i kubik måste hänsyn tas till vindhastighetens variation med tiden, med hjälp av en vindhastighetsfördelning. Vid mätningar av vindens hastighet har det visat sig att vindhastigheten approximativt kan beskrivas med en Weibullfördelning, som matematiskt beskrivs med följande uttryck: (Troen 1989)

$$f(u) = \frac{k}{A} \left(\frac{u}{A} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{u}{A} \right)^k \right) \quad (15)$$

där u är vindhastigheten, k är den så kallade *formparametern* och A är den så kallade *skalparametern*.

Genom att variera form- och skalparametern kan vindhastighetens fördelning vid en specifik plats beskrivas matematiskt. I *Figur 12* presenteras uppmätta vindfördelning samt Weibullfördelningen för fyra olika platser i Europa.



Figur 12. Exempel på vindfördelningar från fyra olika platser i Europa. Weibullfunktion illustreras med en linje för varje fördelning och dess skalparameter A samt formparametern k presenteras ovanför respektive fördelning. (Nielsen 2001)

Vid beräkning av energiproduktionen används normalt vinddata innehållandes medelvärde på vindhastigheten med tio minuters mellanrum. Detta får till följd att de variationer i vindhastigheten som sker under tio minuter inte tas med i beräkningen. De variationer i vindhastigheten som skapas av turbulens sker ofta under korta tidsperioder och detta kan approximativt korrigeras med en faktor F , som fås av följande samband: (Troen 1989)

$$F=3(\ln(z/z_0))^{-2} \quad (16)$$

Uttrycket ovan gäller enbart för områden där terrängen är platt samt homogen och där medelvindhastigheten är hög. Detta kan ha betydelse vid uppskattning av energiproduktionen i till exempel komplex terräng. Dock hävdar Troen (1989) att det i de flesta fall inte behöver göras ytterligare korrigeringar för turbulens och han uppger tre huvudskäl för detta påstående:

- Rotorsystemet har en begränsad reaktionstid vilket leder till att snabba förändringar i vindhastighet inte påverkar rotationen. Reaktionstidens omfattning beror på hur väl vindkraftverkets reglersystem svarar mot vindhastighetsvariationer samt hur snabbt virvlar byggs upp kring bladen.
- Vid beräkning av energiproduktionen tar modellen enbart hänsyn till vindförhållandena vid navhöjden. Utifrån dessa vindförhållanden beräknas den totala energiproduktionen för hela den cirkulära rotorytan. I verkligheten är vindens karaktär inte den samma över hela rotorytan och därför filtreras stora delar av turbulensens effekter bort
- Vid uppskattning av energiproduktionen för ett specifikt vindkraftverk används en effektkurva som är framtagen för det specifika verket. Det är allmänt vedtaget att dessa kurvor bygger på tio minuters medelvärde av vindhastigheten. Därför är i viss mån turbulensens effekter inräknade i modellen. För att dessa effekter ska bli likvärdiga måste dock terrängen där effektkurvan mättes vara likartad den terräng där det specifika verket ska stå.

Sammanfattningsvis anser Troen (1989) att det inte är nödvändigt att korrigera beräkningar av produktionen för platser med platt eller undulerande terräng med råhetsklasserna 0,1 eller 2. För högre värde på råheten eller i terräng med branta sluttningar är det viktigt att ha i åtanke att effektkurvan kan vara felaktig.

3.5 Tidigare studier med WAsP

Sedan år 1988 då WAsP blev lättillgängligt i form av ett datorprogram har modellen använts i en mängd studier både ur kommersiellt och akademiskt syfte. Nedan presenteras kortfattat exempel på tidigare studier där WAsP-metodiken har använts.

3.5.1 WAsP i skogsmiljö

Då allt fler vindkraftverk projekteras i skogsmiljö har forskare på Risö, där WAsP-modellen togs fram, börjat se över modellens applicerbarhet i skogsmiljö. Enligt Dellwik (2006) skiljer sig vindströmmar över skog från strömmar över låg vegetation i tre avseende:

- En nollplansförskjutning måste beaktas.
- Vindens omblandning och vindprofilen över skogen är beroende av de virvlar som uppstår vid trädtopparna
- Råheten och nollplansförskjutningen är beroende av hur tät vegetationen är.

I WAsP kan hänsyn tas till två av dessa tre effekter genom att välja råhet och nollplansförskjutning. Dock finns det ibland en osäkerhet vilken råhet som gäller för skogsområden samt hur nollplansförskjutningen ska beräknas. (Dellwik 2006)

I en artikel av Dellwik (2006) presenteras resultatet från en studie där tre uppmätta vindprofiler från tre olika skogar jämförs med resultat från WAsP-modellen. De tre skogarna är följande:

- *Corselitze*, en strandskog med höjden 26 meter.
- *Sorö*, en strandskog med höjden 25 meter.
- *Ulborg*, en granskog med höjden 15 meter.

Vinddata från mätmaster placerade intill skogarna jämfördes med beräknad vindhastighet från WAsP-modellen. Jämförelser gjordes dels med WAsP:s standardvärden, det vill säga råketslängden för skog är lika med 0,4 och ingen nollplansförskjutning används, och dels med beräknade och modellerade värden på nollplansförskjutningen och råkheten. (Dellwik 2006)

Resultatet från studien visar att WAsP underskattar skogens påverkan på medelvindhastigheten. När standardvärden användes överskattades vindhastigheten med så mycket som 50 till 70 procent för *Corselitze* skogen och 25 till 50 procent för *Sorö* skogen. För *Ulborg* skogen var överskattningen av medelvindhastigheten inte lika omfattande, cirka fjorton procent. När modellerade och beräknade värden på nollplansförskjutningen och råketslängden användes blev resultatet bättre, men fortfarande överskattade WAsP vindhastigheten jämfört med uppmätta värden med i genomsnitt sex procent. (Dellwik 2006)

3.5.2 Övriga studier med WAsP

WAsP har använts i en mängd studier för att beräkna regionala och lokala vindförhållanden. På regional nivå kan nämnas den första vindkartering som togs fram med hjälp av WAsP, *European Wind Atlas* (Troen 1989). Därefter följde en mängd landsomfattande studier och till exempel tog SMHI, på uppdrag av NUTEK, fram en vindkartering över södra Sverige med hjälp av beräkningsprogrammet WAsP (SMHI 1997). Även länderna Norge, Jordanien, Australien, Schweiz, Algeriet, Finland, Tyskland och Egypten har använt WAsP-modellen för vindkarteringar (Nielsen 2001).

Eftersom WAsP-modellen finns lättillgängligt i ett användarvänligt datorprogram används modellen främst för att uppskatta energiproduktionen för ett specifikt vindkraftverk vid projektering. Till exempel hade WAsP fram till år 2001 använts för att beräkna energiproduktionen för mer än 6000 vindkraftverk i Danmark med gott resultat (Nielsen 2001).

För att undersöka vindklimatet både på lokal och regional nivå har WAsP även använts i ett flertal studier av mer akademisk karaktär (till exempel: Ahmed Shata 2006, Ozerdem 2006, Lange 2004, Bartholy 2003 och El-Osta 1995).

4. MIUU-modellen

I fallstudien till detta examensarbete testas enbart hur väl WAsP-modellen stämmer överens med energiproduktionen vid Andersfält (se motivering i *kapitel 2.5.1*). Under arbetet med litteraturstudien har även andra modeller, vars syfte är att uppskatta vindhastigheten, påträffats. I Sverige har förutom WAsP-modellen även MIUU-modellen fått stor uppmärksamhet eftersom den visar på goda vindförhållanden på platser som tidigare inte ansetts som lämpliga för vindkraft. Till exempel visar modellen att det på hög höjd över områden med skog är mer än tillräckliga medelvindhastigheter för att etablera vindkraft. Därför anses denna modell relevant för detta examensarbete och nedan beskrivs dels övergripande MIUU-modellens metodik och dels presenteras exempel på studier där modellen har använts. För en mer utförlig matematisk beskrivning av modellen hänvisas till Enger (1990).

4.1 Modellens metodik

Institutionen för meteorologi vid Uppsala universitet har utvecklat en mesoskale-modell, där vindens hastighet nära markytan uppskattas med *geostrofiska* vindar som utgångspunkt. Den så kallade MIUU-modellen (Meteorologi Uppsala Universitet) togs fram då det visat sig att befintliga modeller gav ett allt för osäkert resultat i komplex terräng. Även meteorologiska observationer till havs över till exempel Östersjön visar att vindens beteende ofta är mer komplext än vad som tidigare antagits i enklare modeller, som till exempel WAsP (Bergström 2001).

Om en klimatologisk modell ska beskriva den exakta verkligheten måste alla typer av väderförhållande beaktas, vilket skulle kräva orealistiskt många simuleringar. MIUU-modellen bygger på avancerade samband vars lösningar kräver mycket datortid. För att modellen ska kunna komma fram till ett resultat under en rimlig tidsrymd har därför de parametrarna som har störst inverkan på vindens karaktär identifierats. Enligt Bergström (2004) är det främst fem parametrar som styr vindens rörelse: (Bergström 2004)

- Den *geostrofiska* vindens styrka och riktning.
- Havs- och marktemperatur.
- Markytans råhet.
- Terrängens topografi.
- Temperaturskillnaden mellan mark- och havsområden.

Då hänsyn främst tas till dessa parametrar fås en metod med en begränsad mängd simuleringar och efter en viktning som görs baserad på klimatologiska data för den geostrofiska vinden, kan slutligen energin i vinden uppskattas. Metoden kan användas för att ta fram kartor och uppskatta vindpotentialen för en specifik plats med en horisontell upplösning på 0,5 till 10 kilometer. Modellen kan således enbart ge information om lokala vindvariationer nedtill terrängskalor motsvarande upplösningen (Bergström 2006). Detta innebär att MIUU-modellen till exempel inte tar hänsyn till lokala objekt så som hinder, höjder eller mindre skogsområden. För att påverkan från dessa lokala variationer ska kunna beaktas måste modellens upplösning bli ännu finare.

MIUU-modellen är en så kallad tredimensionell hydrostatisk mesoskale-modell, som innehåller ekvationer för vind, temperatur, luftfuktighet och turbulens. Modellen har ett koordinatsystem som grovt följer höjdskillnaderna vid markytan, för att gradvis övergå till helt horisontellt vid modellens topp. För att begränsa antalet rutor i det horisontella rutnätet är rutorna små nära den punkt som är av intresse och därifrån ökar storleken på rutnätet allt eftersom avståndet från punkten ökar. Eftersom vindens hastighet och riktning påverkas av markens karaktär långt ifrån den punkt som är av intresse görs simuleringar för ett större område. Till exempel gjordes simuleringar på en yta innehållandes hela Skandinavien och Östersjön då en vindkartering för Sverige togs fram med MIUU-modellen. (Bergström 2004)

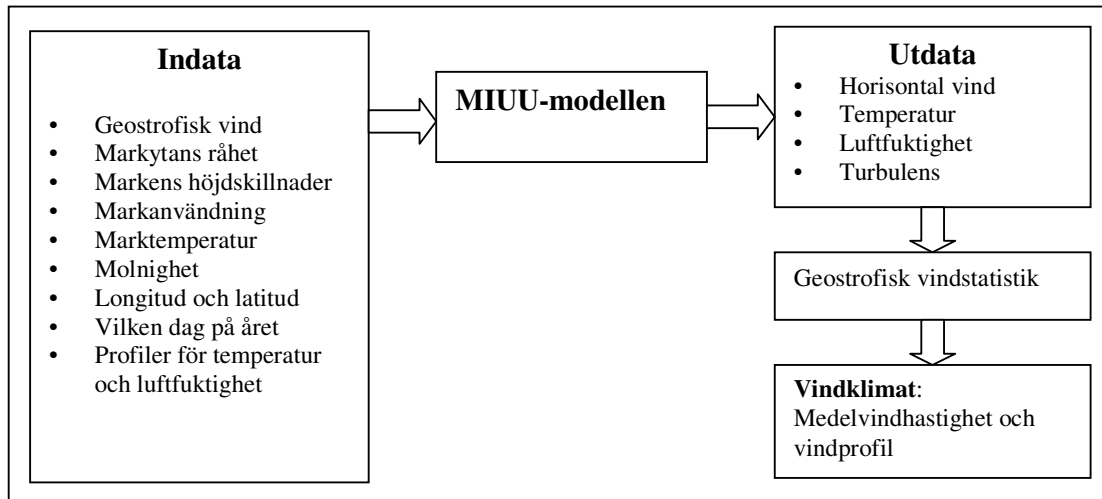
I vertikalled begränsas modellen av råhetslängden för markytan och modellens högsta punkt är oftast 10 000 meter. Avståndet mellan beräkningsnivåerna närmast marken är logaritmiska och på högre höjd övergår avståndet till att vara linjärt. För de höjder som oftast är av intresse för vindkraft, det vill säga upp till 100 meter, görs normalt beräkningar på åtta nivåer. (Bergström 2004)

Vid markytan måste råheten, temperaturen samt terrängens topografi beskrivas för varje rutnät i koordinatsystemet. Råheten beskrivs utifrån markanvändningen som tillsammans med höjdskillnader hämtas från digitala kartor. Över hav och sjöar sätts z_0 antingen till 0,00025 meter eller så används *Charnocks samband*¹⁶. Under vintern antas marken vara täckt med snö och under denna tid på året används ett värde på z_0 över öppna ytor på 0,001 meter. Markytans temperatur och dess variation över dagen och över året beräknas med hjälp av en energibalans som tar hänsyn till solinstrålningen samt markanvändningen för den specifika platsen. För att begränsa antalet simuleringar, men ändå inkludera den årliga temperaturvariationen, används normalt temperaturdata från fyra månader (januari, april, juli och oktober), som får representera de olika årstiderna. Hänsyn till den dagliga temperaturvariationen tas enbart för landområde, eftersom temperaturens dygnsvariation över hav och sjöar är mycket liten i förhållande till variationen över land. (Bergström 2004)

Den ostörda geostrofiska vinden är utgångspunkten vid beräkningar enligt MIUU-metodiken. Om enbart ett medelvärde på den geostrofiska vindhastigheten skulle användas vid simuleringar skulle effekten av markytans temperatur försummas, eftersom de dagliga variationerna i stabilitet är mycket kraftigare vid låg geostrofisk vindhastighet jämfört med hög. Denna effekt är ibland mycket stor och därför är det av vikt att göra simuleringar över olika geostrofiska vindhastigheter. I de studier där MIUU-modellen har tillämpats har simuleringar gjorts för tre olika vindhastigheter (omkring 5, 10 och 15 m/s) samt åtta till sexton olika vindriktningar. (Bergström 2004)

I *Figur 13* finns en sammanställning av de indata som krävs till modellen samt vilken information som går att få ut vid modellering.

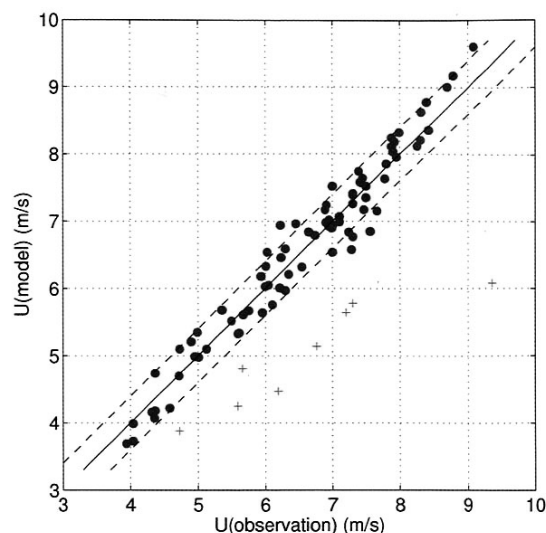
¹⁶ Se ekvation 5 i kapitel 3.2.3.



Figur 13. Bilden visar ett blockschema över in- och utdata för MIUU-modellen. (Bergström 2004)

4.2 Verifiering av modellen

I syfte att testa MIUU-modellens tillförlitlighet har verifieringar på 66 olika platser runt om i Sverige genomförts. Vindmätare placerade i master har samlat in vinddata på höjder mellan 20 och 145 meter med flest mätningar inom intervallet 30 till 60 meter. Vid jämförelse mellan resultatet från modelleringen och observationerna framkommer en god överensstämmelse, vilket åskådliggörs i *Figur 14*. Det finns dock en viss spridning av resultatet, men 88 procent av jämförelserna har ett fel på mindre än 0,4 meter per sekund. En av verifieringarna har utförts på 100 meters höjd vid Emmaboda i ett typiskt småländskt skogslandskap. Både modell och observation ger en medelvind på 6,7 till 6,8 meter per sekund, vilket visar att MIUU-modellen kan användas för att beskriva vindhastigheten ovanför skog. (Bergström 2007)



Figur 14. Jämförelse mellan modellerad och observerad årsmedelvind för 66 platser i Sverige. De platser som är markerade med "+" har uppenbara lokala höjdskillnader som inte registreras på grund av MIUU-modellens begränsade upplösning. (Bergström 2007)

4.3 Tidigare studier med MIUU-modellen

MIUU-modellen har använts i studier för att beräkna vindens hastighet och den har visat sig stämma bra överens med utförda observationer (Bergström 2004). Nedan presenteras några exempel på studier där MIUU-modellen har använts.

Den största studien som utförts med MIUU-modellen gjordes av *Uppsala universitet* på uppdrag av *Energimyndigheten* och resulterade i en vindkartering över Sverige med en kilometers upplösning. I de beräkningar som låg bakom modellen utfördes totalt 192 datorsimuleringar och varje simulering gjordes under en 30 timmars period. Studiens resultat i form av årsmedelvind redovisas dels i rikstäckande kartor och dels i femton mer detaljerade kartor som täcker hela Sverige. (Bergström 2006a)

I en studie gjord år 2001 beräknades vindklimatet över Östersjön med hjälp av MIUU-modellen. Eftersom det enbart finns en begränsad mängd mätdata över havsområden är det extra viktigt att ta fram modeller som väl överensstämmer med verkligheten för att kunna kartlägga vindpotentialen över hav. Studien visar att enklare modeller, som till exempel WASP, inte tar hänsyn till de komplexa fenomen som uppstår vid kuster och över hav. För att dessa aspekter ska beaktas krävs mer avancerade modeller, som MIUU. (Bergström 2001)

Det är inte alltid självklart att vindkraftverk ska placeras högst upp på en bergstopp. Ibland kan så kallade tunneleffekter leda till höga vindhastigheter även i en dal. I en studie utförd av Bergström och Källstrand (2000) undersöks hur väl resultat från MIUU-modellen samt WASP-modellen stämmer överens med gjorda observationer vid Suorva 90 kilometer sydväst om Kiruna. Terrängen i området som modelleras är komplext och består av en långsmal dalgång med höjdskillnader till de omkringliggande bergen på cirka 1000 meter. Slutsatserna från studien är att den enklare WASP-modellen inte till fullo återspeglar vinden karaktär vid dalgången vid Suorva. Däremot visar resultatet från modellering med MIUU-modellen god överensstämmelse med gjorda observationer i området. (Bergström 2000)

Vid projektering av vindkraft finns det möjlighet att på beställning få en beräkning av vindklimatet vid en specifik plats med hjälp av MIUU-modellen. Beräkningarna utförs av *Uppsala universitet* och resulterar i en medelvind på en bestämd höjd samt en uppskattning av energiproduktionen för ett specifikt vindkraftverk. (Bergström 2006b)

5. Resultat

Fallstudien till detta examensarbete är uppdelad i tre olika delstudier som har utförts i kronologisk ordning. I den första delstudien, *skillnad i energiproduktion*, undersöks huruvida det är någon skillnad i energiproduktion mellan de tre vindkraftverken vid Andersfält. Den andra delstudien, *skogens påverkan*, syftar till att utreda om det är Tönnersaskogen som är den bidragande faktorn till skillnaden i energiproduktion. I den sista delstudien, *modellering*, undersöks om det går att beskriva de meteorologiska fenomen som uppstår intill en skog med hjälp av en känd modell. Resultatet från dessa studier presenteras i kronologisk ordning i nedanstående avsnitt och analyseras kontinuerligt i den löpande texten.

5.1 Skillnad i energiproduktion

Vid Andersfält står tre identiska vindkraftverk av samma fabrikat¹⁷. Eftersom de är placerade vinkelrätt från Tönnersaskogen är det intressanta att jämföra energiproduktionen för att få en uppfattning om i vilken omfattning skog kan påverka vindkraftsproduktion. I detta kapitel presenteras resultatet från den första fallstudien med hjälp av diagram och statistiska nyckeltal. Huruvida det förekommer någon skillnad i energiproduktion mellan de tre vindkraftverken vid Andersfält undersöks dels utifrån månadsvärden och dels utifrån dygnsvärden.

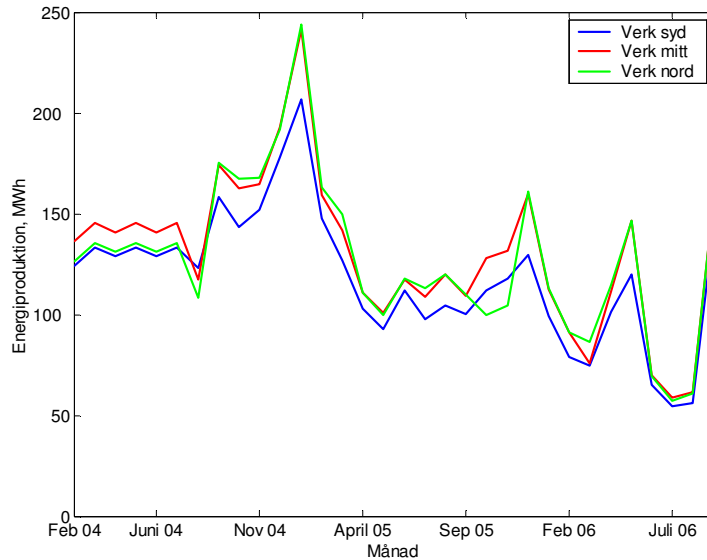
5.1.1 Månadsstatistik

Denna analys bygger på månadsvis noteringar av energiproduktionen för vindkraftverken vid Andersfält. De tre vindkraftverken togs i drift under januari 2004 men eftersom den månaden inte var fullständig påbörjas analysen från februari månads energiproduktion. Därefter inhämtas noteringar till och med september 2006 vilket innebär att energiproduktionen från 32 månader analyseras.

I *Figur 15* presenteras energiproduktionen från de tre vindkraftverken:

- Södra verket (blå linje i diagrammet) är placerat närmst skogen cirka 100 meter ifrån den yttersta trädridån.
- Mellersta verket (röd linje i diagrammet) ligger cirka 350 meter från skogen.
- Norra vindkraftverket (grön linje i diagrammet) är placerat i linje med de två andra och cirka 600 meter från skogen.

¹⁷ Vindkraftverken beskrevs i *kapitel 1.1.3*.



Figur 15. Diagrammet är baserat på månadsvärden och visar energiproduktionen för de tre vindkraftverken vid Andersfält. Energiproduktionen från det södra vindkraftverket markeras med blå linje, det mellersta med röd linje och det norra med grön linje.

Energiproduktionen från de tre vindkraftverken följs i stort sett åt och det är endast under oktober och november 2005 som det norra vindkraftverket inte följer en gemensam trend. Samtliga vindkraftverk producerar mest energi under januari 2005, vilket förklaras med att vindhastigheterna under denna period var mycket höga. Bland annat drog stormen *Gudrun* fram över södra Sverige natten mellan den åttonde och nionde januari. Under sommaren 2006 noteras den lägsta energiproduktionen. I juli 2006 producerar de tre vindkraftverken i genomsnitt 57 MWh och i januari 2005 var den genomsnittliga produktionen nästan tre gånger högre, 150 MWh. Vidare går det utifrån diagrammet att avläsa att det södra vindkraftverket under de flesta månader producerar mindre energi än de övriga. Dock är det inte lika enkelt att avgöra om det finns någon skillnad mellan de norra och mellersta vindkraftverken. För att statistisk säkerställa huruvida det finns någon skillnad i energiproduktion mellan de tre vindkraftverken görs en analys med hjälp av metoden *stickprov i par*¹⁸. Resultatet från denna analys presenteras i *Tabell 2*.

Tabell 2. Resultat från analysmetoden *stickprov i par*, där skillnaden mellan månadsproduktion för två vindkraftverk analyseras. Jämförelse görs mellan det mellersta och södra, norra och södra samt norra och mellersta. Nyckeltalen som presenteras är: medelskillnaden \bar{x} , standardavvikelsen s och konfidensintervallet I .

	\bar{x} , kWh	s	I
Mitt-syd	12492	7706	(9670, 15315)
Nord-syd	9821	11627	(5562, 14080)
Nord-mitt	-2672	8513	(-5790, 447)

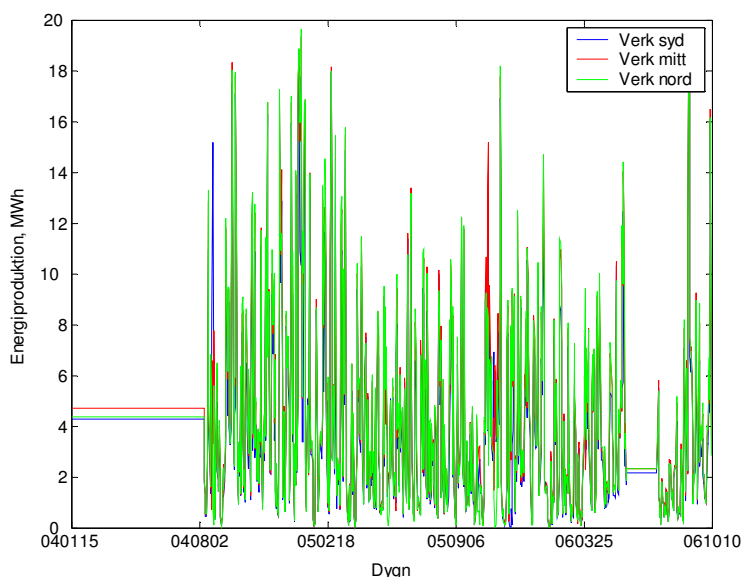
¹⁸ Den statistiska analysmetoden *stickprov i par* beskrivs i *Bilaga 1*.

Utifrån resultatet i *Tabell 2* kan det konstateras att det södra verket under en genomsnittlig månad producerar 12,5 MWh mindre energi än det mellersta samt 9,8 MWh mindre än det norra vindkraftverket. Eftersom det 95 procentiga konfidensintervallet inte går över noll kan skillnaden antas vara statistiskt säkerställd. Däremot går det med ett 95 procentigt konfidensintervall inte att särskilja de norra och mellersta verken med hänsyn till månadsvis energiproduktion, eftersom konfidensintervallet går över noll.

I denna analys har ingen hänsyn tagits till eventuella driftstopp som inträffar då någon komponent i vindkraftverket är ur funktion. Därför görs ytterligare en statistisk undersökning där utgångspunkten är dygnsnoteringar av energiproduktionen och där driftstopp beaktas med hjälp av en statistisk metod.

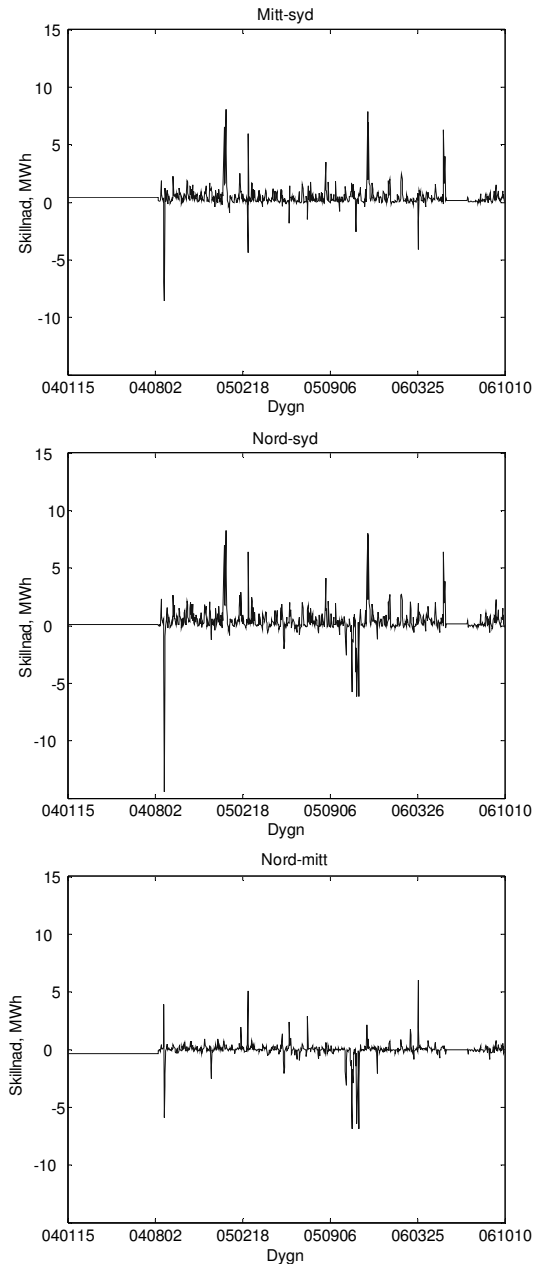
5.1.2 Dygnstatistik

I denna studie är utgångspunkten dygnsnoteringar av energiproduktionen för de tre vindkraftverken vid Andersfält mellan 2004-01-15 och 2006-10-10. Detta innebär att 999 dygn finns till förfogande för statistisk analys och i *Figur 16* presenteras dygnsproduktionen för de tre vindkraftverken under den aktuella perioden.



Figur 16 Diagrammet visar dygnsproduktionen för de tre vindkraftverken vid Andersfält mellan perioden 2004-01-15 till 2006-10-10. Energiproduktionen från det södra vindkraftverket markeras med blå linje, det mellersta med röd linje och det norra med grön linje.

Eftersom variationen mellan dygnen är stor går det utifrån diagrammet inte att avgöra vilket verk som producerar minst respektive mest energi. Det kan dock vara intressant att notera att produktionen under närliggande dygn varierar kraftigt. Som mest producerar ett vindkraftverk vid Andersfält knappt 20 MWh per dygn och den genomsnittliga dygnsproduktionen är cirka 2,9 MWh. Det är endast under två längre perioder, mellan 2004-01-15 till 2004-08-10 samt mellan 2006-05-31 till 2006-07-17, som energiproduktionen har varit konstant. Detta förklaras med att den automatiska informationsinhämtningen brustit och ett medelvärde har beräknats under den tiden som data uteblivit.

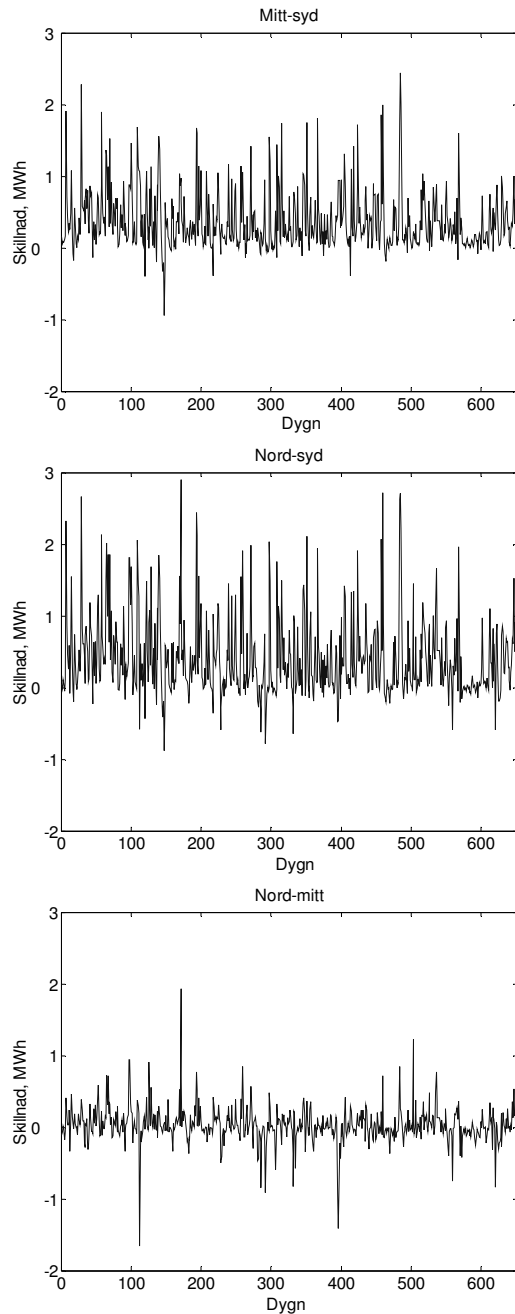


Figur 17. Diagrammen visar skillnad i dygnsproduktion mellan vindkraftverken vid Andersfält under perioden 040115 till 061010. Det översta diagrammet visar skillnaden mellan det mellersta och södra vindkraftverket. Det mellersta diagrammet visar skillnaden i produktion mellan det norra och södra, samt det nedersta mellan det norra och mellersta. Ett positivt värde innebär att det första verket producerar mest.

För att på ett lättöverskådlig sätt visa hur energiproduktionen mellan de tre vindkraftverken skiljs åt presenteras i *Figur 17* skillnaden i energiproduktion mellan de mellerst och södra, norra och södra samt norra och mellersta vindkraftverken. I diagrammen innebär ett positivt värde att det första vindkraftverket, det vill säga det mellersta verket i det översta diagrammet samt det norra verket i det mellersta och understa diagrammen, producerar mest energi.

På grund av skalan på y-axeln går det utifrån diagrammen i *Figur 17* inte att avgöra om det ena vindkraftverket producerar mer energi än det andra. Dock visar diagrammen att skillnaden i energiproduktion varierar kraftigt, men är under de flesta dygn mindre än 5 MWh. Under enstaka dygn är det stora skillnader i energiproduktion och till exempel producerade den 23 augusti 2004 det södra verket nästan 15 MWh mer än det norra (se det mellersta diagrammet). Vid en närmare analys av detta dygn visar det sig att det norra verket endast producerade cirka 0,7 MWh och det södra producerade således drygt 15 MWh. Denna skillnad kan förklaras med att det norra vindkraftverket varit ur drift stora delar av detta dygn medan det södra vindkraftverket har producerat för fullt. Detta dygn ger således en missvisande bild över skillnaden i energiproduktion mellan verken. Det är därför önskvärt att utesluta de dagar något av verken varit ur drift och detta görs genom att ta bort de dygn då skillnaden i produktion är kraftigt avvikande, så kallade *outliers*.

Det är viktigt att påpeka att *driftstoppskorrigeringen* är en statistisk metod, vilket innebär att korrigeringen inte är fullständig. Till exempel kommer de dygn vindkraftverken varit ur drift under en kort tid inte tas bort.



Figur 18. Diagrammen visar skillnad i dygnsproduktion mellan vindkraftverken vid Andersfält när *outliers* samt de dygn då avläsningen inte fungerat tagits bort. Kvar återstår 651 dygn. Det översta diagrammet visar skillnaden mellan det mellersta och södra vindkraftverket. Det mellersta diagrammet visar skillnaden i produktion mellan det norra och södra, samt det nedersta mellan det norra och mellersta. Ett positivt värde innebär att det första verket producerar mest.

Efter att ha identifierat samt uteslutit samtliga *outliers* och tagit bort de dygn den automatiska inhämtningen inte fungerat återstår 651 av de 999 dygnen. Utifrån dessa 651 *driftstoppskorrigerade* dygn tas nya diagram på skillnaden i energiproduktion fram och de presenteras i *Figur 18*.

Eftersom de kraftigt avvikande värdena har eliminerats saknar diagrammen i *Figur 18*, till skillnad från diagrammen i *Figur 17*, enstaka toppar och dalar. Dessa diagram ger därför en mer korrekt bild av skillnaden i energiproduktion mellan vindkraftverken.

Utifrån det översta diagrammet i *Figur 18* går det att avläsa att skillnaden i energiproduktion mellan det mellersta och södra verket varierar mellan cirka -1 MWh till 2 MWh. Under de flesta dygnen är skillnaden positiv vilket innebär att det mellersta verket producerar mer än det södra. Samma trend går att avläsa i det mellersta diagrammet där det norra verket producerar mer än det södra vindkraftverket. I detta diagram är skillnaden i dygnsproduktion något större och varierar mellan cirka -1 MWh till 3 MWh.

I det nedersta diagrammet är skillnaden inte lika tydlig och det är svårt att utifrån diagrammet avgöra vilket av de norra och mellersta verken som producerar mest energi. Även variationen i det nedersta diagrammet är olik de två ovanstående och är inte lika påtaglig. Utifrån dessa två observationer går det att dra slutsatsen att om det finns någon skillnad i energiproduktion mellan de mellersta och norra vindkraftverken är den betydligt mindre än skillnaden mellan de mellersta och södra samt de norra och södra.

För att statistiskt kontrollera huruvida det finns någon skillnad i dygnsproduktion mellan vindkraftverken görs en analys med hjälp av metoden *stickprov i par*, enligt *Bilaga A*. Resultatet i form av statistiska nyckeltal från analysen presenteras i *Tabell 3*.

Tabell 3. I tabellen presenteras resultatet från den statistiska analys som genomförts på dygnsproduktionen, för att säkerställa huruvida det finns någon skillnad i energiproduktion mellan de tre vindkraftverken vid Andersfält. Beräkningar har gjorts dels för samtliga 999 noteringar och dels för de 651 noteringar som återstår när *outliers* samt de dygn då avläsningen inte fungerat tagits bort, så kallade *driftstoppskorr.* dygn. Nyckeltalen som presenteras är: medelskillnaden $\Delta \bar{x}$, standardavvikelsen s och konfidensintervallet I .

	Mitt-syd			Nord-syd			Nord-mitt		
	$\Delta \bar{x}$	s	I	$\Delta \bar{x}$	s	I	$\Delta \bar{x}$	s	I
Samtliga dygn	411 kWh	852	(358, 464)	321 kWh	1103	(252, 389)	-90 kWh	701	(-47,-134)
Driftstoppkorr. dygn	370 kWh	412	(339, 402)	399 kWh	556	(356, 441)	28 kWh	252	(9,48)

Vid jämförelse mellan energiproduktionen för samtliga dygn visar det sig att det södra verket i genomsnitt producerar 411 kWh mindre energi per dygn än det mellersta och 321 kWh mindre än det norra. Det norra producerar i sin tur 90 kWh mindre energi per dygn än det mellerst. Det mellersta vindkraftverket producerar således mest, därefter det norra och minst energi producerar det södra verket. Eftersom det 95 procentiga konfidensintervallen inte går över noll kan samtliga skillnader antas vara statistiskt säkerställda.

När samma statistiska beräkningar utförs för de *driftstoppskorrigerade* dygnen blir resultatet annorlunda. Fortfarande producerar det södra vindkraftverket mindre energi än de mellersta och norra, men det norra verket producerar vid denna analys mer energi än det mellersta. Även i denna undersökning går det 95 procentiga konfidensintervallet inte över noll och skillnaderna kan därför antas vara statistiskt säkerställda. Utifrån ovanstående resultat kan det konstateras att när de dygn som något av verken inte fungerar tagits bort, producerar det norra verket i jämförelse med de andra mer energi. Detta kan enbart förklaras med att det norra vindkraftverket har haft fler driftstopp än de två andra vindkraftverken vid Andersfält. Detta är en intressant iakttagelse som belyser vikten av att inkludera driftstopp när jämförelser mellan vindkraftverk görs.

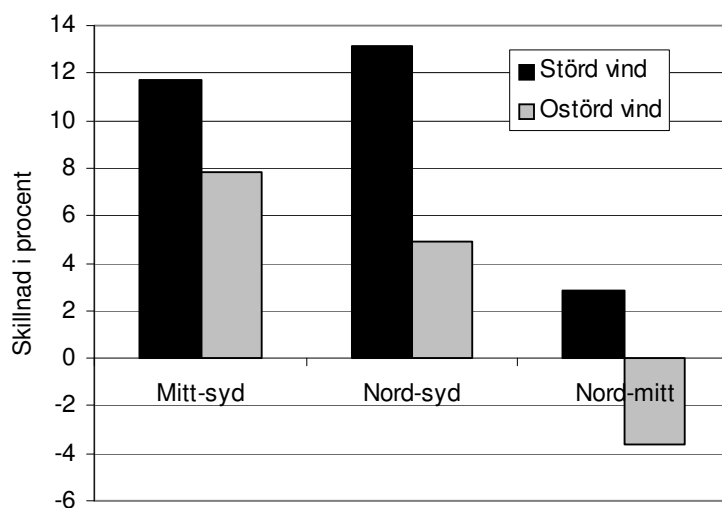
Sammanfattningsvis visar resultatet från den första delstudien att efter *driftstoppskorriger*ing producerar det södra vindkraftverket minst energi och det norra vindkraftverket producerar mest. Dock är skillnaden mellan det södra och mellersta betydligt större än mellan det mellersta och norra. Det är även intressant att notera att det under denna analys har framkommit en skillnad i driftssäkerhet mellan vindkraftverken. Det norra vindkraftverket har nämligen visat sig oftare vara ur funktion än de övriga verken. Det är högst troligt att skillnaden i energiproduktion uppstår på grund av Tönnersaskogen söder om vindkraftverken, men för att säkerställa denna hypotes görs en andra delstudie där skogens påverkan undersöks närmare.

5.2 Skogens påverkan

Beroende på vindriktning kan vindkraftverken vid Andersfält ses som verk placerade i skogen eller som verk placerade på slätten. Detta är möjligt tack vare att Tönnersaskogen är belägen söder om verken och i övrigt är omgivningen kring vindkraftverken typiskt för ett jordbrukslandskap. Ur studiesynpunkt är detta intressant eftersom när det blåser sydliga vindar vid Andersfält uppstår de meteorologiska fenomen som finns över skog och när det blåser västliga, östliga eller nordliga vindar uppstår de fenomen som är typiska för slättmarker. I denna studie görs ett försök att urskilja de dygn då det blåser över skogen, så kallad *störd vind*, och de dygn då det blåser över slätten, så kallad *ostörd vind*¹⁹. Därefter jämförs energiproduktionen från dessa olika dygn och nedan presenteras resultatet.

Vindstationen på Hallands Väderö är den närmaste vindstationen som varit i drift under den studerade perioden och därför inhämtas vinddata från denna station. Då värdena på vindens riktning studeras framkommer det att vinden sällan är stabil. Utifrån definitionen i *kapitel 2.4.1* finns det under den studerade perioden enbart 36 dygn då vinden är *ostörd* och 22 dygn då vinden är *störd*. Dessa specifika dygn sammanlänkas med dygnsproduktionen och därefter görs en statistisk jämförelse för att urskilja trender i datamängden.

Eftersom det under olika dagar blåser olika mycket går det inte att jämföra hur hög energiproduktionen var under *störda* och *ostörda* dygn. För att undkomma detta hinder jämförs istället den procentuella skillnaden i energiproduktion mellan vindkraftverken under de *störda* och *ostörda* dyggen. I *Figur 19* presenteras resultatet med hjälp av ett lättöverskådligt stapeldiagram.



Figur 19. I stapeldiagrammet presenteras den procentuella skillnaden i energiproduktion mellan det mellersta och södra, norra och södra samt norra och mellersta verken då det är störd respektive ostörd vind.

¹⁹ Se definition på *störd* respektive *ostörd vind* i *Kapitel 2.4*.

Diagrammet i *Figur 19* visar tydligt att skillnaden i energiproduktion mellan vindkraftverken är större då det blåser över skogen, *störd vind*, jämfört med när det blåser över slätten, *ostörd vind*. Denna skillnad är som störst för jämförelsen *Nord-syd* och som minst för jämförelsen *Mitt-syd*. Vid jämförelsen *Nord-mitt* visar diagrammet att det norra verket producerar mest vid *störd vind* och det mellersta producerar mest vid *ostörd vind*.

För att statistiskt säkerställa att det är en skillnad i energiproduktion mellan de dygn det är *störd* respektive *ostörd* vind görs ett *tvåsidigt konfidensintervall av två oberoende stickprov*, enligt definitionen i *Bilaga A*. I *Tabell 4* presenteras resultatet från denna undersökning.

Tabell 4. I tabellen visas den procentuella skillnaden i energiproduktion mellan störd och ostörd vind, $\Delta \bar{x}$. Även medelfelet $d(\theta)$ och konfidensintervallet I presenteras.

	$\Delta \bar{x}$	$d(\theta)$	I
Mitt-syd	3,84	1,19	(1,50 6,17)
Nord-syd	8,24	1,93	(4,46 12,04)
Nord-mitt	6,45	1,28	(3,95 8,96)

I det ovanstående resultatet går inga intervall över noll, vilket innebär att det med 95 procent sannolikhet finns en skillnad i energiproduktion då det är *störd* respektive *ostörd* vind. Trots att resultatet från denna undersökning bygger på en begränsad datamängd samt att vindmätaren är placerad på Hallands Väderö cirka 30 kilometer från vindkraftverken går det att finna en tydlig trend. Denna trend visar att skillnaden i energiproduktion mellan vindkraftverken är större då det blåser över skogen jämfört med när det blåser över slätten. Detta innebär att Tönnersaskogen har en signifikant påverkan på energiproduktionen för vindkraftverken vid Andersfält och därmed kan den skillnad i energiproduktion som framkom under den första studien med stor säkerhet härledas till Tönnersaskogen.

Att det finns en skillnad i energiproduktion mellan det södra och mellersta samt mellan det södra och norra verken då det blåser över slätten kan förklaras med denna studiens knapphändiga datamängd. Eftersom vindriktningen på Hallands Väderö är så pass instabil under dygnet är det möjligt att vindens riktning förändras mellan Hallands Väderö och Andersfält. För att få ett mer pålitligt resultat från denna studie skulle mätning av vindens riktning ske i anslutning till vindkraftverken. Först då skulle fler och säkrare analyser kunna göras med hjälp av denna studies metodik. En förhoppning fanns att värden på vindriktningen lagrats i vindkraftverkens databank, men det visade sig att sådan information inte fanns tillgänglig (Salomonsson 2006)

Sammanfattningsvis går det, trots denna studies osäkerhet, att finna en statistisk trend som visar att Tönnersaskogen bidrar till skillnaden i energiproduktion mellan de södra, mellersta och norra vindkraftverken.

5.3 Modellering

Den sista av de tre delstudierna i detta examensarbete syftar till att undersöka huruvida en befintlig modell klarar av att beskriva de fenomen som uppstår då vinden blåser över skog. Utifrån resonemanget i *kapitel 2.5.1* har WAsP-modellen valts till denna studie. För att kunna modellera energiproduktionen för vindkraftverken vid Andersfält med hjälp av WAsP krävs specifik platsdata på topografin, råhetsgraden samt närliggande hinder. Därför har först en områdesbeskrivning genomförts och därefter har dessa data använts vid modelleringen. Nedan presenteras resultatet dels från områdesbeskrivningen och dels från modelleringen.

5.3.1 Områdesbeskrivning

Området som beskrivs i detta kapitel begränsas av en tjugokilometers radie från det mellersta vindkraftverket vid Andersfält. Geografiskt innebär detta en cirkel med Halmstad i norr, Kattegatt i väster, Hallandsåsen i söder och det halländska skogslandskapet i öster. Detta område benämns *ytterområdet* och består av slättlandskap, hav, tät bebyggelse samt skogsmiljö. Eftersom vindkraftverkens energiproduktion påverkas mer av terrängen närmast verken har även ett *närområde* definieras där landskapet beskrivs mer ingående. *Närområdet* begränsas av kusten i väster, Eldsberga i norr, Genevad i öster och den södra delen av Tönnersaskogen i söder. I följande avsnitt beskrivs *närområdet* samt *ytterområdet* utifrån topografi, råhet och närliggande hinder.

5.3.2 Topografi

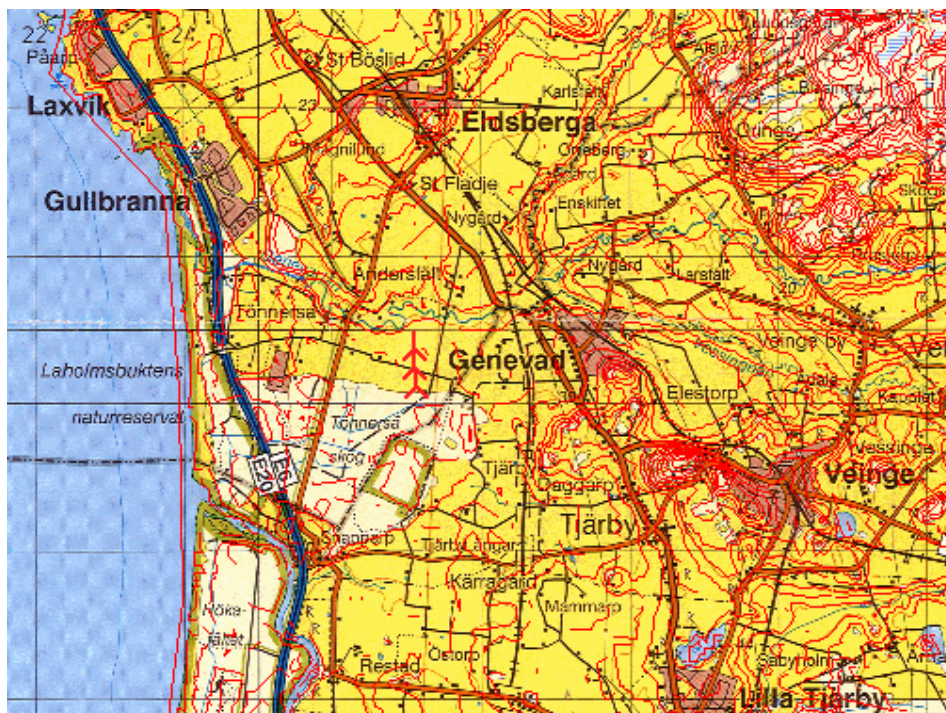
Alla tre vindkraftverken är etablerade på produktiv jordbruksmark. Topografin i *närområdet* är typiskt för ett slättlandskap med ytterst små nivåskillnader. Marken stiger något från kusten och inåt land och vid Genevad är höjden över havet cirka 25 meter. Vindkraftverken är placerade på cirka 15 meters höjd. Det mellersta verket står uppskattningsvis en meter högre än det södra och norra verken. Skillnaden är dock så liten att det inte med hjälp av GPS-mottagare med säkerhet går att avgöra någon höjdskillnad.

Genevadån som rinner igenom närområdet från Genevad ut i Laholmsbukten bildar en mindre nedsänkning i landskapet på cirka tio meter. Topografin i Tönnersaskogen följer till stor del det kringliggande landskapet. Endast i skogens sydöstra delar vid Tjärby sanddynsreservat finns mindre lokala höjdskillnader på omkring tio meter.

Stora delar av ytterområdet består av Laholmsbukten samt slättlandskap och nivåskillnaderna blir därför små. Där slättlandskapet övergår till skogslandskap i de östra delarna av *ytterområdet* blir terrängen betydligt mer kuperad med nivåskillnader på omkring 50 meter.

Vid modellering med hjälp av WAsP rekommenderas att topografin i en radie av fem kilometer från vindkraftverken beskrivs (Nielsen 2001). I *Figur 20* visualiseras höjdskillnaderna med hjälp av höjdkurvor med fem meters ekvidistans. För att undersöka huruvida en nollplansförskjutning²⁰ vid skogen påverkar energiberäkningen i WAsP, lyfts markytan till cirka tre fjärdedelar av skogens höjd.

²⁰ En beskrivning av nollplansförskjutning återfinns i *kapitel 3.2.7*.



Figur 20. Ovanstående karta visar höjdskillnaderna med hjälp av höjdkurvor kring vindkraftverken vid Andersfält. Vindkraftverken är markerade med röda stjärnor. Höjdkurvorna har ekvidistansen fem meter och är framtagna med hjälp av satellitbilder (SRTM projekt 2000). I denna kartbild har ingen nollplansförskjutning lagts in.

5.3.3 Råhet

Markens råhet används i WAsP för att beskriva vindprofilens karaktär. Ju högre råhet desto brantare blir vindprofilen, vilket innebär att vindhastigheten på en bestämd höjd blir lägre. Markens karaktär i *närområdet* består dels av slättlandskap och dels av skog. Råheten för jordbruksmarken förändras något med tiden beroende på vilken säsong det är och vilken gröda som odlas. Närmast vindkraftverken odlades under sommaren och hösten 2006 gräs till trädgårdar. I övrigt finns en del hästhagar intill verken och för dessa ytor tillsammans med gräsodlingen uppskattas råhetsklassen till 1. På övriga fält i *närområdet* odlas varierande grödor typiskt för svenskt jordbruk och råhetsklassen uppskattas till 1,5.

Utifrån fotografier beräknas skogens höjd vid ett antal punkter längs med skogskanten, se *Figur 21* och *Figur 22*. De högsta trädens höjd varierar mellan tretton och arton meter. Medelhöjden beräknas till cirka femton meter. Tönnersaskogen är inte homogen i den bemärkelsen att skogen i vissa områden är glesare och i andra områden tätare. I skogen sker ett aktivt skogsbruk och därför förändras skogens karaktär med tiden. Till exempel finns ett mindre slutavverkat område sydväst om verken där enbart ett fåtal träd sparats och markvegetationen under hösten 2006 var högst ett par meter hög. Denna studie begränsad till en period på två och ett halvt år och under denna tid är förändringen av skogens höjd obetydlig. Slutavverkningar förändrar däremot råheten mer markant och detta beaktas därför vid modelleringen.

Råheten för en specifik skog beror på vilka träd skogen består av, hur höga de är samt hur tätt de står. Till exempel är det troligt att en tät granskog påverkar vindens karaktär annorlunda jämfört med en gles lövskog. Även trädens höjd har stor betydelse för vindprofilens karaktär.

Att ge alla typer av skog samma råhet kan därför antas vara en kraftig approximation. Sedan Troen (1989) gick ut med att skog har råhetsklassen 3 har detta blivit en standard. Kell Øhlenschläger, ansvarig för energiberäkningar på Vestas, anser att skog snarare bör ha råhetsklass 3,5 (Øhlenschläger 2007). Eftersom det finns en osäkerhet om vilken råhetsklass som bör användas görs beräkningar både för råhetsklass 3 och råhetsklass 4 för Tönnersaskogen. På så sätt undersöks i ett brett spann huruvida WAsP-modellen klarar av att ge en korrekt bild av vindprofilen vid Andersfält.

Längs med E6:an drygt två kilometer väster om vindkraftverken växer relativt hög skog som även den ges råhetsklass 3 respektive 4. På båda sidor om Genevadån växer mindre träd och buskar som påverkar energiproduktionen vid nordliga vindar. Råhetsklassen för denna vegetation uppskattas till 2,5.









Figur 21. Fotografiet visar Tönnersaskogen sätt från fälten norr om skogen. Vindkraftverken är således i ryggen när fotografiet togs. Skogen är ut mot fältet gles eftersom det bakom trädriddån finns ett mindre kalhygge.

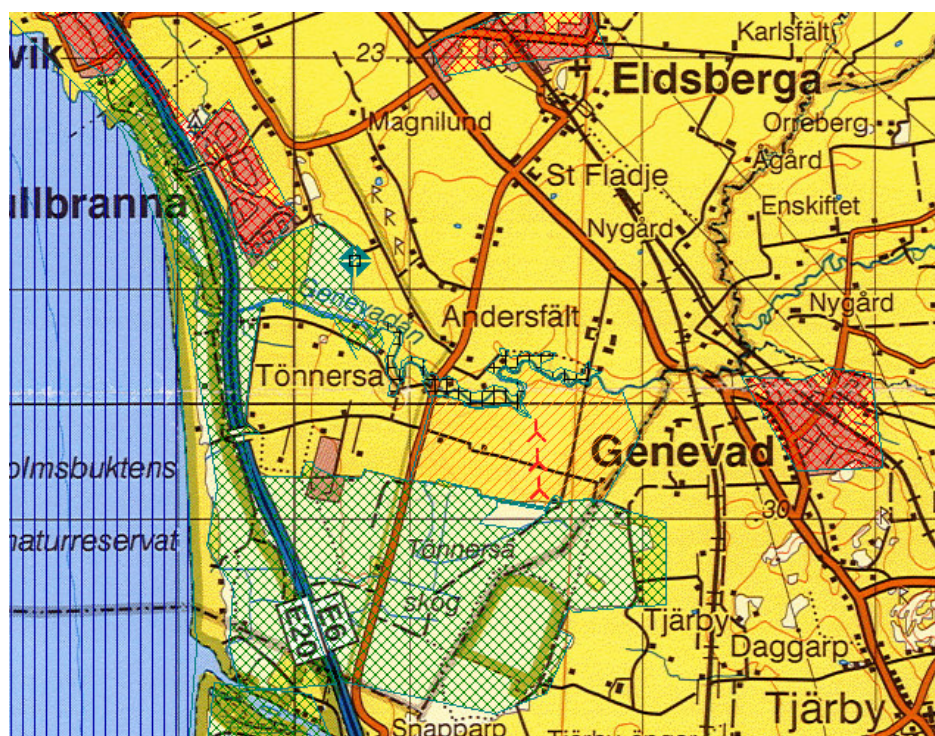


Figur 22. Fotografiet visar Tönnersaskogen innanför kalhygget. Skogen är här betydligt tätare och detta fotografi ger en bättre bild av hur Tönnersaskogen ser ut än vad fotografiet i *Figur 21* visar.

I *yttrområdet* sker en mer översiktlig indelning och landskapets karaktär delas in i fyra olika råhetsområden: Laholmsbukten, skog, tät bebyggelse och slättlandskap.

I *närområdet* och *yttrområdet* kan således följande råhetsområden definieras:

	Hav: råhetsklass 0 (råhetslängd 0,0002 m)
	Skog (>14 m): råhetsklass 3/4 (råhetslängd 0,4/1,6 m)
	Tät bebyggelse: råhetsklass 3 (råhetslängd 0,4 m)
	Åkermark med låg vegetation: råhetsklass 1 (råhetslängd 0,03 m)
	Låg skog (<14 m): råhetsklass 2,5 (råhetslängd 0,2 m)
	Åkermark med varierad vegetation: råhetsklass 1,5 (råhetslängd 0,06)



Figur 23. Karta över närområdet med inlagda råhetsområden enligt ovanstående definition.

Kartan i *Figur 23* visar den digitaliserade råheten i *närområdet*. Bakgrundsråheten, det vill säga där ingen digitalisering gjorts, är definierad som *åkermark med varierad vegetation* (råhetsklass 1,5).

5.3.4 Närliggande hinder

Enligt avsnitt 2.5.2 är ett närliggande hinder en enstaka byggnad eller skogsdunge med följande två kriterier: höjden ska vara minst en fjärdedel av vindkraftverkens navhöjd och hindret ska finnas inom en radie av 1000 meter från vindkraftverken. Eftersom vindkraftverkens navhöjd är 65 meter ska således ett hinder vara mer än sexton meter högt.

Efter observationer på plats påträffades en gård med intilliggande lövträd cirka 500 meter väster om det mellersta vindkraftverket, se *Figur 24*. Trädens höjd uppskattas till cirka arton meter och de växer främst söder och väster om bostadshuset. Nordväst om bostadshuset (till höger bakom ladugården i *Figur 24*) finns enbart några döda träd. Byggnadernas höjd är cirka sex meter. Skogens porositet förändras något över tiden eftersom träden saknar blad på vinterhalvåret. Dock står träden förhållandevis tätt och porositeten uppskattas till 0,1. Övriga gårdar och skogsdungar runt verken är lägre än sexton meter och är då inget hinder enligt definition.



Figur 24. Fotografi av ett närliggande hinder. Bilden är tagen från vägen med det mellersta verket i ryggen. Gården ligger alltså väster om vindkraftverken och norr är således höger på bilden. I förgrunden syns det trädgårdsgräs som odlas på fälten runt vindkraftverken.

5.3.5 Modellering

För att undersöka huruvida WAsP tar hänsyn till de meteorologiska fenomen som uppstår över närliggande skog utförs modelleringar över energiproduktionen för vindkraftverken vid Andersfält. Förutom vinddata från en närliggande vindstation i Halmstad används områdesspecifik data från ovanstående områdesbeskrivning. Vid beräkningen tas även hänsyn till de parkeffekter²¹ som uppstår på grund av vakar från vindkraftverk nedströms. Eftersom det under arbetets gång uppkommit olika uppgifter om vilken råhetsklass som bör användas för skog har beräkningar utförts dels med råhetsklass 3 och dels med råhetsklass 4 för skogen vid Andersfält. Beräkningar har även utförts med och utan nollplansförskjutning. Huvudresultatet från modelleringen presenteras i *Tabell 5* i form av årlig energiproduktion för de tre vindkraftverken vid Andersfält. Resultatet från modelleringen kan jämföras med den verkliga energiproduktionen från den första delstudien, *skillnad i energiproduktion*. Ett mer omfattande resultat från modelleringen presenteras i *Bilaga D*.

²¹ Se kapitel 3.3.

Tabell 5. I tabellen presenteras huvudresultatet från WAsP-modelleringen tillsammans med den uppmätta energiproduktionen efter driftstoppskorrigering.

	Energiproduktion per verk och år, MWh		
	Södra vindkraftverket	Mellersta vindkraftverket	Norra Vindkraftverket
Modellering Råhetsklass 3 för skog Utan nollplansförskjutning	1726	1723	1732
Modellering Råhetsklass 4 för skog Utan nollplansförskjutning	1566	1587	1607
Modellering Råhetsklass 3 för skog Med nollplansförskjutning	1715	1724	1744
Modellering Råhetsklass 4 för skog Med nollplansförskjutning	1555	1588	1619
Uppmätt energiproduktion efter driftstoppskorrigering	1436	1571	1581

Utifrån ovanstående resultat går det att avläsa en påtaglig skillnad i beräknad energiproduktion beroende på om råhetsklass 3 används för skog eller om råhetsklass 4 används. Detta är givetvis mycket intressant och visar hur viktigt det är att rätt råhetslängd används vid uppskattning av energiproduktionen med hjälp av WAsP. Dock är syftet med denna delstudie att undersöka huruvida WAsP tar hänsyn till de meteorologiska fenomen som uppstår nära skog och därför koncentreras vidare analys på jämförelse mellan modellering och uppmätta värden. När denna jämförelse görs är det ytterst viktigt att poängtera det faktum att resultatet från modelleringen visar energiproduktionen under ett normalår. Eftersom årsmedelvinden varierar mellan olika år har en analys av medelvinden för den aktuella perioden, februari 2004 till och med september 2006, utförts (DMI 2007). I *Tabell 6* visas resultatet från analysen.

Tabell 6. I tabellen jämförs uppmätt medelvind i Köpenhamn med normalvinden mellan åren 1966 till 1977 (DMI 2007).

	År 2004	År 2005	År 2006
	Februari-december	Januari-december	Januari-september
Uppmätt medelvind, m/s	5,1	5,1	4,5
Normalmedelvind, m/s	5,6	5,7	5,5

Trots att mätningarna i *Tabell 6* är från Köpenhamn ger de en bild av hur mycket det blåste i regionen under den aktuella perioden. När en jämförelse görs mellan uppmätta vindhastigheter och normalvinden i *Tabell 6* kan det konstateras att sedan vindkraftverken vid Andersfält sattes i drift har det blåst mindre än normalt. Även om skillnaden i meter per sekund inte är speciellt omfattande är det viktigt att belysa att vindens energiinnehåll är proportionell med vindhastigheten i kubik²². Således blir skillnaden i energiproduktion procentuellt betydligt större än vad skillnaden i *Tabell 6* visar. Även det faktum att effektkurvan, där energiproduktionen beskrivs som funktion av vindhastigheten, inte är linjär försvårar en direkt korrigering utifrån resultatet i *Tabell 6*. Att det blåst mindre under den aktuella tidsperioden kan förklara varför modelleringen, med råhetsklass 3 för skog, ger en betydligt högre energiproduktion än uppmätta värden, se *Tabell 5*. Det går därför inte utifrån

²² Vindens energiinnehåll beskrivs närmre i *kapitel 3.4.1*.

denna studie att fastslå huruvida råhetsklass 3 eller råhetsklass 4 bäst beskriver vindprofilen ovanför Tönnersaskogens. En direkt jämförelse mellan beräknad och uppmätt energiproduktion kan göras först efter en normalårskorrigerig av vindhastigheten vid Andersfält. I WASP-modelleringen användes vinddata från Halmstad flygplats mellan åren 1966 till 1977. Eftersom vindstationen därefter lades ner finns det inga vinddata från Halmstad under den perioden vindkraftverken vid Anderfält var i drift. En normalårskorrigerig av vindhastigheten skulle därför få göras utifrån vinddata från stationer längre ifrån Andersfält, vilket givetvis skulle innebära en större osäkerhet.

Istället för att göra en normalårskorrigerig kan skillnaderna i energiproduktion mellan vindkraftverken studeras. Om modellerna i WASP klarar av att beskriva vindens karaktär vid Andersfält borde den procentuella skillnaden i energiproduktion mellan vindkraftverken vara ungefär den samma för modelleringen och uppmätta värden. Därför analyseras den procentuella skillnaden i energiproduktion mellan vindkraftverken i *Tabell 5*. I *Tabell 7* presenteras resultatet.

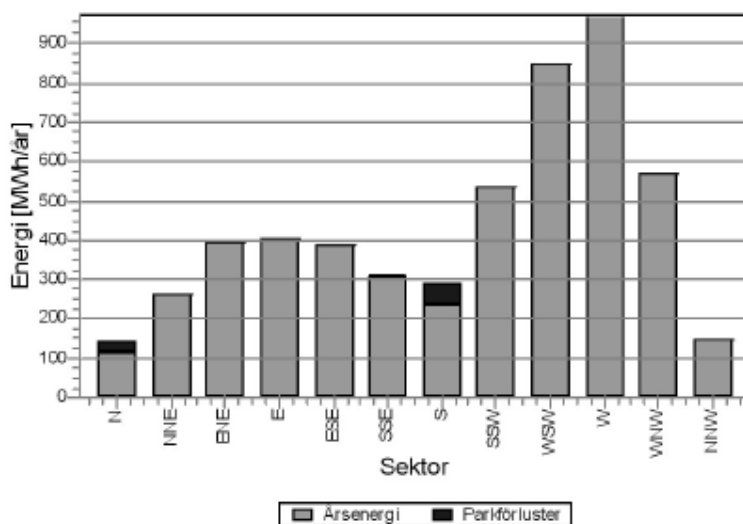
Tabell 7. I tabellen presenteras den procentuella skillnaden i energiproduktion mellan de mellersta och södra, norra och södra samt norra och mellersta vindkraftverken.

	Procentuell skillnad i energiproduktion mellan vindkraftverken		
	Mitt-syd	Nord-syd	Nord-mitt
Modellering Råhetsklass 3 för skog Utan nollplansförskjutning	-0,2	0,3	0,5
Modellering Råhetsklass 4 för skog Utan nollplansförskjutning	1,3	2,6	1,2
Modellering Råhetsklass 3 för skog Med nollplansförskjutning	0,5	1,7	1,1
Modellering Råhetsklass 4 för skog Med nollplansförskjutning	2,1	4,0	1,9
Uppmätt energiproduktion Efter driftstoppsskorregerig	9,4	10,1	0,6

Enligt uppmätta värden från den första delstudien producerar det södra vindkraftverket i storleksordningen tio procent mindre energi än de mellersta och norra verken. Skillnaden mellan de mellersta och norra verken är betydligt mindre, i storleksordningen en procent. Då en jämförelse mellan dessa uppmätta värden och de modellerade värdena görs framkommer en påtaglig skillnad mellan modell och verklighet, se *Tabell 7*. För samtliga modelleringar är skillnaden i energiproduktion mellan de södra och mellersta samt södra och norra betydligt lägre än de uppmätta värdena. Vid modellering med råhetsklass 3 för skog producerar vindkraftverken i stort sett lika mycket energi. Att det mellersta vindkraftverket producerar 0,2 procent mindre energi än det södra beror på den parkeffekt som uppkommer vid sydlig vind. Enligt modellen är förlusten på grund av parkeffekt således större än skogens inverkan på energiproduktionen. När råhetsklass 4 för skog används blir skillnaden i energiproduktion mellan verken större. För de mellersta och södra samt norra och södra blir skillnaden dock inte lika omfattande som vid uppmätta värden. När nollplansförskjutning inkluderas i modellen blir skillnaderna mellan *Mitt-syd* och *Nord-syd* något större, men det är fortfarande långt ifrån skillnaden vid uppmätta värden. Utifrån resultatet i *Tabell 7* kan det slutligen

konstateras att modellerna i WAsP inte tar hänsyn till de meteorologiska fenomen som uppstår vid Tönnersaskogen. Det är främst energiproduktionen för det södra verket i förhållande till de övriga som WAsP inte klarar av att beskriva.

I den första delstudien, där skillnaden i energiproduktion mellan vindkraftverken analyseras, försummas parkeffekten. Detta antagande kan i efterhand bekräftas av modelleringen som visar att den totala förlusten på grund av parkeffekt för vindkraftverken vid Andersfält är knappt två procent. Diagrammet i *Figur 25* visar den beräknade energiproduktionen för de tre vindkraftverken vid Andersfält uppdelat i sektorer. Diagrammet är hämtat från den beräkning då råhetsklass 3 användes. För varje sektor visas energiförlusten på grund av parkeffekt och som väntat är förlusten störst då det blåser nordlig eller sydlig vind. Uppdelat per verk blir energiförlusten på grund av parkeffekt störst för det mellersta verket (2,2 %) och minst för det södra verket (0,9 %). För det norra vindkraftverket blir energiförlusten 1,7 procent.



Figur 25. I diagrammet presenteras beräknad årlig energiproduktionen uppdelat på tolv sektorer. De svarta staplarna visar energiförluster på grund av parkeffekt.

Den låga parkeffekten beror på vindkraftverkens placering. Dels är avståndet mellan verken tillräckligt långt (250 meter eller fem rotordiametrar) för att parkeffekten inte ska bli allt för påtaglig och dels står verken i en nord-sydlig rad. Detta gör att den förhärskande västliga och sydvästliga vindriktningen ger en förhållandevis låg parkeffekt.

Sammanfattningsvis visar resultatet från modelleringen att WAsP-modellen ger en felaktig bild av energiproduktionen för vindkraftverk placerade intill skog. Trots att hänsyn har tagits till högre råhetsgrad samt nollplansförskjutning klarar inte modellen av att beskriva de komplexa meteorologiska fenomen som uppstår över skog.

6. Diskussion

I detta kapitel diskuteras hur den vetenskap, som detta examensarbete lett fram till, kan användas för att förbättra kunskapen om vindkraft i skogsmiljö. För att diskussionen ska bli mer utförlig och intressant har sakkunniga inom området kontaktats. I nedanstående text varvas deras uttalanden med egna observationer och åsikter. De sakkunnigas utlåtande refereras löpande i texten och övrigt är således egna synpunkter. Under diskussionen behandlas även information som framkommit under examensarbetets gång och dessa uppgifter hänvisas till kapitel i rapporten. I diskussionens första avsnitt diskuteras möjligheterna för vindkraft i skogsmiljö. I de tre nästkommande avsnitten diskuteras resultatet samt de felkällor som uppkommit under arbetet med de tre delstudierna: *Skillnad i energiproduktion*, *Skogens påverkan* samt *Modellering*. Slutligen diskuteras examensarbetets generaliserbarhet.

6.1 Vindkraft och skog

Eftersom jag parallellt med detta examensarbete har arbetat med vindkraftsprojektering har möjligheterna samt problematiken med vindkraft i skog även kunnat ses från ett företagsekonomiskt perspektiv. Nedan belyses och diskuteras några viktiga observationer som bör beaktas då vindkraft planeras i skogsmiljöer.

6.1.1 Stort intresse för vindkraft i skog

Sedan våren 2006 då en ny vindkartering baserad på MIUU-modellen presenterades har intresset för vindkraft i skogsmiljö ökat lavinartat. Det stora intresset beror på att resultatet från MIUU-modellen visar att vindarna, på 71 meters höjd ovan nollplansförskjutningen, är lika starka över skogarna i till exempel östra Halland och Småländska höglandet som över slätterna i Skåne (*Kapitel 4*). Detta har lett till att markägare, projekteringsföretag och investerare ser stora möjligheter att tjäna pengar på etableringsplatser som tidigare inte ansågs tänkbara för vindkraft. Till exempel finns det söder om Nässjö ett område som enligt MIUU-modellen har mycket goda vindförhållanden. Trots att dessa teoretiska beräkningar ännu inte har verifierats för området tävlar, förutom markägare, minst sex företag (Eolus Vind, Vindkompaniet, Smålandsvind, Norra Smålands Energibolag och Stena) om att få rättigheterna till att etablera vindkraft.

Kommuner i Sverige har tagit del av resultatet från MIUU-modellen för att utifrån det planera vindkraftsetableringen i kommunen. Eftersom vindkraftverk placerade i slättlandskap ofta stöter på ett stort lokalt motstånd ser kommuner tack vare MIUU-modellen en möjlighet att placera vindkraftverk i skogsmiljöer. Eftersom det ofta finns större obebodda ytor i skogen än på slätten är förhoppningen att ett mindre antal närboende ska påverkas negativt av en vindkraftsetablering. Enligt lag är det upp till kommunen att fatta beslut om och var vindkraftverk ska etableras (Plan- och bygglagen). Det finns då en påtaglig risk att kommuner i framtiden enbart kommer att tillåta vindkraftsetableringar i mindre kontroversiella miljöer, såsom skog. Även om vindförhållandena på till exempel 71 meter ovan nollplansförskjutningen är lika för slätt och skog måste vindkraftverken i skogen på grund av nollplansförskjutningen ha högre torn. Detta leder givetvis till att en etablering i skogsmiljö blir dyrare än en etablering på slätten och i slutändan kommer priset per producerad kilowattimme vindkraft bli högre. På sikt kommer då vindkraft få svårare att konkurrera mot andra energikällor och utbyggnaden av vindkraft kommer då inte att ske i den takt som staten

önskar. Ett mer marknadsmässigt planeringssätt borde vara att låta vindkraft först etableras på de platser där energiproduktionen per investerad krona blir som högst. Till exempel finns det flertalet platser i sydvästra Skåne där etablering av vindkraft stoppas på grund av lokalt politiskt motstånd. Vindkraft i dessa områden skulle ha betydligt lättare att konkurrera med andra energislag, vilket är viktigt för att vindkraft i framtiden ska kunna ses som trovärdigt.

6.1.2 Vindkraftsmarknaden

Den svenska vindkraftsmarknaden domineras av två fabriker, danska Vestas och tyska Enercon (Simmingsköld 2007). I världen finns det ytterligare några stora fabriker, så som Gamesa, Bonus Siemens och GE. Dessa har hittills haft svårt att slå sig in på den svenska marknaden, vilket kan tyckas märkligt eftersom det idag råder en stor efterfrågan på vindkraftverk. En anledning till att det är svårt för nya vindkraftstillverkare att etablera sig kan vara det faktum att branschen kräver förtroende och tillförlitlighet. Eftersom ett vindkraftverk beräknas producera el under 20 till 25 år är det viktigt att välja det verk som tros ha störst driftssäkerhet. Enercon och Vestas har funnits i Sverige under en längre tid och har därför hunnit bygga upp ett förtroende samt en organisation som kan erbjuda en god service.

Eftersom tillgången på nya vindkraftverk är liten i förhållande till efterfrågan kan tillverkare av vindkraftverk ställa högre krav på sina kunder. Detta är någonting Vestas har tagit fasta på och idag kräver företaget en omfattande beskrivning av bland annat vindförhållande, topografi samt omkringliggande vegetation (Johansson 2007). Det är främst vindförhållandena som noggrant måste studeras på den aktuella platsen genom mätning av vindens hastighet och riktning vid navhöjd under minst ett års tid. Enligt Vestas krävs uppgifter om vindens karaktär för att kunna optimera vindkraftverket för den specifika platsen samt för att de med större säkerhet kan förutsätta vindkraftverkets livslängd (Øhlenschläger 2007). Ytterligare en anledning är troligtvis att Vestas inte vill riskera att placera vindkraftverk på olämpliga platser där vindkraftverken producerar lite och slits mycket, vilket skulle ge företaget dålig publicitet. I tider då det råder brist på vindkraftverk har Vestas möjlighet att välja var verken ska placeras och givetvis väljer de då de platser som har bäst förutsättningar att producera mycket energi till en låg driftskostnad.

6.1.3 Branschen är före vetenskapen

Detta examensarbete visar att vetenskapen som finns när det gäller vindkraft i skog är ytterst begränsad. Trots det är intresset för vindkraft i skogsmiljöer stort och mycket av dagens projektering i skogsmiljö sker på spekulationer, vilket givetvis innebär höga risker. För vindkraften i stort vore det förödande om det byggs alltför många vindkraftverk i miljöer där inte intäkterna från elproduktionen täcker utgifterna. Det kan leda till att investerare tappar förtroendet för vindkraftsbranschen, vilket i sin tur skulle leda till att efterfrågan på vindkraft drastiskt skulle minska.

Det kan konstateras att vindkraftsbranschen i Sverige för närvarande ligger före vetenskapen när det gäller vindkraft i skog. I stället för att påskynda en utbyggnad av vindkraft i osäkra miljöer borde större resurser läggas på att studera de fenomen som uppstår när vinden transporteras över komplex terräng, som till exempel skogslandskap.

6.2 Skillnad i energiproduktion

Syftet med fallstudiens första delstudie var att undersöka om det fanns någon signifikant skillnad i energiproduktion mellan de tre vindkraftverken vid Andersfält. Resultatet i *Kapitel 5.1* visar att vindkraftverket närmast skogen har en betydligt lägre energiproduktion än de övriga. Detta påverkar givetvis vindkraftverkets lönsamhet vilket diskuteras i nedanstående avsnitt.

6.2.1 Lönsamhet

Vindkraft konkurrerar idag på samma marknad som bland annat kärnkraft och vattenkraft. En förutsättning för nyetablering av vindkraft är ekonomisk lönsamhet, vilket i princip innebär att intäkterna i form av elförsäljning blir större än investeringskostnaden. Utgifterna för ett vindkraftverk är förhållandevis konstanta. Därför blir den förväntade energiproduktionen samt elpriset helt avgörande för hur lönsamt ett vindkraftverk är och således också om vindkraftverket kommer att byggas. Det är därför av yttersta vikt att med god säkerhet kunna uppskatta hur mycket el ett planerat vindkraft kommer att producera. Eftersom det allt oftare projekteras för vindkraft i skogsmiljö är det intressant att diskutera i vilken omfattning skogen påverkar produktionen.

Resultatet från denna studie visar en skillnad på nio procent mellan det södra och mellersta samt tio procent mellan det södra och norra vindkraftverket vid Andersfält. Denna skillnad är mer omfattande än den uppskattning som gjordes innan vindkraftverken sattes i drift, då energiproduktionen för det södra vindkraftverket uppskattades till cirka tre procent lägre än det mellersta och norra. Vid uppskattningen av energiproduktionen förväntades de mellersta och norra vindkraftverken producera lika mycket. Denna studie bekräftar detta antagande då skillnaden i energiproduktion mellan dessa två vindkraftverk är mindre än en procent.

Resultatet från den första delstudien visar att Tönnersaskogen har en signifikant påverkan på energiproduktionen för det södra verket. Eftersom skillnaden i produktion mellan det mellersta och norra är betydligt mindre torde skogens påverkan på det mellersta verket vara liten. Det bör dock påpekas att det mellersta vindkraftverket står något högre i terrängen än det norra. Det är därför troligt att det mellersta vindkraftverket producerar något mer energi än vad det skulle ha gjort om det var på samma höjd som det norra. Trots att skillnaden i höjdled är liten, uppskattningsvis en till två meter, kan den ha en signifikant påverkan på energiproduktionen. Energiproduktionen kan enligt Simmingsköld (2007) öka i storleksordningen en procentenhet per meter. På grund av denna skillnad i höjdled är det utifrån resultatet från detta examensarbete svårt att fastslå i vilken omfattning skogens påverkan avtar med avståndet. Det kan trots det konstateras att skogens påverkan på vindkraftverken vid Andersfält kraftigt avtar mellan 100 till 350 meter från skogens kant.

Som nämnts tidigare är energiproduktionen för ett vindkraftverk helt avgörande för hur lönsamt ett projekt är. En tioprocentig minskning i energiproduktionen påverkar i högsta grad lönsamheten och kan leda till att ett vindkraftverk inte kan bära sina kostnader (Simmingsköld 2007). Under projekteringsarbetet uppskattas den förväntade energiproduktionen och utifrån den kan investeringskalkyler tas fram. Utöver energiproduktionen har även elpriset en stor inverkan på kalkylens resultat. Historiskt sett har ägare av vindkraftverk där energiproduktionen i förhand har överskattats räddats av ett högre elpris än vad som var väntat (Simmingsköld 2007). Att uppskatta ett framtida elpris är givetvis ytterst osäkert, vilket gör det svårt att ta fram trovärdiga kalkyler som sträcker sig ett par decennier framåt i tiden.

De vindkraftverk som byggs idag är betydligt större än de som etablerades för några år sedan. Samtidigt har priset på råvaror, så som stål och koppar, ökat kraftigt vilket har lett till en högre investeringskostnad för vindkraft. Ett modernt nyckelfärdigt vindkraftverk på omkring två megawatt kostar i storleksordningen 30 miljoner kronor (Simmingsköld 2007). Utifrån ovanstående resonemang kan det konstateras att det blir allt viktigare att ta fram modeller som med större säkerhet kan uppskatta energiproduktionen i ett vindkraftverk.

6.2.2 Uppskattning av energiproduktionen

Svårigheten med att uppskatta energiproduktionen för ett vindkraftverk kan brytas ner till två huvudsakliga problem. För det första måste vindens energiinnehåll vid den aktuella platsen uppskattas. Därefter måste vindens energi på ett korrekt sätt omvandlas till den elektriska energi som vindkraftverket förväntas att generera. Vindens energiinnehåll kan med relativt stor säkerhet uppskattas med hjälp av vindmätare på platsen. När det inte finns en vindmätare i anslutning till verken kan beräkningsprogram liknande WAsP tillsammans med vindmätningar från en närbelägen plats användas för att ge en bild av hur mycket energi det finns i vinden. Givetvis blir uppskattningen bättre om vindmätningen utförs så nära och i en så lik miljö som möjligt. Detta examensarbete visar på svårigheten att uppskatta vindens energiinnehåll i skogsterräng och de modeller som används i beräkningsprogrammet WAsP underskattar skogens påverkan på energiproduktionen (*Kapitel 5.3*). Vid projektering av nya anläggningar i liknande terräng som Andersfält skulle detta problem kunna kringgås genom att under drygt ett års tid mäta vindens hastighet på den aktuella höjden. På så sätt kan energiinnehållet samt turbulensintensiteten beräknas och efter normalårskorrigerings fås en bild av hur mycket energi vinden vid den aktuella platsen på den specifika höjden har under ett normalår. Vid vindmätning rekommenderas att minst tre vindmätare på tre olika höjder monteras för att på så sätt skapa en ungefärlig bild av vindprofilen (Øhlenschläger 2007).

Även om vindens energiinnehåll med relativt stor säkerhet kan uppskattas kvarstår svårigheten att på ett korrekt sätt omvandla vindens energi till den elektriska energi som vindkraftverket genererar. Vid energiberäkningar för vindkraftverk är alltid utgångspunkten vindens energi vid navhöjden. Upptaget av energi sker givetvis över hela rotorytan. Normalt sett är vindenergin jämfört med navhöjden betydligt lägre i den nedre delen av rotorytan och betydligt högre i den övre delen av rotorytan. Det är även viktigt att påpeka att ökningen av vindenergi i höjddled inte är linjär eftersom vindprofilen i sig är exponentiell, och framför allt eftersom vindens energiinnehåll är proportionell med vindhastigheten i kubik (*Kapitel 3.4.1*).

Vindens energi vid navhöjden är således inte ett genomsnittligt värde över hur mycket energi rotorbladen erhåller. Det genomsnittliga energiinnehållet är istället någonstans mellan navhöjden och toppen på rotorytan, beroende på vindprofilens karaktär. Variationen av energiinnehållet i höjddled beaktas, vid uppskattningar av energiproduktionen för ett vindkraftverk, genom att anta att samma variation fanns då effektkurvan för det specifika vindkraftverket togs fram (Øhlenschläger 2007). Detta antagande gäller således enbart om vindprofilen för den aktuella platsen är identisk med den vindprofil som rådde när effektkurvan togs fram. I verkligheten överensstämmer inte alltid dessa två vindprofiler. Till exempel har vindprofilen över skog en helt annan karaktär än vindprofilen över slättlandskap. Effektkurvor som är baserade på vindprofiler i slättlandskap ger således en felaktig bild över energiproduktionen för vindkraftverk placerade i skogslandskap.

Ytterligare en aspekt som måste beaktas då energiproduktionen för vindkraftverk placerade i skogsterräng uppskattas är turbulensens intensitet, som kan variera trots att medelvindhastigheten är den samma. Till exempel kan det på 65 meters höjd över en skog vara samma medelvind som 50 meter över ett slättlandskap. Dock är det troligt att variationen i vindhastighet, det vill säga turbulensen, är högre över skogen jämfört med slätten. En kraftig variation av vindhastigheten gör att det blir svårare för vindkraftverket att ta upp energin i vinden vilket leder till lägre energiproduktion. När Vestas tog fram effektkurvor för vindkraftverket V52-850 kW användes turbulensintensitet tio procent (Vestas 2004). Vid energiberäkningar där högre intensitet råder är det därför troligt att energiproduktionen för vindkraftverk överskattas. Denna skillnad har uppmärksammats av Enercon som på prov tagit fram två effektkurvor för olika turbulensintensiteter (Enercon 2002). När energiberäkningar utfördes för de två kurvorna med i övrigt identiska värden kunde en signifikant skillnad på cirka fem procent konstateras (Enercon 2002).

Det kan utifrån ovanstående resonemang konstateras att uppskattningen av energiproduktionen för vindkraftverk kan bli felaktig trots att vindens medelhastighet är känd. Ett sätt att komma förbi detta problem är att ta fram effektkurvor för olika terrängtyper samt för varierande turbulensintensitet, vilket Enercon i en intern rapport föreslog redan år 2002 (Enercon 2002). Trots att denna problematik har varit känd under en längre tid finns det idag enbart effektkurvor för en typ av terräng samt en bestämd turbulens. När allt fler vindkraftverk planeras i varierande terräng med bland annat skog är det av stor vikt att effektkurvor som överensstämmer med verkligheten tas fram.

Det bästa sättet att bilda sig en uppfattning av den förväntade energiproduktion vid en viss plats är att sätta upp ett vindkraftverk. Om det visar sig att detta vindkraftverk producerar enligt förväntat kan sedan fler verk sättas upp i en park. Detta kan tyckas vara en allt för stor risk, men faktum är att det är precis vad som sker. Till exempel kommer det under hösten 2007 sättas upp ett så kallat referensverk vid Fredriksdal i Nässjö kommun. Det finns i närområdet plats för ytterligare vindkraftverk och om produktionen för det första verket bedöms vara tillräcklig kommer en större park etableras.

I *Kapitel 5.3* där resultatet från modelleringen av energiproduktion med hjälp av WASP presenteras framkommer det att WASP-modellen underskattar skogens påverkan vid energiberäkning. I resultatet från denna studie går det inte att fastslå huruvida det är vindhastigheten vid den aktuella platsen eller omvandlingen med hjälp av effektkurvan som är felaktig.

6.2.3 Driftstopp

För att urskilja huruvida ett vindkraftverk varit ur drift används i detta examensarbete en statistisk metod där kraftigt avvikande värden, så kallade outliers, utesluts. Denna metod är inte till hundra procent tillförlitlig eftersom dygn där samtliga tre vindkraftverk varit ur drift inte kommer med. Även kortare driftstopp för ett enskilt vindkraftverk missas med denna metod eftersom energiproduktionen då inte blir avvikande. Metoden anses dock vara applicerbar till undersökningar liknande detta examensarbete där jämförelser görs mellan vindkraftverk. Om till exempel alla tre vindkraftverken vid Andersfält varit ur drift blir jämförelsen ändå rättvis. De dygn det varit driftstopp under en kortare tid förändrar resultatet marginellt eftersom den uteblivna energiproduktionen blir liten.

En intressant upptäck, som gjordes när driftstopp togs med i analysen, är att det norra vindkraftverket har en större benägenhet att vara ur drift än de övriga två vindkraftverken. Utifrån diskussioner med ansvariga har det framkommit att det främst rörde sig om fel på den så kallade US-sensorn, vilket innebär att vindkraftverkets vindmätarutrustning inte fungerade som den skulle (Larsson 2007). Dessa problem ska nu enligt Vestas vara lösta, men har givetvis inneburit energiförluster och därmed även uteblivna intäkter för ägarna (Larsson 2007).

På uppdrag av Energimyndigheten samt Elforsk genomförs en uppföljning av energiproduktionen för vindkraftverk i Sverige. Inrapporteringen till denna uppföljning är frivillig, men ägarna till de flesta av Sveriges cirka 800 vindkraftverk har valt att lämna ut uppgifter om sina verk. Via hemsidor förmedlas statistik över bland annat energiproduktionen för de senaste tre dyggen och varje månad samt år sammanställs värdena i rapporter. Denna lättillgängliga driftsinformation underlättar projektering av nya vindkraftverk eftersom det med hjälp av närliggande befintliga verk går att bilda sig en uppfattning över energiproduktionen. Även till detta examensarbete har denna uppföljning varit till stor hjälp eftersom driftsuppgifterna för vindkraftverken vid Andersfält kommer ifrån denna källa. Förutom energiproduktion finns det i den offentliga statistiken även uppgifter om vindkraftverkens tillgänglighet på elnätet. Detta är en viktig uppgift eftersom vindkraftverk kan vara ur drift under längre perioder, vilket måste beaktas vid jämförelser mellan olika verk. Enligt driftsstatistiken för de tre vindkraftverken vid Andersfält har alla tre verken sedan driftstart haft en hundraprocentig tillgänglighet (Energimyndigheten 2006). Resultatet från detta examensarbete visar dock att det norra vindkraftverket har varit mer ur drift än de övriga, vilket åskådliggörs i *Tabell 3*. Resultatet från *Tabell 3* visar på en signifikant skillnad i tillgänglighet mellan det norra och det mellersta vindkraftverket vilket inte framkommer i den offentliga driftsstatistiken. Således kan det konstateras att det värde på tillgängligheten som ges ut via Energimyndigheten och Elforsk är felaktigt.

För att få klarhet i hur det offentliga värdet på tillgänglighet tas fram kontaktas Nils-Eric Carlstedt, konsult på Vattenfall Power Consultant och ansvarig för driftsuppföljningen. Enligt Carlstedt (2007) är de medvetna om att värdet på tillgängligheten inte alltid är korrekt. Detta beror på att det är upp till ägarna av vindkraftverken att rapportera in så kallad *hindertid* då verken står still på grund av service eller tekniskt fel. Om ingen rapportering sker blir således tillgängligheten 100 procent. Istället för att inrapporteringen ska ske via ägare görs försök att finna en lösning med vindkraftsleverantörerna där de efter service rapporterar in driftstopp. Det finns därför en förhoppning om att värdet på tillgängligheten i framtiden ska bli mer tillförlitlig. (Carlstedt 2007)

Att ta fram ett korrekt värde på tillgängligheten är inte helt enkelt. Till exempel blir energiförlusten större vid haveri på vinterhalvåret då det blåser mer än vad det blir på sommaren då vindkraftverken producerar lite el. Att hitta en lösning där de som sköter servicen rapporterar skulle troligtvis inte öka tillförlitligheten eftersom det oftast är vindkraftsleverantörerna som själva sköter servicen. Hög tillgänglighet är viktigt vid marknadsföring och till exempel skulle Vestas troligtvis inte vilja skylta med hur ofta deras växellåda går sönder. Detta skulle givetvis vara dålig publicitet och det finns en uppenbar risk att vindkrafttillverkarna inte skulle rapportera in driftstopp. I stället för osäker inrapportering skulle en statistisk metod liknande den som använts i detta examensarbete kunna tillämpas, vilket diskuteras närmre i *Kapitel 6.5.1*.

6.2.4 Ägandeförhållanden

De tre vindkraftverken vid Andersfält ägs av sju personer. Det norra verket ägs av en person, det mellersta har fyra ägare och det södra två ägare. För att på ett rättvist sätt fördela de olika verken mellan ägarna finns det en gemensam mätstation för alla tre vindkraftverken. På så sätt slås elproduktionen samman och säljs gemensamt på elmarknaden. Därefter delas intäkterna från elförsäljningen upp mellan ägarna. Detta är en beprövad lösning som underlättar försäljningen av verk i en park. Förutom att verkets placering i parken inte spelar någon roll finns det även andra fördelar med detta upplägg. Till exempel sprids riskerna för driftstopp eftersom samtliga ägare tar del av energiförlusten då ett av verken står still. (Kähler 2007)

Samtidigt leder detta till att ägarna till det södra verket inte funderar så mycket på att Tönnersaskogen försämrar elproduktionen i just deras verk, eftersom förlusten i energiproduktion fördelas på alla tre vindkraftverken. Enligt Kähler (2007), en av ägarna till det södra verket, har det aldrig varit tal om att hugga ner skogen för att öka produktionen, eftersom skogen anses vara mer värdefull än en ökning av energiproduktionen för det södra verket. Det är troligt att en ensam ägare till det södra vindkraftverket hade resonerat annorlunda eftersom denne då hade fått ta hela förlusten i form av utebliven energiproduktion. Idag när förlusten delas på tre blir den inte lika påtaglig och ägandeförhållandena har således en betydelse när lönsamheten för vindkraft intill skog diskuteras.

6.3 Skogs påverkan

Syftet med denna delstudie var att undersöka huruvida det är Tönnersaskogen som bidrar till den skillnad i energiproduktion som den första delstudien visade. Redan innan denna studie genomfördes stod det klart att det var högst troligt att skillnaden i energiproduktion berodde på skogen, eftersom den teori som finns beskriven i *Kapitel 3* pekar på just detta. Dock fanns det en förhoppning att denna studie även skulle kunna ge en bättre bild av hur omfattande skogens påverkan är. Som nämnts tidigare i *Kapitel 5.2* blev datamängden alltför knapphändig och osäker för att kunna dra några större slutsatser från denna studie. Detta beror på att den närmsta vindmätaren som var i drift under den aktuella perioden var stationerad på Hallands Väderö, cirka 30 kilometer från Andersfält. Det är troligt att vindens riktning förändras något medan den transporteras från Hallands Väderö till vindkraftverken vid Andersfält. Denna hypotes bekräftas delvis av det faktum att vindens riktning sällan är stabil under en längre tid. De vindmätningar som användes till denna studie visar att vindens riktning på Hallands Väderö fluktuerar kraftigt under de åtta mätningar per dygn som finns tillgängliga. I nedanstående avsnitt diskuteras hur turbulens samt vindriktning bör beaktas vid framtida projekteringar av vindkraft.

6.3.1 Turbulens

Att vindkraftverk som står intill skog producerar mindre energi än vindkraftverk som står i ett öppet landskap kan ses som en självklarhet. Anledningen är de meteorologiska fenomen som uppstår ovan skogen och som beskrivs i *Kapitel 3*. Det kan utifrån den inhämtade teorin konstateras att turbulens ovanför skog är ett synnerligen komplext fenomen som beror på en mängd olika faktorer. Det är därför ytterst komplicerat att utifrån teorin förklara hur luften strömmar ovanför Tönnersaskogen. För att ge en bild över denna komplexitet kan det meteorologiska systemet kring Andersfält jämföras med det meteorologiska systemet Sverige.

Det är allmänt känt att det trots avancerade modeller är ytterst svårt att förutspå vädret i Sverige. Långtidsprognoser på ett par veckor framåt kan endast göras utifrån hur vädret varit tidigare år under samma tid. Detsamma gäller för det betydligt mindre meteorologiska systemet kring Andersfält och därför blir uppskattningar av vindens egenskaper högst osäkra och generella.

Turbulent vind leder inte bara till lägre energiproduktion utan påverkar även livslängden på vindkraftverkets mekaniska komponenter. Det är således troligt att det södra verket vid Andersfält på lång sikt kommer att ha ett högre slitage än det norra. I praktiken innebär detta att vitala delar i verket eventuellt måste bytas ut, vilket får stora ekonomiska konsekvenser. Vindkraftverken vid Andersfält är dimensionerade för en turbulensintensitet på arton procent och vid skog kan intensiteten uppgå till tjugo procent eller mer (*Kapitel 3.2.1*).

Både Vestas (2004) och Enercon (Jeppsson 2007) påstår att deras vindkraftverk är dimensionerade för arton procents turbulens. Samtidigt medger de att en ökad turbulens ökar lasterna på vindkraftverket, vilket torde öka risken för haveri. För vindkraftsleverantörer är detta givetvis ett känsligt ämne eftersom de trots återkommande haveri av växelåda, generator och lager påstår att de är dimensionerade för 25 år. Vestas har under en tid haft problem med tillförlitligheten på sina maskiner, till exempel har flera växelåder fått bytas ut efter bara några års drift (Simmingsköld 2007). Om vindkraftverken skulle ha stått i en mer turbulent miljö skulle lasterna öka med ett ökat slitage som följd, vilket troligtvis skulle leda till fler haverier. I Sverige finns det få moderna vindkraftverk i skogsmiljö och eftersom de har varit i drift under ett fåtal år är det svårt att utvärdera hur laster från turbulens påverkar driftsäkerheten.

Normalt sett ökar vindens energiinnehåll med höjden och därför byggs det allt högre torn. Under vintern 2006/2007 byggdes, vid Västraby i Västergötland, Sveriges dittills högsta vindkraftverk med tornhöjden 95 meter, vilket kan jämföras med tornen vid Andersfält som är 65 meter. Påverkan från Tönnersaskogen skulle givetvis minska om tornen hade varit högre, men det är inte självklart att vindkraftverken skulle bli mer lönsamma. Vid projektering av vindkraft måste kostnaden för ett högre torn vägas mot vinsten i energiproduktion och det är därför av vikt att känna till i vilken omfattning vindenergin ökar med höjden. Resultatet från detta examensarbete visar att beräkningar med hjälp av WAsP inte är tillförlitliga i skogsmiljö och WAsP bör därför inte användas då en tornhöjd ska optimeras i skogsterräng. För att få klarhet i hur vindens karaktär förändras med höjden på en specifik plats krävs att vinden mäts på en mängd olika höjder. Detta blir givetvis en relativt stor investering på mellan en halv och en miljon kronor (Hjort 2007). Det hade därför varit önskvärt att i ett tidigare skede, med hjälp av teoretiska modeller, kunna beräkna den optimala höjden.

För att inhämta mer information om hur skog påverkar vindkraft har kontakt upprättats med Gordon Hoch, som arbetar för Enercon med etablering av vindkraft på det tyska inlandet. Enercon har i Tyskland etablerat tre större parker i och intill skogsmiljöer. Vindkraftverken i dessa parker har tornhöjder på 108 eller 114 meter. En av parkerna ligger vid Mehring och består av femton vindkraftverk av typen E66 och E70. En del av vindkraftverken vid Mehring är placerade i en skog och en del är placerade i ett öppet landskap. Därför har en jämförelse kunnat genomföras och enligt Hoch är påverkan från skogen marginell, eftersom vindturbinerna är placerade på ett 114 meter högt torn. (Hoch 2007)

6.3.2 Vindriktning

I vilken omfattning skogen påverkar energiproduktionen vid Andersfält beror givetvis på hur ofta det blåser över Tönnersaskogen. Eftersom skogen finns i söder är det främst sydliga, sydöstliga samt sydvästliga vindar som försämrar energiproduktionen. Vindens riktning samt varifrån de kraftigaste vindarna kommer kan åskådliggöras med hjälp av en vindros. I teorikapitlet 3.4.2 visas en vindros från Halmstad flygplats, cirka 16 kilometer från Andersfält. Om denna vindros antas gälla även för Andersfält kan det konstateras att den högsta vindenergin kommer ifrån väster. Sydliga vindar är betydligt ovanligare, vilket innebär att vinden vid Andersfält oftare är ostörd än störd, enligt definitionen i *Kapitel 2.4.1*. Om vindförhållandena vid Andersfält hade varit omvända, det vill säga oftare sydliga än västliga vindar, skulle energiproduktionen vid Andersfält bli betydligt lägre. Det kan konstateras att vindens riktning vid den specifika platsen har stor betydelse för energiproduktionen och detta är ytterst viktigt att beakta när resultatet från detta examensarbete analyseras.

6.4 Modellering

Den tredje frågeställningen till detta examensarbete var att undersöka huruvida det finns någon modell som kan beskriva de fenomen som uppstår intill Tönnersaskogen. Många projekteringsföretag i den svenska vindkraftsbranschen använder WAsP som ett hjälpmedel när energiproduktionen på förhand ska uppskattas. Det är då intressant att undersöka hur väl denna modell överensstämmer med energiproduktionen vid Andersfält. Därför jämfördes resultatet från den första delstudien, där energiproduktionen för de tre vindkraftverken fastslogs, med resultatet från beräkningar med hjälp av WAsP-modellen.

6.4.1 Resultat och felkällor

För att kunna genomföra en WAsP-beräkning krävs indata i form av topografi, råhet och närliggande hinder. Dessa parametrar definierades utifrån en områdesbeskrivning som utfördes dels på plats vid Andersfält och dels utifrån kartmaterial. En felkälla till modelleringen skulle kunna vara felaktigheter i indata. Det måste dock påpekas att ett av syftena med WAsP är att på ett enkelt sätt kunna beräkna vindens energiinnehåll utifrån kartor. Det är därför troligt att den systematiska samt noggranna beskrivning av området som genomfördes i detta examensarbete är mer än tillräcklig. De osäkerheter och begränsningar som finns i modellens linjära samband är troligtvis en större felkälla i förhållande till de mätfel som kan ha uppstått vid områdesbeskrivningen. Det är dessutom troligt att områdesbeskrivningen som genomfördes till detta examensarbete är mer omfattande än de beskrivningar som normalt görs vid WAsP-beräkningar. Följaktligen kommer de fel som uppstår vid denna modellering även uppstå när energiproduktionen uppskattas vid till exempel vindkraftsprojektering.

Resultatet från modelleringen visar att WAsP-modellen underskattar skogens påverkan på energiproduktionen i vindturbinerna vid Andersfält. Således kan det konstateras att frågeställningen, *huruvida det finns någon modell som beskriver energiproduktionen vid Andersfält*, inte kunnat besvaras genom detta examensarbete. Eftersom WAsP bygger på enkla linjära samband är det troligt att det finns mer avancerade meteorologiska modeller som på ett bättre sätt tar hänsyn till de fenomen som uppstår ovanför skog. Under arbetets gång har ytterligare modeller vars syfte är att beskriva vindenergin på en bestämd höjd framkommit, men på grund av begränsningar i tid har inte dessa modellers tillförlitlighet i skogsmiljö kunnat undersökas närmre.

Det hade varit önskvärt att utifrån en överensstämmande modell undersöka hur mycket högre vindkraftverk i skogsmiljö måste vara för att energiproduktionen ska bli samma som i ett slättlandskap. Det hade även varit intressant att få en bild av hur skogens påverkan avtar med avståndet från skogen på en bestämd höjd. Eftersom resultatet från detta examensarbete visar på brister i WAsP kan inte denna modell användas för att få svar på ovanstående frågeställningar.

WAsP-modellens enkla metodik, som bygger på att omvandla befintliga vindmätningar till den terräng som råder vid den aktuella platsen, fungerar väl då vindmätningen är utförd i en terräng som är lik den aktuella platsens terräng. Vinddata till moduleringen i detta examensarbete hämtades från Halmstads flygplats. Om denna vindmätning istället hade utförts i ett skogslandskap är det troligt att resultatet hade överensstämmt bättre med verkligheten. För att modellen ska bli tillförlitlig i skogsmiljöer måste de fenomen som uppstår ovanför trädtopparna beaktas på ett bättre sätt än vad WAsP gör. Eftersom det idag i en allt större omfattning projekteras för vindkraft i skogsmiljö borde det finnas ett stort kommersiellt intresse i att utveckla modeller som bättre överensstämmer med verkligheten. Bergström (2007) påstår att den betydligt mer avancerade MIUU-modellen ger en god bild över medelvindhastigheten på en bestämd höjd. Dock är denna modell inte applicerbar vid så kallad *micrositing*, på grund av begränsad upplösning. Dessutom är denna modell ännu inte tillgänglig i ett användarvänligt datorprogram, vilket troligtvis beror på att den är allt för avancerad och tidskrävande. Det hade varit önskvärt att kombinera WAsP-modellens enkla metodik med mer avancerade meteorologiska samband. På så sätt skulle modellen med större säkerhet kunna uppskatta energiproduktionen i mer komplexa miljöer utan att en vindmätning genomförts i anslutning till den aktuella platsen.

6.4.2 Resultatets förankring med tidigare studier

I en tidigare studie (Dellwik 2006) jämfördes uppmätta medelvindhastigheter intill fyra skogsområden i Danmark med beräknade medelvindhastigheter (*Kapitel 3.5.1*). Som modell användes WAsP och resultatet visade att modellen överskattade vindhastigheten intill skog. Dock blev överskattningen mindre påtaglig när nollplansförskjutning samt beräknade värden på råheten inkluderades i modellen. Dellwiks studie skiljer sig från denna studie främst i ett avseende: Dellwik (2006) jämför medelvindhastigheten medan fokus i detta examensarbete har legat på att jämföra vindkraftverks energiproduktion. Givetvis ger båda studierna en bild över hur väl WAsP överensstämmer med verkligheten men det är viktigt att poängtera att vindens energi är proportionell mot vindens energiinnehåll i kubik (*Kapitel 3.4.1*). Således blir en liten skillnad mellan uppmätt och beräknad medelvind betydligt större när den ska översättas till producerad energi i ett vindkraftverk. När enbart medelvindhastigheten studeras framkommer därför inte hur väl modellen klarar av omvandlingen mellan vindhastighet och energiproduktion, vilket diskuteras närmre i *Kapitel 6.2.2*.

Utifrån ovanstående resonemang kan det konstateras att WAsP-modellen, som med stor framgång har kunnat appliceras för energiberäkningar i öppen terräng, inte med lika stor säkerhet kan användas i skogsmiljö. Detta faktum är egentligen ingenting nytt. Redan när programmet togs fram i slutet på 1980-talet fastställde utvecklarna på Risö att programmet hade begränsad trovärdighet i komplex terräng samt skog (*Kapitel 3.4.4*). Det anmärkningsvärda är istället att WAsP under de cirka 20 år, som modellen varit tillgänglig,

inte har förbättrats. En anledning till detta skulle kunna vara att det först på senare tid projekteras för vindkraft i skogsmiljö och därför har det tidigare inte funnits ett behov. Det är även troligt att konkurrensen för beräkningsprogram av denna typ är begränsad och därför har EMD, som distribuerar WAsP, inte haft något intresse i att utveckla modellerna som ligger till grund för programmet.

6.5 Studiens generaliserbarhet

I detta avsnitt diskuteras hur generaliserbar den metodik som används i examensarbetet är, det vill säga om metodiken är applicerbar om en liknande studie ska genomföras på en annan vindkraftspark än den vid Andersfält. För att få en uppfattning om huruvida resultatet kan appliceras på andra vindkraftverk, som är placerade intill skog, diskuteras även resultatets generaliserbarhet.

6.5.1 Metodiken

Metodiken till detta examensarbete bygger på statistiska modeller och applikationer som kan användas vid framtida utvärderingar av vindkraftverk och parker. Min uppfattning av vindkraftbranschen är att det utförs allt för få utvärderingar av vindkraftprojekt, vilket leder till att utvecklingen hämmas. Ofta nöjer sig ägare till vindkraftverk att enbart följa upp energiproduktionen och så länge projektet är ekonomiskt lönsamt görs inga åtgärder för att utvärdera vindkraftverken närmare. Eftersom det hittills har varit lönsamt att äga och driva vindkraftverk i Sverige utvärderas inte projekten i någon större omfattning, vilket eventuellt skulle förändras om det i framtiden kommer upp ekonomiskt tveksamma projekt som inte blir lönsamma. De två första delstudierna till detta examensarbete visar att det med relativt enkla statistiska metoder går att få en klarare bild över hur vindkraftverken fungerar. Eftersom det enbart är indata som är specifik för vindkraftverken vid Andersfält är metodiken i allra högsta grad applicerbar även för andra vindkraftsparker.

På uppdrag av Energimyndigheten och Vindforsk utförs en kontinuerlig utvärdering av vindkraftverk i Sverige. Detta är en mycket användbar källa för att utvärdera olika projekt och få en bild över hur bra en specifik plats för vindkraft är. Dock framgår det från resultatet i detta examensarbete att uppgifterna om vindkraftverkens tillgänglighet är felaktiga, se även diskussionen i *Kapitel 6.2.3*. Detta beror på att inrapporteringen av driftstopp idag sker manuellt, vilket leder till att flertalet driftstopp inte rapporteras. Istället för att förlita sig på rapportering från ägare eller leverantörer kan den statistiska metod som används i den första delstudien för att urskilja en *outlier* appliceras. Detta skulle leda till att värdet på tillgängligheten i den offentliga driftsuppföljningen skulle bli mer tillförlitligt. Samtidigt skulle driftsäkerheten för olika vindkraftverk och fabrikat kunna jämföras vilket skulle sätta press på vindkraftstillverkare att hålla sina vindkraftverk vid drift i så stor utsträckning som möjligt.

6.5.2 Resultatet

Då denna studies resultat analyseras är det viktigt att ha i åtanke att studien är gjord för ett specifikt fall med en specifik skog som skiljer sig kraftigt från täta granskogar i till exempel Småland. Eftersom turbulens är ett komplext fenomen som beror på en mängd olika faktorer är det troligt att små skillnader i terrängen har stor inverkan på turbulensens utbredning. Om detta resultat ska appliceras på en annan liknande vindkraftspark är det därför viktigt att ta med skillnader i terrängen som en felkälla.

Diskussionen i *Kapitel 6.3.2* belyser vikten av att beakta vindriktningen eftersom den har stor betydelse för utgången av studiens resultat. Detta gäller även då resultatet från denna studie ska appliceras på en liknande park intill en skog.

Studien till detta examensarbete har utförts på en typ av vindkraftverk, vars teknik visserligen kan anses vara modern, men vars torn är lägre än de som byggs idag. Till exempel har det i Tyskland byggts vindkraftverk med den dubbla tornhöjden vilket givetvis innebär att de meteorologiska fenomen som uppstår ovanför trädtopparna inte påverkar produktionen i samma utsträckning. För att resultatet från denna studie till fullo ska gå att applicera på kommande projekt måste en noggrannare genomgång med fler fallstudier utföras.

Resultatet från den tredje delstudien i detta examensarbete visar att WAsP-modellen inte klarar av att beskriva de fenomen som uppstår ovanför trädtopparna i en skog. Detta resultat måste anses vara mer generellt än de övriga resultaten i detta arbete eftersom det bekräftas av en tidigare studie (Dellwik 2006). Det är därför troligt att en liknande studie för en annan park vid en skog skulle leda fram till samma slutsatser. Det går dock inte att utifrån denna och den tidigare studien (Dellwik 2006) generellt avgöra i vilken omfattning WAsP skiljer sig från verkligheten. Det är istället troligt att skillnaden mellan modellen och verkligheten varierar beroende på hur skogen samt den omkringliggande terrängen ser ut.

7. Slutsatser

Arbetet med detta examensarbete har pågått mellan september 2006 och maj 2007. Under denna tid har det skapats ett stort intresse för vindkraft i skogsmiljö bland företag, myndigheter samt skogsägare. Anledningen till denna uppståndelse när det gäller vindkraft i skog är givetvis Bergströms vindkartering, med hjälp av MIUU-modellen, som pekar på goda vindförhållanden över skogsterräng i Sverige. På grund av det stora intresset har det känts relevant att studera i vilken omfattning skog påverkar elproduktionen i en vindturbin och detta examensarbete är ett resultat av denna studie. Examensarbetet är indelat i en teoretisk del som består av en litteraturstudie och en praktisk del som består av en fallstudie över tre vindkraftverk intill en skog vid Andersfält. Fallstudien är indelad i tre delstudier; *Skillnad i energiproduktion*, *Skogens påverkan* samt *Modellering*. I följande kapitel presenteras slutsatserna från ovanstående studier. Utifrån slutsatserna formuleras rekommendationer för vindkraftprojektering i skogsmiljö och därefter presenteras förslag på vidare arbete inom området. Slutligen diskuteras huruvida arbetets syfte är uppnått.

Den första och även den viktigaste slutsatsen från detta examensarbete är att vindkraftsbranschen ligger före vetenskapen när det gäller vindkraft i skogsmiljö. Trots att det i Sverige finns liten erfarenhet och kunskap om i vilken omfattning skog påverkar elproduktionen samt hållfastheten i ett vindkraftverk projekteras det i stor omfattning för vindkraft i skogsterräng. Det finns en påtaglig risk att energiproduktionen inte kommer att uppgå till den förväntade på grund av allt för turbulenta vindar, vilket även skulle kunna leda till större slitage och fler haverier.

Det kan också konstateras att vindens karaktär ovanför skog skiljer sig markant från vindens karaktär ovanför till exempel ett slättlandskap. Det beror främst på den turbulens som skapas ovanför trädtopparna och som bland annat beror på skogens karaktär, markytans topografi, vindens hastighet samt atmosfärens stabilitet. Turbulensens utbredning är synnerligen komplex och eftersom den påverkas av en mängd olika faktorer är det mycket svårt att med hjälp av meteorologiska samband finna en generell modell.

Utifrån resultatet från fallstudien över vindkraftverken vid Andersfält går det att dra en mängd slutsatser om hur Tönnersaskogen, söder om vindkraftverken, påverkar energiproduktionen och nedan sammanfattas de viktigaste.

- Det finns en statistiskt säkerställd skillnad i energiproduktion mellan de tre vindkraftverken och skillnaden beror på Tönnersaskogen som är belägen söder om verken.
- Skillnaden i energiproduktion mellan de södra och mellersta vindkraftverken är omkring nio procent och skillnaden mellan de södra och norra verken är omkring tio procent. Vid projekteringen underskattades skogens påverkan då det södra verkets energiproduktion uppskattades till cirka tre procent lägre än de mellersta och norra vindkraftverken.

- Det finns även en statistiskt säkerställd skillnad på energiproduktionen mellan de mellersta och norra verken. Skillnaden är dock betydligt mindre, omkring en procent. Uppskattningen vid projekteringen, där de mellersta och norra verken förväntades producera lika, kan i detta fall anses vara god.
- Under fallstudien har det framkommit att det norra vindkraftverket oftare varit ur drift än de övriga två vindkraftverken.

Vid modellering av de tre vindkraftverkens energiproduktion med beräkningsprogrammet WAsP framkom att skogens påverkan kraftigt underskattades. Även tidigare studier bekräftar detta resultat och det kan således konstateras att WAsP inte är tillförlitligt vid energiberäkningar för vindkraft i skog.

7.1 Rekommendationer

Utifrån ovanstående slutsatser formuleras rekommendationer till företag och privatpersoner som planerar att projektera för vindkraft intill en skog eller i skogsterräng.

- På grund av begränsad erfarenhet och kunskap innebär projektering i skogsterräng ett större risktagande än projektering i till exempel slättlandskap. Detta beror på att uppskattningen av vindkraftverks energiproduktion i skogslandskap är betydligt mer osäker.
- Under en förstudie bör så mycket information som möjligt om liknande projekt inhämtas. Det bör beaktas att Sverige är ett litet land när det gäller vindkraft och störst erfarenhet finns således utomlands.
- Beräkningsprogrammet WAsP är inte tillförlitligt vid beräkningar av energiproduktionen i skogsterräng.
- För att uppskattningen av energiproduktionen ska bli säkrare i skogsterräng bör vindmätning genomföras eftersom de meteorologiska modeller som används inte kan anses tillförlitliga.
- Utifrån vindmätning kan turbulensens intensitet vid den specifika platsen beräknas och därefter jämföras med den turbulens som vindkraftverket är dimensionerat för. Trots att vindkraftstillverkaren har dimensionerat verket utifrån en viss turbulens är det ingen garanti att verket kommer att klara de höga lasterna. Högre turbulens leder till högre laster vilket i sin tur leder till större förslitning av vitala delar.
- Dagens effektkurvor är inte anpassade till skogsmiljöer vilket leder till en större osäkerhet vid energiberäkningar, trots vindmätning på plats.
- Eftersom turbulensen avtar med höjden rekommenderas givetvis höga torn. Erfarenheter från Tyskland visar att skogens inverkan på vindkraftverk med 114 meters torn är marginell.

7.2 Förslag på vidare arbete

Det har i detta examensarbete konstaterats att vetenskapen om vindkraft i skog är ytterst begränsad och det bör därför göras insatser för att öka förståelsen kring de meteorologiska fenomen som uppstår ovanför skog. Att ta fram och utvärdera meteorologiska modeller är tidskrävande eftersom verifieringar måste ske under en längre tid. Detta beror på att vinden kraftigt varierar under året samt mellan olika år.

Eftersom Sverige har förhållandevis lite vindkraft jämfört med andra länder vore det relevant och intressant att dokumentera erfarenheter från vindkraftsparker intill skog i andra länder. Den statistiska metodik som använts i den första och andra delstudien skulle kunna appliceras till exempel på vindkraftsparken Mehring i Tyskland. Resultatet från en sådan studie skulle ge en bild över hur omfattande närliggande skog påverkar vindkraftsproduktionen på navhöjder över 100 meter. Denna information skulle vara mycket värdefull eftersom det är på dessa höjder det idag projekteras för vindkraft i svenska skogar.

Om det ska byggas vindkraft i skog måste det finnas maskiner som klarar av de turbulenta förhållanden som råder. Det är också viktigt att anpassa effektkurvor till dessa förhållanden så att energiproduktionen kan uppskattas med större säkerhet även i dessa mer komplexa miljöer. Den höga efterfrågan på vindkraft världen över borde leda till att fler tillverkare kan etablera sig på marknaden, vilket på sikt gynnar utvecklingen.

Eftersom det idag projekteras för vindkraft i skog finns det en efterfråga på modeller som med större säkerhet kan beräkna energiproduktionen i skogsterräng. Därför borde resurser läggas på att utveckla ett beräkningsprogram som klarar av att beskriva de mer komplexa vindprofilerna som uppstår ovanför trädtopparna. Först därefter går det att besvara väsentliga frågeställningar som till exempel: *vad är den optimala tornhöjden? På vilket avstånd från en skog ska vindkraftverk placeras?*

Under detta examensarbete har endast WAsP-modellens tillförlitlighet i skogsterräng undersökts. Eventuellt finns det andra modeller som på ett bättre sätt klarar av att beskriva de meteorologiska fenomen som uppstår ovanför skog. Att kartlägga dessa modeller samt undersöka deras tillförlitlighet i komplex terräng hade kunnat underlätta framtida arbetet med att ta fram en bättre modell.

7.3 Arbetets syfte

I det inledande kapitlet beskrivs examensarbetets syfte och nedan i rapportens avslutande avsnitt diskuteras huruvida syftet har uppnåtts. För att konkretisera syftet ställdes i *Kapitel 1.3* tre enkla frågeställningar om vindkraftverken vid Andersfält upp:

- *Producerar det södra vindkraftverket minst och det norra verket mest?*
- *Är det skogen som är bidragande faktor till skillnaden i energiproduktion?*
- *Finns det någon modell som beskriver de fenomen som uppstår och som ger ett rättvisande resultat på energiproduktionen?*

Det kan konstateras att ovanstående frågeställningar har besvaras i tur och ordning under fallstudiens tre delstudier. Dock är det mer oklart huruvida arbetets syfte har uppnåtts. Det övergripande syftet var nämligen att förklara vilken inverkan närliggande skog har på energiproduktionen i ett vindkraftverk. Resultatet från fallstudien beskriver enbart hur Tönnersaskogen påverkar energiproduktionen vid Andersfält. Eftersom WASP-modellen inte klarade av att beskriva de fenomen som uppstår vid skog framkommer i detta examensarbete ingen generell förklaring på skogs inverkan på vindkraftsproduktionen. Trots att syftet inte till fullo har uppnåtts kan examensarbetet anses vara värdefullt eftersom det belyser de brister som finns inom området. Det har även under arbetets gång framkommit många nya intressanta frågeställningar som delvis kunnat besvaras. Därför kan detta arbete användas för att öka förståelsen för vindkraft i skogsmiljö.

8. Källförteckning

Nedan presenteras de skriftliga källor som använts till detta examensarbete. Därefter kommer en förteckning över de kontaktpersoner som har utlämnat information till examensarbetet via samtal, intervjuer samt email.

8.1 Skriftliga källor

Ahmed Shata, A.S. och Hanitsch, R. (2006), *Evaluation of wind energy potential and electricity generation on the coast of Mediterranean Sea in Egypt*, Renewable Energy, vol 31 nr 8 sid 1183-1202

Arya, S. P. (2001), *Introduction to Micrometeorology*, 2:a uppl, Academic Press, California, USA, ISBN 0-12-059354-8

Bartholy, J., Radics, K. och Bohoczky, F. (2003), *Present state of wind energy utilisation in Hungary: policy, wind climate, and modelling studies*, Renewable and Sustainable Energy, vol 7 nr 2 sid 175-186

Bergström, H., Källstrand B. (2000), *Measuring and modelling the wind climate in a mountain valley in northern Sweden*, rapporten inhämtas via kontakt med Bergström 2006-12-13

Bergström, H. (2001), *Boundary-Layer Modelling for Wind Climate Estimates*, Wind Engineering vol 25 nr 5 sid 289-299

Bergström, H. (2004), *Higher-order closure meso-scale modelling for wind resource estimates in Sweden*, European Wind Energy Conference EWEC2004, rapporten inhämtas via kontakt med Bergström, 2006-12-11

Bergström, H. (2006a), *Vindpotentialen i Sverige på 1 km-skala*, Version 2006:1, hittas på hemsidan: www.stem.se, 2006-11-21

Bergström, H. (2006b), *Beräkning av vindklimatet vid Fredriksdal med hjälp av MIUU-modellen*, rapporten är inhämtad från Eolus Vind AB, 2006-11-06

Bergström, H. (2007), *Den svenska vindkarteringen, hur väl stämmer den?*, Medvind, nr 2 sid 3-5

Dellwik E., Landberg L. och Jensen N. O. (2006), *WAsP in the Forest*, Wind Energy, vol 9 nr 3 sid 211-218

DMI (Danmarks Meteorologiske Institut), *Månedsberetning: Københavns Lufthavn*, Hittas på hemsidan: www.dmi.dk/dmi/index/danmark/oversigter/maanedsbberetning.htm, 2007-04-29.

El-Osta, W., m.fl. (1995), *Wind farm pilot project in Libya*, Renewable Energy, vol 6 nr 5-6 sid 639-642

- Enercon (2002), *Wind Energy Converter Power Curves*, Version 1.0, inhämtas via kontakt med Claes Jeppsson på Enercon, 2007-03-23
- Energimyndigheten (2006), *Driftsuppföljning av vindkraftverk*, 2006, hittas på hemsidan <http://www.vindenergi.org/driftuppfolj.htm>, 2006-12-21
- Energimyndigheten (2005), *Energiläget 2005*, hittas på hemsidan: www.energimyndigheten.se, 2007-05-05
- Enger, L. (1990), *Simulation of Dispersion in Moderately Complex Terrain- Part A. The Fluid Dynamic Model*, Atmospheric Environment, vol 24 nr 9 sid 2431-2446
- Ek K. (2005), *Public and private attitude towards "green" electricity: the case of Swedish wind power*, Luleå Tekniska Högskola
- Finnemore E. J. och Franzini J. B. (2002), *Fluid Mechanics with Engineering Applications*, 10:de uppl, McGraw-Hill Companies, ISBN 0-07243202-0
- Hammarlund K. (1997), *Attityder till vindkraft*, Göteborgs Universitet
- Jacob D. J. (1999), *Introduction to Atmospheric Chemistry*, Princeton University Press, Storbritannien, ISBN 0-691-001185-5
- Laholms kommun (2006), *Vindkraftsplan för Laholms kommun*, Förslag till vindkraftsplan, Inhämtas från Eolus Vind AB, 2007-01-15
- Lange, B., m.fl. (2004), *Importance of thermal effects and sea surface roughness for offshore wind resource assessment*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol 92 nr 11 sid 959-988
- Mann J. (1998), *Wind Field Simulation*, Probabilistic Engineering Mechanics, vol 13 nr 4 sid 269-282
- Nielsen P. (2001), *WindPRO 2*, Energi- og Miljödata (EMD), Aalborg, Danmark, inhämtas från Eolus Vind AB, 2006-10-24
- Näslund M. (2003), *Energigasteknik*, 2:a uppl, Mediatryck, Lund, ISBN 91-86-46435-3
- Ozerdem, B., Turkeli, H.M. (2005), *Wind energy potential estimation and micro-siting on Izmir Institute of Technology Campus, Turkey*, Renewable Energy, vol 30 nr 10 sid 1623-1633
- Petersen, E. L., m.fl. (1998a), *Wind power meteorology. Part 1: climate and turbulence*, Wind Energy, vol 1 nr S1 sid 25-45
- Petersen, E. L., m.fl. (1998b), *Wind power meteorology. Part 2: siting and models*, Wind Energy, vol 1 nr 2 sid 55-72

- Plan- och Bygglagen (1987:10), SFS, hittas på hemsidan:
<http://www.notisum.se/rnp/sls/lag/19870010.HTM>, 2007-05-05
- Proposition 2001/02:143 (2002), *Samverkan för en trygg, effektiv och miljövänlig energiförsörjning*, hittas på hemsidan: <http://www.riksdagen.se/Webbnav/index.aspx?nid=34>, 2007-05-05
- Proposition 2005/06:143 (2006), *Miljövänlig el med vindkraft - åtgärder för ett livskraftigt vindbruk*, hittas på hemsidan: <http://www.riksdagen.se/Webbnav/index.aspx?nid=34>, 2007-05-05
- Reistad, N. (2002), *Energi- och miljöfysik*, 2:a uppl, Tekniska Högskolan, Lunds Universitet
- Rönnborg, P. (2006), *Finding the right place*, Handelshögskolan vid Göteborgs Universitet, ISBN: 978-91-631-8676-9
- Skogsstyrelsen (2006), *Kort fakta om skog och skogsmarker*. Hittas på hemsidan:
<http://www.svo.se/minskog/templates/Page.asp?id=15390>, 2006-11-09
- SMHI (2007), *Meteorologiska stationer som har observerat vindriktning som mest var tredje timma*, uppgifterna hämtades via WindPRO 2, se referens: WindPRO 2 (2006)
- SMHI (1997), *Vindkartering för södra Sverige*, Stockholm, ISSN 1102-2574
- SRTM (2000), *Shuttle Radar Topography Mission*, informationen hämtas från hemsidan:
<ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2/>, 2007-02-22.
- Svenska språknämnden (2000), *Svenska skrivregler*, 2:a uppl, Liber AB, Stockholm
- Thøgersen, M. L. (2005), *WindPRO/PARK, Introduction to Wind Turbine Wake Modelling and Wake Generated Turbulence*, rapporten inhämtas via kontakt med Thomas Sørensen på EMD
- Troen, I. och Petersen, E. L. (1989), *European Wind Atlas*, Roskilde, Danmark,
- van Lieshout, P. (2004), *Predicting wind output - Time dependent energy calculations*, Refocus, vol 5 nr 3 sid 40-43
- Jacobson, M. Z. (1999), *Fundamentals of Atmospheric Modeling*, Cambridge University Press, Storbritannien, ISBN 0 521 63143 2
- Vattenfall (2006), *Driftsuppföljning vindkraft*, hittas på hemsidan: www.vindstat.nu, 2006-11-09.
- Veers, P. S. och Butterfield, S. (2001), *Extreme Load Estimation for Wind Turbines: Issues and Opportunities for Improved Practice*, okänd tidskrift
- Verheij, J.W., m.fl. (1992), *Gust Modelling for Wind Loading*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol 42 nr 1-3 sid 947-958

Vestas (2004), *Allmän specifikation Vestas V52-850 kW, 50/60 Hz, OptiSpeed-vindkraftverk*, svensk version, inhämtas från Eolus Vind AB, 2006-10-20

WindPRO 2 (2006), *2.5 Service pack*, copyright: EMD International A/S, Niels Jernesvej 10, DK-9220 Aalborg Ø, programmet används dels på Eolus Vind AB och dels på Triventus Consulting AB

Wizelius, T. (2003), *Vindkraft i teori och praktik*, Studentlitteratur, Lund, , ISBN 91-44-02055-4

8.2 Kontaktpersoner

Andersson Anders, arbetar på Vattenfall AB och ansvarar för den dagliga driftsuppföljningen, muntlig samt skriftlig kontakt via email, 2006-10-10

Carlsteadt Nils-Eric, arbetar för Vattenfall Power Consultant och ansvarar för den offentliga driftsuppföljningen, kontakt via telefonsamtal, 2007-03-22

Flarup Marcus, arbetar på SMHI och ansvarar för information och statistik, muntlig samt skriftlig kontakt via email, 2006-09-28

Helmersson Arne, arbetar som säljare på Vestasvind Svenska AB, samtal under Eolus seminarium, 2007-01-20

Hjort Jonathan, projektledare på Norra Smålands Energi, samtal under den nationella vindkraftskonferensen, 2007-04-27

Hoch Gordon, sales Manager på ENERCON Energy Converter AB, arbetar med vindkraft i det tyska inlandet, kontakt via email, 2007-03-28

Jeppsson Claes, sales Manager på ENERCON Energy Converter AB, kontakt via telefonsamtal, 2007-03-23

Johansson Per, VD för Vestasvind Svenska AB, föreläsning under *Fokusdagar Eolus 2007-02-13*

Kähler William, en av två ägare till det södra vindkraftverket vid Andersfält, kontakt via telefonsamtal, 2007-03-22

Larsson Pär, arbetar med Technical support på Vestasvind Svenska AB, föreläsning under *Fokusdagar Eolus 2007-02-13*

Salomonsson Stefan, byggsamordnare på Eolus Vind AB och har tidigare arbetat för Vestas, kontakt via telefonsamtal 2006-10-25

Simmingsköld, Bengt, VD på Eolus Vind AB, samtal under våren 2007.

Øhlenschläger Kell, arbetar med vind och siting på Vestas, föreläsning under *Fokusdagar Eolus 2007-02-14*

Bilagor

Bilaga A. Statistiska nyckeltal och modeller

Bilaga B. WASP-modellen

Bilaga C. Vakmodellen

Bilaga D. Modelleringsresultat

Bilaga A. Statistiska nyckeltal och modeller

I denna bilaga ges en överblick över några grundläggande statistiska begrepp samt de statistiska modeller som har använts i arbetet för att säkerställa resultatet. Informationen är hämtad från kurslitteratur till *Matematisk statistik* vid Lunds Tekniska Högskola. Framst har boken *Experimentell och industriell statistik* skriven av Lennart Olbjer (2000) använts.

Statistiska nyckeltal

En datamängd x_1, x_2, \dots, x_n kan förutom grafiskt även beskrivas numeriskt genom att så kallade nyckeltal beräknas. Nyckeltalen kan delas in i lägesmått samt spridningsmått och med hjälp av dessa mått kan slutsatser om datamängden dras.

Lägesmättet ger en bild av var tyngdpunkten i datamängden ligger och i detta arbete beskrivs genomgående lägesmättet med hjälp av datamängdens medelvärde, \bar{x} som definieras nedan:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) \quad (1)$$

Variansen s^2 är ett spridningsmått och beskriver datamängdens genomsnittliga spridning från medelvärdet.

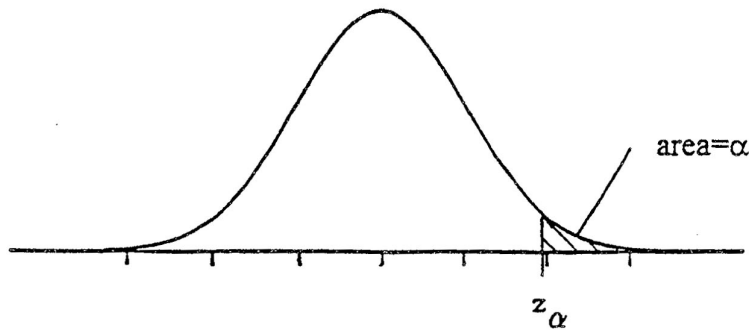
$$s^2 = \frac{1}{n-1} \left[(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2 \right] \quad (2)$$

Enligt *Ekvation 2* beräknas variansen genom att kvadrera mätdata vilket får till följd att enheten för variansen blir datamängdens enhet i kvadrat. För att enheten ska bli samma presenteras oftast spridningsmättet med hjälp av standardavvikelsen, s som är roten av variansen.

Fördelningar

Vid praktiska experiment har det visat sig att variationer i naturen oftast fördelas någorlunda symmetriskt kring en mittpunkt. En sådan fördelning kallas normalfördelning, $N(\mu, \sigma^2)$ där μ är mittpunkten (väntevärdet) och σ^2 är fördelningens bredd (variansen). Den viktigaste satsen inom sannolikhets teorin ger en förklaring till varför normalfördelningen är så användbar. Satsen kallas den *centrala gränsvärdes satsen* och säger att summor av oberoende slumpvariabler tenderar att bli normalfördelade när antalet termer i summan ökar, oavsett vilken fördelning den enskilda termen har.

Kvantiler i en fördelning används för att begränsa sannolikheten till en viss procentsats. Detta görs genom att "svansarna" i en fördelning inte tas med i beräkningar. Om man till exempel nöjer sig med 95-procentig sannolikhet ska en yta, α motsvarande fem procent tas bort från fördelningen. Kvantilen för en normalfördelning åskådliggörs i *Figur 1* och kvantiler för några standardvärden återfinns i *Tabell 1*.



Figur 1. α -kvantilen för $N(0,1)$ -fördelning.

Tabell 1. Normalfördelningens kvantiler.

α	z_α
0,10	1,2816
0,05	1,6449
0,025	1,9600
0,010	2,3263
0,005	2,5758

I detta arbete nämns utöver normalfördelningen även den så kallade Weibull-fördelningen som har visat sig vara användbar då vindhastighetens variation vid en bestämd höjd ska beskrivas.

Jämförelse mellan två oberoende stickprov

I detta examensarbete har metoden, *jämförelse mellan två oberoende stickprov* använts för att undersöka huruvida två datamängder statistiskt skiljer sig åt. Data i modellen antas vara från oberoende stickprov, från två populationer. Alltså antas att det finns:

n_1 data $x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n}$ från $N(\mu_1, \sigma_1^2)$

n_2 data $x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2n}$ från $N(\mu_2, \sigma_2^2)$

Det vanliga är att σ_1^2 och σ_2^2 är okända och de får då skattas från datamängden. Medelfelet $d(\theta^*)$ beräknas då enligt följande samband:

$$d(\theta^*) = d(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) = \sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}} \quad (3)$$

Därefter beräknas ett tvåsidigt 95-procentigt konfidensintervall:

$$I_{\mu_1 - \mu_2} = (\bar{x}_1 - \bar{x}_2 \pm z_{\alpha/2} \cdot d(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)) \quad (4)$$

där $z_{\alpha/2}$ är den så kallade z-kvantilen som för ett tvåsidigt 95 % konfidensintervall är 1,96, se *Tabell* . Om det beräknade konfidensintervallet inte går över noll är det med 95 procent sannolikhet en skillnad mellan datamängderna.

Jämförelse mellan stickprov i par

När data uppträder parvis är det lämpligt att också göra jämförelsen parvis. I detta arbete används då metoden *jämförelse mellan stickprov i par* och nedan beskrivs modellen.

Data i modellen antas vara oberoende stickprov som uppträder parvis:

n_1 data $x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n}$ från $N(\mu_1, \sigma_1^2)$

n_2 data $x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2n}$ från $N(\mu_2, \sigma_2^2)$

Skillnaden D_1, D_2, \dots, D_n mellan varje par beräknas därefter enligt följande:

$$D_1 = x_{11} - x_{21}, D_2 = x_{12} - x_{22}, \dots, D_n = x_{1n} - x_{2n}$$

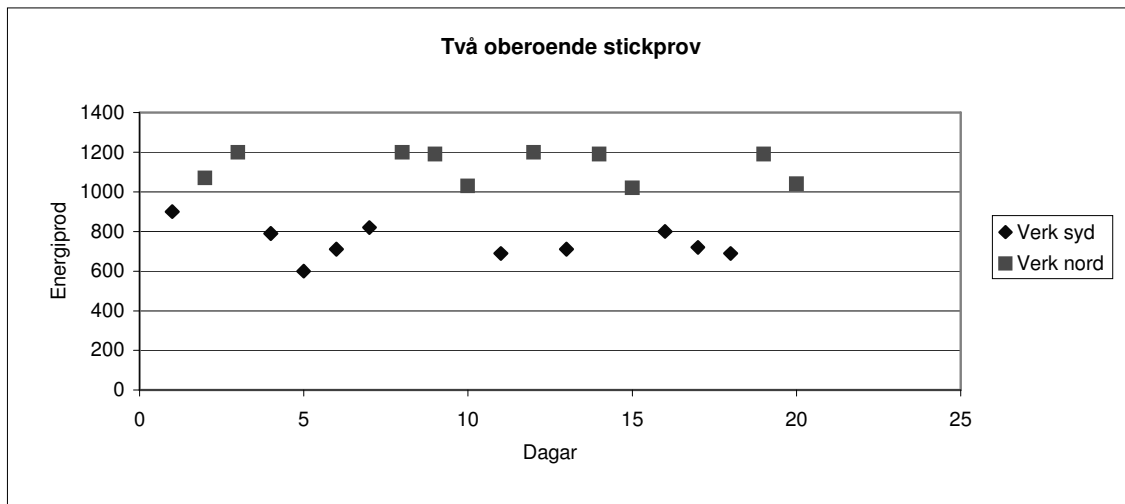
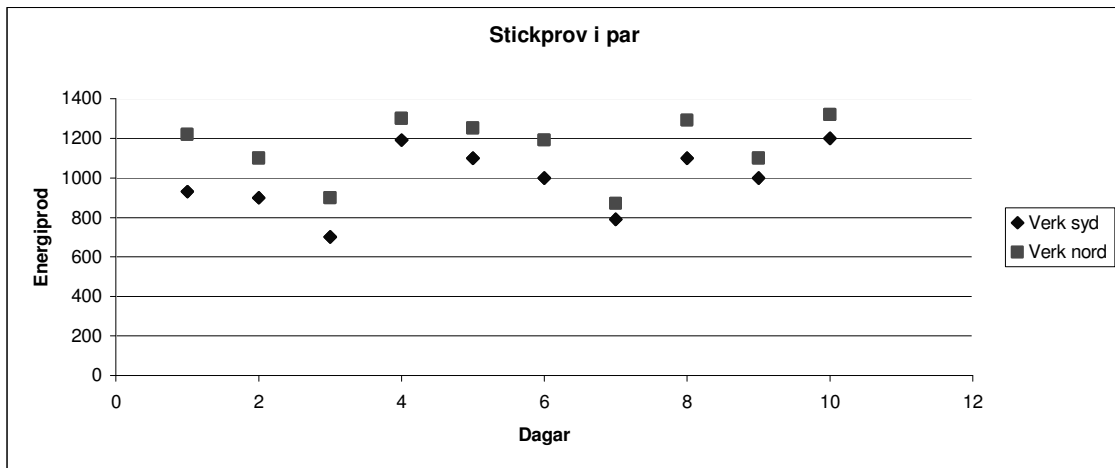
Därefter beräknas skillnadens medelvärde, \bar{D} och standardavvikelsen, s_D för att sedan ta fram ett 95-procentigt konfidensintervall för skillnaden Δ :

$$I_{\Delta} = \bar{D} \pm z_{\alpha/2} \cdot d(\bar{D}) \quad (5)$$

Där $d(\bar{D})$ är medelfelet och definieras som:

$$d(\bar{D}) = \frac{s_D}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

När modellen *stickprov i par* respektive modellen *två oberoende stickprov* används kan åskådliggöras med hjälp av följande två grafer:



Figur 2. Grafisk beskrivning över när *stickprov i par* respektive *två oberoende stickprov* bör användas vid statistiska jämförelser.

Outlier

Om en stor mängd data behandlas är det möjligt att vissa värden i datamängden inte är korrekta. Detta kan bero på en mängd olika faktorer som till exempel mätfel, driftstopp, fel vid avläsning och så vidare. Då ett värde är kraftigt avvikande från resterande värden i en datamängd är det högst troligt att detta värde inte är representativt och ska därmed uteslutas ur datamängden. Inom statistiken benämns ett kraftigt avvikande värde med det engelska ordet *outlier*.

Det finns en mängd olika metoder att avgöra huruvida ett värde är en *outlier*. I detta arbete används en enkel metod som definieras nedan:

Utgångspunkten är en normalfördelad datamängd med väntevärdet μ och variansen σ^2 , $N(\mu, \sigma^2)$. Ett avvikande värde är en *outlier* om medelvärdet för datamängden utan *outliern* är större än tre gånger standardavvikelsen, enligt definition nedan:

En misstänkt *outlier* x_{n+1} , i en normalfördelad datamängd x_1, x_2, \dots, x_n , är en *outlier* om

$$|\bar{x} - x_{n+1}| > 3 \cdot s \quad (7)$$

Anledningen till att tre gånger standardavvikelsen används är att med bredden tre standardavvikelser täcks 99,74 procent av alla värden i en normalfördelning in.

Bilaga B. WASP-modellen

Nedan beskrivs de ekvationer som ligger till grund för WASP-modellen. Informationen är hämtad från European Wind Atlas (Troen 1989) där WASP-modellens metodik beskrivs. Dock saknas fullständiga härledningar av ekvationerna, men nedanstående information bedöms trots det värdefull eftersom det ger en viss matematisk förklaring till modellens linjära samband.

Modellering av vindprofiler

Vid höga vindhastigheter modelleras vindens hastighet som funktion av höjden (en så kallad vindprofil) över platt och förhållandevis homogen terräng med hjälp av följande logaritmiska samband:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \cdot \ln \frac{z}{z_0} \quad (1)$$

Där $u(z)$ är vindhastigheten vid höjden z över markytan, z_0 är markytans råhetslängd, κ är von Kármáns konstant, i detta fall $0,40$ och u_* är den så kallade *friction velocity*, som ingår i definitionen för *surface stress*, τ :

$$|\tau| = \rho \cdot u_*^2 \quad (2)$$

där ρ är luftens densitet.

Även vid måttliga vindhastigheter uppstår avvikelser från det logaritmiska sambandet i *Ekvation 1* då z sjunker till några tiotals meter. Avvikelsen orsakas av den effekt som uppstår då värmetransport sker mellan markytan och luften. När markytan kyls under natten reduceras uppkomsten av turbulens vilket får till följd att vindens hastighet ökar kraftigare med ökad höjd. Under dagtid sker motsatt fenomen och vindhastigheten ökar då mer konstant med ökad höjd. Följande uttryck beskriver vindprofilen där ovanstående fenomen tas i beaktning:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \left(\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - \Psi \frac{z}{L} \right) \quad (3)$$

där Ψ är en empirisk funktion och L är den så kallade Monin-Obukhov längden:

$$L = \frac{T_0 \cdot c_p \cdot u_*^3}{\kappa \cdot g \cdot H_0} \quad (4)$$

där T_0 är ytans temperatur, H_0 är värmetransporten, c_p är värmeöverföringstalet för luft vid konstant tryck, g är gravitationskonstanten och övriga parametrar finns definierade ovan. Ytterligare beskrivningar av värmeöverföringen mellan markyta och luft presenteras i avsnittet *Stabilitetsmodell*.

Geostrofiska kraftlagen

Vindar nära jordytan har sitt ursprung i de större vädersystemen som uppstår av till exempel tryckskillnader. Eftersom strukturen i *PBL* snabbt regleras när det uppstår skillnader i tryck infinner sig en ungefärlig balans mellan tryckgradientkraften och friktionskraften. Då det råder neutral stabilitet kan denna balans mellan jordytans friktion u_* och den geostrofiska vinden G beskrivas med den så kallade *geostrofiska kraftlagen* (*geostrophic drag law*):

$$G = \frac{u_*}{\kappa} \sqrt{\left(\ln\left(\frac{u_*}{f \cdot z_0}\right) - A \right)^2 + B^2} \quad (5)$$

$$\sin \alpha = -\frac{Bu_*}{\kappa G} \quad (6)$$

där α är vinkeln mellan vinden nära ytan och den geostrofiska vinden, f är Coriolis parametern och A och B är två empiriska konstanter som i detta fallet är 1,8 respektive 4,5. Den geostrofiska vinden kan beräknas utifrån markytans tryckgradient och stämmer ofta överens med den vindhastighet som observeras ovanför *PBL* av satelliter.

Stabilitetsmodellen

När jordytan under ett dygn värms upp och kyls ner uppstår variationer i luftens stabilitet då luftmassor transporteras i vertikalled. Denna effekt beaktas approximativt genom enkla samband som har sitt ursprung i den *geostrofiska kraftlagen* och ekvationen för vindprofilen.

Då G , z_0 och f hålls konstanta fås följande differentialekvation ut från *Ekvation 5*:

$$dG = 0 = \frac{du_*}{u_*} G - \frac{u_*^2}{\kappa^2 G} \left[\left(\ln \frac{u_*}{f z_0} - A(\mu) \right) \left(\frac{du_*}{u_*} - \frac{dA}{d\mu} d\mu \right) + B \frac{dB}{d\mu} \right] \quad (7)$$

Med hjälp av *Ekvationerna 4,5* och *6* samt genom att sätta in de neutrala värdena på följande koefficienter:

$$A(0) \approx 1,8 \quad B(0) \approx 4,5$$

$$\frac{dA}{d\mu} \approx -0,2 \quad \frac{dB}{d\mu} \approx 0,2$$

fås uttrycket:

$$\frac{du_*}{u_*} \approx \left[\frac{c g}{f T_0 c_p \rho G^2} \right] dH \quad (8)$$

med konstanten $c=2,5$. Ovanstående ekvation beskriver alltså hur u_* förändras från ett neutralt värde genom att ta ett klimatologiskt medelvärde av värmetransporten dH .

Differentialekvationen av ekvationen som beskriver vindprofilen, *Ekvation 3*, är följande:

$$du(z) = \frac{du_*}{\kappa} [\ln(z/z_0) - \psi(z/L)] - \frac{u_*}{\kappa} \frac{d\psi}{dL} \frac{dL}{dH} dH \quad (9)$$

Genom att sätta in neutrala värden på koefficienterna $A(0)$, $B(0)$, $dA/d\mu$ och $dB/d\mu$ som ovan samt genom att använda *Ekvation 8* fås ett uttryck som innehåller höjden över marken z_m , som beskriver den höjd där effekter av icke neutrala förhållanden börjar uppkomma.

$$\frac{z_m}{\ln(z_m/z_0)} = \left(\frac{c}{a\kappa} \right) \cdot \frac{u_*^3}{fG^2} \quad (10)$$

där den nya konstanten a är lutningen på den neutrala stabilitetsfunktionen som är ett värde mellan 4 och 5 beroende på om uttrycket för stabila eller ostabila förhållanden används.

Med hjälp av en förenklad neutral kraftlag:

$$\frac{u_{*0}}{G} = \frac{0,5}{\ln(Ro) - A(0)} \quad (11)$$

kan *Ekvation 10* uttryckas på följande vis:

$$\frac{z_m/z_0}{\ln(z_m/z_0)} \approx konst \cdot Ro(\ln(Ro) - A(0))^{-3} \quad (12)$$

där konstanten är ungefär 0,1 och där det så kallade *surface Rossby number*, Ro , definieras som:

$$Ro = \frac{G}{fz_0} \quad (13)$$

Slutligen kan uttrycket approximeras till följande lag:

$$z_m/z_0 \approx \alpha \cdot Ro^\beta \quad (14)$$

där $\alpha = 2,0 \cdot 10^{-3}$ och $\beta = 0,9$.

Ekvation 14 används i WAsP-modellen för att finna den höjd där vindprofilen börjar förändras på grund av icke neutrala förhållanden. Vid denna höjd bestäms den relativa avvikelserna av vindhastigheten, från det neutrala värdet. Detta görs genom att summera avvikelserna som orsakas av den genomsnittliga värmetransporten ΔH_{off} och den varierande värmetransporten ΔH_{rms} :

$$\frac{\Delta u(z_m)}{u_0(z_m)} = \frac{\Delta u_*}{u_{*0}} - \frac{\psi(z_m/L_{off}) + \psi(z_m/L_{rms})}{\ln(z_m/z_0)} \quad (15)$$

där L_{off} är *Monin-Obukhov längden* som är beroende på ΔH_{off} och L_{rms} är beroende på F_{rms} samt ΔH_{rms} . F_{rms} är i sin tur en formfaktor som tar hänsyn till det faktum att stabilitetsfunktionen Ψ ser olika ut beroende på om det råder stabila respektive ostabila förhållanden:

$$\psi(z/L) = \begin{cases} \left(1 - 16 \frac{z}{L}\right)^{1/4} - 1 & \text{ostabil} \\ -4,7 \frac{z}{L} & \text{stabil} \end{cases} \quad (16)$$

Förändringen i höjddet av den relativa avvikelserna av medelvindhastigheten u beskrivs slutligen med följande samband:

$$u(z) = u_0(z) \cdot \left(1 + \frac{\Delta u(z_m)}{u_0(z_m)} (1 - f(z)) + \frac{\Delta u_{*off}}{u_{*0}}\right) \quad (17)$$

Ekvation 17 deriveras vilket ger den slutgiltiga vindprofilen $f(z)$ som används i WASP för att beräkna i vilken omfattning effekterna från icke neutrala förhållande påverkar vindhastigheten vid en bestämd höjd.

I kustnära områden måste hänsyn tas till att det råder en blandning mellan land- och havsförhållanden. Detta görs i WASP med en faktor w som beräknas på följande sätt:

$$w = \frac{\min(x, c)}{c} \quad (18)$$

där x är avståndet uppströms till kusten och c är bredden på kustområdet, normalt används 10 kilometer.

Övergång mellan olika rårheter

Den logaritmiska vindprofilen är applicerbar om terrängen uppströms är förhållandevis homogen. Om så inte är fallet blir det svårt att definiera en rårhetslängd som stämmer överens med hela området. När vinden blåser från ett område med rårhetslängden z_{01} till ett intilliggande område med rårhetslängden z_{02} ökar höjden på *Internal Boundary Layer (IBL)* när vinden transporteras över förändringen. På ett avstånd x från förändringen har höjden på *IBL* ökat till höjden h enligt följande samband:

$$\frac{h}{z'_0} \left(\frac{h}{z'_0} - 1 \right) = konst \cdot \frac{x}{z'_0} \quad (19)$$

$$z'_0 = \max(z_{01}, z_{02}) \quad (20)$$

där konstanten är 0,9. Ovanför h är vinden ”orörd” medan vindprofilen i *IBL* rubbas till följd av rårhetsförändringen. Både resultat från experiment och numeriska modeller visar att den förändrade vindprofilen kan modelleras med hjälp av tre logaritmiska samband:

$$u(z) = \begin{cases} u' \frac{\ln(z/z_{01})}{\ln(c_1 h/z_{01})} & \text{för } z \geq c_1 h \\ u'' + (u' - u'') \frac{\ln(z/c_2 h)}{\ln(c_1/c_2)} & \text{för } c_2 h \leq z \leq c_1 h \\ u'' \frac{\ln(z/z_{02})}{\ln(c_2 h/c_{02})} & \text{för } z \leq c_2 h \end{cases} \quad (21)$$

där u är vindhastigheten vid en specifik höjd, z .

Hinder

Vindens hastighet kan påverkas markant av enstaka hinder och i WAsP beaktas de effekter som uppstår med hjälp av följande två-dimensionella modell, som tagits fram med hjälp av studier gjorda i vindtunnel:

$$\frac{\Delta u}{u} = 9,8 \left(\frac{z_\alpha}{h} \right)^{0,14} \frac{x}{h} (1-P) \eta \cdot \exp(-,67\eta^{1,5}) \quad (22)$$

där

$$\eta = \frac{z_\alpha}{h} \left(\frac{0,32}{\ln(h/z_0)} \cdot \frac{x}{h} \right)^{-0,47} \quad (23)$$

och

P = porositeten
 h = hindrets höjd
 z_α = höjden på den punkt som är av intresse
 x = avstånd till hindret

Topografi

I WAsP finns en topografisk modell som liksom modellen för hinder och modellen för övergång mellan olika rårheter korrigerar uppmätt vinddata för effekter av inhomogen terräng. I den topografiska modellen tas hänsyn till de effekter som uppstår då vinden transporteras över höjdskillnader i landskapet. I ett första steg beräknas den potentiella flödesförändringen x som uppkommer till följd av höjdskillnader i terrängen och beskrivs med en tredimensionell vektor $\vec{u} = (u, v, w)$:

$$\vec{u} = \nabla x \quad (24)$$

I ett bestämt område med radien R kan en generell lösning på det potentiella flödet beskrivas med följande ekvation:

$$x_j = K_{nj} J_n \left(c_j^n \frac{r}{R} \right) \exp(in\phi) \exp\left(-c_j^n \frac{z}{R}\right) \quad (25)$$

Där K_{nj} är en godtycklig koefficient, J_n är den n:te graden av *Bessels funktion*, r är radien, Φ är azimuten, z är höjden och c_j^n är den i:nte nollpunkten av J_n . För ett specifikt problem bestäms koefficienterna utifrån markytans karaktär som i WAsP beskrivs med följande samband:

$$w_0 = \left. \frac{\partial}{\partial z} x \right|_{z=0} = \vec{u}_0 \cdot \nabla h(r, \phi) \quad (26)$$

Där w_0 är den friktion som terrängen skapar, u_0 är vektorn för vindhastigheten och h är terrängens höjd.

Genom att definiera modellens centrum, som sätts vid den punkt som är av intresse för studien, koncentreras beräkningen och förändringen i vindhastighet beräknas enbart för denna punkt. För centumpunkten $r = 0$ fås följande lösning:

$$\nabla x_j = \frac{1}{2} (1, i) K_{1j} \frac{c_j^1}{R} \exp\left(-c_j^1 \frac{z}{R}\right) \quad (27)$$

Det slutgiltiga resultatet från modellens första steg fås genom att en serie av koefficienten K_{1j} matas in i *Ekvation 27*. Därefter summeras ∇x_j för de olika K_{1j} och resultatet blir en lösning av den potentiella flödesförändringen. Varje term har en horisontell höjd $L_j = R/c_j^1$, som är den höjd där förändringar av vindhastigheten sker på grund av markens ojämnheter.

Det andra steget i modellen innehåller samband som modifierar lösningen från det första steget så att den approximativt anpassas till markytans friktion. Avvikelsen från det potentiella flödet är begränsat till ett lager med höjden l_j där $l_j \ll L_j$. Höjden l_j fås ut genom följande samband:

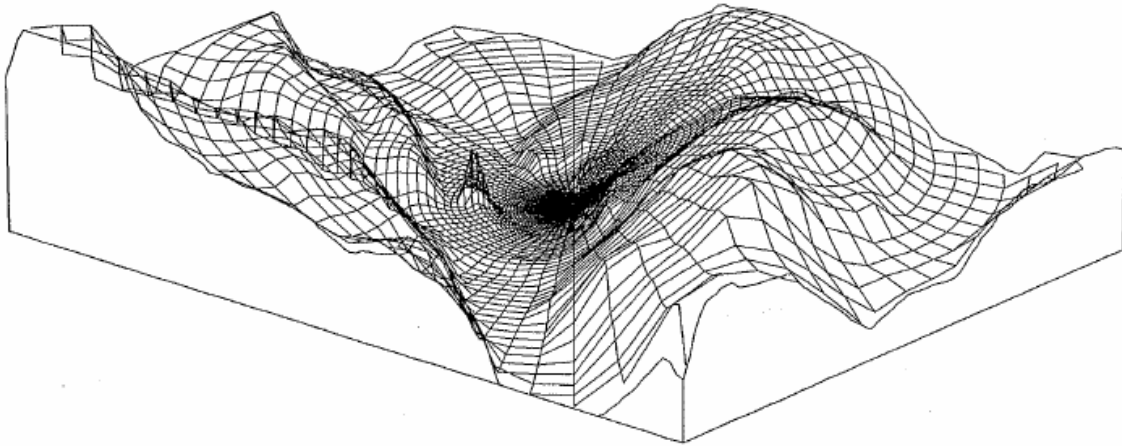
$$l_j = 0,3 \cdot z_{0j} \left(\frac{L_j}{z_{0j}} \right)^{0,67} \quad (28)$$

Där z_{0j} är ytans råhetslängd med avseende på hur homogen terrängen är. För homogen terräng är $z_{0j} = z_0$ och för inhomogen terräng tas ett viktat medelvärde på råhetslängden uppströms mellan punkterna $r = 0$ och $r = 5L_j$.

I nedanstående samband modelleras en avvikelseprofil för varje term från *Ekvation 27*.

$$\frac{\Delta \vec{u}_j(z)}{|u_0(z)|} = \frac{|u_0(L_j)|^2}{|u_0(z'_j)|^2} \nabla x_j \quad (29)$$

Där $u_0(z)$ är vindhastigheten vid höjden z och z'_j är lika med $\max(z, l_j)$. Beräkningar av koefficienten K_{1j} resulterar i ett nät som illustreras i *Figur 1*. Rutorna i nätet är som minst intill centrum och ökar med faktorn 1,06 för varje ruta från centumpunkten. I princip krävs att terrängens höjd för varje ruta beskrivs men i praktiken skapas oftast ett rutnät genom att höjdkurvor i terrängen digitaliseras.



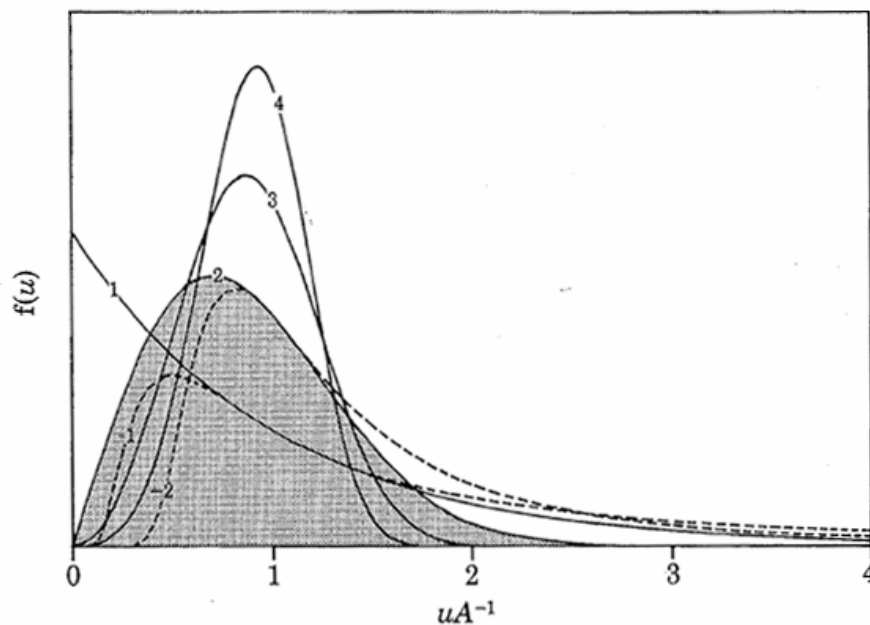
Figur 1. Ett exempel på hur ett rutnät för en komplex terräng kan åskådliggöras.

Weibullfördelning

Vindens hastighet vid en specifik plats beskrivs bäst med en *Weibullfördelning*, som matematiskt beskrivs med följande ekvation:

$$f(u) = \frac{k}{A} \left(\frac{u}{A}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{u}{A}\right)^k\right) \quad (30)$$

Där $f(u)$ är fördelningen på vindhastigheten u . A och k är de två så kallade *Weibullparametrarna* som ofta benämns skalparametern (A) och formparametern (k). Hur formparametern påverkar *Weibullkurvans* utseende illustreras i *Figur 2*.



Figur 2. Kurvan för Weibullfördelningen med olika formparametrar, k .

Weibullfördelningen kan delas in i två olika fördelningar: *exponentiell fördelning* där $k = 1$ och *Rayleigh fördelning* där $k = 2$. Det har visat sig att klimatet i norra Europa ofta skapar vindar som kan beskrivas med formparametern $2,0$.

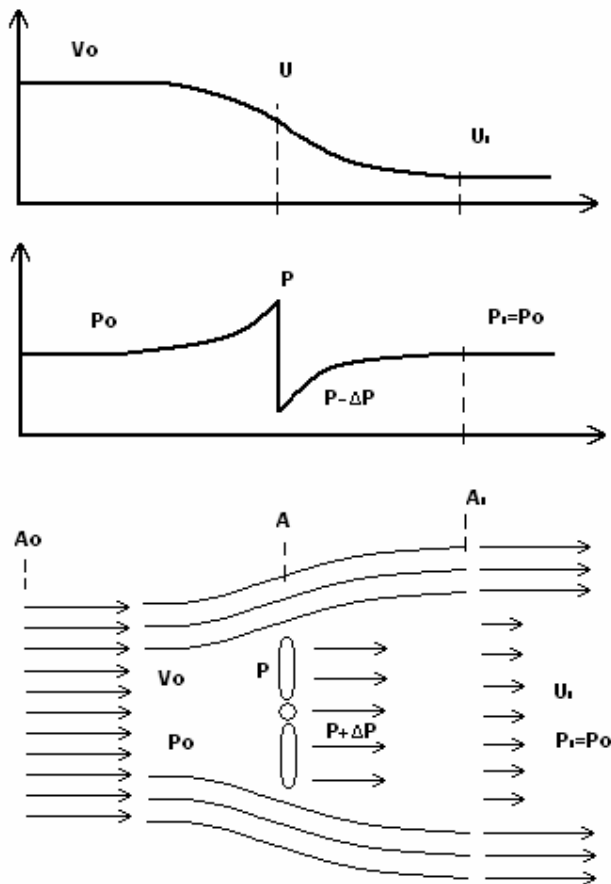
Bilaga C. Vakmodellen

Nedan presenteras bakgrunden till den vakmodell som används för att beräkna parkeffekten för vindkraftverken vid Andersfält. Informationen har hämtats från dokumentet *WindPRO/PARK, Introduktion to Wind Turbine Wake Modelling and Wake Generated Turbulence*, utgivet av EMD International A/S.

Till detta examensarbete används en enkel vakmodell framtagen av N.O Jensen. I modellen antas en ideal vindturbin där flödet runt omkring och bakom turbinen ej roterar eller utsätts för någon friktion. Modellen är baserad på *Bernoullis ekvation*, som fastslår att energin i en ideal ström är konstant enligt följande samband:

$$\frac{\rho V^2}{2} + P = H \quad (1)$$

där ρ är luftens densitet, V är vindhastigheten, P är trycket och H är den totala energin som är konstant längs med en luftström. Då vinden transporteras genom en ideal turbin är således energin uppströms turbinen lika med energin nedströms då den energi turbinen tagit upp subtraherats. Genom att applicera *Bernoullis ekvation* framför och bakom rotorn fås två *Ekvation 2* och *3*:



Figur 1. Flödet kring en ideal vindturbin.

$$P_0 + \frac{\rho V_0^2}{2} = P + \frac{\rho u^2}{2} \quad (2)$$

$$P - \Delta P + \frac{\rho u^2}{2} = P_0 + \frac{\rho u_1^2}{2} \quad (3)$$

Figur 1 beskriver flödet kring en ideal vindturbin.

Ekvationerna 2 och 3 läggs samman, vilket leder till följande samband, som beskriver tryckminskningen över rotorytan:

$$\Delta P = \frac{\rho(V_0^2 - u_1^2)}{2} \quad (4)$$

Ett annat sätt att beräkna tryckminskningen, ΔP , är att utifrån Newtons andra lag uttrycka reduktionen av den luftmassas rörelseenergi som passerar genom rotorytan:

$$\Delta P = \rho u(V_0 - u_1) \quad (5)$$

Genom att slå ihop Ekvation 4 och 5 fås ett uttryck för vindhastigheten vid rotorytan:

$$u = \frac{V_0 + u_1}{2} \quad (6)$$

Den så kallade *thrust* kraften T , det vill säga den kraft som verkar i vindens riktning, beräknas utifrån tryckminskningen:

$$T = \Delta P * A \quad (7)$$

där A är rotorns area.

Genom att introducera en så kallad *axial interference factor*, a :

$$u = (1-a)V_0 \quad \text{samtidigt} \quad u_1 = (1-2a)V_0 \quad (8)$$

som därefter tillsammans med Ekvation 4 läggs ihop med Ekvation 7, fås följande samband:

$$T = 2\rho a(1-a)V_0^2 A \quad (9)$$

Därefter definieras en så kallad *thrust coefficient*, C_T :

$$C_T = 4a(1-a) \Rightarrow a = \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{1-C_T} \quad (10)$$

Genom att ersätta a i Ekvation 9 med uttryck för a i Ekvation 10 fås följande samband för *thrust force*, T :

$$T = \frac{1}{2} \rho V_0^2 A C_T \quad (11)$$

Uttrycket för a i *Ekvation 10* kan även sättas in i *Ekvation 7*, vilket ger:

$$\frac{u_1}{V_0} = (1 - 2a) = \sqrt{1 - C_T} \quad (12)$$

Ovanstående härledning har lett fram till ett uttryck (*Ekvation 12*) som beskriver sambandet mellan vindhastigheten nedströms vaken, u_1 , turbinens *thrust coefficient*, C_T samt den fria vindhastigheten uppströms turbinen, V_0 . Detta samband används i enkla vakmodeller, till exempel N.O Jensen PARK modell, för att beskriva vindturbiners påverkan på bakomvarande turbin.

Bilaga D. Modelleringsresultat

I delstudien *Modellering* till examensarbetet *Skogs påverkan på vindkraftsproduktion* undersöks hur väl WASP-modellen överensstämmer med energiproduktionen i vindkraftverken vid Andersfält. Beräkningarna utförs i datorprogrammet WindPRO 2 och totalt utförs fyra beräkningar:

1. Råhetsklass 3 för skog, utan nollplansförskjutning.
2. Råhetsklass 4 för skog, utan nollplansförskjutning.
3. Råhetsklass 3 för skog, med nollplansförskjutning.
4. Råhetsklass 4 för skog, med nollplansförskjutning.

Nedan presenteras huvudresultatet från dessa beräkningar:

Beräkning 1. Råhetsklass 3 för skog, utan nollplansförskjutning.

WindPRO 2 version 2.5.5.74 Oct 2006

Project: Andersfält	Description:	Printed Page: 2007.04.24 16:59 / 1
		Licensed user: Eolus Vind AB Väpnaregatan 17 SE-28150 Hässleholm +46 0451-49150
		Calculated: 2007.02.23 14:33/2.5.6.79

PARK - Huvudresultat

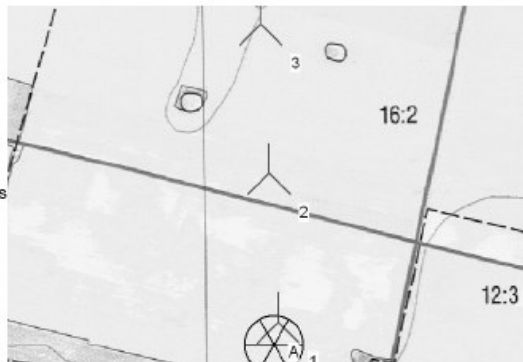
Calculation: Råhetsklass 3 för skog, utan nollplansförskjutning

Wake Model N.O. Jensen (RISØ/EMD)

Calculation Settings
 Air density calculation mode Individual per WTG
 Result for WTG at hub altitude 1,246 kg/m³ to 1,246 kg/m³
 Hub altitude above sea level (asl) 79,6 m to 80,0 m
 Annual mean temperature at hub alt. 7,5 °C to 7,5 °C
 Pressure at WTGs 1 003,4 hPa to 1 003,5 hPa

Wake Model Parameters
 Wak-konstant 0,075

Vindstatistik SE HALMSTADS FLYGPLATS 1966-77.wvs



VKV placering

RN	East	North	Z	Raddata/Beskrivning
			[m]	
1 Ny	1 327 118	6 274 247	15	verk syd
2 Ny	1 327 107	6 274 497	15	verk mitt
3 Ny	1 327 096	6 274 748	15	verk norr

▲ Nytt VKV ⊙ Platsdata
Skala 1:10 000

Nyckelresultat för höjd 50,0 m över marknivå

Terräng RN	East	North	Vindfördelningens namn	Typ	Vindenergi [kWh/m ²]	Medelvind [m/s]	Ekvivalent råhét
A	1 327 112	6 274 208	platsdata södra med skog 3 WAsP (RVEA0011 1, 0, 0, 13)		2 068	5,7	1,6

Calculated Annual Energy for Wind Farm

VKV kombination	Årsenergi		Park Verkningsgrad [%]	VKV Medelenergi [MWh]	Capacity Factor for	
	Resultat [MWh]	Resultat-10,0% [MWh]			Resultat [%]	Resultat-10,0% [%]
Vindpark	5 179,9	4 661,9	98,4	1 726,6	23,2	20,9

Beräknad Årsenergi för nya VKV

Terräng	VKV typ	Giltig	Tillverkare	Typ	Effekt [kW]	Diam. [m]	Höjd [m]	Effektkurva	Opphovsman	Name	Årsenergi		Park		
											Resultat [MWh]	Resultat-10,0% [MWh]	Verkningsgrad [%]	Medelvind [m/s]	
1	A	Ja	VESTAS	V52	850	52,0	65,0	EMD	Noise opt.	100,0(8m/s), 101,6(10m/s)	07-20021	725,8	1 563	99,1	6,2
2	A	Ja	VESTAS	V52	850	52,0	65,0	EMD	Noise opt.	100,0(8m/s), 101,6(10m/s)	07-20021	722,5	1 560	97,8	6,2
3	A	Ja	VESTAS	V52	850	52,0	65,0	EMD	Noise opt.	100,0(8m/s), 101,6(10m/s)	07-20021	731,8	1 569	98,3	6,2

Beräkning 2. Råhetsklass 4 för skog, utan nollplansförskjutning.

WindPRO 2 version 2.5.5.74 Oct 2006

Project: Andersfält	Description: Triventus Consulting AB påtar sig inget ekonomiskt ansvar för gjorda energiproduktionsberäkningar. 3:e partsbedömning rekommenderas alltid. Den bedömda årsproduktionen baseras på ett "normalår", mätdata från mätmast på Almåsaaberget, samt att den/de använda vindstatistikerna från SMHI antas vara representativa för den aktuella platsen. På de bedömda produktionsiffrorna rekommenderas ett avdrag med 20% pga osäkerhet i bedömningen, driftstörningar, nedslagning etc.	Printed/Date: 2007.04.24 16:57 / 1 Licensed user: Eolus Vind AB Väpnaregatan 17 SE-28150 Hässleholm +46 0451-49150 Calculated: 2007.02.23 14:17/2.5.6.79
--------------------------------------	--	---

PARK - Huvudresultat

Calculation: Råhetsklass 4 för skog, Utan nollplansförskjutning

Wake Model N.O. Jensen (RISØ/EMD)

Calculation Settings

Air density calculation mode Individual per WTG
Result for WTG at hub altitude 1,246 kg/m³ to 1,246 kg/m³
Hub altitude above sea level (asl) 79,6 m to 80,0 m
Annual mean temperature at hub alt. 7,5 °C to 7,5 °C
Pressure at WTGs 1 003,4 hPa to 1 003,5 hPa

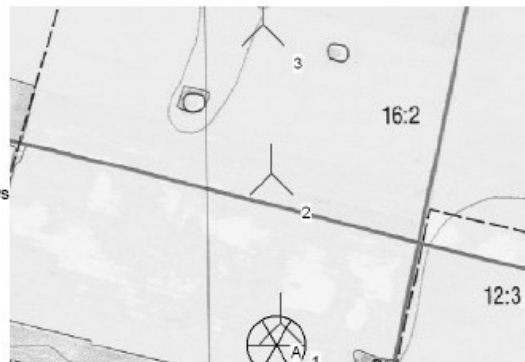
Wake Model Parameters

Vak-konstant 0,075

Vindstatistik SE HALMSTADS FLYGPLATS 1966-77.wvs

VKV placering

RN	East	North	Z	Raddata/Beskrivning
				[m]
1 Ny	1 327 118	6 274 247	15	verk syd
2 Ny	1 327 107	6 274 497	15	verk mitt
3 Ny	1 327 096	6 274 748	15	verk norr



Nyckelresultat för höjd 50,0 m över marknivå

Terräng RN

East	North	Vindfördelningens namn	Typ	Vindenergi [kWh/m ²]	Medelvind [m/s]	Ekvivalent råhet
A 1 327 112	6 274 208	platsdata södra med skog WAsP (RVEA0011 1, 0, 0, 13)		1 748	5,4	2,1

Calculated Annual Energy for Wind Farm

VKV kombination	Årsenergi		Park Verkningsgrad [%]	VKV Medelenergi [MWh]	Capacity Factor for Resultat-10,0%	
	Resultat [MWh]	Resultat-10,0% [MWh]			Resultat [%]	Resultat-10,0% [%]
Vindpark	4 759,9	4 283,9	98,3	1 586,6	21,3	19,2

Beräknad Årsenergi för nya VKV

Terräng	VKV typ	Giltig Tillverkare	Typ	Effekt [kW]	Diam. [m]	Höjd [m]	Effektkurva Upphovsman	Name	Årsenergi		Park		
									Resultat [MWh]	Resultat-10,0% [MWh]	Verkningsgrad [%]	Medelvind [m/s]	
1 A	Ja	VESTAS	V52	850	52,0	65,0	EMD	Noise opt. 100,0(8m/s), 101,6(10m/s)	07-20021	586,6	1 409	99,0	5,9
2 A	Ja	VESTAS	V52	850	52,0	65,0	EMD	Noise opt. 100,0(8m/s), 101,6(10m/s)	07-20021	587,0	1 428	97,8	6,0
3 A	Ja	VESTAS	V52	850	52,0	65,0	EMD	Noise opt. 100,0(8m/s), 101,6(10m/s)	07-20021	607,2	1 446	98,3	6,0

Beräkning 3. Råhetsklass 3 för skog, med nollplansförskjutning.

WindPRO 2 version 2.5.5.74 Oct 2006

Project: Nollplan utan karta	Description:	Printed/Page 2007.04.24 17:04 / 1
		Licensed user: Eolus Vind AB Väpnaregatan 17 SE-28150 Hässleholm +46 0451-49150
		Calculated: 2007.03.16 11:26/2.5.6.79

PARK - Huvudresultat

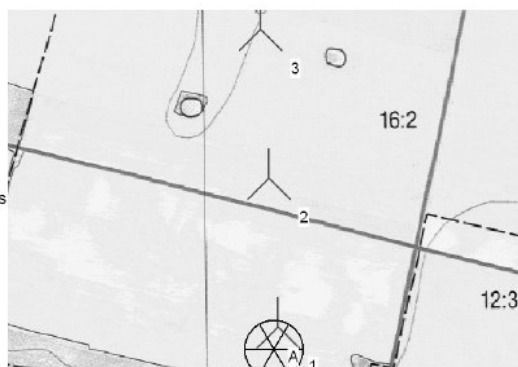
Calculation: Råhetsklass 3 för skog, med nollplansförskjutning

Wake Model N.O. Jensen (RISØ/EMD)

Calculation Settings
 Air density calculation mode Individual per WTG
 Result for WTG at hub altitude 1.248 kg/m³
 Hub altitude above sea level (asl) 80,0 m
 Annual mean temperature at hub alt. 7,5 °C
 Pressure at WTGs 1 003,4 hPa

Wake Model Parameters
 Wake-konstant 0,075

Vindstatistik SE HALMSTADS FLYGPLATS 1966-77.wvs



VKV placering

RN	East	North	Z	Raddata/Beskrivning
			[m]	
1 Ny	1 327 118	6 274 247	15	verk syd
2 Ny	1 327 107	6 274 497	15	verk mitt
3 Ny	1 327 096	6 274 748	15	verk norr

Nyckelresultat för höjd 50,0 m över marknivå

Terräng RN	East	North	Vindfördelningens namn	Typ	Vindenergi [kWh/m ²]	Medelvind [m/s]	Ekvivalent råhet
A	1 327 112	6 274 208	platsdata södra med skog 3	WAsP (RVEA0011 1, 0, 0, 13)	2 042	5,6	1,7

Calculated Annual Energy for Wind Farm

VKV kombination	Årsenergi		Park Verkningsgrad [%]	VKV Medelenergi [MWh]	Capacity Factor for	
	Resultat [MWh]	Resultat-10,0% [MWh]			Resultat [%]	Resultat-10,0% [%]
Vindpark	5 182,4	4 664,1	98,4	1 727,5	23,2	20,9

Beräknad Årsenergi för nya VKV

Terräng	VKV typ	Giltig	Tillverkare	Typ	Effekt [kW]	Diam. [m]	Höjd [m]	Effektkurva	Upphovsman	Name	Årsenergi		Park		Medelvind [m/s]
											Resultat [MWh]	Resultat-10,0% [MWh]	Verkningsgrad [%]	Verkningsgrad [%]	
1 A	Ja	VESTAS	V52	850	52,0	65,0	EMD	Noise opt.	100.0(8m/s), 101.6(10m/s)	07-20021	714,6	1 543	99,1	99,1	6,1
2 A	Ja	VESTAS	V52	850	52,0	65,0	EMD	Noise opt.	100.0(8m/s), 101.6(10m/s)	07-20021	723,7	1 551	97,8	97,8	6,2
3 A	Ja	VESTAS	V52	850	52,0	65,0	EMD	Noise opt.	100.0(8m/s), 101.6(10m/s)	07-20021	744,0	1 570	98,3	98,3	6,2

WindPRO is developed by EMD International A/S, Niels Jernesvej 10, DK-9220 Aalborg Ø, Tlf. +45 96 35 44 44, Fax +45 96 35 44 46, e-mail: windpro@emd.dk

Beräkning 4. Råhetsklass 4 för skog, med nollplansförskjutning.

WindPRO 2 version 2.5.5.74 Oct 2006

Project: Nollplan utan karta	Description: Triventus Consulting AB påtar sig inget ekonomiskt ansvar för gjorda energiproduktionsberäkningar. 3:e partsbedömning rekommenderas alltid. Den bedömda årsproduktionen baseras på ett "normalår", mätdata från mätmast på Almåsaberget, samt att den/de använda vindstatistikerna från SMHI antas vara representativa för den aktuella platsen. På de bedömda produktionssiffrorna rekommenderas ett avdrag med 20% pga osäkerhet i bedömningen, driftstörningar, nedslagning etc.	Printed/Page: 2007.04.24 17:04 / 1 Licensed user: Eolus Vind AB Väpnaregatan 17 SE-28150 Hässleholm +46 0451-49150 Calculated: 2007.03.16 11:26/2.5.6.79
--	--	---

PARK - Huvudresultat

Calculation: Råhetsklass 4 för skog, med nollplansförskjutning

Wake Model N.O. Jensen (RISØ/EMD)

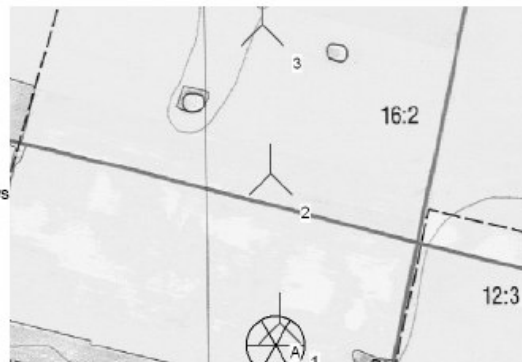
Calculation Settings
Air density calculation mode Individual per WTG
Result for WTG at hub altitude 1.246 kg/m³
Hub altitude above sea level (asl) 80,0 m
Annual mean temperature at hub alt. 7,3 °C
Pressure at WTGs 1 003,4 hPa

Wake Model Parameters
Wak-konstant 0,075

Vindstatistik SE HALMSTADS FLYGPLATS 1966-77.wvs

VKV placering

RN	East	North	Z	Raddata/Beskrivning
			[m]	
1 Ny	1 327 118	6 274 247	15	verk syd
2 Ny	1 327 107	6 274 497	15	verk mitt
3 Ny	1 327 096	6 274 748	15	verk norr



A Nytt VKV © Platsdata Skala 1:10 000

Nyckelresultat för höjd 50,0 m över marknivå

Terräng RN	East	North	Vindfördelningens namn	Typ	Vindenergi [kWh/m ²]	Medelvind [m/s]	Ekvivalent råhet
A	1 327 112	6 274 208	platsdata södra med skog WAsP (RVEA0011 1, 0, 0, 13)		1 727	5,3	2,2

Calculated Annual Energy for Wind Farm

VKV kombination	Årsenergi		Park Verkningsgrad [%]	VKV Medelenergi [MWh]	Capacity Factor for Resultat-10,0%	
	Resultat [MWh]	Resultat-10,0% [MWh]			Resultat [%]	Resultat-10,0% [%]
Vindpark	4 762,5	4 286,3	98,4	1 587,5	21,3	19,2

Beräknad Årsenergi för nya VKV

Terräng	VKV typ	Giltig Tillverkare	Typ	Effekt [kW]	Diam. [m]	Höjd [m]	Effektkurva Upphovsman	Name	Årsenergi		Park		Medelvind [m/s]
									Resultat [MWh]	Resultat-10,0% [MWh]	Verkningsgrad [%]	Medelvind [m/s]	
1 A	Ja	VESTAS	V52	850	52,0	85,0	EMD	Noise opt. 100.0(8m/s), 101.6(10m/s) 07-20021	556,1	1 400	99,0	5,9	
2 A	Ja	VESTAS	V52	850	52,0	85,0	EMD	Noise opt. 100.0(8m/s), 101.6(10m/s) 07-20021	588,2	1 429	97,8	6,0	
3 A	Ja	VESTAS	V52	850	52,0	85,0	EMD	Noise opt. 100.0(8m/s), 101.6(10m/s) 07-20021	619,2	1 457	98,3	6,0	