

Ljudemission från vindkraftverk

Acoustic emission from wind power

Nicholas Zmijewski

Referat

Ljudemission från vindkraftverk

Nicholas Zmijewski

I takt med att samhället växer behövs nya alternativa energikällor, inte bara för att täcka upp det nya behovet av energi utan även för att substituera till exempel kolkraften som ger betydande utsläpp i vår miljö. Vindkraften kommer därmed med all sannolikhet ha en betydande marknadsandel i framtidens energimarknad.

Utbyggnaden av vindkraft hindras bland annat av den utbredda misstro som finns kring vindkraftens effekter för boende omkring vindkraftverken. Speciellt kan ljud från vindkraftverken upplevas som störande. Ljudemissionen från ett vindkraftverk är den ljudeffekt verket ger upphov till. Syftet med projektet var att utreda sambandet mellan mätbara variabler och ljudeffektnivån samt utreda möjligheten att beskriva ljudeffektnivån från ett vindkraftverk med en semi-empirisk modell. Modellen skall användas som en prediktionsmodell för ljudeffektnivån.

För att identifiera sambanden utfördes en litteraturstudie kring ljudemission, vindkraftverk och aerodynamiken kring ett vindkraftverk samt av tidigare framtagna modeller. Aerodynamiken kring ett blad på ett vindkraftverk har studerats. Ljudemissionens källor är beroende av hastigheten i bladets gränsskikt. De möjliga flödesmekanismerna över bladet har kartlagts med syfte att hitta samband med ljudemissionen. Bladet är något vridet vilket gör att hela bladets momentana vinkel mot vinden inte kan ge uttryck för gränsskiktets karaktär generellt för hela bladet. För att bestämma den källa som momentant har störst påverkan krävs omfattande data över aktuell bladprofil. Därefter kan en generell modell för att prediktera ljudemissionen tas fram.

Projektet resulterade i en kartläggning av relationen mellan ljudeffektnivån och den producerade elektriska effekten, rotorbladens rotationshastighet samt rotorbladets längd. Modellen visar att ljudeffektnivån för ett vindkraftverk kan predikteras med data om vindkraftverkets storlek samt rotationshastighet. Dessa ger då tryckskillnaden mot omgivande statiskt atmosfärstryck som uppstår över rotorn. Denna kan relateras till ljudeffektnivån från vindkraftverket.

Ljudeffektmätningar från 14 olika vindkraftverk vid diskretiserad vindhastighet användes i projektet. Osäkerheten i mätvärden samt det låga antalet vid valideringen använda mätvärden gör att beloppet av parametrarna i modellen är något osäkra. Beräkningar med modellen bör därför endast ses som en fingervisning av ljudeffektnivån.

Nyckelord: Ljudemission, strömningshastighet, bladvinkelreglering.

Institutionen för informationsteknologi, Uppsala Universitet
Lägerhyddsvägen 2, SE-752 37 UPPSALA
ISSN 1401-5765

Abstract

Sound emission of wind power

Nicholas Zmijewski

As society grows the demand for new alternative fuels becomes more apparent, not only to cover new needs but also to substitute the widely used fossil intensive fuels such as coal power, which does formidable damage to our environment. Wind power is likely to have a significant part in this change.

The expansion of wind power is hindered by the widespread distrust and the skepticisms about what the effects might be on residents in the area surrounding the wind power station. Sound emission from a wind turbine is the sound power that the specific station generates. The project aimed to investigate the relationship between measurable variables and the sound power level and also investigate the possibility of describing the sound power level from a wind turbine with a semi-empirical model. The model produced would be used for a general prediction of sound power level.

To identify significant relationship a literature study was carried out encompassing sound radiation, wind aerodynamics surrounding a wind turbine as well as previously developed models. The aerodynamics of a blade on a wind turbine was studied as the source of the sound emission seems to be dependent on the flow in the boundary layer of the blade. Possible mechanisms of flow over the blade have been mapped in order to find relationships with the sound emission. The blade of a wind turbine is slightly twisted for aerodynamic reasons dependent on airfoil design, for this reason the pitch of the blade cannot generally express the character of the boundary layer over a blade. To determine the source that instantaneously has the greatest impact requires extensive data on the current blade profile. A general model to predict the sound emission can then be developed.

The project resulted in the identification of the relationship between sound power level and the produced power, the rotational speed of the rotor as well as the rotor blades length. The pressure difference over the rotor is expressed with available data and related to the sound power level from a wind turbine. The model shows that the sound power level of a wind turbine can be predicted with data on the rotor size and rotational speed. Sound power measurements from 14 wind power stations at discrete wind speeds were used in the project. The uncertainty of measurement and the low number of data points used in the validation makes the parameters in the model is somewhat uncertain. Calculations with the model should therefore be taken as an indication of the actual sound power level.

Keywords: Sound emission, flow velocity, pitch control

Department of Information Technology, Uppsala University
Lägerhyddsvägen 2, SE-752 37 UPPSALA
ISSN 1401-5765

Förord

Det här examensarbetet omfattar 30 högskolepoäng inom civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet. Projektet är utfört under vårterminen 2010 på ÅF Ingemansson i Göteborg.

Många som hjälpt mig att genomföra arbetet förtjänar ett stort tack. Jag vill först och främst tacka min handledare Martin Almgren för all hjälp och för ett intressant och varierande examensarbete.

Stort tack till alla trevliga kollegor på ÅF Ingemansson för hjälp med akustiska frågor och trevliga luncher. Tack också till min ämnesgranskare Bengt Carlsson vid institutionen för informationsteknologi vid Uppsala universitet.

Nicholas Zmijewski

Stockholm, juni 2010

Copyright © Nicholas Zmijewski och Institutionen för informationsteknologi, Uppsala universitet.

UPTEC W10 028, ISSN 1401-5765

Tryckt hos Institutionen för geovetenskaper, Geotryckeriet, Uppsala universitet, Uppsala, 2010.

Populärvetenskaplig sammanfattning

Ljudemission från vindkraftverk

Nicholas Zmijewski

Förändringar av klimatet blir allt tydligare och effekterna allt allvarigare. Vad klimatförändringen beror på är fortfarande under debatt men mycket talar för att människans utsläpp av växthusgaser är en stor orsak. I vilket fall som helst är det tydligt att energiframställning i dagens samhälle inte är hållbart och måste ställas om till ett mer långsiktigt och miljövänligt alternativ.

Energien i samhället idag framställs framförallt från fossila bränslen så som olja, kol och naturgas. Fossila bränslen bildas över lång tid från dött organiskt material. Då denna process tagit så pass lång tid är det svårt att återskapa. I samband med utvinning av den energi som finns lagrad i fossila bränslen fås biprodukter bl.a. i form av växthusgaser så som koldioxid (CO₂). Tron att växthuseffekten ökar och att våra utsläpp av växthusgaser är skälet bakom har lett till att politiker och allmänheten vänt sig till diverse alternativa bränslen där vindkraft visat sig spela en stor roll.

Vind är luftmassor som rör sig på grund av tryckskillnader och temperaturskillnader i atmosfären. Denna rörelseenergi som finns i de flyttande luftmassorna är eftertraktad. För att ta vara på energin i vinden omvandlas den till mekanisk energi och vidare till elektrisk energi. För omvandlingen från vindens rörelseenergi till mekanisk energi finns det flera varianter av konstruktioner, de vanligaste är det horisontella vindkraftverket samt i mindre omfattning det vertikala vindkraftverket. Vertikala vindkraftverk roterar i det horisontella planet och behöver därmed inte rikta sig efter den aktuella vindens riktning. Horisontella vindkraftverk, den vanligaste typen och den undersökt i detta projekt, roterar i det vertikala planet. Det horisontella vindkraftverket har i merparten av industrin idag tre rotorblad, detta kan dock variera då vissa har endast två. Vinden fångas upp av blad där det induceras en kraft, denna kraft för då bladen runt rotornavet. Rotornavet för sedan vidare denna mekaniska energi till generatoren som omvandlar den till elektriskenergi och sedan vidare ut på våra elnät.

El från vindkraft framställs idag i både stor och liten skala. Allt ifrån små vindkraftverk som endast kan förse en sommarstuga till stora vindkraftparker med flera tusen vindkraftverk med kapacitet att förse industrier med elektricitet över hela året. Vindens energi är oändlig och kan därmed kallas för en grön energikälla för samhället. Det finns trots detta flera nackdelar med framställningen av energi genom vindkraft så som dess påverkan på omgivningen, t.ex. skuggeffekter, oestetiska effekter samt akustiska effekter. Av dessa källor till påverkan har det visat sig att ljudet från vindkraftverket är det generellt mest störande för omkringboende och besökare.

De senaste åren har vindkraftindustrin expanderat mycket vilket gjort att särskilda behov av kontroll uppkommit. Innan ett nytt vindkraftverk får uppföras bör de möjliga effekterna som konstruktionen kan ha på omgivande miljö kartläggas, detta görs med en miljökonsekvensbeskrivning. I denna utredning finns även ett moment som kartlägger

vad vindkraftverket kommer ha för inverkan på ljudmiljön i området. Dessa utredningar kan innebära stora kostnader för bl.a. mätningar och simuleringar. Med det ökade intresset för vindkraft har även behovet av förståelse av skälen bakom ljudemissionen från vindkraftverk ökat.

Ljudemissionen från ett vindkraftverk har visat sig bero på bladets vinkel mot vinden. Bladets vinkel kan anpassas till att antingen producera maximal möjlig elektriskeffekt eller också kan vinkeln anpassas för att minimera ljudemissionen. Nyare verk anpassar även rotorns varvtal i dessa syften.

Ljud är tryckfluktuationer kring atmosfärstrycket som utbreder sig från en ljudkälla. I ett vindkraftverk skapas tryckfluktuationer av interaktion mellan luftens flöde i atmosfären och vindkraftverket, men även på mindre skala kring rotorbladets gränsskikt. För att modellera flöde används extensiva flödesmodeller (CFD) vilka ofta är opraktiska. Dessa modeller kräver data som kanske är otillgängligt eller så tar beräkningarna helt enkelt för lång tid för att vara praktiskt användbara.

Ljudemissionen från ett vindkraftverk är den ljudeffekt verket ger upphov till. En modell som förutspår ljudemissionen från ett vindkraftverk beroende på dess konstruktion och drift kan inte bara vara till användning för att kunna förändra och förbättra verket utan även vid val av vindkraftverk då ljudeffektnivån har större betydelse.

Syftet med detta projekt var att utreda sambandet mellan vindkraftverkets drift och konstruktion och vindkraftverkets ljudeffektnivå samt utreda möjligheten att beskriva ljudeffektnivån med en modell. Modellen skall användas för att förutspå ljudeffektnivån från vindkraftverket.

Med litteraturstudier och tillgängliga data från mätningar av ljudeffektnivån från vindkraftverk sammanfattades relevanta samband för ljudemissionen. Projektet resulterade i en kartläggning av relationen mellan ljudeffektnivån och den av vindkraftverket producerade elektriska effekten, rotorns rotationshastighet samt vindkraftverkets storlek. Ljudeffektnivån för ett vindkraftverk kan förutspås beroende på vindkraftverkets storlek samt dess rotationshastighet då bladvinkeln regleras för att reducera ljudeffektnivån maximalt.

Ljudeffektmätningar från 14 vindkraftverk användes i projektet. Osäkerheten i mätningen samt det låga antalet mätpunkter vid kontroll av modellen gör att modellen är något osäker. Beräkningar med modellen bör därför endast ses som en fingervisning av ljudeffektnivån. Fler mätningar bör därför användas för att få en bättre grund för modellen.

Innehållsförteckning

1 INLEDNING	1
1.1 Bakgrund	1
1.1.2 Tillgängliga modeller	2
1.3 Avgränsningar och antaganden	3
1.4 Tillvägagångssätt	4
1. Litteraturstudie	4
2. Processbeskrivning	4
3. Modellering	4
4. Utvärdering	4
2. TEORI	5
2.1 Vad är ljud?	5
2.2. Ljudtrycksnivå	6
2.3. Ljudeffekt	7
2.4. Avståndets påverkan på ljud:	7
3. BULLER FRÅN VINDKRAFTVERK	9
3.1. Vindkraftverkets konstruktion	9
3.1.1. Navhöjd	9
3.2 Vindens energi	10
3.3. Ljudalstring	11
3.4. Aerodynamik	12
3.5. Ljudkällor på bladet	13
3.6. Ljudreducerande inställning	15
3.7. Flöde över bladet	16
4. ANVÄNDA MÄTDATA	18
4.1 Mätuppställning	18
4.2 Korrigering	19
4.3 Vindkraftverkets ljudeffekt	19
4.4. Vinddata	19
4.5 Osäkerhet	21
5 MODELLERING	23
5.1 Val av funktion	23
5.2 Flöde kring vindkraftverket	24

5.3 Estimering av parametrar.....	30
5.3.1. Teori	30
5.3.2. Validering	30
6 RESULTAT OCH OBSERVATIONER.....	32
<i>Relation 1:</i>	32
<i>Relation 2:</i>	32
6.2 Validering	32
7. DISKUSSION.....	35
8. SLUTSATS	37
8.1 Framtida arbete	37
9. REFERENSER	39
A.1. Normalfördelning av residualerna	41

Ordlista	Förklaring
Ljudimmission	Det ljud som når en mottagare
Ljudemission	Det ljud som en källa sänder ut
Temperaturinversion	Temperaturlöslagande med höjden
Ekvivalentnivå	Logaritmisk medelljudnivå under en viss tidsperiod
Tersband	Uppdelning av frekvenser för mätvärde för att lättare kunna skapa överskådliga resultat.
Laminärt flöde	Rätlinjigt, skiktat flöde.
Semiempirisk	Kunskap som grundas dels på teoretiska förhållanden och dels på experimentella data.

1 Inledning

1.1 Bakgrund

I takt med att samhället växer behövs nya alternativa energikällor, inte bara för att täcka upp det nya behovet av energi utan även att substituera till exempel kolkraften som gör betydande utsläpp i vår miljö. Här kommer vindkraft med all sannolikhet ha en betydande marknadsandel. Buller från vindkraftverk är därmed en mycket aktuell fråga.

Ett nytt vindkraftverk har idag ofta en effekt kring 2 MW vilket ger i snitt mellan 4-5 GWh per år. Detta motsvarar elförbrukning till omkring 1000 hushåll. (Naturvårdsverket, 2007) I slutet av 2008 producerade vindkraften i Sverige cirka 2 TWh per år vilket motsvarar 1,4 procent av Sveriges totala elproduktion. Förhoppningar för planerad expansion är höga. Vid år 2015 bedöms vindkraften i Sverige producera 12,5 TWh per år och vidare till att år 2020 kunna producera 15 TWh. För att generera detta behövs det byggas 500 MW vindkraft per år i Sverige, det vill säga i snitt ett stort vindkraftverk per arbetsdag (Handlingsplan, 2009). Globalt producerades 340 TWh år 2009 vilket motsvarar 2 % av världens totala energi konsumtion (WWEA, 2009). Med den tänkta utbyggnaden av vindkraft kommer många fler än idag bo i närheten av ett vindkraftverk. Det är därför viktigt att veta hur utbyggnaden påverkar omgivningen och försöka minska eventuella negativa effekter.

Utbyggnaden av vindkraft hindras av den utbredda misstro som finns kring vindkraft och dess effekter för boende omkring vindkraftverken. Undersökningar har visat att det mest störande momentet har varit det buller vindkraftverk kan ge upphov till (Pedersen, 2002). För att kartlägga områden för möjlig utbyggnad i Sverige används simuleringsprogram. Dessa tar hänsyn till den geografiska omgivningen, naturområden samt omkring boende. Då en plats med goda vindförhållanden valts för eventuell projektering inleds en förstudie. Studien beskriver tillgänglighet till mark, projektets ekonomiska kalkyl samt de miljökrav som ställts, där en bullerutredning ingår. Tillståndsansökan lämnas sedan in till lämpliga myndigheter som prövar ansökan enligt miljöprocesslagstiftningen och miljöbalken (Naturvårdsverket, 2010).

Med dagens bestämmelser får ett vindkraftverk inte ge ifrån sig en ljudnivå högre än 40 dB(A) kring bostäder, vilket motsvarar ungefär 30 dBA inomhus med öppet fönster. I områden med lågt bakgrundsljud, t.ex. friluftsområden där ljudmiljön är särskilt viktig bör ljudnivån ej överstiga 35dBA. Vindkraftanläggningar är den verksamhet i Sverige som har strängast krav på ljudnivå, vilket kan bero på ljudets besvärande karaktär. Studier har även visat på psykologiska effekter relaterat till störning från vindkraftverk, så som stress och sömnsvårigheter (Pedersen, 2007). Ljudets svischande karaktär nämns som ett av skälen till det oproportionerliga missnöjet jämfört med andra ljudkällor av samma nivå. Trots att många skäl till detta svischande ljud har föreslagits, t.ex. blad-torn interaktion och vindhastighetsvariation kring rotorn, har gjorda studier inte helt klarlagt mekanismen bakom.

1.1.1 Mätningar av ljudet kring ett vindkraftverk

Ljudtrycksnivån som mäts på ett längre avstånd från vindkraftverket kallas ljudmission, alltså det ljud som upplevs vid t.ex. bostaden. Idag är kunskapen god och väl beprövad kring hur ljudmissionen från ett vindkraftverk skall mätas, beräknas och utvärderas. Det finns flera beräkningsmodeller varav den enklare Naturvårdsverkets modell, 2001 samt modellen Nord2000 är de vanligaste vid beräkning av ljudmission från vindkraftverk. Den mer detaljerade modellen Nord2000 utvecklades för att beräkna samhällsbuller och tar i viss grad hänsyn till atmosfärens påverkan på ljudutbredningen.

Ljudmissionen från ett vindkraftverk är den ljudeffekt verket ger upphov till. En modell som förutspår ljudmissionen från ett vindkraftverk beroende på dess konstruktion och drift kan vara till användning för att kunna förändra och förbättra verket. En modell kan även vara till hjälp vid val av vindkraftverk då ljudeffektnivån har större betydelse. Vindkraftverkets ljudkälla verkar vara variabel beroende av rotorbladsposition. Över en rotation eller längre tid och på avstånd lika med eller större än verkets totalhöjd kan vindkraftverket approximeras som en punktkälla vid navet.

1.1.2 Tillgängliga modeller

För tillfället finns det ingen standardmodell för ljudmission från vindkraftverk. Ett antal beskrivande modeller för enskilda verk har dock tagits fram. Detta gör att tillverkare ofta tar fram en egen modell för sina verk, hänsyn tas oftast till ytterst få variabler vilket resulterar i en starkt förenklad modell. Detta gör även att det kan vara svårt att jämföra resultat från olika tillverkare då ingen generell modell finns.

Ljud är tryckfluktuationer kring det statiska atmosfärstrycket. Källan, ur vilken dessa tryckfluktuationer utbreddas kallas ljudkälla. I ett vindkraftverk skapas tryckfluktuationer av interaktion mellan luftens flöde i atmosfären och vindkraftverket, men även på mindre skala kring rotorbladets gränsskikt. För att modellera flöde används extensiva flödesmodeller (CFD) vilka ofta är opraktiska. Dessa modeller kräver data som kanske är otillgängligt eller så tar beräkningarna helt enkelt för lång tid för att vara praktiskt användbara.

De modeller som används i industrin för tillfället är generellt baserade på Boundary element metoden (BEM) som är en numerisk metod använd för att lösa de partiella differential ekvationerna (PDE). Denna metod delar upp bladet i ett antal delar för vilka den beräknar ljudmissionen individuellt för att sedan summera över hela bladet. Metoden kräver utförliga värden på bladets utformning och flödet däröver.

De utvecklade modellerna kompletteras med empiriska korrelationer för att passa experimentellt framtagna data. Märkvärd är en semi-empirisk modell som togs fram i slutet på 80-talet av NASA med hjälp av vindtunneltest (Brooks, 1989). Modellen har använts mycket sedan dess och har fortfarande betydande påverkan. Modellen är dock specifikt anpassad och skalad till de använda rotorbladen, vilka var till ett mindre vindkraftverk. Liknande försök har även gjorts de senaste åren av det europeiska

samarbetet DRAW (Development of Design Tools for Reduced Aerodynamic Noise Wind Turbines) för att skala en modell med empiriska data (Vanlanduit, 2009). Svårigheten med att behålla kravet av maximal elektrisk produktion samtidigt som ljudemissionen önskas minska utreds i projektet SIROCCO (Silent Rotors by Acoustic Optimisation), där försök görs till att utveckla rotorblad med lägre ljudemission (ECN, 2010).

1.2 Syfte och målsättning

Syftet med detta projekt var att utreda möjligheten att ta fram en semi-empirisk modell för den akustiska emissionen från ett vindkraftverk utifrån tillgängliga data. Modellen skall användas som en prediktionsmodell för ljudeffektnivån inom lämpligt dataområde. Modellen skall tillgodose olika behov

- Då ett verk tidigare granskats och större rotorradie önskas, skall modellen kunna beräkna ökningen av ljudeffektnivå.
- Då ljudeffektnivån för ett vindkraftverk inte har mätts skall modellen kunna ge ett ungefärligt värde.

1.3 Avgränsningar och antaganden

Undersökta vindkraftverk var moderna horisontalaxlade bladvinkelreglerade vindkraftverk med skarp bladkant och snabb anpassning av bladvinkel.

För att tillåta en standardisering för mätning av ljudeffektnivå har ett antal antaganden gjorts, dessa redovisas närmare i avsnittet osäkerhet.

Vid modelleringen antogs systemet innehålla brus, en stokastisk variabel med medelvärde lika med noll.

1.4 Tillvägagångssätt

Projektet består utav fyra huvudmoment:

1. Litteraturstudie

Befintlig litteratur kring akustik, tillgängliga modeller för ljudemission från vindkraftverk samt möjliga modelleringsalternativ behandlas. Detta redovisas i teorikapitlet.

2. Processbeskrivning

Processen kring hur ljudet uppkommer och påverkas beskrivs närmare, relevanta variabler identifieras och kartläggs. Data som samlats in, vilka antas beskriva det studerade systemet, beskrivs och värderas.

Möjligheten att basera modellen på en fysikaliskt framtagen funktion utreds. Ur detta utformas en enkel, men beskrivande modell med basekvationer som är fysikaliskt förankrade med en del okända parametrar.

3. Modellering

Den tidigare framtagna modellen utvecklas till en mer generell modell för ett typiskt vindkraftverk genom att de okända variablerna skattas.

Modellen valideras med korsvalidering, där en del av de insamlade data inte används för estimering av okända parametrar utan för att testa modellens precision.

4. Utvärdering

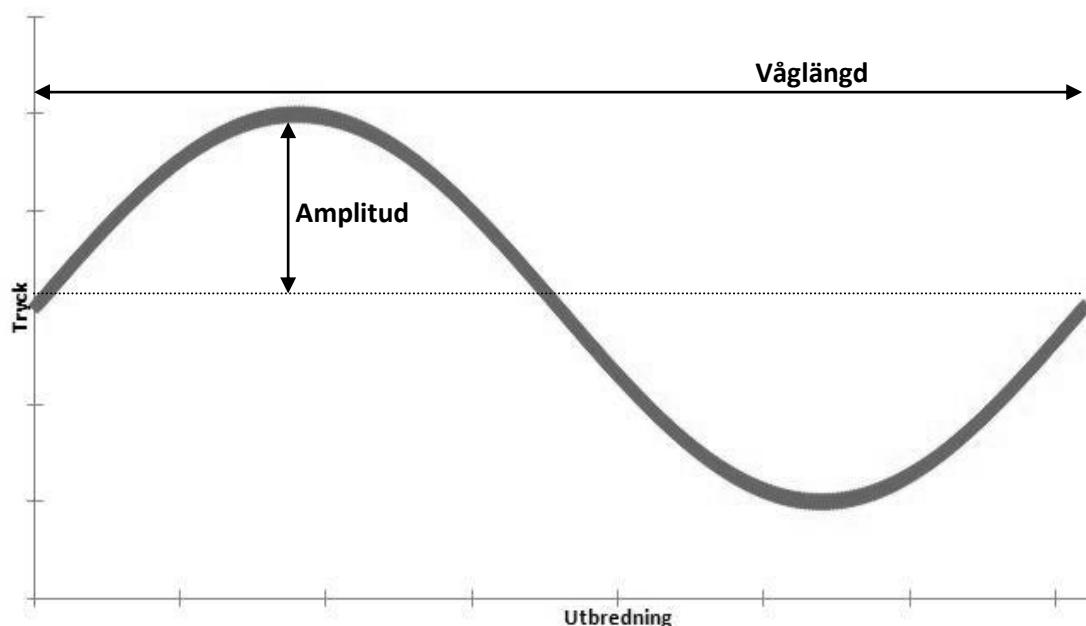
Resultatet från estimeringen jämförs med mätdata och analyseras med avseende på användbarhet.

2. Teori

2.1 Vad är ljud?

Ljud är en mekanism som består av vågutbredning i ett medium genom cykler av kontraktion och expansion. Cyklerna ger tryckvariationer som kan mätas, och ofta höras. Tryckvariationerna kommer vara proportionella till störningen och beroende av mediets egenskaper.

Denna typ av våg kallas longitudinell och uttrycks i Figur 1 som en sinusfunktion över en period. Vågens amplitud uttrycker signalens maximala värde relativt det ostörda lufttrycket. Våglängden är avståndet mellan två vågtoppar eller längden av en period för en sinusformad tryckvariation.



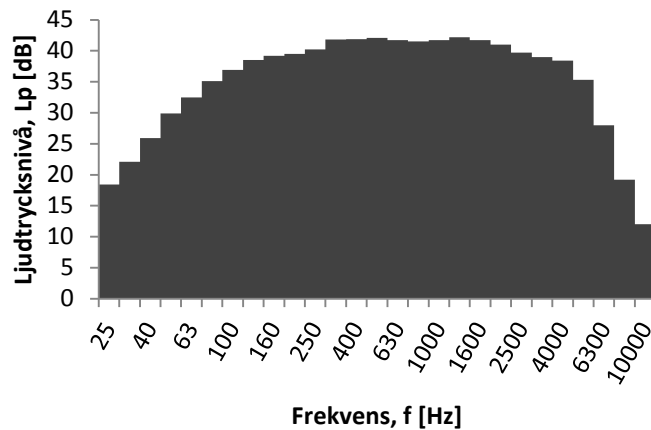
Figur 1. Sinusformad våg för tryckvariationen av en longitudinell våg.

Vågens utbredningshastighet är beroende av dess våglängd samt dess frekvens och beräknas med

$$c = f \cdot \lambda \quad (1)$$

där c är ljudhastigheten, f är frekvensen och λ är signalens våglängd.

Ljud som inte är rena toner emitteras vid en mängd olika frekvenser, kallat ljudets frekvensspektrum. För att få en överblick över en källas frekvensspektrum diskretiseras de uppmätta frekvenserna och kan sedan delas upp dessa i band. Ett vanligt sätt är att dela upp spektret i 1/3 oktav- band eller ters-band (drygt 30 delar i det hörbara området) med bandets geometriska centerfrekvens som angivet värde, se Figur 2.



Figur 2. ljudtrycksnivå uppdelad i tersband för vindkraftverk.

2.2. ljudtrycksnivå

Tryckvariationer mäts i enheten Pascal (Pa). Detta blir dock svårhanterligt då värden för ljudtryck kan variera mellan 10^{-5} Pa till 10^5 Pa. Enstaka tryckpulser kan även ge ännu högre tryck. Därför översätts mätningar oftast till enheten decibel (dB) enligt ekvation (2). Enheten Bel(B) används för att jämföra förhållandet mellan två signaler i en logaritmisk skala, i detta fall ljudtrycket som mäts och ett referenstryck.

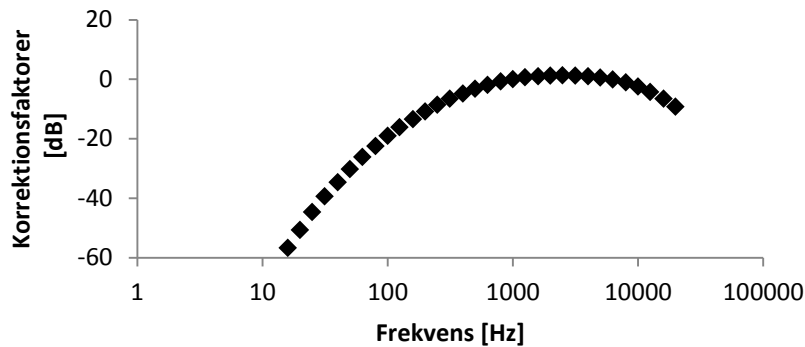
Referenstrycket, p_{ref} , är den lägsta möjliga nivån människan kan uppfatta ljud vid.

$$L_p = 10 \log \left(\frac{p^2}{p_{ref}^2} \right) = 20 \log \left(\frac{p}{p_{ref}} \right) \quad (2)$$

$$p_{ref} = 2 \cdot 10^{-5} Pa$$

där p är trycket [Pa] och L_p är ljudtrycksnivån [dB].

Människan hör inte lika bra vid alla frekvenser vilket tas hänsyn till genom att filtrera ljudet och korrigera nivån vid de olika frekvenserna, ett s.k. vägningsfilter. I praktiken innebär detta att ljudtrycksnivån för aktuell frekvens kan justeras och kallas då ljudnivå. Dessa filter togs fram för att minska inflytande på mätvärde av frekvenser som var mindre intressanta. Ljudnivå anges i enheten dB(A) då det vanliga A-vägningsfiltret används. A-filtret togs fram främst för användning vid lägre frekvenser med korrektionsfaktorer enligt Figur 3. Då ljudet från vindkraftverk främst ligger vid dessa frekvenser kan detta filter rimligtvis användas.



Figur 3. Korrektionsfaktorer för A-vägning av ljudtrycksnivå som funktion av frekvens.

2.3. Ljudeffekt

I vissa miljöer kommer ljudet reflekteras mot omgivande ytor och därmed ge en högre ljudtrycksnivå än objektet skulle ge upphov till i fritt fält. För att på enhetligt vis jämföra ljudemission från objekt oavsett omgivning används ljudeffekten. Ljudeffekten beräknas ur ljudtrycksmätning med hänsyn till källans utformning.

Ljudeffekten är den från objektet utstrålade energin per sekund. Den är därmed proportionell mot tryckkällans styrka och oberoende av ljudets utbredning. Ljudeffekten kan, för en volymflödeskälla, uttryckas enligt:

$$P = p \cdot Q \quad (3)$$

där

P är utstrålad ljudeffekt [W]

p är tryckkällan [Pa]

Q är flödet av mediet [m^3/s]

Då denna enhet i likhet med ljudtryck blir svårhanterlig används ofta en logaritmisk skala, och kallas då ljudeffektnivå.

Relationen mellan ljudeffektsnivå och ljudeffekten från objektet uttrycks av

$$L_W = 10 \log \left(\frac{P}{P_{ref}} \right) \quad (4)$$

där L_W är ljudeffektnivån i dB relativt 1 pW, och referenseffekten är $P_{ref} = 10^{-12}$ [W].

2.4. Avståndets påverkan på ljud:

Ett vindkraftverk kan vid ljudutbredningsberäkningar approximeras som en punktkälla för ljud (IEC, 2006). Ljudemissionen sker likformigt över en sfärisk yta från centrum av navet av vindkraftverket. Ljudintensiteten, I , alltså effekt per ytenhet av ljudvågen, kan då beräknas som:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (5)$$

där r är avståndet till rotornavet.

Vid ett tillräkligt stort avstånd från en punktkälla kan ljudintensiteten approximeras som den av en plan ljudvåg. Intensiteten av ljudvågen är då proportionell mot effektivvärdet av ljudtrycket i kvadrat. Ur detta följer att ljudtrycket kommer minska som $1/r$ med avståndet från navet. Av detta skäl finns det ett standardavstånd vid mätning av ljudemission för vindkraftverk.

2.5. Ekvivalent nivå

Vid mätning av ljudtrycksnivå tas ett medelvärde över mättiden för att begränsa datamängden. Detta medelvärde kallas den ekvivalenta nivån över aktuella tiden för signalen.

$$L_{eq} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{t} \int_0^t \frac{p^2}{p_{ref}^2} dt \right) \quad (6)$$

där t är mätperioden.

3. Buller från vindkraftverk

3.1. Vindkraftverkets konstruktion

Ett flertal varianter av vindkraftverk har tagits fram, både vertikala och horisontella verk med varierande antal rotorblad. De vindkraftverk som använts i detta projekt har alla varit moderna horisontalaxlade vindkraftverk då denna variant är vanligast.

På det horisontella vindkraftverket är tre blad fästa vid ett rotnav som roterar i det vertikala planet. Rotornavet för vidare den mekaniska energin från bladen till turbinen. Via turbinen konverteras den mekaniska energin till elektrisk energi av en generator. Tornet, som oftast är ett ihåligt rör, stöttar upp navet och gör turbinen åtkomlig för underhåll och kontroll.

För att konstruktionen skall vara riktad mot vinden roteras den vid turbinhusets bas efter vilken riktning medelvinden har med hjälp av reglerteknik och en vindriktningsmätare fäst ovanför navet.



Figur 4. Vindkraftverk i Mecklemburg, Tyskland

3.1.1. Navhöjd

Vindhastighet varierar beroende på aktuell höjd. Närmare marken kommer vindhastigheten att vara lägre än vid rotnavet och bladen. På högre höjd är påverkan från marken mindre och vindhastigheten därmed högre (Ackerman, 2007). En ändring av navhöjden hos vindkraftverket borde därmed ge en ändring av vindhastigheten vid rotnavet respektive över rotorarean.

3.2 Vindens energi

Ett vindkraftverk omvandlar rörelseenergin i vinden till elektrisk effekt. Den möjliga effekten, det vill säga vindens rörelseenergi per sekund genom rotorarean, kan beräknas enligt

$$P_{\text{maximal}} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v_0^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_0^3 \cdot A \quad (7)$$

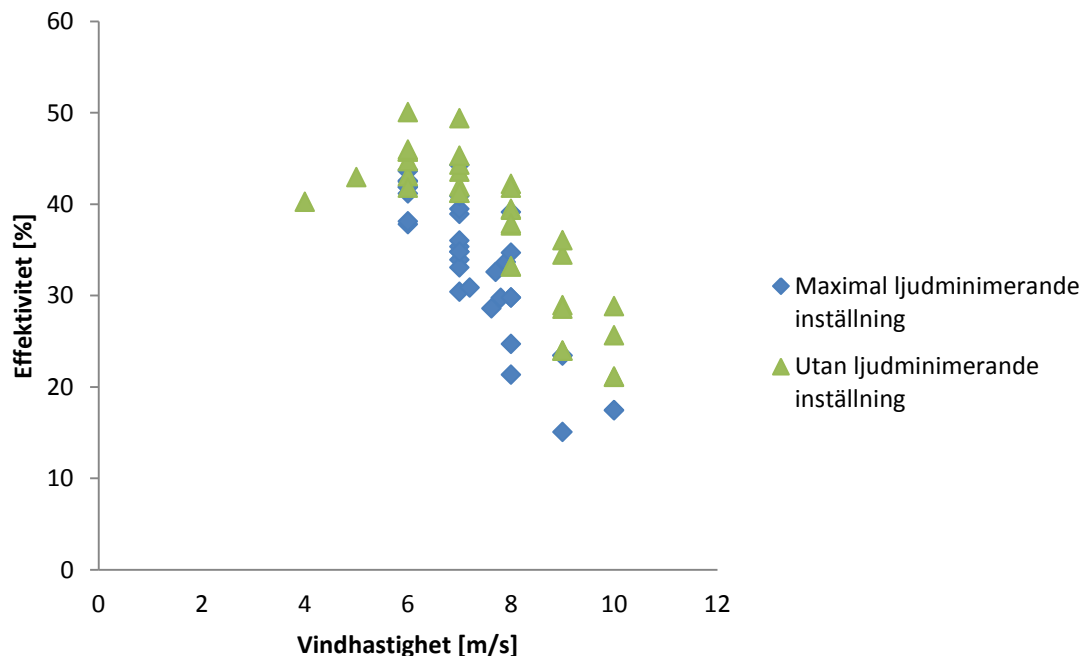
där P_{maximal} är vindens rörelseenergi per sekund [W], \dot{m} är massflödet [kg/s], A är arean av en cirkelformad skiva med rotorbladets längd som radie, v_0 är vindhastigheten uppströms vindkraftverket och ρ är luftens densitet vid 20° C vid 1 atmosfärstryck.

Vindkraftverket kan inte omvandla all denna energi då vinden bromsas upp av verket. Detta leder till en tryckökning framför verket och därmed att en del av vinden kommer att gå vid sidan av rotern. Effektiviteten av ett vindkraftverk kan beräknas som kvoten av den uttagna effekten och vindens rörelseenergi per sekund dvs.

$$C_p = \frac{P_{\text{uttagna}}}{P_{\text{maximal}}} \quad (8)$$

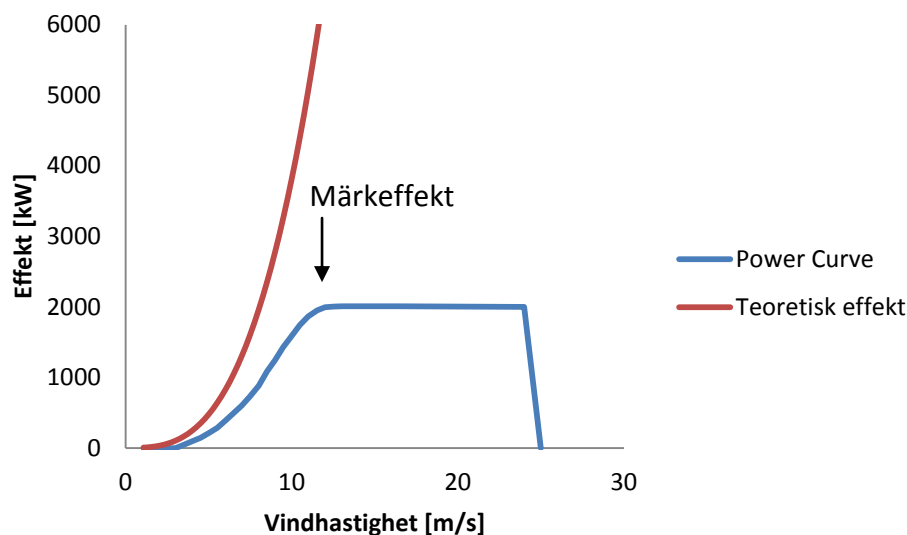
Andelen vind som maximalt flödar genom vindkraftverkets rotorarea, där dess rörelseenergi omvandlas till elektrisk effekt, är bestämd enligt Betz lag till ~59% (Danish Wind Industry, 2003).

Effektiviteten, C_p av några i projektet undersökta verk mot vindhastighet visas i Figur 4.



Figur 5. Vindkraftverks effektivitet (C_p) mot vindhastigheten vid navhöjd, baserad på mätningar från i projektet undersökta vindkraftverk.

Ett vindkraftverk uppnår maximal effekt vid en viss vindhastighet, denna effekt kallas märkeffekt (Wind turbine zone, 2010). När märkeffekten är nådd kommer bladvinkeln och rotorns varvtal regleras så att bland annat risk för skada på verket minimeras, se Figur 5.



Figur 6. Den i vinden teoretiska effekten samt den producerade effekten för ett vindkraftverk med märkeffekt 2 MW mot aktuell vindhastighet.

3.3. Ljudalstring

Ljudemissionen från vindkraftverk delas in i två huvudsakliga grupper, mekanisk och aerodynamisk. Ljudet från mekaniken i verket så som växellåda och generator har huvudsakligen byggts bort i moderna verk. Däremot återstår det aerodynamiska, ofta svischande ljudet, vilket beskrivs som det karaktäristiska ljudet från vindkraftverk.

Då vindhastigheten ökar är det inte bara ljudemissionen från vindkraftverket som möjligtvis ökar utan även det naturliga bruset runt omkring verket. Karaktären på det aerodynamiska ljudet är bredbandigt, inom frekvensområdet 63-4000 Hz (Naturvårdsverket, 2009). Detta spann liknar karaktären av ljudet vinden ger upphov till i vegetation. Vid högre vindhastigheter ökar inte varvtalet då märkeffekt är nådd och det svischande aerodynamiska ljudet kommer då heller inte att öka. Däremot kan bruset runt om vindkraftverket öka och därmed i praktiken dölja eller maskera ljudemissionen från vindkraftverket.

Studier har gjorts för att kunna lokalisera och kvantifiera de största ljudkällorna på ett verk och då specifikt bladet, då det visat sig vara den mest betydande källan (Schepers, 2005). De visar att det mesta av ljudet ofta kommer från de yttre delarna av bladet vid dess nedåtgående rörelse, dock inte spetsen av bladet som ses i Figur 6.



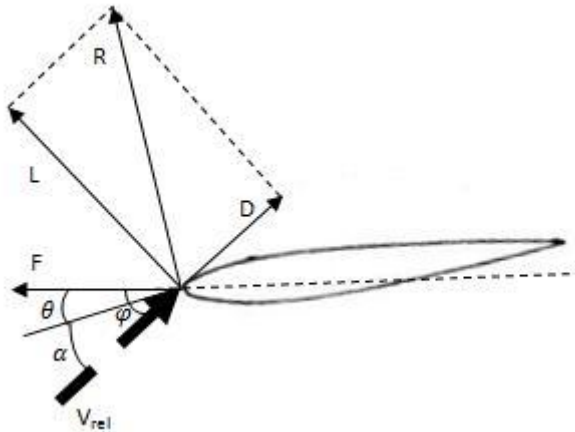
Figur 7. Bild av vindkraftverk med ljudkällorna i rotorplanet projicerade (Schepers, 2005).

3.4. Aerodynamik

Rotorbladens rotation drivs av luftens rörelse eller mer precist av aerodynamiska krafter. Då det inkommande flödet möter bladet med en vinkel relativt vindriktning skapas en tryckskillnad. Denna tryckskillnad ger upphov till två krafter, lyft (L) och dragkraft (D) med resultanten (R). Dragkraften är då parallell med den relativa vinden och vinkelrät mot lyftkraften. Den relativa vinden är den vind bladet uppfattar med angreppsvinkeln α enligt Figur 7. Den vinkel bladet har relativt rotornavet, θ , regleras vid bladvinkelreglering, se ekvation (9).

$$\varphi = \alpha + \theta \quad (9)$$

där α är angreppsvinkeln, φ är inflödesvinkel och θ är den aktuella bladvinkeln.



Figur 8. Tvärsnitt av ett rotorblad med krafter markerade samt inflödesvinkel för flödet(φ).

Angreppsvinkeln (α) bestämmer i viss mån tjockleken på gränsskiktet kring bladet. En ökning av α resulterar i en ökning av lyftkraften. När vinkeln når den kritiska angreppsvinkeln kommer lyftkraften inte längre öka utan minska. Detta kallas att bladet överstegras och användes ofta av äldre verk för att vid höga vindhastigheter undvika skador på verket med hjälp av överstegringsreglering. Nyare verk reglerar både varvtal och bladvinkel.

Aerodynamiken för rotorbladen på ett vindkraftverk liknar på många vis de hos ett flygplan. De är dock i grunden formade för ett annat syfte. Vid formgivningen måste inte bara den relativt låga hastigheten tas i åtanke utan även det faktum att den turbulens som verket i sig ger upphov till kommer påverka framtida prestation. Bladen är även något skruvade för säkerhetens skull. Hastigheten över bladet ökar i radiell riktning, vilket gör att även krafterna som bladsegmentet upplever kommer öka. Genom att se till att krafterna på bladet är jämt fördelade minskar risken att brott längs med bladet kommer inträffa.

3.5. Ljudkällor på bladet

Det aerodynamiska ljudet beror på luftens interaktion med bladet, det vill säga luftens strömning i och kring bladets gränsskikt. Luftflödets beteende över vingen beror dels på turbulensen i den inkommande luften men framförallt beror beteendet på bladets form och bladets vinkel vid kontakt.

Reynolds tal kan på ett enkelt vis beskriva strömningens karaktär i bladets gränsskikt.

$$Re = \frac{v_b \cdot B}{\nu} \quad (10)$$

där Re är Reynoldstal, v_b är hastigheten i gränsskiktet, B är längden av bladets kortsida och ν är viskositeten.

Vid höga Reynoldstal kan strömningen anses turbulent. Vid tal under 2300 anses strömningen närma sig laminärt.

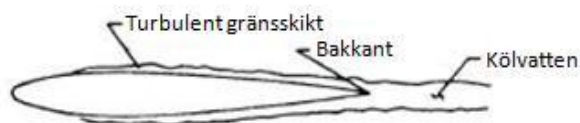
Flödet i gränsskiktet kring bladet kan delas in i 6 olika extremgrupper. Grupperna har var och en sin påverkan på ljudet och inträffar vid olika angreppsvinklar samt på grund av skruvningen vid olika position på bladet.

Laminär strömning uppstår vid låga Reynolds tal dvs. närmare navet på bladet. Detta är endast en källa vid större verk med bredare vingar. Virvlarna behöver tid att bildas, därefter avges de vid kanten där turbulent strömning råder. Denna källa kan resultera i ett särskilt irriterande ljud då den ofta ger rena toner. Denna källa verkar inte vara betydande vid större vindkraftverk (Moriarty, 2003).



Figur 9. Laminär strömning i bladets gränsskikt (efter Brooks, 1989).

Turbulentströmning inträffar vid högre Reynolds tal och är ofta den huvudsakliga källan till ljud. Beroende på det turbulenta gränsskiktets tjocklek kommer ljudemissionen se annorlunda ut. Ljudet uppkommer ur interaktionen mellan avlösning av virvlar från det turbulenta gränsskiktet och den avslutande kanten på bladet (Moriarty, 2003).



Figur 10. Turbulent strömning i bladets gränsskikt (efter Brooks, 1989).

Separationsljud uppstår vid betydande angreppsvinklar då turbulenta strukturer skapas på sugsidan av bladet. Då angreppsvinkeln ökar så ökar även turbulensen i gränsskiktet vilket kan göra att dessa strukturer blir den dominerande orsaken till buller (Brooks, 1989).



Figur 11. Separation av gränsskiktet från ytan (efter Brooks, 1989).

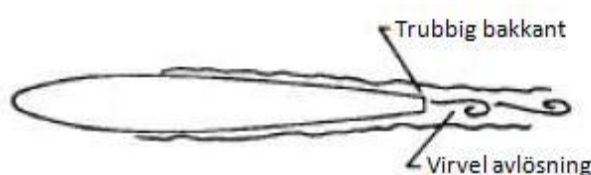
Vid bladets bakkant kommer von Kármán virvlar ta form. Dessa virvlar skapas vid mindre separation av flödet från bladets yta. Hastigheten av flödet intill bladet är avsevärt lägre jämfört med flödet längre ut, flödet längre ut kommer därmed vikas in över bakkanten och en virvel formas. Detta sker från bägge sidor om bladet och dessvärre med viss återkoppling. Frekvensen av virvelavlösningen kan beräknas utgående från dess Strouhals tal och hastigheten i gränsskiktet (Crowe, 2005).

$$St = \frac{f \cdot L}{v_b} \quad (11)$$

där St är Strouhallet, f är virvelavlösningens frekvens, v_b är hastigheten i gränsskiktet och L är längden från framkant till bakkant på bladet.

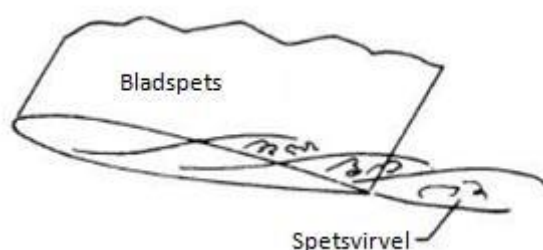
För blad kan Strouhal talet antas vara kring 0,2 (Almgren, personligt meddelande, 2010). Ljudemissionens dominerande frekvenser kan därmed möjligtvis kunna bestämmas av virvlarnas virvelavlösningens frekvens.

Ljudet från *kantvirvelavlösningen* hos bladet har visats bero på bladets tjocklek relativt gränsskiktet. Ifall bladkantens tjocklek är större än gränsskiktet kommer denna källa vara betydande (Moriarty, 2003). Av detta skäl bör bladkanten vara skarp.



Figur 12. Virvelavlösning vid bladets bakkant (efter Brooks, 1989).

Vid bladets spets bör flödet se lite annorlunda ut jämfört med resten av vingen. Här kommer tryckskillnaden mellan över- och undersidorna (sug- och trycksida) av bladet att spå på en formation av virvlar och p.g.a. gränsskiktets storlek kommer flödet få en tre-dimensionell karaktär. Detta innebär att avancerade strömningsdynamiska modeller (CFD) krävs för att med god precision kunna bedöma detta bidrag. Bidraget från denna källa kommer att ha en högfrekvent karaktär (Brooks, 1989).



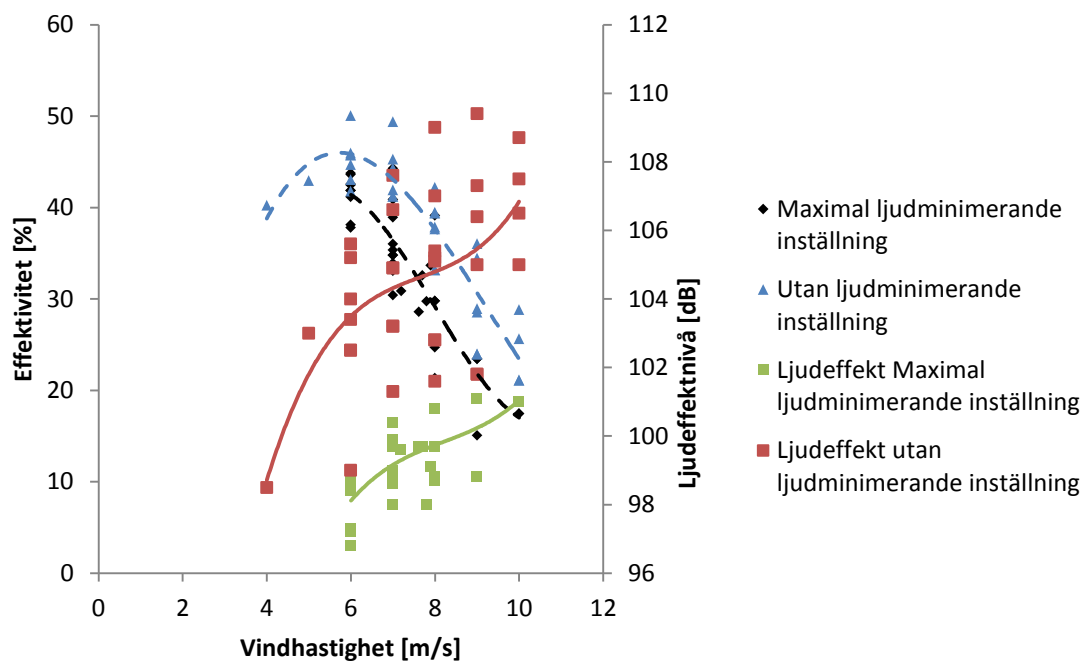
Figur 13. Virvel vid bladspets (efter Brooks, 1989).

Tryckfluktuationer skapas även då turbulent luft flödar in mot bladet och interagerar med bladet. Beroende på storlek av inkommande virvlar jämfört med bladets dimensioner kommer ljudet ha olika karaktär. Större virvlar ger en lägre frekvens på ljudet medan mindre virvlar ger högre frekvens (Amiet, 1985).

3.6. Ljudreducerande inställning

Vid konstruktion av moderna verk har tillverkaren ofta tagit hänsyn till problemet med buller. Det är en konkurrensfördel om man kan konstruera tystare vindkraftverk. Med hjälp av god bladdesign och snabb bladvinkelreglering kan påverkan från ljudkällorna längs med bladet minimeras. Regleringen sker dock med viss förlust i producerad effekt

då lyftkraften inte längre nödvändigtvis maximeras. I Figur 13 ses en polynompassning till de i projektet använda data. Figuren illustrerar förlusten i vindkraftverkets effektivitet vid ljudminimerande inställning samtidigt som ljudemissionen minskar.



Figur 14. Effektiviteten och ljudeffektnivån mot vindhastigheten för olika ljudminimerande inställning.

Denna inställning kan användas vid särskilda tillfällen, t.ex. på kvällen då ljudmiljön anses extra viktig eller då inversion av temperaturskiktningen ger upphov till höga ljudnivåer vid längre avstånd.

3.7. Flöde över bladet

Vindkraftverk regleras med bladvinkelreglering och varvtalsreglering dels för att undvika skada men även för att minska ljudeffekten. Det är med bladvinkeln som verket anpassar sig för att bäst utnyttja den tillgängliga energin i vinden. Ett vindkraftverk börjar producera elektricitet vid vindhastighet kring 3-4 m/s. Ljudemissionen ökar med ökande vindhastighet till dess att det maskeras av det naturliga bruset eller tills kraftverket når sin märkeffekt.

För att maximera den producerade elektriska effekten söks angreppsvinkeln som maximerar lyftkraften. Angreppsvinkeln varierar beroende på position på bladet. Vindhastigheten ger vilken bladvinkel som maximerar den sammanlagda lyftkraften över hela bladet och därmed vilken bladvinkel som maximerar den producerade elektriska effekten.

En stor del av ljudeffekten har även visat sig ha sitt ursprung nära spetsen av bladet vars hastighet varierar linjärt med rotationshastigheten av rotornavet. Ökar längden av

rotorbladet kommer även hastigheten vid spetsen öka. Ifall ljudeffekten beror av hastigheten i gränsskiktet borde även denna öka.

En ljudkälla som beror av hastigheten hos omgivande medium kallas en strömningsljudkälla och karakteriseras efter dess form och beteende enligt tabell 1. En monopol har en rundstrålande punktkälla eller en pulserande sfäryta som ursprung, som t.ex. tryckpulser från ett avgasrör.

Tabell 1. Påverkan av strömningshastigheten över bladen av vindkraftverken (Almgren, personligt meddelande, 2010)

Källtyp	Ljudeffektens(W) beroende av strömningshastigheten(u)	Nivåökning av ljudeffekten vid dubbling av strömningshastigheten	Exempel
Monopol	$W \sim u^4$	12 dB	Tryckpulser från avgasrör
Dipol	$W \sim u^6$	18 dB	Tryckpulser från flygplansvinge
Kvadrupol	$W \sim u^8$	24 dB	jetstråle

4. Använda mätdata

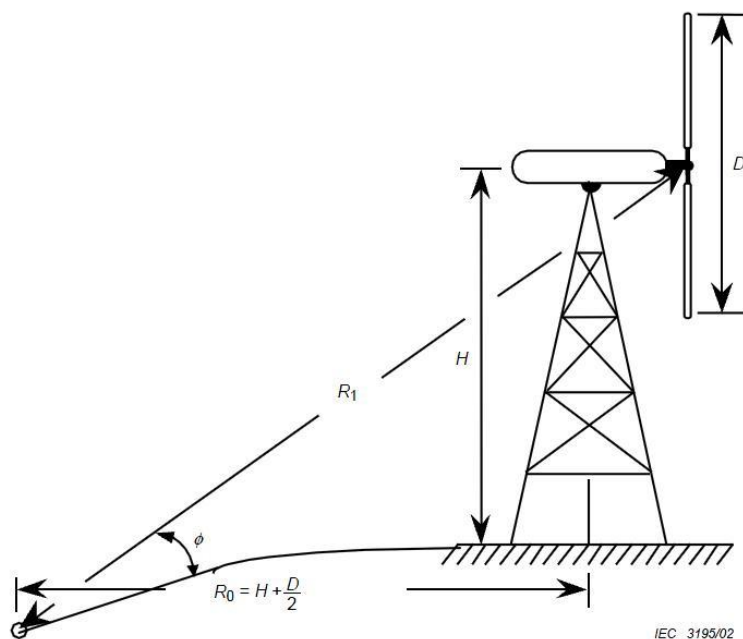
Data i denna studie har tagits fram i enlighet med den allmänt vedertagna internationella standarden (IEC, 2006) för mätning av ljudemission kring vindkraftverk. Mätningar har gjorts av ett flertal oberoende parter, där undersökning innehåller bland annat mätning av ljudtrycksnivå vid standardiserat avstånd samt tersbandsanalys.

Mätningar av ljudemission gjordes för 17 moderna vindkraftverk, sammanfattat till 132 mätningar av ljudeffektnivå vid diskretiserade vindhastigheter. I en mindre del av mätningarna fanns även värden på rotationshastigheten samt bladvinkel för rotorn vid aktuell vindhastighet att tillgå. Ljudemissionsmätningar gjordes både med och utan ljudminimerande inställning då det var möjligt.

Rapporter med bestämning av ljudeffektnivå är ofta konfidentiell information från leverantörer av vindkraftverk och refereras eller återges därför inte här.

4.1 Mätupställning

Ljudtrycksnivån mäts med en mikrofon ovanpå en hård yta omgiven av ett vindskydd. Mätupställningen ställs vid ett standardiserat avstånd från tornets bas på nedströmssidan av tornet. Avståndet till verkets mitt är lika med verkets navhöjd plus rotorradie enligt Figur 14.



Figur 15. Mätupställning för mätning av ljudeffektsnivå från ett vindkraftverk (IEC, 2006).

Tidsperioder då betydande intermitternt bakgrundsljud förekommer, t.ex. då flygplan och bilar som passerar eller när det regnar, markeras under mätning och tas bort vid sammanställning av mätning.

Mikrofonen konverterar ljudtrycket till en kontinuerlig analog signal. Denna signal matas in i en ljudtrycksnivåmätare som ger ifrån sig ett effektivvärde av

ljudtrycksnivån. Effektivvärdet (rms-värdet) bestäms ofta med tidskonstanten ”FAST”, som motsvarar en integreringstid på 125 ms. Även det A-viktade medelvärde för ljudtrycksnivån över den använda integrationstiden L_{Aeq} , kan oftast fås ut i samband med mätning. Parallellt med denna mätning sparas även producerad effekt samt i vissa fall aktuell rotationshastighet och bladvinkel medelvärdesbildat under samma tid som vid ekvivalentnivåbestämningen.

Alla mätningar görs normalt med tidsintervall från 1 till 10 min.

4.2 Korrigering

Mätvärdet korrigeras för bakgrundsljudet vilket ger det korrigerade mätvärdet, $L_{Aeq,c}$, det vill säga endast turbinens ljudemission. Bakgrundsljudet mäts då turbinen står stilla och påverkar ljudnivån minimalt. Konvertering av ljudtrycksnivåerna ($L_{Aeq,c}$) till ljudeffektnivåer (L_{WA}) sker sedan, där hänsyn tas till omgivningen kring mikrofonen och avståndet till navet på verket.

4.3 Vindkraftverkets ljudeffekt

I fallet vindkraftverk används ekvation (12) för att beräkna ljudeffektnivå utifrån ljudtrycksnivån där hänsyn tas till avståndet till objektet vid mätning.

$$L_{WA} = L_{Aeq,c} - 6 + 10 \cdot \log\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot R_l^2}{S_0}\right) \quad (12)$$

där 6 dB är en korrektionsfaktor för den hårda skiva som mikrofonen sitter på vilken ger en dubbling av ljudtrycket från interferensen mellan infallande och reflekterad ljudvåg. Den senare termen beskriver korrektionen med avseende på referensytan S_0 som är 1 m^2 .

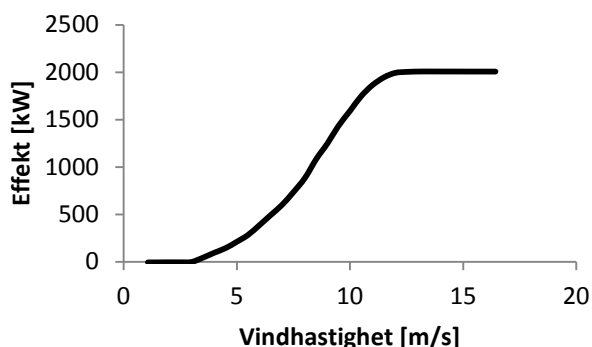
Avståndet R_l beräknas ur sambandet

$$R_l = \sqrt{(R_0 + d)^2 + (H - h_A)^2} \quad (13)$$

där R_0 är avståndet mellan mitten av torn och mikrofon, d är avståndet mellan mitten av torn och rotorfäste, H är rotorfästets höjd över marken och h_A höjden av mikrofon, se Figur 14.

4.4 Vinddata

Vinddata kring ett vindkraftverk tas fram på olika vis. Den producerade elektriska effekten och vindhastigheten vid navhöjd relateras med en effektkurva. Ett exempel på en sådan effektkurva ses i Figur 15. Ifall relationen mellan vind och effekt saknas används anemometrar i navhöjd och som sista alternativ används data från markbaserade mätmaster vid höjden 10 m uppströms verket (IEC, 2006).



Figur 16. Effektkurva för vindkraftverk med en märkeffekt på 2 [MW].

En logaritmisk vindprofil antas för att relatera vindhastigheten vid 10 m höjd, den meteorologiska referenshöjden, till den vid navhöjd (IEC, 2006) med ekvation (14).

$$V_{10m\ Höjd} = V_{Nav} \cdot \frac{\ln(10m/z_{0ref}) \cdot \ln(Navhöjd/z_0)}{\ln(Navhöjd/z_{0ref}) \cdot \ln(z/z_{0ref})} \quad (14)$$

där $V_{10m\ Höjd}$ är vindhastigheten vid 10 m höjd och V_{Nav} är vindhastigheten vid navhöjd, z_{0ref} är referensvärde för markens råhetslängd vilket valts till 0,05 (IEC, 2006) och z är höjden av anemometern.

Markens råhetslängd, z_0 beräknas antingen från mätningar av vindhastigheten vid olika höjder eller också uppskattas råhetslängden från Tabell 2.

Tabell 2. Tabell över referens värden för markensråhetslängd (IEC, 2006).

Typ av terräng	Råhetslängd, z_0
Öppet vatten, snö och sand ytor	0,0001 m
Öppet platt landskap, klippt gräs	0,01 m
Jordbruksmark med viss vegetation	0,05 m
Stad, skog mycket kuperat landskap	0,3 m

Trycket samt temperaturen kan spela roll vid ljudalstring samt utbredning. Både den producerade effekten och vindhastigheten konverteras till en standardatmosfär samt till standardtemperaturen 15° C för vart mättilfälle med ekvationer (15) och (16).

$$P_{normal} = P_{Mät} \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}} \right) \frac{p_{ref}}{p} \quad (15)$$

$$V_{normal} = V_{Mät} \cdot \left(\frac{p_{ref} \cdot T}{p \cdot T_{ref}} \right)^{1/3} \quad (16)$$

där P_{normal} är den normaliserade effekten då $P_{Mät}$ är den uppmätta effekten. V_{normal} är den normaliserade vindhastigheten då $V_{Mät}$ är den uppmätta vindhastigheten. T är temperaturen i Kelvin med referens temperaturen, $T_{ref} = 288$. p är det aktuella atmosfärstrycket med referenstrycket, $p_{ref} = 101,3\ kPa$

4.5 Osäkerhet

Mätningen av ljudtrycksnivån innehåller en viss osäkerhet skapad av varierade meteorologiska parametrar, omgivningen vid mätning samt använda mätinstrument.

Osäkerheten delas in i två grupper A och B. I grupp A finns de mätfel som har en bestämd statistisk fördelning så som mätfel från mätinstrumenten. I grupp B finns osäkerheten som evalueras utgående från erfarenhet samt annan information, så som beskrivning av omgivningen vid mättillfället. Osäkerheten för de olika komponenterna presenteras som standardavvikelse och kombineras sedan för att ge ett uttryck för den kombinerade standardosäkerheten av värdet i fråga. Nedanstående osäkerhetsanalys bygger på den vedertagna standarden för bedömning av osäkerhet vid mätning av ljudemission från vindkraftverk (IEC, 2006).

Exempel på påverkan från omgivningen på ljudtrycksmätning är mikrofonens placering relativt vindkraftverket. Vid kuperad terräng kan mätinstrumentet vara mer eller mindre skyddat vilket bör tas i hänsyn. Ifall marken är ojämn eller sluttande finns även risken att den antagna interferensen för mätskivan blir inkorrekt.

Den använda akustiska mätutrustningen har sin egen osäkerhet. Denna osäkerhet beror av kalibreringen av utrustning till aktuella förhållanden vid mättillfälle. Vid mättillfället varierar bl.a. de meteorologiska förhållanden som temperatur och luftfuktighet. Osäkerhet i vind- och turbulensmätning samt andra meteorologiska förhållanden kan även de störa och därmed öka osäkerheten. Gjorda vindmätningar beror i sin tur av kalibreringen till den använda effektkurvan, samt osäkerheten hos de använda anemometrarna.

Vid var mätning av ljudtrycksnivån görs en polynomregression för insamlade mätdata. Polynomet används sedan för att skatta ljudtrycksnivån vid vindhastigheterna. Detta görs för att behålla noggrannheten vid minimering av data (IEC, 2006). Osäkerheten som resulterar ur approximationen tillhör grupp A, där standardavvikelsen skattas enligt (17).

$$U_A = \sqrt{\frac{\sum(y - y_{skattad})^2}{N-2}} \quad (17)$$

där y är den uppmätta ljudtrycksnivån och $y_{skattad}$ är den genom regression skattade ljudtrycksnivån vid vald vindhastighet. N är antalet mätningar inkluderade i regressionsanalysen.

För alla osäkerheter i grupp B antas en geometrisk fördelning av möjliga värden och beräknas för vart och ett individuellt med ett spann av $\pm a$.

$$U_B = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (18)$$

Då standardavvikelsen för var källa har bestämts kombineras dessa till en kombinerad standardosäkerhet för mätvärdet.

$$U = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (19)$$

Denna osäkerhet presenteras för vart ljudtrycksvärde. Den sammanlagda osäkerheten för ett värde är aldrig högre än 1,5 dB för i detta projekt använda värden.

5 Modellering

Då man vill undersöka en process och det tänkta experimentet anses oekonomiskt eller svår genomförbart kan en modell vara till hjälp. Beroende på kunskapen om systemet i fråga kan modellen använda sig av kända fysikaliska lagar. Uppmätta data för processen används för att uppskatta en del av modellen som inte kan förklaras med fysikaliska lagar, denna typ av modell kallas semi-empirisk.

I detta fall söks en modell som vid specifika värden på konstruktionen av vindkraftverket och situation ger en prediktion av ljudeffektsnivån. Systemet beskrivs av en statisk modell, alltså oberoende tidigare mätvärden i serien.

$$\hat{y}(t) = g(u) \quad (20)$$

$\hat{y}(t)$ är den predikterade utsignalen från modellen g och u är insignalen till modellen.

Estimering av en modell sker i tre övergripande steg som upprepas med varierande premisser tills dess att acceptabelt resultat uppnåtts. Detta sker oavsett modelleringsmetod då vissa steg och antaganden är gemensamma.

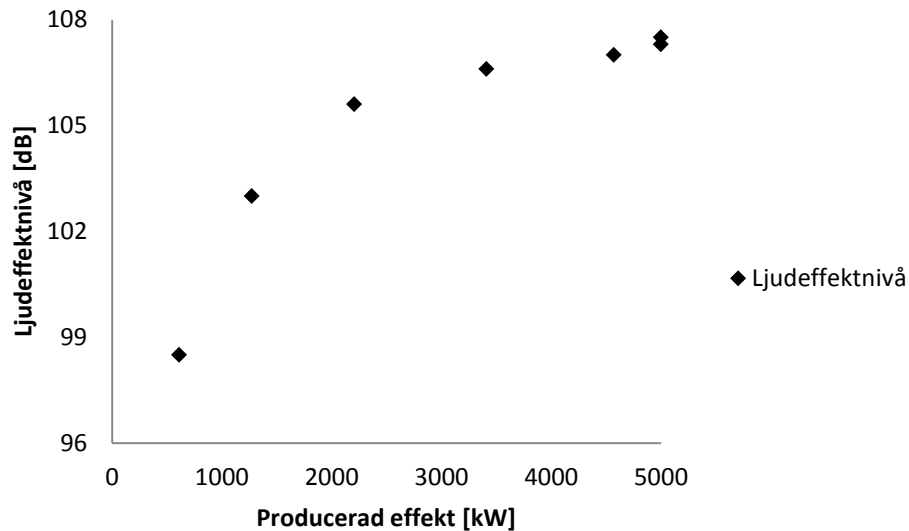
1. Val av modell
2. Parameterestimering
3. Modellvalidering

Det första steget innefattar en omfattande studie av systemet för att kartlägga vilka antaganden som kan göras om systemet samt vilken form av modell som bör användas. Med vald modell samt möjlig ytterlig information om systemet väljs en lämplig estimeringsmetod. Den resulterande modellen skall sedan studeras och valideras. Det kan här visa sig att de antaganden som gjorts inte stämmer och måste kompletteras. Ifall modellen underkänns i valideringssteget upprepas proceduren med ett annat val av modell.

5.1 Val av funktion

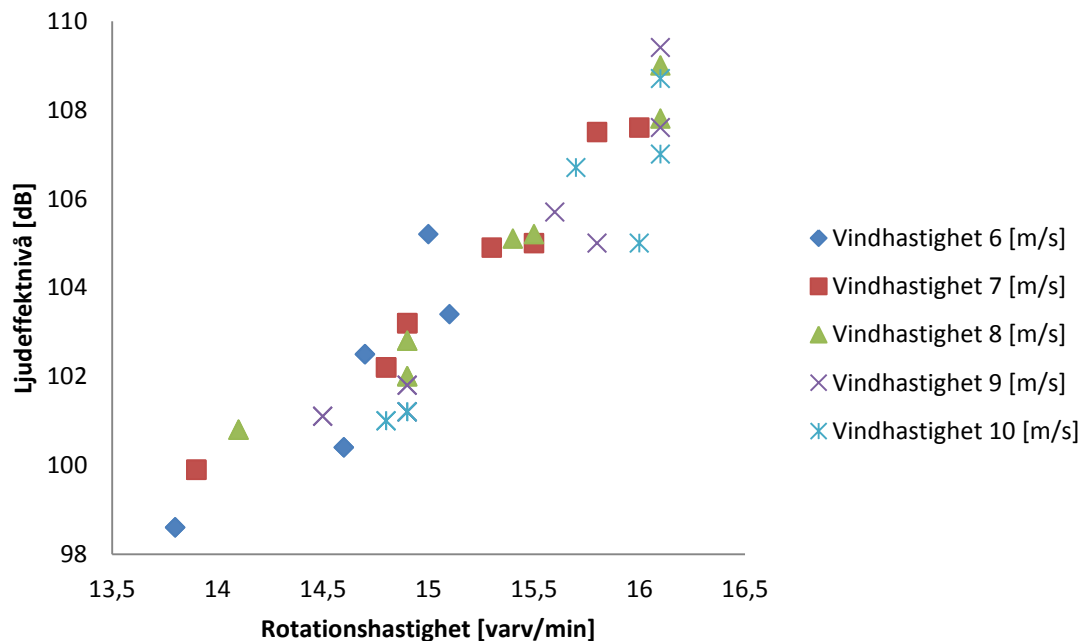
Verk som konstruerats för hög effektproduktion kommer ha en högre navhöjd och större rotordiameter än de som konstruerats för låg effektproduktion. Navhöjd och rotordiameter är därmed korrelerade vid maximal ljudminimerande inställning, se Bilaga 3.

Då vindhastigheten ökar kommer även ljudeffektivnivån och den producerade effekten att öka. Detta sker upp till en viss vindhastighet. Därefter minskar ökningen av ljudemission per hastighetsenhet och kurvan planar ut. Utseendet indikerar ett olinjärt samband mellan den producerade effekten och ljudeffektnivån vilket ses i Figur 16.



Figur 17. Mätvärden av ljudeffektnivå mot den producerade elektriska effekten för ett vindkraftverk.

Ljudeffektnivån är klart beroende av rotationshastigheten som visas i Figur 17. Den aktuella rotationshastigheten avspeglar den momentant producerade elektriska effekten enligt det aktuella verkets effektkurva.



Figur 18. Mätvärden av ljudeffektnivå mot rotationshastigheten med vindhastigheten vid 10 m höjd markerad.

5.2 Flöde kring vindkraftverket

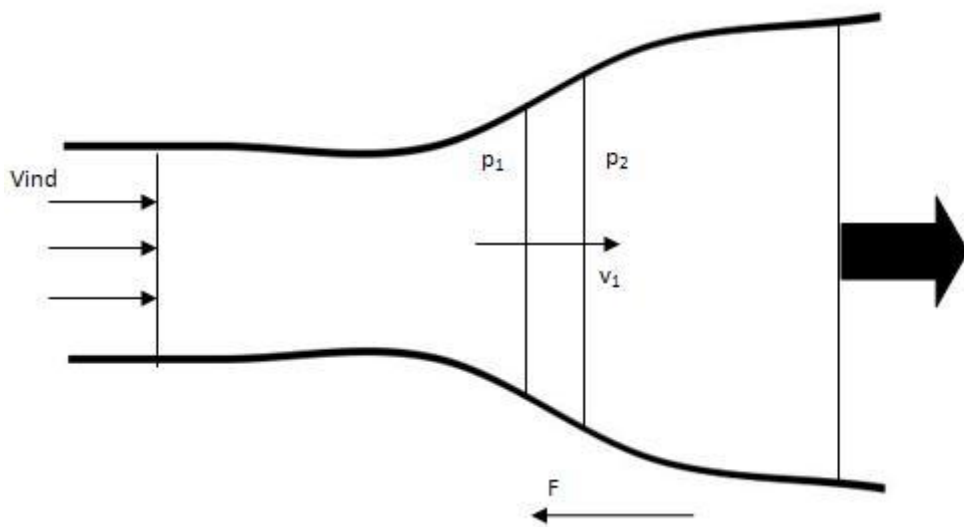
Ljudeffekten är i sin fysikaliska mening en funktion av flödet. Flödet kring vindkraftverket ska därför undersökas och utvärderas med avseende på ljudemission. Existerar det ett samband mellan tryckskillnaderna kring vindkraftverket och

ljudeffekten? Hypotesen att ljudeffektnivån kan relateras till flödet över vindkraftverket testas sedan i nästa avsnitt.

Vindkraftverkets rotor har som huvudsaklig funktion att omvandla vindens rörelseenergi till mekanisk energi som sedan förs vidare till turbinen. För att enklare beskriva huvuddragen hos flödet kring och över rotorn görs vissa antaganden.

1. Idealt flöde över och kring vindkraftverket - Ingen friktion.
2. Ingen rotationshastighet efter rotorn - Ingen turbulens.
3. Rotorn approximeras med en ideal skiva.

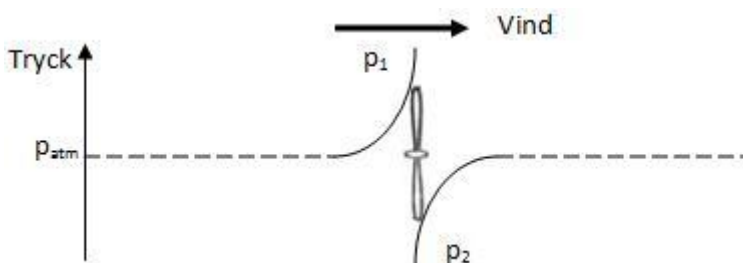
Flödet över vindkraftverket kan sedan beskrivas enligt Figur 18.



Figur 19. Schematisk figur över flödet genom en rotorskiva samt tryckförändringen över rotorn.

Vindkraftverket retarderar vindens hastighet från v_0 långt uppströms till v_2 nedströms, där v_1 är hastigheten genom rotorn.

Trycket ökar precis innan rotorn för att sedan minska kraftigt efter rotorn. Denna ökning av tryck begränsar den möjligt uttagbara effekten genom att den avvisar en del av luften så att denna istället går runt verket.



Figur 20. Schematisk bild över tryckskillnaden över vindkraftverkets rotorarea.

Pga. denna avvisande effekt kommer luften som passerar genom rotorn att ha en lägre hastighet än den faktiska vinden. Förhållandet mellan dessa vindhastigheter definieras i enlighet med Figur 15 som (21).

$$a = \frac{v_0 - v_1}{v_0} \quad (21)$$

Kraften som uppkommer då vindens hastighet retarderas över rotorn från inkommande vind långt uppströms till vindhastigheten långt nedströms kan definieras enligt:

$$F = \Delta p \cdot A \quad (22)$$

där A är diskens area och Δp är tryckskillnaden framför rotorn.

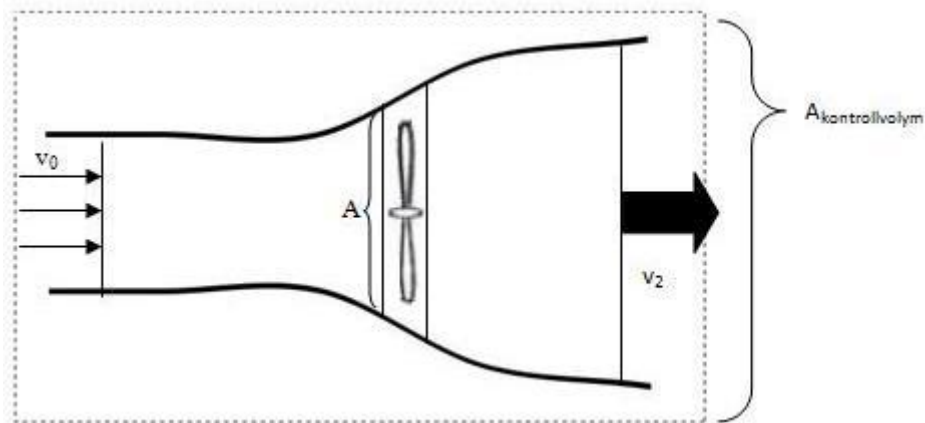
Då flödet är stabilt, friktionsfritt och inkompressibelt kan Bernoullis ekvation tillämpas före och efter rotorn för att få ett uttryck för tryckskillnaden.

$$p_0 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_0^2 = p + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 \quad (23)$$

$$(p - \Delta p) + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 = p_0 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 \quad (24)$$

$$\Delta p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (v_0^2 - v_2^2) \quad (25)$$

där Δp är tryckfallet direkt efter rotorn skapas av strömningshastigheten genom rotorn [Pa]. v_0 är hastigheten av inkommande vind, v_1 är vindens hastighet genom rotorn, v_2 är vindhastigheten långt nedströms rotorn och p_0 är det statiska atmosfärstrycket.



Figur 21. Flöde kring verket med kontrollvolym A markerad som streckad.

Newtons andra lag ger rörelsemängden i x- riktningen med kontrollvolym A i enlighet med Figur 19 som:

$$\sum F = \frac{dp}{dt} \quad (26)$$

$$F_{externa} + F_{tryck} = m \cdot \frac{dv}{dt} + v \cdot \frac{dm}{dt} = \frac{1}{dt} \iiint \rho \cdot v_1 \cdot dV + \iint \rho \cdot v_1 \cdot V \cdot dA \quad (27)$$

där p är rörelsemängden, m är massan.

$$\frac{1}{dt} \iiint \rho \cdot v_1 \cdot dV = 0 \text{ Då flödet antas vara idealt.} \quad (28)$$

$$F_{tryck} = 0 \text{ Då atmosfärstryck och samma sidarea.} \quad (29)$$

Därmed kan uttrycket förenklas till:

$$\iint \rho \cdot v_1 \cdot V \cdot dA = F_{externa} \quad (30)$$

$$\rho \cdot v_1^2 \cdot A_1 + \rho \cdot v_0^2 \cdot (A_{kontrollvolym} - A_1) + \dot{m} \cdot v_0 - \rho \cdot v_0 \cdot A_{kontrollvolym} = -F \quad (31)$$

där \dot{m} är massutbytet till och från kontrollvolymen per tidsenhet.

Lagen om konstant massa ger för flödet i kontrollvolymen att:

$$\rho \cdot A_1 \cdot v_1 + \rho \cdot v_0 \cdot (A_{kontrollvolym} - A_1) + \dot{m} = \rho \cdot A_{kontrollvolym} \cdot v_0 \quad (32)$$

$$\rightarrow \dot{m} = \rho \cdot A \cdot (v_0 - v_1) \quad (33)$$

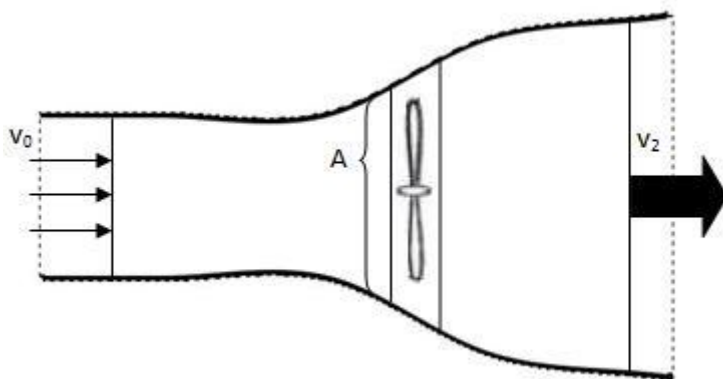
Därmed fås med hjälp av ekvation (22) och (25) ett uttryck för kraften som verkar på vinden:

$$F = \rho \cdot v_1 \cdot A(v_0 - v_2) = \dot{m}(v_0 - v_2) \quad (34)$$

Ifall ekvation (34) slås samman med uttrycken för tryckskillnaden fås ett uttryck för vindhastigheten bakom rotorn v_1 .

$$\rightarrow v_1 = \frac{1}{2} \cdot (v_0 + v_2) \quad (35)$$

Alltså är hastigheten över rotorn medelhastigheten av vindhastigheten långt uppströms respektive nedströms rotorn.



Figur 22. Flöde kring verk med kontrollvolym B markerad som streckad.

Kontrollvolym B har definierats enligt Figur 20, denna används även för att på så vis eliminera massflödet som sker i kontrollvolym A. Newtons andra lag används även här för att ta fram relationen mellan vinden och den motriktade kraften.

$$F = \rho \cdot v_1 \cdot A \cdot (v_0 - v_2) + F_{tryck} \quad (36)$$

Ur ekvation (34) kan slutas att de yttre tryckkrafterna, $F_{tryck} = 0$

Då flödet är friktionslöst kan antagandet göras att det inte finns någon förlust i inre energi. Energiekvationen ger utvunnen energi:

$$E = \frac{mv_0^2}{2} + p_0V - \frac{mv_2^2}{2} - p_0V \quad (37)$$

där E är energin, m är massa, v är hastigheten, p_0 är atmosfärstrycket och V är volymen.

Därmed kan den möjliga effekten beräknas som:

$$P = \dot{m} \cdot \left(\frac{v_0^2}{2} - \frac{v_2^2}{2} \right) = \rho \cdot v_1 \cdot A \cdot \left(\frac{v_0^2}{2} - \frac{v_2^2}{2} \right) \quad (38)$$

där \dot{m} är massa per tidsenhet och ρ är luftens densitet.

Effekten kan nu med hjälp av (25) och (38) uttryckas som en funktion av tryckskillnaden:

$$P = v_1 \cdot A \cdot \Delta p \quad (39)$$

Tryckskillnaden över rotern uttrycks därmed med kännedom om endast effekten och rotordiametern.

$$\Delta p = \left(\frac{P}{A} \right) \cdot \frac{1}{v_1} \quad (40)$$

$$\Delta p = \left(\frac{P_e}{\mu \cdot A} \right) \cdot \frac{1}{v_1} = \left(\frac{P_e}{\mu \cdot A} \right) \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x}$$

där P_e är den producerade elektriska effekten, μ är turbinens effektivitet, A är rotordiskens area och v_1 är vindens hastighet genom rotordiskens area.

Tryckskillnaden kan även uttryckas med avseende på förhållanden i tangential riktning dvs. som funktion av systemets rotationshastighet:

Energiekvationen i tangential riktning då tryckkrafterna är lika med noll ger:

$$E_{rot} = \frac{I \cdot \omega^2}{2} \quad (41)$$

Tröghetsmomentet för en ideal disk är:

$$I = \frac{m \cdot r^2}{2} \quad (42)$$

vilket ger att energin per sekund för rotationen av rotorn är

$$P = I \cdot \omega = \frac{m \cdot r^2 \cdot \omega}{2} = \frac{\rho \cdot \pi \cdot r^4 \cdot \omega}{2} \cdot v_1 \quad (43)$$

Därmed kan tryckskillnaden över rotorn uttryckas med hjälp av (40) och (43) endast med rotationshastigheten och rotordiametern samt luftens densitet.

$$\Delta p = \left(\frac{P}{A}\right) \cdot \frac{1}{v_1} = \frac{\rho}{2} \cdot r^2 \cdot \omega \quad (44)$$

De två uttrycken (40) och (44) som beskriver den tryckskillnad vindkraftverkets rotorarea ger upphov till vid strömningshastigheten v_1 relateras sedan till ljudeffektnivån. Hur ljudeffekten är relaterad till tryckskillnaden över rotorarean skall sedan modelleras.

Sambanden transformeras med logaritmen. Det är då ljudeffekten och inte ljudeffektnivån som beskrivs av relationen. Då rotordisken antas oändligt tunn kan ljudeffekten momentant uttryckas

$$P = \beta_1 \cdot \log(\Delta p) + \beta_2$$

där P är ljudeffekten, β_i är okända parametrar och Δp är tryckskillnaden över vindkraftverkets rotorarea.

Uttryck (40) blir då enligt ovan:

$$y = \beta_1 \cdot \log_e(P_e) + \beta_2 \cdot \log_e(r^2) + \beta_3 \cdot \log\left(\frac{1}{\mu \cdot \pi}\right) \quad (52)$$

där r är rotordiskens radie [m], β_i är de skattade koefficienterna.

Uttryck (44) blir

$$P = \beta_1 \cdot \log(r^2 \cdot \omega) + \beta_2 \cdot \log\left(\frac{\rho}{2}\right) \quad (55)$$

där ω är rotationshastigheten av rotorn, r är den approximerade rotordiskens radie och ρ är densiteten för luft vid 20° C samt 1 atmosfärstryck.

5.3 Estimering av parametrar

5.3.1. Teori

Det finns många tillvägagångssätt att estimerar parametrar. Ett verktyg vid analys är att undersöka skillnaden mellan observerade värden (y_i) och modellens uppskattade värden (\hat{y}), dvs. residualerna vilka definieras enligt (48).

$$r_i = y_i - \hat{y}(x_i, \hat{\beta}) \quad (48)$$

Antaganden görs om systemet som underlättar valet av metod. En kontroll av validiteten hos antaganden görs sedan i avsnittet validering.

- De samlade residualerna antas vid estimering ha medelvärde lika med noll.
- Residualerna antas ha samma varians samt vara okorrelerade.

Dessa antagande ger enligt Gauss-Markov att minstakvadratmetoden är den mest lämpliga metoden att använda för att estimerar okända parametrar. Minstakvadratmetoden med Gauss-Newtons algoritm uppskattar okända parametrar genom att iterativt minimera kvadraten av residualerna(Q)

$$Q = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i, \beta)]^2 \quad (45)$$

där y_i är det observerade värdet vid x_i , β de okända parametrarna och Q summan av residualer.

Optimala värden på β fås då derivatan av (45) är noll enligt

$$\frac{dQ}{d\beta} = 2 \cdot \sum r_i \cdot \frac{dr_i}{d\beta} = 0 \quad (46)$$

där r är residualerna.

Med en startgissning av vad de okända parametrarna skulle kunna vara hittas sedan iterativt den bästa lösningen. Detta innebär i praktiken att normalen till residualerna skall vara vinkelrät mot insignalerna.

$$x^T (y - \hat{\beta}x) = 0 \quad (47)$$

5.3.2. Validering

Denna del av modelleringsprocessen är förmodligen den viktigaste för att resultatet skall kunna vara en användbar modell, den kommer dock ofta i skymundan och i många fall utreds inte fullständigt.

Vid analys av data bör alltid has i åtanke att ett mätvärde innehåller fel och att detta fel bör kvantifieras och dess påverkan på estimeringen av parametrar minimeras.

Mätt signalvärde = deterministisk signal + slumpmässig störning

Modellens prediktionsfel kan delas in i två huvudkomponenter, bias- och variansfel. Biasfel kan ses som det prediktionsfel som är inbyggt i modellen, modellen kan helt enkelt inte beskriva systemet perfekt även om brusfria data skulle användas vid estimeringen. Variansfelet kan åtgärdas genom att ta ett större stickprov och därigenom låta bruset ge mindre inverkan vid estimeringen (Ljung, 2004).

Då en modell formats och kan beskriva utsignalen för ett system beroende på de angivna insignalerna till systemet bör modellen testas mot värden som inte använts vid estimeringen av modellen. Dessa data kallas valideringsdata och metoden kallas för korsvalidering då en del av det insamlade data reserveras för detta ändamål.

Ifall modellen approximerar systemet korrekt bör residualerna för korsvalideringen vara små med ett slumpmässigt beteende. Om en trend kan ses har modellen med säkerhet missat en del av systemet och bör omkonstrueras. Residualerna testas mot insignalerna samt tänkbara insignaler. Ifall ett beroende upptäcks bör modellen omkonstrueras och denna variabel inkluderas.

En modells generella anpassning till mätvärden som används vid korsvalidering kan uttryckas med modellens förlustfunktion. Denna uttrycker skillnaden mellan den beräknade utsignalen från modellen och den faktiska mätta utsignalen från systemet vägd mot antalet använda mätningar

$$Q_{val} = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i(\theta))^2}{N} \quad (49)$$

där Q_{val} är förlustfunktionen och N är antalet mätningar.

En modell med litet prediktionsfel samt lågt antal skattade parametrar är i regel ett bra val för vidareutveckling. När fler modeller finns kan dessa rankas med Akaike's informationskriterium vilket definieras enligt

$$AIC = 2 \cdot k - N \cdot \ln\left(\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i(\theta))^2}{N}\right)$$

där k är antalet parametrar.

Till skillnad från förlustfunktionen straffar kriteriet ökande antal parametrar. En modell med ett lägre AIC värde jämfört med andra modeller är därmed förmodligen ett bättre val.

6 Resultat och observationer

Relationen mellan tryckökningen framför rotorn och den rörelseenergi vinden överför till rotorn har studerats teoretiskt i tidigare avsnitt. Möjligheten att relatera tryckskillnaden till ljudeffektnivån med semi-empiriska korrektioner studeras genom att skatta okända parametrar för de föreslagna modellerna.

Mätvärden delades upp beroende på ljudminimerandeinställning. Utan ljudminimerande inställning visade sig ljudeffektnivån följa de uppställda relationerna mycket dåligt. Detta förklaras djupare i diskussion.

I den första relationen används den från vindkraftverket producerade elektriska effekten för att beskriva ljudeffekten relativt arean av vindkraftverkets rotor. I den andra relationen används rotationshastigheten relativt arean av vindkraftverkets rotor.

6.1 Estimering

Relation 1:

Då verket använder maximal ljudreducerande inställning fås en skattning av modellen:

$$\hat{y} = 5,1353 \cdot \log(P_e) - 4,5422 \cdot \log(r^2) + 61,568 \quad (53)$$

där P_e är den producerade elektriska effekten [W], r är rotordiskens radie och \hat{y} är den skattade modellen.

För relationen mellan tryckskillnaden och ljudeffekten fås därmed approximativt sambandet:

$$L_W \propto 5 \cdot \log_e\left(\frac{P_e}{r^{1,8}}\right) \rightarrow P = P_{ref} \cdot \sqrt{\frac{P_e}{r^{1,8}}} \quad (54)$$

där L_W är ljudeffektnivån, P är ljudeffekten och P_{ref} är ljudeffektens referensnivå.

Relation 2:

Då verket använder maximal ljudreducerande inställning fås en skattning av modellen

$$\hat{y}_i = 52,26 \cdot \log(r^2 \cdot \omega) - 291,49 \quad (56)$$

För relationen mellan tryckskillnaden och ljudeffekten fås därmed approximativt sambandet:

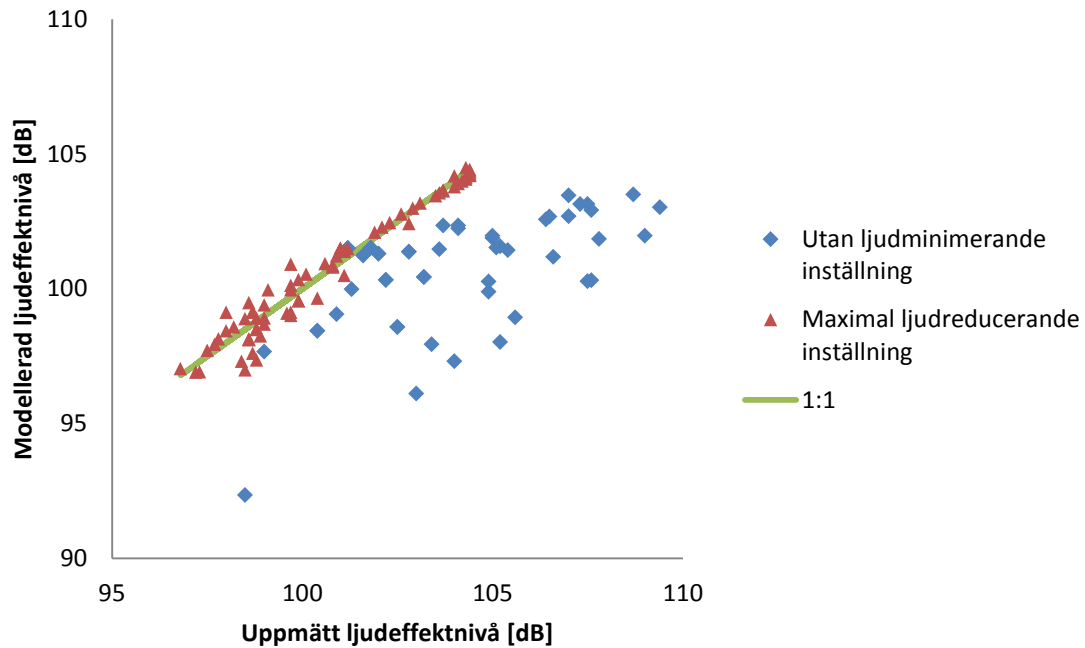
$$L_W \propto 50 \cdot \log_e(r^2 \cdot \omega) \rightarrow P \propto P_{ref} \cdot (r^2 \cdot \omega)^5$$

6.2 Validering

Korsvalideringen skedde med avseende på såväl varierande vindhastigheter som varierande verk och tillverkare. Modellerna beskriver korsvalideringsdata väl, dock med en trend i residualerna. Denna trend relateras till vindhastigheten alternativt attribueras

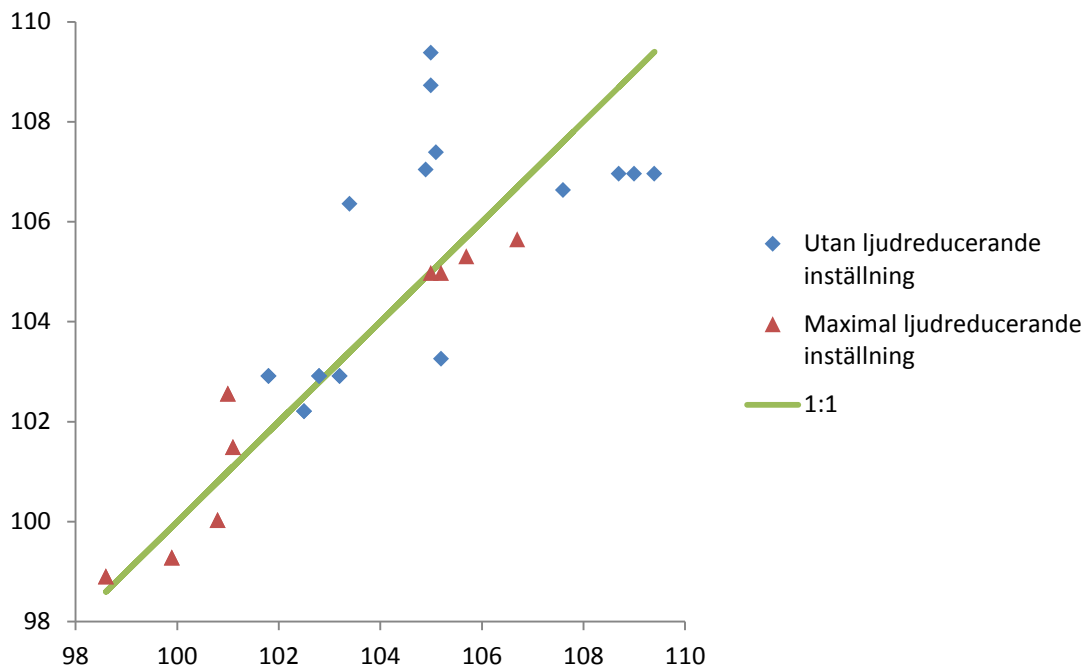
till osäkerheten i mätningarna. Det likartade beteendet skulle kunna bero på att samma värden har använts i båda estimeringarna. En annan möjlighet är att vindhastigheten faktiskt spelar en betydande roll. Relationen mellan tryckökningen och ljudeffekten visar sig vara stark och kan beskrivas väl.

Relation 1 beskriver den verkliga ljudeffekten vid maximal ljudreducerande inställning väl, vilket ses i Figur 16. Utan ljudreducerande inställning stämmer modellen dåligt.



Figur 23. Uppmätt ljudeffektnivå mot modellerad ljudeffektnivå med relation 1 för alla använda data.

Relation 2 beskriver i likhet med relation 1 den verkliga ljudeffekten vid maximal ljudreducerande inställning väl, vilket ses i Figur 17. Utan ljudreducerande inställning stämmer modellen dåligt.



Figur 24. Uppmätt ljudeffektnivå mot modellerad ljudeffektnivå med relation 2 för valideringsdata.

För relation 1 kunde 34 värden användas vid estimering av parametrarna vilket gav att 2 verk, dvs. 15 värden, kunde användas som valideringsdata. För relation 2 kunde 4 vindkraftverk användas vid ljudminimerande inställning. Därmed kunde endast ett verk, dvs. 4 värden, användas för korsvalidering samt 11 värden som estimeringsdata.

Modellerna testades och residualerna plottades och evaluerades, se bilaga 2. Resultatet visar att residualerna är normalfördelade vilket validerar gjort antagande om slumpmässighet, se bilaga 1.

Modellerna beskriver estimeringsdata med goda resultat för förlustfunktionen samt akaikes funktionen vilket redovisas i tabell 3.

Tabell 3. Valideringsdata för testade relationer mellan tryckskillnaden och ljudeffekten.

	Förlustfunktion	AIC
Relation 1	0,103	-28,15
Relation 2	0,42	0,497

Sammanvägt med utförd residualanalys sluts att modellerna approximerar ljudeffektnivån bra vid lägre hastigheter. Vid högre hastigheter verkar ljudeffektnivån minska oberoende rotationshastigheten. Relation 1 klarar dock av att beskriva ljudeffektnivån även vid högre hastigheter.

7. Diskussion

Projektet har utrett möjligheten att ta fram en modell för den akustiska emissionen från ett vindkraftverk. Den härledda modellen baseras på att tryckskillnaden över vindkraftverket kan relateras till ljudeffektnivån. Ljudeffektnivån är i sin tur beroende av rotationshastigheten och rotordiametern hos vindkraftverket. Detta validerar hypotesen att ett första steg för att sänka ljudeffekten från ett vindkraftverk är att sänka rotationshastigheten av rotorn. Ljudeffektnivån beror linjärt av logaritmen av tryckskillnaden och därmed rotationshastigheten av rotorn vid maximal ljudminimerande inställning av ett vindkraftverk. Det kan slutas att tryckskillnaden ger ett betydande bidrag till ljudeffektnivån.

Tryckskillnaden visas i relation 1 vara proportionell mot strömningshastigheten i gränsskiktet över rotorarean. Ifall gränsskiktet tjocklek antas linjärt proportionellt mot tryckskillnaden fås därmed ungefärligt sambandet:

$$P \propto u^5 \quad (57)$$

där u är strömningshastigheten genom rotorn och P är ljudeffekten.

Ljudkällan jämförs med andra ljudemissionskällor beroende av strömningshastighet. Källan skulle kunna beskrivas som ett mellanting mellan en svag monopol och dipol. Det vill säga källan kan kategoriseras som en punktkälla med varierande källposition. Detta validerar antagandet som gjorts vid mätning av ljudeffektnivå, samt stödjer hypotesen om multipla källor, dvs. varierande källor beroende på position utefter bladet.

Vindkraftverken som modellens parametrar estimerades efter är producerade av ett flertal av de idag största tillverkarna. Ljudeffekten för vindkraftverk har definierats och har mätts enligt marknadsstandard. I standarden ingår dock inte att rapportera relevanta rotationshastigheter. Detta försvårade undersökningen av vissa variablers inverkan på ljudeffektnivån. Ifall större stickprov skulle användas vid estimering av parametrarna i framförallt relation 2 skulle variansen i mätvärden ge mindre inverkan.

Källor över bladet

Ljudkällorna över bladet kunde inte modelleras individuellt i detta projekt. Försök att modellera ljudkällorna med semi-empiriska modeller har gjorts tidigare och utvecklas fortfarande dock blir modellerna alltför specialiserade och i många fall oanvändbara. Ljudkällorna beskrivs och bestäms av angreppsvinkeln och kan bestämmas för var individuell bladdesign. Den angreppsvinkel som ger upphov till störst lyftkraft kan även ge upphov till betydande ljudemission. Dessa vinklar undviks därför med en ljudminimerande inställning. Detta går dock inte att kombinera med önskan om maximal produktion av elektrisk effekt.

Modellen approximerar den verkliga ljudeffekten vid maximal ljudminimerande inställning. Vid denna inställning optimeras bladvinkeln med avseende på angreppsvinkel och kravet på maximal elektrisk produktion försummas.

Dimensioner

Strömningshastigheten vid spetsen av bladet ökar vid större rotorradie vilket enligt litteraturstudien ger högre ljudeffektnivå. Större rotordiameter innebär två saker: större moment vid navet samtidigt som hastigheten vid bladspetsen ökar. Resultatet av större konstruktion är ofta bara en mindre ökning av elektrisk effekt, vinsten blir istället en mer stabil elektrisk produktion. Rotationshastigheten kan då tillåtas minska och momentet vid navet öka. Detta ger samma elektriska produktion fast med lägre ljudeffektnivå.

Analys av osäkerheten av den resulterande modellen visar att den kan användas för att prediktera ljudeffektnivån med viss noggrannhet vid maximal ljudminimerande inställning. Modellen kan användas som ett verktyg vid approximation av ljudeffektnivå för planerade respektive byggda större vindkraftverk.

8. Slutsats

Syftet med projektet var att utreda sambandet mellan mätbara variabler och ljudeffektnivån samt utreda möjligheten att beskriva ljudeffektnivån från ett vindkraftverk med en semi-empirisk modell.

Aerodynamiken kring ett blad på ett vindkraftverk är mycket beroende av infallsvinkel och bladregleringen som utförs för att maximera lyftkraften och därmed den producerade effekten. Bladet är format som en vriden ving för att jämt fördela krafterna över bladet och minimera risk för brott i konstruktionen. Detta gör att flödet över bladet inte bara varierar beroende på aktuell bladvinkel utan flödet kommer även att variera över vingen. Ljudeffekten kommer därmed att ha flera och varierande källor. Utan uppgifter om bladprofilen, ytskrovligheten och kordalängd kunde inte gränsskiktet med säkerhet definieras och därmed heller inte ljudkällorna längs med bladet.

För ljudemissionen från vindkraftverk som använts i studien har följande visats:

- För att prediktera ljudemissionen från ljudkällorna längs bladet behövs omfattande data över bladdesignen.
- För att approximativt prediktera ljudeffekten från ett vindkraftverk behövs endast värden på rotationshastigheten och rotorradien. Dessa ger då den tryckskillnad som uppstår framför rotorn vilken relateras till ljudeffekten för vindkraftverket.

$$P \propto P_{ref} \cdot (r^2 \cdot \omega)^5 \quad (61)$$

där P är ljudeffekten och P_{ref} är ljudeffektens referensnivå, r är rotorbladets längd och ω är rotorns rotationshastighet.

- För att approximativt prediktera ljudeffekten från ett vindkraftverk behövs endast värden på den producerade elektriska effekten och rotorbladets längd.

$$P \propto P_{ref} \cdot \sqrt{\frac{P_e}{r^{1,8}}} \quad (62)$$

där P_e är den av vindkraftverket producerade elektriska effekten.

- Enligt ekvation (62) kommer därför ljudeffekten att minska nästan linjärt mot ökningen av rotorbladets längd om den producerade effekten är densamma.

8.1 Framtida arbete

Ljudkällorna kring bladet på ett vindkraftverk är beroende av många saker men framför allt gränsskiktets tjocklek och strömningen däri. Tjockleken av gränsskiktet definieras av angreppsvinkeln och bladets yta. Beroende av dessa variabler kommer strömningens karaktär variera och vissa källor vara mer framträdande. För att modellera strömningen

krävs data över bladdesignen och bladvinkeln med god noggrannhet. Med hjälp av CFD modellering och data över bladformen skulle angreppsvinkeln och tjockleken av gränsskiktet kunna beräknas över hela bladet och i förlängning hela vindkraftverk. Detta skulle kunna översättas i ett enkelt program för en generell beskrivning av ljudeffekten från vindkraftverk, då bladprofil samt dimensioner är känd.

9. Referenser

9.1 Tryckt material samt material från internet

- Ackerman, S. & Knox, J. (2007). *Meteorology*. Thomson Brooks/Cole.
- Amiet, R. (1975). Acoustic radiation for an airfoil in a turbulent stream. *Sound and Vibration*, vol 41, 407-420.
- Brooks, T., Pope, D. & Marcoloni, M. (1989). *Airfoil self-noise and prediction*. NASA.
- Crowe, C. & Elger, D (2005). *Engineering Fluid Mechanics*. John Wiley & Sons, Inc.
- Danish wind industry association. (den 1 juni 2003). *Power Coefficient*. Hämtat från: <http://www.talentfactory.dk/en/tour/wres/cp.htm> den 10 mars 2010
- ECN: *SIRICO*. (2010). Hämtat från ECN: <http://www.ecn.nl/nl/units/wind/rd-programma/aerodynamica/projects/sirocco/> den 10 februari 2010
- Energimyndigheten. (2007). *Nytt planeringsmål för vindkraften år 2020*. Hämtat från Energimyndigheten: <http://www.energimyndigheten.se> den 4 Dec 2009
- IEC. (2006). *Wind turbine generator systems - Part 11: Acoustic noise measurement techniques*. IEC - International Electrotechnical Commission.
- Ljung, L & Glad, T. (2004). *Modellbygge och simulering*. Studentlitteratur.
- Moriarty, P. & Migliore P. (2003). *Semi-Empirical Aeroacoustic Noise Prediction Code for Wind Turbines*. National Renewable Energy Laboratory.
- Naturvårdsverket. (2010). Hämtat från Webbvägledning om MKB för vindkraftsprojekt: <http://www.naturvardsverket.se/sv/Verksamheter-med-miljopaverkan/Energi/Vindkraft/Webbvagledning-om-MKB-for-vindkraftprojekt/> den 10 mars 2010
- Naturvårdsverket. (2007). Hämtat från Vindens kraft - 15 frågor och svar om vindkraft: <http://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/620-8274-4.pdf> den 20 Dec 2009
- Naturvårdsverket. (2009). *Ljud från vindkraftverk*. Hämtat från Naturvårdsverket <http://www.naturvardsverket.se/> den 20 januari 2010
- Pedersen, E. (2007). *Human response to wind turbine noise - perception, annoyance and moderating factors*. Göteborg: Göteborgs universitet, Sahlgrenska Academy.
- Pedersen, E & Waye K. (2002). *Störningar från vindkraftverk*. Göteborg, Halmstad: Avdelningen för miljömedicin, Göteborgs universitet.
- Schepers, J. & Oerlemans, S. (2005). *SIROCCO: Silent ROTors by aCoustic Optimisation*. Wind Turbine Noise: Perspectives for Control. Berlin.

Svensk Vindenergi. (2009). Handlingsplan. Hämtat från Svensk Vindenergi:
<http://www.svenskvindenergi.org/> den 20 oktober 2009

Vanlanduit, P. (2009). *Colaborations*. Hämtat från Universiteit, Vrije:
<http://mech.vub.ac.be/avrg/collaborations.htm> Dec 2009

Wind Turbine ZONE. (2010). *Wind Turbine ZONE*. Hämtat från Wind Turbine
Glossary: <http://windturbinezone.com/buyers-guide/wind-turbine-glossary> den 10 April
2010

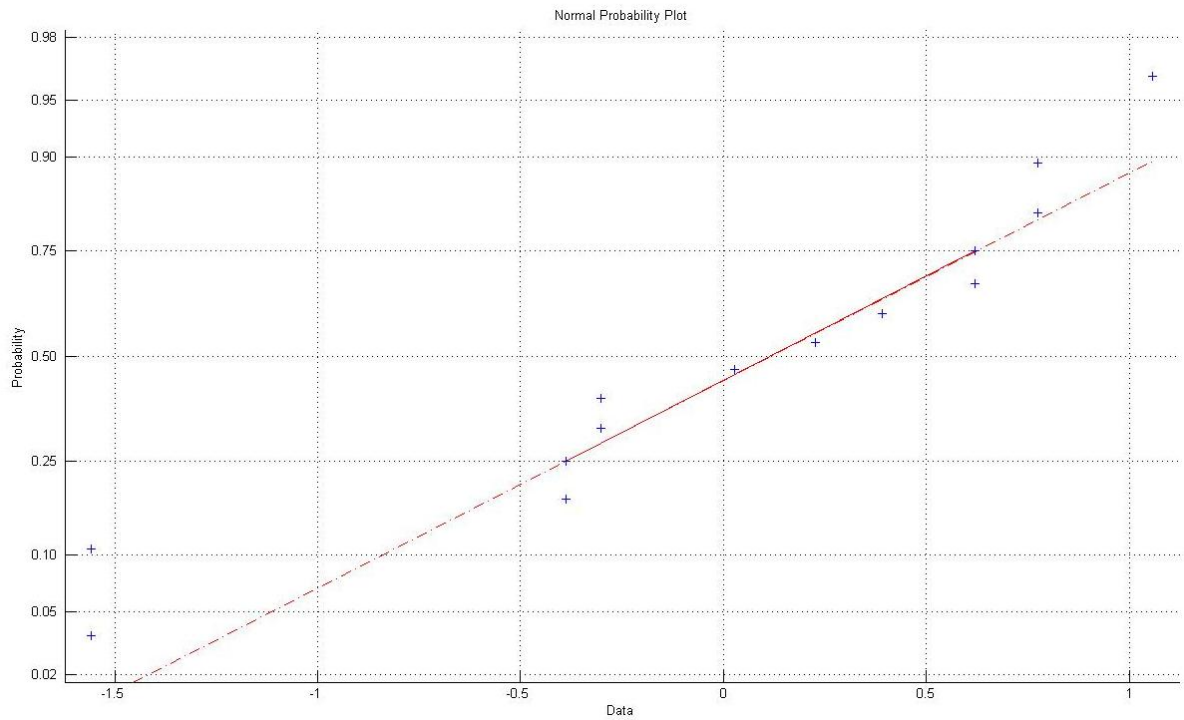
WWEA (2008). *World Wind Energy Report*. Hämtat från World Wind Energy:
http://www.wwindea.org/home/images/stories/worldwindenergyreport2008_s.pdf den
24 November 2009

9.2 Personliga meddelanden

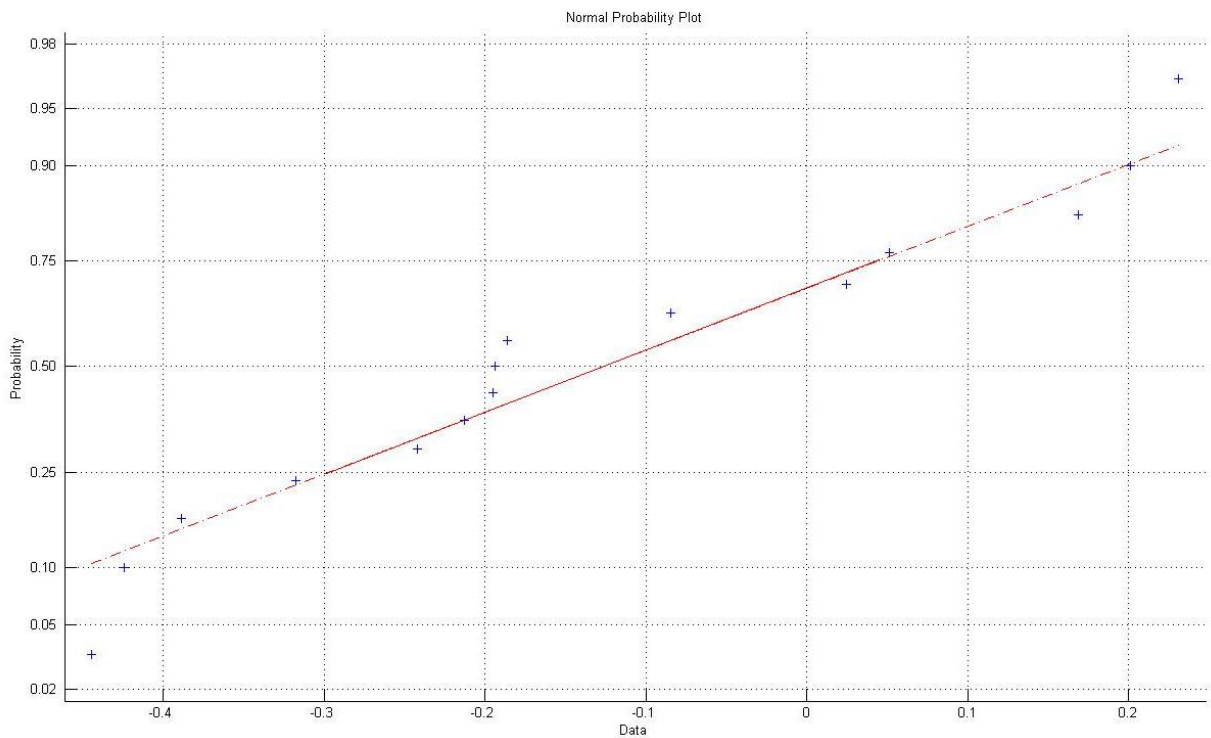
Almgren, Martin, Ljud och vibrations expert vid ÅF-Ingemansson, Göteborg, maj 2010

Appendix

A.1. Normalfördelning av residualerna



Figur A1. Diagram över residualerna för tryckmodellen för ljudeffektsnivå med rotationshastigheten mot den teoretiska normalfördelningen. Ifall residualerna följer linjärt kan de ses som normalfördelade.



Figur A2. Diagram över residualerna för tryckmodellen för ljudeffektsnivå med den producerade effekten mot den teoretiska normalfördelningen. Ifall residualerna följer linjärt kan de ses som normalfördelade.