



**TEKNISKA HÖGSKOLAN**  
**HÖGSKOLAN I JÖNKÖPING**

**Förbättrad analysmetod av bullerimmission  
från vindkraftverk**

**Improved method of analysis of noise immission from wind  
turbines**

John Skog

**EXAMENSARBETE 2015**

Byggnadsteknik

---

Postadress:

Box 1026

551 11 Jönköping

Besöksadress:

Gjuterigatan 5

Telefon:

036-10 10 00 (vx)

Detta examensarbete är utfört vid Tekniska Högskolan i Jönköping inom Byggnadsteknik. Författaren svarar själv för framförda åsikter, slutsatser och resultat.

Examinator: Hamid Movaffaghi

Handledare: Sverker Björklund

Omfattning: 15 hp

Datum: 2015-06-18

## Abstract

**Purpose:** The expansion of wind power in Sweden has increased rapidly and will continue to do so for the foreseeable future. More and more inhabitants will then be exposed to wind turbine noise which in turn leads to a greater challenge in finding suitable locations for the continuing expansion. The often used models for calculation of wind turbine noise, SEPA and Nord2000, has been criticized for not resulting in an estimated value that matches the real noise level.

The purpose of this final report is twofold:

- Increasing knowledge of the flaws in present calculation models by presenting the critique that has been lifted in recent years as well as presenting suggestions for improvement.
- Performing an experiment that examines the possibility of analyzing recordings of immission levels with an algorithm in order to obtain a result that better coincides with the noise experience of inhabitants.

**Method:** Literature analysis, hypothesis construction and an experiment

**Findings:** The calculation models SEPA and Nord2000 lacks in accuracy because they do not take several of the weather effects that can influence the spreading and strength of wind turbine noise in consideration. The usage of immission recordings are, as of now, substandard due to the large amount of background noise becoming a part of the measured result. By using a computer algorithm that can find wind turbine noise in a recording and extracting only those parts, a recording that better represents situations where extreme wind turbine noise occurs can be produced.

**Implications:** To limit the underestimating of estimated noise immission values, newly formulated limits can be presented. An algorithm that extracts wind turbine noise from a recording has good potential to give more accurate measuring results.

**Limitations:** This final report does not deal with the handling of measuring equipment nor sea based wind turbines.

The literature analysis consists of comparing official documents, made by the Swedish Environment Protection Agency, which are used as basis for building permits of wind turbines, with reports and studies that questions the feasibility behind those documents. Based on this, hypotheses are formed that becomes the foundation for the algorithm's workflow and test environment.

**Keywords:** Wind turbine, low frequency, noise, immission, calculation model, algorithm, filter

Content is described in Swedish below.

## Sammanfattning

**Syfte:** Expansionen av vindkraft i Sverige har ökat starkt under de senaste åren och kommer att fortsätta i samma raska takt. Fler och fler invånare kommer då att bli utsatta för vindkraftsbuller vilket för med sig en större utmaning i att finna lämpliga lokaliseringar för den fortgående expansionen. De beräkningsmodeller som vanligtvis används för att bestämma andelen vindkraftsbuller, SEPA och Nord2000, har mött kritik för att felaktigt bedöma den verkliga ljudnivån.

Syftet med detta examensarbete är tvåfaldigt:

- Öka kunskapen kring de brister som finns i dagens mätmetoder av vindkraftsbuller vid bostäder genom att tydliggöra den kritik som framförts på senare tid och även att presentera förbättringsförslag.
- Utföra ett experiment som undersöker möjligheten att analysera immissionsinspelningar med en algoritm för att erhålla ett resultat som bättre stämmer överens med bullerupplevelsen hos invånarna.

**Metod:** Litteraturstudier, hypotesbildande och experiment

**Resultat:** Bestämmandet av ljudnivåer som vindkraftverk skapar vid bostäder, eller andra viktiga lokaliseringar, har en del brister. Beräkningsmodellerna SEPA och Nord2000 har båda otillräcklig noggrannhet på grund av att de inte tar hänsyn till flera av de vädreffekter som påverkar vindkraftsljudets spridning och styrka. Användningen av immissionsinspelningar är i nuläget undermålig på grund av att mycket bakgrundsljud blir en del av mätresultatet. Genom att använda en algoritm som kan hitta vindkraftsljud i en inspelning och extrahera endast de delarna kan en inspelning, som bättre representerar tillfällena då vindkraftsljudet är som mest störande, erhållas.

**Konsekvenser:** För att lindra den underskattning av förmodade immissionsvärden kan nyformulerade gränsvärden för ljudnivåer sättas upp, hanteringen av mätresultat revideras och ett minsta avstånd från vindkraftverk till mottagare antas. En algoritm som filtrerar ut vindkraftsljud ur en inspelning har goda möjligheter att ge mer noggranna mätresultat.

**Begränsningar:** Detta arbete behandlar inte hanteringen av mätutrustning eller havsbaserade vindkraftverk.

Litteraturstudien består i att jämföra av Naturvårdsverket framställda dokument, vilka används som beslutsunderlag för bygglov av vindkraftverk, med forskningsrapporter som ifrågasätter värdet av dessa. Utifrån detta bildas hypoteser som ligger till grund för algoritmens arbetsgång och testmiljö. Algoritmen kommer att behandla en fiktiv inspelning där ett enskilt vindkraftverk är i drift.

**Nyckelord:** Vindkraft, lågfrekvent, buller, immission, beräkningsmodell, algoritm, filtrering

# Innehållsförteckning

<b>I</b>	<b>Inledning .....</b>	<b>I</b>
1.1	BAKGRUND .....	1
1.2	PROBLEMBESKRIVNING.....	1
1.3	MÅL OCH FRÅGESTÄLLNINGAR .....	2
1.3.1	<i>Frågeställningar.....</i>	2
1.4	AVGRÄNSNINGAR .....	2
1.5	DISPOSITION .....	2
<b>2</b>	<b>Metod och genomförande.....</b>	<b>4</b>
2.1	UNDERSÖKNINGSSTRATEGI.....	4
2.2	KOPPLING MELLAN FRÅGESTÄLLNINGAR OCH METODER FÖR DATAINSAMLING.....	4
2.2.1	<i>Vilka brister har dagens beräkningsmetoder av ljud från vindkraftverk enligt modern forskning? .....</i>	5
2.2.2	<i>Hur kan dagens metoder utvecklas för att eliminera eller avhjälpa bristerna som finns nu? .....</i>	5
2.2.3	<i>Vilken potential finns i att låta en algoritm ta fram vindkraftsljud i en immissionsinspelning? .....</i>	5
2.3	VALDA METODER FÖR DATAINSAMLING .....	5
2.3.1	<i>Litteraturstudier och dokumentanalyser.....</i>	5
2.3.2	<i>Hypotesbildande .....</i>	5
2.3.3	<i>Experiment.....</i>	6
2.4	ARBETSGÅNG.....	6
2.5	TROVÄRDIGHET .....	6
<b>3</b>	<b>Teoretiskt ramverk .....</b>	<b>8</b>
3.1	KOPPLING MELLAN FRÅGESTÄLLNINGAR OCH TEORI .....	8
3.2	LITTERATURSTUDIE .....	8
3.2.1	<i>Ljud.....</i>	8
3.2.2	<i>A-vägning.....</i>	9
3.2.3	<i>Karaktären hos ljud från vindkraftverk .....</i>	9
3.2.4	<i>Lågfrekventa ljud och infraljud .....</i>	9

## Innehållsförteckning

---

3.2.5	<i>Lagar och regler</i> .....	10
3.2.6	<i>Ljudets spridning</i> .....	10
3.2.7	<i>Mätmetodik enligt IEC 61400-11</i> .....	11
3.2.8	<i>Beräkningsmodeller</i> .....	12
3.3	HYPOTESBILDANDE.....	15
3.4	EXPERIMENT.....	15
3.4.1	<i>Digitalt ljud och analys med MATLAB</i> .....	16
3.5	SAMMANFATTNING AV VALDA TEORIER.....	16
<b>4</b>	<b>Empiri</b> .....	<b>17</b>
4.1	LITTERATURSTUDIE.....	17
4.1.1	<i>Människans upplevelse av vindkraftljud</i> .....	17
4.1.2	<i>Hälsoeffekter hos människor orsakade av vindkraftsljud</i> .....	18
4.1.3	<i>Anskaffandet av ljudvärden</i> .....	18
4.2	EXPERIMENT.....	22
4.2.1	<i>Förutsättningar</i> .....	23
4.2.2	<i>Algoritmens arbetsgång</i> .....	27
4.3	SAMMANFATTNING AV INSAMLAD EMPIRI.....	28
<b>5</b>	<b>Analys och resultat</b> .....	<b>30</b>
5.1	VILKA BRISTER HAR DAGENS BERÄKNINGSMETODER AV LJUDIMMISSION FRÅN VINDKRAFTVERK ENLIGT MODERN FORSKNING?.....	30
5.2	HUR KAN DAGENS METODER UTVECKLAS FÖR ATT ELIMINERA ELLER AVHJÄLPA BRISTERNA SOM FINNS NU?.....	31
5.3	VILKEN POTENTIAL FINNS I ATT LÅTA EN ALGORITM TA FRAM VINDKRAFTSLJUD I EN IMMISSIONSINSPELNING?.....	31
5.3.1	<i>Inspelning 1 - Vindsus</i> .....	31
5.3.2	<i>Inspelning 2 - Landsväg</i> .....	32
5.3.3	<i>Inspelning 3 – Fåglar</i> .....	34
5.3.4	<i>Algoritmen – Slutsater</i> .....	35
5.4	RESULTAT.....	35
5.4.1	<i>Vilka brister har dagens beräkningsmetoder av ljud från vindkraftverk enligt modern forskning?</i> .....	35

5.4.2	<i>Hur kan dagens metoder utvecklas för att eliminera eller avhjälpa bristerna som finns nu?</i>	35
5.4.3	<i>Vilken potential finns i att låta en algoritm ta fram vindkraftsljud i en immissionsinspelning?</i>	36
5.5	KOPPLING TILL MÅLET	36
<b>6</b>	<b>Diskussion och slutsatser</b>	<b>37</b>
6.1	RESULTATDISKUSSION	37
6.2	METODDISKUSSION	37
6.3	BEGRÄNSNINGAR	38
6.4	SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER	38
6.5	FÖRSLAG TILL VIDARE FORSKNING	38
	<b>Referenser</b>	<b>39</b>
	<b>Bilagor</b>	<b>41</b>
	MATLAB SCRIPTS	41
	<i>Testgroundfilter.m</i>	41
	<i>Peakfinder.m</i>	42
	<i>Ljudfilter.m</i>	47
	<i>stft.m</i>	47
	<i>Spectrogrammation.m</i>	47

# 1 Inledning

---

*Detta kapitel ger en bakgrund till problemet som detta examensarbete angriper. Mål och frågeställningar presenteras och avgränsningar anges.*

---

## 1.1 Bakgrund

Detta examensarbete om 15 hp genomförs som en avslutande del av utbildningen i Byggnadsteknik på Tekniska Högskolan i Jönköping.

Riksdagen har satt upp ett mål som säger att 30 TWh ska produceras från vindkraft år 2020. Vindkraftsproduktionen beräknades stå för 11 TWh i slutet av 2014 enligt Vindkraftsbranschen.se (2014). Denna starka expansion innebär att fler och fler vindkraftverk sätts upp på den svenska landsbygden. Ett ökande antal människor kommer därför att tvingas bo i närheten av dem. För att förhindra att invånarna ska bli störda av vindkraftverken har beräkningsmodeller tagits fram för att beskriva spridningen av vindkraftsljud.

## 1.2 Problembeskrivning

Vindkraft är den del i Sveriges infrastruktur som har hårdast ljudkrav på sig. Vid bostäder ska den ekvivalenta ljudnivån inte överskrida 40 dBA. Jämför detta med tågtrafik som måste hålla sig under en dygnsekvivalent ljudnivå på 60 dBA och väg- och flygtrafik vars krav är 55 dBA (Elforsk, 2006). I generella ordalag brukar en ökning av 10 dBA beskrivas som att upplevelsen av ljudets styrka fördubblas (Naturvårdsverket, 2010).

Nivåerna för tåg-, väg- och flygtrafik är lättare att bestämma än vindkraftsljud. En tidpunkt när mängden bakgrundsljud är lågt, till exempel en vindstilla dag, används som måttillfälle vilket ger klara och tydliga resultat. Detta går inte att applicera på vindkraftverk eftersom det måste finnas en vind, annars genererar inte kraftverket något ljud. Vind skapar bakgrundsljud från exempelvis sus i träd och försvårar arbetet med att utvärdera faktisk ljudnivå som vindkraftverket orsakar vid mottagarpunkten (Bolin och Nilsson, 2010).

De vanligaste beräkningsmodeller för bullerimmission, SEPA och Nord2000, består i att först mäta ljudstyrkan i närheten av ett enskilt verk (emission) och använda det resultatet för att beräkna nivåerna vid intressanta mottagarpunkter (immission) såsom bostäder (Naturvårdsverket, 2010). Ska en vindkraftsparks bullerpåverkan undersökas, mäts varje kraftverk var för sig för att sedan läggas ihop till ett sammanslaget värde (Naturvårdsverket, 2010). Dessa beräkningsmodeller har på senare tid mött skarp kritik.

Befolkning i närheten av vindkraftverk upplever sig ofta som störda även om ljudnivåerna som uppmätts ligger inom gränsvärdena (Shepherd, D., McBride, D., Welch, D., Dirks, KN., Hill, EM. 2011; Farboud, A., R. Crunkhorn, and A. Trinidade. 2013). Vissa författare menar att de beräkningsmodeller som används är bristfälliga och inte representerar den verkliga bullernivån (Furuholm och Hultberg, 2013). En långtidsstudie har även visat att skillnaden mellan beräknad bullernivå och verklig kan vara så stor som 10 dBA (Larsson, 2014).



Stora avvikelser mellan uppmätta värden och faktiska värden vid bostaden kan leda till en mängd olika problem. Dels kan legitimiteten hos vindkraft som grönt energialternativ försvagas (Zmijewski, 2010) och dels kan människors hälsa påverkas negativt. Studier har visat att störda sömnrutiner förekommer hos de som bor i närheten av vindkraftverk (Nissenbaum, M., Aramini, J. och Hanning, D, 2012).

Detta examensarbete syftar till att, i samarbete med Akustikverkstan, belysa dessa påstådda brister för att öka kunskapen kring buller från vindkraftverk. Därutöver ska en experimentell algoritm, vars syfte är att undersöka potentialen hos ett alternativt sätt att behandla immissionsinspelningar, framställas och testas.

### 1.3 Mål och frågeställningar

Målet med detta examensarbete är att öka kunskaperna om bristerna i dagens mätmetoder av vindkraftverksbuller vid bostäder genom att tydliggöra den kritik som framförts på senare tid och även presentera förbättringsförslag från olika forskare.

Ett experiment som undersöker möjligheten med att filtrera bort oönskat bakgrundsljud från immissionsinspelningar med en algoritm ska utföras. Algoritmen skapas utifrån slutsatser från olika forskningsrapporter. Målet med experimentet är att undersöka om det är möjligt att bearbeta immissionsinspelningar på ett sätt som gör det lättare att avgöra vindkraftverkets bidrag till buller vid bostäder. Algoritmen ska skrivas i MATLAB och analysera tre fiktiva inspelningar.

#### 1.3.1 Frågeställningar

**Frågeställning 1** - Vilka brister har dagens beräkningsmetoder av ljudimmission från vindkraftverk enligt modern forskning?

**Frågeställning 2** – Hur kan dagens metoder utvecklas för att eliminera eller avhjälpa bristerna som finns nu?

**Frågeställning 3** – Vilken potential finns i att låta en algoritm ta fram vindkraftsljud i en immissionsinspelning?

### 1.4 Avgränsningar

Detta arbete kommer endast att inrikta sig på bakgrundsljudets inverkan på immissionsmätningar och inte användningen av mätutrustning.

Vindkraftverk som har vertikala rotationsaxlar eller är uppförda till havs kommer inte att behandlas.

Algoritmen behandlar endast enstaka vindkraftverk.

Arbetet syftar till att koncentrera sig på beräkningsmodellerna SEPA och Nord2000 eftersom det är de som används mest idag (Naturvårdsverket, 2013).

### 1.5 Disposition

Här följer en kortfattad beskrivning av vad varje kommande kapitel i arbetet behandlar.

Kapitel 2 – *Metod och genomförande*, talar om hur den information som arbetet bygger på har samlats in och hur resultaten framställts. Arbetets avgränsningområden beskrivs.

Kapitel 3 – *Teoretiskt ramverk*, är kunskapsgrund som behövs för att förstå resterande delar av arbetet. Den av myndigheter fastställda metoden för vad som ger noggranna värden presenteras här.

Kapitel 4 – *Empiri*, redogör för det forskningsmaterial som riktar kritik mot nuvarande metoder och hantering av mätresultat. Algoritmens princip och dess testmiljö redogörs.

Kapitel 5 – *Analys och resultat*, innehåller en analys av empirin i relation till det teoretiska ramverket. Här visas även experimentets resultat och analys av det.

Kapitel 6 – *Diskussion och slutsatser*, beskriver författarens tankar om metodval och resultat. Även förslag på framtida forskning presenteras.

*Referenser* – En lista på alla referenser som ligger till grund för den information som arbetet bygger på.

*Bilagor* – Här presenteras delar av algoritmens MATLAB-kod.

## 2 Metod och genomförande

---

I detta kapitel följer en presentation av de valda metoder som använts för besvarande av arbetets frågeställningar. En diskussion kring fördelar och nackdelar i metodvalet förs i slutet av kapitlet.

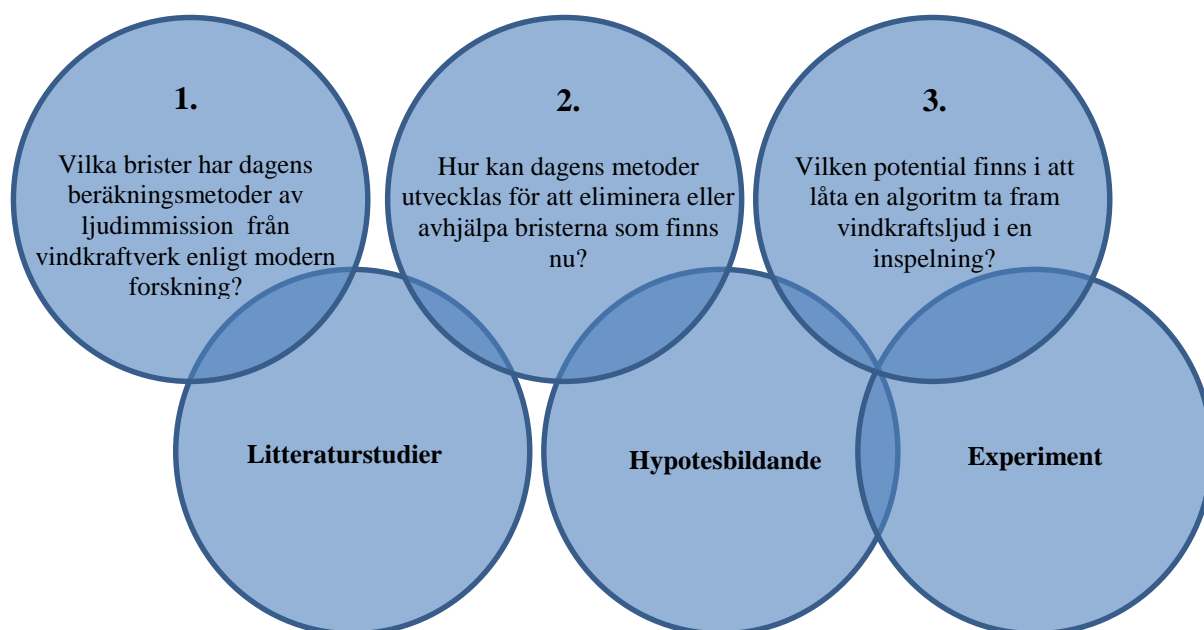
---

### 2.1 Undersökningsstrategi

Detta examensarbete är av kvantitativ typ och ämnade att tydliggöra läget i vilken forskningen kring vindkraftens akustiska aspekter ligger idag genom att samla in relevanta rapporter och forskningsartiklar. Detta material har sammanställts i en översiktlig och lättbegriplig form. Vidare utfördes ett experiment som undersökte potentialen i att använda en algoritm för analys av immissionsinspelningars innehåll av vindkraftsljud.

### 2.2 Koppling mellan frågeställningar och metoder för datainsamling

Frågeställningarna och metoderna för besvarandet av dem var tänkt att följa ett logiskt resonemang med en tydlig, röd tråd. Figuren nedan illustrerar tanken bakom resonemanget och hur frågeställningarna hör ihop med metoderna.



Figur 1. Principiell illustration av sambandet mellan frågeställningarna och metoderna i arbetet.

### **2.2.1 Vilka brister har dagens beräkningsmetoder av ljud från vindkraftverk enligt modern forskning?**

Besvarandet av denna frågeställning bestod i att ta de av Naturvårdsverket fastställda och rekommenderade beslutsunderlag för bestämmandet av immissionsnivåer och ställa de i relation till forskningsmaterial och studier som behandlar ämnet. Grundliga litteraturstudier och dokumentanalyser har behandlats och presenterats på ett lättförståeligt sätt så att läsaren blir införstådd i vilka hinder som mätmetoderna står för idag.

### **2.2.2 Hur kan dagens metoder utvecklas för att eliminera eller avhjälpa bristerna som finns nu?**

Genom att ha analyserat forskningsmaterial och jämfört dem med vanligt använda beslutsunderlag för lokalisering av vindkraftverk har en hypotes bildats. Utifrån detta har förbättringsförslag tagits fram. Däribland ett förslag på den experimentella algoritmen som använts för att besvara den tredje frågeställningen.

### **2.2.3 Vilken potential finns i att låta en algoritm ta fram vindkraftsljud i en immissionsinspelning?**

De resulterande mätdata som erhållits från algoritmen har analyserats för att ge ett svar till denna frågeställning.

## **2.3 Valda metoder för datainsamling**

Målet för arbetet är att öka kunskaperna kring bristerna i dagens beräkningsmetoder av ljudimmission från vindkraftverk. Författaren har därför valt de tidigare nämnda metoderna utifrån bedömningen att det skulle vara enkelt för läsaren att följa med i resonemanget. Principen för arbetet var att först samla information som användes till att forma idéer vilka analyserades och sen testades.

### **2.3.1 Litteraturstudier och dokumentanalyser**

Eriksson Barajas, Forsberg och Wengström (2013) beskriver metoden bakom systematiska litteraturstudier som en ökning av information genom att kritiskt granska och sammanställa information från artiklar, forskningsmaterial, böcker etc. Studier och forskningsmaterial ska analyseras utifrån dess innehåll och trovärdighet. Det senare uppnås genom klara och tydliga metodbeskrivningar som ska ge läsaren en grundlig förståelse av vad som undersöks och anledningen till resultatet (Girden, 2001).

### **2.3.2 Hypotesbildande**

Med hypotes menas en idé som är härledd utifrån ett logiskt resonemang. Ett antal fakta samlas in och en korrelation dem emellan fastställs. Utifrån korrelationen bildas en idé eller hypotes. Resonemanget som leder fram till hypotesen ska vara tydligt så att läsaren förstår de antaganden och förutsättningar som ligger till grund för det (Ejvegård, 2009).

Hypotesen ska bestå av ett påstående samt olika variabler. En jämförelse mellan variablerna och hypotesens påstående görs för att se om hypotesen är trovärdig.

### 2.3.3 Experiment

För att kunna utföra en experimentell undersökning måste ett flertal faktorer beaktas. Experimentet ska dokumenteras och utföras på ett sådant sätt att samma resultat ska kunna erhållas om det utförs en ytterligare gång. Subjektivitet ska därför undvikas eftersom det varken är mätbart eller konsekvent mellan individer (Field, 2003).

Det viktigaste av allt, enligt Field (2003), är att ett experiment ska vara mätbart. Mätmetoderna måste vara av god *Construct Validity*, dvs att de mäter det som de är ämnade för och inte innehåller oönskade värden (Girden, 2001).

## 2.4 Arbetsgång

Utifrån skribentens observationer är buller från vindkraftverk något som gemene man sällan eller aldrig kommer i kontakt med och således kan förkunskapen vara låg. Arbetsgångens utformning har anpassats för att göra den röda tråden uppenbar för läsaren. Se även figur 1 för ytterligare tydliggörande av arbetsgången.

Först presenteras en sammanställning av det material som i regel ligger till grund för beslut samt en förenklad förklaring till vindkraftverksljuddets karaktär och innehåll. Detta ska ge läsaren en förståelse för de förutsättningar och kriterier som gäller för vindkraftsproduktionen idag. Därefter redovisas forskningsmaterial som behandlar olika aspekter dels kring mätmetoder som finns och dels hur människor blir påverkade om de blir exponerade för ljud från vindkraftverk. Eventuella förbättringsförslag från författarna av rapporterna tas upp. Detta görs för att tydliggöra de båda sidorna i diskussionen.

Hypoteser och de fiktiva inspelningarna som algoritmen ska gås igenom. Därefter redovisas principen för algoritmen genom att metodiskt gå igenom dess komponenter. Ett kort referat av koden presenteras.

## 2.5 Trovärdighet

För att säkerställa en god trovärdighet krävs en stark validitet och reliabilitet samt att valda metoder tillämpas på ett korrekt sätt. Eriksson et. al (2013) beskriver validitet som förmågan hos ett instrument att mäta det som var avsett att mätas. De instrument som används i detta arbete är de metoder som beskrivs i kapitel 2.3.

Stor vikt i litteraturanalysen har lagts på att öka validiteten genom redovisandet av källor som presenterar olika sidor av debatten kring vindkraftsbuller och att kritiskt granska olika slutsatser och resultat. Referenserna som används är antingen forskningsartiklar eller andra publicerade rapporter. Källorna är därmed hämtade från akademiskt erkända utgivare och korrekturlästa. Vissa referenser i arbetet är äldre än fem år och validiteten kan därför ifrågasättas. Valet av äldre referenser motiveras med att de antingen fortfarande används som beslutsunderlag för expansion av vindkraft eller att den information som framkommer i dem ännu idag anses som relevant för besvarandet av detta arbetes frågeställningar.

Reliabilitet innebär att resultatet ska kunna bli detsamma om metoden repeterades. Detta försvårades på grund av de motstridiga slutsatser som förekom ett flertal gånger bland forskningsrapporterna. En god objektivitet och neutralitet har eftersträvat genom att analysera en mängd källor med mycket skilda ståndpunkter och därmed undvika en partiskhet.

Trovärdigheten hos den experimentella algoritmen har säkerställts genom att noggrant presentera principen den bygger på samt en utförlig dokumentation av det indata som behandlas av den. Den har en god validitet och reliabilitet för den strikta miljö i vilken den testades. För att ytterligare stärka trovärdigheten hos algoritmen diskuteras fördelarna och nackdelarna med dess princip.

På grund av yttre omständigheter kunde inte algoritmen anpassas och utformas efter en verklig inspelning av vindkraftsljud. Algoritmens praktiska användbarhet utanför dess strikt kontrollerade testmiljö är låg. Författaren har därför valt att lägga fokus på möjligheterna med att analysera inspelningar med samma princip.

### 3 Teoretiskt ramverk

Här presenteras en litteraturstudie om ljudets beteende, vindkraftverksljudet karaktär och spridning samt det som ligger till grund för beslut för vindkraftverkens lokalisering idag. Ett kort hypotesbildande utförs där möjliga grundstenar i algoritmens utformning och svar på frågeställning 2 diskuteras. Inför experimentet ges en kort översikt av användningen av MATLAB för experimentet som presenteras i kapitel 4.

#### 3.1 Koppling mellan frågeställningar och teori

För att förstå resonemanget bakom besvarandet av frågeställningarna 1 och 2 behövs en grundkunskap i hur mät- och beräkningsmetodiken är uppbyggd. I de delkapitel som följer ges en översikt av information som används under bygglovsprocessen för vindkraft.

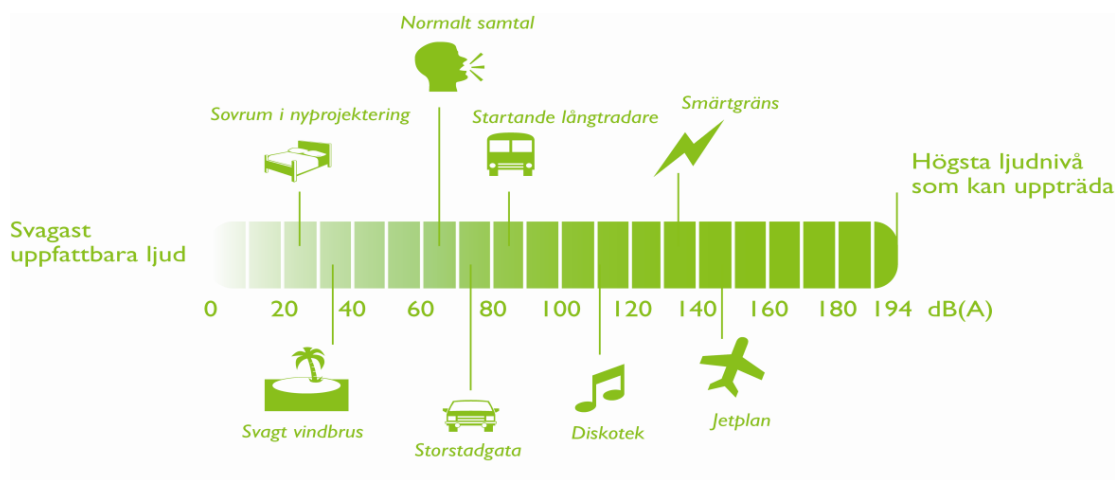
Frågeställning 3 ska besvaras med ett experiment. En kort sammanfattning ges om hur mjukvaran MATLAB arbetar och hur digitalt ljud behandlas av det.

#### 3.2 Litteraturstudie

Ett systematiskt förfarande av informationsinsamlingen har utförts utefter anvisningar av Eriksson Barajas et. al (2013). Först redovisas grundkunskaper kring ljud och därefter om vindkraftverksljud. Beräkningsmetoderna SEPA och Nord2000 behandlas.

##### 3.2.1 Ljud

Tryckförändringar i luft uppfattar vi som ljud och anges i enheten Pascal (Pa). Detta kan översättas till decibel (dB) som kallas ljudtrycksnivå och i vanligt tal för volym. Ju högre dB, desto starkare uppfattas ljudet (se figur 2).



Figur 2. Exempel på ljudstyrkor för olika källor. (Thorén, 2009)

Det sättet som ljud sprider sig från en punktkälla är sfäriskt och kan beskrivas enligt

$$I = \frac{p}{4\pi r^2} \quad (1)$$

där  $p$  är den effekt som sänds ut från källan på avståndet  $r$  vilket ger ljudintensiteten  $I$ . Översättningen från Pa till dB utförs genom

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

där  $p_{ref}$  är ett mått på det lägsta ljudtrycket som människan kan uppfatta och anges enligt

$$p_{ref} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \quad (3)$$

För varje avståndsdubbling mellan källan och mottagaren minskar ljudnivån 6 dB (Naturvårdsverket, 2010).

### 3.2.2 A-vägning

Det mänskliga örat uppfattar inte alla frekvenser likadant. Låga frekvenser (<200 Hz) är svårare att höra än höga frekvenser (1 kHz – 10 kHz). Därför används A-viktade ljudnivåer i regel när bullermätningar utförs som är mer representativt för hur vi uppfattar vår omvärld. För att illustrera: 80 dB (oviktad) vid 20 Hz uppfattas inte alls lika starkt som 80 dB vid 1500 Hz. Den A-viktade decibelskalan (dBA) är anpassad efter upplevelsen av ljudets styrka, med andra ord: 80 dBA vid 20 Hz *upplevs* som lika stark som 80 dBA vid 1500 Hz.

### 3.2.3 Karaktären hos ljud från vindkraftverk

Vindkraftsljud beskrivs oftast som ett bredbandig och amplitudmodulerat brus. I alldagligt tal kan det beskrivas som ett ”swooshande” eller som ett pulserande brus. Ordet *puls* används som beskrivning av vindkraftverksljud vidare i examensarbetet. Att det är bredbandigt betyder att ljudet som alstras innehåller ett stort frekvensomfång. Amplitud-modulationen innebär att ljudstyrkan varierar över tid. Ljudstyrkan från vindkraftverk varierar periodiskt i relation till rotorhastigheten med en rytmisk karaktär. Denna karaktär avtar ju längre avståndet från källa till mätpunkt blir på grund av vädereffekter.

Vindkraftverk genererar i huvudsak två olika typer av buller: mekaniskt och aerodynamiskt buller. Det aerodynamiska ljudet är det som vanligtvis associeras med vindkraftverk och är dessutom den dominerande typen. Det uppkommer av luft som passerar rotorbladen. Styrkan på det aerodynamiska bullret kan anpassas efter vilken vinkel bladen har mot vindriktningen, rotationshastigheten och till viss del hur bladen är utformade (Naturvårdsverket, 2010).

### 3.2.4 Lågfrekventa ljud och infraljud

Lågfrekventa ljud (20-200 Hz) och infraljud (<20 Hz) färdas mycket längre sträckor än de högfrekventa. Större vindkraftverk skapar även starkare lågfrekventa ljud. Exponeringen för dessa ljud anser Naturvårdsverket (2010) inte vara orsak till oro då mätningar har visat nivåer så låga att människor inte påverkas. Påstådda symptom som illamående, huvudvärk och oro motstrids med ett citat från Dr Geoff Leventhall, som omnämns som en av världens främsta experter på lågfrekvent ljud och infraljud:

”I can state quite categorically that there is no significant infrasound from current designs of wind turbines.” – Almgren (2006), s 36



### 3.2.5 Lagar och regler

Bullerkrav som måste uppfyllas av vindkraftverk är att de inte får generera en ekvivalent ljudnivå som överskrider 40 dBA. Kravet skärps 5 dBA om ljudet innehåller märkbara toner istället för bara brus eller om en plats avsedd för avkoppling, exempelvis ett promenadstråk, blir exponerat (Naturvårdsverket, 2010). Utöver detta finns inga krav på mätresultat. Inget minsta avstånd mellan kraftverk och bostad finns angivet. Uttömmande dokumentation om val av utrustning och metoder samt motiv för sitt val ska finnas för grundande av beslutsunderlag (NFS 2003:3).

Placeringen av vindkraftverk styrs i huvudsak av Plan- och Bygglagen (PBL) och Miljöbalken (MB). PBL talar om bygglovsplikten och kommunens bestämmanderätt i lokaliseringen av nya vindkraftverk. Översiktsplanen ska innehålla information om hur mark- och vattenområden ska användas samt hur den byggda miljön ska utvecklas och bevaras (Vindlov.se, Plan- och Bygglagen 2015-04-17). MB kräver att en miljökonsekvensbeskrivning måste utformas för det planerade byggprojektet där eventuella vinster eller risker presenteras.

### 3.2.6 Ljudets spridning

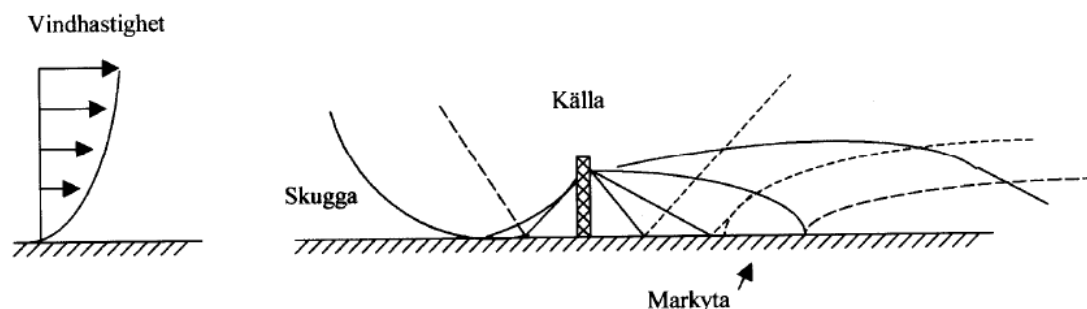
Naturvårdsverket (2010) beskriver olika faktorer som inverkar på spridningen av vindkraftverksljud. På land är vindkraftverk en tänkt punktljudskälla med sfärisk strålning.

#### 3.2.6.1 Lufttemperatur

Variierande lufttemperatur påverkar hur snabbt ljudet breder ut sig över en yta. Varmare temperatur gör att ljudet färdas fortare och sprider sig längre.

#### 3.2.6.2 Vindens riktning

Vinden för med sig ljudet i dess riktning. Om ljudet breder ut sig i motsatt riktning mot vinden (uppströms) ”böjs” ljudet av och en ljudskugga bildas. Böjningen kallas för refraction. Om istället ljudet breder ut sig i vindriktningen (nedströms) färdas det långa sträckor.



Figur 3. Visuellt beskrivning av ljudutbredning från ett vindkraftverk (Naturvårdsverket, 2010).

Beräkningsmodellerna utgår från att ljudet färdas nedströms där vinkeln mellan vindriktningen, vindkraftverket och mottagaren är  $\pm 45^\circ$  (Naturvårdsverket, 2010).

### 3.2.6.3 Temperaturinversion

Under vissa väderförhållanden ökar lufttemperaturen med höjden. Detta kallas för positiv temperaturgradient och inträffar ofta under sommarkvällar. Vindhastigheten nära marken minskar eller avstannar helt. Vid vindkraftverkets nav blåser det dock lika mycket som tidigare och därmed är det ingen förändring av ljudalstringen. Detta skapar två effekter. Dels att det bildas en ansamling av ljud vid marken och dels att maskerande ljud, såsom lövsus, försvinner. Vindkraftverk kan höras även om dess ljud är 10 dBA lägre än det maskerande bakgrundsljudet. Saknas bakgrundsljud hörs vindkraftverk mycket tydligt om kvällar och nätter vilket kan störa de som bor i närheten.

### 3.2.6.4 Markdämpning

Hur miljön runt vindkraftverket ser ut påverkar hur mycket av ljudet som absorberas och därmed också hur långt det sprids. En tät vegetation med buskar och högt gräs absorberar mer av ljudet än åkermark. Markens beskaffenhet beskrivs med en markråhetsfaktor som används i beräkningsmodeller.

Ljudutbredningen i relation till vindriktningen påverkar den dämpning som marken ger. Som beskrivet i figur 3 tenderar ljudvågorna att böjas uppåt vid uppströms utbredning. Detta gör att infallsvinkeln ljudvågorna får gentemot marken blir flack och de ”släpas” längs med den. Markens råhet får då en stor påverkan på ljuddämpningen. Fallet är det motsatta för nedströms utbredning. Ljudvågorna böjs ner mot marken och får en mer aggressiv vinkel som gör att markdämpningen blir svagare.

### 3.2.7 Mätmetodik enligt IEC 61400-11

Den internationella standarden IEC 61400-11 behandlar metoderna bakom akustiska mätningar av buller från enstaka vindkraftverk.

Nödvändiga data från en bullermätning består inte endast av ljudnivåer utan även av vindhastighet, lufttemperatur, luftfuktighet och inom vilket spann som vindvinkeln varierar under mättillfällena. Faktorer som kan ha påverkat mätresultatets kvalité ska redovisas och diskuteras så att en korrekt bedömning av bullernivån ska kunna utföras.

En referenshastighet för vinden av 8 m/s på höjden 10 m och en markråhetslängd på 0,05 m används som grund för en uppmätt A-vägd ljudeffekt ( $L_{WA}$ ) för emission. Denna referenshastighet är bestämd utifrån ett tänkt extremfall där förhållandet mellan bakgrundssus från träd och av kraftverket genererat buller är som störst. Även ljudeffektnivåer vid vindhastigheter 6-10 m/s noteras (IEC 61400-11).

Vindhastigheter ökar dock i regel med höjden och vindkraftverk är ytterst sällan så låga som 10 m. Dessutom är det mycket kostsamt att bygga ställningar som är så höga att en mikrofon ska kunna hållas uppe vid navet. Vindhastigheten kan erhållas genom att se vilken elektrisk effekt som genereras från kraftverket. Efter det utförs en översättning till referensförhållandet med hjälp av en logaritmisk vindprofil (Naturvårdsverket, 2010).

Mätningarna utförs nära kraftverket för att minska påverkan från terräng, atmosfäriska förhållanden och vind. Referensavståndet  $R_0$ , dvs det horisontella avståndet mellan mikrofon och kraftverk, erhålls genom

$$R_0 = H + \frac{D}{2} \quad (4)$$

där  $H$  är höjden från marknivå till navhöjd och  $D$  är rotordiameter. Vindhastigheten kan bestämmas genom att antingen se vilken elektrisk effekt som genereras från kraftverket eller direkt mätning med en anemometer. Om anemometer används ska den placeras på minst 10 meter höjd (dock inte över navhöjden) och ett avstånd mellan  $2D$  och  $4D$  från kraftverket. För att undvika turbulens från omgivande kraftverk får inget annat kraftverk vara närmare än  $10D$ .

Fåglar, bilar, hög musik eller något annat kan också hamna i en inspelning. Dessa irrelevanta ljud är svåra rensa bort (Naturvårdsverket, 2013). Enligt IEC 61400-11 ska detta lindras genom att bestämma bakgrundsljudets nivå i förhållande till vindkraftverkets ljudnivå. Skillnaden mellan den sammanlagda nivån och bakgrundsnivån ska helst inte vara mindre än 3 dB då det gör det svårt att avgöra kraftverkets bidrag till bullerbilden. Om förhållandet anses vara för litet kan tidpunkten för mätningen ändras, mikrofonen kan flyttas, ett extra vindsydd för mikrofonen sätts upp m.m. (Elforsk, 1998).

### 3.2.8 Beräkningsmodeller

För att utföra en immissionsberäkning behövs först en emissionsmätning. Anledningen till varför immissionsmätningar sällan utförs är för att det är mycket svårt att avgöra hur stort bidrag som vindkraftverken gör på ljudbilden eftersom bakgrundsljuden ofta blir väldigt starka jämfört med vindkraftsljudet (Bolin et. al, 2013). Almgren (2006) understryker att:

*”Bullerberäkningar ger oftast ett mera tillförlitligt resultat än mätningar och bör därför i första hand komma i fråga” – s. 21*

Det finns olika beräkningsmodeller som används men SEPA och Nord2000 är de som används allra mest. Nedan följer en korta sammanfattningar av hur deras arbetsgångar ser ut. Arbetsgången hos Nord2000 beskrivs i kortare ordalag då en djupare genomgång skulle bli allt för omfattande för detta arbete.

#### 3.2.8.1 Naturvårdsverkets modell (Swedish Nature Protection Agency, SEPA)

Då avståndet mellan vindkraftverket och mottagaren överskrider 1000 m ska ljudnivåerna över varje oktavband 63 Hz – 4000 Hz användas i beräkningarna. Vidare måste uppgifter om beskaffenheten hos terrängen finnas för att en markrålängd ska kunna uppskattas (se tabell 1) samt avståndet mellan vindkraftverket och mottagaren (Naturvårdsverket, 2013). Beroende på vilken terräng vindkraftverken uppförs i väljs en av markrålängderna. Det bör nämnas att markrålängden för skog tidigare varit 0,3 m, men det anses numera vara för lågt och bör vara 0,5 – 1,0 (Naturvårdsverket, 2010 s 25).

Tabell 1. Markråhetslängder för olika terrängtyper (Naturvårdsverket, 2010).

Typ av terräng	Markråhetslängd, $z_0$ , i m
Förortsbebyggelse, landsortsstäder, skogsbälten Många träd och/eller större buskar	0,3
Jordbruksområden med få byggnader, träd, etc, Flygplatser eller områden med utspridda träd och byggnader	0,05
Vattenytor (sjöar, fjärdar, öppet hav) Bar mark Slät yta av snö, sand eller klippt gräs Landningsbana på en flygplats	0,01

För milt kuperad terräng rekommenderar Naturvårdsverket sin beräkningsmodell. Bestämmande av ljudnivån hos mottagaren, enligt SEPA, följer av nedanstående beräkningar.

I de fall då ljudeffektnivån för vindkraftverket ökar linjärt i förhållande till vindhastigheten erhålls en korrigerad ljudeffektnivå,  $L_{WA,korr}$ , ur sambandet

$$L_{WA,korr} = L_{WA} + k \cdot \Delta v_h \quad (5)$$

där  $L_{WA}$  är den uppmätta ljudeffektnivån som erhålls enligt IEC,  $k$  är ljudnivåns beroende av vindhastigheten på 10 m höjd enligt tillverkarens specifikation, t ex 1,0 dB/m/s. Den inverkan som ytråheten  $\Delta v_h$  har på ljudets spridning fås enligt

$$\Delta v_h = v_h \left( \frac{\ln(H/z_0)}{\ln(h/z_0)} \cdot \frac{\ln(h/0,05)}{\ln(H/0,05)} - 1 \right) \quad (6)$$

där råhetslängden  $z_0$  bestäms enligt tabell 1,  $H$  är aggregatets navhöjd och  $h$  är 10 m.

Den korrigerade ljudeffektnivån används sedan till beräkningen av ljudutbredningen. Beräkningarna finns i två versioner beroende på avstånd mellan aggregat och mottagare. För avstånd upp till 1000 m gäller

$$L_A = L_{WA} - 8 - 20 \log(r) - 0,005r \quad (7)$$

där  $r$  är avståndet i fråga. Då det istället är över 1000 m fås ljudtrycksnivån i immissionspunkten,  $L_A$ , genom

$$L_A = L_{WA,korr} - 10 - 20 \log(r) - \Delta L_a \quad (8)$$

där

$$\Delta L_a = 10 \cdot \left( \sum 10^{(L_i + A_i)/10} \right) - 10 \cdot \left( \sum 10^{(L_i + A_i - r \cdot a_i)/10} \right) \quad (9)$$

och där  $L_i$  är oktavbandsvärden för ljudeffektnivå 63 - 4000 Hz erhållna genom egenhändigt utförd mätning eller enligt tillverkarens specifikation. Notera att dessa värden ska anges i dB, inte dBA. Värdena  $A_i$  och  $a_i$  är A-vägningen respektive luftabsorptionen per meter vid samma frekvenser.

*Tabell 3. Värden som används i ekvation 3.5 för varje oktavband (Naturvårdsverket, 2010).*

Frekvens, Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000
$A_i, \text{ dB}$	-26	-16	-9	-3	0	+1	+1
$a_i, \text{ dB}$	0,0001	0,0003	0,0006	0,0014	0,0032	0,0079	0,0220

Vid samtidig ljudimmission från flera vindkraftverk läggs bidraget från varje enskilt kraftverk,  $i$ , ihop enligt formeln:

$$L_{A,\text{tot}} = 10 \cdot \log \left( \sum 10^{\frac{L_{Ai}}{10}} \right) \quad (10)$$

### 3.2.8.2 Nord2000

Denna beräkningsmodell är ursprungligen utvecklad för trafik men har funnits vara användbar även för vindkraft (Thorén, 2009). Principen för Nord2000 är att börja med en ljudnivå som adderas med olika sorters bidragande effekter från den omgivande miljön. Varje bidrag har en egen metodik för hur den bestäms.

$$L_R = L_W + \Delta L_d + \Delta L_a + \Delta L_t + \Delta L_s + \Delta L_r \quad (11)$$

Där

$L_W$  = Ljudtrycksnivå för frekvensbandet som undersöks. Vanligtvis tersband mellan 63 – 4000 Hz (se tabell 3)

$\Delta L_d$  = Effekt av spridning

$\Delta L_a$  = Effekt av luftabsorption

$\Delta L_t$  = Effekt av terräng

$\Delta L_s$  = Effekt av vegetation/bebyggelse

$\Delta L_r$  = Effekt av hinder och markegenskaper då tillägg från reflekterat ljud beräknas

Nord2000 är mer komplex och tar hänsyn till fler faktorer än SEPA. Förutsättningen är fortfarande ett tänkt extremfall med nedströms vind. Det är inte känt hur väl SEPA fungerar i kuperad terräng (Naturvårdsverket, 2010). Konkava ytor i starkt kuperad terräng kan ge en ökning av ljudnivån jämfört med plan mark. I sådana fall rekommenderar Naturvårdsverket att Nord2000 används.

### 3.3 Hypotesbildande

Problembeskrivningen i detta arbete nämner att människor kan uppleva sig som störda och negativt påverkade även om gränsvärdet för dygnsekvivalent ljudnivå på 40 dBA inte överskrids. Detta tyder på att det sätt som används för att beskriva bullernivån inte beskriver verkligheten på ett tillfredsställande sätt. Någoting sänker  $L_{Aeq}$  och hindrar det från att representera bullerintensiva perioder som stör de personer som bor i närheten.

Eftersom  $L_{Aeq}$  är ett medelvärde så minskar det om perioder med låg ljudintensitet inträffar, det vill säga om vindkraftverket hörs dåligt. Utifrån detta kan en hypotes bildas:

*Om en analyserande algoritm skapas med funktionen att leta upp vindkraftsljud i en inspelning och radera det överflödiga ljudet kommer medelnivån för ljudet öka och även representera bullerintensiva perioder bättre.*

För att undersöka vilken potential som finns i att utforma en algoritm som denna analyseras resultaten utifrån ett flertal delresultat, eller variabler:

- Misstar algoritmen andra ljud för vindkraftsljud?
- Hur många pulser blir raderade?
- Vilken längd har den behandlade inspelningen jämfört med originalet?
- Vilken skillnad i ljudstyrka blir det mellan den behandlade inspelningen och originalinspelningen?

### 3.4 Experiment

Algoritmen som ska utvecklas och testas i detta arbete ska programmeras i mjukvaran MATLAB, vars namn kommer utav att det behandlar värden som matriser. Det är ett forskningsverktyg utvecklat av Mathworks och används till att utföra beräkningar till laborationer, tester och experiment. Inbyggt i mjukvaran finns en mycket stor mängd av funktioner som kan behandla ett eller flera ingångsvärden och utföra en operation som returnerar ett resultat som i sin tur kan behandlas igen med en annan operation, etc. I de fall som en särskild operation inte står att finna eller är för mödosam att använda så finns möjligheten att programmera en egen funktion, även kallad för script, innehållandes flera mindre operationer. Till hjälp finns en stor online-community för MATLAB, kallad MATLAB Central, där hundratals scripts, programmerade av medlemmarna, delas öppet.

### 3.4.1 Digitalt ljud och analys med MATLAB

Datan i ett digitalt ljud består av så kallade *samples* som innehåller information i form av reella tal vilka används för att spela upp ljudet. Varje sample har en *bit-rate* vilket säger hur många *bits* en *sample* består av. Mängden samples per sekund och bits per sample avgör hur tydligt, eller högupplöst, ett digitalt ljud blir. Ju mer, desto tydligare. Till exempel innehåller ljudet, eller musiken, från en vanlig CD-skiva en *sample rate* på 44,1 kHz, vilket betyder 44 100 samples per sekund, och 16 bits per sample i två kanaler. Högre upplösning i ett digitalt ljud ger ett mer väldefinierat ljud men ställer därmed också högre krav på datorn som ska behandla det.

För det experiment som utförts analyserades ett antal fiktiva ljudinspelningar av MATLAB. Ljudfilen fördes in i MATLABs funktionsminne med funktionen *audioread* som returnerade en vektor där varje element representerade informationen i en *sample*. Om ett stereoljud förs in i MATLAB returneras en matris med två rader som representerar informationen i höger och vänster kanal (Theodoros och Aggelos, 2014).

## 3.5 Sammanfattning av valda teorier

Naturvårdsverkets rapporter talar om den officiellt fastställda informationen för vilken beslutsfattande grundar sig på idag. Både SEPA och Nord2000 försöker beskriva hur miljön runt ett vindkraftverk påverkar det utstrålade ljudet. Båda modeller, om än skilda i sin komplexitet, utgår från att ljudet färdas nedströms utan riktningsförändringar och att varje bidrag från miljön runt om försvagar ljudet.

Beräkning med hjälp av ljudemission anses vara det mest tillförlitliga sätt att bestämma immissionsnivån vid bostäder (Almgren, 2006; Naturvårdsverket, 2013).

Hälsoeffekterna av buller från vindkraftverk anses inte vara ett bekymmer så länge riktvärdena på en ekvivalent ljudnivå av 40 dBA, eller 35 dBA under särskilda omständigheter, hålls. Påverkan från infraljud anses vara obefintligt då det i regel är ohörbart.

För experimentet kommer mjukvaran MATLAB att användas vilket är ett kraftfullt verktyg för att utföra experiment.

## 4 Empiri

---

*I kapitel 3 presenterades officiellt fastställd information som används för beslutsunderlag. I detta kapitel ges replik till forskning som menar eller på annat sätt visar att den fastställda informationen har brister som måste beaktas. Experimentets förutsättningar redovisas.*

---

### 4.1 Litteraturstudie

Forskningslitteratur som analyserats till detta arbete kunde indelas i tre kategorier utefter det som undersöktes i dem.

- Människans upplevelse av vindkraftsljud
- Hälsoeffekter hos människor orsakade av vindkraftsljud
- Anskaffandet av ljudvärden

En del av forskningsresultaten, i synnerhet tillhörandes de två första kategorierna, använder enkäter som metod. Enkäter kring vindkraft brukar råka ut för problemet med för få respondenter. Enligt Girde (2001) bör minst 75 % av det totala antalet utskickade enkäter besvaras för att förhindra en partiskhet i resultaten, men det är mycket vanligt att antalet respondenter är kring 35 % för denna typ av forskning (Shepherd et. al, 2011; van den Berg et.al 2008).

#### 4.1.1 Människans upplevelse av vindkraftsljud

Vindkraftverksljud är väldigt annorlunda jämfört med andra vanliga bullerkällor. Det vanligaste är trafikbuller som kan beskrivas som ett mullrande brus eller ett svischande. Ljud från vindkraftverk har istället ett periodiskt pulserande som kan upplevas som långt mer störande än övrig infrastruktur såsom bil-, tåg- och flygtrafik (Pedersen och Persson Waye, 2004).

Vindkraftens expansion kräver stora ytor med ihållande vind, och därför blir den svenska landsbygden ofta den plats som projekteras för vindkraft. Personer som flyttar ut till landsbygden gör ofta det för att de söker ett lugnare tempo än vad som finns inne i städerna (Pedersen och Persson Waye, 2004) och därför blir en extra, oönskad, ljudkälla ett stort irritationsmoment. Enligt Pedersen (2003) och Shepherd et. al (2011) behöver inte denna irritation öka proportionellt med ljudnivån. Bolin et. al (2011) och van den Berg (2008) påstår motsatsen. Hur en individ reagerar på vindkraftsljud beror ibland på faktorer som egentligen inte har med akustik att göra. Pedersen och Persson Waye (2004) har funnit att ljudet uppfattas som mer störande om kraftverket är synligt för individen eller om denne har en negativ inställning till vindkraft, t.ex. att de inte är estetiskt tilltalande och stör landskapsbilden.

Avståndet som ljudet kan färdas har rapporterats vara hörbart på så långa avstånd som 5 km och vissa fall mer än så. Vid kvällar och nätter kan ljudet uppfattas extra lätt av vissa individer. Detta behöver inte bara bero på markinversionseffekten och att mängden bakgrundsljud minskar utan även på att känsligheten ökar vid försök till att somna. Ett förslag till minsta avstånd mellan kraftverk och mottagarpunkt på 2 km har lagts fram för att vidare säkerställa att ljudet inte hörs (Shepherd et.al, 2011).



#### 4.1.2 Hälsoeffekter hos människor orsakade av vindkraftsljud

Vid beskrivning av hur ljud påverkar människor används ofta uttrycket *psykoakustiska effekter*. Hur vindkraftsljudets psykoakustiska effekter, eventuella hälsomässiga konsekvenser och vid vilken ljudnivå det uppstår har ännu inte klarlagts.

Studier har visat att även under gränsvärdet på 40 dBA att 10-20 % vara ganska eller mycket störda av vindkraftverksljud, och då i synnerhet av den rytmiska amplitudmodulationen. Detta medför en ökad stress som ofta yttrar sig i rubbade sömnrutiner och försämringar av livskvalité (Nissenbaum et. al, 2012). Personer som flyttar ut på landsbygden har ofta visionen av en idyll där fåglar kvittrar och lövsus i träden är det som hörs. De har inte valt att vindkraftverk är en del av sin idyll och därför upplever de känslor av hjälplöshet och frustration gentemot vindkraft då det tränger sig in på deras privata sfär (Shepherd et. al, 2011; Pedersen & Persson Wayne, 2004).

##### 4.1.2.1 Infraljud och vibrationer

Farboud, Crunkhorn och Trinitade (2013) gör en sammanställning av en mängd studier och teoretiserar att om osynlig röntgenstrålning har negativa hälsoeffekter så är det en möjlighet att ohörbart ljud, infraljud, också har det. Salt och Hullar (2010) är av samma åsikt och förklarar att håren i innerörats snäcka inte påverkas av infraljud men det gör istället håren som finns i utkanten av snäckan. När infraljud når dem skickas nervsignaler till hjärnan utan att vi uppfattar ett ljud. Farboud et. al (2013) återger att Alves-Pereira och Castelo Branco myntar begreppet *vibroacoustic disease*. Detta karaktäriseras av en onormalt stor produktion av kollagen i kroppen utan att en inflammatorisk process är pågående hos de som exponerats för starka och konstanta lågfrekventa ljud. Studien undersökte flygplanspiloter och visade att manifestationerna bestod av mild beteende störning, epilepsi och arytm. Varken *vibroacoustic disease* eller *wind turbine syndrome* har funnit acceptans i den akademiska världen.

Naturvårdsverkets approach till infraljud och andra lågfrekventa komponenter i vindkraftsljud är att det inte orsakar hälsoproblem överhuvudtaget eftersom det inte är vetenskapligt bevisat. Bolin et. al (2011) menar att inga påtagliga hälsoeffekter av vindkraftsbuller har kunnat påvisas.

#### 4.1.3 Anskaffandet av ljudvärden

De två tidigare kategorierna kan relateras till en subjektivitet hos individen – Vad hon tycker om vindkraft, hur känslig hon är för ljud, hur estetiskt tilltalande hon finner vindkraftverk etc. Det som är subjektivt är svårt att mäta och anpassa efter. Därför behövs definitiva värden som beskriver en förutsättning eller ett tillstånd. För vindkraftsljud används ekvivalenta ljudnivåer ( $L_{Aeq}$ ) som ett mått på bullerexponering. Som tidigare nämnts får  $L_{Aeq}$  inte överstiga 40 dBA i vanliga fall eller 35 dBA vid särskilda situationer. Forskning kring vindkraftsbuller kretsar därför ofta kring hur  $L_{Aeq}$  erhålls och detta värde innebär.

Användningen av ett medelvärde,  $L_{Aeq}$ , betyder att de toppar och dalar i ljudtryck som inträffar på grund av meteorologiska effekter blir utjämnade. Farboud et. al (2013) menar att vindkraftsljudet teoretiskt sett kan vara obefintligt under en längre period och komma tillbaka med oerhörd kraft utan att det ekvivalenta värdet överskrider 40 dBA.

Farboud et. al (2013) fortsätter och menar att A-vägningen av ljudnivåerna kan vara missvisande. Den lågfrekventa komponenten av vindkraftverksljudet påverkas mindre av ljudabsorption och har därför ofta ett starkare energiinnehåll hos mottagaren. A-

vägningens uppbyggnad filtrerar dock bort de lågfrekventa ljuden som därmed inte ger ett nämnvärt bidrag till  $L_{Aeq}$ .

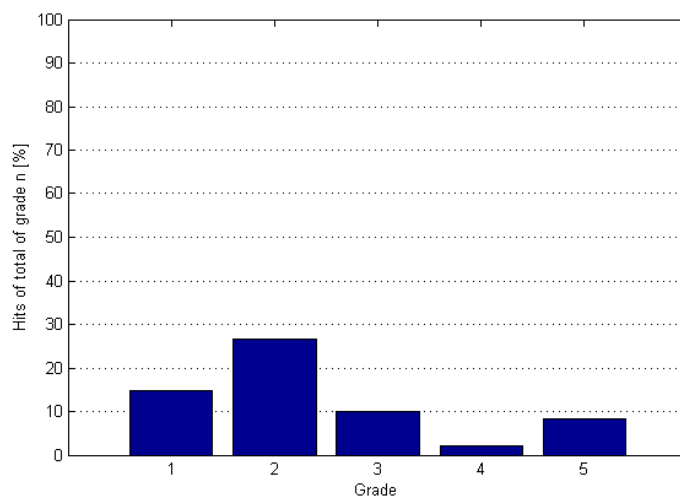
Det finns andra viktade filter vilka är mer anpassade för lågfrekventa ljud eller industribuller. Ett av dessa är dBC som är justerat utefter ljud med starka och lågfrekventa komponenter. Enligt Bolin et. al (2013) är A-vägningen det som visar störst korrelation mellan störningsupplevelse och ljudnivå jämfört med C-vägning. Dock bör en avvägning om C-vägda ljudnivåers användning göras där det finns misstankar om stora lågfrekvenskomponenter enligt Nilsson och Bolin (2011).

#### 4.1.3.1 Immissionsberäkningar och verkligheten

Flera undersökningar har riktat kritik mot att beräkningar av ljudnivåer i en immissionspunkt har en bristande korrelation med verkligheten. Furuholm och Hultberg (2013) genomförde 847 immissionsinspelningar i milt kuperad terräng vilka jämfördes med beräkningar utförda enligt SEPA som om en sedvanlig bulleranalys utförts. Varje inspelning lyssnades igenom och graderades subjektivt utefter hur tydligt de uppfattade att ljudet från vindkraftverket var. Graderingarna var:

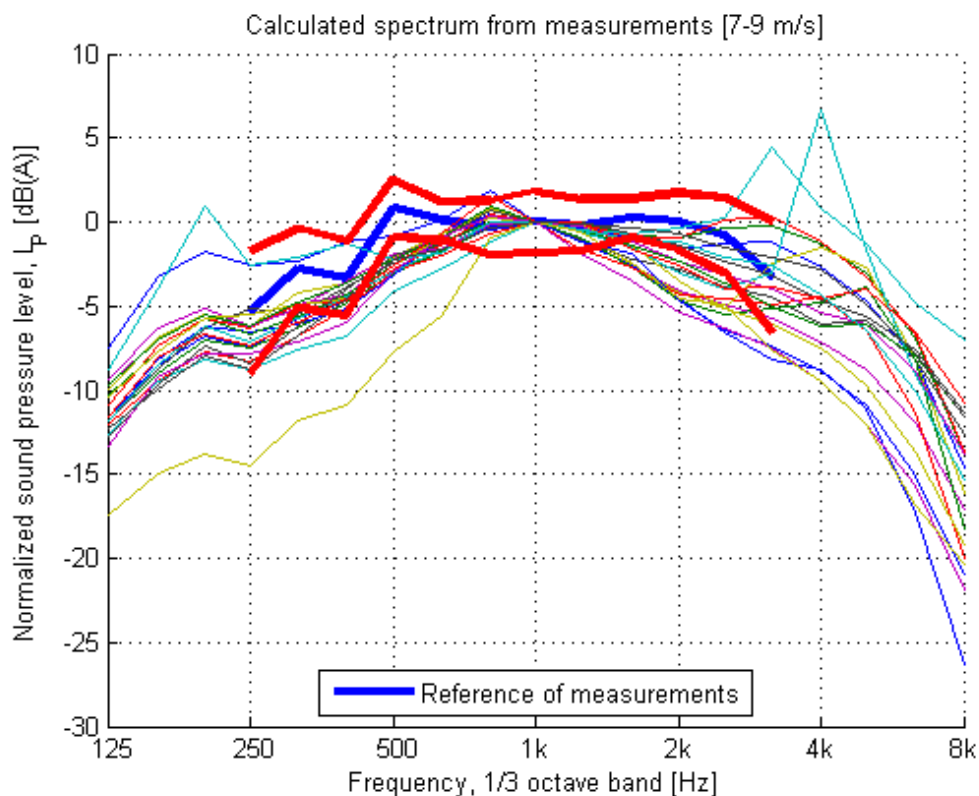
1. Inget vindkraftsljud, mycket störning såsom regn etc.
2. Möjligtvis vindkraftsljud, ingen amplitudmodulation. Dåligt.
3. Lite amplitudmodulation. Ok inspelning med mycket bakgrundsljud.
4. Något klarare amplitudmodulation. Låg bakgrundsstörning.
5. Mycket bra inspelning! Distinkt amplitudmodulation med ytterst lite störande bakgrundsljud.

Fördelningen av inspelningarna i de fem kategorierna visade att ett tydligt vindkraftsljud sällan var förekommande.



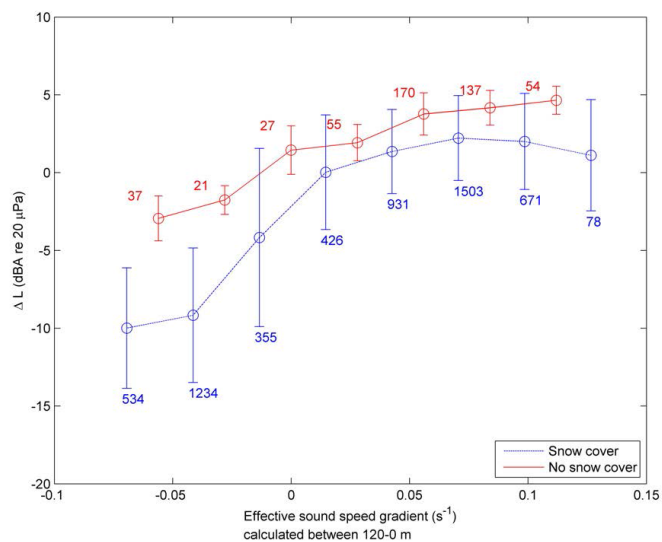
Figur 4. Stapeldiagram över inspelningarnas graderingar (Furuholm och Hultberg, 2013).

Vidare jämförelser utfördes genom att ta alla ”5: or” och ställa upp deras ljudkurvor i ett diagram tillsammans med en referenskurva baserad på förmodade ljudnivåer i immissionspunkten genom emissionsmätningar och beräkningar enligt SEPA. Det som var intressant för Furuholm och Hultberg var att se om formen på de verkliga kurvorna stämde överens med referenskurvan och därför normaliserades alla kurvor i 1 kHz. En felmarginal på  $\pm 1$  dB lades till. Det visade att inspelningarnas formkurva avvek från referenskurvan..



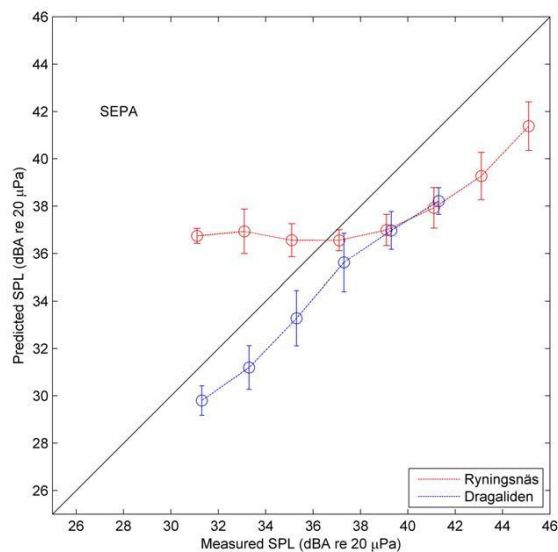
Figur 5. Jämförelse mellan referenskurva och inspelningar med gradering 5 (Furuholm och Hultberg, 2013).

Larsson (2014) utförde liknande mätningar under 2012-2013. Han undersökte ljudhastighetsgradienter, dvs hur ljudvågen refrakteras, i kuperad terräng under snö- och barmarkssäsong, och hur väl SEPA och Nord2000 stämde överens med de uppmätta värdena. Rapporten är i nuläget inte helt färdig utan presenterar huvudsakligen de resultat som framkommit. Det visade sig att ljudhastighetsgradienter påverkar spridningen av ljud avsevärt. Vid snöfria förhållanden kunde skillnaden mellan verklig och beräknad ljudnivå variera 8 dBA medan ett snötäcke kunde orsaka en variation på så mycket som 12 dBA.

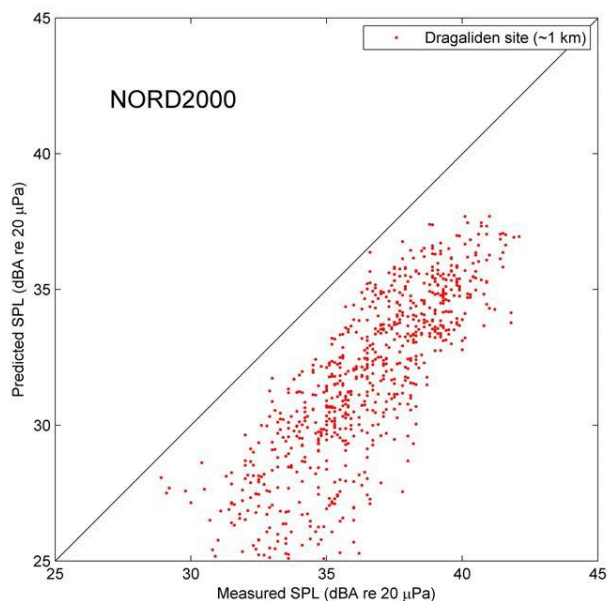


Figur 6. Ljudnivå för olika ljudhastighetsgradienter vid snötäckt mark och barmark vid platsen Dragaliden. Avstånd till närmaste vindkraftverk är 1 km. Vertikala linjer visar variationen av mätvärden (Larsson, 2014).

Jämförelsen mellan uppmätta och beräknade ljudnivåer enligt modellerna SEPA och Nord2000 visade upp stora avvikelser.



Figur 7. Jämförelse av uppmätt ljudnivå (Measured SPL) och beräknad ljudnivå (predicted SPL) på två lokaliseringar med SEPA. Resultaten togs fram under barmarkssäsong (Larsson, 2014).



Figur 8. Jämförelse av uppmätt ljudnivå och beräknad ljudnivå med Nord2000. Resultaten togs fram under barmarkssäsong (Larsson, 2014).

Dessa avvikelser som uppkom i Larssons undersökning av SEPA och Nord2000 användes som motivation till att ta fram en ny beräkningsmodell som tar hänsyn till ljudhastighetsgradienter, kallad NoiseMet.

Baserat på sina långtidsmätningar ger Larsson ett förslag till en ny formulering av riktlinjer för vindkraftsljud. Han föreslår att för 90 % av tiden i en mätning ska ljudet vara under 40 dBA. Genom att göra detta menar han att diskussionen om att ett riktvärde ska aldrig få överstigas, om det är definierat vid ett särskilt förhållande (såsom det i IEC 61400-11) eller om det ska vara ett medelförhållande, kringgås.

## 4.2 Experiment

Ett väl utfört experiment ska ge ett klart och tydligt mätresultat och dessutom vara förståeligt nog för läsaren att denne ska kunna replikera samma experiment och undersöka om resultatet blir detsamma. För detta experiment ska metoder och ingångsdata i möjligaste mån presenteras på ett lättförståeligt sätt. Ljud är komplicerat att beskriva utan att låta läsaren uppleva det. Spektrogram används därför som visuellt hjälpmedel.

## 4.2.1 Förutsättningar

Algoritmen blev testad i mycket kontrollerade förhållanden för att på så sätt lättare mäta och värdera resultaten. Detta uppnåddes genom att använda programvaran Reason 8 för att framställa tre fiktiva inspelningar som var och en innehåller olika typer av bakgrundsljud. Bakgrundsljuden kommer från samplingar, eller kortare inspelningar, av diverse ambienta ljud som kan uppstå kring ett vindkraftverk. Dessa samplingar, eller ljudeffekter, ska inte förväxlas med samples i en sample rate som är bråkdelen av en sekund långa. Ljudeffekterna är hämtade från olika ljudbibliotek som tillhandahåller samples med fria copyright-tillstånd. Samplingarna arrangeras i slumpmässiga ordningar för att skapa en simulerad ljudbild.

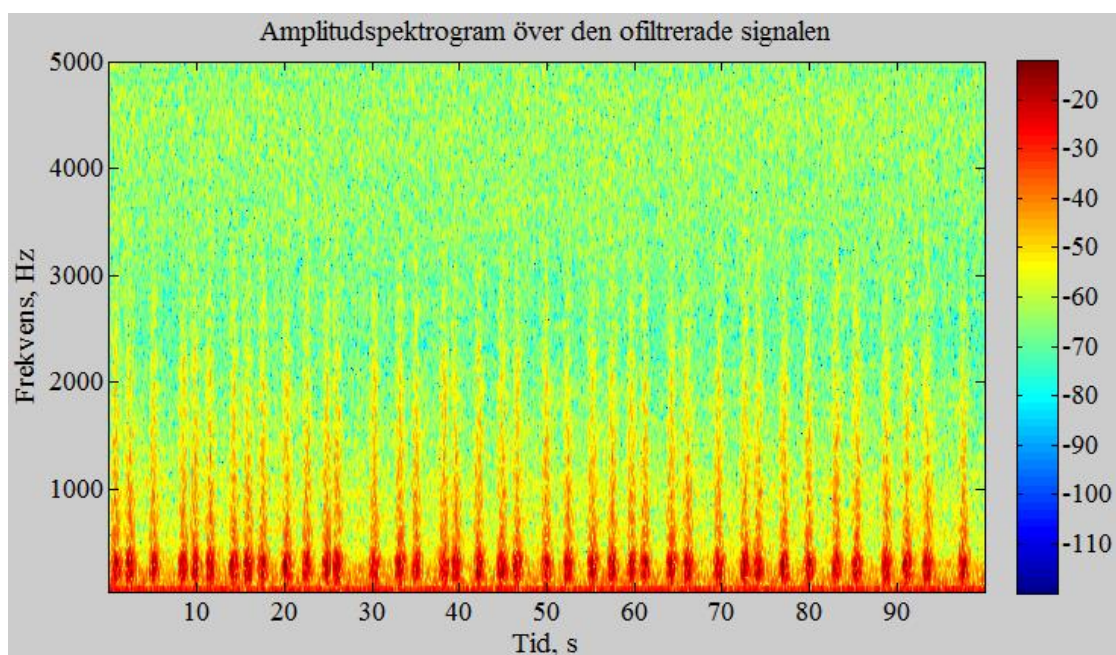
Tre inspelningar, vilka är 100 sek långa vardera och innehåller 40 pulser vid samma tidpunkter, kommer att behandlas av algoritmen. Då en rytmisk amplitudmodulation sällan uppkommer vid immissionspunkten (Furuholm & Hultberg, 2013) har varje puls satts ut med varierande mellanrum. Vindkraftsljudet är helt syntetiskt och har framställts med en brusgenerator. Dess periodiska amplitudmodulation är stark mellan 150-320 Hz och är utformat för att ha det karaktäristiska ”swoosh” som kraftverk utstrålar. Vid verkliga immissionsmätningar ska helst skillnaden mellan endast bakgrundsljud och vindkraftsljud tillsammans med bakgrundsljud inte understiga 3 dB (Elforsk, 1998) och därför har ljudnivåerna i de fiktiva inspelningarna ställts in så att skillnaden är 4-5 dB. Frekvensområdena för bakgrundsljuden redovisas i tabeller.

De fiktiva inspelningarna visualiseras med hjälp av ett spektrogram som genereras av programkoden. I spektrogrammet kan man se vid vilka tidpunkter starka och svaga ljud (röda resp. blåa färger i spektrogrammet, se färgskalan) inträffar i olika frekvensomfång.

Varje ljudfil har 22 050 Hz sample rate innehållandes 8 bits/sample i en kanal (mono). Anledningen till att inte ett mer högupplöst ljud användes var för att den dator som utförde beräkningarna inte skulle överbelastas.

### 4.2.1.1 *Inspelning 1 – Vindsus*

Denna inspelning var den mest enkla av de tre och innehåller endast två ljud: vindkraftsljud och vindsus. Enkelheten i den gör den ideal för att använda som referensfall. I spektrogrammet nedan visualiseras pulserna från det fiktiva vindkraftverket som röda pelformationer.



Figur 9. Frekvenser upp till 5000 Hz visas dels för att tydligare visa var vindkraftsljudet är men också för att det inte inträffar några intressanta avvikelser över 5000 Hz i denna inspelning.

Tabell 4. Innehåll i inspelning 1 – Vindsus

Ljud	Förekomst, st.	Starkast frekvensområde, Hz
Vindkraftverk	40	150-320
Vindsus	Hela inspelningen	60-200

Som tabell 4 visar överlappade brusets och vindkraftsljudets starkaste frekvensområde varandra vilket skulle kunna ha gjort det svårare för algoritmen att hitta volymtoppar.

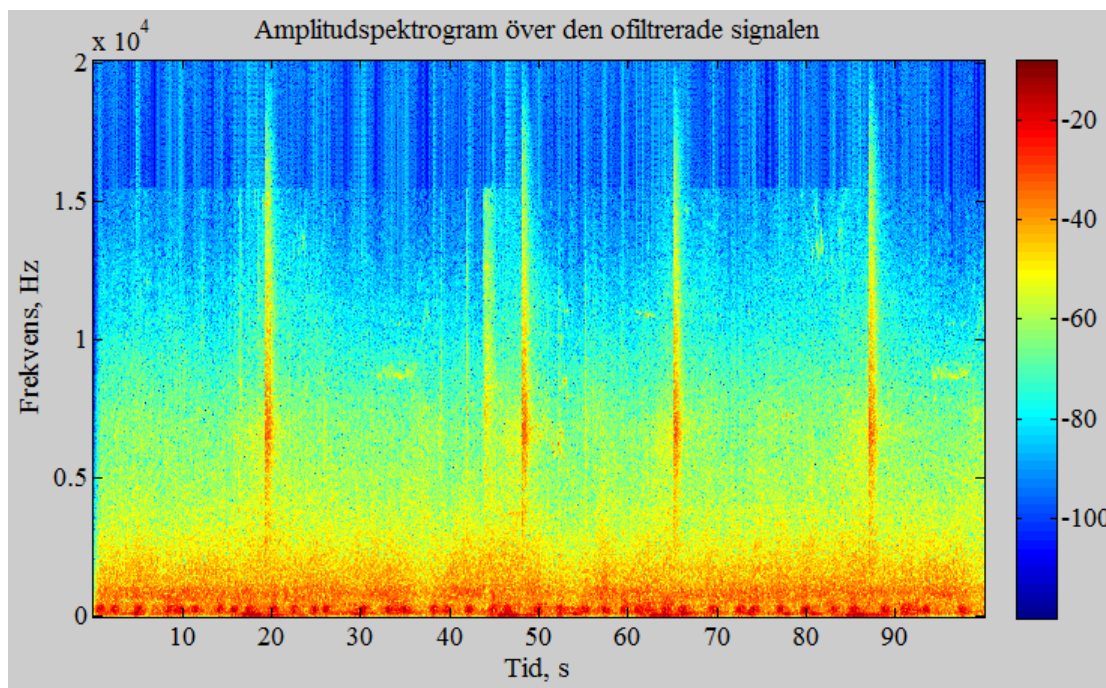
De röda pellarlikande formationerna är där vindkraftsljudet har placerats i inspelningarna. Figur 9 kan användas som referens för att se var vindkraftverket låter i de andra två inspelningarna då pulserna har samma positioner i alla inspelningar.

#### 4.2.1.2 Inspelning 2 – Landsväg

Här användes fyra st. samplingar, utöver vindkraftsljudet, som tillsammans skapade ljudbilden av en landsväg där olika fordon åkte förbi. I grunden låg ett landsvägsljud med ett stort frekvensomfång. Anledningen till den tydliga volymförändringen vid 15 kHz beror på att en av samplingarna (landsväg) innehåller bara information upp till ca 15 kHz. Eftersom denna avvikelse inträffar vid både höga frekvenser och låga ljudnivåer anses den endast orsaka en marginell skillnad i resultatet.

Det är svårare att se var i detta spektrogram de olika ljuden befinner sig eftersom de flesta ljuden håller sig kring samma frekvensområde. Vindkraftsljudet kan ses väldigt långt ner i spektrogrammet som små röda prickar.





Figur 10. Inspelning 2 - Landsväg

Landsvägsljudet höll en stark och stadig ljudnivå mellan 80-950 Hz men hade två områden där det stundvis blev mer framträdande. Utöver detta har tre ytterligare samples bestående av olika fordonstyper använts: Lastbil, större personbil och buss.

Tabell 5. Innehåll i inspelning 2 – Landsväg

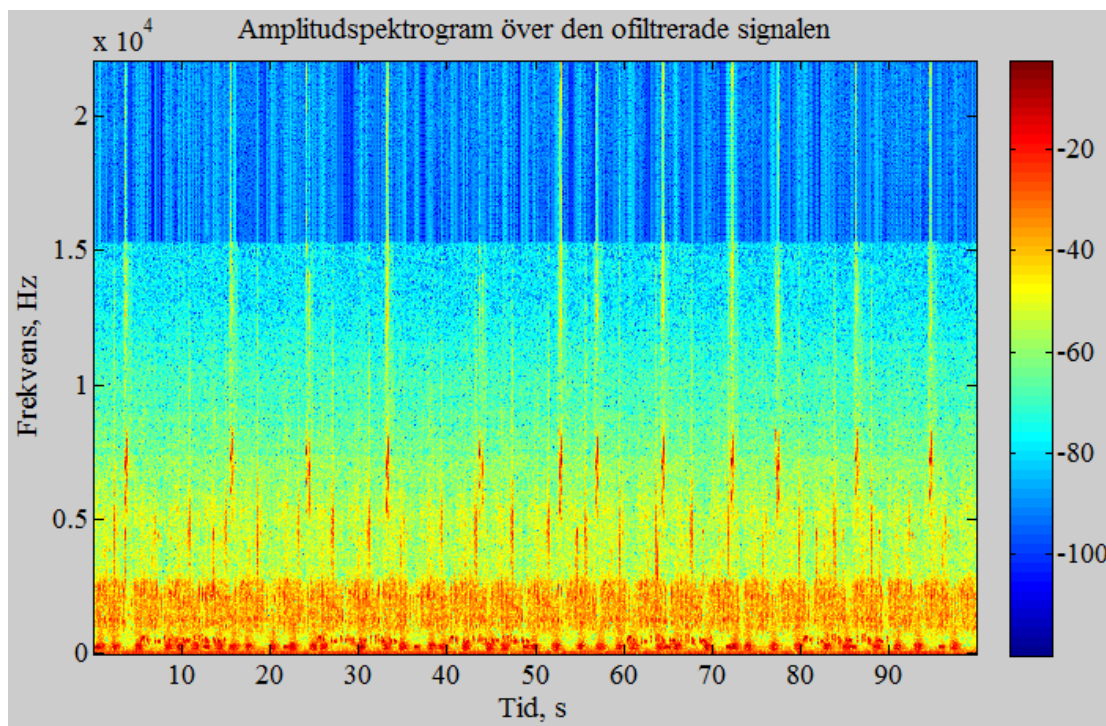
Ljud	Förekomst, st.	Starkast frekvensområde, Hz
Vindkraftverk	40	150-320
Landsväg	Hela inspelningen	Ca 200, 850
Lastbil	10	100
Buss	4	80
Större personbil	5	280

Lastbilen och bussen har huvudsakligen låga komponenter. Bussen ger även ifrån sig ventilljudet då den stannar och släpper av passagerare. Ventilljudet kan ses tydligt i figur 10 kring sekunderna 20, 50, 65 samt 90 i form av ett långt streck som breder ut sig över ett stort frekvensområde. Den större personbilen hade igång sin varningssignal (tuta) när den passerar.

#### 4.2.1.3 Inspelning 3 – Fåglar

Fågelläten varierar starkt i karaktär och hamnar ofta i resultatet från en immissionsmätning. Arrangemanget av denna inspelning är menat att ha kraftiga ljud i ett brett frekvensomfång som ska konkurrera med vindkraftsljudet.





Figur 11. Till synes i nederkanten av spektrogrammet är det flera typer av fåglar som konkurrerar om samma frekvensområde.

Frekvensområdet för en ugglas läte blev specifikt anpassat så att det hamnade kring vindkraftverkets starkaste område. Detta var för att undersöka om algoritmen lämnade kvar ugglas hoande. Risken fanns också för att flera av vindkraftverkets pulser skulle bli raderade eftersom det fanns andra ljud som låg kring samma frekvensområde och ljudnivå. Detta skulle ha kunnat medfört att algoritmen inte fann någon volymtopp kring vindkraftsljudet.

Tabell 7. Innehåll i inspelning 3 – Fåglar.

Ljud	Förekomst, st.	Starkast frekvensområde, Hz
Vindkraftverk	40	150-320
Vindsus	Hela inspelningen	60-200
Kajor	Hela inspelningen	1100-1300
Småfågel 1	12	7000
Småfågel 2	15	2500
Skogsduva	5	380-450
Ugglas läte	10	260

Denna inspelning bestod av sammanlagt sju samples. I grunden fanns samma vindsus som i *Inspelning 1 - Vindsus* men även en flock av kajor. Vidare fanns en skogsduva och en ugglas som skulle ta de lägre frekvenserna och två st. olika småfåglar som gav ifrån sig väldigt högfrekventa ljud.

#### 4.2.2 Algoritmens arbetsgång

För att hitta var i inspelningen som vindkraftsljudet uppkommer användes en enkel princip som bygger på en del av resultatet som Furuholm och Hultberg (2013) kom fram till, dvs att ett tydligt vindkraftsljud är sällan hörbart vid immissionspunkten. Ovidkommande ljud och brist på amplitudmodulation var ofta förekommande. Det algoritmen gjorde var att rensa bort delarna i de fiktiva inspelningarna där inget vindkraftsljud fanns. Vindkraftsljuden arrangeras för att hamna periodiskt efter varandra. På så sätt lämnades en ”renare” inspelning kvar med tydlig och rytmisk amplitudmodulation.

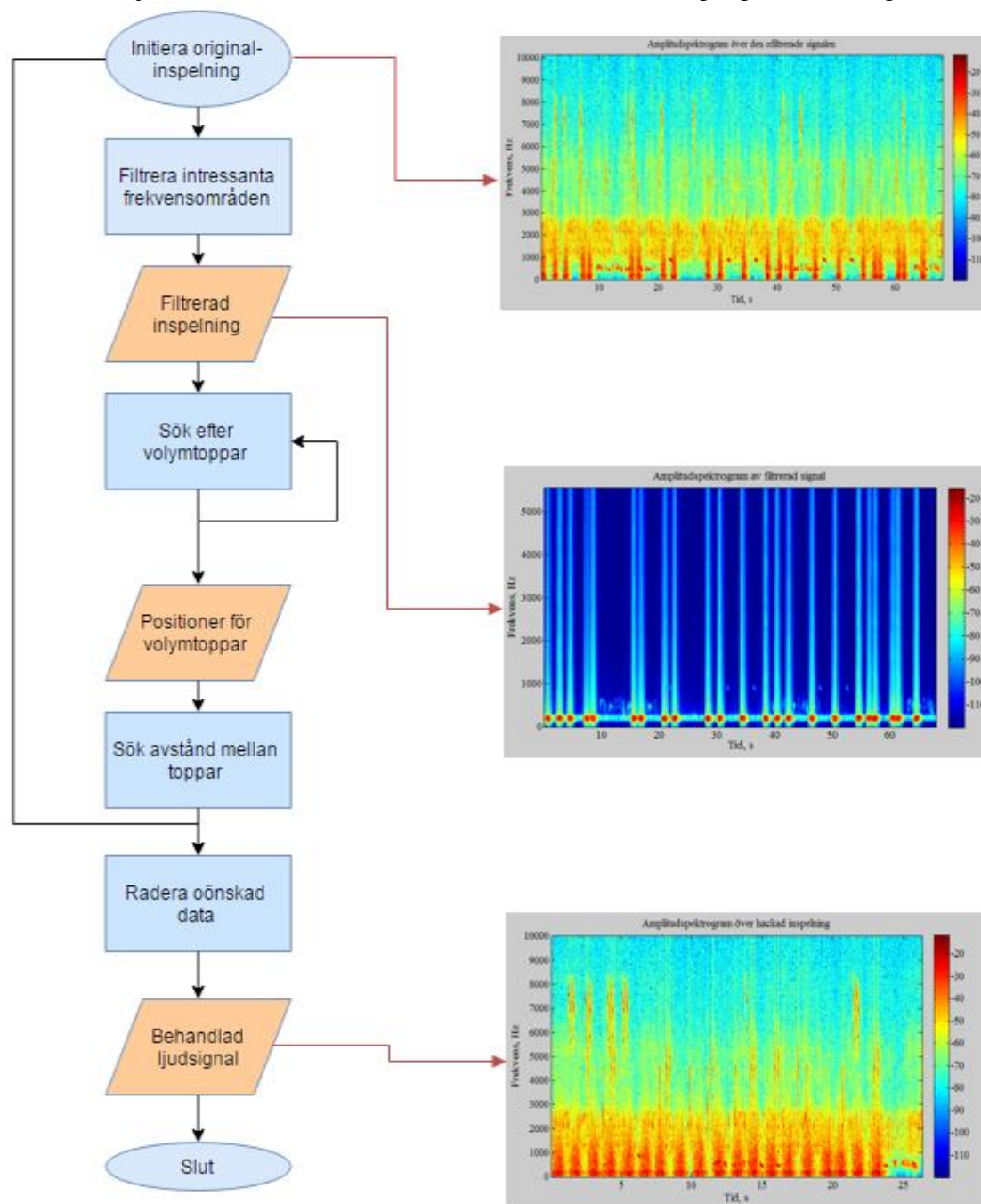
Originalinspelningen fördes igenom ett snävt filter där frekvenser kring vindkraftsljudets mest framträdande komponenter förstärktes medan resten sänktes i ljudstyrka. En filtrerad signal erhöles där varje puls blev mycket tydligare. Algoritmen letade därefter upp volymtoppar i den filtrerade signalen och returnerade en vektor där varje element angav vilka samples i inspelningen som innehöll en volymtopp. Just denna del av algoritmen utfördes två gånger då den vid första tillfället returnerade väldigt många toppar, arrangerade i kluster. Genom att utföra det två gånger hittades positionerna för ”topparnas toppar” och andelen svaga toppar minskades avsevärt. Positionerna för de kvarvarande topparna fördes tillbaks till den originala och ofiltrerade inspelningen. En tänkt rotationstid angavs i algoritmen som beskrev hur tätt pulserna skulle komma. Denna rotationstid hade fördelaktligen bestämts utifrån vindkraftverkets rotationsfrekvens, men då inget sådant fanns att tillgå sattes rotationstiden  $t = 1,2 \text{ sek}$ , vilket var längden för varje puls. En topp antogs vara en punkt i mitten av pulsen och där ljudnivån var som starkast. Genom sambandet

$$P_2 - P_1 - t = X, \quad X > 0 \quad (12)$$

undersöktes om avståndet  $X$  mellan två punkter,  $P_1$  och  $P_2$  var längre än  $t$ . Om  $X > 0$  raderades informationen i  $X$ . Med andra ord; om ett mellanrum fanns mellan slutet på en puls och början på nästa togs mellanrummet, alltså det oönskade ljudet, bort och de båda pulserna fördes samman. Resultatet blev då en kortare ljudfil som saknar långa mellanrum mellan varje vindkraftsljud.

En del av operationerna som algoritmen genomför har hämtats från communityn MATLAB Central där många användare lägger ut sina scripts för andra att använda sig av. Scripts som utför rätt operation har letats upp och därefter sammanställts och anpassats till det syfte som algoritmen har i detta arbete. Ett filterscript, framställt av Akustikverkstan, har också använts. Parametrarna i algoritmen anpassades manuellt för att hitta toppar i *Inspelning 1*.

Nedan följer ett flödesschema som beskriver arbetsgången för algoritmen.



Figur 12. Beskrivning av algoritmens arbetsgång. De streckade pilarna visar spektrogrammet för varje behandlingssteg. Inspelningen som visualiseras var ett kort utkast av inspelning 3.

### 4.3 Sammanfattning av insamlad empiri

Empirin visar att den kritik som riktas mot hur dagens beräkningar av vindkraftsljud går till och hur resultaten hanteras har allvarliga brister. Huruvida dessa brister faktiskt har samhällsmässiga konsekvenser i form av hälsonebudsättningar är inte fastställt och har motstridiga uppgifter.

Forskningen kring människors hälsopåverkan av vindkraftsljud grundar sig i data vars validitet kan ifrågasättas. Enkäter som används för att undersöka människors upplevelse

av att bo nära vindkraftverk har låga respondentandelar (Shepherd et. al, 2011; van den Berg et.al 2008) vilket kan uppfattas som tveksamt (Girden, 2001).

Experimentet med algoritmen innebar att ta tre arrangerade inspelningar, sammansatta av samlingar, och låta den hitta vindkraftsljud och ta bort oönskade partier.

## 5 Analys och resultat

---

I detta kapitel ställs empirin och det teoretiska ramverket i relation eller i kontrast mot varandra och analyseras utefter frågeställningarna. Resultaten från algoritmen presenteras och utvärderas. Till sist sammanfattas de härledda svaren på frågeställningarna i punktform.

---

### 5.1 Vilka brister har dagens beräkningsmetoder av ljudimmission från vindkraftverk enligt modern forskning?

Det framkommer av jämförelsen av de beslutsunderlagsgrundande rapporterna mot forskningsmaterialet att spridningen och effekten av vindkraftsljud underskattas grovt. Påverkande faktorer som refraktion inkluderas exempelvis inte. Almgrens (2006) citat visar att resonemanget kring bestämmandet av vindkraftsljud grundar sig i en mycket stor tilltro till beräkningsmodeller istället för verkligheten:

*”Bullerberäkningar ger oftast ett mera tillförlitligt resultat än mätningar och bör därför i första hand komma i fråga” – s. 21*

Vidare finns det rekommendationer av Naturvårdsverket (2013) kring vilka beräkningsmodeller som ska användas vid vilka tillfällen. SEPA rekommenderas vid okuperad terräng och Nord2000 vid kuperad terräng. Vid jämförelse med de resultat som Furuholm och Hultberg (2013) och Larsson (2014) presenterat tycks de sakna belägg.

Furuholm och Hultberg (2013) visar att om sedvanlig mät- och analysmetodik utförs enligt SEPA är det sällan som tydliga vindkraftskomponenter är en del av  $L_{Aeq}$ . Larssons undersökning understryker denna tes. I Figur 7 kan stora skillnader ses mellan beräknad och verklig ljudnivå samt ytterligare skillnad beroende på lokalisering. I Larssons fall var terrängen starkt kuperad och därmed rekommenderas Nord2000 istället för SEPA enligt Naturvårdsverket (2013). Där tycks dock avvikelserna vara ännu större. En av punkterna i Figur 8 visar att den uppmätta ljudnivån var kring 37,5 dBA när den beräknade endast var ca 22,5 dBA, det vill säga en skillnad på 15 dBA. Detta blir en oerhörd skillnad då den upplevda ljudnivån fördubblas för varje 10 dBA och att ljudstyrkan avtar med 6 dB per avståndsdubbling (Naturvårdsverket, 2010).

Det bör dock noteras att Larssons rapport inte är helt färdigställd i nuläget och hans metod för insamlandet av data inte är helt tydlig. Det kan i figur 6 ses mycket stora variationer av mätvärden vilket gör resultatet svårtolkat. Möjligen är avvikelserna överdrivna, men det är svårt att avgöra. Författaren av detta examensarbete väljer därför att ta Larssons data som en indikation på brister istället för faktiska mått på hur stora bristerna är.

Beräkningsmodellerna behöver inte vara det enda som ska ses över. Såsom Farboud et al (2013) menar kan användandet av ekvivalenta ljudnivåer hypotetiskt sett gömma extremfall eftersom det är ett medelvärde uttaget ur ett informationsspänn. Riskerna finns att  $L_{Aeq}$  skulle kunna vara långt över 40 dBA för att sedan minska till en ohörbar nivå utan att den ekvivalenta ljudnivån överstiger gränsvärdet. Mycket störande perioder kan alltså ”gömmas”. Befolkningen som lever i närheten av ett eller flera vindkraftverk känner sig bara störda när det låter, inte när det är tyst. Alltså bör användandet av ekvivalenta ljudnivåer undersökas.

A-vägning av ljudnivåer kan möjligen även det vara missvisande eftersom de lågfrekventa ljudkomponenterna reduceras skarpt i den typen av filtrering. Visserligen är den anpassad efter hur vi människor uppfattar ljud men som Salt och Hultberg (2010) teoretiserar kan infraljud påverka oss, fastän vi inte märker av det, som röntgenstrålar, vars ljus vi inte uppfattar. Forskningen kring upplevelsen av lågfrekvent ljud tycks dock inte ha funnit ett definitivt svar på hur vi människor påverkas av det. I de källor om lågfrekventa ljud som använts i detta examensarbete är ord som ”möjligen” eller ”kan ha” ofta förekommande. Tvetydiga uttalanden som dessa underminerar reliabiliteten. Lågfrekventa ljud från vindkraftverk och dess negativa hälsopåverkan kan därför inte motiveras i detta arbete.

## **5.2 Hur kan dagens metoder utvecklas för att eliminera eller avhjälpa bristerna som finns nu?**

Användningen av ekvivalent ljudnivå kan bli missvisande eftersom det är ett medelvärde av ljudnivån över tid eftersom vindkraftverk kan stundvis vara ohörbart eller inte ha en amplitudmodulation. Enligt Shepherd et. al (2011) och Pedersen (2008) är det pulserande brusdet som människor upplever som mest störande. Därför är det fruktlöst att låta tillfällena då amplitudmodulationen inte är hörbar vara en del av den ekvivalenta ljudnivån. Istället bör den ekvivalenta ljudnivån bestämmas utifrån förhållanden som Furuholm och Hultberg beskriver som en ”femma” (Se kapitel 4.1.3.1). Implementeringen av en algoritm som analyserar en inspelning och söker efter vindkraftverk skulle därför genom extrahering av vindkraftverksljud skapa en ”femma” som får ligga till grund för mätresultatet.

Ljudet från vindkraftverk kan vara hörbart på mycket stora avstånd; ibland så mycket som 5 km. I nuläget finns inget minsta avstånd mellan vindkraftverk och bostad. Om ett minsta avstånd på 2 km fastställdes, såsom Shepherd et. al (2011) föreslagit, i kombination med Larssons (2014) föreslagna revidering av riktvärdet kan bullerpåverkan på de närboende lindras. Avståndet gör att den störande amplitudmodulationen avtar och kravet att vindkraftsljudet inte får överstiga 40 dBA för 90 % av tiden minskar risken för att ljudstarka perioder ”göms”.

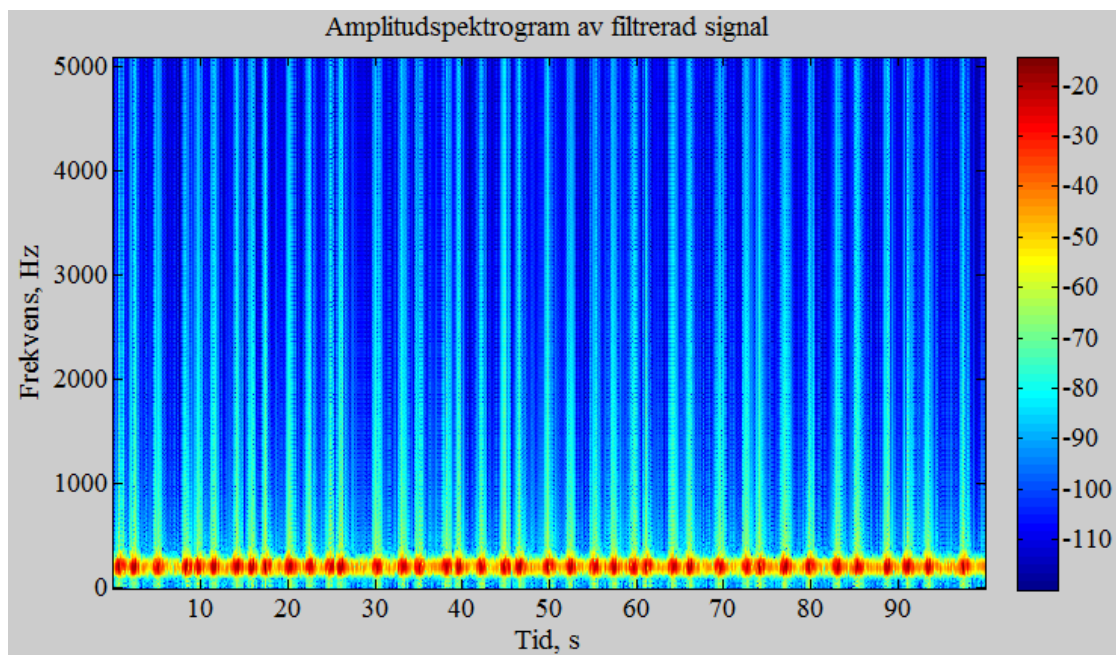
## **5.3 Vilken potential finns i att låta en algoritm ta fram vindkraftsljud i en immissionsinspelning?**

Här redovisas resultatet från algoritmens bearbetande av de tre fiktiva inspelningarna enligt metodiken som presenterats i figur 12. I slutet av kapitlet dras slutsatser om effektiviteten hos denna algoritm och även potentialen i att utveckla en algoritm som kan användas i verkliga immissionsinspelningar.

### **5.3.1 Inspektion 1 - Vindsus**

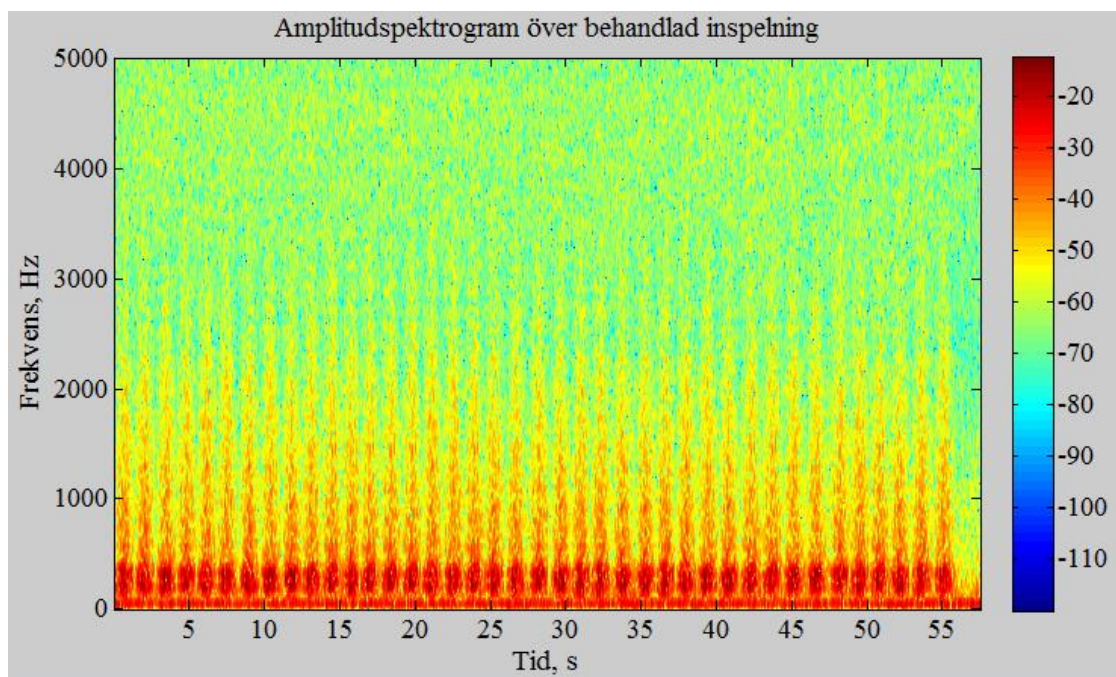
Efter filtrering av originalinspektionen erhöles nedanstående resultat.





Figur 13. Filterrad signal av inspelning 1 - Vindsus.

Bruset reducerades avsevärt och vindkraftsljudet kunde isoleras. Algoritmen raderade därefter effektivt mellanrummen som fanns mellan varje puls. I slutet finns ett område på ca 3 sek med endast vindsus.

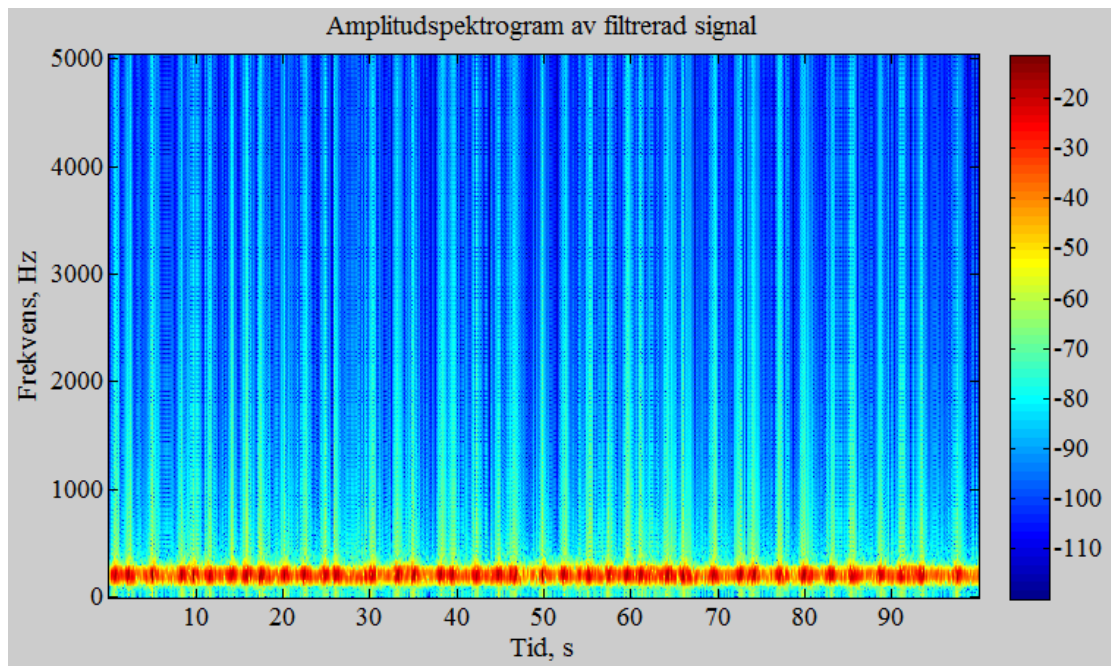


Figur 14. Behandlad ljudsignal 1 - Vindsus.

Varje puls återkom med jämna mellanrum vilket visar att en amplitudmodulation uppnåddes.

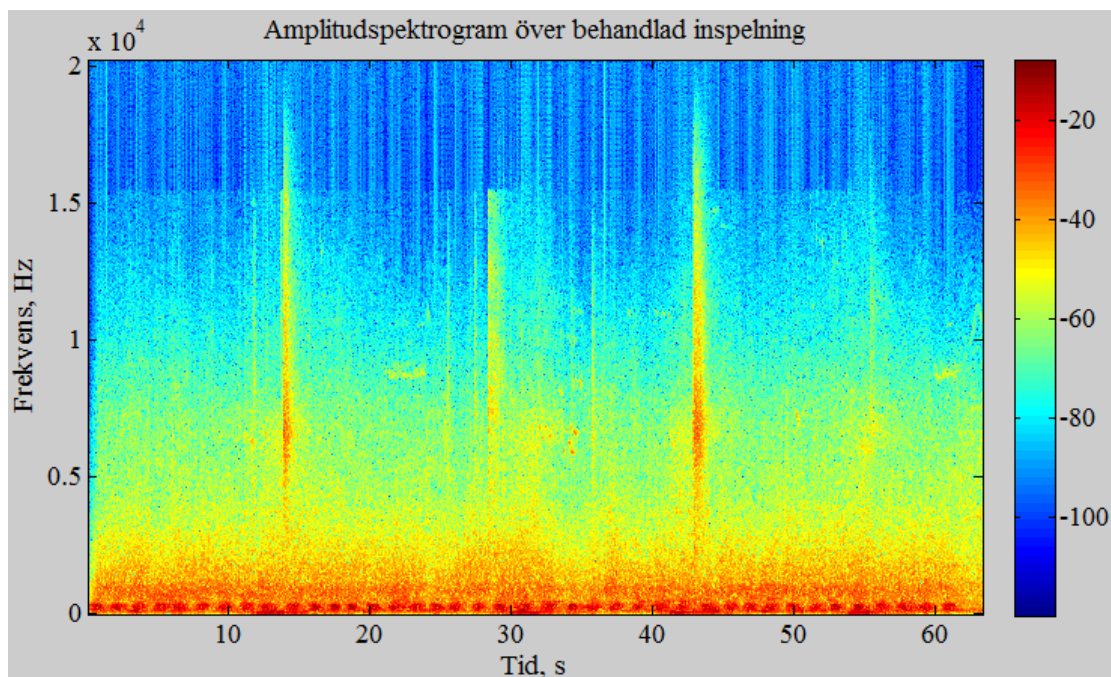
### 5.3.2 Inspelning 2 - Landsväg

Vindkraftsljudet här är svårare att se på grund av de många fler ljuden som ligger på samma frekvensområde.



Figur 15. Filtrerad signal av inspelning 2 - Landsväg

Bussens ventilljud raderades i behandlingen vid två positioner. Som i inspelning 1 lämnades 3 sekunder kvar i slutet av inspelning utan att innehålla vindkraftsljud. Återkommande röda prickar kan ses längst ner i spektrogrammet. Detta är vindkraftsljudet.



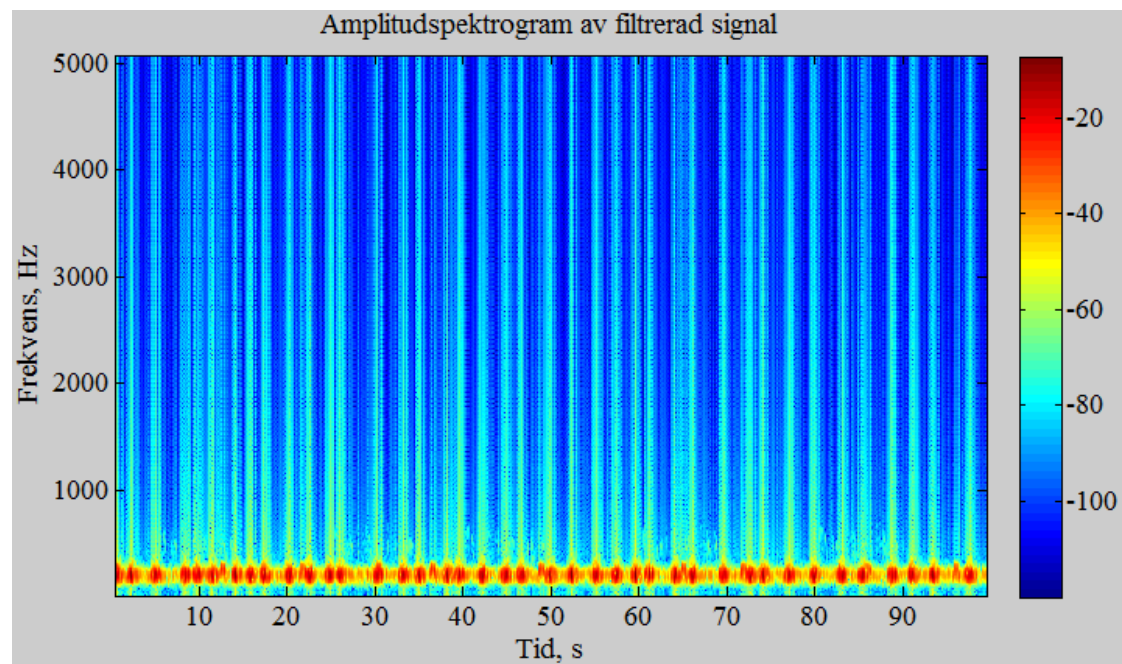
Figur 16. Behandlad inspelning 2 - Landsväg.

En jämn periodicitet kan ses i figur 16. En amplitudmodulation erhöles.



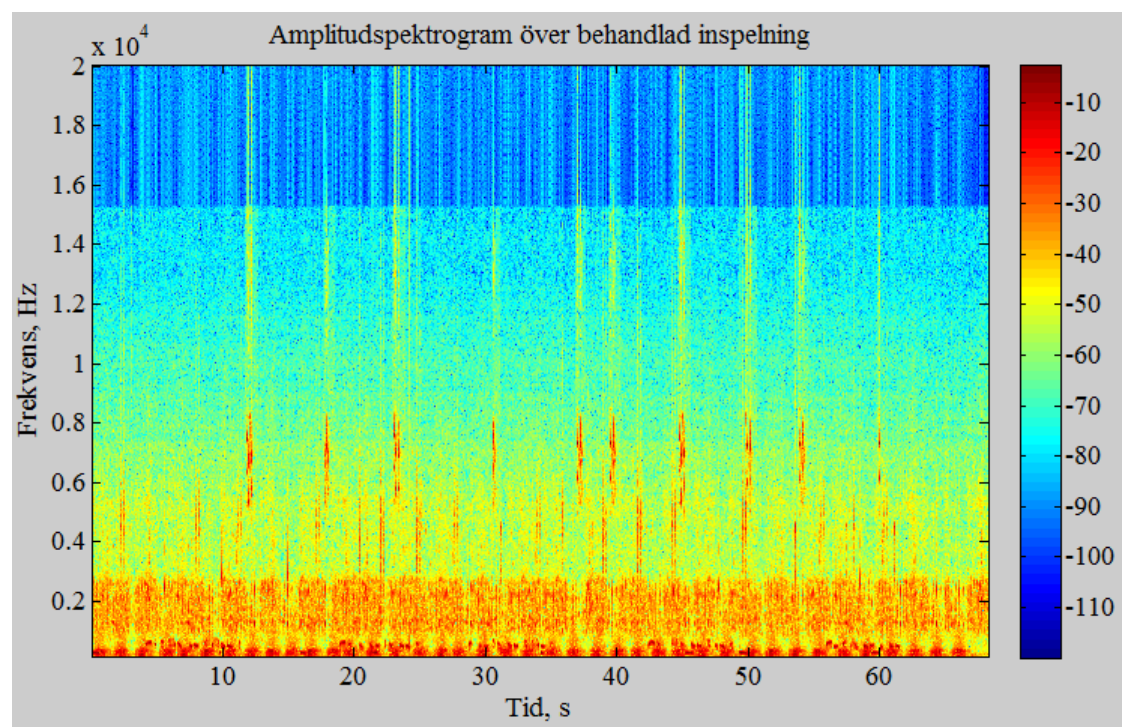
### 5.3.3 Inspelning 3 – Fåglar

Amplitudspektrogrammet liknar de tidigare filtrerade inspelningarna. Om en jämförelse görs med inspelning 1 – Vindsus kan flera ytterligare röda prickar upptäckas. Dessa ytterligare prickar är en ugglas hoande.



Figur 17. Filtrerad signal av inspelning 3 - Fåglar.

Som det kan ses i figuren nedan finns en tydlig, rytmisk amplitudmodulation i den behandlande inspelningen.



Figur 18. Behandlad inspelning 3 – Fåglar.

Vid sekunderna 46 och 49 har ugglans läte betraktats som en puls av algoritmen.

Amplitudmodulationen är alltså något sämre än i inspelning 1 och 2 men är fördenskill inte otydlig.

### 5.3.4 Algoritmen – Slutsatser

Genom att använda denna mycket enkla algoritm har en avsevärd del av oönskat ljud i inspelningarna raderats utan att förlora en enda vindkraftspuls.

Tabell 4. Resultat från algoritmen.

Inspelning	Antal raderade sekunder	Antal raderade pulser	Skillnad i dB.
1 - Vindsus	42,5	0	4,4
2 - Landsväg	36,6	0	3,9
3 - Fåglar	31,5	0	2,9

Att filtrera undan oönskat ljud med denna princip visar också att den resulterande inspelningen visar en högre ekvivalent ljudnivå. Detta presenterar tydligare vilken ljudnivå som kan uppkomma under särskilda förhållanden istället för att ta ett medelvärde över en hel inspelning. Hypotesen anses som stärkt av resultaten.

## 5.4 Resultat

### 5.4.1 Vilka brister har dagens beräkningsmetoder av ljud från vindkraftverk enligt modern forskning?

- Spridningen av vindkraftsljud underskattas.
- Vissa meteorologiska effekter inkluderas inte, såsom refraktion.
- Beräkningsmodellerna tycks inte representera verkligheten i tillräcklig grad.
- Det sätt som ekvivalenta ljudnivåer används nu riskerar att "gömma" starka ljud
- A-vägda ljudnivåer ignorerar lågfrekventa ljudkomponenter

### 5.4.2 Hur kan dagens metoder utvecklas för att eliminera eller avhjälpa bristerna som finns nu?

- Ett minsta avstånd från vindkraftverk till bostäder behövs. 2 km är föreslaget.
- Riktvärdet kan behöva revideras, exempelvis som det förslag Larsson (2014) lade fram där ljudet i immissionspunkten ska vara under 40 dBA för 90 % av tiden.
- Resultatet av en bulleranalys måste beskriva när vindkraftsljudet är tydligt
- En analyserande och filtrerande algoritm kan radera ovidkommande delar i immissionsinspelning.

### 5.4.3 Vilken potential finns i att låta en algoritm ta fram vindkraftsljud i en immissionsinspelning?

- Mycket god potential.
- En stor del av oönskat ljud raderas från inspelningen och vindkraftsljudet återkommer med tydlig rytmisk amplitudmodulation.
- Mer representativt för verkliga förhållanden där boende i närheten av ett vindkraftverk kan känna sig störda.
- Oönskade ljud kan dock råka misstas för vindkraftsljud och vice versa.
- Användningsmöjligheten för vindkraftparker är okänt.

## 5.5 Koppling till målet

Detta examensarbete visar en översikt av den diskussion som förs kring vindkraftverkens bullerpåverkan på allmänheten. De vanligaste beräkningsmodellerna för ljudnivåer hos en mottagare (immissionspunkt), SEPA och Nord2000, har visat sig stämma dåligt med verkligheten. Det ljud som når immissionspunkten är sällan precis det som beräknades. Vid vissa tillfällen hörs inte vindkraftsljudet alls och i vid andra tillfällen är det mycket tydligt. Genom att använda en algoritm som i en immissionsinspelning rensar bort partier där vindkraftverket inte hörs framhävs vindkraftsljudet och representerar därför det störande ljudet bättre. Potentialen hos en sådan algoritm har visat sig vara god.

## **6 Diskussion och slutsatser**

---

*Detta kapitel ger en inblick i hur författaren ser på sitt resultat och val av metoder och begränsningar. Förslag till ytterligare forskning presenteras.*

---

### **6.1 Resultatdiskussion**

Detta arbete har utformats i syfte för att belysa de brister som finns för dagens metoder för att bestämma nivåer för vindkraftsbuller vid bostäder eller andra intressanta områden. Det har varit författarens strävan att arbetet ska vara lättförståeligt för den oinvidde, och därför har stor tid och möda lagts ner för att uppnå det.

Resultaten visar att det finns stora brister i hur bestämmandet av vindkraftsbuller går men att det finns åtgärder som kan vidtas för att lindra dessa brister. Det finns dock ett par frågor som författaren hade velat få svar på. Naturvårdsverkets motivering till sin hantering och syn på vindkraftsljud var svårfunnen. Den hade varit intressant att hitta då Furuholm och Hultbergs (2013) och Larsson (2014) påvisar uppenbara brister i dagens beräkningsmetoder vilka osannolikt blivit upptäckta för endast ett par år sedan. Människor har känt sig störda av vindkraftsljud långt innan dessa rapporter ens påbörjades (Pedersen, 2004).

Algoritmens resultat kan diskuteras utifrån flera olika punkter. Kan den verkligen användas som argument för att utveckla en mer komplicerad algoritm eftersom den endast har applicerats inom en mycket kontrollerad miljö? Är det syntetiska vindkraftverksljudet representativt för ett verkligt? Validiteten kan anses vara god då det är högst relevant att undersöka om det går att radera delar ur en inspelning. Dock kan reliabiliteten ifrågasättas i och med experimentets kontrollerade testmiljö. Detta gör att det inte går att använda resultaten i tabell 4 som ett svar på hur stor skillnad i dB som erhålls i om algoritmen skulle appliceras på en verklig inspelning.

### **6.2 Metoddiskussion**

Diskussionen kring bullret från vindkraftverk och dess påverkan på människor känns väldigt polariserad. Naturvårdsverkets rapporter påstår att immissionberäkningar är bättre medan flera studier säger att det inte stämmer. En del forskare menar att det finns hälsorisker med vindkraftsljud även inom gränsvärdena medan andra säger att det inte gör det. Infraljud kan vara farligt enligt vissa men är helt ofarligt enligt andra. Att sortera mellan varje påstående och öka informationen om det, i linje med metodiken som beskrivs av Eriksson et. al (2013), har visat sig vara svårare än vad författaren av detta examensarbete hade räknat med.

Larssons (2014) rapport visar på mycket intressanta påståenden. Dock är det svårt att acceptera slutsatserna i den på grund av rapportens otydlighet. Förhoppningsvis blir otydligheterna åtgärdade i den kompletta versionen.

Den starkt kontrollerade miljön som algoritmen testades i var ursprungligen inte tanken, men på grund av ett flertal yttre omständigheter var förutsättningarna för utformningen av algoritmen sådana att det var omöjligt att utveckla den ytterligare. Detta är beklagligt, men det är författaren förhoppning att läsaren ändå förstått potentialen med att låta vindkraftsljud i immissionspunkten spelas in och analyseras av ett datorprogram.

### **6.3 Begränsningar**

Avgränsningarna lades fram så att arbetet kretsade kring landbaserade, enstaka vindkraftverk och hur beräkningsmodellerna Nord2000 och SEPA betraktar ljudutbredningen. Detta var en väl avvägd avgränsning.

Arbetet var utformat för att en som aldrig läst om emission och immission från vindkraft ska kunna skaffa sig en kunskapsbas om ämnet. På grund av detta bestod en stor del av arbetet att grundligt förklara vissa termer och metodiker, samtidigt som en del sammanfattas mycket kort, t.ex. Nord2000 i kap 3.2.8.2. Arbetets storlek ökade därför och tog tid från andra delar, som algoritmens utformning. Det kan ha varit fördelaktigt att istället hänvisa nya läsare till material som kan introducera dem för vindkraftsakustik istället för att ge en stor mängd grundinformation här i detta arbete.

### **6.4 Slutsatser och rekommendationer**

Forskning kring både hur ljud breder ut sig i naturen och hur de påverkar människor måste fortsätta.

En satsning för att utveckla en algoritm som isolerar vindkraftsljud kan visa sig vara ett kraftfullt verktyg i bygglovsprocessen. Med det kan en starkare motivering till varför en vindkraftspark ska kunna placeras i ett särskilt område erhållas.

### **6.5 Förslag till vidare forskning**

Den nya algoritmens arbets sätt måste anpassas så att den kan identifiera vindkraftsljud och sortera bort bakgrundsljud mer effektivt än den grova algoritmen som presenterats här. Vilka indikatorer som ska användas för identifikationen måste tas fram.

Vindkraftsljud är varierande i både frekvensomfång och amplitudmodulation. En avancerad algoritm ska kunna identifiera vindkraftskomponenten i en inspelning utan att variationen blir ett problem. Alltså behöver den ”lära” sig hur ett vindkraftsljud låter och utifrån det avgöra när det inträffar eller inte.

Tekniken som behandlar denna problematik finns redan i form av mjukvaror för röstigenkänning. Mjukvaror lär sig rösten som en person har och kan känna igen den bland en mängd andra röster med helt olika amplitudmodulationer och frekvensomfång.

Hypotetiskt borde samma teknik kunna appliceras på igenkänning av vindkraftsljud.

## Referenser

- Almgren, Martin. (2006). *Ljud från vindkraft – Utredning inför Naturvårdsverkets allmänna råd*. Elforsk, Stockholm
- Bolin, K., Nilsson, M. E., & Bluhm, G. (2012). *Projektrapport: Upplevd störning av vindkraftsbuller, en jämförande studie av ljud från olika turbiner*. KTH. Stockholm
- Bolin, K., Nilsson, M. E., & Khan, S. (2010). The potential of natural sounds to mask wind turbine noise. *Acta Acustica united with Acustica*, 96(1), 131-137.
- Ejvegård, Rolf (2009). *Vetenskaplig metod*. 4. uppl. Lund: Studentlitteratur
- Eriksson Barajas, K., Forsberg, C. & Wengström, Y. (2013). *Systematiska litteraturstudier i utbildningsvetenskap: vägledning vid examensarbeten och vetenskapliga artiklar*. 1. utg. Stockholm: Natur & Kultur
- Farboud, A., Crunkhorn, R., & Trindade, A. (2013). 'Wind turbine syndrome': fact or fiction?. *The Journal of Laryngology & Otology*, 127(03), 222-226.
- Field, A. & Hole, G. (2003). *How to design and report experiments*. London: SAGE
- Furuholm, H., Hultberg, K. (2013) *Noise Immission from wind farms*. Chalmers Tekniska Högskola. Master's Thesis 2013:112. Göteborg.
- Girden, E. (2001). *Evaluating research articles: from start to finish*. 2. ed. Thousand Oaks, Calif.: Sage
- IEC 61400-11. International Standard. *Wind turbine generator systems – Part 11: Acoustic noise measurement techniques*.
- Larsson, C. (2014). *Ljud från vindkraftverk, modell-validering-mätning: Slutrapport Energimyndighetens projekt 32437-1*. Elforsk, Stockholm.
- Ljunggren, S. (1998). *Mätning av bullerimmission från vindkraftverk*.
- Naturvårdsverket. (2010) *Ljud från vindkraftverk*, Naturvårdsverket: Reviderad utgåva 6241. Stockholm
- Naturvårdsverket. (2013). *Mätning och beräkning av ljud från vindkraft*, Naturvårdsverket. Stockholm
- NFS 2003:3. Naturvårdsverkets författningssamling
- Nilsson, M. E., Bluhm, G., Eriksson, G., Bolin, K., Lindkvist, P., Martin Almgren, Å. I., ... & Boué, M. (2011). *Kunskapssammanställning om infra-och lågfrekvent ljud från vindkraftsanläggningar: Exponering och hälsoeffekter*, Slutrapport till Naturvårdsverket.
- Nissenbaum, M. A., Aramini, J. J., & Hanning, C. D. (2012). Effects of industrial wind turbine noise on sleep and health. *Noise and Health*, 14(60), 237.
- Pedersen, E., & Halmstad, H. I. (2003). *Noise annoyance from wind turbines: a review*. Naturvårdsverket.
- Pedersen, E., & Wayne, K. P. (2004). Perception and annoyance due to wind turbine noise—a dose-response relationship. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 116(6), 3460-3470.
- Pedersen, Eja, LR-M. Hallberg, and K. Persson Wayne. "Living in the vicinity of wind turbines—a grounded theory study." *Qualitative Research in Psychology* 4.1-2 (2007): 49-63.
- Salt, A. N., & Hullar, T. E. (2010). Responses of the ear to low frequency sounds, infrasound and wind turbines. *Hearing research*, 268(1), 12-21.
- Shepherd, D., McBride, D., Welch, D., Dirks, K. N., & Hill, E. M. (2011). Evaluating the impact of wind turbine noise on health-related quality of life. *Noise and Health*, 13(54), 333.
- Svevind. *Vindkraftsparket Piteå – Den första privata som ansluts direkt till stamnät*. 2013. <http://www.svevind.se/News/NewsEntry.aspx?newsEntryID=396> (hämtad 2015-01-28)

- Theodoros G., Aggelos P., (2014). *Introduction to Audio Analysis* [Elektronisk resurs]. 1 Academic Press
- Thorén, Johanna. (2009). *Simulering av vindkraftljud med beräkningsmodellen Nord2000*. Institutionen för geovetenskaper, Luft-, vatten och landskapslära, Uppsala Universitet. Examensarbete 30 hp. Uppsala.
- van den Berg, F., Pedersen, E., Bouma, J., & Bakker, R. (2008). *Visual and acoustic impact of wind turbine farms on residents: Final report*.
- van den Berg, G. P. (2004). Effects of the wind profile at night on wind turbine sound. *Journal of sound and vibration*, 277(4), 955-970.
- Vindkraftsbranschen. *Vindkraftstatistik och prognos*. 2014. <http://www.vindkraftsbranschen.se/wp-content/uploads/2014/10/Statistik-vindkraft-kvartal-3-2014-20141015.pdf> (hämtad 2015-01-28)
- Vindlov. *Plan och bygglagen*. 2012. <http://www.vindlov.se/sv/Lagar--regler/Lagar-forordningar--foreskrifter/Plan--och-bygglagen/> (hämtad 2015-04-17)
- Zmijewski, Nicholas. (2010) *Ljudemission från vindkraftverk*. Institutionen för informations-teknologi, Uppsala Universitet, Examensarbete 30 hp. Uppsala.



## Bilagor

### Matlab scripts

#### Testgroundfilter.m

```

clear all
close all
[S,fsamp] = audioread('[filnamn]');
ftype = 0;
fr = 200; %200 Hz ger tydligt kraftverksljud från inspelningen
wlen = 1024;
nfft = 4192;
ljudfilter(S, fr, ftype, fsamp);

Sf = ans;

peakfinder(Sf,0.22,0.05)

[peakLoc] = peakfinder(Sf,0.22,0.05);
SfPeak = [peakLoc];
clear [peakLoc]
M = S(SfPeak) % signalstyrka i originalet i varje peakpunkt. Detta
kan användas för en ny runda för peakfindern.
[peakLoc]=peakfinder(M); %Leta upp topparna i peakvektorn
SfPeakPos = SfPeak(peakLoc); %Positionerna för de samples där topparna
uppkommer i originalsignalen S
clear peakLoc
S2=S; %Originalsignalen dupliceras
puls=1.2*fsamp %varje puls, eller swoosh, är x.x sek. Det ger en
längd på såhär många samples
for n=[1:length(SfPeakPos)-1]
    if (SfPeakPos (n+1) -SfPeakPos (n)>puls)
        S2 ([SfPeakPos (n)+puls/2:SfPeakPos (n+1)-puls/2]) = [0];
        disp('Något görs här')
    else
        disp('Inget görs i elementet')
    end
end
end
S2(S2 == 0) = [];
%Dags att ta fram medelvärdena!
S_medel = mean(S);
S_medel = 20*log10(S_medel + 1e-6);
S2_medel = mean(S2);
S2_medel = 20*log10(S2_medel + 1e-6);
S_medel-S2_medel
spectrogrammathon(S,Sf,fsamp);
%% define analysis parameters
Sflen = length(S2); % length of the signal
wlen = 1024; % window length
h = wlen/4; % hop size
nfft = 4192; % number of fft points
% define the coherent amplification of the window
K = sum(hamming(wlen, 'periodic'))/wlen;
% perform STFT
[s, f, t] = stft(S2, wlen, h, nfft, fsamp);
% take the amplitude of fft(x) and scale it, so not to be a
% function of the length of the window and its coherent amplification
s = abs(s)/wlen/K;
if rem(nfft, 2) % odd nfft excludes Nyquist point

```



```
st(2:end, :) = s(2:end, :).*2;
else % even nfft includes Nyquist point
st(2:end-1, :) = s(2:end-1, :).*2;
end
% convert amplitude spectrum to dB (min = -120 dB)
s = 20*log10(s + 1e-6);
% plot the spectrogram
figure(3)
imagesc(t, f, s);
set(gca, 'YDir', 'normal')
set(gca, 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 14)
xlabel('Tid, s')
ylabel('Frekvens, Hz')
title('Amplitudspektrum över behandlad inspelning')
handl = colorbar;
set(handl, 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 14)
```

### Peakfinder.m

```
function varargout = peakfinder(x0, sel, thresh, extrema,
include_endpoints)
%PEAKFINDER Noise tolerant fast peak finding algorithm
% INPUTS:
% x0 - A real vector from the maxima will be found
(required)
% sel - The amount above surrounding data for a peak to be
identified (default = (max(x0)-min(x0))/4). Larger values
mean
the algorithm is more selective in finding peaks.
% thresh - A threshold value which peaks must be larger than
to be
maxima or smaller than to be minima.
% extrema - 1 if maxima are desired, -1 if minima are
desired
(default = maxima, 1)
% include_endpoints - If true the endpoints will be included
as
possible extrema otherwise they will not be included
(default = true)
% OUTPUTS:
% peakLoc - The indicies of the identified peaks in x0
% peakMag - The magnitude of the identified peaks
%
% [peakLoc] = peakfinder(x0) returns the indicies of local maxima
that
are at least 1/4 the range of the data above surrounding
data.
%
% [peakLoc] = peakfinder(x0,sel) returns the indicies of local
maxima
that are at least sel above surrounding data.
%
% [peakLoc] = peakfinder(x0,sel,thresh) returns the indicies of
local
maxima that are at least sel above surrounding data and
larger
(smaller) than thresh if you are finding maxima (minima).
%
% [peakLoc] = peakfinder(x0,sel,thresh,extrema) returns the maxima
of the
data if extrema > 0 and the minima of the data if extrema
< 0
```

```
%
% [peakLoc, peakMag] = peakfinder(x0,...) returns the indices of
the
%     local maxima as well as the magnitudes of those maxima
%
% If called with no output the identified maxima will be plotted
along
%     with the input data.
%
% Note: If repeated values are found the first is identified as the
peak
%
% Ex:
% t = 0:.0001:10;
% x = 12*sin(10*2*pi*t)-3*sin(.1*2*pi*t)+randn(1,numel(t));
% x(1250:1255) = max(x);
% peakfinder(x)
%
% Copyright Nathanael C. Yoder 2011 (nyoder@gmail.com)
% Perform error checking and set defaults if not passed in
error(nargchk(1,5,nargin,'struct'));
error(nargoutchk(0,2,nargout,'struct'));
s = size(x0);
flipData = s(1) < s(2);
len0 = numel(x0);
if len0 ~= s(1) && len0 ~= s(2)
    error('PEAKFINDER:Input','The input data must be a
vector')
elseif isempty(x0)
    varargout = {[[],[]]};
    return;
end
if ~isreal(x0)
    warning('PEAKFINDER:NotReal','Absolute value of data will
be used')
    x0 = abs(x0);
end
if nargin < 2 || isempty(sel)
    sel = (max(x0)-min(x0))/4; %Delat med 4 är
grundinställningen
elseif ~isnumeric(sel) || ~isreal(sel)
    sel = (max(x0)-min(x0))/4;
    warning('PEAKFINDER:InvalidSel',...
        'The selectivity must be a real scalar. A selectivity of
%.4g will be used',sel)
elseif numel(sel) > 1
    warning('PEAKFINDER:InvalidSel',...
        'The selectivity must be a scalar. The first selectivity
value in the vector will be used.')
    sel = sel(1);
end
if nargin < 3 || isempty(thresh)
    thresh = [];
elseif ~isnumeric(thresh) || ~isreal(thresh)
    thresh = [];
    warning('PEAKFINDER:InvalidThreshold',...
        'The threshold must be a real scalar. No threshold will be
used.')
elseif numel(thresh) > 1
    thresh = thresh(1);
    warning('PEAKFINDER:InvalidThreshold',...
```

```

    'The threshold must be a scalar. The first threshold value in
the vector will be used.')
end
if nargin < 4 || isempty(extrema)
    extrema = 1;
else
    extrema = sign(extrema(1)); % Should only be 1 or -1 but
make sure
    if extrema == 0
        error('PEAKFINDER:ZeroMaxima','Either 1 (for maxima) or -1
(for minima) must be input for extrema');
    end
end
if nargin < 5 || isempty(include_endpoints)
    include_endpoints = true;
else
    include_endpoints = boolean(include_endpoints);
end
x0 = extrema*x0(:); % Make it so we are finding maxima regardless
thresh = thresh*extrema; % Adjust threshold according to extrema.
dx0 = diff(x0); % Find derivative
dx0(dx0 == 0) = -eps; % This is so we find the first of repeated
values
ind = find(dx0(1:end-1).*dx0(2:end) < 0)+1; % Find where the
derivative changes sign
% Include endpoints in potential peaks and valleys as desired
if include_endpoints
    x = [x0(1);x0(ind);x0(end)];
    ind = [1;ind;len0];
    minMag = min(x);
    leftMin = minMag;
else
    x = x0(ind);
    minMag = min(x);
    leftMin = x0(1);
end
% x only has the peaks, valleys, and possibly endpoints
len = numel(x);
if len > 2 % Function with peaks and valleys
    % Set initial parameters for loop
    tempMag = minMag;
    foundPeak = false;

    if include_endpoints
        % Deal with first point a little differently since tacked
it on
        % Calculate the sign of the derivative since we tacked the
first
        % point on it does not necessarily alternate like the
rest.
        signDx = sign(diff(x(1:3)));
        if signDx(1) <= 0 % The first point is larger or equal to
the second
            if signDx(1) == signDx(2) % Want alternating signs
                x(2) = [];
                ind(2) = [];
                len = len-1;
            end
            else % First point is smaller than the second
            if signDx(1) == signDx(2) % Want alternating signs
                x(1) = [];
            end
        end
    end
end

```

```

                                ind(1) = [];
                                len = len-1;
                                end
                                end
                                end

                                % Skip the first point if it is smaller so we always start
on a                                % maxima
                                if x(1) >= x(2)
                                ii = 0;
                                else
                                ii = 1;
                                end

                                % Preallocate max number of maxima
                                maxPeaks = ceil(len/2);
                                peakLoc = zeros(maxPeaks,1);
                                peakMag = zeros(maxPeaks,1);
                                cInd = 1;
                                % Loop through extrema which should be peaks and then
valleys                                while ii < len
                                ii = ii+1; % This is a peak
                                % Reset peak finding if we had a peak and the next peak is
bigger                                % than the last or the left min was small enough to
reset.                                if foundPeak
                                tempMag = minMag;
                                foundPeak = false;
                                end

                                % Make sure we don't iterate past the length of our vector
                                if ii == len
loop                                    break; % We assign the last point differently out of the
                                end

                                % Found new peak that was lager than temp mag and
selectivity larger                    % than the minimum to its left.
                                if x(ii) > tempMag && x(ii) > leftMin + sel
                                tempLoc = ii;
                                tempMag = x(ii);
                                end

                                ii = ii+1; % Move onto the valley
                                % Come down at least sel from peak
                                if ~foundPeak && tempMag > sel + x(ii)
                                foundPeak = true; % We have found a peak
                                leftMin = x(ii);
                                peakLoc(cInd) = tempLoc; % Add peak to index
                                peakMag(cInd) = tempMag;
                                cInd = cInd+1;
                                elseif x(ii) < leftMin % New left minima
                                leftMin = x(ii);
                                end
                                end

```

```

    % Check end point
    if include_endpoints
        if x(end) > tempMag && x(end) > leftMin + sel
            peakLoc(cInd) = len;
            peakMag(cInd) = x(end);
            cInd = cInd + 1;
        elseif ~foundPeak && tempMag > minMag % Check if we still
need to add the last point
            peakLoc(cInd) = tempLoc;
            peakMag(cInd) = tempMag;
            cInd = cInd + 1;
        end
        elseif ~foundPeak
            if tempMag > x0(end) + sel
                peakLoc(cInd) = tempLoc;
                peakMag(cInd) = tempMag;
                cInd = cInd + 1;
            end
        end

    % Create output
    peakInds = ind(peakLoc(1:cInd-1));
    peakMags = peakMag(1:cInd-1);
else % This is a monotone function where an endpoint is the only peak
    [peakMags,xInd] = max(x);
    if include_endpoints && peakMags > minMag + sel
        peakInds = ind(xInd);
    else
        peakMags = [];
        peakInds = [];
    end
end

% Apply threshold value. Since always finding maxima it will always
be
% larger than the thresh.
if ~isempty(thresh)
    m = peakMags>thresh;
    peakInds = peakInds(m);
    peakMags = peakMags(m);
end

% Rotate data if needed
if flipData
    peakMags = peakMags.';
    peakInds = peakInds.';
end

% Change sign of data if was finding minima
if extrema < 0
    peakMags = -peakMags;
    x0 = -x0;
end

% Plot if no output desired
if nargout == 0
    if isempty(peakInds)
        disp('No significant peaks found')
    else
        figure;
        plot(1:len0,x0,'.-',peakInds,peakMags,'ro','linewidth',2);
    end
else
    varargout = {peakInds,peakMags};
end
end

```

**Ljudfilter.m**

Detta script publiceras inte på Akustikverkstans begäran.

**stft.m**

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               Short-Time Fourier Transform           %
%                               with MATLAB Implementation             %
%                               %                                       %
% Author: M.Sc. Eng. Hristo Zhivomirov      12/21/13 %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [stft, f, t] = stft(x, wlen, h, nfft, fs)
% function: [stft, t, f] = mystftfun(x, fs, wlen, h, nfft)
% x - signal in the time domain
% wlen - length of the hamming window
% h - hop size
% nfft - number of FFT points
% fs - sampling frequency, Hz
% f - frequency vector, Hz
% t - time vector, s
% stft - STFT matrix (time across columns, freq across rows)
% represent x as column-vector if it is not
if size(x,2) > 1
    x = x';
end
% length of the signal
xlen = length(x);
% form a periodic hamming window
win = hamming(wlen, 'periodic');
% form the stft matrix
rown = ceil((1+nfft)/2);           % calculate the total number of
rows                                  rows
coln = 1+fix((xlen-wlen)/h);      % calculate the total number of
columns                               columns
stft = zeros(rown, coln);         % form the stft matrix
% initialize the indexes
indx = 0;
col = 1;
% perform STFT
while indx + wlen <= xlen
    % windowing
    xw = x(indx+1:indx+wlen).*win;

    % FFT
    X = fft(xw, nfft);

    % update the stft matrix
    stft(:,col) = X(1:(rown));

    % update the indexes
    indx = indx + h;
    col = col + 1;
end
% calculate the time and frequency vectors
t = (wlen/2:h:xlen-wlen/2-1)/fs;
f = (0:rown-1)*fs/nfft;
end

```

**Spectrogrammation.m**

```
function [SPCTR]=spectrogrammation(S, Sf, fsamp)
```

```

Sflen = length(S);           % length of the signal
wlen = 1024;                 % window length (recomended to be
power of 2)
h = wlen/4;                  % hop size (recomended to be
power of 2)
nfft = 4192;                 % number of fft points
(recomended to be power of 2)
% define the coherent amplification of the window
K = sum(hamming(wlen, 'periodic'))/wlen;
% perform STFT
[s, f, t] = stft(S, wlen, h, nfft, fsamp);
% take the amplitude of fft(x) and scale it, so not to be a
% function of the length of the window and its coherent amplification
s = abs(s)/wlen/K;
% correction of the DC & Nyquist component
if rem(nfft, 2)              % odd nfft excludes Nyquist point
    st(2:end, :) = s(2:end, :).*2;
else                          % even nfft includes Nyquist point
    s(2:end-1, :) = s(2:end-1, :).*2;
end
% convert amplitude spectrum to dB (min = -120 dB)
s_medel = mean(s);
s_medel = 20*log10(s_medel + 1e-6);
% formatSpec = 'Medelvärde för dB innan s översattes till dB är
%2.2f';
% fprintf(formatSpec,s_medel)
% clear formatSpec
s = 20*log10(s + 1e-6);
% formatSpec = 'Medelvärde för dB efter s översattes till dB är
%2.2f';
% fprintf(formatSpec,s)
% clear formatSpec
% plot the spectrogram
figure(1)
imagesc(t, f, s);
set(gca, 'YDir', 'normal')
set(gca, 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 14)
xlabel('Tid, s')
ylabel('Frekvens, Hz')
title('Amplitudspektrum över den ofiltrerade signalen')
handl = colorbar;
set(handl, 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 14)
clear s f t wlen nfft h
% [x, fs] = audioread('Brus NO REV_MONO_LOFi.wav'); % get the
samples of the .wav file
% x = x(:, 1); % get the first channel
% xmax = max(abs(x)); % find the maximum abs value
% x = x/xmax; % scaling the signal
% define analysis parameters
Sflen = length(Sf); % length of the signal
wlen = 1024; % window length (recomended to be
power of 2)
h = wlen/4; % hop size (recomended to be
power of 2)
nfft = 4192; % number of fft points
(recomended to be power of 2)
% define the coherent amplification of the window
K = sum(hamming(wlen, 'periodic'))/wlen;
% perform STFT
[s, f, t] = stft(Sf, wlen, h, nfft, fsamp);
% take the amplitude of fft(x) and scale it, so not to be a

```

```
% function of the length of the window and its coherent amplification
s = abs(s)/wlen/K;
% correction of the DC & Nyquist component
if rem(nfft, 2) % odd nfft excludes Nyquist point
    st(2:end, :) = s(2:end, :).*2;
else % even nfft includes Nyquist point
    s(2:end-1, :) = s(2:end-1, :).*2;
end
% convert amplitude spectrum to dB (min = -120 dB)
s = 20*log10(s + 1e-6);
% plot the spectrogram
figure(2)
imagesc(t, f, s);
set(gca, 'YDir', 'normal')
set(gca, 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 14)
xlabel('Tid, s')
ylabel('Frekvens, Hz')
title('Amplitudspektrum av filtrerad signal')
handl = colorbar;
set(handl, 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 14)
clear s f t wlen nfft h
end
```