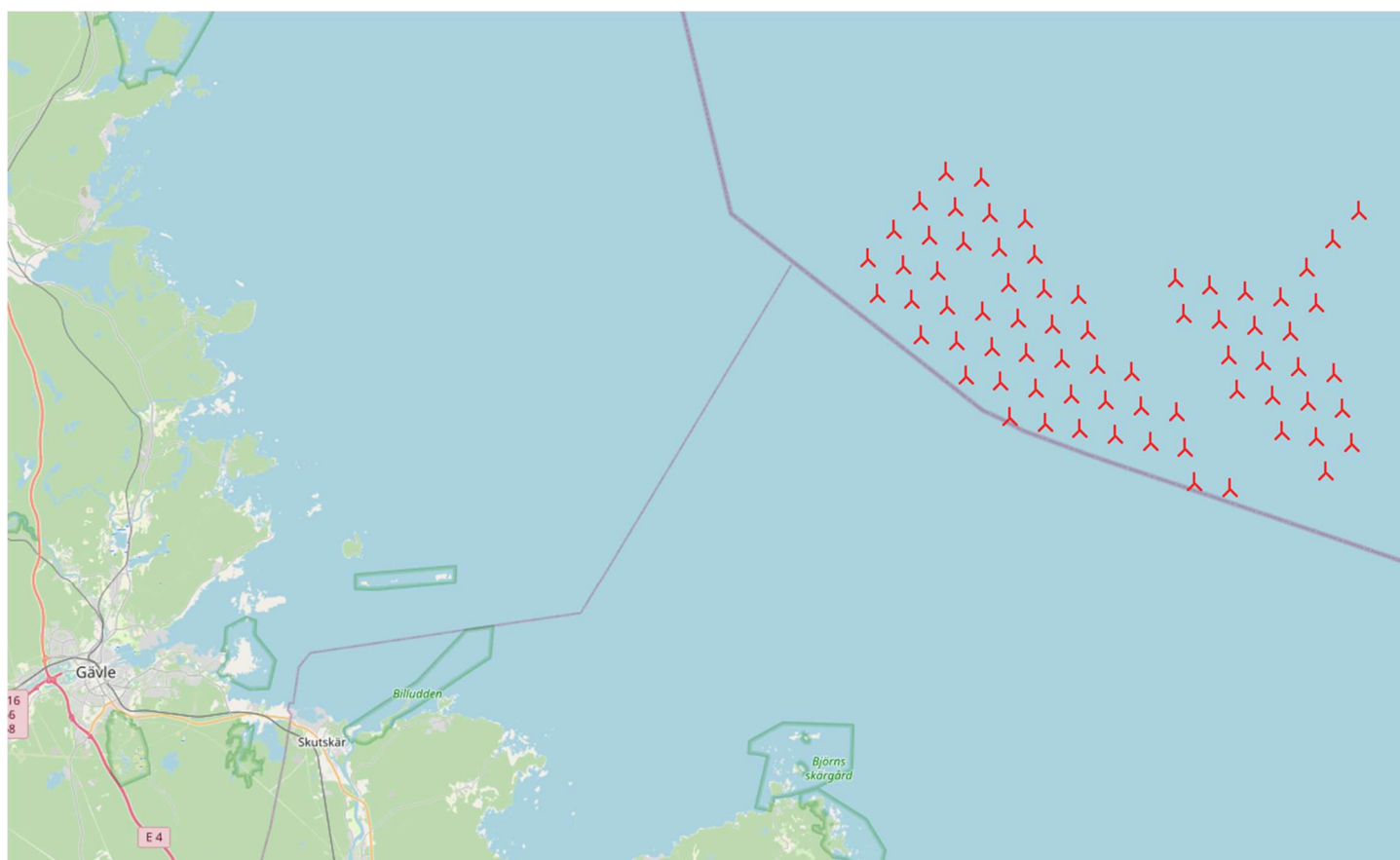


Deep Wind Offshore

# ► Olof Skötkonung

Bullerberäkningar

Oppdragsnr.: 1087453 Dokumentnr.: 6002-KVT-Z-RA-0001, KVT/2023/R122 Versjon: J02 Dato: 2023-12-06



**Kund:** Deep Wind Offshore  
**Kundkontakt:** Apurva Jain  
**Rådgivare:** Norconsult Sverige AB, Hantverkargatan 5K, 112 21 Stockholm  
**Oppdragsledare:** Hanna Sabelström

J02	2023-12-06	Updated turbine dimensions	Märta Selander	Inge Hommedal	Erik Åslund
J01	2023-12-01	Updated turbine dimensions	Märta Selander	Inge Hommedal	Erik Åslund
C01	2023-10-11	Draft version for comments from Client	Märta Selander, Hanna Sabelström	Inge Hommedal	-
Versjon	Dato	Beskrivelse	Utarbeidet	Fagkontrollert	Godkjent

This document has been prepared solely for the client. No third party may rely on the document and Norconsult Sverige AB shall have no liability towards any third party.

## ► Sammanfattning

I samband med planering av en framtida offshore vindkraftpark utanför Gävle i Gästrikland har ljudnivåerna från vindkraftverken och in mot land beräknats av Kjeller Vindteknikk (KVT).

På grund av generell brist på ljuddata från offshore-turbiner har denna analys baserats på ljuddata från vindkraftverk (turbiner) av mindre storlek som sedan har använts för att estimeras buller från de framtida, större vindkraftverken.

Rapporten innehåller fördjupande information om ljudutbredning över hav samt en kort sammanfattning av dagens kunskap kring buller från vindkraftsparker till havs.

Det har skapats en bullerkarta för en layout bestående av 70 stycken 20 MW turbiner. Ljudnivåerna för turbinerna har uppskattats eftersom det *inte* finns data tillgänglig från turbintillverkarna. 20 MW turbinen har en uppskattad ljudeffektnivå på  $L_{WA} = 115,4$  dB. Resultaten visar att bullernivån på land är långt under Naturvårdsverkets riktvärde på  $L_{Aeq} = 35$  dB. Beräkningarna visar att gränsen där  $L_{Aeq} = 35$  dB ligger mellan 20-40 km från land.

När det har beslutats vilken turbintyp som ska användas i en realisering av projektet behöver en ny analys utföras med faktisk ljuddata från turbinleverantör. Enligt överenskommelse med kund har KVT använt NORD2000 för beräkning av ljudnivån enligt Naturvårdsverkets rekommendationer (Naturvårdsverket, 2020-12-01).

## ► Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>5</b>
	<b>Buller från stora vindkraftverk till havs</b>	<b>7</b>
1.1	Allmänt om buller från stora vindkraftverk	7
1.2	Ljudutbredning över hav från vindkraftverk	7
1.2.1	<i>Lite om buller från vindkraftsparker vs. buller från enskilda vindkraftverk</i>	8
1.2.2	<i>Lite om potentiella akustiska- och psykoakustiska effekter av havsvågor</i>	8
1.2.3	<i>Vindprognos som möjlig åtgärd mot buller</i>	9
1.3	Uppskattning av oktavdata för framtida stora vindkraftverk	10
<b>2</b>	<b>Bullerberäkningar</b>	<b>12</b>
2.1	Svenska bullergränser	12
2.2	NORD2000	12
<b>3</b>	<b>Resultat</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>Referenser</b>	<b>15</b>

# 1 Inledning

Deep Wind Offshore (DWO), kunden, planerar en offshore vindkraftpark nordväst om Gävle. Kjeller Vindteknikk (KVT) har fått i uppdrag att i tidig fas utföra ljudberäkningar för att undersöka ljudutbredningen in mot land.

Området för den tänkta vindkraftsparken ligger ca 35 km från kusten och visas i Figur 5. Området ligger utanför den svenska territorialgränsen, som går ca. 22,2 km från kusten, men tydligt innanför Sveriges ekonomiska zon.

Vinden blåser huvudsakligen från land, med dominerande vindriktningar från sydväst och sydsydväst (Figur 1). Det är en liten andel vind som utgör pålandsvind, vilket är den mest kritiska vindriktningen när det gäller ljudutbredningen från vindkraftsparken in mot land.

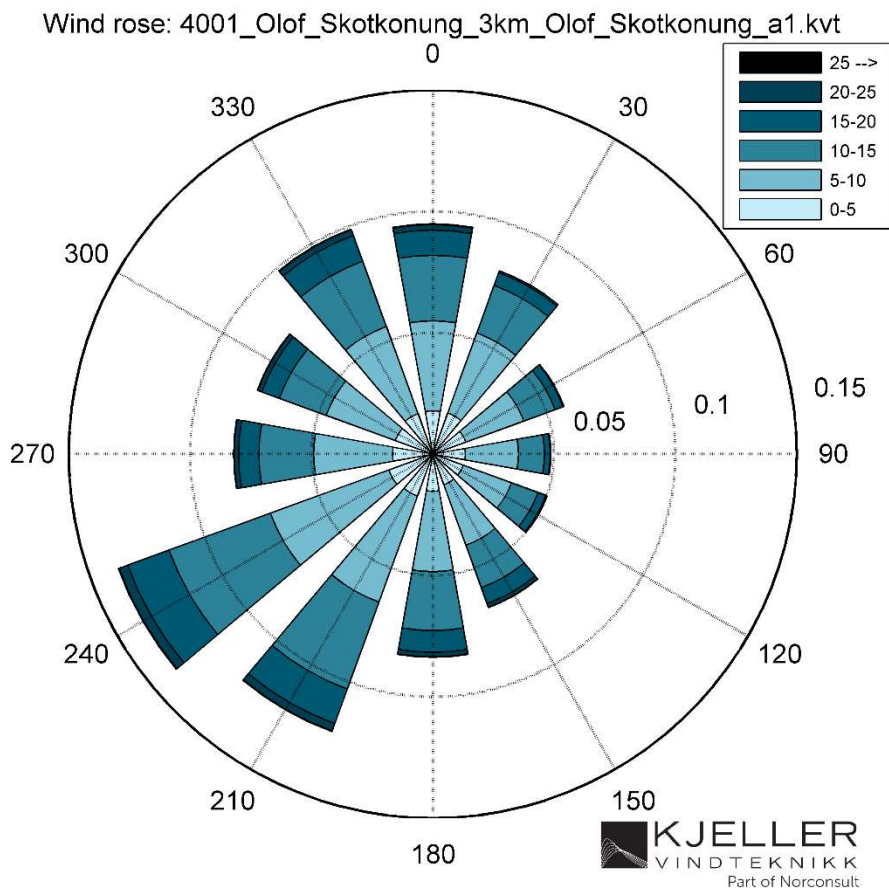
Det har antagits att det ska användas en turbinstorlek som ännu *inte* finns tillgänglig på marknaden, med en effekt på 20 MW. En översikt över layoutalternativet visas i Tabell 1.

Ljuddata från offshore-turbiner av denna storlek finns idag *inte* tillgänglig och därför har ljuddata för dessa framtida turbinstorlekar uppskattats genom estimering från tillgänglig data från mindre vindkraftverk, detta beskrivs närmre i avsnitt 1.3.

Resultaten från ljudberäkningarna presenteras i avsnitt 4 i form av en bullerkarta.

Tabell 1: Översikt över layouten med antagen turbinstorlek på 20 MW.

Installerad effekt per turbin [MW]	Antal turbiner	Rotordiameter [m]	Navhöjd [m]
20	70	330	205



Figur 1: Beräknad vindros for perioden 2000 – 2021. Vindrosen är beräknad i 10 m höjd över marken och är baserad på WRF3km-data. Färgkoden på vindrosen visar vindhastighet som 10 min medelvind [m/s]. Längden på varje sektorstolpe visar andelen av tid med vind från given riktning. Norr motsvarar 0 °.

# Buller från stora vindkraftverk till havs

## 1.1 Allmänt om buller från stora vindkraftverk

Buller från vindkraftverk kan beskrivas som bredbandigt ljud, dvs ljudet innehåller energi från många olika frekvenser. Låg-frekvensdelen av ljudet orsakas av de stora komponenterna på ett vindkraftverk, såsom rotorblad och torn. Med ökande storlek på dessa delar ökar också den delen av ljudet som är lågfrekvent. Detta har med geometri och fysik att göra, och är därmed oberoende av fabrikat. Det kan därför förväntas att framtida och större vindkraftverk kommer att ge mer lågfrekvent buller än dagens vindkraftverk.

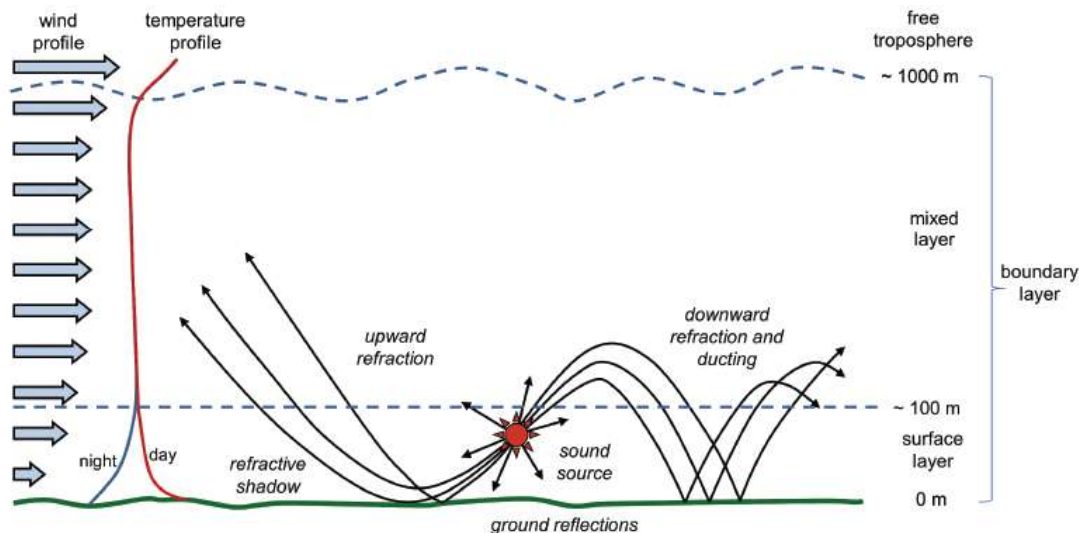
Lågfrekvent buller har mindre dämpning över avstånd än vad buller i mellan- och högfrekvensspektrumet har. Under annars lika villkor kommer alltså framtida stora vindkraftverk att orsaka buller över ett större geografiskt område än dagens vindkraftverk. Detta faktum kan få konsekvenser för bland annat;

1. Val av beräkningsmetod för ljudutbredning över stora avstånd. Beräkningsmetoden måste kunna hantera utbredning av lågfrekvent ljud över hav på ett bra sätt.
2. Hantering av buller inomhus från vindkraftverk (Bolin, et al., 2014).

## 1.2 Ljudutbredning över hav från vindkraftverk

Det är känt att ljud sprider sig bra över hav, framförallt i medvind. Det finns flera orsaker till en så effektiv ljudutbredning, de två viktigaste är:

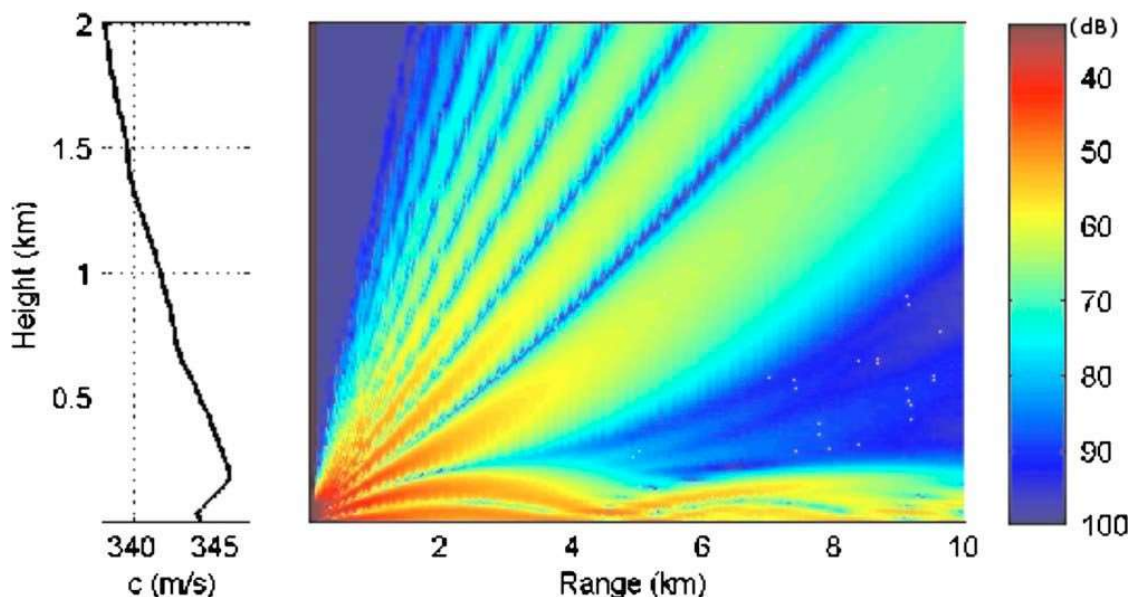
1. Det finns ingen naturlig ljudavskärmning från terräng, byggnader eller andra objekt.
2. Vid vissa atmosfäriska förhållanden kan ljudet reflekteras mellan havsyta och skikt i atmosfären, såsom visas i Figur 2. Detta kan liknas vid att *ljudet kanaliseras, dvs fångas mellan havsytan och skikt i atmosfären* så att en mindre del av ljudenergin släpps igenom till andra delar av atmosfären. Ljudstyrkan minskar därför inte med ökande avstånd lika mycket som i andra och mer vanliga atmosfäriska situationer. För vanliga ljudkällor i normal atmosfär minskar ljudet med  $\approx 6$  dB per fördubbling av avståndet i fjärrfältet, medan ljudet över hav i förhållanden som ovan endast minskar med  $\approx 3$  dB per avståndsfördubbling.



**Figure 1.** Schematic of the atmospheric boundary layer (ABL) showing the atmospheric surface layer (ASL; between the straight dashed line and the ground), mixed layer, capping inversion (curvy dashed line), and free troposphere. Near-ground sound propagation for a high-wind condition, with the wind blowing from left to right, is depicted.

Figur 2: Illustration av viktiga teman i ljudutbredning, här visat **över land**. För ljudutbredning **över hav** kommer reflektioner från havsytan att betyda mer än vid ljudutbredning över land. Över hav är det också vanligt att låga jet-vindar («Low level jets») är mer stabila, vilket ger mer distinkta ljudreflektioner nedåt. (Wilson, et al., 2015)

Ljudutbredning över hav från vindkraft-imiterade ljudkällor har studerats empiriskt och modellbaserat av Bolin et. al. (Bolin, et al., 2009). Ett exempel på modell-predikerad ljudutbredning från den artikeln visas i figuren nedan.



Figur 3: Datamodellerad ljudutbredning, här i form av förlust/dämpning («Transmission loss»), som funktion av avstånd och höjd över havet (figuren til höger). Effektiv ljudhastighet som funktion av höjd över havet visas i figuren till vänster. Lägg märke till «kanalisering» av ljudet i höjd med maxima av ljudhastigheten ( $\approx 200$  m över havet). Detta är figur 8 i artikeln av Bolin et.al. (Bolin, et al., 2009).

Figuren ovan gäller för laminär strömning i atmosfären, en situation som kan vara vanlig i Östersjön under vår och tidig sommar.

Bolin et. al. har senare också studerat långtidsestimat för lågfrekvent ljud från vindkraftverk till havs (Bolin, et al., 2014). Den artikeln visar också ljudutbredning för olika vindriktningar mellan vindkraftverk och mottagare (såsom en bostad på land).

I den tillgängliga litteraturen är det konsensus om att *ljudutbredning i medvind* på stora avstånd från ett vindkraftverk till havs medför en reduktion på  $\approx 3$  dB per fördubbling av avstånd. I *motvind eller sidvind* kommer reduktionen att vara mycket större. Även i *medvind, men med mycket turbulens* i atmosfären kommer reduktionen troligen vara större än  $\approx 3$  dB per avståndsfördubbling.

### 1.2.1 Lite om buller från vindkraftsparker vs. buller från enskilda vindkraftverk

I facklitteraturen behandlas oftast buller från enskilda vindkraftverk. Buller från *hela vindkraftsparker* har alltså studerats mindre. Variationer i källstyrka (till följd av variationer i turbulens uppströms i parken) och varierande ljudutbredning (variationer i atmosfären) kommer jämnas ut i rum och tid. Detta har konsekvenser för hur ljudet från en vindkraftspark breder ut sig jämfört med ljudet från ett *enskilt vindkraftverk*. Vi har inte funnit litteratur som tar sig an detta tema men generellt så kommer sådana fenomen att leda till mindre korttidsvariationer i bullernivån på stora avstånd (till exempel till en bostad på land). Å andra sidan kommer turbinerna i en vindkraftspark leda till mer turbulens inom parkområdet. Mer turbulens leder bland annat till förlust i elproduktionen (vakförluster) och mer buller. Det är svårt att på förhand avgöra hur balansen mellan dessa två effekter kommer att falla ut för en vindkraftspark.

### 1.2.2 Lite om potentiella akustiska- och psykoakustiska effekter av havsvågor

Vi har inte satt oss in i vilken betydelse vågor på havsytan har för ljudreflektionerna mellan hav och eventuella ljudreflektioner i atmosfären.



Det är känt att under kraftig vind kan också naturligt förekommande ljud från vågor på havet vara starkt och kan ha potential till att maskera buller från vindkraftverk. Detta har studerats av bland annat Bolin et al. (Bolin, et al., 2012). Den studien behandlade inte specifikt låg-frekvent buller och det är därför ovisst hur relevant studien är för framtida vindkraftverk (se ovan). Ljud från vågor har studerats specifikt i en studie från 2010 (Bolin & Åbom, 2010). Förhållandet mellan direkta vind-induserade vågor (som har relativt kort våglängd) och dyningar (som har längre våglängd) kommer nog också påverka eventuell maskering. Dyningar bildas lätt över stora, öppna hav och det är osäkert hur vanligt det är med dyningar i detta område av Östersjön. Observera att dyningar kan vara kvar ett tag efter att vindar har reducerats och i tiden fram tills dess att dyningarna också har avtagit kan maskeringen vara annorlunda än i perioder med stabil vind. Omvänt så byggs dyningar upp långsamt över tid så att det kommer vara lite dyningar en tid efter att det börjat blåsa igen efter en period med lite vind. Detsamma kan antas gälla för ljudreflektioner som nämnts ovan. Dessa två teman bör studeras närmre, gärna också för denna specifika del av Östersjön.

### **1.2.3 Vindprognos som möjlig åtgärd mot buller**

Vindmodeller/prognoser med bra upplösning i tid och rum har potential till att ge kunnskap om atmosfäriska förhållanden som påverkar ljudutbredning. Kombinerat med bra modeller för ljudutbredning kan detta användas som ett verktyg till att ta fram prognoser (på tex tim- eller dygnsbasis) för ljudutbredningen in till land från vindkraftsparker. Vid risk för god ljudutbredning (dvs höga bullernivåer vid land) kan man ställa ner vindkraftverken till ett mindre ljudalstrande modus. Bra vindmodeller/prognoser är förstas också användbara verktyg för energiplanering och elhandel.

### 1.3 Uppskattning av oktavdata för framtida stora vindkraftverk

Ljuddata för den turbinstorlek som har använts i denna rapport har inte funnits tillgänglig. Det finns generellt väldigt lite information angående ljuddata från stora vindkraftverk att tillgå. I den här rapporten har därför uppskattad ljuddata använts för att beräkna buller från framtida, större vindkraftverk.

En artikel i Journal of Acustical society of America handlar om buller från stora vindkraftverk, där man har uppskattat både 1/3-oktav- och oktavdata för vindkraftverk med en effekt runt 10 MW (Møller & Pedersen, 2010). Data från vindkraftverk i storlekarna 650 kW till 2,5 MW användes för att extrapolera data till 10 MW-turbiner. Ekvation (1) är angiven i rapporten och beskriver förhållandet mellan källljudet för en referensturbin och källljudet för en annan turbin. Datan som är använd i rapporten ger värdet 11,0 dB på *konstanten*, Refpower är 1 MW och RefL<sub>WA</sub> 101,1 dB (Møller & Pedersen, 2010).

$$L_{WA} = \textit{konstant} \cdot \log_{10} \left( \frac{\textit{Power}}{\textit{Refpower}} \right) + \textit{Ref}L_{WA} \quad (1)$$

Ekvation (1) har använts på liknande sätt i *detta* arbete för att uppskatta L<sub>WA</sub>-värden (ett värde för ljudeffektnivå) för den framtida turbinstorleken på 20 MW. Motsvarande ekvation har också använts för att extrapolera 1/3-oktavdatan för ljudeffektnivå till 20 MW-turbinerna. Uppskattade L<sub>WA</sub>-värden för 2,5 MW turbiner från rapporten har då använts tillsammans med olika tillpassade konstanter för varje centerfrekvens. Därefter är de uppskattade 1/3 oktavsdatan summerade upp till den uppskattade oktavdatan. Oktavdatan som är given i rapporten av Møller og Pedersen, och de resulterande värdena efter extrapolering till större vindkraftverk är angivna i Tabell 2.

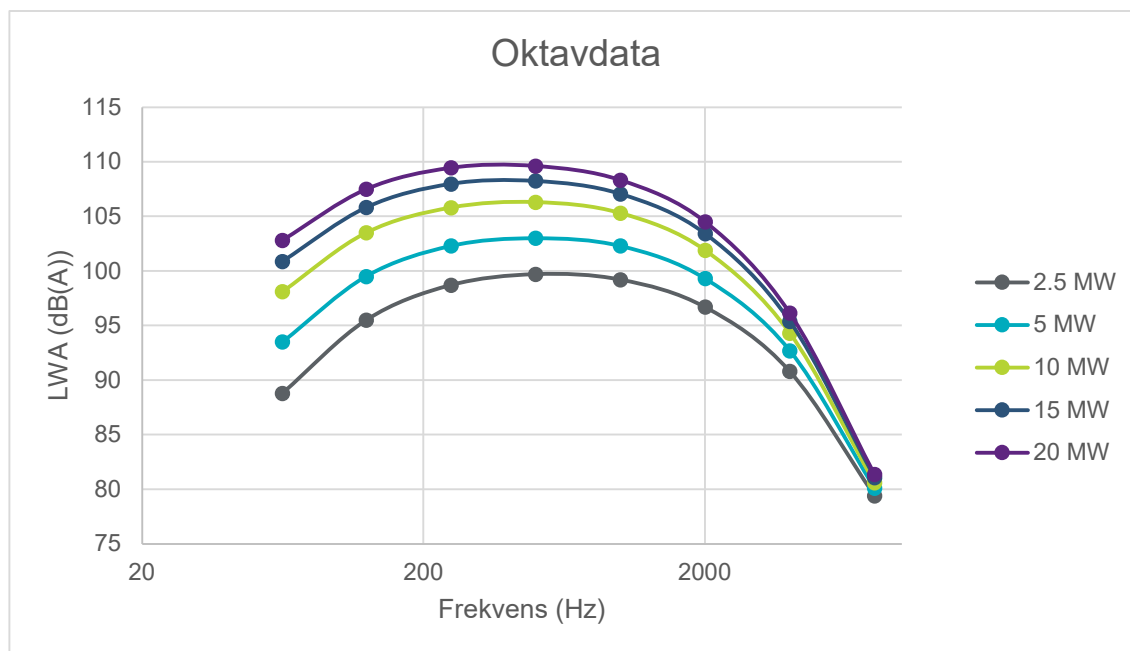
Tabell 2: Uppskattade ljudeffektnivåer för vindkraftverk av storlek runt 2,5 MW, 5 MW och 10 MW från Tabell III i rapporten av Møller og Pedersen (Møller & Pedersen, 2010), och extrapolerade värden för vindkraftverk av storlek kring 15 MW och 20 MW. Notera att datan inte innehåller några säkerhetsmarginaler.

Centerfrekvens [Hz]	Ljudeffektnivå, L <sub>WA</sub> [dB]				
	Från Møller och Pedersens rapport			Extrapolerat av KVT	
	2,5 MW	5 MW	10 MW	15 MW	20 MW
31,5	78,3	83,6	88,8	91,9	94,1
63	88,8	93,5	98,1	100,9	102,8
125	95,5	99,5	103,5	105,8	107,5
250	98,7	102,3	105,8	108,0	109,5
500	99,7	103	106,3	108,2	109,6
1000	99,2	102,3	105,3	107,1	108,3
2000	96,7	99,3	101,9	103,4	104,5
4000	90,8	92,7	94,3	95,4	96,1
8000	79,4	80,1	80,6	81,1	81,4
Σ L <sub>WA</sub>	105,5	108,8	112,1	114,0	115,4

Det är viktigt att notera att detta är uppskattade värden för bullernivåer för framtida, större vindkraftverk och vid ett framtida val av en specifik turbin typ behöver nya bedömningar göras med ljuddata från vald turbinleverantör.

Det finns i nuläget *ingen tillgänglig ljuddata* från turbin tillverkare som kan användas till beräkningen. Den enda informationen tillgänglig för V236-15MW är ljudeffektnivån L<sub>WA</sub> = 115,3 dB<sup>1</sup>. Detta motsvarar det extrapolerade värdet för den 20 MW-turbin som använts, vilket innebär att det finns en risk att värdet är underskattat.

<sup>1</sup> [V236-15.0 MW™ \(vestas.com\)](https://www.vestas.com)



Figur 0-4: Uppskattad oktavdata för vindkraftverk med storlek runt 2,5 MW, 5MW och 10 MW från Møller och Pedersens rapport (Møller & Pedersen, 2010), samt extrapolerade värden för vindkraftverk med storlekar runt 15 MW och 20 MW. Lägg märke till en förskjutning av spektrumet mot mer bas med ökande storlek på vindkraftverk.

## 2 Bullerberäkningar

### 2.1 Svenska bullergränser

Naturvårdsverket gav i december 2020 ut en ny vägledning som ger riktlinjer om hur man ska beräkna buller från vindkraftverk (Naturvårdsverket, 2020-12-01). Vägledningen anger även riktvärden för buller som inte bör överskridas vid bostäder samt vid friluftsoch rekreationsområden, se Tabell 3. Riktvärdena gäller den totala bullernivån, från alla närliggande vindkraftverk.

Tabell 3: Riktvärden (ljudnivå som inte bör överskridas) för buller från vindkraftverk (Naturvårdsverket, 2020-12-01).

Områdesanvändning	Riktvärde $L_{eq}$ [dBA]
Utomhus vid bostäder (permanent- och fritidsboende)	40
Utomhus inom friluftsområden	35

Observera att det i denna rapport används rätt fackterm,  $L_{Aeq}$ , för den tidsgenomsnittliga och A-vägda ljudtrycksnivån.

Naturvårdsverket rekommenderar att man i de flesta fall använder sig av metoden NORD2000 för beräkning av vindkraftsbuller. Det finns även enklare, svenska beräkningsmetoder som är framtagna av Naturvårdsverket som kan användas i vissa fall (Naturvårdsverket, 2020-12-01).

### 2.2 NORD2000

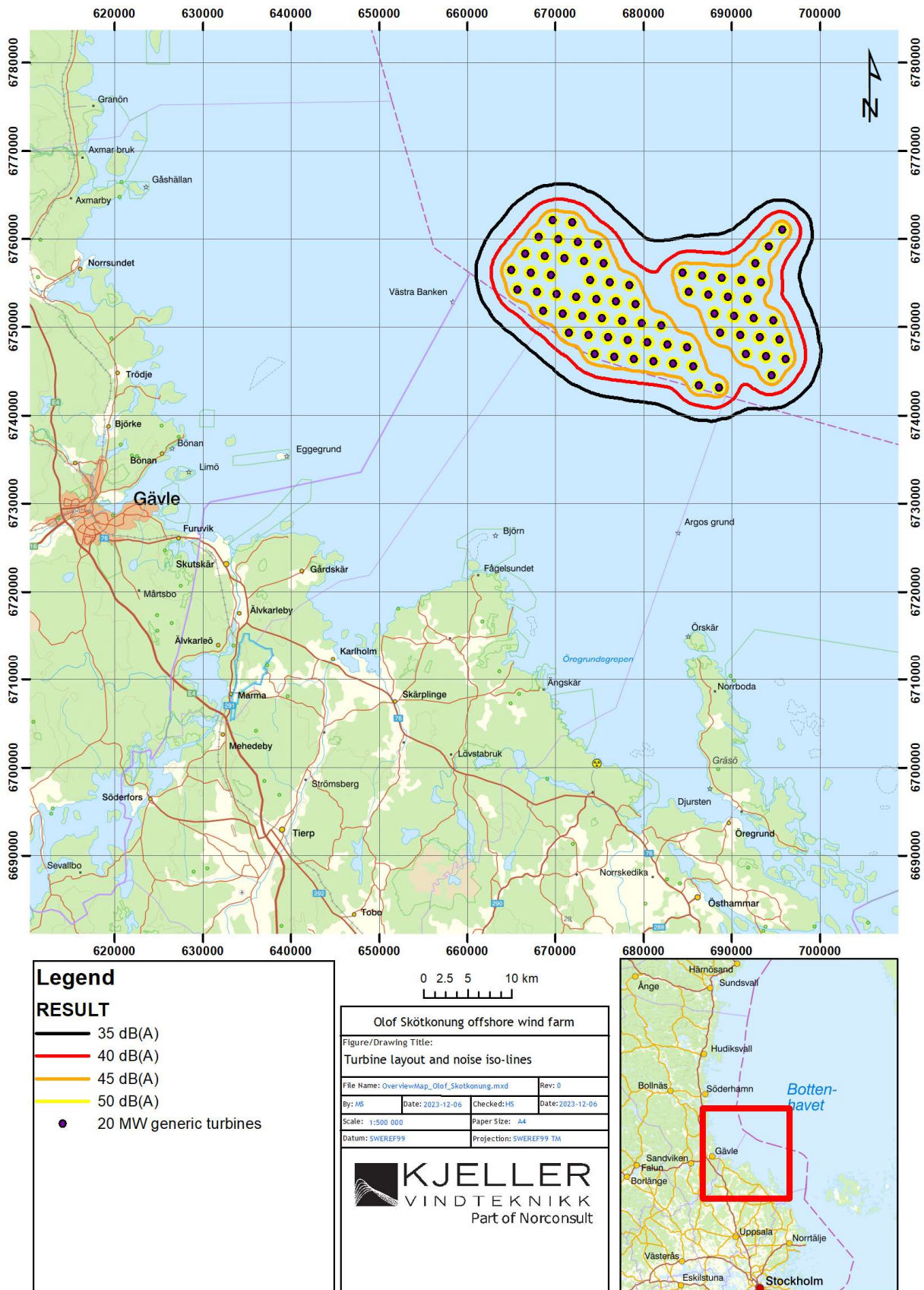
NORD2000 är en generell utredningsmodell för buller. Modellen är inte framtagen specifikt för vindkraft men är tillräckligt generell för att även fungera för vindkraftverk (DELTA, 2009) och andra höga bullerkällor. Eftersom modellen innehåller parametrar för bland annat marktyper och meteorologi ges det möjlighet att genomföra beräkningar med hög noggrannhet i komplexa miljöer. Naturvårdsverket anser att beräkningar i normalfallet alltid ska göras för meteorologiska förhållanden som motsvarar medvind i samtliga riktningar (Naturvårdsverket, 2020-12-01).

### 3 Resultat

Här presenteras resultaten i form av en bullerkarta. Figur 5 visar resultatet för de 70 stycken 20 MW-turbinerna. På grund av den höga osäkerheten i beräkningarna presenteras endast kartor.

Gränsen på  $L_{Aeq} = 35$  dB ligger långt utanför kusten, mellan 20-40 km från land. Större avstånd ger större modellosäkerhet vid låga bullernivåer (i akustiska sammanhang) så som i detta fall där ljudet rör sig mellan 20 och 40 km och har nivåer på 35 dB och lägre. Samtidigt är det även en stor osäkerhet knuten till de uppskattade källljuden eftersom det har funnits knapphändigt dataunderlag att basera dessa beräkningar på.

I tidig planeringsfas som detta projekt kan resultaten i denna rapport vara till hjälp för att skapa sig en bild av ljudutbredningen från den planerade vindkraftsparken. Vid ett framtida val av turbintyp för projektet behöver det göras en ny bedömning av bullernivåer där oktavdata från relevant turbinleverantör används istället för uppskattad data.



Figur 5: Bullerkarta för Olof Skötkonung med 20 MW- turbiner.

## 4 Referenser

Bolin, K., Almgren, M., Ohlsson, E. & Karasalo, I., 2014. *Long term estimations of low frequency noise levels over water from an off-shore wind farm*, s.l.: Journal of the Acustical society of America, volume 135 (3).

Bolin, K., Boué, M. & Karasalo, I., 2009. *Long range sound propagation over a sea surface*, s.l.: Journal of the Acustical Society of America.

Bolin, K., Kedhammar, A. & Nilsson, M. E., 2012. *The influence of background sounds on loudness and annoyance of wind turbine noise*, s.l.: Acta Acustica united with Acustica.

Bolin, K. & Åbom, M., 2010. Air-borne sound generated by sea waves. *Journal of the Acoustical society of America*, Volum 127, pp. 2771-2779.

DELTA, 2009. *Validation of the Nord2000 propagation model for use on wind turbine noise*, AV 1238/09 , Fredericia: DELTA.

EMD, 2020. *WindPRO User Manual*. [Internett]

Available at: <http://help.emd.dk/WindPRO/>

Miljø- og Fødevarerministeriet, 2019. *Bekjendtgørelse om støj fra vindmøller*. [Internett]

Available at: <https://www.retsinformation.dk/eli/lta/2019/135>

Miljøstyrelsen, 2021. *Støj fra vindmøller - Vejledning fra Miljøstyrelsen*, Odense: Miljøministeriet.

Møller, H. & Pedersen, S. C., 2010. *Low-frequency noise from large wind turbines*, s.l.: Acustical Society of America.

Naturvårdsverket, 2020-12-01. *Vägledning om buller från vindkraftverk*, s.l.: s.n.

Naturvårdsverket, 2021. *Buller från vindkraftverk*. [Internett]

Available at: <http://www.naturvardsverket.se/Stod-i-miljoarbetet/Vagledning/Buller/Buller-fran-vindkraft/>

Wilson, D. K., Pettit, C. L. & Ostashev, V. E., 2015. *Sound propagation in the atmospheric boundary layer*, s.l.: Acustical Society of America.