



UPPSALA
UNIVERSITET

Bulleranalys Nora-Lindesberg

Prof. Ken Mattsson

25 augusti 2025

På uppdrag av föreningen *Skona Nora* har vi utfört en mycket noggrann bullerspridnings analys av området kring den existerande vindparken *Munkhyttan* i kombination till de planerade vindparkerna *Munkhyttan 2*, *Siggebohyttan* och *Älgfallet*. Det är totalt $3+3+12+11=29$ vindkraftverk. I beräkningarna har vi utgått från Vestas V162, 6.2 MW i samtliga vindparker, bortsett *Älgfallet* där vi i brist på information utgår från Vestas V172, 7.2 MW, som vi anser vara det mest troliga valet. Baserat på flera noggranna mätningar från ett antal vindparker (t.ex. Vindpark Målarberget och Vindpark Lervik) har vi kalibrerat ett mycket precist beräkningsprogram: **SoundSim360**, som kan hantera ljudspridning över stora komplexa områden och bullerkällor över alla frekvenser, inklusive infraljud (frekvenser under 20 Hz).

Hur ljud sprids över större områden beror i hög grad på den rådande atmosfären, topografin, markens beskaffenhet, ljudkällornas inbördes positioner och spektrala innehåll. Det är därför viktigt att förstå hur fysiken påverkar ljudutbredningen. Centrala begrepp är diffraktion, refraktion, geometrisk spridning, absorption, transmission, reflektion och interferens. Om inte allt detta ingår i beräkningsmodellen på ett korrekt och noggrant sätt kan ljudspridningen inte simuleras trovärdigt. Vår beräkningsmodell (SoundSim360) löser vågekvationen i 3D och läser in den aktuella tredimensionella atmosfären samt verklig topografi. All relevant fysik inkluderas korrekt och det finns inga *fria parametrar* att justera. Detta gör resultaten precisa, under antagandet att källstyrkorna är korrekt angivna. Under de senaste 20 åren har jag och min forskargrupp ägnat oss åt forskning och utveckling av mycket noggranna och tillförlitliga numeriska metoder anpassade för ljudutbredning (se t.ex. [28, 27, 29, 25, 26, 24, 30, 4, 23, 31, 40, 32, 34, 20, 3, 46, 45, 33, 38]). Denna kunskap har kondenserats i beräkningskoden SoundSim360, som uppnår mycket hög effektivitet genom en avancerad GPU-implementering.

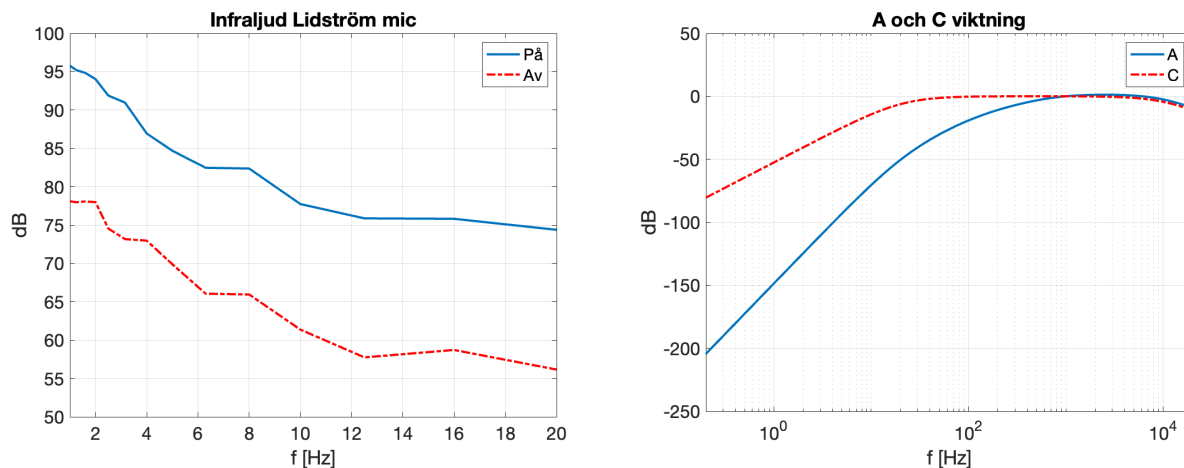
Den modell som i dag oftast används för att beräkna ljudspridning är Nord2000 [2], som implementeras i t.ex. SoundPlan och windPRO. Nord2000 är en strålgångsmodell, byggd på antagandet att ljudet är högfrekvent. Den är i grunden tvådimensionell och kan av naturliga skäl inte hantera lågfrekvent ljud korrekt, och den kan heller inte modellera interferens (samverkan mellan flera källor). Även diffraktion hanteras bristfälligt, vilket blir problematiskt i kuperad terräng eller i närheten av byggnader och bullerskydd. Vi har tidigare visat att Nord2000 inte är pålitlig i kuperad terräng [4]. För att kompensera modellens brister innehåller Nord2000 ett flertal *fria parametrar* som användaren kan justera, vilket gör att resultaten i hög grad beror på vem som kör programmet-något vi kan illustrera med flera tydliga exempel. Enligt flera studier, bl.a. av Conny Larsson [17], underskattar programmet ofta ljudnivåerna med 5-7 dBA vid avstånd kring 1 km jämfört med mätningar. Ibland används en mer förenklad modell *ISO 9613-2* [12], som ger resultat jämförbara med Nord2000 men betraktas som ännu mer osäker. Cloudberry har genomfört en bullerberäkning i windPRO med modell *ISO 9613-2* (vilket framgår av beräkningsresultatet); resultatet visas i Figur 6.

Flera studier har visat att atmosfäriska förhållanden och markegenskaper orsakar betydande variationer i bullernivåer-upp till 20 dBA-på 1 km avstånd från en vindpark [17, 37, 16]. Långtidsmätningar av Conny Larsson (2014) [17, 37] bekräftade att variationerna är störst under kvällar och nätter, särskilt vid snötäckt mark. Ett särskilt störande, "svischande" amplitudmodulerat (AM) buller uppstår huvudsakligen under kvällar, nätter och morgnar. Under en årslång mätkampanj observerades AM-buller 19% av tiden på 1 km avstånd. Förekomsten påverkas starkt av förhållandena längs utbredningsvägen, och interferens mellan turbiner kan förekomma. AM-buller kan spridas över 10 km [36] och är betydligt mer störande än kontinuerligt ljud på samma dBA-nivå. Det är vanligen starkast under vinterkvällar vid inversionsförhållanden.

Nord2000 togs ursprungligen fram för trafikbuller på kortare avstånd i platt terräng (några hundra meter). Trafikbuller skiljer sig avsevärt från vindkraftsbuller. Vindkraftsbuller är till sin natur i huvudsak lågfrekvent, med de högsta nivåerna under 5 Hz. De absolut högsta nivåerna ligger under 1 Hz, och nivåerna förväntas öka med större verk [35, 44]. Att försöka beskriva infraljud med A-vägning (dBA) är, enligt mig och många andra experter, inte ändamålsenligt. Vissa förespråkar C-vägning, vilket är en förbättring men tar fortfarande mycket liten hänsyn till just infraljudet. I Figur 1 visar vi effekten av A- och C-vägning, dvs. hur mycket man ska dra av i varje tersband. Vid vindpark Målarberget genomförde vi den 23 oktober 2024 en mätning av infraljud när verken var i drift och strax därefter när alla verk stoppades p.g.a. negativa elpriser; se Figur 1.

Dessa mätningar visar att vindkraftverken är orsaken till de höga infraljudsnivåerna kring vindparken, då bakgrundsnivån ligger cirka 18 dB under nivån med verken i drift. Vi har observerat samma resultat (ca 18

dB högre infraljud med verken i drift) vid vindpark Lervik den 21 maj 2024. Summerar man alla tersband i infraljudsområdet (från mätningen i Figur 1) när verken snurrar fås 102.7 dB, vilket motsvarar 25.6 dBA och 73.9 dBC. När verken är avstängda blir motsvarande värden 85.9 dB, 7.7 dBA och 56.8 dBC. Detta är de effektiva infraljudsnivåerna i dB, dBA och dBC (under 20 Hz). Vi betonar att frekvenser under 1 Hz inte ingår eftersom de inte kan mätas tillräckligt noggrant med nuvarande utrustning; vi förväntar oss att nivåerna är som högst kring 0.2-0.4 Hz. Flera mätningar visar också på högre nivåer (cirka 5 dB) av infraljud inomhus [13, 5, 6, 8]. De värden vi redovisar här är från utomhusmätningar.



Figur 1: Noggrann mätning av infraljud med och utan verk påslagna (vänster). A- och C-viktning (höger).

Vibrationer

Det finns en växande oro kring de seismiska vibrationer som genereras av vindkraftverk. Till skillnad från akustiska vågor, som sprids i luften, fortplantar sig seismiska vågor genom marken och kan färdas flera kilometer, beroende på de lokala geologiska förhållandena. Dessa lågfrekventa markvibrationer kan även interagera med luftburna akustiska vågor, vilket potentiellt kan ge upphov till kombinerade störningseffekter som ännu inte är fullt utredda. Empiriska data om seismiska vågor från vindkraftverk är fortfarande begränsade. Minst en vetenskaplig studie har dock analyserat fenomenet och fokuserat på lågfrekventa vibrationer och deras utbredning [11]. Resultaten från den studien kan sammanfattas enligt följande:

(i) De flesta seismiska vågorna som genereras av vindkraftverk sprider sig som Rayleigh-vågor; (ii) De mikro-seismiska vågor som alstras påverkar seismologiska mätstationer på avstånd upp till cirka 15 km från en vindpark; (iii) Störst påverkan observeras i frekvensområdet 5-10 Hz och (iv) Drift av en vindpark under starka vindförhållanden kan generera mikro-seismiska vågor som är tillräckligt starka för att orsaka störningar för närboende. För att fullt ut förstå effekten av dessa seismiska vibrationer krävs ytterligare forskning. I synnerhet är inomhusmätningar av lågfrekventa vibrationer viktiga, eftersom dessa kan kopplas in i människokroppen som kroppslett ljud och därigenom manifesteras sig som upplevt infraljud. En korrekt simulering av de verkliga effekterna av seismiska vågor från vindparker skulle kräva avancerade numeriska metoder, exempelvis liknande SoundSim360, i kombination med högupplösta seismiska mätningar utförda under kontrollerade och välkarakteriserade förhållanden. En sådan omfattande studie har, såvitt jag vet, ännu inte genomförts men representerar en viktig riktning för framtida forskning. Min nuvarande rapport är dock begränsad till att behandla luftburna akustiska vågor och inkluderar därför inte markburna seismiska vibrationer eller deras potentiella kopplingseffekter.

Infraljudets påverkan på människor

Det finns ett antal studier som ofta lyfts fram som "bevis" för att infraljud från vindkraftverk inte orsakar negativ påverkan på människor, däribland de senaste rapporterna [22, 21]. Efter noggrann genomgång av dessa och ett stort antal tidigare publikationer (t.ex. [7]) kan jag konstatera att ingen av dessa studier undersökt de doser vi regelmässigt mäter upp i närheten av vindkraftverk. Dessutom har ingen av dessa studier involverat neurofysiologer, vilket är en avgörande brist givet att infraljudets huvudsakliga påverkan sannolikt sker via nervsystemet. Det finns däremot studier som tydligt kopplar infraljudsexponering (vid nivåer 80-90 dB) till förändrad hjärnaktivitet [50, 10]. Specialister inom otoneurologi, såsom Håkan Enbom och professor Alec N. Salt [41, 42, 43], har visat starka indikationer på att ohörbart infraljud kan trigga migrän hos upp till 30 % av

befolkningen - vilket motsvarar den andel som är kända för att ha ett högkänsligt nervsystem [18, 39]. Påverkan är därmed högst individuell, men potentiellt allvarlig för en betydande minoritet.

Både jag själv och en kollega i forskarteamet har upplevt tydliga symtom (sömnstörningar i upp till en vecka samt migrän dagen efter) i direkt anslutning till våra mätningar vid vindkraftverk. Under dessa mätningar har vi dokumenterat infraljudsnivåer på minst 95 dB vid 1 Hz, motsvarande cirka 103 dB totalt (1-20 Hz), vid exponeringstider över 4 timmar (se Figur 1). Liknande symtom har tidigare rapporterats av andra forskare [5], även vid lägre doser än de vi uppmätt. Redan 1985 kunde Danielsson och Landström [9] visa fysiologiska effekter av infraljud vid 95 dB, bl.a. höjning av diastoliskt blodtryck samt sänkning av systoliskt blodtryck och puls. Djurförsök och fältstudier stärker bilden. Nya resultat visar att många djurarter, särskilt hjortdjur och fåglar, flyttar sig mer än 5 km från vindkraftverk [47]. Även boende i närheten vittnar om en tydlig minskning av vilda djur i områdena runt vindparker.

Ett fenomen som sällan lyfts fram i diskussionen om vindkraftens ljudpåverkan är att turbinerna alstrar ett kraftigt pulserande (impulsivt) infraljud [15, 13, 14]. Detta pulserande infraljud har sin grund i bladpassage-frekvensen (BPF), dvs. den rytmiska tidpunkten då rotorbladen passerar tornet. I ett ljudspektrum framträder detta som tydliga spikar vid BPF och dess multiplar (övertoner). För moderna turbiner med rotorblad på 75-85 meter ligger BPF typiskt mellan 0.2-0.6 Hz, medan äldre turbiner ofta har en BPF kring 1 Hz. Detta pulserande infraljud skiljer sig markant från naturligt infraljud - exempelvis från vind som strömmar över trädtoppar eller från havsvågor - som är mer kontinuerligt och inte visar samma distinkta spektrala mönster. Det är väl etablerat inom akustikforskningen att pulserande ljud upplevs som mer störande än kontinuerligt ljud vid samma ljudnivå [49]. Denna aspekt är därför av central betydelse vid bedömning av vindkraftsljudets påverkan. Att enbart fokusera på ljudnivån (dB) riskerar att bli missvisande - ljudets form (kontinuerligt eller pulserande) är avgörande för störningsgraden och därmed hälsopåverkan.

Våra egna mätningar under perioden 26 oktober 2023 - 16 december 2024 visar nivåer mellan 92-115 dB vid 1 Hz på avstånd 500-1000 m från närmaste verk. Som jämförelse exponerades försökspersoner i den finska studien [21] endast för 73 dB vid 1 Hz (motsvarande totalt 89 dB infraljud) under 10 minuter, och i den australiensiska studien [22] för 87 dB infraljud under tre dygn. Dessa studier är därför inte jämförbara med de faktiska exponeringsnivåer vi dokumenterat kring befintliga vindkraftparker. I dessa studier har man dessutom enbart använt kontinuerligt infraljud.

Vi föreslår att infraljudets hälsoeffekter omgående undersöks genom en kontrollerad exponeringsstudie på ett representativt statistiskt urval av befolkningen (ca 1000 personer). Deltagarna bör exponeras för minst 95 dB vid valda frekvenser i infraljudsområdet under några timmar, helst med pulserande signaler för att efterlikna verkliga förhållanden. Urvalet bör inkludera personer med dokumenterad migränkänslighet. Studien bör utformas i nära samarbete med experter inom otoneurologi. Innan en sådan studie genomförs är vår starka rekommendation att pausa utbyggnaden av vindkraftparker, eftersom de nuvarande kunskapsluckorna utgör en betydande risk för folkhälsan.

Mätningar av infraljud

Noggrann mätning av infraljud ner till 1 Hz kräver instrument som är kalibrerade för låga frekvenser. En tillförlitlig kalibrering vid 1 Hz kan genomföras hos NORSAR mot deras Hyperion-system vid mätstationen i Elverum, som är certifierad inom CTBTO-nätverket för infraljud. Vi har använt fyra Lidström-infraljudsmikrofoner [19], vilka kalibrerats hos NORSAR. Dessa mikrofoner utvecklades i början av 1980-talet i Sverige för helikopterdetektion. De är extremt känsliga men samtidigt robusta nog att fungera under tuffa väderförhållanden. Lidström-mikrofonerna har tidigare använts av FOI och KTH (prof. Thomas Lindblad), och används i dag av forskargruppen vid Institutet för rymdfysik (IRF) i Kiruna under ledning av Johan Kero [48], som också ställt tre mikrofoner till vårt förfogande.

Under våra mätningar har vi även testat Nor140 och Nor145, som är populära inom akustikkonsultbranschen. Enligt specifikation ska Nor145 kunna mäta ner till 0.4 Hz, men i praktiken är instrumentet inte kalibrerat för så låga frekvenser. Våra tester visar att den underskattar nivån med cirka 20 dB under 3 Hz. Slutsatsen är att instrument som inte är kalibrerade för 1 Hz inte kan användas för tillförlitliga mätningar av infraljud från vindkraftverk. För sådana mätningar krävs professionell kalibrerad utrustning, exempelvis från Hyperion eller Chaparall, som kan mäta korrekt i intervallet 0,01-200 Hz. Vi har nyligen inhandlat två Hyperion-mikrofoner för att mäta nivåer under 1 Hz med hög precision. Det är också viktigt att mäta inomhus, eftersom infraljudsnivån där ofta visar sig vara högre än utomhusnivån.

De mätningar som vi genomfört och använt för att kalibrera vår beräkningskod, och för att samtidigt inversmodellera fram källstyrkan hos vindkraftverken i infraljuds området skedde under 21 maj 2024 och 10 september 2024 vid vindpark Lervik, och under 26 oktober 2023, 23 oktober 2024 och 16 december 2024 vid vindpark Målarberget. Vi mätte vid båda parker vid flera (3-4) mätpunkter och vid olika tidpunkter på dygnet för att samla in bra statistik. Vid varje mätning läste vi in aktuella atmosfärsdata som vi använde vid

inversmodelleringen. Här är det också viktigt att vi får data (t.ex. vilka verk som står still) från driftansvarig under mätperioden. Vid Lervik och Målarberget har det aldrig varit ett problem. Vi har skickat in en vetenskaplig artikel som i mer detalj beskriver mätningarna, mätdata och kalibreringen. Denna artikel förväntas bli accepterad inom ett par månader. Mätdata kan delas vid efterfrågan. Verken vid Målarberget är av modell Vestas V150-4.3 MW. Vid Lervik är verken större, på 6.6 MW (modell SG170-6,6). Med hjälp av noggranna mätningar och inversmodellering i SoundSim360 kan vi beräkna källstyrkan vid 1 Hz till 154, 158 och 177 dB för de tre mätningarna kring Målarberget. Vid Lervik fick vi fram källstyrkan 159 och 168 dB för de två mätningarna som genomfördes. Det är alltså en stor variation på källstyrkan, som till stor del är korrelerat till den rådande atmosfären. Ett medelvärde från de fem olika mättagarna ger 163 dB källstyrka vid 1 Hz, och är det vi räknar med i Figurerna 2 och 3. De planerade verken vid *Munkhyttan 2* och *Siggebohyttan* är av typen VESTAS V162-6.2 med navhöjden 129 meter och styrkan 6.2 MW (listade med källstyrkan 104.8 dBA). De planerade verken vid *Älgfallet* är av typen VESTAS V172-7.2 med en förväntad navhöjd på 199 meter och styrkan 7.2 MW (listade med källstyrkan 107.8 dBA). Dessa verk är alltså betydligt större än de som vi mätt på vid Målarberget som har navhöjden 125 meter och storleken 4.2 MW.

Beräkningar av infraljud vid Nora-Lindesberg

I beräkningarna har vi använt en representativ atmosfär från 31 mars 2023 (nerladdad väderdata från TH-REDDs Data Server), och genomfört beräkningar för dagen (klockan 16.00) och för natten (klockan 04.00). Marktypen är satt som vanlig mark (Impedansklass E) enligt [2]. Atmosfärdämpningen är hämtad från [1]. Vi lägger på 8 m/s medvind åt alla håll enligt praxis. Vi använde källstyrkan (ljudeffekten) 163 dB för att beräkna spridningen av infraljudet (i detta fall 1 Hz) kring Nora-Lindesberg. Resultatet för dag beräkningen återfinns i Figur 2 och natt beräkningen i Figur 3. Placeringen av verken är tagen från bullerberäkningen som Cloudberry redovisat i Figur 6, genomförd med windPRO. Vi uppskattar att infraljudsnivån vid 1 Hz kommer pendla mellan de framräknade värdena ± 15 dB, beroende på väder- och markförhållandena. Denna osäkerhet ligger i själva källstyrkan för vindkraftverken som också är ytterst väderberoende. **Vi listar infraljudsnivån (vid 1 Hz) för de närboende i Tabell 1. Nivån ligger högt över 95 dB (vid 1 Hz) för samtliga närboende. Detta är höga nivåer och jag bedömer det högst olämpligt (hälsovådligt) att placera denna vindkraftpark så nära Nora och Lindesberg med tanke på den forskning som finns, som tydligt påvisar en påverkan på blodtryck och hjärnan vid infraljudsnivåer kring 80-95 dB [9, 50, 10]. Viktigt att notera är att 95 dB infraljud kring 1 Hz motsvarar en total infraljudsnivå (1-20 Hz) på ca 103 dB.**

När vi presenterar dB-kartorna i figurerna 2 och 3 presenterar vi domäner med vissa dB-nivåer, inklusive osäkerhet. Den röda domänen är till exempel ett område där infraljuds nivån är $95 \text{ dB} \pm 1,5 \text{ dB}$ (därför inom intervallet 93.5-96.5 dB). Detta beror på osäkerheter i modellparametrarna, såsom markdämpning, atmosfärisk dämpning och interferensmönster. Jag anser att allt inom det röda området är 95 dB, och allt innanför den inre kanten av det röda området är högre än 95 dB. Allt utanför den yttre kanten av det röda området är mindre än 95 dB. För att uppnå ett mer konservativt mått bör man ligga på 1.5 dB till någon specifik punkt på kartorna. Samma sak gäller för bullerkartorna i dBA. Den största osäkerheten är dock själva källstyrkan, som kan variera med $\pm 15 \text{ dB}$.

Känslig punkt	Koordinater (Sweref 99 TM)	dB vid 1 Hz (Dag)	dB vid 1 Hz (Natt)	Osäkerhet (dB)
A	507557,6607649	103.37	104.95	± 1.5
B	507588,6607842	103.27	104.87	± 1.5
C	506287,6608401	109.04	109.87	± 1.5
D	505996,6604026	103.37	104.60	± 1.5
E	503194,6606016	102.31	103.18	± 1.5
F	505409,6604105	102.81	104.29	± 1.5
G	506962,6600533	101.20	103.31	± 1.5
H	508295,6600617	100.16	101.93	± 1.5
I	509426,6601432	101.03	102.91	± 1.5
J	509843,6602007	99.41	100.85	± 1.5
K	509747,6602831	100.98	102.68	± 1.5
M	509356,6604561	101.28	102.49	± 1.5

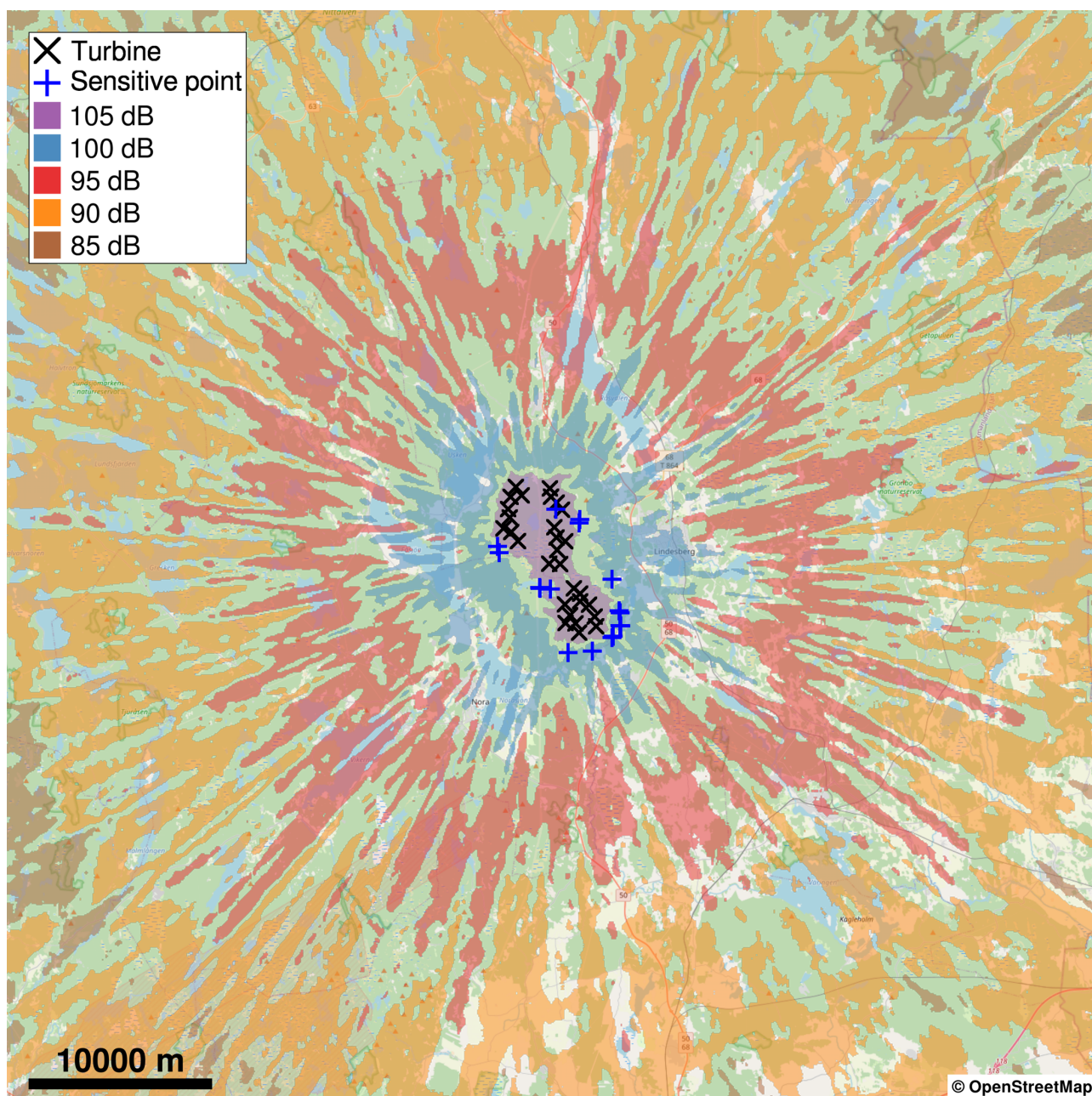
Tabell 1: Infraljudsnivåer (dB) vid 1 Hz för två olika atmosfärer: dag och natt, medvind 8 m/s (vid 10 m höjd) vid de känsliga punkterna (identiska med punkterna listade i ljudemissions beräkningen från Cloudberry återgiven i Figur 6) beräknade med SoundSim360. Källstyrkan är satt till 163 dB. Beräkningarna har en osäkerhet av ± 1.5 dB, som beror på atmosfärförhållanden och markdämpning. Ljudemissions kartorna är listade i Figur 2 (dag) och Figur 3 (natt). Den potentiellt skadliga nivån 95 dB (vid 1 Hz) överskrids vid samtliga punkter.

Beräkningar av dBA nivåer vid Nora-Lindesberg

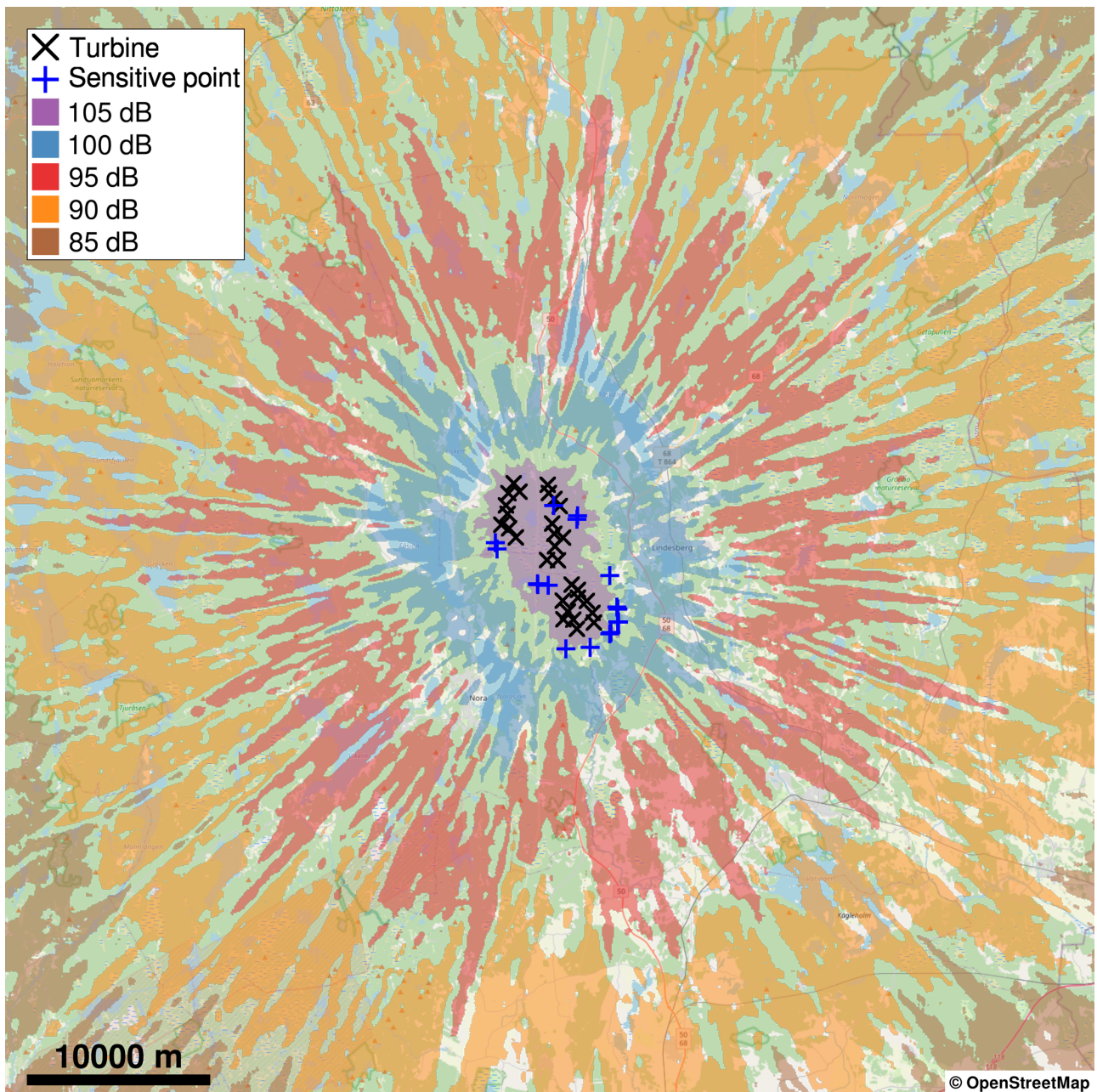
Vi beräknade även bullerspridningen kring Nora-Lindesberg i dBA. Vi utgår från placering enligt bullerberäkningen som Cloudberry utförde med windPRO. De planerade verken vid *Munkhyttan 2* och *Siggebohyttan* är av typen VESTAS V162-6.2 med navhöjden 129 meter (6.2 MW, listade med källstyrkan 104.8 dBA). De planerade verken vid *Älgfallet* förväntas vara av typen VESTAS V172-7.2 med en förväntad navhöjd på 199 meter (7.2 MW, listade med källstyrkan 107.8 dBA). Vi använder istället SoundSim360 för att beräkna bullerspridningen. I beräkningarna har vi använt en representativ atmosfär från 31 mars 2023 (nerladdad väderdata från THREDDS Data Server), och genomfört beräkningar för dagen (klockan 16.00) och för natten (klockan 04.00). Marktypen är satt som vanlig mark (Impedansklass E) enligt [2]. Atmosfärdämpningen är hämtad från [1]. Vi lägger på medvind 8 m/s åt alla håll enligt praxis. Resultatet för dag beräkningen återfinns i Figur 4 och natt beräkningen i Figur 5. Motsvarande resultat med windPRO finns återgivet i Figur 6. Enligt våra beräkningar bryter man här mot kravet på 40 dBA för alla listade bostäder kring vindkraftparkerna, vilket redovisas i Tabell 2. Beräkningarna med SoundSim360 ger ljudnivån vid en representativ dag. Det kan bli både högre och lägre värden, beroende på vädret för dagen. **Ljudnivån på natten är oftast högre än på dagen. Osäkerheten i bullerspridningen uppskattar vi till ± 1.5 dBA. Dock finns en större osäkerhet kring ljudeffekten, som kan variera med mer än 20 dBA. I synnerhet på kvällen kan det uppkomma amplitudmodulerat (AM) buller [17], som är ett extremt störande hörbart (swishande) buller som kan spridas mer än 10 km.** Vid uppkomsten av AM buller blir ljudnivån i dBA signifikant högre (det kan öka mer än 15 dBA jämfört med nivån i de redovisade bullerkartorna).

Känslig punkt	Koordinater (Sweref 99 TM)	dBA (Dag)	dBA (Natt)	Osäkerhet (dBA)
A	507557,6607649	41.07	43.20	± 1.5
B	507588,6607842	40.98	42.93	± 1.5
C	506287,6608401	49.22	49.88	± 1.5
D	505996,6604026	43.69	45.36	± 1.5
E	503194,6606016	38.93	41.03	± 1.5
F	505409,6604105	41.84	43.81	± 1.5
G	506962,6600533	42.15	44.11	± 1.5
H	508295,6600617	40.08	42.22	± 1.5
I	509426,6601432	43.17	45.06	± 1.5
J	509843,6602007	38.44	41.14	± 1.5
K	509747,6602831	39.18	41.57	± 1.5
M	509356,6604561	39.87	42.15	± 1.5

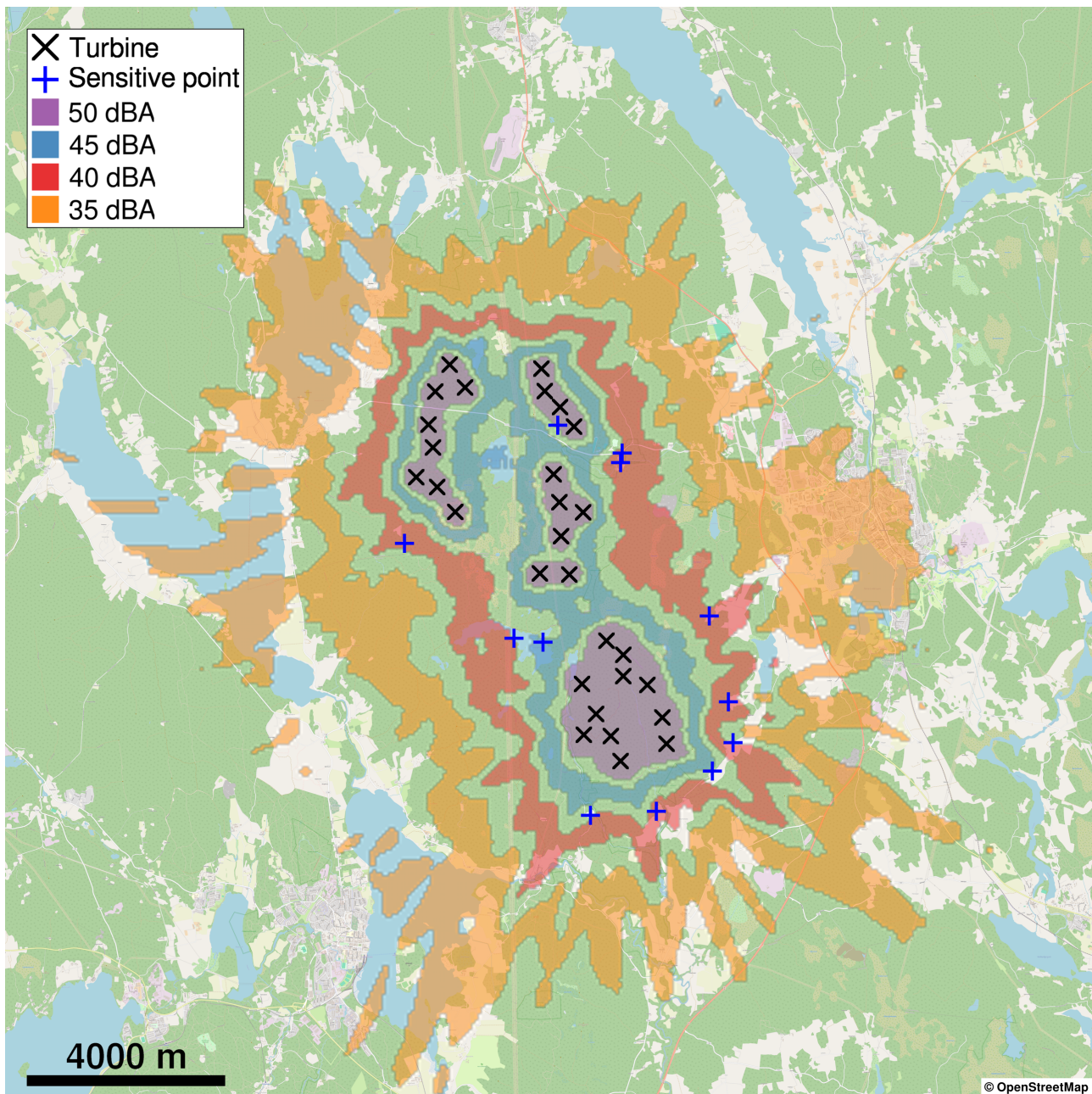
Tabell 2: Ljudnivåer (dBA) för två olika atmosfärer: dag och natt, medvind 8 m/s (vid 10 m höjd) vid de känsliga punkterna (identiska med punkterna listade i ljudemissions beräkningen från Cloudberry återgiven i Figur 6) beräknade med SoundSim360. Beräkningarna har en osäkerhet av ± 1.5 dBA, som beror på atmosfärsförhållanden och markdämpning. Ljudemissions kartorna är listade i Figur 4 (dag) och Figur 5 (natt). Den tillåtna gränsen 40 dBA överskrids vid samtliga punkter.



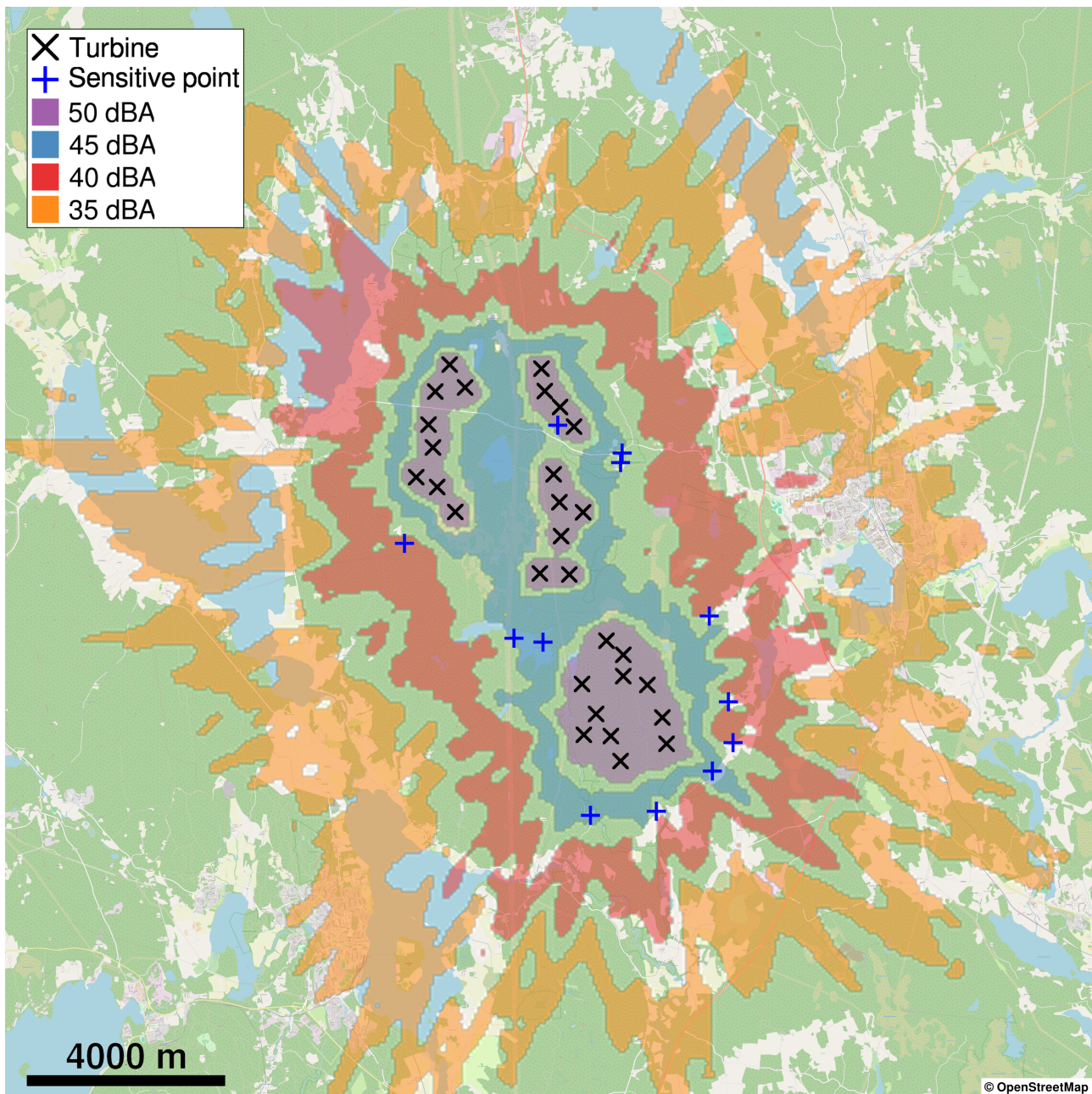
Figur 2: Beräkning av infraljud (1 Hz) med SoundSim360 kring Nora-Lindesberg, en typisk dag. Området med rött visar 95 dB med ± 1.5 dB osäkerhet. Allt inom den inre kanten av rött är högre än 95 dB vid 1 Hz.



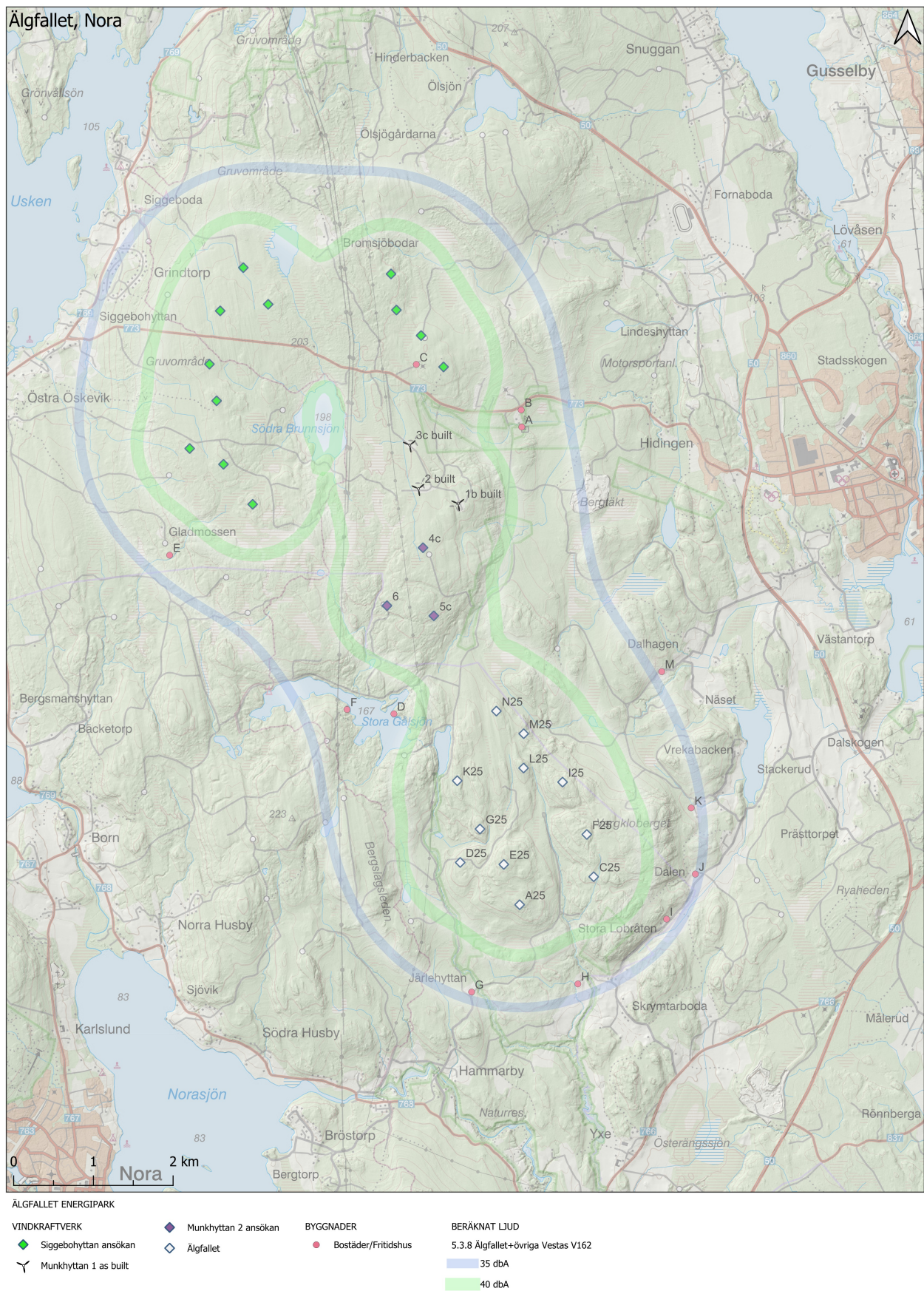
Figur 3: Beräkning av infraljud (1 Hz) med SoundSim360 kring Nora-Lindesberg, en typisk natt. Området med rött visar 95 dB med ± 1.5 dB osäkerhet. Allt inom den inre kanten av rött är högre än 95 dB vid 1 Hz.



Figur 4: Beräkning av buller (dBA) med SoundSim360 kring Nora-Lindesberg, en typisk dag. Området med rött visar 40 dBA med ± 1.5 dB osäkerhet. Allt inom den inre kanten av rött är högre än 40 dBA.



Figur 5: Beräkning av buller (dBA) med SoundSim360 kring Nora-Lindesberg, en typisk natt. Området med rött visar 40 dBA med ± 1.5 dB osäkerhet. Allt inom den inre kanten av rött är högre än 40 dBA.



Figur 6: Beräkning av bullernivån (dBA) med windPRO genomfört av Cloudberry

Sammanfattning och slutsatser

Våra beräkningar med SoundSim360 visar att infraljudsnivåerna för personer bosatta innanför innerkanten av de rödmarkerade områdena i Figurerna 2 och 3 överstiger 95 dB vid 1 Hz. Om samtliga tersband mellan 1-20 Hz inkluderas motsvarar detta en sammanlagd nivå på cirka 103 dB infraljud. Vi bedömer att detta med hög sannolikhet kan vara skadligt för upp till 30 % av befolkningen i dessa områden.

Vidare visar våra beräkningar att gränsvärdet på 40 dBA för närboende överskrids i de planerade vindparksområdena (se Figurerna 4 och 5). Detta står i direkt kontrast till de beräkningar som företaget Cloudberry redovisat med hjälp av windPRO och den starkt förenklade modell som rekommenderas av Naturvårdsverket. En jämförelse mellan Figur 5 och Figur 6 illustrerar denna skillnad tydligt.

De presenterade bullerkartorna i dBA bygger uteslutande på ljudeffektsdata från tillverkaren (i detta fall Vestas). Våra analyser visar att dessa data är opålitliga och riskerar att kraftigt underskatta bullernivåerna i verkligheten. Av särskild oro är förekomsten av amplitudmodulerat (AM) buller [17], som är särskilt framträdande under natten och de tidiga morgontimmarna. Detta hörbara, pulserande "susande" ljud är välkänt för att vara mycket störande och kan sprida sig över avstånd som överstiger 10 km. När AM-buller uppstår kan det höja den upplevda dBA-nivån med mer än 15 dBA i förhållande till de nivåer som redovisas i standardiserade bullerkartor.

Långtidsmätningar från tidigare studier [37, 16] har visat att bullernivåerna kan variera med upp till 20 dBA på ett avstånd av cirka 1 km från närmaste turbin. Dessa variationer orsakas främst av förändringar i väder- och markförhållanden, vilka inte beaktas i den förenklade modell som används i Cloudberrys beräkningar. Detta innebär att de verkliga bullernivåerna sannolikt rejält underskattas i tillverkarens och exploatörens presentationer.

Med hänsyn till de identifierade riskerna är det vår bedömning att tillstånd för de aktuella vindparkerna inte bör beviljas utan omfattande kompletterande analyser. Dessa bör inkludera högupplösta numeriska beräkningar samt långvariga, oberoende fältmätningar under varierande atmosfäriska och geologiska förhållanden. Här ingår även att undersöka infraljudets hälsopåverkan enligt min rekommendation. Endast genom en sådan metodik kan en rättvisande och vetenskapligt grundad bedömning av påverkan på människors hälsa säkerställas.

Vi föreslår att infraljudets hälsoeffekter omgående undersöks genom en kontrollerad exponeringsstudie på ett representativt statistiskt urval av befolkningen (ca 1000 personer). Deltagarna bör exponeras för minst 95 dB vid valda frekvenser i infraljudsområdet under några timmar, helst med pulserande signaler för att efterlikna verkliga förhållanden. Urvalet bör inkludera personer med dokumenterad migränkänslighet. Studien bör utformas i nära samarbete med experter inom otoneurologi. Innan en sådan studie genomförs är vår starka rekommendation att pausa utbyggnaden av vindkraftparker, eftersom de nuvarande kunskapsluckorna utgör en betydande risk för folkhälsan.

Referenser

- [1] ISO9613 1996b. Acoustics-attenuation of sound during propagation outdoors, 1996.
- [2] Nina Aguilera, Henrik Naglitsch, and Katrin Olofsson. Beräkningsmanual Nord2000 : för bullerberäkningar i väg- och järnvägsplaner. Technical Report 2024:033, Efterklang, 2024.
- [3] Martin Almquist and Eric M. Dunham. Non-stiff boundary and interface penalties for narrow-stencil finite difference approximations of the laplacian on curvilinear multiblock grids. *Journal of Computational Physics*, 408:109294, 2020.
- [4] Martin Almquist, Ilkka Karasalo, and Ken Mattsson. Atmospheric sound propagation over large-scale irregular terrain. *Journal of Scientific Computing*, 61(2):369–397, 2014.
- [5] Stephen E. Ambrose, Robert W. Rand, and Carmen M. E. Krogh. Wind turbine acoustic investigation: Infrasound and low-frequency noise – a case study. *Bulletin of Science, Technology & Society*, 32(2):128–141, 2012.
- [6] Walker B, Hessler G, Hessler D, Rand R, and Schomer P. *A Cooperative Measurement Survey and Analysis of Low Frequency and Infrasound at the Shirley Wind Farm in Brown County, Wisconsin*. Report number 122412-1, 2012.
- [7] K. Bolin, G. Bluhm, G. Eriksson, and M. E. Nilsson. Infrasound and low frequency noise from wind turbines: exposure and health effects. *Environmental Research Letters*, 6(3):035103, 2011.

- [8] Richard A Carman. Measurement procedure for wind turbine infrasound. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, volume 250, pages 6143–6153. Institute of Noise Control Engineering, 2015.
- [9] Åke Danielsson and Ulf Landström. Blood pressure changes in man during infrasonic exposure. *Acta Medica Scandinavica*, 217(5):531–535, 1985.
- [10] Caroline Garcia Forlim, Leonie Ascone, Christian Koch, and Simone Kühn. Resting state network changes induced by experimental inaudible infrasound exposure and associations with self-reported noise sensitivity and annoyance. *Scientific Reports*, 14(1):24555, 2024.
- [11] Theodore V. Gortsas, Theodoros Triantafyllidis, Stylianos Chrisopoulos, and Demosthenes Polyzos. Numerical modelling of micro-seismic and infrasound noise radiated by a wind turbine. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 99:108–123, 2017.
- [12] ISO9613-2:2024. Acoustics - attenuation of sound during propagation outdoors - part 2: General method of calculation, 2024.
- [13] N D Kelley, H E McKenna, R R Hemphill, C L Etter, R L Garrelts, and N C Linn. Acoustic noise associated with the mod-1 wind turbine: its source, impact, and control. Technical report, Solar Energy Research Inst. (SERI), Golden, CO (United States), 02 1985.
- [14] N. D. Kelley, H. E. McKenna, E. W. Jacobs, R. R. Hemphill, and N. J. Birkenheuer. The MOD-2 wind turbine: Aeroacoustical noise sources, emissions, and potential impact, January 1988.
- [15] Neil Kelley. Wind-turbine noise research at seri. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 1(2):88–89, 2025/02/12 1982.
- [16] Thomas Lagö and Bertil Persson. Wind turbine measurements in sweden. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, volume 259, pages 8151–8164. Institute of Noise Control Engineering, 2019.
- [17] Conny Larsson. Ljud från vindkraftverk, modell-validering-mätning : Slutrapport Energimyndighetens projekt 32437-1. Technical report, Uppsala University, LUVAL, 2014.
- [18] Francesca Lionetti, Arthur Aron, Elaine N. Aron, G. Leonard Burns, Jadzia Jagiellowicz, and Michael Pluess. Dandelions, tulips and orchids: evidence for the existence of low-sensitive, medium-sensitive and high-sensitive individuals. *Translational Psychiatry*, 8(1):24, 2018.
- [19] L. Liszka. *Infrasound: A Summary of 35 Years of Infrasound Research*. IRF scientific report. Swedish Institute of Space Physics, 2008.
- [20] Lukas Lundgren and Ken Mattsson. An efficient finite difference method for the shallow water equations. *Journal of Computational Physics*, 422:109784, 2020.
- [21] Panu P. Majjala, Ilmari Kurki, Lari Vainio, Satu Pakarinen, Crista Kuuramo, Kristian Lukander, Jussi Virkkala, Kaisa Tiippana, Emma A. Stickler, and Markku Sainio. Annoyance, perception, and physiological effects of wind turbine infrasound. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 149(4):2238–2248, 04 2021.
- [22] Nathaniel S. Marshall, Garry Cho, Brett G. Toelle, Renzo Tonin, Delwyn J. Bartlett, Angela L. D Rozario, Carla A. Evans, Christine T. Cowie, Oliver Janev, Christopher R. Whitfeld, Nick Glozier, Bruce E. Walker, Roo Killick, Miriam S. Welgampola, Craig L. Phillips, Guy B. Marks, and Ronald R. Grunstein. The health effects of 72 hours of simulated wind turbine infrasound: A double-blind randomized crossover study in noise-sensitive, healthy adults. *Environmental Health Perspectives*, 131(3):037012, 2023.
- [23] K. Mattsson, M. Almquist, and M. H. Carpenter. Optimal diagonal-norm SBP operators. *J. Comput. Phys.*, 264:91–111, 2014.
- [24] K. Mattsson and M. H. Carpenter. Stable and accurate interpolation operators for high-order multi-block finite-difference methods. *SIAM J. Sci Comput.*, 32(4):2298–2320, 2010.
- [25] K. Mattsson, F. Ham, and G. Iaccarino. Stable and accurate wave propagation in discontinuous media. *J. Comput. Phys.*, 227:8753–8767, 2008.
- [26] K. Mattsson, F. Ham, and G. Iaccarino. Stable boundary treatment for the wave equation on second-order form. *Journal of Scientific Computing*, 41:366–383, 2009.

- [27] K. Mattsson and J. Nordström. High order finite difference methods for wave propagation in discontinuous media. *J. Comput. Phys.*, 220:249–269, 2006.
- [28] K. Mattsson, M. Svärd, M.H. Carpenter, and J. Nordström. High-order accurate computations for unsteady aerodynamics. *Computers & Fluids*, 36:636–649, 2006.
- [29] K. Mattsson, M. Svärd, and M. Shoenybi. Stable and accurate schemes for the compressible navier-stokes equations. *J. Comput. Phys.*, 227(4):2293–2316, 2008.
- [30] Ken Mattsson. Summation by parts operators for finite difference approximations of second-derivatives with variable coefficients. *Journal of Scientific Computing*, 51:650–682, 2012.
- [31] Ken Mattsson. Diagonal-norm upwind SBP operators. *Journal of Computational Physics*, 335:283 – 310, 2017.
- [32] Ken Mattsson, Martin Almquist, and Edwin van der Weide. Boundary optimized diagonal-norm SBP operators. *Journal of Computational Physics*, 2018.
- [33] Ken Mattsson and Ylva Ljungberg Rydin. Implicit summation by parts operators for finite difference approximations of first and second derivatives. *Journal of Computational Physics*, 473:111743, 2023.
- [34] Ken Mattsson and Pelle Olsson. An improved projection method. *Journal of Computational Physics*, 372:349 – 372, 2018.
- [35] Henrik Möller and Christian Sejer Pedersen. Low-frequency noise from large wind turbines. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 129(6):3727–3744, 2011.
- [36] Phuc D. Nguyen, Kristy L. Hansen, Bastien Lechat, Colin Hansen, Peter Catcheside, and Branko Zajamsek. Audibility of wind farm infrasound and amplitude modulated tonal noise at long-range locations. *Applied Acoustics*, 201:109106, 2022.
- [37] Olof Öhlund and Conny Larsson. Meteorological effects on wind turbine sound propagation. *Applied Acoustics*, 89:34–41, 2015.
- [38] Pelle Olsson, Gustav Eriksson, and Ken Mattsson. Projection based summation-by-parts methods, embeddings and the pseudoinverse. *Journal of Computational Physics*, 524:113689, 2025.
- [39] M. Pluess, E. Assary, F. Lionetti, K. J. Lester, E. Krapohl, E. N. Aron, and A. Aron. Environmental sensitivity in children: Development of the highly sensitive child scale and identification of sensitivity groups. *Translational Psychiatry*, 54(1):51–70, 2018.
- [40] Ylva Rydin, Ken Mattsson, and Jonatan Werpers. High-fidelity sound propagation in a varying 3D atmosphere. *Journal of Scientific Computing*, 77(2):1278–1302, 2018.
- [41] Alec N. Salt and Timothy E. Hullar. Responses of the ear to low frequency sounds, infrasound and wind turbines. *Hearing Research*, 268(1):12–21, 2010.
- [42] Alec N. Salt and James A. Kaltenbach. Infrasound from wind turbines could affect humans. *Bulletin of Science, Technology & Society*, 31(4):296–302, 2011.
- [43] Alec N Salt and Jeffery T Lichtenhan. How does wind turbine noise affect people. *Acoustics Today*, 10(1):20–28, 2014.
- [44] Bo Søndergaard. Low frequency noise from wind turbines: Do the danish regulations have any impact? an analysis of noise measurements. *International Journal of Aeroacoustics*, 14(5-6):909–915, 2015.
- [45] Vidar Stiernström, Martin Almquist, and Ken Mattsson. Boundary-optimized summation-by-parts operators for finite difference approximations of second derivatives with variable coefficients. *Journal of Computational Physics*, 491:112376, 2023.
- [46] Vidar Stiernström, Lukas Lundgren, Murtazo Nazarov, and Ken Mattsson. A residual-based artificial viscosity finite difference method for scalar conservation laws. *Journal of Computational Physics*, 430:110100, 2021.
- [47] Anne Tolvanen, Henri Routavaara, Mika Jokikokko, and Parvez Rana. How far are birds, bats, and terrestrial mammals displaced from onshore wind power development? – a systematic review. *Biological Conservation*, 288:110382, 2023.

- [48] Antoine Turquet, Quentin Brissaud, Celso Alvizuri, Sven Peter Näsholm, Alexis Le Pichon, and Johan Kero. Retrieving seismic source characteristics using seismic and infrasound data: The 2020 ml 4.1 kiruna minequake, sweden. *Geophysical Research Letters*, 51(12):e2024GL109276, 2024. e2024GL109276 2024GL109276.
- [49] Kerstin Persson Waye, Michael Smith, and Mikael Ögren. Hälsopåverkan av lågfrekvent buller inomhus. Technical Report 3, Sahlgrenska Akademin Medicinska Institutionen, 2017.
- [50] Markus Weichenberger, Martin Bauer, Robert Kühler, Johannes Hensel, Caroline Garcia Forlim, Albrecht Ihlenfeld, Bernd Ittermann, Jürgen Gallinat, Christian Koch, and Simone Kühn. Altered cortical and subcortical connectivity due to infrasound administered near the hearing threshold - evidence from fmri. *PLOS ONE*, 12(4):1–19, 04 2017.