

Saare Wind Energy tuulepargi infraheli analüüs

100 Vestas V236–15 MW tuulikud

Füüsikapõhine täislaine-modelleerimine SoundSim360 abil

Prof. Ken Mattsson

Uppsala Ülikooli Teadusliku Andmetöötuse professor,
Pronumerix AB Tegevjuht

17. mai 2026

Kokkuvõte

Kohalike elanike initsiatiivil (SRS) oleme läbi viinud põhjaliku infraheli leviku analüüsi kavandatud Saaremaa avameretuulepargi piirkonnas, mida on kirjeldatud Saare Wind Energy OÜ poolt esitatud keskkonnamõjude hindamise (KMH) dokumentides [37, 38]. Hinnatud projekt koosneb 100-st Vestas V236–15 MW tuulikust rootori (gondli) kõrgusega 145 m.

Lisaks infraheli analüüsile oleme teostanud ka vastava dBA-põhise mürauuringu, et võimaldada võrdlust KMH dokumentatsioonis esitatud keskkonnahinnangutega [38]. KMH dokumendid käsitlevad öise piirväärtusena ligikaudu 35 dBA tundlike elamu- ja puhkealade eksootsiooni jaoks. Kuid kuna piirväärtuse käsitus põhineb A-kaalutud helirõhutasemetel, siis jäävad KMH dokumentides madal-sagedusliku- ja infraheli komponendid tugevasti alahinnatuiks. See suunab teostama täiendavat võrdlevat analüüsi, kasutades selleks füüsikapõhist täislaine-modelleerimist *SoundSim360* abil.

Keskkonnalubade menetlemisel praegu kasutatavad helileviku hindamise mudelid — eelkõige Nord2000 ja ISO 9613-2 — ei olnud algselt välja töötatud suurte avameretuulikute müra hindamiseks ning ilmutavad väga olulisi piiranguid, kui neid rakendada kaasaegsete turbiinide puhul. Eelkõige on piiratud nende mudelite võime esitada amplituudmoduleeritud madalsagedus- ja infraheli levikut realistlikes atmosfääritingimustes. Tagajärjena võivad nende helitasemed olla alahinnatud meteoroloogilistes olukordades, mis mõjutavad pikamaalevikut, nagu seda on öised temperatuurinversioonid või tugevamad tuulenihked.

Lisaks toob A-kaalutud helirõhutasemete (dBA) laialdane kasutamine kaasa metodoloogilise piiratuse, kui kasutada seda madalsagedusliku- ja infraheli hindamisel. A-kaalumise filter summutab tugevasti madalsagedus- ja infraheli komponente, hoolimata kasvavast teaduslikust tõendusest, et vastavad sagedused võivad mõjutada inimeste tajuprotsesse, olles ebameeldivad ning põhjustades unehäireid ja füsioloogilisi kõrvalekaldeid tundlikumal osal inimestest.

Usaldusväärne eksootsiooni hindamine nõuab seetõttu taolisi mõõtmisi ja simulatsioone, mis hõlmavad kogu asjakohast sagedusvahemikku, ulatudes allpool vähemalt 0,1 Hz-ni. Käesolevas uuringus kasutame *SoundSim360* — füüsikapõhist matemaatilist raamistikku, mis lahendab kolmemõõtmelise akustilise lainevälja, tuginemata seejuures empiirilistele korrektsioonifaktoritele või kasutaja poolt muudetavatele parameetritele. See võimaldab kooskõlaliste võrdluste tegemist tegelikkuses mõõdetud ja simuleeritud heliväljade vahel ning pakub füüsikaliselt läbipaistvama aluse keskkonnamõjude hindamiseks, kui praegu kasutatav regulatiivne praktika.

Loobumisklausel: Käesoleva aruande on koostanud Pronumerix AB ja see esindab aruande autori sõltumatut eksperthinnangut. Analüüsid põhinevad eelretsenseeritud uuringutel, teaduskirjandusel, arvutuslikel simulatsioonidel ja mõõtemetoodikatel, mis on välja töötatud koostöös Uppsala Ülikooli teadlastega ja avaldatud teaduskirjanduses. Viited Uppsala Ülikoolile kirjeldavad teadustöö akadeemilist tausta, kuid ei pea tähendama institutsionaalset kinnitust käesolevas aruandes esitatud järeldustele või soovitudele.

Tuulikumüra kõrgresolutsiooniline modelleerimine *SoundSim360* abil

Põhinedes detailsetel mõõtmistel mitmetest tuuleparkidest — sealhulgas Målarberget ja Lervik — oleme kalibreerinud kõrgtäpse arvutusliku tööriista *SoundSim360* [26], mis on võimeline simuleerima heli levikut ka keerukamate maastike kohal ja kogu sagedusspektri ulatuses, sealhulgas infraheli (alla 20 Hz sagedused).

Heli levimist suurte vahemaade taha juhivad mitmed omavahel mõjuvad füüsikalised protsessid, sealhulgas atmosfääriline kihistatus, topograafia, pinnase impedants, heliallika geomeetria ja spektraalne sisu. Täpne modelleerimine peab seetõttu hõlmama olulisi füüsikalisi nähtusi nagu difraktsioon, refraktsioon, geomeetiline hajumine, absorptsioon, ülekanne, peegeldumine ja interferents. Kui neid protsesse ei arvestata korrektselt, siis ei saa müra levikut usaldusväärselt simuleerida. *SoundSim360* ületab need väljakutsed, lahendades kolmemõõtmelise akustilise lainevõrrandi, integreerides reaalsed atmosfääriolud ja kõrgresolutsioonilised maastikuandmed ilma et oleks vaja kasutaja-kohandatavaid „vabasid parameetreid“. See tagab, et simulatsiooni täpsus sõltub ainult füüsikaliste sisendandmete õigsusest, mitte subjektiivsest kalibreerimisest.

Viimase kahe aastakümne jooksul on meie uurimisrühm välja töötanud kõrgtasemel arvutuslike meetodite komplekti spetsiifiliselt kõrgtäpse heli leviku modelleerimiseks (vt nt [21, 30, 22, 27, 28, 20, 23, 3, 19, 24, 36, 25, 31, 18, 2, 45, 44, 29, 34]). Need meetodid moodustavad *SoundSim360* aluse, mis on implementeeritud tõhusalt teostatavaks kaasaegsetel kõrge jõudlusega graafikaprotsessoritel (GPU-del), võimaldades detailsete täislaine-simulatsioonide tegemist suurte akustiliste piirkondade kohta. *SoundSim360* üksikasjade osas viitame allikale [26].

Kontrastina on täna tuulikumüra prognoosimiseks kõige laialdasemalt kasutatav arvutimudel Nord2000 [1], mida tavaliselt rakendatakse kommertstarkvarades nagu SoundPlan ja windPRO. Nord2000 on põhimõtteliselt kiirtejälgimise (ray-tracing) mudel, mis põhineb eeldusel et jälgitakse kõrgsageduslike helide levikut. Reaalsuse kahemõõtmelise lähendusena ei suuda see korrektselt esitada madalsageduste levikut, samuti ei suuda see modelleerida interferentsi mitme allika vahel. Selle difraktsiooni-käsitlus on samuti piiratud, mis on eriti problemaatiline liigendatud maastikul või hoonete ja barjääride lähedal. Varasemad tööd on näidanud, et Nord2000 annab rohkete erisustega maastikel ebausaldusväärseid tulemusi [3]. Nende puuduste leevendamiseks toobki mudel sisse arvukaid empiirilisi „häälestusparameetreid“, mis aga muudavad tulemused tugevasti sõltuvaks kasutaja suvakohastest seadetest ja eeldustest. Mitmed sõltumatud uuringud, sh Conny Larssoni omad [15], näitavad et Nord2000 alahindab süsteemselt tegelikkuses mõõdetud helitasemeid 5–7 dBA juba ca 1 km kaugusel. Veelgi lihtsustatumad mudelid, nagu ISO 9613-2 standard [10], annavad üldjoontes sarnaseid või veel vähemtäpseid tulemusi.

Olemuslike probleemidega on need traditsioonilised (lihtsustatud) mudelid silmitsi, kui püüavad simuleerida madalsagedus- või infraheli, eriti pikematel vahemaadel ja liigendatud maastikel. Nende sõltuvus kasutaja-kohandatavatest korrektsioonifaktoritest osutab olulisele ebakindlusele, mis kasvab veelgi koos tuulikute arvuga, maastiku keerukusega ja vahemaade kasvuga. Kuna madalsagedus- ja infraheli komponendid sumbuvad õhu ja maapinna mõjul väga nõrgalt, võivad need rännata palju kilomeetreid, muutes eelnimetatud modelleerimispiirangud eriti kriitilisteks.

Selleks et arvutuslik tööriist saaks olla teadus- ja inseneriringkondadele laialdaselt kasulik, peab see vastama kolmele põhikriteeriumile: 1) aluseks olev metoodika peab olema rangelt valideeritud ja läbipaistvalt dokumenteeritud; 2) tulemused peavad olema selged, tõlgendatavad ja visuaalina haaratavad; ja 3) tööriist ise peab olema usaldusväärne ja kasutajast sõltumatu, vältides vajadust mingite parameetrite *ad hoc* muutmiseks.

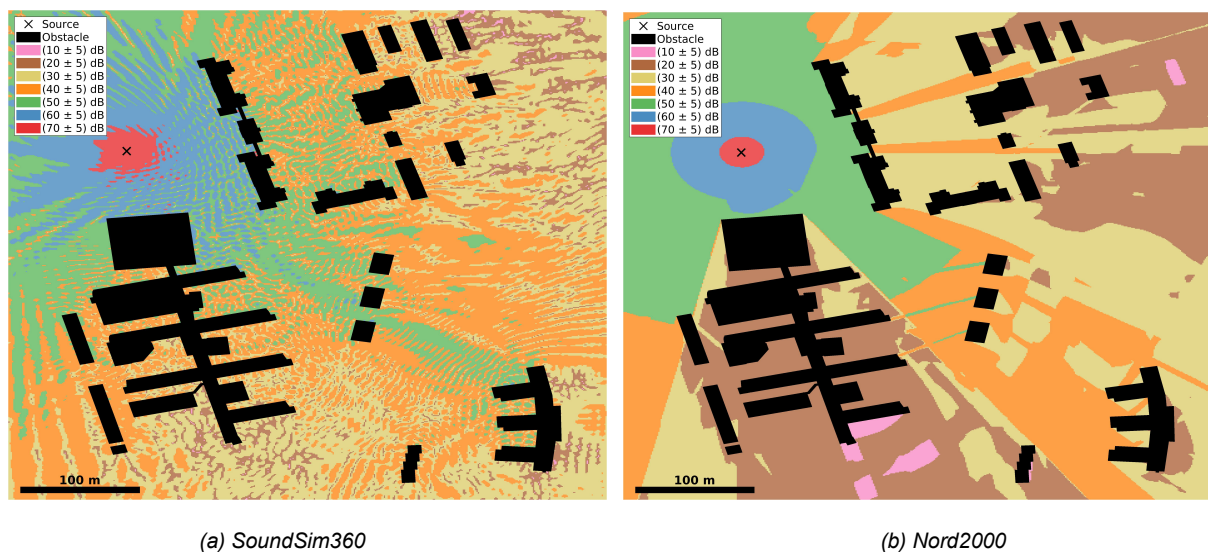
Just need põhimõtted määratlevad *SoundSim360* disainifilosoofia. Erinevalt tavapärastest kiirtejälgimise mudelitest nagu Nord2000, mis sõltuvad empiirilistest kohandustest, lahendab *SoundSim360* kolmemõõtmelise akustilise lainevõrrandi otseselt ja täies mahus, kõrvaldades seeläbi ebakindluse peamised allikad. Neli peamist kiirtejälgimise meetodi puudust, mida meie meetod ületab, on: 1) madalsagedusliku heli (alla 200 Hz) ebakohane käsitlus, 2) raskused keerukama ruumigeomeetria lahendamise vajadusel, 3) piiratud võimekus simuleerida heli liikumist läbi erinevate struktuuride ja 4) suutmatus käsitleda liikuvaid või amplituudmoduleeritud heliallikaid.

Illustratiivse näitena on joonisel 1 *SoundSim360* ja Nord2000 (rakendatuna SoundPlan 9.1-s) võrdlus 31,5 Hz heliallika puhul, mis paikneb Polacksbackenis, Uppsala Ülikoolis. Allikas asub 10 m maapinna kohal ja on helivõimsuse tasemega 105 dB. Maastiku- ja hooneandmed saadi Lantmäteriet'ilt [14] ja maapind modelleeriti kõva pinnana (impedantsiklass H Nord2000-s). Kõik teised Nord2000 parameetrid jäeti vaikeväärtustele. Saadud helirõhutaseme (SPL) jaotus 2 m kõrgusel on näidatud mõlema mudeli kohta. *SoundSim360* arvutuspiirkonna ulatus on 500 m × 600 m × 250 m. Olulised lahknevused on ilmselged ka hoonete taga olevates varjualustes, kus Nord2000 alahindab süstemaatiliselt SPL-i umbes 20–30 dB võrra. Taolised kõrvalekalded peegeldavad kiirtejälgimise meetodite põhilisi piiranguid madalsageduslikus režiimis ja rõhutavad vajadust täislane-simulatsiooni kasutamiseks tuulikumüra täpsema modelleerimise tarbeks.

Mõõdetud infraheli ja madalsageduslik müra tuulikutest

Pikaajalisemat kokkupuudet keskkonnamüraga on seostatud südame-veresoonkonna haiguste suurenenud riskiga [6, 50], mis on Lääne-Euroopas endiselt üks peamine surma põhjus. Madalsageduslik müra on seejuures eriti murettekitav selle suure levulatusetõttu ja vähese sumbumise tõttu tüüpilistes hoonekonstruktsioonides.

Praktikas tugineb regulatiivne hindamine sageli väga pealiskaudsetele arvutustele, mis tehakse tarkvaraga nagu windPRO, ja millele järgneb tabelist leitavate helisumbuvus-väärtuste mahaarvamine [12]. Selliste sumbumismudelite üldist rakendatavust on akustika kirjanduses kahtluse alla seatud [33] ja tuulikute poolt genereeritavate detailsete helispektrite piiratud avalik kättesaadavus takistab ka madalsageduslike arvutuste sõltumatut kontrollimist.



Joonis 1: Madalsagedusliku (31.5 Hz) heli simulatsioon Polacksbackenis (105 dB punktallikas 10 m maapinna kohal), võrdluses (a) *SoundSim360* ja (b) Nord2000. Näidatud on helirõhutasemed 2 m kõrgusel. Nord2000 ei suuda madalamatel sagedustel difraktsiooni korrektselt modelleerida.

Füüsikalist mõtet sisaldavate hinnangute saamiseks tuleks tuulikumüra hinnata laiaribalise spektraalanalüüsi abil kolmandik-oktaaviribade (fc) lõikes, mis hõlmavad nii kuuldava- kui infraheli vahemikku (ligikaudu 0,1 Hz kuni 20 kHz). Keskkonnahindamised raporteerivad aga tavaliselt oktaaviriba andmeid ainult vahemikus 31–10 000 Hz, jättes kõrvale üha suuremate kaasaegsete tuulikute puhul üha olulisemaks saanud infra- ja madalsagedusheli komponendid.

Møller ja Søndergaardi varasemad uuringud [32, 43] näitasid, et madalsagedusliku müra suhteline panus kasvab koos tuuliku suurusega. See peegeldab akustilise emissiooni nihkumist madalamatele sagedustele, vihjates et üha suuremad tuulikud kiirgavad üha suurema osa oma helienergiast just madalsagedusliku- ja infraheli vahemikus. Hiljutised suured mõõtekampaaniad kinnitavad sedasama trendi [49]. Tuuleturbiinide müraspektris kipuvadki domineerima just

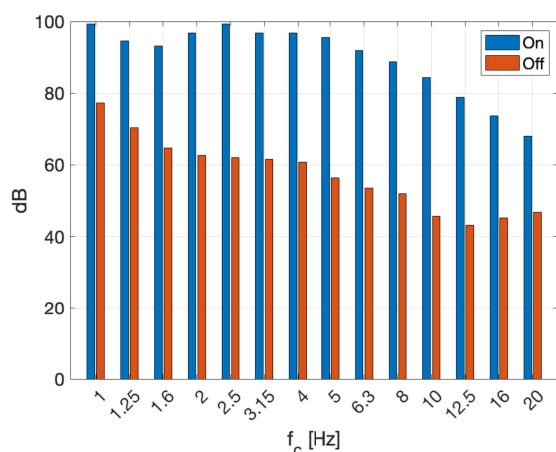
madalsageduslikud komponendid, mille koguenergiast kannavad põhiosa alla 10 Hz jäävad sagedused. Energia spektraalset maksimumi on sageli täheldatud allpool 1 Hz ja skaleerimine näitab, et need komponendid suurenevad koos rootori diameetri ja laba pikkuse suurenemisega. Sellistes tingimustes muutub füüsikaliselt puudulikuks selline hindamine, mis põhineb ainult A-kaalutud helirõhutasemetel (dBA), sest A-kaalumiskõver summutab tugevasti sagedusi alla 20 Hz. Alternatiivsed kaalumiskõverid, nagu C- ja G-kaalumine, pakuvad parandatud tundlikkust madalsagedustele, kuid ei kajasta ikkagi kogu nende kantavat akustilist energiat (vt joonis 2).

Målarberget tuulepargis tehti 23. oktoobril 2024 infraheli välimõõtmised nii tuulikute töötamise kui (negatiivsetest elektrituruhindadest tingitud) väljalülitamise ajal (joonis 2). Tulemused näitavad, et tuulikute töö oli kohalikuks domineerivaks infraheli allikaks. Laiaribaline tase vahemikus 1–20 Hz oli tuulikute väljalülitamisel ligikaudu 27 dB madalam, kui töötavate tuulikute tingimustes. Analoogilised mõõtmistulemused saadi ka Lervik tuulepargis 21. mail 2024.

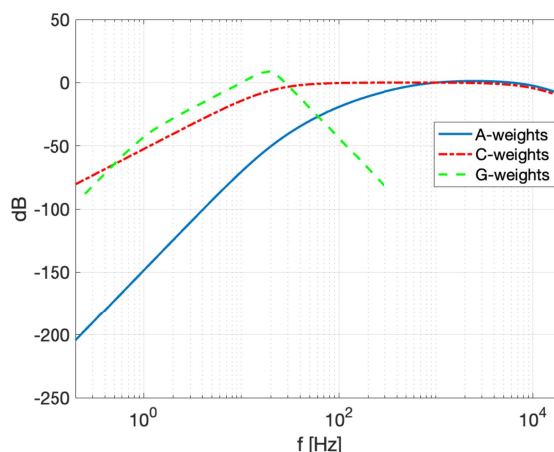
Kolmandik-oktaaviribade summeerimine vahemikus 1–20 Hz annab tuulikute töötamise ajal laiaribaliseks (kaalumata) infrahelitasemeks ligikaudu 106,4 dB. Sageduskaalutud tasemetena väljendatuna oleks see ca 22,7 dBA, 73,9 dBC ja 92,1 dBG. Tuulikute väljalülitamise ajal olid vastavad tasemed 79,1 dB (kaalumata) ning –2,8 dBA, 44,5 dBC ja 59,3 dBG kaalutuna. Need tulemused tõstavad esile mürataseme hindamise tugeva sõltuvuse mõõtmiseks kasutatava sageduskaalumise valikust.

Sagedusi alla ca 1 Hz ei kaasatud mõõtmistesse praeguste instrumentide piiratuse tõttu. Kuid nii arvutuslik modelleerimine kui ka välivaatlused näitavad, et tuugeni energiaspektri tipp võib asuda vahemikus 0,2–0,6 Hz, sõltuvalt selle disainist ja töötingimustest.

Mitmed sõltumatud uuringud raporteerivad, et siseruumides on infraheli tasemed sageli osutunud 3–5 dB kõrgemaks, kui on vastavad tasemed väljaspool hooneid [13, 4, 5, 7]. See on tavaliselt seletatav lainete struktuurilise seostumise ja resoneerumise efektidega hoonetes sees, mistõttu võivad madalsageduslikud rõhufluktuatsioonid siseruumides võimenduda. Need leiud rõhutavad selgelt ka sisetingimustes toimuva ekspositsiooni käsitlemise tähtsust, kui hinnatakse inimeste võimalikku reaktsiooni tuuliku infrahelile.



(a) Helirõhk



(b) A-, C- ja G- kaalutuna

Joonis 2: (a) Infraheli tasemed mõõdetuna tuugeni töötamise ja seismise ajal, näidates antud tuugeni panust kohapealsesse madalsageduslikku helifooni. (b) Sagedus-sõltuvuslik sumbumine, mille tekib mõõtmisnäitusesse A-, C- ja G- kaalutud filtrite kasutamisel, muudab madalsagedusliku- ja infraheli mõõtmistulemusi nii nagu joonisel näidatud.

Infraheli mõõtmise seadmed ja nende kalibreerimine

Täpne infraheli mõõtmine sagedustel, mis lähenevad 1 Hz-le ja sellest veelgi allapoole, nõuab seadmeid mis on vastava sagedusvahemiku tarbeks tõendatult kalibreeritud. Usaldusväärset kalibreerimist umbes 1 Hz juures suudab teostada NORSAR-is, kasutades oma Hyperion referentssüsteemi CTBTO sertifitseeritud infraheli monitoorimisjaamas Elverumis, Norras.

Käesolevas uuringus kasutasime nelja Lidströmi infraheli mikrofoni - andureid mis töötati Rootsist algselt välja 1980. aastate alguses helikopterite tuvastamis-rakenduste tarbeks [17]. Neid andureid iseloomustab kõrge tundlikkus ja mehaaniline usaldusväärsus, mis teeb need hästi sobivaks pikaajalisteks väliskeskkonna mõõtmisteks. Neid on varem kasutanud Rootsi Kaitseuuringute Asutus (FOI), Kuninglik Tehnikaülikool (KTH) ning neid kasutab praegu Rootsi Kosmosefüüsika Instituut (IRF) Kirunas, Johan Kero järelevalve all [48]. Anduritest kolm hangitigi koostöös IRF-iga. Kõik neli andurit kalibreeriti enne nende kasutuselevõttu NORSAR-is, sealse Hyperion referentsüsteemi järgi.

Välitööde ajal hindasime ka kommertstootjate taseme-andureid, sealhulgas Nor140 ja Nor145, mida tavaliselt kasutatakse keskkonnamüra hindamisel. Kuigi tootja spetsifikatsioonid näitavad Nor145 seadme tundlikkust kuni ca 0,4 Hz, näitavad meie võrdlevad mõõtmised vähenevat täpsust väga madalatel sagedustel. Alla ca 3 Hz erinesid mõõdetud tasemed oluliselt referentskalibreeritud anduritega saadud tasemetest. See toob esile usaldusväärse madalsagedusliku kalibreerimise tähtsuse infraheli mõõtmiste tegemisel. Instrumendid mis ei ole kalibreeritud 1 Hz juures, võivad tuua tuulikute infraheli hindamisse olulist ebakindlust.

Usaldusväärne infraheli monitooring nõuab seega professionaalselt kalibreeritud seadmeid. Kommertssüsteemid tootjatelt nagu Hyperion ja Chaparral võimaldavad täpseid mõõtmisi ligikaudu sagedusvahemikus 0,1–200 Hz. Mõõtmistäpsuse parandamiseks alla 1 Hz on hiljuti meie mõõtmis-süsteemi integreeritud kaks Hyperioni mikrofoni. Olulised on ka mõõtmised siseruumides, kuna hoonete konstruktsioonid võivad madalsageduslikke rõhu-fluktuatsioone modifitseerida ning oma struktuurse siduvuse ja resonantsiefekti kaudu neid kohati võimendada.

Mõõtmiskampaaniad, mida kasutati meie arvutusliku levikumudeli kalibreerimiseks ja valideerimiseks ning infraheli allika tugevuse hindamiseks pöörd-modelleerimise teel, viidi läbi kahes tuulepargis: Lervik tuulepark (21. mai 2024 ja 10. september 2024) ning Målarberget tuulepark (26. oktoober 2023, 23. oktoober 2024 ja 16. detsember 2024). Kõikjal tehti mõõtmised ühes kuni kolmes vastuvõtukohas. Samaaegseid atmosfäärilisi andmeid salvestati iga kampaania ajal ja integreeriti need pöörd-modelleerimise protseduuri. Juurdepääs operatiivsetele tuulikuandmetele, sealhulgas tuuliku sisse-/väljalülitatud olekule, oli täpse tõlgendamise jaoks oluline ja sellega varustati meid koostöös vastava tuulepargi operaatoriga.

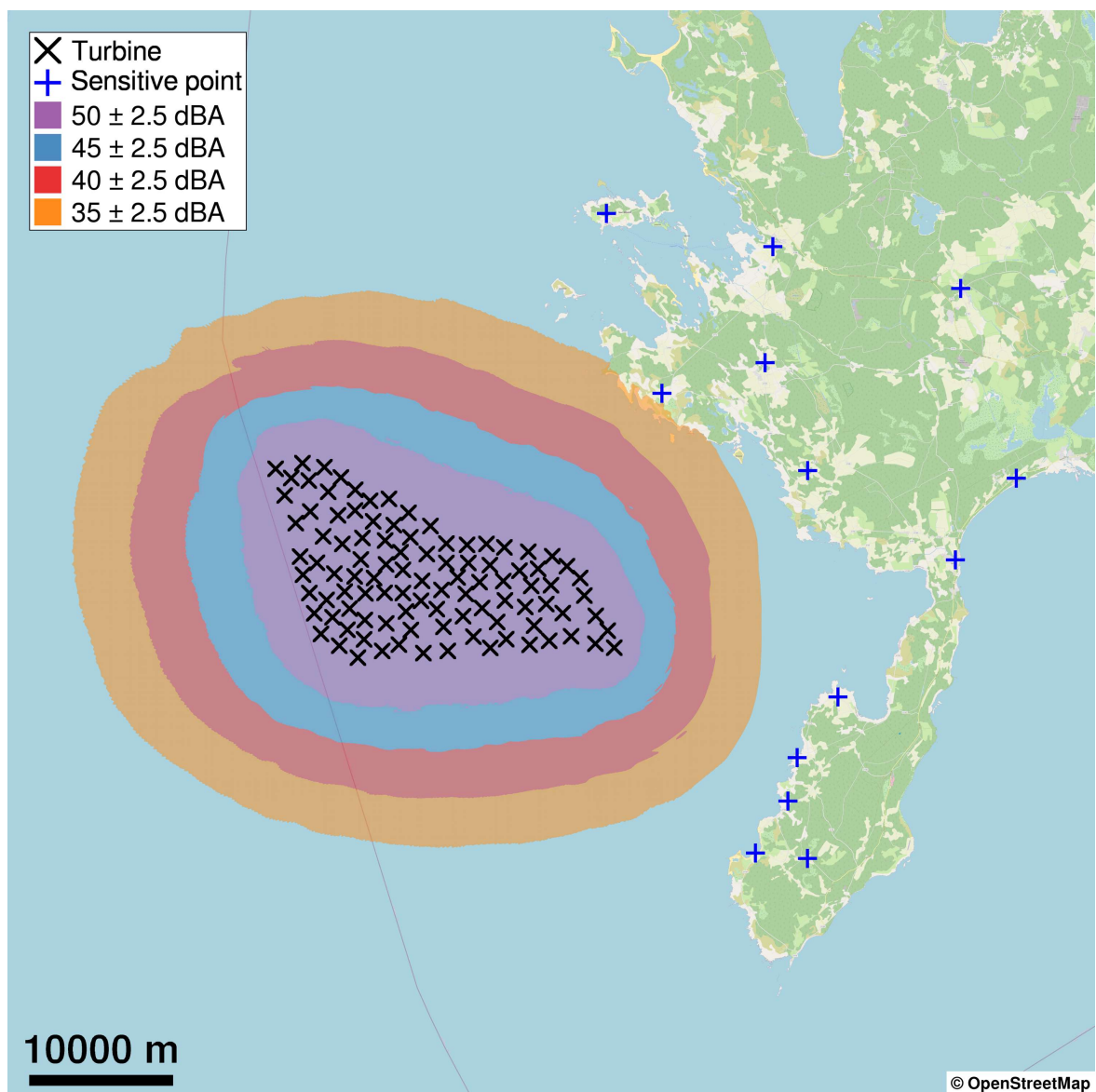
Mõõtmismetoodika, kalibreerimisprotseduuride ja andmestiku üksikasjalik kirjeldus on esitatud [26]-s. Mõõtmisandmestik on saadaval mõistliku nõudmise korral. Målarberget tuulikud on Vestas V150–4,3 MW, Lervikus SG170–6,6 MW tuulikud. Viie sõltumatu mõõtmiskampaania tulemuste keskmistamine annab hinnatava helivõimsuse tasemeks ligikaudu 163 dB 1 Hz juures. Need leiud rõhutavad õigesti kalibreeritud instrumentatsiooni kasutamise tähtsust tuuliku infraheli hindamisel, kuna seadmete ebapiisav kalibreerimine võib viia tegelike ekspositsioonitasemete süstemaatilise alahindamiseni.

Kuuldava heli (dBA) levik Saare Wind Energy tuulepargis

Projekt koosneb 100-st kavandatud Vestas V236–15 MW tuulikust gondli kõrgusega 145 m. Iga tuuliku jaoks eeldati helivõimsuse taset ligikaudu 115,3 dBA, mis on kooskõlas [38]-s esitatud A-kaalutud müraemissiooni kaardiga. Tuleks eeldada ligikaudu ± 3 dB kõikumist tulenevalt atmosfääriolude, hetke töötingimuste ja müraallika kohta esitatavate algandmete varieeruvusest, kooskõlas [38]-s esitatud aruteluga.

Simulatsioonid tehti, kasutades representatiivset õist atmosfääriprofili (31. märts 2023, kell 04:00; meteoroloogilised andmed saadi THREDDS Data Server'ilt), mis vastab stabiilsetele atmosfäärilistele tingimustele pärituulega 8 m/s 10 m kõrgusel maapinnast. Sellistest tingimustest on teada, et need võimendavad pikamaalevikut. Maapinna omadused modelleeriti Nord2000 klassifikatsiooniskeemi järgi [1], kus pehmed pinnad esitati impedantsiklassiga E ja kõvad pinnad (nagu vesi, asfalt ja betoon) käsitleti täielikult peegeldavatena (klass H). Atmosfääriline sumbumine implementeeriti ISO 9613-1 [9] järgi.

Tulemuseks saadud A-kaalutud helirõhutasemete ruumiline jaotus on näidatud joonisel 3 ning vastavad helirõhutasemed tundlike ekspositsioonipunktide asukohtades koondatud tabelisse 1.



Joonis 3: A-kaalitud helirõhutasemete (dBA) simulatsioon, kasutades SoundSim360, arvestades kõigis suundades levikuga tagantuule 8m/s puhul ning arvestades atmosfääri representatiivse profiiliga. Tundlike ekspositsioonipunktide info tabelis 1.

Asukoht	x-koord	y-koord	SPL [dBA]	Lähim tuulik [m]
Vilsandi	373505	6473120	20,1	24127
Kihelkonna	384964	6470470	14,8	26427
Kärla	397891	6467211	5,0	33247
Lümanda	384178	6462440	22,9	19753
Karala	376960	6460525	31,2	13682
Kotlandi	386928	6454850	24,5	17523
Mändjala	401418	6453922	7,6	30382
Salme	397038	6448346	13,8	24567
Rahuste	388585	6438994	24,3	15993

Asukoht	x-koord	y-koord	SPL [dBA]	Lähim tuulik [m]
Kaunispe	385619	6434842	25,8	14911
Jämaja	384881	6431822	24,7	16194
Türju	382501	6428239	24,2	17436
lide	386132	6427762	19,4	19996

Tabel 1. A-kaalutud helirõhutasemed (dBA) tundlikes ekspositsioonipunktides, arvatuna SoundSim360 abil. Tulemused on näidatud pärituule kiirusel 8 m/s, representatiivse öise atmosfääriprofiili tingimustes. Allika eeldatav helivõimsus 115,3 + 3 dBA.

Meie simulatsioonid näitavad osal rannajoonest pisut kõrgemaid A-kaalutud helirõhutasemeid võrreldes KMH dokumentatsioonis esitatutega, kuid prognoositavad tasemed jäävad alla 35 dBA, mis on [38]-s arutatud öiseks sihtväärtuseks.

Arvutused põhinevad Vestas'te tootja poolt pakutud allikahelivõimsuse andmetel. Siiski on paljud sõltumatud välitööd teatanud süstemaatilistest lahknevustest allika ennustatud ja tegelikult mõõdetud A-kaalutud helirõhutasemete vahel, eriti stabiilsetes öistes atmosfääritingimustes, mis võivad pikamaalevikut võimendada.

Erilist huvi pakub amplituudmoduleeritud (AM) müra [15], mis esineb sageli õhtustes ja öistes tingimustes. AM tekitab iseloomulikku ajas muutuvat „vuhinat“ või siis pulseerivat heli, mis võib soodsates atmosfääritingimustes levida vahemaadele üle 10 km. Kui AM tugevalt esile kerkib, võivad lühiajalised tippväärtused ületada statsionaarse mudeli ennustusi mitme dBA võrra. Kuna seda nähtust üldiselt ei ole standardsetes püsiseisundi emissioonikaartides selgesõnaliselt kajastatud, siis võib ka see kaasa aidata tajumusliku häirivuse ja öise häirivuse alahindamisele tavapärastes regulatiivsetes hinnangutes.

Infraheli levik Saare Wind Energy tuulepargis

Projekt koosneb 100-st kavandatud Vestas V236–15 MW tuulikust gondli kõrgusega 145 m. Iga tuuliku eeldatav helivõimsuse tase 1 Hz juures on 163 dB. See tase on kooskõlas väärtustega, mis on kaasaegsete suurte tuulikute (Vestas V150–4,3 MW ja SG170–6,6 MW) tuletatud sõltumatutest mõõdistustest, nii nagu on raporteeritud [26]-s. Tõenäoliselt on tegelikkuses helivõimsuse kasv veel suurem tänu mõõtmete kasvuga kaasnevale efektile.

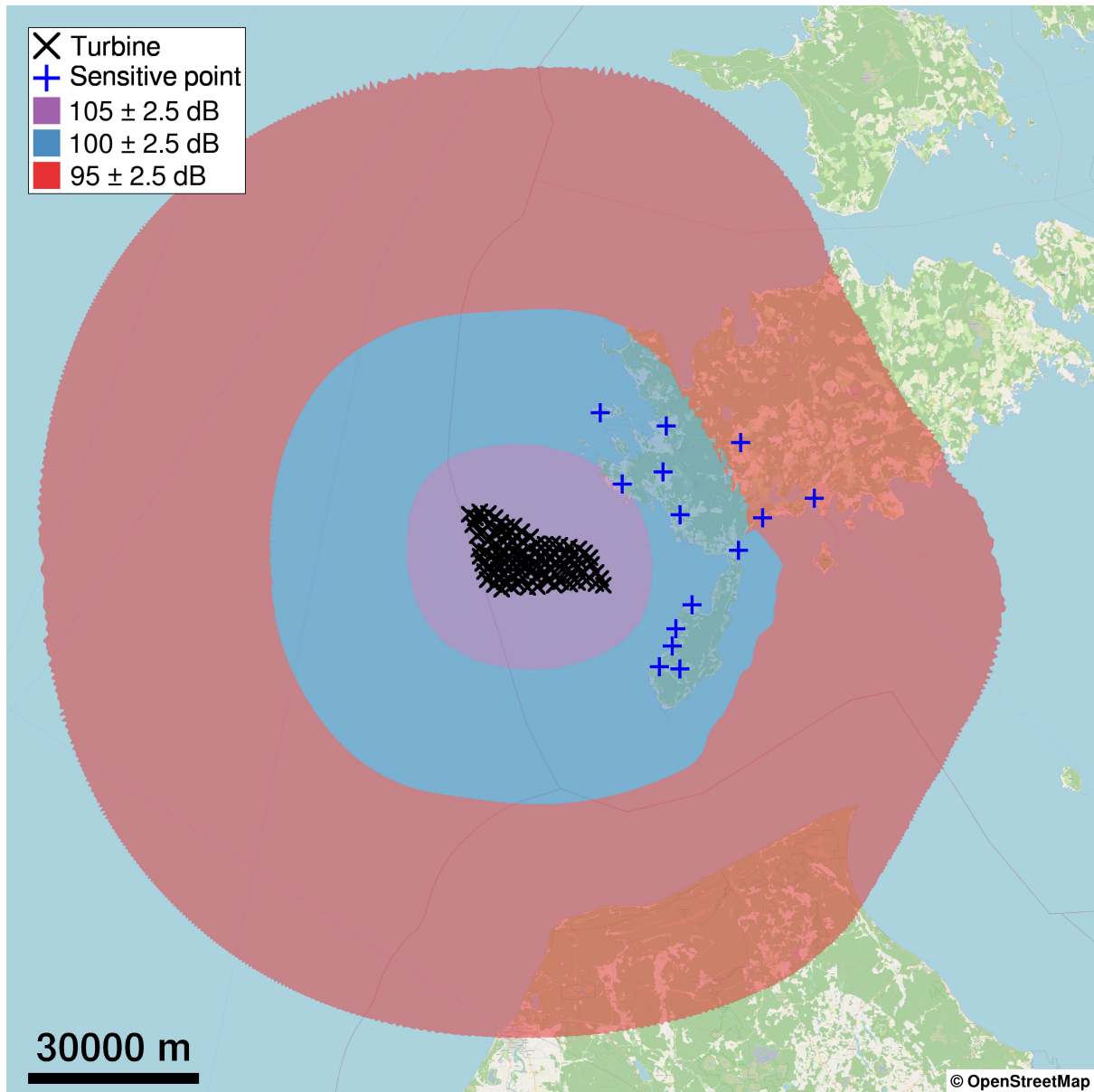
Simulatsioonid teostati, kasutades representatiivset öist atmosfääriprofiili (31. märts 2023, kell 04:00; meteoroloogilised andmed THREDDS Data Server'ilt), mis vastab stabiilsetele atmosfääritingimustele pärituulega 8 m/s (10 m kõrgusel maapinnast). Sellistest tingimustest on teada, et need võimendavad pikamaalevikut. Maapinna omadused modelleeriti Nord2000 klassifikatsiooniskeemi järgi [1], kus pehmed pinnad esitati impedantsiklassiga E ja kõvad pinnad (nagu vesi, asfalt, betoon) täielikult peegeldavatena (klass H). Atmosfääriline sumbumine implementeeriti ISO 9613-1 [9] järgi.

Tulemuseks saadud 1 Hz infrahelivälja ruumiline jaotus on näidatud joonisel 4, vastavad helirõhutasemed tundlikes ekspositsioonipunktides on koondatud tabelisse 2.

Arvutatud 1 Hz tasemed jäävad ekspositsioonipunktides vahemikku ca 95–105 dB. Sõltuvalt atmosfääri stabiilsusest, tuule suunast ja maapinna relieefist võivad esineda variatsioonid ligikaudu ± 15 –20 dB. Infraheli tase 95 dB 1 Hz juures vastab integreeritud laiaribalisele tasemele (1–20 Hz) ligikaudu 103 dB. Mitmed eelretsenseeritud uuringud on raporteerinud mõõdetavaid neurofüsioloogilisi reaktsioone kontrollitud laboritingimustes ekspositsioonitasemetel vahemikus 80–90 dB [51, 11]. Arvestades nii tulemuseks saadud ekspositsioonitasemeid kui ka mõjutatud piirkonna ruumilist ulatust, väärivad sellised tulemused väga hoolikat kaalumist keskkonna- ja rahvatervise vaates.

Teine simulatsioon viidi läbi, kasutades representatiivset päevast atmosfäärilist profiili idasuunas puhuva 4 m/s tuulega. Vastav ruumiline jaotus on joonisel 5, ekspositsioonipunktide tasemed on

koondatud tabelisse 3. Võrdlus näitab selgelt, et atmosfääritingimused ja tuule suund mõjutavad infraheli levikut oluliselt, eriti suuremate kauguste puhul allikast.



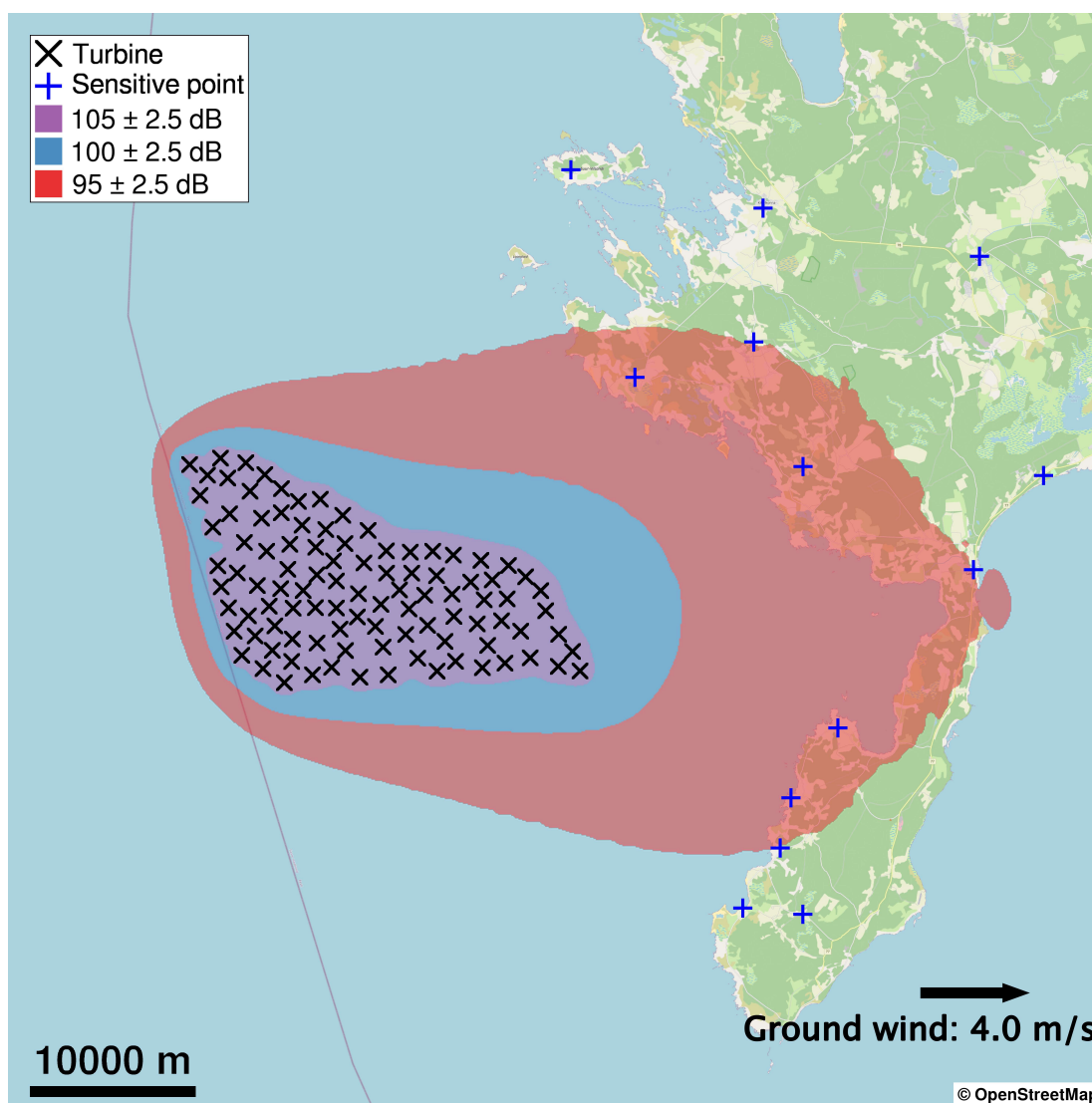
Joonis 4: Simuleeritud infrahelitasemed sagedusel 1 Hz (dB), arvestades atmosfääri representatiivse öise profiiliga ja levikuga tagantuule 8m/s puhul. Arvutatud kasutades SoundSim360. Punasega märgitud ala sisekontuur vastab tasemele ≥ 97.5 dB. Tundlike ekspositsioonipunktide info on koondatud tabelisse 2.

Määramatuste tõlgendus: Värvikontuurid esindavad tasemeintervalle, mis hõlmavad ka mudeli kõikumust. Näiteks 95 dB-na märgistatud kontuur vastab ca 95 dB $\pm 2,5$ dB-le. Seda tingivad peamiselt erinevad varieeruvused pindade impedantsis, interferentsimustrites ja atmosfääri sumbuves.

Asukoht	x-koord	y-koord	SPL (1 Hz) [dB]	Lähim tuulik [m]
Vilsandi	373505	6473120	100,4	24127
Kihelkonna	384964	6470470	99,0	26427
Kärla	397891	6467211	96,6	33247
Lümanda	384178	6462440	100,3	19753

Asukoht	x-koord	y-koord	SPL (1 Hz) [dB]	Lähim tuulik [m]
Karala	376960	6460525	102,3	13682
Kuressaare	410580	6457144	95,5	40094
Kotlandi	386928	6454850	100,7	17523
Mändjala	401418	6453922	97,0	30382
Salme	397038	6448346	98,3	24567
Rahuste	388585	6438994	100,4	15993
Kaunispe	385619	6434842	100,9	14911
Jämaja	384881	6431822	100,6	16194
Türju	382501	6428239	100,7	17436
lide	386132	6427762	99,6	19996

Tabel 2. Arvutatud infraheli tasemed 1 Hz juures (dB) tundlikes ekspositsioonipunktides öistes tingimustes (pärituul 8 m/s). Allika eeldatav helivõimsus: 163 dB 1 Hz juures.



Joonis 5: Simuleeritud sageduse 1 Hz (dB) tasemed päevastes atmosfääritingimustes ja läänetuulega 4 m/s. Arvutatud SoundSim360 abil. Joonis on illustreerimas infraheli leviku sõltumist tuule suunast ja atmosfääritingimuste mõjutustest. Tundlike ekspositsioonipunktide info on tabelis 3.

Asukoht	x-koord	y-koord	SPL (1 Hz) [dB]	Lähim tuulik [m]
Vilsandi	373505	6473120	86,4	24127
Kihelkonna	384964	6470470	88,6	26427
Kärla	397891	6467211	89,5	33247
Lümanda	384178	6462440	92,5	19753
Karala	376960	6460525	94,0	13682
Kotlandi	386928	6454850	94,3	17523
Mändjala	401418	6453922	91,5	30382
Salme	397038	6448346	92,5	24567
Rahuste	388585	6438994	93,9	15993
Kaunispe	385619	6434842	93,6	14911
Jämaja	384881	6431822	92,4	16194
Türju	382501	6428239	90,8	17436
lide	386132	6427762	90,1	19996

Tabel 3. Arvutatud infraheli tasemed 1 Hz juures (dB) tundlikes ekspositsioonipunktides päevastes tingimustes (läänest idasuunas puhuv tuul 4 m/s). Allika eeldatav helivõimsus: 163 dB sageduse 1 Hz juures.

Järeldused

Meie *SoundSim360* simulatsioonid kavandatud Saaremaa avameretuulepargi jaoks näitavad, et infrahelitasemed joonisel 4 punaseks märgitud piirkonna sisemise piiri sees võivad ulatuda ligikaudu 97,5 dB-ni 1 Hz juures. Integreerituna sagedusvahemikus 1–20 Hz, vastab see laiaribalisele infrahelitasemele ligikaudu 106 dB. Piirkond, mis on kokkupuutes tasemetega üle 92,5 dB sageduse 1 Hz juures, ulatub tuulepargist paljude kilomeetrite kaugusele.

Vastavad dBA-simulatsioonid näitavad öiseid A-kaalutud helirõhutasemeid, mis on üldiselt kooskõlas KMH dokumentatsioonis esitatutega, kuigi mõnes asukohas ka pisut kõrgemad. Ennustatud tasemed tundlike ekspositsioonipunktide elamutele jäävad alla kõneldud 35 dBA öise sihtväärtuse. Tulemusi tuleks aga tõlgendada ettevaatlikult, eriti stabiilsetes öistes atmosfääritingimustes, kus amplituudimodulatsiooni ja pikamaaleviku efektid võivad veelgi võimenduda.

Tuleb rõhutada et madalsagedusliku- ja infraheli prognoose mõjutavad atmosfääritingimustest, mürallaika tehnoandmetest, maastikurelieefist ja modelleerimiseeldustest tulenevad kõikumised. Lisaks tuleks hoolikalt tõlgendada kitsasriba tasemete (näiteks 1 Hz juures) ja laiaribaliste mõõtühikute omavahelisi suhteid.

Kasvav hulk eelretsenseeritud teadusuuringuid [8, 39, 40, 41, 51, 11, 16, 35, 42] on käsitlenud füsioloogilisi, tajumuslikke ja afektiivseid reaktsioone madalsageduslikule- ja infrahelile. Mõned kontrollitud katsed teatavad mõõdetavaist muutustest füsioloogilistes või afektiivsetes markerites teatud ekspositsioonitingimustes, sealhulgas olukordades kus heli ei ole teadlikult tajutav. Kirjandus jääb aga heterogeenseks ja selliste reaktsioonide ulatus, mehhanismid ja pikaajalised tagajärjed on jätkuva teadusliku uurimise teemad.

Sarnaseid küsimusi on tõstatatud ka eluslooduse ja loomade käitumise kontekstis, kus infraheli akustilist energiat on välja pakutud potentsiaalse mõjurina käitumisele, stressireaktsioonidele või navigeerimisele. Praegune tõendatus selles valdkonnas jääb piiratuks ja ebakindlaks [47, 46].

Tuulikumüra iseloomustatakse veel amplituutmodulatsioonist ja ajalisest varieeruvusest lähtuvalt, sh madalsageduslike komponentide osas, mis võivad mõjutada tajumuslikke reaktsioone teisiti kui tavapärased püsiva keskkonnamüra allikad.

Kokkuvõttes osutavad modelleerimistulemused ja olemasolev teaduskirjandus sellele, et infraheli ja madalsageduslik heli võivad meie akustilises keskkonnas esindada komponente, mis jäävadki iseloomustamata juhul kui kasutada tänaseid standardseid, peamiselt A-kaalutud helitasemel põhinevaid hindamismõdikuid. Ettevaatusprintsipi ja teaduspõhisuse vaatekohast osutavad siinsed leiud vajadusele jätkuvaks uurimistööks eksponeerumise paremaks iseloomustamiseks, sõltumatuteks pikaajalisteks mõõtmisteks ning madalsagedus- ja infraheli hoolikamaks käsitlemiseks tulevastes keskkonnamõjude hindamistes.

Kasutatud allikad

- [1] Nina Aguilera, Henrik Naglitsch ja Katrin Olofsson. Beräkningsmanual Nord2000: för bullerberäkningar i väg-och järnvägsplaner. Tehniline aruanne 2024:033, Efterklang, 2024.
- [2] Martin Almquist ja 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.
- [3] Martin Almquist, Ilkka Karasalo ja Ken Mattsson. Atmospheric sound propagation over large-scale irregular terrain. *Journal of Scientific Computing*, 61(2):369–397, 2014.
- [4] Stephen E. Ambrose, Robert W. Rand ja 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.
- [5] Walker B, Hessler G, Hessler D, Rand R ja Schomer P. A Cooperative Measurement Survey and Analysis of Low Frequency and Infrasound at the Shirley Wind Farm in Brown County, Wisconsin. Aruande nr 122412-1, 2012.
- [6] Mathias Basner, Wolfgang Babisch, Adrian Davis, Mark Brink, Charlotte Clark, Sabine Janssen ja Stephen Stansfeld. Auditory and non-auditory effects of noise on health. *The Lancet*, 383(9925):1325–1332, 2014.
- [7] Richard A Carman. Measurement procedure for wind turbine infrasound. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, 250:6143–6153. Institute of Noise Control Engineering, 2015.
- [8] Åke Danielsson ja Ulf Landström. Blood pressure changes in man during infrasonic exposure. *Acta Medica Scandinavica*, 217(5):531–535, 1985.
- [9] International Organization for Standardization. Acoustics: Attenuation of Sound During Propagation Outdoors. ISO, 1993.
- [10] International Organization for Standardization. Acoustics-Attenuation of Sound During Propagation Outdoors: Part 2: General Method of Calculation. 1996.
- [11] Caroline Garcia Forlim, Leonie Ascone, Christian Koch ja 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.
- [12] Dan Hoffmeyer ja Jørgen Jakobsen. Sound insulation of dwellings at low frequencies. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 29(1):15–23, 2010.
- [13] N D Kelley, H E McKenna, R R Hemphill, C L Etter, R L Garrelts ja N C Linn. Acoustic noise associated with the mod-1 wind turbine: its source, impact, and control. Tehniline aruanne, Solar Energy Research Inst. (SERI), Golden, CO (USA), 02 1985.
- [14] Lantmateriet. Terrain Model Download, grid 1+. <https://www.lantmateriet.se/sv/Kartor-och-geografisk-information/geodataprodukter/produktlista/markhojdmmodell-nedladdning-grid-1/>, 2021.
- [15] Conny Larsson. Ljud från vindkraftverk, modell-validering-mätning: Slutrapport Energimyndighetens projekt 32437-1. Tehniline aruanne, Uppsala Ülikool, LUVÅL, 2014.
- [16] Francesca Lionetti, Arthur Aron, Elaine N. Aron, G. Leonard Burns, Jadzia Jagiellowicz ja 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.
- [17] L. Lyszka. Infrasound: A Summary of 35 Years of Infrasound Research. IRF teaduslik aruanne. Swedish Institute of Space Physics, 2008.
- [18] Lukas Lundgren ja Ken Mattsson. An efficient finite difference method for the shallow water equations. *Journal of Computational Physics*, 422:109784, 2020.

- [19] K. Mattsson, M. Almqvist ja M. H. Carpenter. Optimal diagonal-norm SBP operators. *Journal of Computational Physics*, 264:91–111, 2014.
- [20] K. Mattsson ja 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.
- [21] K. Mattsson, M. Svärd, M.H. Carpenter ja J. Nordström. High-order accurate computations for unsteady aerodynamics. *Computers & Fluids*, 36:636–649, 2006.
- [22] K. Mattsson, M. Svärd ja M. Shoeybi. Stable and accurate schemes for the compressible navier-stokes equations. *Journal of Computational Physics*, 227(4):2293–2316, 2008.
- [23] Ken Mattsson. Summation by parts operators for finite difference approximations of second-derivatives with variable coefficients. *Journal of Scientific Computing*, 51:650–682, 2012.
- [24] Ken Mattsson. Diagonal-norm upwind SBP operators. *Journal of Computational Physics*, 335:283–310, 2017.
- [25] Ken Mattsson, Martin Almqvist ja Edwin van der Weide. Boundary optimized diagonal-norm SBP operators. *Journal of Computational Physics*, 2018.
- [26] Ken Mattsson, Gustav Eriksson, Leif Persson, José Chilo ja Kourosh Tatar. Efficient finite difference modeling of infrasound propagation in realistic 3D domains: Validation with wind turbine measurements. *Applied Acoustics*, 243:111156, 2026.
- [27] Ken Mattsson, Frank Ham ja Gianluca Iaccarino. Stable and accurate wave-propagation in discontinuous media. *Journal of Computational Physics*, 227(19):8753–8767, 2008.
- [28] Ken Mattsson, Frank Ham ja Gianluca Iaccarino. Stable boundary treatment for the wave equation on second-order form. *Journal of Scientific Computing*, 41(3):366–383, 2009.
- [29] Ken Mattsson ja Ylva Ljungberg Rydin. Implicit summation by parts operators for finite difference approximations of first and second derivatives. *Journal of Computational Physics*, 473:111743, 2023.
- [30] Ken Mattsson ja Jan Nordström. High order finite difference methods for wave propagation in discontinuous media. *Journal of Computational Physics*, 220(1):249–269, 2006.
- [31] Ken Mattsson ja Pelle Olsson. An improved projection method. *Journal of Computational Physics*, 372:349–372, 2018.
- [32] Henrik Möller ja Christian Sejer Pedersen. Low-frequency noise from large wind turbines. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 129(6):3727–3744, 2011.
- [33] Henrik Möller, Steffen Pedersen, Kerstin Persson Wayne ja Christian Sejer Pedersen. Comments to the article „Sound insulation of dwellings at low frequencies" I. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 30(3):229–231, 2011.
- [34] Pelle Olsson, Gustav Eriksson ja Ken Mattsson. Projection based summation-by-parts methods, embeddings and the pseudoinverse. *Journal of Computational Physics*, 524:113689, 2025.
- [35] M. Pluess, E. Assary, F. Lionetti, K. J. Lester, E. Krapohl, E. N. Aron ja 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.
- [36] Ylva Rydin, Ken Mattsson ja Jonatan Werpers. High-fidelity sound propagation in a varying 3D atmosphere. *Journal of Scientific Computing*, 77(2):1278–1302, 2018.
- [37] Saare Wind Energy OÜ. Environmental impact assessment program for the saaremaa offshore wind farm. <https://swe.ee/EIA/SWE%20OWF%20EIA%20program%2030.03.2021%20ENG.pdf>, märts 2021. KMH programm, 30. märts 2021.
- [38] Saare Wind Energy OÜ. Summary of the environmental impact assessment report for the saaremaa offshore wind farm. https://swe.ee/EIA/SWE_EIA_report_Summary_14.08.2023_ENG.pdf, august 2023. KMH aruande kokkuvõte, 14. august 2023.
- [39] Alec N. Salt ja Timothy E. Hullar. Responses of the ear to low frequency sounds, infrasound and wind turbines. *Hearing Research*, 268(1):12–21, 2010.
- [40] Alec N. Salt ja James A. Kaltenbach. Infrasound from wind turbines could affect humans. *Bulletin of Science, Technology & Society*, 31(4):296–302, 2011.
- [41] Alec N Salt ja Jeffery T Lichtenhan. How does wind turbine noise affect people. *Acoustics Today*, 10(1):20–28, 2014.
- [42] Kale R. Scattery, Dawson VonStein, Lisa B. Prichard, Brian C. Franczak, Trevor J. Hamilton ja Rodney M. Schmaltz. Infrasound exposure is linked to aversive responding, negative appraisal, and elevated salivary cortisol in humans. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, Volume 20 – 2026, 2026.
- [43] 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.

- [44] Vidar Stiernström, Martin Almquist ja 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.
- [45] Vidar Stiernström, Lukas Lundgren, Murtazo Nazarov ja Ken Mattsson. A residual-based artificial viscosity finite difference method for scalar conservation laws. *Journal of Computational Physics*, 430:110100, 2021.
- [46] Michael Stocker. Infrasonic acoustic energy produced by offshore wind turbine energy generation may interfere with bird and cetacean navigation cues. *Environmental Science and Pollution Research*, 2026.
- [47] Anne Tolvanen, Henri Routavaara, Mika Jokikokko ja 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 ja Johan Kero. Retrieving seismic source characteristics using seismic and infrasound data: The 2020 ML 4.1 Kiruna minequake, Sweden. *Geophysical Research Letters*, 51(12), 2024.
- [49] Wenjie Wang, Yan Yan, Yongnian Zhao ja Yu Xue. Studies on the experimental measurement of the low-frequency aerodynamic noise of large wind turbines. *Energies*, 17(7), 2024.
- [50] Kerstin Persson Waye, Michael Smith ja Mikael Ögren. Hälsopåverkan av lågfrekvent buller inomhus. Tehniline aruanne 3, Sahlgrenska Akadeemia Meditsiiniinstituut, 2017.
- [51] Markus Weichenberger, Martin Bauer, Robert Kühler, Johannes Hensel, Caroline Garcia Forlim, Albrecht Ihlenfeld, Bernd Ittermann, Jürgen Gallinat, Christian Koch ja 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.

Tõlkemärkus. Käesolev tõlge on koostatud vaid tehnilise abivahendina ning järgib originaaldokumendi struktuuri ja sisu. Õiguslikult siduvaks jääb autori loodud ingliskeelne originaal.