



POROČILO

LDSTA-JP-2/2023

Analiza metodologije merjenja hrupa vetrnih elektrarn

Naročnik:

Republika Slovenija
Ministrstvo za Okolje, Podnebje in Energijo
Tone Kvasič, tone.kvasic@gov.si
Martina Gračner, martina.gracner@gov.si
Tanja Bolte, tanja.bolte@gov.si
Langusova ulica 4, 1535 Ljubljana

Naslov za izstavitev racuna:

Republika Slovenija
Ministrstvo za Okolje, Podnebje in Energijo
Langusova ulica 4
1535 Ljubljana
Email: gp.mope@gov.si

Vzorec:

Vetrna elektrarna VEDV 15 pri Dolenji vasi, ki jo upravlja AAE VE, vetrna energija d. o. o.

Datum

meritev:

Od: 05.09.2023 (12:03)

Do: 22.09.2023 (6:58)

Datum

poročanja:

23.11.2023

Datum

poročila:

17.01.2023

Meritve izvajal:

Jure Murovec
Luka Čurovič

Avtor poročila:

Jurij Prezelj
Jure Murovec
Luka Čurovič

Vodja laboratorija:

Jurij Prezelj

Rezultati meritev, njihova analiza in numerični modeli, se nanašajo na pogoje okolja pod katerimi so bili izmerjeni in pod stanjem naprav v času meritev.

1 PROJEKTNA NALOGA

Celovit nacionalni energetska in podnebni načrt Republike Slovenije št. 35400-18/2019/22 z dne 28. 2. 2020 je Ministrstvu za okolje in prostor in Ministrstvu za Infrastrukturo z namenom spodbujanja proizvodnje električne energije iz obnovljivih virov energije zadal nalogo, da: Preučita in po potrebi nadgradita veljavno zakonodajo s področja zvočnega onesnaževanja s sprejemom predpisa o mejnih vrednostih oziroma razdalji vetrnih elektrarn do najbližjih stavb z varovanimi prostori (infrazvočno, nizko frekvenčno in slišno območje zvoka) in določita pogoje in omejitve, ki jih je treba v zvezi s hrupom upoštevati pri umeščanju vetrnih elektrarn v prostor. Zaradi izvedbe te naloge želita ministrstvi na vetrni elektrarni VEDV 15 pri Dolenji vasi v občini Divača, ki jo upravlja podjetje AAE VE, vetrna energija d.o.o., Ribniško selo, Za tremi ribniki 36, 2000 Maribor preveriti metodo merjenja hrupa vetrnih elektrarn (opisano v nadaljevanju te projektne naloge) in ugotoviti, kako je njene rezultate mogoče uporabiti pri morebitni nadgraditvi veljavne zakonodaje na področju hrupa v okolju.

Ministrstvo za okolje, podnebje in energijo (v nadaljevanju: MOPE) je z namenom spodbujanja proizvodnje električne energije iz obnovljivih virov energije pripravilo projektno nalogo »Preizkus metode merjenja hrupa vetrnih elektrarn« s katero želi na vetrni elektrarni VEDV 15 pri Dolenji vasi, ki jo upravlja podjetje AAE VE, vetrna energija d. o. o. preveriti dansko metodo merjenja hrupa vetrnih elektrarn (VE), ki vključuje tudi metodologijo meritev nizkofrekvenčnega hrupa, in ugotoviti, ali je predmetno metodo meritve hrupa VE mogoče uporabiti pri morebitni nadgraditvi veljavne zakonodaje na področju hrupa v okolju.

Izvajalec naloge, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za Strojništvo, Laboratorij za energetske delovne stroje in tehnično akustiko, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, mora skladno s projektno nalogo:

1. Izvesti ocenjevanje hrupa pred najbolj izpostavljeno stavbo z varovanimi prostori. Ocenjevanje hrupa je treba izvesti ločeno za hitrosti vetra 6 m/s in 8 m/s,
2. Izračunati nizko frekvenčni hrup v obravnavani stavbi z varovanimi prostori,
3. Na obravnavani stavbi z varovanimi prostori izvesti ocenjevanje hrupa za primer polja treh vetrnih elektrarn.

Pri tem se predpostavi primer, kot da bi na Griškem polju obratovala tri enake vetrne elektrarne (primerljive z VEDV 15), z enako oddaljenostjo do stavbe z varovanimi prostori kot v primeru obravnavane vetrne elektrarne VEDV 15.

Predmetna projektna naloga je razvojnega značaja, njen cilj je zagotoviti pravno okolje, ki bo omogočalo investicije v obnovljive vire energije ter hkrati varovalo okolje in zdravje ljudi. Predmetna projektna naloga ni povezana s konkretnim obratovanjem vetrne elektrarne VEDV 15 pri Dolenji vas.

1.1 Zahteve projektne naloge po minimalni vsebini poročila

Izbran izvajalec mora po zaključku izvedbe projektne naloge pripraviti poročilo, ki mora vsebovati vsaj naslednje vsebine:

a) Določitev merilnega mesta:

- Izbrano merilno mesto in izveden postopek za njegovo izbiro,
- Način pritrditve mikrofona.

b) Meritev zvočnih spektrov in hitrosti vetra:

- Izmerjene zvočne spektre pri obravnavanih hitrostih vetra,
- Rezultate izvedene korekcije referenčne hitrosti vetra iz Enačb 2 ali 3,
- Izbiro hrapavost terena iz Preglednice 1.

c) Popravek za hrup ozadja in določitev ravni zvočne moči:

- Izvedene postopke za izvedbo popravka zaradi hrupa ozadja ter določitve zvočne moči, vključno z uporabljenimi matematičnimi izračuni, vhodnimi podatki, vmesnimi in končnimi rezultati.

d) Določitev zvočnega tlaka L_{pA} :

- Izvedene postopke za izračun zvočnega tlaka v 1/3 in 1/1 oktavnih pasovih ter izračune skupne ravni zvočnega tlaka $L_{pA,tot}$, vključno z uporabljenimi matematičnimi izračuni, vhodnimi podatki in vmesnimi rezultati.

e) Določitev poudarjenih tonov in popravka L_r :

- Izvedene frekvenčne analize v skladu z Aneksom 2 smernic iz 2. točke projektne naloge, iz katere naj bodo razvidni posamezni koraki, uporabljeni matematični izračuni, vhodnimi podatki, vmesnimi in končnimi rezultati,
- Določitev popravka L_r zaradi morebitnih tonov.

f) Določitev nizkofrekvenčnega hrupa vetrne turbine v obravnavani stavbi z varovanimi prostori:

- Razvidni morajo biti posamezni koraki med matematični izračuni, vhodnimi podatki, vmesnimi in končnimi rezultati.

g) Določitev zvočnega tlaka za primer polja treh vetrnih elektrarn.

- Razvidni morajo biti posamezni koraki med matematični izračuni, vhodni podatki, vmesni in končni rezultati.

Izvajalec naloge mora v primeru tehničnih ali metodoloških težav pri njeni izvedbi, na težave opozoriti ter v kolikor je mogoče predlagati načrt ukrepanja za tovrstne nepredvidljive dogodke.

KAZALO

1	PROJEKTNA NALOGA	2
1.1	Zahteve projektne naloge po minimalni vsebini poročila	4
2	KRATKA VSEBINA POROČILA (Executive summary)	5
2.1	Nekaj potrebnih definicij ključnih pojmov	6
3	MERILNI SISTEM	7
3.1	Predmet meritve	7
3.2	Merilni Inštrument, mikrofoni in kalibracija	8
3.3	Mikrofonska zaščita pred vetrom	10
3.4	Merjenje smeri in hitrosti vetra	13
3.5	Izbira merilnega mesta	15
4	MERILNI POSTOPKI IN IZRAČUNI	17
4.1	Preliminarna ocena izmerjenih vrednosti	18
4.2	Merjenje zvočne moči VE	19
4.2.1	Izločanje residualnega hrupa in korekcija hrupa ozadja	23
4.2.2	Korekcija kupole	25
4.2.3	Korekcija hrupa zaradi vetra preko kupole za zaščito mikrofona pred vetrom in dežjem	26
4.2.4	Korekcija travniških žuželk	28
4.2.5	Korekcija hrupa ozadja	29
4.3	Ocenjevanje ravni zvočnega tlaka pri varovanih objektih	30
4.3.1	Tonalna korekcija.....	31
4.4	Ocenjevanje ravni zvočnega tlaka v varovanih objektih	42
5	REZULTATI MERITEV ZVOČNE MOČI	43
5.1	Rezultati glede na povprečenje dolgotrajnih kontinuiranih meritev po strokovni izbiri intervalov	44
5.2	Rezultati kratkotrajnih meritev po minutnih intervalih ki ustrezajo zahtevam standarda/smernic.....	48
6	REZULTATI OCEN RAVNI HRUPA NA POLJUBNI RAZDALJI IN V NAJBLIŽIH VAROVANIH OBJEKTIH	52
6.1	Rezultati glede na povprečenje po strokovni oceni dolgotrajnih kontinuiranih meritev.....	53
6.2	Rezultati kratkotrajnih meritev po minutnih intervalih, ki ustrezajo zahtevam standarda/smernice.....	54
7	ROBUSTNOST METODE IZ PRIMERJAVE DVEH PRISTOPOV	54
7.1.1	Primerjava zvočnih moči.....	54
7.1.2	Primerjava ocene ravni hrupa na izbrani razdalji.....	55
7.1.3	Primerjava ocene nizkofrekvenčnih ravni hrupa v varovanih objektih	55
8	AMPLITUDNA MODULACIJA	56
8.1	Osnove.....	56
8.2	Meritve in analiza amplitudne modulacije	56
8.3	Ugotovitve analize amplitudne modulacije	58
9	ZAKLJUČKI	59
10	REFERENCE	63

2 KRATKA VSEBINA POROČILA (Executive summary)

1) ALI JE METODOLOGIJA OCENJEVANJA HRUPA VE PO DANSKI UREDBI PRIMERNA ZA IMPLEMENTACIJO V SLOVENIJI?

DA, za objekte z varovanimi prostori, ki se nahajajo na dovolj veliki razdalji od VE, ki naj bi bila daljša od trikratnika njene skupne višine.

2) ALI BI BILE POTREBNE MODIFIKACIJE DANSKE METODE ZA IMPLEMENTACIJO V SLOVENIJI?

Modifikacije metode so priporočljive. Metodo bi bilo priporočljivo modificirati oziroma dopolniti z manjkajočimi vsebinami primernimi za R. Slovenijo.

3) KATERE TOČKE METODOLOGIJE DOLOČANJA HRUPA VE PO DANSKI UREDBI BI BILO PRIPOROČLJIVO MODIFICIRATI OZIROMA DOPOLNITI ZA PODROČJE R. SLOVENIJE?

Danska uredba o meritvah hrupa pri vetrnih elektrarnah obsega dva dela: prvi del se osredotoča na določanje zvočne moči vetrnih elektrarn, ki je časovno zahtevno, drugi del pa na ocenjevanje ravni hrupa v prostem zvočnem polju in v objektih. Za ocenjevanje hrupa bi se lahko uporabljali tudi podatki o zvočni moči VE, ki jih zagotovi proizvajalec, ali numerični modeli, ki temeljijo na velikosti VE, njene električne moči, zvočne moči ter vrtljajev v odvisnosti od hitrosti vetra.

Modeliranje hrupa VE ni enostavno, saj zaradi velikosti vetrnice prehajamo iz njenega bližnjega polja (od skupne višine = višina stebra + dolžina lopatice) v daljno polje (trikratnik njene skupne višine = 3 x (višina stebra + dolžina lopatice)). Zato je modeliranje hrupa VE v njenem bližnjem polju potrebno izvesti specifično z vetrnico kot krožnim virom hrupa. Krožni vir je sestavljen iz točkovnih virov po vrhu lopatice in dodatnim virom, ki se nahaja na stebru, in sicer na mestu, kjer se mu vrh lopatice najbolj približa.

Zaradi ogromne količine podatkov in velikega števila parametrov pri dolgotrajnih meritvah (več kot 11000 minutnih posnetkov na teden) vnašamo pri analizi dodatno negotovost pri izračunu zvočnih moči. Metoda upošteva le negotovost izračuna, zanemari pa merilno negotovost ravni zvočne moči na podlagi meritev ravni zvočnega tlaka v bližini vetrne elektrarne. Rezultati študije kažejo na pomemben raztros analize izmerjenih vrednosti akustičnih in meteoroloških spremenljivk (v razponu +/- 2 dBA).

Danska metoda obravnava nizkofrekvenčni hrup v Varovanih Objektih na podlagi "A" vrednotene ravni hrupa in dveh tipičnih zvočnih izolacij fasad s fasadnimi elementi. Korekcije morebitnih nizkofrekvenčnih tonov oziroma pojava amplitudne modulacije ne predvideva. Metodologija ocenjevanja tonske korekcije se mora poenostaviti.

Metoda ne upošteva obstoječih ravni hrupa ozadja na imisijskih mestih pred izpostavljenimi objekti, ki so nujne pri določanju pogojev in omejitev, ki jih je potrebno v zvezi s hrupom upoštevati pri umeščanju vetrnih elektrarn v prostor. Pri tem bo potrebno definirati psevdovok in infrazvok kot sestavni element hrupa ozadja pred postavitvijo VE. Definirati bo potrebno postopke za določanje hrupa ozadja.

2.1 NEKAJ POTREBNIH DEFINICIJ KLJUČNIH POJMOV

HRUP – Hrup je vsak zvok, ki moti.

ZVOK – Zvok je spreminjanje tlaka po času na izbranem mestu (ušesa, mikrofona), ki je posledica vzbujanja tlačne motnje z zvočnim virom zvočne moči L_w in potovanjem te zvočne motnje od zvočnega vira do izbranega mesta (poslušanja, meritve) s hitrostjo zvoka po zraku, ki znaša približno 343 m/s.

SLIŠNI ZVOK - Spreminjanje zvočnega tlaka v frekvenčnem območju med 20 Hz in 20 kHz in z amplitudami večjimi od $2 \cdot 10^{-5}$ Pa, pri 1000 Hz, na mestu poslušanja/meritve oziroma ocenjevanja.

PSEVDO ZVOK - Označuje spreminjanje tlaka po času na izbranem mestu opazovanja (merilnik hitrosti toka zraka, senzor na vročo žičko, senzor za tlak, infrazvočni mikrofona). Spreminjanje tlaka je posledica gibanja turbulentnega toka zraka preko točke opazovanja in s tem potovanja tlačnih motenj od mesta nastanka turbulentnega (vrtinčnega) toka do mesta opazovanja s povprečno hitrostjo turbulentnega toka (hitrost vetra). Frekvenčno območje psevdozvoka (sprememb tlaka zaradi gibanja turbulentnega toka) je določeno z velikostjo vrtincev in hitrostjo toka in je praviloma v frekvenčnem območju pod 1000 Hz. Frekvenčni območji psevdozvoka in infrazvoka se prekrivata.

INFRA ZVOK je definiran s širjenjem zvočnega valovanja po prostoru s hitrostjo zvoka (343 m/s) pri čemer imajo na točki opazovanja signali spremembe zvočnega tlaka frekvenčni obseg pod 20 Hz. Frekvenčni območji psevdozvoka in infrazvoka se prekrivata.

ZVOČNA MOČ

Zvočna moč označuje neto energijo zvočnega valovanja, ki se izseva iz zvočnega vira v enoti časa, pri tem pa se nastalo zvočno valovanje širi v okolico s hitrostjo zvoka (343 m/s). Zvočna moč vira je vzrok za nastanek zvoka in raven zvočnega tlaka je posledica delovanja vira z zvočno močjo L_w . Enota je [dB] ali [dBA], vendar vrednosti niso primerljive z ravnjo zvočnega tlaka.

RAVEN ZVOČNEGA TLAKA

Amplituda spreminjanja zvočnega tlaka na izbranem mestu se spreminja preko več velikostnih razredov od 10^{-5} Pa do 10^3 Pa, zato za opisovanje amplitud uporabljamo logaritemsko vrednotenje z definirano ravnjo zvočnega tlak. S tem lahko izmerjene vrednosti primerjamo s človeškim zaznavanjem zvoka. Za opisovanje karakteristik zvočnih virov (emisije zvočnega valovanja) uporaba ravni zvočnega tlaka ni primerna, saj je odvisna od pogojev okolice po kateri se zvočno valovanje širi od vira do mesta opazovanja. To je od razdalje zvočnega vira do opazovalca, od meteoroloških pogojev do akustičnih lastnosti tal nad katerimi se zvok širi.

3 MERILNI SISTEM

Za preverjanje metodologije ocenjevanja hrupa VE in njihovega vpliva na varovane objekte predpisane v Danski uredbi je bila izbrana edina večja VE v Sloveniji, VEDV 15 pri Dolenji vasi. Teren okoli VE omogoča postavitev merilnega sistema, vendar zahteva posebno zaščito pred živalmi ki se pasejo na travnikih pod VE. Za obdobje meritev smo izbrali poletje 2023 zaradi možnosti dnevnega nadzora, preverjanja in varovanja merilne opreme in nižje verjetnosti padavin.

3.1 Predmet meritve

Vetrna elektrarna tipa E-70 z instalirano močjo 2,3 megavata nemškega proizvajalca Enercon. Elektrarna ima 97 metrov visok steber na katerega je postavljen rotor s trilstno eliso z 71 metri premera. V temelj premera 15 metrov in višine 2,8 metra je vgrajeno 500 m³ betona in 50 ton železa. VE Dolenja Vas je bila izdelana v letu 2011 in je pričela z obratovanjem v letu 2013.

MOČ

Nazivna moč:	2.300,0 kW
Hitrost začetnega vetra (cut in wind):	2,5 m/s
Nazivna hitrost vetra:	15,0 m/s
Izklopna Hitrost vetra (cut out):	34,0 m/s
Območje vetra (DIBt):	III
Razred vetra (IEC):	Ia

ROTOR

Premer:	71.0 m
Površina rotorja:	3,959.0 m ²
Število lopatic:	3
Najvišja vrtilna frekvenca:	21.0 U/min
Obodna hitrost:	78 m/s
Material:	GRP
Proizvajalec:	Enercon
Power density 1:	581.0 W/m ²
Power density 2:	1.7 m ² /kW

MENJALNIK

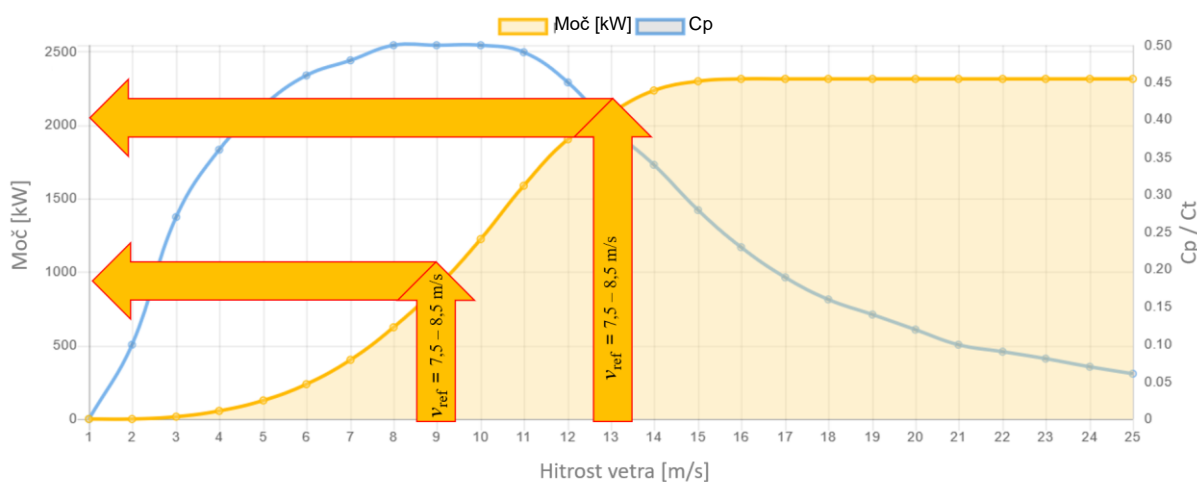
Tip:	Brez menjalnika neposredno gnan generator (direct drive)
------	---

EI . GENERATOR

Tip:	Sinhronski
Število:	1
Hitrost (Maksimalna):	21.0 U/min
Napetost:	2,000.0 V
Omrežna povezava:	IGBT
Omrežna frekvenca:	50.0 Hz
Proizvajalec:	Enercon

STEBER

Višina osi:	98 m
Tip:	Jeklena cev/beton
Oblika:	Konična
Korozivna zaščita:	Barvano
Proizvajalec:	Enercon



Slika 1: Moč VE v odvisnosti od hitrosti vetra na vrhu stebra (rumena barva) z označenimi referenčnimi hitrostmi vetra na višini 10 m

3.2 Merilni Inštrument, mikrofoni in kalibracija

Meritve hrupa vetrne elektrarne so bile opravljene z merilnim inštrumentom Norsonic Nor140, ki vsebuje vse razpoložljive opcije proizvajalca.

Merilno območje inštrumenta je od $0,3 \mu\text{V} - 7 \text{ V}_{\text{rms}}$ (10 V peak) v enem območju, kar ustreza ravnemu zvočnemu tlaku od -10 dB do 137 dB (140 dB peak) pri uporabi tipičnega merilnega mikrofona z občutljivostjo 50 mV/Pa . Večrazpinski sigma-delta pretvornik ima efektivno frekvenco vzorčenja 48 kHz . Anti-aliasing filter je izveden s kombinacijo analognega in digitalnega filtra. Inštrument Nor140 ima uporabni dinamični razpon ki presega 120 dB .

Inštrument sočasno meri A in Z frekvenčno utežene ravni. Ravni zvočnega tlaka v frekvenčnih pasovih $1/3$ oktave meri sočasno. $1/3$ oktavnici (terčni) filtri so zvedeni z digitalni IIR filtri in imajo razpon od $0,4 \text{ Hz}$ do 20000 Hz , tako da ustrezajo zahtevam za razred 1 po standardih (IEC 61260) in ANSI S1.11-2004 razred 1. Nor140 lahko izvaja frekvenčno analizo v realnem času v $1/3$ oktave, ki pokriva frekvenčne pasove od $0,4 \text{ Hz}$ do 20 kHz v enem območju.

Lastni šum inštrumenta je izmerjen pri kalibraciji z nastavitvijo $-26,0 \text{ dB}$, kar ustreza občutljivosti mikrofona 50 mV/Pa . Za vhodno napetost pri ravni signala 0 dB ustreza $1 \mu\text{V}$. Tipične vrednosti ravni lastnega šuma so 5 dB nižje od navedenih vrednosti.

Lastni šum merilnega inštrumenta, izmerjen z mikrofonom Nor1225 in predojačevalnikom Nor1209, povprečen v 30 s merilnega časa:

A-vrednoteno: 18 dB
 C-vrednoteno: 22 dB
 Z-vrednoteno: 30 dB
 1/3 terčni pasovi: 6,3 Hz do 250 Hz: 15 dB
 1/3 terčni pasovi: 315 Hz do 20 kHz: 10 dB

Merilni inštrument zagotavlja kalibrirane rezultate znotraj temperaturnega območja od: -10°C do $+50^{\circ}\text{C}$ in pri Vlažnosti od 5 % do 90 % RH, oziroma pri rosišču manj kot 40°C . Atmosferski tlak: 85 kPa do 108 kPa.

Inštrument omogoča shranjevanje samega zvočnega signala v *.wav datoteko na SD kartico ali notranji pomnilnik. Shranjevanje se sproži avtomatično po zaključku posamezne meritve. Shranjevanje ima 8, 16 ali 24-bitno amplitudno resolucijo pri frekvenci vzorčenja 12 ali 48 kHz. Dinamično območje posnetka ima tako 96 dB. Referenčni kalibracijski ton je mogoče dodati na začetku prvega zapisa v meritvi. Uporaba 48 kHz vzorčenja s 24 bitno amplitudno resolucijo in shranjene zvočnih signalov nam je omogočilo nadaljnjo obdelavo podatkov v skladu z vsemi zahtevami projektne naloge. Med meritvami smo izmerili preko 11000 wav datotek, ki skupaj zavzamejo preko 80 GB podatkov.

Merilni inštrument ima integrirano tudi ozkopasovno frekvenčno analizo. FFT analiza ima 8000 točk z ločljivostjo 1,46 Hz. Ozkopasovna frekvenčna analiza Pokriva frekvenčno območje od 1,46 do 9,6 kHz. Izpolnjuje zahteve za analizo FFT pri iskanju tonalnosti v skladu s standardom ISO/DIS 1996-2 Annex C (2005).



Slika 2: Merilni inštrument Norsonic Nor-140

Kljub tej opciji, Fourierova analiza za namen identifikacije tonov ni bila izvedena na samem inštrumentu, temveč na posnetih *.wav signalov z uporabo programskega paketa LabView. S tem smo lahko poljubno nastavljali frekvenčno resolucijo, kot to zahteva standard za določanje tonske korekcije. Pri Fourierovi transformaciji smo iz posnetih *.wav datotek dobili ozkopasovne spektre z resolucijo od 0,1 Hz do 10 Hz

Kalibracija za preverjanje inštrumenta med meritvami je bila izvedena na začetku in koncu meritev ter ob vsaki menjavi baterij. Inštrument je med meritvami deloval stabilno vedno znotraj 0,1 dBA in kalibracijskih konstant ni bilo potrebno nastavljati.

3.3 Mikrofonska zaščita pred vetrom

Pri meritvah zvoka v toku zraka, to je v vetru, se okoli mikrofona tvorijo turbulentni tokovi, ki so nestacionarni in posledično povzročajo nestacionarni tlak na membrano mikrofona. S tem mikrofonska membrana generira signal, ki ni posledica zvoka temveč posledica turbulentnega toka zraka okoli mikrofona. Ta šum je potrebno preprečiti, saj ga zaradi njegove naključne lastnosti ni mogoče digitalno izločiti iz signala. Zato je uporaba zaščite mikrofona pred vetrom nujno potrebna.

Standard IEC 61400-11 opisuje glavne smernice glede uporabe vetrne zaščite pri meritvah hrupa vetrnih elektrarn. Praktično vse študije meritev hrupa vetrnic, [1-22], uporabljajo sekundarno vetrno zaščito kot dodatek primarni vetrni zaščiti in izpostavljajo njeno pomembnost. Primarno vetrno zaščito predstavlja komercialno dostopna odprto celična pena v obliki krogle, ki je nameščena na sam mikrofona. Del raziskav in meritev navaja uporabo sekundarne vetrne zaščite izdelane iz tanke tkanine, [1-3,6,9,13]. V takem primeru ni potrebna vpeljava korekcijskega faktorja. Zaradi dolgotrajnih meritev in potrebe po zaščiti pred dežjem, smo v našem primeru namesto tanke tkanine uporabili kupolo, izdelano in poliuretanske pene (PU), kar navajajo tudi mednarodne raziskave, [10,19-22]. Na ta način smo bolje zaščitili mikrofona pred vremenskimi vplivi, s postavitvijo mikrofona blizu tal pa omejili vpliv hrupa vetra. Nekatere študije so raziskovale tudi smiselnost »podzemne« postavitve mikrofona [9, 10], kar pa je zaradi kraških tal okoli vetrnice Dolenja vas, v našem primeru bilo neizvedljivo.



Slika 3: Sekundarne vetrne zaščite z uporabo konstrukcije žic/palic in tkanine, [2,3,6,9].

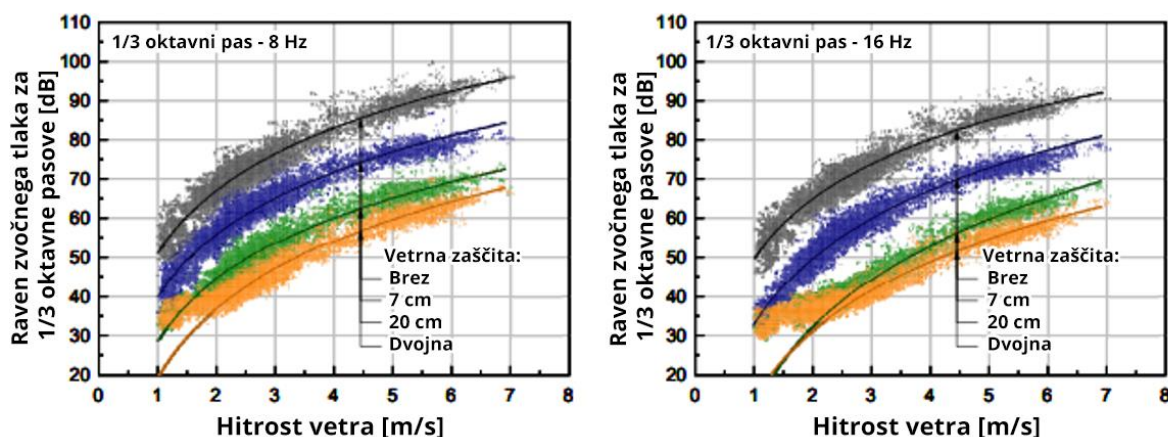


Slika 4: Sekundarna vetrna zaščita v obliki okvirja v zemlji, prekrita z zaprto celično peno, [9, 10].



Slika 5: Manj praktična uporaba večjih konstrukcij, ki spominjajo na šotor, [14, 18].

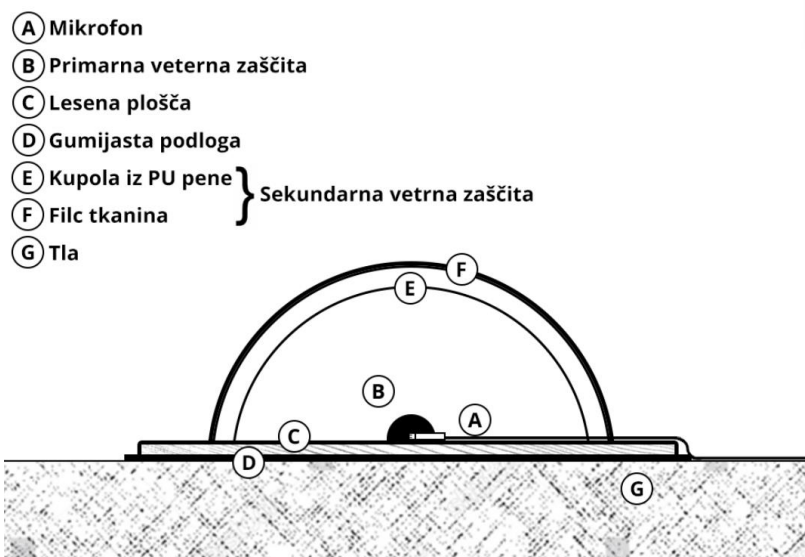
Uporaba sekundarne vetrne zaščite dokazano zmanjša vpliv hrupa vetra in s tem poveča razmerje signal-šum. V primeru visokih hitrosti vetra, je osnovna vetrna zaščita nezadostna. Ker pa vpliv vetra ni možno povsem izničiti (predvsem pri visokih hitrostih vetra), smo s pomočjo dosedanjih raziskav in literature (Slika 6) izpeljali model hrupa vetra na kupoli v odvisnosti od hitrosti vetra, ki je predstavljen v poglavju 4.1.3:



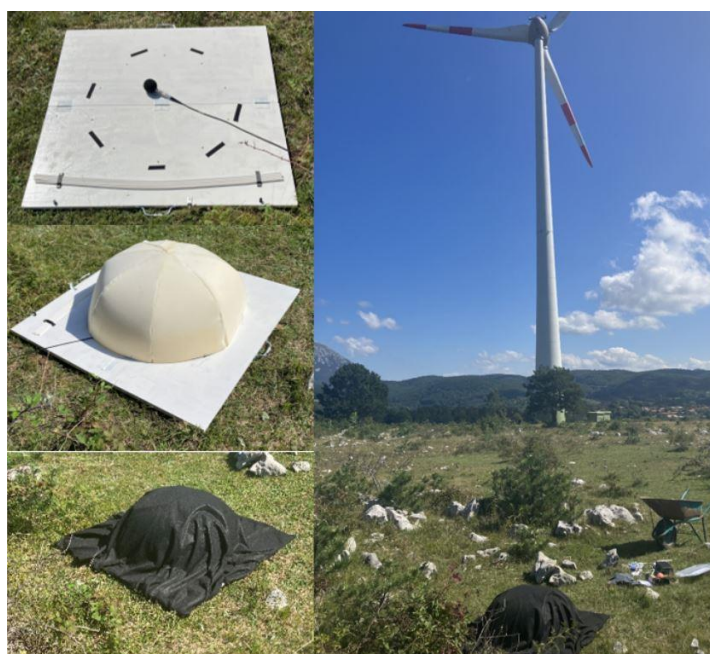
Slika 6: Raven hrupa vetra v odvisnosti od hitrosti vetra, [2].

Celotna vetrna zaščita je prikazana na Sliki 7. Podlago za kupolo je predstavljala 1 m x 1 m velika ploskev iz 18 mm debelega trdega lesa, ki je bil prebarvan in polakiran z namenom zaščite pred vodo/dežjem/vlago in zagotavljanjem odboja zvoka od njegove površine. Pod leseno ploščo je bila podložena 10 mm debela gumijasta podloga, ki je preprečevala prenos talnih vibracij na mikrofona. Primarno vetrno zaščito je predstavljala odprto celična pena v obliki krogle s premerom 100 mm, ki je bila postavljena na leseno ploščo. Mikrofona na ta način ni bil v neposrednem stiku s ploščo. Sekundarna vetrna zaščita je bila sestavljena iz kupole izdelane iz PU pene debeline 30 mm, na katero je bil položena 3 mm filc tkanina, katera je nudila dodatno zaščito pred dežjem in preprečevala, da bi se PU pena preveč napila vode. Zaradi strukture ter debeline sekundarne vetrne zaščite je bilo potrebno v gluhi sobi izmeriti raven zvočnega tlaka na mikrofona z in brez kupole ter izračunati korekcijske faktorje.

V času meritev je bil mikrofonski nameščen na odbojno ploščo dimenzije 1 m x 1 m. Mikrofonski je bil z Merilnikom Norsonic Nor-140 povezan preko mikrofonskega kabla. Mikrofonski je bil zaščiten s standardno vetrno zaščito dimenzije 100 mm in sekundarno zaščito premera 60 cm nameščeno koncentrično nad mikrofonom in osnovno vetrno zaščito. Sekundarna vetrna zaščita je bila uporabljena, ker se emisijske meritve skladno s projektno nalogo izvajajo pri velikih hitrostih vetra, upoštevati pa je potrebno tudi nizko-frekvenčno območje pod 200 Hz. Pogled na merilno mesto je prikazan na Sliki 8.



Slika 7: Celotna vetrna zaščita.



Slika 8: Uporaba in namestitev sekundarne vetrne zaščite na merilnem mestu u ob vetrni elektrarni VEDV 15.

3.4 Merjenje smeri in hitrosti vetra

Raven zvočne moči vetrne elektrarne L_w [dBA] se določa pri referenčnih pogojih, ki so določeni s hitrostjo vetra v_{ref} na referenčni višini z_{ref} , ki je enaka 10 m v smeri od vetrne elektrarne proti merilnemu mestu ('downwind'). Referenčni pogoji so določeni s hitrostjo vetra v_{ref} in sicer v območju $5.5 \text{ m/s} < v_{ref} < 6.5 \text{ m/s}$ in v območju $7.5 \text{ m/s} < v_{ref} < 8.5 \text{ m/s}$ in smerjo vetra, smer vetra med mikrofonom in stolpom turbine ne sme odstopati za več kot $\pm 15^\circ$ od smeri vetra. v_{ref} se lahko določi na dva načina. Pri prvem načinu se hitrost vetra meri hitrost vetra v_h z uporabo anemometra, vgrajenega na višini (h) rotorja vetrne turbine, v_{ref} na višini 10 m v referenčnih pogojih pa se nato lahko izračuna po Enačbi 2: Hitrost vetra na referenčni višini določena na podlagi meritev hitrosti vetra na višini rotorja. Kjer h predstavlja višino rotorja turbine (v metrih), z_{0ref} predstavlja referenčna hrapavost 0,05 metra (določena vrednost) in z_{ref} je referenčna višina 10 metrov (določena vrednost).

$$v_{ref} = v_h \cdot \frac{\ln \frac{z_{ref}}{z_{0ref}}}{\ln \frac{h}{z_{0ref}}} \quad \text{En. 2}$$

Pri drugem načinu se meri hitrost vetra v_z na višini z nad koto tal. v_{ref} na višini 10 m v referenčnih pogojih pa se izračuna po Enačbi 3: Hitrost vetra na referenčni višini določena na podlagi meritev hitrosti vetra na višini z nad tlemi s hrapavostjo z_0 .

$$v_{ref} = v_z \cdot \frac{\ln \frac{z_{ref}}{z_{0ref}} \cdot \ln \frac{h}{z_0}}{\ln \frac{h}{z_{0ref}} \cdot \ln \frac{z}{z_0}} \quad \text{En. 3}$$

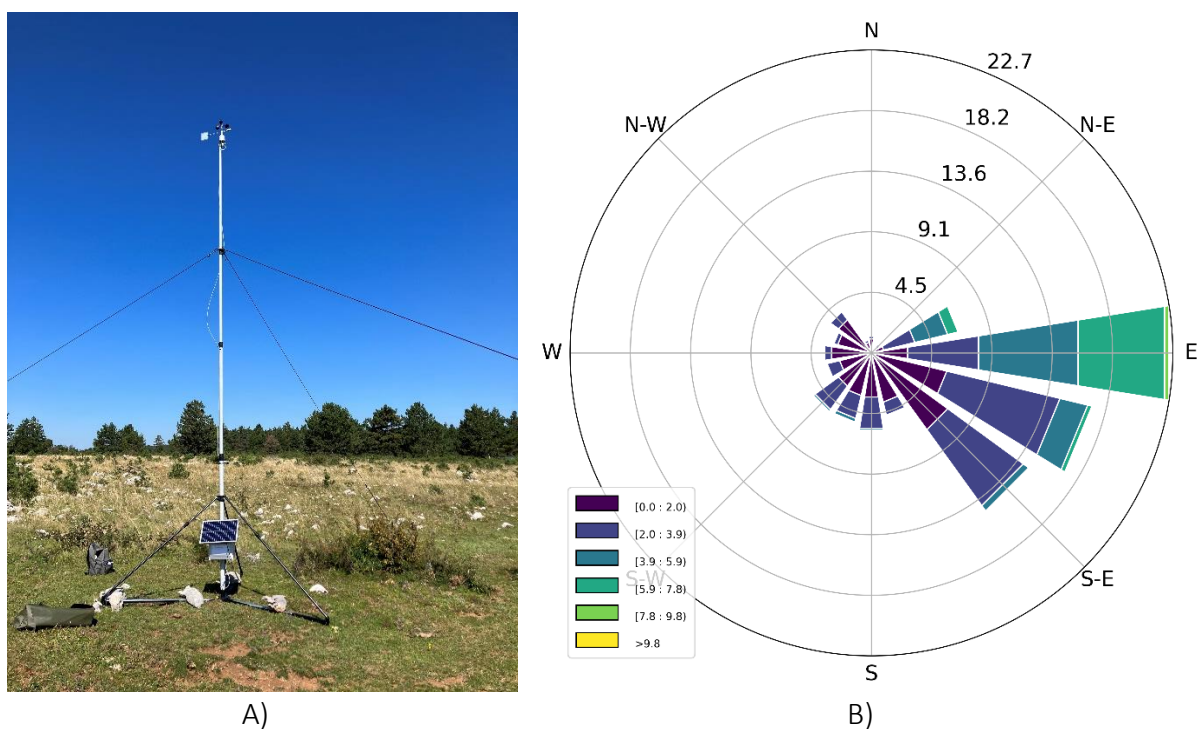
Kjer z predstavlja višina merilnika hitrosti vetra, z_{0ref} je referenčna hrapavost 0,05 metra (določena vrednost) in z_0 = hrapavost površine tal, ki je ocenjena iz Preglednice 1.

Preglednica 1: Hrapavost različnih tipov površine tal.

Vrsta tal	Hrapavost z_0 [v metrih]
Voda, sneg, pesek	0,0001
Odprta ravnina, gola zemlja, pokošena trava	0,01
Poraščeno kmetijsko zemljišče	0,05
Stanovanjsko območje; majhno mesto, območje z gostim, visokim rastlinjem	0,3

Podatki upravitelja VE s hitrostjo na vrhu stebra bi bili dobrodošli, saj postavitve sistema na višini od 5 do 10 m ne more v celoti opisati pogojev na obratovalni višini vetrnice.

Hitrosti in smeri vetra na višini rotorja vetrne elektrarne v_h s strani upravljavca nismo prejeli. Meritve hitrosti in smeri vetra so bile zato izvedene na višini $z = 5.5$ m nad tlemi s senzorjem za smer in hitrost vetra KVT 60A, ki izpolnjuje zahteve nacionalne meteorološke službe in je primeren za meritve hitrosti vetra med 0 m/s in 50 m/s in smeri vetra med 0° in 360° . Meritve hitrosti in smeri vetra so bile izvedene s časovno ločljivostjo 1 minute, čas meritev je bil usklajen s časom na merilniku zvoka. Merilnik je bil postavljen med mikrofonom in vetrno elektrarno. Lokacija senzorja za smer in hitrost vetra je določena z okvirnima koordinatama E 422025 in N 65819 po D96TM (koordinate so bile določene s pomočjo Atlasa okolja). Razdalja med mikrofonom in senzorjem meteoroloških razmer je bila dovolj velika, da šum anemometra za smeri in hitrosti vetra na mestu mikrofona ni bil zaznaven. Umeščeno anemometra v prostor je prikazana na Sliki 9A in Sliki 11. Mikrofon z zaščito in odbojno ploščo se je nahajal na površini, ki jo lahko na podlagi Preglednice 1. okarakteriziramo kot poraščeno kmetijsko zemljišče ($z_0 = 0.05$). Pogled na merilno mesto z mikrofonom in inštrumentom NOR 140 je prikazan na Sliki 8 in 11.



Slika 9: A) Slika postavitve senzorja za smer in hitrost vetra.
B) Roža vetrov na podlagi meritev smeri in hitrosti vetra na višini 5,5 m nad tlemi.

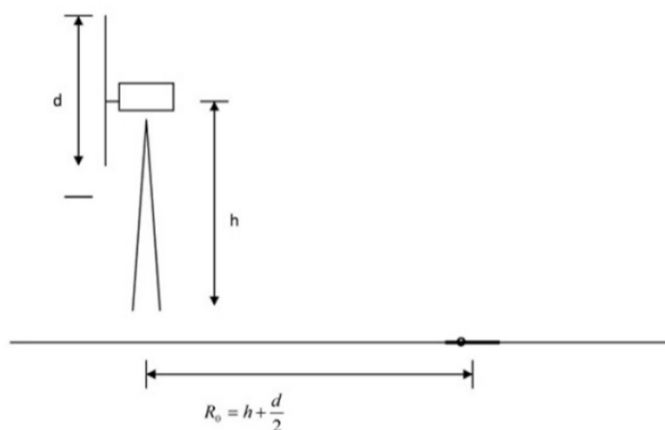
Na Sliki 9B je prikazana roža vetrov, ki je bila določena na podlagi meritev hitrosti in smeri vetra na višini 5,5 m nad tlemi v času, ko so se izvajale emisijske meritve ravni hrupa vetrne elektrarne VEDV15 pri Dolenji vasi. Iz rože vetrov je razvidno, da so se v času meritev pojavljale referenčne razmere (s hitrostjo vetra med 5.5 do 6.5 m/s in 7.5 do 8.5 m/s in smerjo $\pm 15^{\circ}$), le ko je pihal veter iz vzhodne smeri (vzhodnik), kar potrjuje pravilnost izbire lokacije merilnega mesta mikrofona.

3.5 Izbira merilnega mesta

Raven zvočne moči L_{WA} vetrne turbine v terčnih ali oktavnih frekvenčnih pasovih se določi na podlagi meritev pri različnih ravneh proizvedene električne moči na merilnem mestu, ki se nahaja na zavetrni strani stolpa. Razdalja merilnega mesta je pogojena z višino osi rotorja VE h ter dolžino lopatic oziroma premerom vetrne elektrarne d . Razdaljo R_0 od stebra vetrne elektrarne izračunamo po Enačbi 4:

$$R_0 = h + \frac{d}{2} \quad \text{En. 4}$$

Meritve je treba opraviti na razdalji R od temelja turbine, ki ne sme odstopati za več kot $\pm 20\%$ od razdalje R_0 . Odstopanje od R_0 ne sme presegati ± 30 metrov. Med merjenjem mora biti mikrofonski nameščen tako, da smer glede na stolp turbine ne odstopa za več kot $\pm 15^\circ$ od smeri vetra.



Slika 10: Določitev razdalje R_0 .

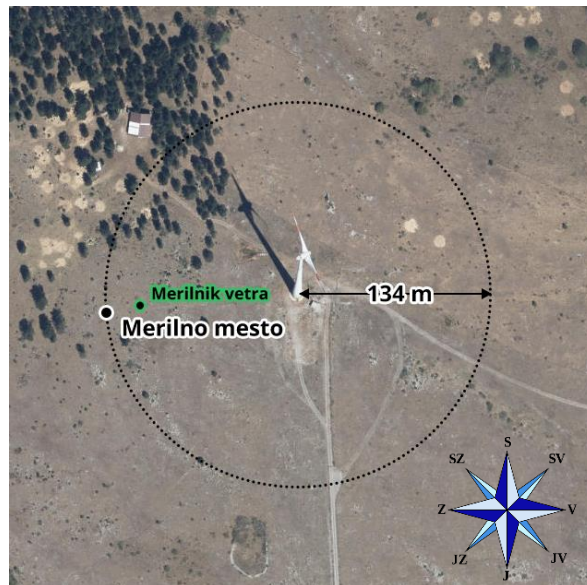
Pri izbiri merilnega mesta smo upoštevali oddaljenost od vetrne elektrarne, konfiguracijo terena, vrsto tal, prisotnost odbojnih površin in smer vetra. Vetrna elektrarna VEDV 15 pri Dolenji vasi v občini Divača se nahaja na okvirni lokaciji, ki je določena s koordinatama E 421765 in N 66301 po D96TM (koordinate so bile določene s pomočjo Atlasa okolja). Višina stolpa h je 98 m, premer rotorja d pa znaša 71 m. Pri teh vhodnih podatkih znaša razdalja (na podlagi Enačbe 4):

$$R_0 = h + \frac{d}{2} = 98 \text{ m} + \frac{71}{2} \text{ m} = 133,5 \text{ m}$$

Merilno mesto se mora torej nahajati na razdalji:

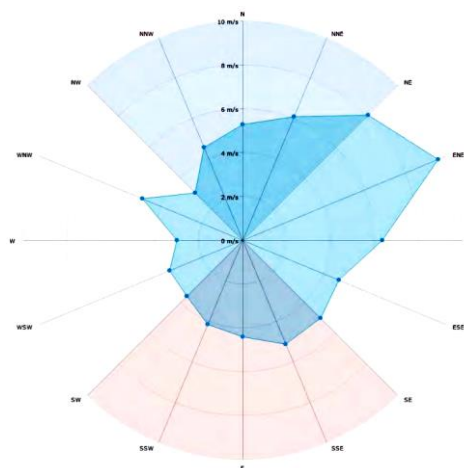
$$R = 133,5 \text{ m} \pm 26,7 \text{ m}$$

Umeščenosť merilnega mesta v prostor je prikazana na Sliki 11. Razdalja med merilnim mestom in vetrno elektrarno je ocenjena na $134\text{ m} \pm 5\text{ m}$.



Slika 11: Položaj merilnega mesta.

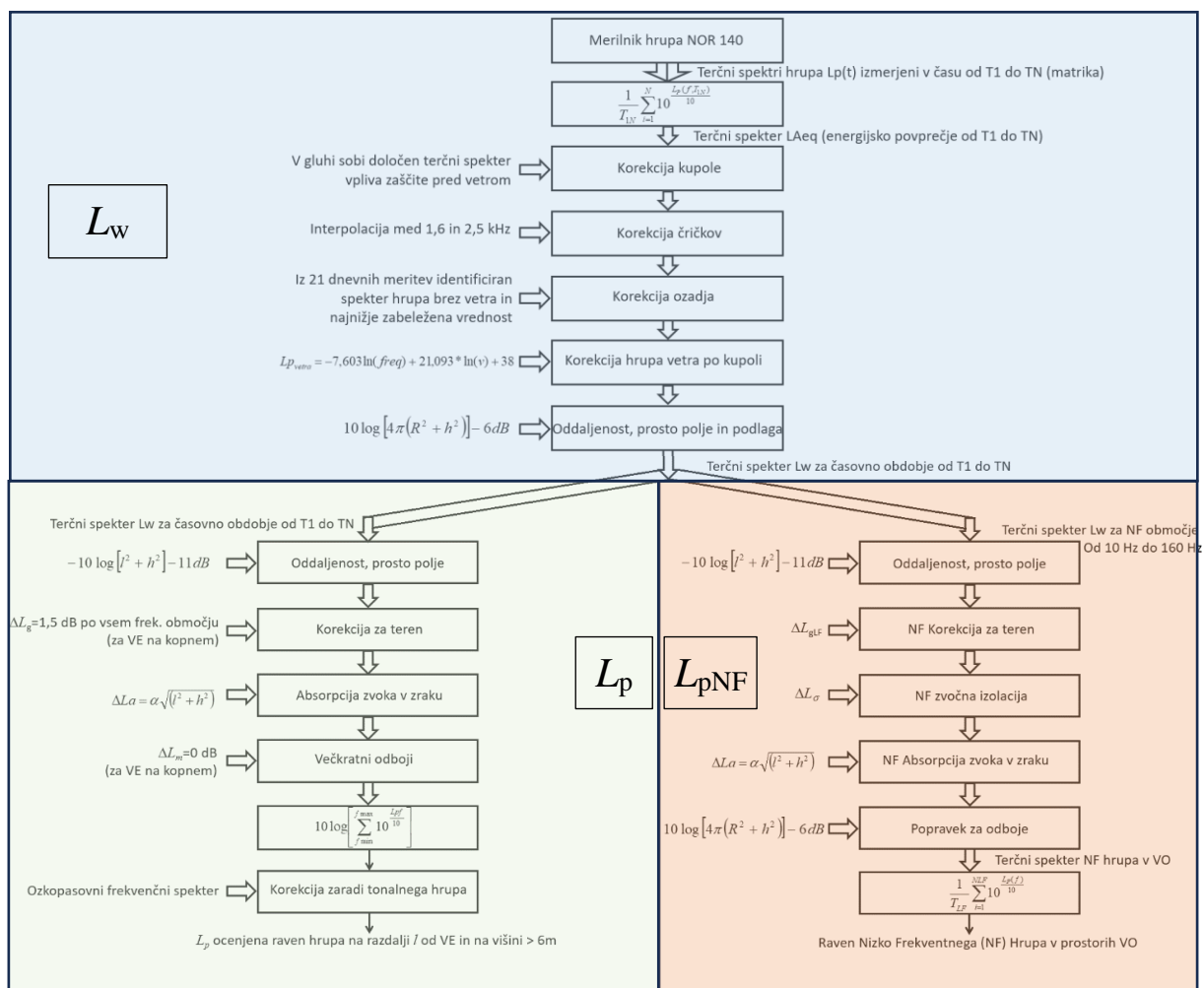
Položaj merilnega mesta glede na smeri neba je bil izbran v skladu s povprečnimi letnimi vrednostmi hitrosti ter smeri vetra na območju VEDV 15, Dolenja vas. Roža vetrov pridobljena za celoletno povprečje je prikazana na Sliki 12. Mikrolokacijo merilnega mesta pa je pogojevalo tudi rastje ter prisotnost dreves.



Slika 12: Celoletno povprečje rože vetrov na območju VEDV 15, Dolenja vas, [23].

4 MERILNI POSTOPKI IN IZRAČUNI

Danska metoda temelji na treh ločenih korakih, na sliki 13 označenih z L_w , L_p in L_{pNF} . V prvem koraku se določi, oziroma izmeri, oziroma pridobi podatke o zvočni moči VE. V drugem koraku se izvede izračun ocene ravni zvočnega tlaka na mestu varovanega objekta iz zvočne moči določene v predhodnem koraku. V tretjem koraku se izvede izračun ocene ravni nizkofrekvenčnega (NF) hrupa v varovanem objektu. Izračun se izvede na osnovi ocenjene pričakovane tipične zvočne izolacije varovanega objekta v nizkofrekvenčnem območju in ocenjene ravni hrupa VE na varovanem objektu.



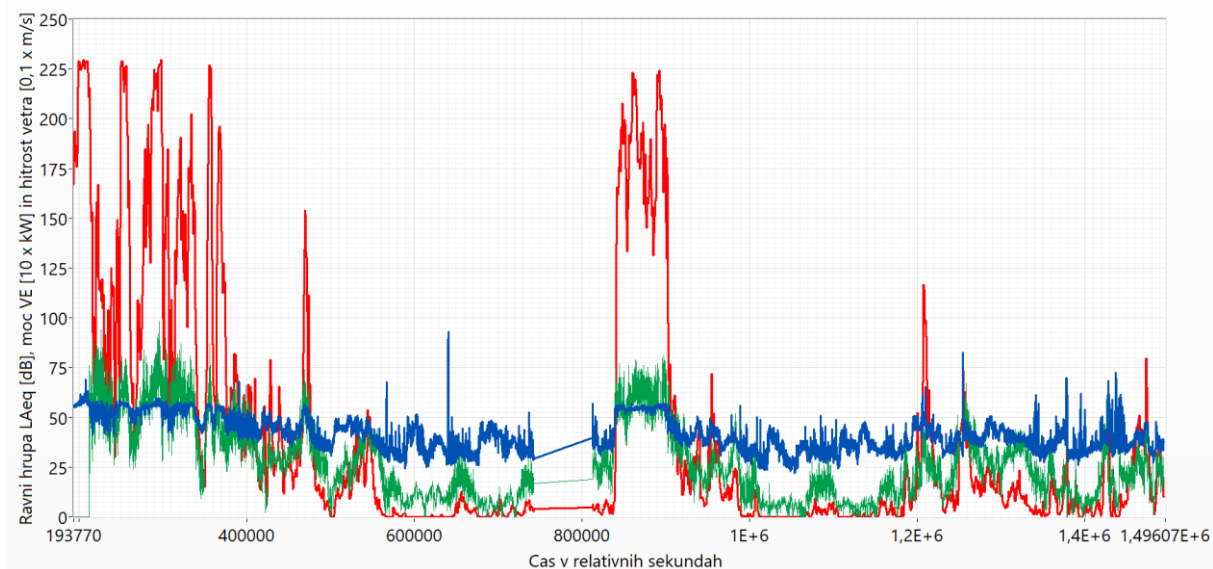
Slika 13: Blokovi diagram izračuna zvočne moči VE, ravni hrupa ter ravni nizkofrekvenčnega hrupa.

Postopek je tako zasnovan ker so ravni hrupa ki jih povzročajo VE na oddaljenih varovanih objektih prenizke da bi se jih lahko merilo z dovolj majhno merilno negotovostjo. Razmerje signal-šum je prenizko (Signal je hrup VE in šum je hrup ozadja, ki prihaja iz okolice merilnega mesta). Hrup ozadja ima prevelik vpliv na meritve hrupa VE neposredno na varovanih objektih. S tako zasnovanim trodelnim ocenjevanjem pa se poveča robustnost metode. V poglavju izračuni bomo zato predstavili tri korake:

- 1) Merjenje zvočne moči L_w .
- 2) Ocenjevanje ravni hrupa PRI / OB (Brez objekta) varovanem objektu L_p .
- 3) Ocenjevanje hrupa VE v varovanih prostorih L_{pNF} .

4.1 Preliminarna ocena izmerjenih vrednosti

Meritve smo izvajali v minutnih intervalih. V dolžini trajanja meritev od 05.09.2023 (12:03) do: 22.09.2023 (6:58) smo zabeležili 22000 intervalov. V vsakem minutnem intervalu smo izluščili večje število akustičnih značilk kot so L_{Aeq} , terčni spekter v frekvenčnem območju od 6,3 Hz do 20 kHz, impulzne ravni hrupa, minimalne ravni, in druge. Istočasno smo za vsak minutni interval pridobili podatke o moči delovanja vetrne elektrarne, hitrost in smer vetra. Osnovni podatki so prikazani na sliki 14: L_{Aeq} je prikazana v modri barvi, 10 kratnik hitrost vetra v zeleni barvi in desetina moči vetrne elektrarne v rdeči barvi. Iz slike 14 lahko razberemo ujemanje med podatki. Ob povečani hitrosti vetra se poveča moč vetrne elektrarne, prav tako izmerjena raven hrupa L_{Aeq} . Podatki o hrupu nakazujejo da le ta ni tako odziven na hitrost vetra kot moč VE. Njegove vrednosti so vedno višje od 25 dBA in lahko dosegajo vrednosti do 50 dBA tudi ko vetrna elektrarna ne obratuje oziroma je njena moč 0 kW. Zaradi tega smo podatke prikazali v korelacijskih diagramih na sliki 15, ki razkrivajo povezavo med tremi značilkami hrupa (L_p pri 6,3Hz [dB], L_p pri 160 Hz [dB] in L_{Aeq} [dBA])v odvisnosti od moči delovanja VE.



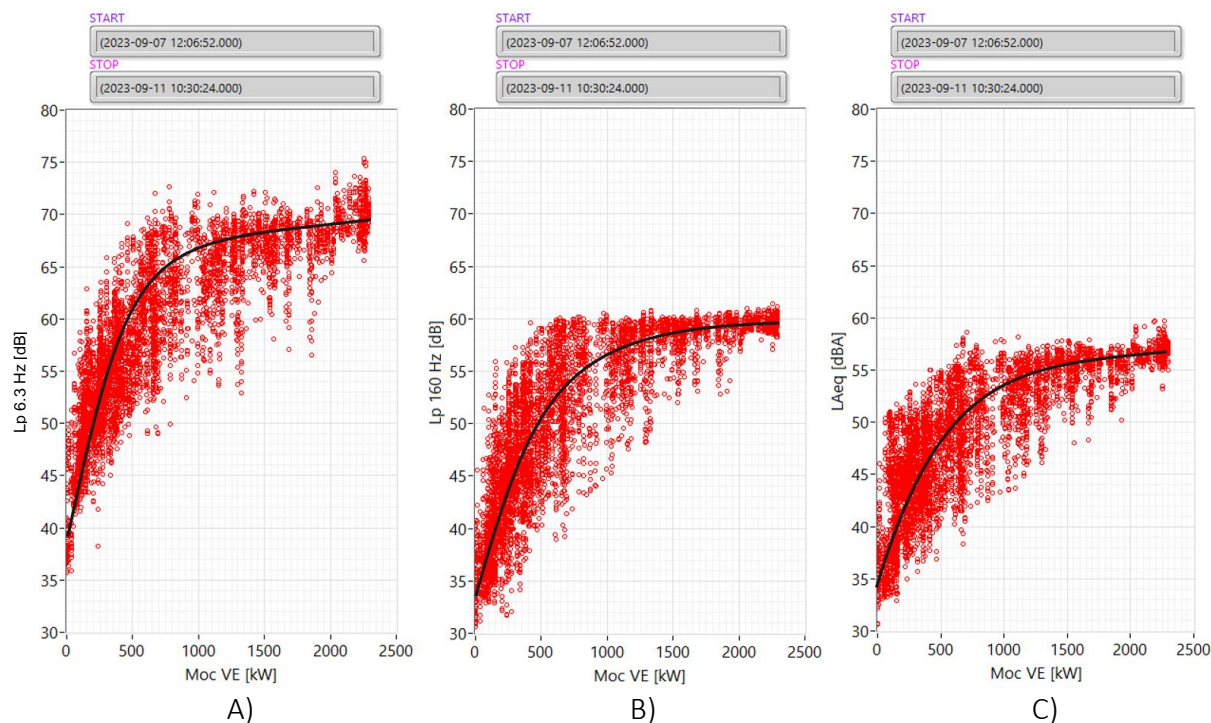
Slika 14: Potek moči vetrne elektrarne v desetini moči podane v kW (rdeče), hitrost vetra v desetkratni vrednosti m/s (zeleno) in izmerjena raven zvočnega tlaka L_{Aeq} v dBA (modro).

Na sliki 15 so prikazane odvisnosti hrupa od moči vetrne elektrarne. Na sliki 15A je prikazano kako sta med seboj povezana raven hrupa v linearni skali [dB] pri 6,3 Hz (infrazvok) in moč delovanja VE. Na sliki 15B je prikazana povezava med ravnjo hrupa v linearni skali [dB] pri 160 Hz (nizkofrekvenčni hrup) in močjo VE. Na sliki 15C je prikazana povezava med celotno ravnjo hrupa preko vseh frekvenčnih območij utežena po "A" krivulji L_{Aeq} [dBA] z močjo VE.

Iz slike 15 lahko razberemo da s povečevanjem moči vetrne elektrarne narašča raven hrupa. Iz diagramov lahko razberemo da se s povečevanjem moči delovanja vetrne elektrarne preko 1 MW raven hrupa stabilizira, kar je najbolj očitno pri nizkofrekvenčnem hrupu okoli 160 Hz (slika 15B), kjer maksimalne zabeležene vrednosti ne presežejo 61 dB in to od moči 500 kW navzgor.

Naslednja pomembna ugotovitev je da raztros izmerjenih vrednosti pri dani moči delovanja vetrne elektrarne pada s povečevanjem njene moči. Največji raztros rezultatov zznamo v

območju delovanja pod 200 kW, to je v območju ko se VE vklaplja in izklaplja oziroma ne deluje v optimalni delovni točki. Najmanjši raztros meritev ravni hrupa je pri vseh značilkah najmanjši pri največji moči obratovanja VE in znaša samo 3 dB oziroma 5 dBA.



Slika 15: Ravni hrupa za različne značilke v odvisnosti od moči delovanja vetrne elektrarne.

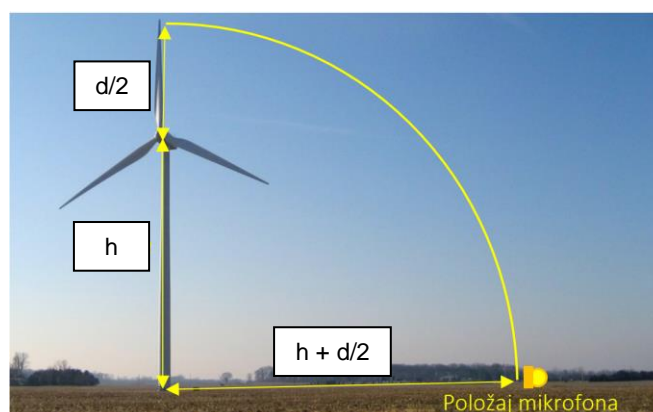
- A) Infrazvok pri frekvenci 6,3 Hz v odvisnosti od moči VE.
- B) Nizkofrekvenčni zvok pri frekvenci 160 Hz v odvisnosti od moči VE.
- C) Skupna raven hrupa, utežena po frekvenčni "A" krivulji v odvisnosti od moči VE.

Rezultati prikazani na sliki 15 so pričakovani in se ujemajo z rezultati ki jih navajajo študije [25, 26, 27, 28]. S tem smo validirali postopek meritev in pridobili zaupanje v izmerjene rezultate, tako da smo lahko nadaljevali študijo z izračuni zvočne moči kot funkcije hitrosti vetra, kar smo v zaključku uporabili za ocenjevanje ravni hrupa na poljubnem mestu, ki leži v daljnem polju vetrne elektrarne in v prostem zvočnem polju brez vpliva odbojev, in za ocenjevanje nizkofrekvenčnega hrupa v stavbah z varovanimi prostori.

4.2 Merjenje zvočne moči VE

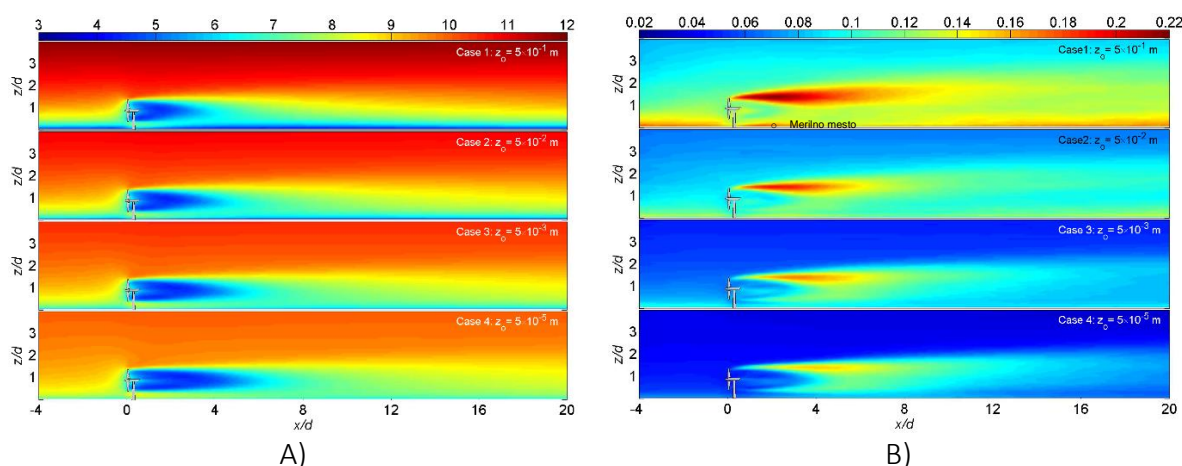
Osnovna enačba, ki je podana v Danski uredbi temelji na sferičnem širjenju zvočnega valovanja v prostem zvočnem polju. Poudariti je potrebno, da izpeljava te enačbe temelji na predpostavki daljnega zvočnega polja. Razdalja med merilnim mestom in VE mora biti zato dovolj velika. Danska uredba predvideva razdaljo meritve $h + d/2$, kjer je h višina gredi rotorja in $d/2$ dolžina lopatice od sredine rotorja do njenega vrha. V našem primeru je razdalja od temelja vetrnice do mikrofona znašala $134 \text{ m} \pm 5 \text{ m}$. Iz Slike 16 lahko ugotovimo da Danska uredba uporablja

minimalne zahteve za daljno polje, saj je merilno mesto oddaljeno od virov hrupa komaj 1,5 kratnik dimenzij vira ($2 \cdot d/2$).



Slika 16: Oddaljenost mikrofona od temelja vetrnice.

Danska uredba predvideva, da se merilno mesto postavi v zavetrje vetrnice. Iz literature je znano, da je turbulentno gibanje zraka za VE odvisno od hrapavosti terena (Slika 17). Območja z intenzivnejšim turbulentnim poljem so izvor aerodinamično generiranega zvoka. Turbulentno gibanje zraka pa ima signifikanten vpliv tudi na nastanek tlačnih oscilacij v frekvenčnem območju pod 100 Hz. Tlačne oscilacije, ki nastanejo zaradi premikanja turbulentnega zračnega polja s hitrostjo vetra, povzročajo psevdovzok.



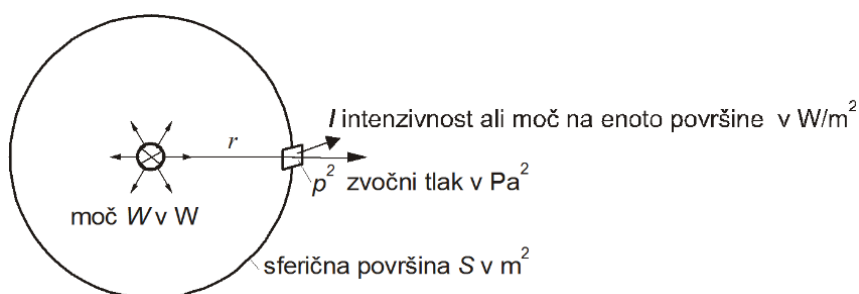
Slika 17: A) Hitrost vetra za vetrnico v odvisnosti od hrapavosti terena, [24].
B) Intenziteta turbulence za vetrnico v odvisnosti od hrapavosti terena, [24].

Iz Slike 17B lahko razberemo, da je intenziteta turbulence, t.j. turbulentno gibanje zraka, na samem merilnem mestu zelo izrazito. Iz tega sledi, da merilni mikrofoni med meritvami poleg zvoka zaznava tudi nizkofrekvenčne oscilacije tlaka, ki so posledica gibanja turbulentnega toka. Tudi to je vplivalo na izrazito nizkofrekvenčni spekter izmerjenega mikrofonskega signala na merilnem mestu. Opazimo lahko tudi, da je merilno mesto točno pod izrazitim območjem izjemno močne turbulence na vrhu zavetrne strani vetrnice. Znotraj takega turbulentnega toka so prisotni tudi aerodinamični izvori zvoka, dipolnega in kvadropolnega karakterja. Ti izvori zvoka sevajo aerodinamično generiran zvok, ki pa se širi s hitrostjo zvoka (343 m/s) do merilnega mesta, in predstavlja pravi zvok, ki ima prav tako izrazit nizkofrekvenčni karakter.

Iz definicije zvočne intenzivnosti, ki predstavlja neto energijo valovanja, ki se širi skozi enoto površine v enoti časa lahko zapišemo osnovni izraz za zvočno moč.

$$W = \oint I(\psi) dS \quad \text{En. 5}$$

Ko zvočnemu viru, z izrazito prostorsko usmerjenostjo (Raven zvočnega tlaka in zvočne intenzivnosti sta odvisna od prostorskega kota Ψ okoli vira: $Lp(\Psi)$ in $L_I(\Psi)$) določimo zvočno moč, ga v akustičnem smislu izenačimo z monopolnim virom enake zvočne moči, ki ima uniformno (enakomerno) usmerjenost, slika 18. Kljub temu da je VE usmerjen zvočni vir, saj je raven hrupa odvisna od kota merjenja, pa Danska uredba predvideva postavitev enega merilnega mikrofona v območje kjer je raven hrupa največja. **Meritve zvočnih moči VE po metodi določeni v Danski uredbi so zato precenjene.**



Slika 18: Zvočna moč, zvočna intenzivnost in zvočni tlak.

Raven zvočne moči je definirana podobno kot raven zvočne intenzivnosti, s tem da je $W_0=10^{-12}$ [W]. Ker zvočno moč dobimo s pomočjo integrala/vsote to pomeni da je zvočna moč integralna veličina, ki kot taka vsebuje povprečenja izmerjene zvočne intenzivnosti/zvočnega tlaka na površini, ki obdaja vir glede na velikost te površine.

Če predpostavimo da:

- Imamo točkovni/monopolni zvočni vir,
- Merimo v daljnem polju zvočnega vira,
- In da merimo v **prostem zvočnem polju**.

Potem lahko izpeljemo povezavo med zvočnim tlakom, zvočno intenzivnostjo in zvočno močjo.

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{\frac{p_{RMS}^2}{\rho c}}{I_0} \frac{p_0^2}{p_0^2} = 10 \log \frac{p_{RMS}^2}{p_0^2} + 10 \log \frac{p_0^2}{\rho c I_0}$$

En. 6

$$L_I = Lp - 10 \log \frac{p_0^2}{\rho c I_0}$$

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0} = 10 \log \frac{IS}{W_0} \frac{I_0}{I_0} = 10 \log \frac{I}{I_0} + 10 \log \frac{S}{S_0} + 10 \log \frac{I_0}{W_0} = L_I + 10 \log \frac{4\pi r^2}{S_0}$$

$$L_w = L_I + 10 \log 4\pi r^2 + 10 \log \frac{1}{S_0}$$

$$S_0 = 1 \text{ m}^2$$

$$r^2 = R^2 + h^2$$

En. 7

$$L_w = L_p + 10 \log 4\pi(R^2 + h^2) - 10 \log \frac{p_0^2}{\rho c I_0}$$

$$L_w = L_p + 10 \log 4\pi(R^2 + h^2) - 0.13$$

Enačba za določanje zvočne moči, ki je podana v Danski uredbi (Enačba 8) torej izhaja neposredno iz osnovne definicije za zvočno moč. Pri tem zanemarja da vetrnica ni točkovni vir na predvidenem merilnem mestu in da je pogoj za daljno polje komaj (če sploh) zadovoljen. Pogoj prostega zvočnega polja korigira s členom -6dB , ki izhaja iz predpostavke da je merilni mikrofonski postavljen na idealno odbojno površino. Iz tega sledi da mora biti odbojna površina na kateri je zaščita za veter dovolj velika ($1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$), toga in težka, da odbije celoten zvok. Enačba 8 tudi zanemarja konstanto -0.13 dB kar ni kritično, je pa begajoče, ker v nadaljevanju upošteva korekcije zaradi absorpcije zvoka v zraku s podobnim velikostnim razredom.

$$L_{wA,ref} = L_{A,ref,k} + 10 \cdot \log 4\pi(R^2 + h^2) - 6\text{dB}$$

En. 8

Iz Enačbe 8 razberemo, da je $L_{A,ref,k}$ iz Danske uredbe identičen L_{pA} iz teorije merjenja zvočne moči strojev in naprav, Enačba 7. Raven zvočnega tlaka, ki jo za izračun zvočne moči navaja Enačba 8 v Danski uredbi torej upošteva samo korekcijo hrupa ozadja po Enačbi 9:

$$L_{A,ref,k} = 10 \cdot \log \left(10^{\frac{L_{A,ref}}{10}} - 10^{\frac{L_{A,b}}{10}} \right)$$

En. 9

Kjer sta:

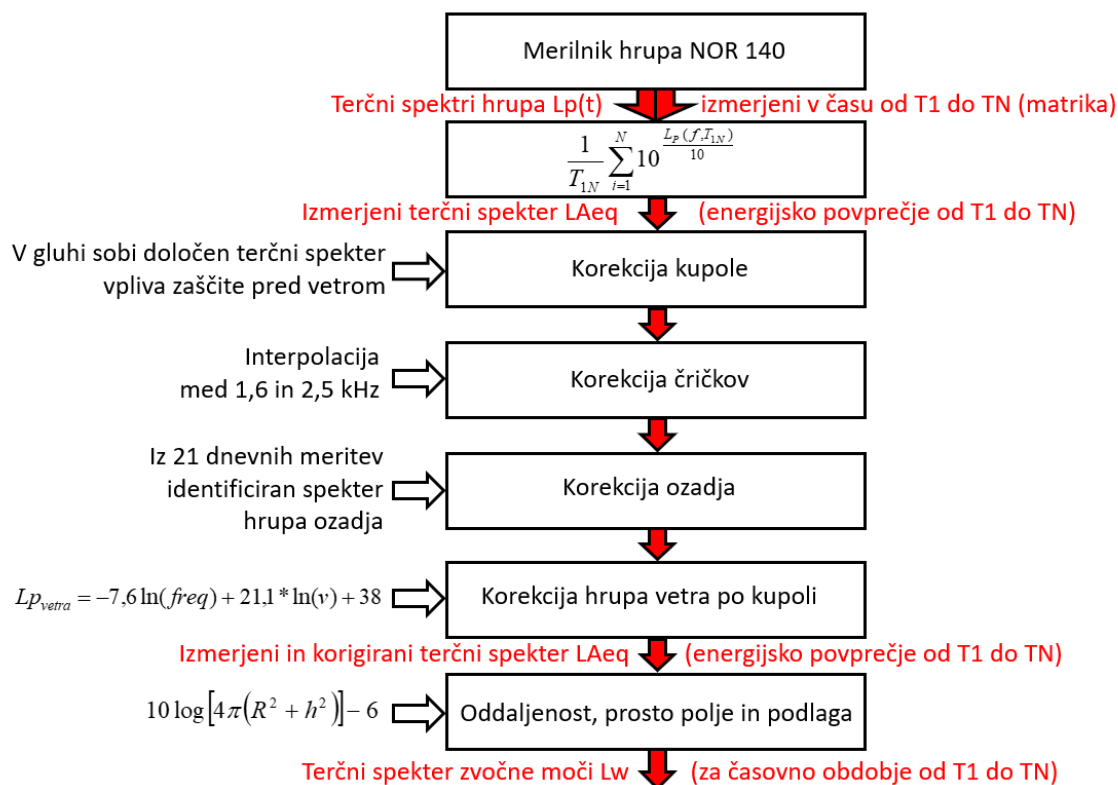
$L_{A,ref,k}$ Korigirana referenčna raven zvočnega tlaka v $1/3$ oktavnem spektru (ali oktavnem spektru)

$L_{A,b}$ Povprečna raven zvočnega tlaka hrupa ozadja v $1/3$ oktavnem spektru (ali oktavnem spektru)

Standardi za merjenje zvočne moči strojev in naprav na prostem upoštevajo še vpliv zaščite mikrofona pred vetrom. Hrup ozadja je v Danski uredbi površen, zato smo ga v tej študiji bolje definirali. Hrup ozadja smo razdelili na tri dele ki omogočajo izračune korekcij:

1. Korekcija bioloških virov zvoka z dobro definiranimi lastnostmi v spektru hrupa,
2. Korekcija zaradi hrupa obtekanja zraka čez mikrofonsko zaščito pred vetrom
3. Korekcija zaradi permanentnega hrupa ozadja

Na Sliki 19 je prikazan postopek za izračun energijsko povprečene ravni zvočnega tlaka na merilnem mestu, korigirane za vse vplive hrupa ozadja in akustičnih lastnosti kupole-zaščite mikrofona pred vetrom in dežjem.



Slika 19: Blokovni diagram postopka izračuna energijsko povprečene ravni zvočnega tlaka.

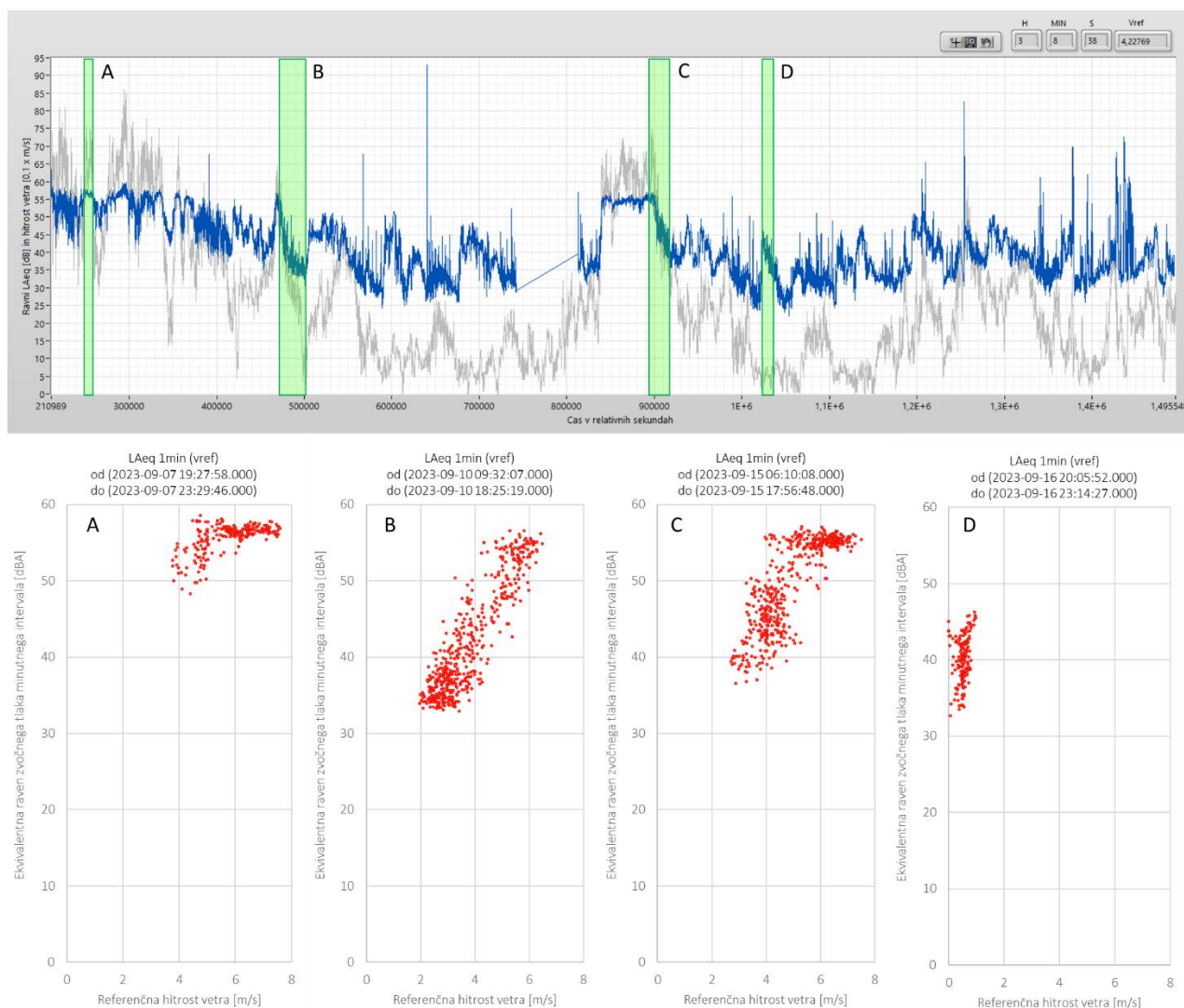
Namen meritev je torej pridobiti povezavo med ravno zvočne moči L_w in hitrostjo vetra v_{ref} . Izmerjene ravni zvočnega tlaka na mestu meritve morajo biti izključno posledica delovanja VE, brez ostalih virov hrupa.

4.2.1 Izločanje residualnega hrupa in korekcija hrupa ozadja

Namen korekcije hrupa ozadja je iz izmerjenega spektra hrupa izločiti hrup vseh zvočnih virov razen VE, tako da rezultat meritev opisuje samo vpliv VE. Na mestu meritve smo med meritvami zaznali naslednje residualne vire hrupa, ki so vplivali na izmerjeni spekter hrupa:

1. Avtocesta,
2. Prelet letal,
3. Zvoki biološkega izvora kot so različne vrste travniških žuželk, ptic, rejnih živali, ...
4. Ostali viri antropološke aktivnosti kot so npr. motorna žaga, kmetijska mehanizacija,...

Zaradi residualnih virov hrupa, meritve ravni hrupa in posledično zvočne moči (kot funkcije hitrosti vetra), zahtevajo pravilno izbiro časovnega intervala integracije merjenih vrednosti (ko residualni viri nimajo vpliva na izmerjeno vrednost). Na Sliki 20 so prikazane vrednosti izmerjene in še nekorrigirane ravni zvočnega tlaka po minutnih intervalih. Vsako minuto smo izmerili eno ekvivalentno vrednost ravni hrupa. Vsaka izmerjena raven je torej ekvivalentna vrednost ravni za interval ene minute.



Slika 20: V različnih časovnih intervalih je korelacija med L_{Aeq} in hitrostjo vetra različna.

Za izbrane štiri intervale na Sliki 20 lahko prikažemo povezavo med izmerjenimi vrednostmi $L_{A,eq}$ in hitrostjo vetra. Iz intervala A lahko razberemo, da v tem časovnem intervalu raven hrupa okoli 55 dBA ni odvisna od hitrosti vetra za hitrosti med 5 m/s in 7,5 m/s. Iz intervala B lahko razberemo jasno povezavo med $L_{A,eq}$ in hitrostjo vetra, ki bi jo lahko interpolirali z linearno funkcijo, kar spet ni realno, saj po literaturi zvočna moč VE ne narašča linearno s hitrostjo vetra. V intervalu C vidimo, da so točke okoli 55 dBA zgoščene pri hitrostih vetra od 4 m/s do 7,5 m/s.

Interval D pa je jasni pokazatelj, da se v primeru, ko ni vetra in VE ne obratuje, izmerjene ravni hrupa na merilnem mestu gibljejo od 35 do 45 dBA.

Iz tega sledi da ne moremo enostavno vzeti izmerjenih podatkov in iz njih izračunati povprečnih vrednosti, ampak da moramo analizirati različne intervale in na podlagi strokovne presoje izbrati tiste intervale, ki so primerni za izračune. To lahko naredimo z uporabo več orodij:

1. Analiza terčnih spektrov,
2. Analiza ozkopasovnih spektrov (FFT),
3. Poslušanje posnetkov,
4. Opazovanje razmerja med hitrostjo vetra in izmerjeno ravnjo.

Tovrstno analizo smo naredili na dva načina:

1. **Povprečenje korelacij:** V prvem načinu smo intervale izbirali po strokovni oceni, tako da smo opazovali povprečne terčne spektre, iz katerih so razvidni rezidualni viri hrupa. Izbrali smo časovna obdobja stabilne ravni hrupa ob konstantni hitrosti vetra, znotraj katerih smo preposlušali zvočne posnetke. Časovni intervali so bili različno dolgi od nekaj minut do nekaj ur in so predstavljeni v petem poglavju. Pristop k izbiri intervalov lahko opišemo kot dolgotrajno povprečenje rezultatov.
2. **Kratkotrajne meritve:** Pri drugem načinu pa smo z uporabo klasifikacije izbrali tiste enominutne posnetke, ki so ustrezali zahtevam po hitrosti in smeri vetra in ki niso vsebovali residualnih virov hrupa. Iz 11000 posnetkov smo tako izluščili 25 posnetkov iz katerih smo pridobili podatke o zvočni moči vetrnice ob zahtevanih hitrostih vetra. Drugi način torej ustreza terminologiji kratkotrajnih meritev in je skladen z Dansko uredbo.

4.2.2 Korekcija kupole

Mikrofon je med meritvijo potrebno zaščiti pred vetrom, dežjem in drugimi zunanji vplivi kot so biološki. Med 21 dnevnimi meritvami je v zaščitno kupolo zašla muha, govedo pa je kupolo enkrat poškodovalo in prekinilo stik med mikrofonom in merilnim inštrumentom.

Zaščitna kupola mora biti zato dovolj trdna, da zdrži takšne motnje ter ustrezno zaščiti opremo, po drugi strani pa iz materialov, ki prepuščajo zvok. Kupolo smo izdelali iz 30 mm debele poliuretanske pene, preko katere je bil dodatno napet filc. Znotraj kupole, na njeni sredini je bila standardizirana 100 mm zaščita mikrofona pred vetrom, ki je sama po sebi deklarirana za meritve hrupa v vetru do 5 m/s. Mikrofon je imel tako dvojno zaščito.

Sekundarna vetrna zaščita povzroča slabljenje zvoka zaradi česar je bil upoštevan popravek v terčnih frekvenčnih pasovih. Popravek je bil določen na podlagi primerjave meritev, ki so bile opravljene v gluhi sobi Laboratorija za delovne stroje in tehnično akustiko Fakultete za strojništvo v Ljubljani. Kot vir zvoka je bil uporabljen zvočnik z linearno frekvenčno karakteristiko v frekvenčnem območju med 38 Hz in 30000 Hz, ki je predvajal 'roza' šum. Zvočnik se je nahajal na razdalji 2 m od mikrofona in na višini 2 m nad mikrofonom. Opravljena je bila serija meritev pri različnih emisijskih ravneh zvoka (raven zvočnega tlaka na položaju mikrofona z osnovno zaščito brez sekundarne zaščite je znašala med 50 dBA in 80 dBA v korakih po 10 dB). Meritve

so bile opravljene z in brez sekundarne vetrne zaščite, vpliv vetrne zaščite je bil določen kot razlika v izmerjenih ravneh z in brez sekundarne vetrne zaščite.

Meritve so bile opravljene po naslednjem postopku:

- Najprej so bile izvedene meritve ravni zvočnega tlaka v trajanju 1 min na položaju mikrofona brez sekundarne vetrne zaščite.
- V drugem koraku so bile izvedene meritve ravni zvočnega tlaka v trajanju 1 min na položaju mikrofona z nameščeno sekundarno vetrno zaščito.
- Meritve z in brez sekundarne zaščite so bile ponovljene trikrat.

Dvojno zaščito smo izvedli skladno s priporočili standarda EN 61400-11:2013 Wind turbines - Part 11: Acoustic noise measurement techniques. Lastnosti dvojne zaščite pa smo preverili v gluhi sobi. Po pričakovanih korekcija pri nizkih frekvencah pod 160 Hz ni potrebna. V frekvenčnem območju med 500 Hz in 4000 Hz je korekcija približno konstantna in znaša 3 dB. V pasu med 160 Hz in 500 Hz enakomerno narašča približno 0,5 dB na terčni pas. V frekvenčnem območju nad 8000 Hz je korekcija 6 dB. Tako velika korekcija je posledica uporabe poliuretanske pene, ki smo jo izbrali zaradi zaščite pred dežjem in živalmi. Poliuretanska pena (PU) skupaj s tkanino iz filca predstavlja absorpcijski material, zato je potrebno pri izmerjenih vrednostih ravni zvočnega tlaka posameznim frekvenčnim pasovom dodati korekcijske faktorje, navedene v Preglednici 2. Vpliv sekundarne vetrne zaščite je bil določen kot povprečna razlika (aritmetično povprečje) v ravneh zvočnega tlaka z in brez sekundarne zaščite.

Preglednica 2: Korekcijski faktorji kupole

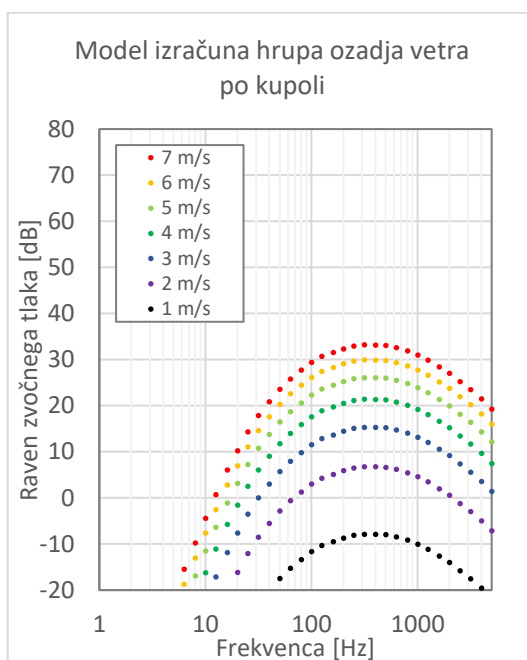
f [Hz]	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80
Korekcija [dB]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250
Korekcija [dB]	0	0	0,2	0,7	1,5	2,2	2,8	2,9	3	3	3	3
f [Hz]	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	12500	16000	20000
Korekcija [dB]	3,1	3,1	3,2	3,2	3,6	4,3	4,8	5,4	6,1	6,3	6,6	6,8

4.2.3 Korekcija hrupa zaradi vetra preko kupole za zaščito mikrofona pred vetrom in dežjem

Veter sam po sebi povzroči hrup na kupoli. V strokovni literaturi je veliko raziskav, ki proučujejo vpliv tega hrupa, ki NI posledica delovanja VE temveč samega vetra, kar je zapisano tudi v poglavju 3.3. S pomočjo dosedanjih raziskav in literature smo izpeljali model hrupa vetra na kupoli v odvisnosti od hitrosti vetra (Enačba 10).

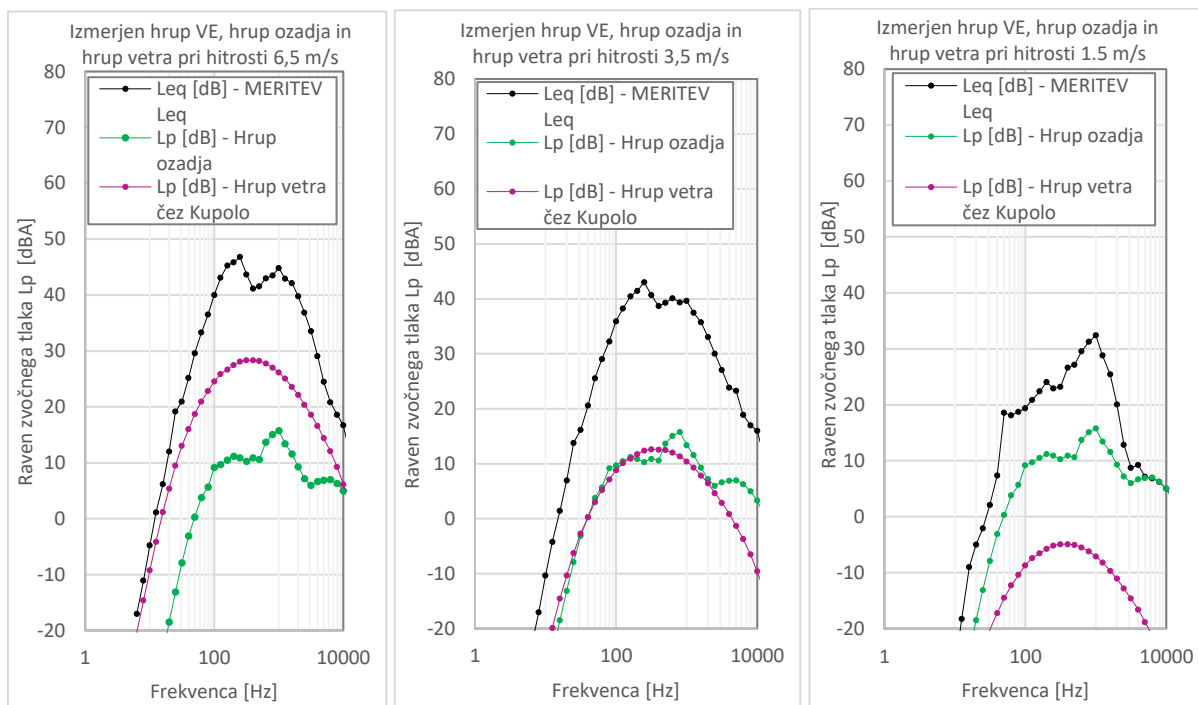
$$Lp_{vetra} = -7,603 \ln(freq) + 21,093 * \ln(v) + 38,471 \quad [\text{dB}] \quad \text{En. 10}$$

Model izračuna hrupa zaradi obtekanja zraka preko kupole v "A" frekvenčno uteženem spektru je prikazan na Sliki 21.



Slika 21: Model hrupa zaradi obtekanja zraka preko kupole.

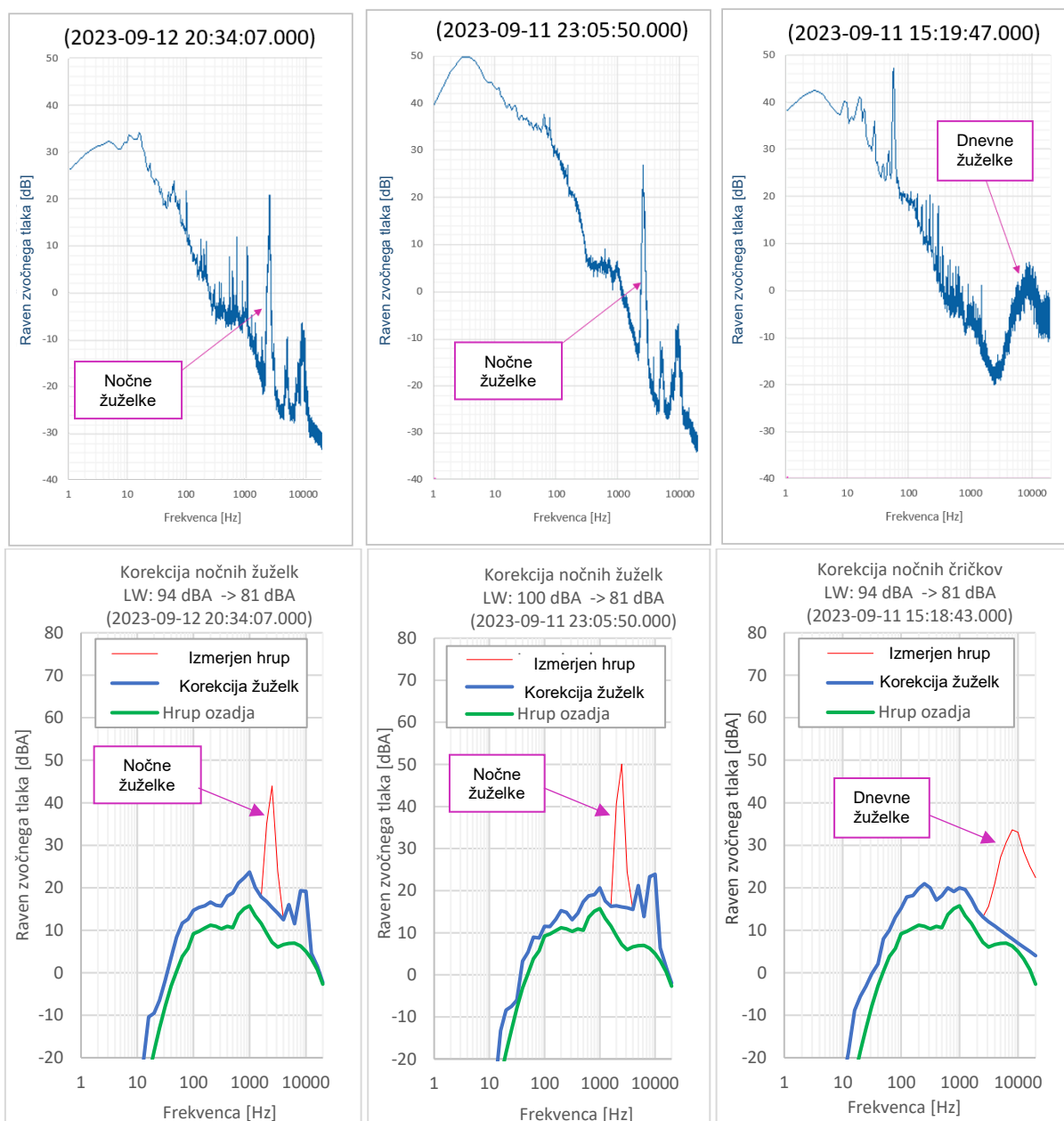
Hrup ozadja in hrup zaradi vetra okoli zaščitne kupole se spreminjata v odvisnosti od hitrosti vetra. Pri večjih hitrostih vetra je hrup ozadja zanemarljiv v primerjavi s hrupom zaradi vetra okoli kupole, kar vidimo na Sliki 22.



Slika 22: Izmerjen hrup VE v primerjavi z hrupom ozadja in hrupom vetra čez kupolo pri različnih hitrostih vetra.

4.2.4 Korekcija travniških žuželk

Korekcija zaradi oglašanja travniških žuželk je bila izvedena v frekvenčni domeni. Zvok nočnih žuželk je izrazit pri 2000, 2500 in 3150 Hz, zvok dnevnih pa v frekvenčnem območju okoli 10 kHz. Pri višjih hitrostih vetra zvok oglašanja žuželk ne dominira, prav tako ne podnevi. Korekcija zaradi žuželk je torej odvisna od obdobja dneva in od hitrosti vetra. Nočne žuželke imajo močan vpliv na izmerjene vrednosti ravni hrupa, zato smo ta residualni vir eliminirali tako, da smo tem trem vrednostim v spektru pripisali povprečno vrednost v sosednjih frekvencah, to je 1600 Hz in 4000 Hz (Slika 23). Podnevi se v spektru dvignejo frekvence nad 16 kHz, kar pripisujemo oglašanju druge vrste žuželk. Zaradi "A" uteženja pa korekcija teh žuželk ni bila izrazita in bi jo lahko tudi zanemarili.



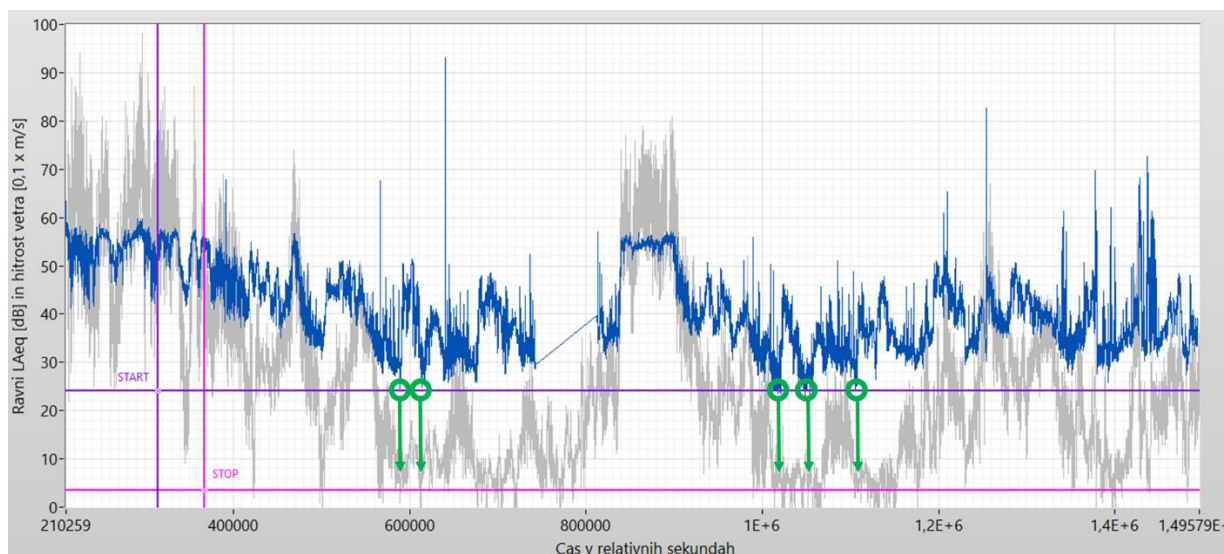
Slika 23: Frekvenčni spekter oglašanja različnih vrst travniških žuželk (dnevno oglašanje in nočno oglašanje) ter korekcija oglašanja travniških žuželk.

4.2.5 Korekcija hrupa ozadja

Ker smo meritve izvajali v minutnih intervalih v času trajanja od 05.09.2023 (12:03) do 22.09.2023 (6:58), smo lahko iz množice meritev izbrali minutne časovne intervale znotraj katerih med meritvijo na merilnem mestu ni bil prisoten noben zvok iz zgoraj naštetih residualnih virov, razen hrup VE. Če residualne vire zvoka lahko izločimo iz meritev, pa hrupa ozadja ne moremo, saj je ves čas prisoten.

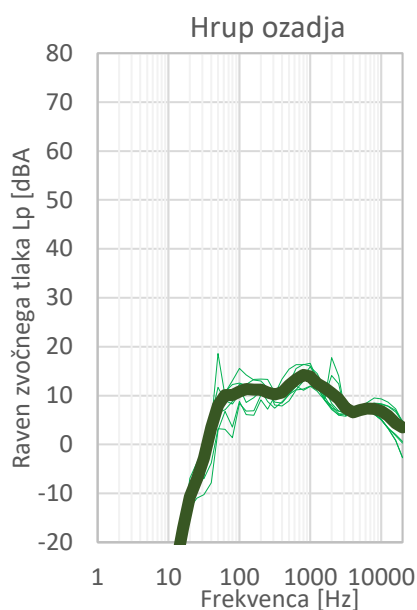
Zato smo hrup ozadja določili ob pogojih, ko ni deloval noben od v prejšnjih poglavjih naštetih residualnih virov, niti sama VE, ker je bila hitrost vetra prenizka, manjša od 1 m/s. Ta hrup ozadja prihaja neposredno iz lastnega šuma mikrofona, merilnega inštrumenta, bobnenja oddaljenih mest, meteoroloških oscilacij zračnega tlaka, hrupa avtoceste, ipd.

Na Sliki 24 so z zelenimi oznakami prikazane najnižje izmerjene vrednosti ravni hrupa tekom obdobja 21 dni meritev. Vse minimalne ravni so bile zabeležene pri hitrosti vetra manjši od 1 m/s, se pravi v obdobju ko se turbina VE ni vrtela. Te vrednosti so prikazane na sliki 25, njihovo povprečje pa smo privzeli kot raven hrupa ozadja.



Slika 24: Najnižje izmerjene vrednosti ravni hrupa.

Ravni hrupa ozadja so izjemno nizke, zato korekcija hrupa ozadja nima praktično nobenega vpliva na izmerjene ravni hrupa VE v primerih, ko referenčna hitrost vetra presega 4 m/s. Poudariti je potrebno, da je bila najnižja raven hrupa izmerjena ob hitrosti vetra 1 m/s.



Slika 25: Frekvenčni spekter hrupa ozadja.

4.3 Ocenjevanje ravni zvočnega tlaka pri varovanih objektih

Ko enkrat poznamo zvočno moč vira (VE) lahko zgornje enačbe enostavno obrnemo in izračunamo pričakovane ravni zvočnega tlaka L_{pA} na poljubni razdalji l od stojišča VE do točke sprejema. Pri tem moramo upoštevati še lastnosti akustične okolice. Za širjenje hrupa na prostem moramo upoštevati morebitne odboje ΔL_m , hrapavost terena ΔL_g in absorpcijo zvoka v zraku ΔL_a . Enačba za izračun ravni zvočnega tlaka na poljubni razdalji od sredine gredi VE tako dobi naslednjo obliko (Enačba 11):

$$L_{pA} = L_{WA,ref} - 10 \cdot \log(l^2 + h^2) - 11dB + \Delta L_g - \Delta L_a + \Delta L_m \quad \text{En. 11}$$

Kjer je:

$L_{wA,ref}$	Zvočna moč VE
l	razdalja od stojišča turbine do točke izračuna
h	višina vetrne elektrarne, od tal do gredi rotorja
ΔL_g	korekcija za teren (1,5 dB za turbine na kopnem in 3 dB za turbine na morju).
ΔL_a	absorpcija zraka, $\Delta L_a = \alpha(f)\sqrt{l^2 + h^2}$ kjer je koeficient dušenja $\alpha(f)$ podan v Preglednici 3, vrednost $\sqrt{l^2 + h^2}$ pa moramo pretvoriti v enoto km.
ΔL_m	popravek za večkratne odboje (0 dB za vetrne turbine na kopnem)

Preglednica 3: Koeficient absorpcije $\alpha(f)$ za enotretjinskem oktavnem spektru pri relativni vlažnosti zraka 80 % in temperaturi zraka 10 °C.

Osrednja frekvenca 1/3 oktave v Hz	50	63	80	100	125	160	200	250	315
α_a v dB/km	0,07	0,11	0,17	0,26	0,38	0,55	0,77	1,02	1,3
Osrednja frekvenca 1/3 oktave v Hz	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	
α_a v dB/km	1,6	2,0	2,4	2,9	3,6	4,6	6,3	8,8	
Osrednja frekvenca 1/3 oktave v Hz		2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	
α_a v dB/km		12,6	18,8	29,0	43,7	67,2	105	157	

Rezultat je ocenjena raven zvočnega tlaka v prostem zvočnem polju, kar pomeni vsaj **6 m** nad tlemi in **6 m** od fasad večjih površin.

4.3.1 Tonalna korekcija

Tonalna korekcija se izvaja samo pri ocenjevanju ravni zvočnega tlaka na poljubni razdalji pred varovanimi prostori. Če pri meritvah zvočne moči zaznamo ton, korekcija ni enoznačna, temveč je odvisna od zaznave tega tona na mestu imisije (pri varovanem objektu). Zaznavanje tonov pri varovanem objektu je izjemno težavno zaradi nizkega razmerja signal-šum. (Razmerje hrup VE/hrup ozadja). V našem primeru smo s strokovnim ocenjevanjem ozkopasovnega FFT spektra identificirali morebitne tone, ki pa po analizi niso imeli lastnosti, ki ustrezajo pogojem za korekcijo.

V tem delu poročila je predstavljena določitev poudarjenih tonov in popravljene ravni hrupa L_r , ki upošteva popravek zaradi prisotnosti poudarjenih tonov v hrupu vetrne elektrarne. Skladno z zahtevami naloge smo izvedli frekvenčno analizo, kot je to opisano v Aneksu 2 smernic iz 2. točke projektne naloge in določili popravek zaradi prisotnosti poudarjenih tonov. V sklopu izračuna so prikazani posamezni koraki, uporabljeni matematični izračuni z vhodnimi podatki, vmesni in končni rezultati. Določen pa je tudi popravek zaradi prisotnosti poudarjenih tonov za preiskovano vetrno elektrarno.

Za določitev popravljene oziroma ocenjene ravni hrupa L_r na mestu ocenjevanja je potrebno upoštevati popravek zaradi prisotnosti poudarjenih tonov v hrupu. Popravek zaradi poudarjenih tonov se izvede na podlagi frekvenčne analize hrupa vetrne turbine, ki se izmeri v bližini vetrne turbine skladno z metodologijo za določanje A – vrednotene ravni zvočne moči vetrne turbine. Frekvenčna analiza in popravek zaradi poudarjenih tonov se izvede skladno s Prilogo 2 smernic za izvedbo naloge. Če frekvenčna analiza hrupa izmerjenega v bližini vetrne turbine pokaže, da popravek zaradi poudarjenih tonov v bližini vetrne turbine ni potreben, potem se predpostavi, da popravek zaradi poudarjenih tonov na mestu imisije pred izpostavljenimi stanovanjskimi objekti ni potreben.

Če frekvenčna analiza hrupa izmerjenega v bližini vetrne turbine skladno s Prilogo 2 smernic za izvedbo naloge pokaže, da je popravek zaradi poudarjenih tonov na emisijskem mestu v bližini vetrne turbine večji od nič, se izvedejo dodatne meritve pred najbolj izpostavljenimi stanovanjskimi objekti. Dodatne meritve hrupa se izvedejo pred najbolj izpostavljenimi objekti z varovanimi prostori na višini 1.5 metra nad tlemi. Mesto merjenja mora biti izbrano tako, da hrup zaradi vetra čim manj vpliva na rezultate meritev. Izbrano merilno mesto ali merilna mesta je potrebno dokumentirati s fotografijami. Pri izvedbi dodatnih meritev pred najbolj izpostavljenimi objekti z varovanimi prostori je potrebno upoštevati tudi smer in hitrost vetra. Smer vetra mora biti ugodna za razširjanje hrupa v smeri sprejemnika oziroma imisijskega mesta. Smer vetra se mora nahajati znotraj $\pm 45^\circ$ glede na smer vektorja, ki povezuje vir in mesto imisije. Pri izvedbi meritev ni podanih zahtev glede temperaturnega gradienta ali oblačnosti. Pri izvedbi meritev je potrebno spremljati hitrost in smer vetra na referenčni višini 10 metrov nad tlemi. Hitrost vetra se lahko določi tudi na podlagi krivulje moči vetrne turbine. Meritve se izvedejo pri obratovalnih pogojih, ki lahko povzročijo poudarjeno tonsko komponento hrupa pred izpostavljenimi objekti. Hitrost vetra na višini 10 m od tal mora znašati med 5 in 9 m/s. Pri malih vetrnih turbinah, pri katerih ni na voljo krivulje moči, se hitrost vetra določi na podlagi meritev na višini 10 metrov od tal.

Meritve z namenom določanja popravka zaradi poudarjenih tonov pred izpostavljenimi objekti morajo trajati vsaj eno uro v tistih pogojih obratovanja, v katerih je ton najbolj poudarjen. Objektivna analiza prisotnosti poudarjenih tonov se opravi v skladu s smernicami iz 3. člena, in sicer na podlagi vsaj 5 frekvenčnih spektrov (čas povprečenja 60 sekund) v vsakem od območij hitrosti vetra od 5,5 m/s do 7 m/s (vsaj en frekvenčni spekter pri hitrosti vetra pod 6,0 m/s) in od 7 m/s do 8,5 m/s (vsaj en spekter pri hitrosti vetra nad 8,0 m/s). Popravek zaradi izrazitih tonov K_T v dB se izračuna za vsak izmerjeni spekter, kot je določeno v prilogi 2, členu 2.4, enačbi 2.4.2. Popravljen raven hrupa L_r (zaradi jasno slišnih poudarjenih tonov) pri 6 oziroma 8 m/s se izračuna na podlagi najvišje vrednosti K_T za vsako ustrezno območje hitrosti vetra, kot je določeno v Enačbi 12.

$$L_r = L_{pA} + K_T \quad \text{En. 12}$$

V sklopu ocenjevanja se lahko tonska komponenta določi na podlagi meritev na zavetrni strani enakovredne turbine na razdalji, ki ustreza razdalji do sosednje točke.

4.3.1.1 Metodologija

Objektivna metoda za določanje popravka zaradi poudarjenih tonov v hrupu je opisana v 2. točki projektne naloge. Metoda je opisana v angleškem jeziku. V tem delu je predstavljen povzetek metode v slovenskem jeziku. Metoda vključuje postopke za določanje popravkov zaradi poudarjenih tonov. Popravki znašajo med 0 in 6 dB. Metoda se lahko uporabi za določanje popravkov za stacionarne in spreminjajoče se tone, za ozkopasovni hrup in za nizkofrekvenčne tone. Metoda je sestavljena iz treh korakov:

1. Ozkopasovna frekvenčna analiza (FFT-analiza).
2. Določitev povprečnih ravni zvočnega tlaka za ton ali tone in maskirni hrup znotraj kritičnega frekvenčnega pasu okoli tona/tonov.
3. Izračun slišnosti tonov ΔL_{ta} in popravek zaradi poudarjenih tonov K_T .

Frekvenčna analiza

Vsak A-uteženi ozkopasovni spekter se določi z enominutnim linearnim povprečenjem (dolgoročno povprečenje). Efektivna pasovna širina frekvenčne analize mora biti manjša od 5 % širine kritičnega pasu s tonskimi komponentami. Pasovne širine kritičnih pasov so navedene v Preglednici 4. Kot izhodišče se priporoča uporaba frekvenčne ločljivosti 3 Hz, ki ustreza 4,5 Hz efektivne pasovne širine frekvenčne analize. Frekvenčni analizator je potrebno kalibrirati v dB re 20 μ Pa. Pri ozkopasovni frekvenčni analizi se uporabi Hanningova okenska funkcija:

- 1) Pri uporabi Hanningovega časovnega okna je efektivna pasovna širina frekvenčne analize enaka 1,5-kratniku frekvenčne ločljivosti. Frekvenčna ločljivost je razdalja med črtami spektra.
- 2) Z uporabo efektivne pasovne širine frekvenčne analize, ki je enaka 5 % kritičnega frekvenčnega pasu, se slišni toni običajno pokažejo kot lokalni maksimumi v ozkopasovnem frekvenčnem spektru, ki so za vsaj 8 dB višji od ravni šuma ozadja.
- 3) V redkih primerih, ko gre za prisotnost številnih bližnjih tonov, je za pravilno določitev ravni maskirnega hrupa morda potrebna večja ločljivost (manjša pasovna širina).
- 4) Če se frekvenca slišnih tonov v času povprečenja spreminja za več kot 10 % širine ustreznega kritičnega pasu, je morda treba dolgoročno povprečenje razdeliti na več krajših časov povprečenja.

Raven zvočnega tlaka tonov L_{pt}

Toni se identificirajo na podlagi ozkopasovnega spektra. Spekter se uporabi za določanje ravni zvočnega tlaka tonov. Vsi lokalni maksimumi s pasovno širino 3 dB, ki je manjša od 10 % pasovne širine dejanskega kritičnega pasu, se obravnavajo kot ton. Skupno raven vseh tonov L_{pt} dobimo tako, da energijsko seštejemo ravni posameznih tonov L_{pti} znotraj kritičnega pasu po Enačbi 13:

$$L_{pt} = 10 \cdot \log \sum 10^{\frac{L_{pt,i}}{10}} \quad \text{En. 13}$$

Kjer je i enako številu vseh tonov.

Če je »ton« dejansko ozkopasovni hrup ali če se frekvenca tona spreminja, se bo ton v časovno povprečenem frekvenčnem spektru prikazal kot več črt. V takih primerih je $L_{pt,i}$ energijska vsota vseh spektralnih črt z ravnmi, ki se od ravni lokalnih maksimumov razlikujejo za manj kot 6 dB, vključno s popravkom zaradi vpliva uporabljene okenske funkcije (za Hanningovo okno je to energijska vsota minus 1,8 dB). Kadar so toni nizkofrekvenčni, je priporočljivo raziskati neuteženo raven tonov glede na slušni prag (Standard DS/EN ISO 387-7). Toni, katerih raven je 10 dB ali več pod pragom slišnosti, se ne upoštevajo.

Pasovna širina in centralna frekvenca za kritične pasove

Če je v kritičnem pasu samo en ton, je centralna frekvenca f_c enaka frekvenci tona, vendar tako, da je f_c večja od 50 Hz. Če spekter vsebuje več tonov, se kritični pas postavi okoli signifikantnih tonov, tako da:

- 1) Je v kritičnem pasu čim več signifikantnih tonov, in
- 2) je razlika med skupno ravnjo tona L_{pt} in ravnjo maskirnega hrupa L_{pn} (glej člen 2.3.3) čim večja. Ta točka je ključna v zvezi s predhodno točko (točko 1).
- 3) Ko so ustrezni toni izbrani, se kritični pas postavi simetrično okoli izbranih signifikantnih tonov v tem pasu.

Za določitev centralne frekvence kritičnega pasu f_c se kot signifikantni štejejo samo toni znotraj 10 dB tona z najvišjo ravnjo. Centralna frekvenca kritičnih pasov f_c se lahko znotraj ustreznega frekvenčnega pasu neprestano spreminja. Najnižji kritični pas je 0 Hz – 100 Hz.

Preglednica 4: Pasovne širine kritičnih pasov.

Centralna frekvenca f_c [Hz]	50 - 500	Nad 500
Pasovna širina [Hz]	100	20 % f_c

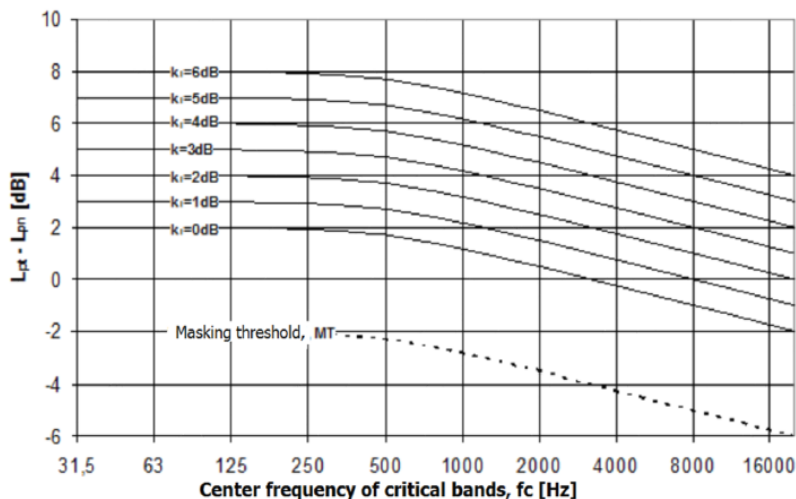
Raven zvočnega tlaka maskirnega hrupa v kritičnem pasu L_{pn}

Povprečno raven zvočnega tlaka v kritičnem pasu $L_{pn,avg}$ je mogoče ugotoviti z vizualnim povprečenjem spektralnih "črt hrupa ozadja" v območju med $\pm 0,5$ in ± 1 -kratno širino kritičnega pasu okoli centralne frekvence f_c . Spektralne "črte hrupa", ki so del maskirnega hrupa, se ugotovijo tako, da se zanemarijo vsi maksimumi v spektru, ki so posledica tonov in vseh njihovih mogočih stranskih pasov znotraj relevantnega frekvenčnega območja. Skupna raven zvočnega tlaka maskirnega hrupa znotraj kritičnega pasu L_{pn} se izračuna iz povprečne ravni zvočnega tlaka v istih kritičnih pasovih $L_{pn,avg}$ kot je navedeno v Enačbi 14:

$$L_{pn} = L_{pn,avg} + 10 \cdot \log \left(\frac{\text{pasovna širina kritičnega pasu}}{\text{efektivna pasovna širina frekvenčne analize}} \right) \quad \text{En. 14}$$

Izračun slišnosti tonov ΔL_{ta} in popravek zaradi poudarjenih tonov K_T

Slišnost tonov ΔL_{ta} je izražena v dB nad pragom maskiranja MT , glej sliko 26. Popravek K_T je vrednost, ki se prišteje L_{Aeq} v časovnem obdobju, da se dobi ocenjena raven hrupu s tonalnim popravkom za to časovno obdobje. ΔL_{ta} in K_T lahko določimo s pomočjo slike 26 na podlagi razlike med ravnjo tona in maskirnega hrupa v kritičnem pasu $L_{pt} - L_{pn}$. Točko na Sliki 26 določata centralna frekvenca f_c kritičnega pasu in razlika v ravneh $L_{pt} - L_{pn}$. Vrednost ΔL_{ta} se določi kot razlika med $L_{pt} - L_{pn}$ in pragom maskiranja, prikazanim na Sliki 26. K_T se določi kot razlika med K_T in pragom maskiranja, prikazanim na sliki. Druga možnost je, da se ΔL_{ta} izračuna z Enačbo 15, K_T pa z Enačbo 16.

Slika 26: Prag maskiranja MT in krivulje za določitev popravka K_T .

L_{pt} je skupna raven zvočnega tlaka tonov v kritičnem pasu, L_{pn} pa je skupna raven zvočnega tlaka maskirnega hrupa v istem pasu. Slišnost tonov v kritičnem pasu ΔL_{ta} se lahko izračuna s pomočjo Enačbe 14

$$\Delta L_{ta} = L_{pt} - L_{pn} + 2 + \log \left(1 + \left(\frac{f_c}{502} \right)^{2,5} \right) \text{ dB re MT} \quad \text{En. 15}$$

Kjer je:

- L_{pt} skupna raven zvočnega tlaka tonov v kritičnem pasu,
- L_{pn} skupna raven zvočnega tlaka maskirnega hrupa v kritičnem pasu in
- f_c centralna frekvenca kritičnega pasu v Hz.

Popravek K_T v dB se lahko izračuna po Enačbi 15:

$$\begin{aligned} 10 \text{ dB} < \Delta L_t: & \quad K_T = 6 \text{ dB} \\ 4 \text{ dB} \leq \Delta L_{ta} \leq 10 \text{ dB}: & \quad K_T = \Delta L_{ta} - 4 \text{ dB} \\ \Delta L_{ta} \leq 4 \text{ dB}: & \quad K_T = 0 \text{ dB} \end{aligned} \quad \text{En. 16}$$

Opomba: K_T ni omejen na celoštevilске vrednosti.

Če se v istem spektru pojavi več tonov (ali skupin tonov) v različnih kritičnih pasovih, se za vsakega od teh pasov naredijo ločeni izračuni. Kritični pas, ki vsebuje najbolj slišen ton ali tone (tj. tistega ali tiste z najvišjo vrednostjo ΔL_{ta}), določa ΔL_{ta} in popravek K_T .

Dokumentacija

Določanje popravka zaradi poudarjenih tonov v hrupu na podlagi ozkopasovne frekvenčne analize je potrebno dokumentirati s spodnjimi dokumenti.

a) Frekvenčna analiza

- Čas merjenja, število spektrov/čas povprečenja in efektivna pasovna širina frekvenčne analize.
- Časovno okno (npr. Hanningovo), tonsko uteženje (Lin) in frekvenčno uteženje (A).
- Tipičen spekter z navedbo položaja ključnega kritičnega pasu in povprečne ravni hrupa v tem pasu.

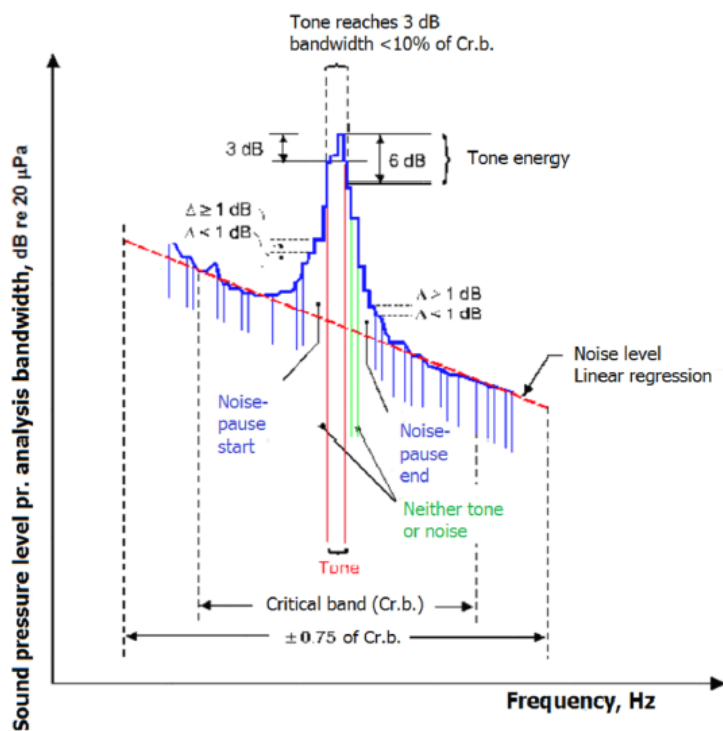
b) Izračuni v ključnem kritičnem pasu

- Navedite, ali je rezultat dobljen z vizualnim povprečenjem ali s samodejnim izračunom.
- Mejne frekvence za kritični pas in območje za vizualno povprečenje ali linearno regresijo (glej člen 4.4).
- Frekvence in ravni tonov ter skupna raven tonov L_{pti} in L_{pt} v dB re 20 μ Pa.
- Raven maskirnega hrupa v kritičnem pasu L_{pn} v dB re 20 μ Pa.
- Slišnost tona(-ov) ΔL_{ta} v dB nad avdiometričnim pragom.
- Vrednost popravka K_T v dB.

Toni v drugih kritičnih pasovih, pri katerih bi se lahko pojavil popravek zaradi poudarjenih tonov, naj bodo označeni vsaj s svojo frekvenco.

c) Podrobne opredelitve ravni tonov in maskirnega hrupa

Za potrebe numerične implementacije metode so v tem členu podane podrobnejše opredelitve tonov in maskirnega hrupa.



Slika 27: Opredelitve tonov (rdeče črte), maskirnega hrupa (modre črte) in prekinitve šuma ozadja (niti toni niti hrup, zelene črte). Δ je merilo za iskanje tonov in je običajno nastavljeno na 1 dB.

Pomembno je, da izvajanje s programsko opremo omogoča vizualne preglede rezultatov. Potreben je najmanj spekter, v katerem je označeno, katere črte so opredeljene kot toni, skupaj z oznako kritičnega pasu okrog njih s pripadajočo regresijsko črto za hrup. Poleg tega bi bilo koristno, če bi bilo označeno, katere črte so opredeljene kot maskirni hrup, prekinitve šuma ozadja in toni. To je mogoče storiti na primer z uporabo različnih barv spektralnih črt, kot je prikazano na sliki 27.

d) Prekinitve šuma ozadja

Prekinitve šuma ozadja so lokalni maksimumi v spektru, kjer bi se lahko pojavili toni. Prekinitve šuma ozadja se definirajo in poiščejo po naslednjem načelu:

Začetek prekinitve šuma ozadja je na pozitivni (levi) strani lokalnega maksimuma kot spektralna črta "s", kjer so izpolnjeni naslednji pogoji Enačbe 17:

$$\begin{aligned} L_s - L_{s-1} &\geq \Delta \text{ dB in} \\ L_{s-1} - L_{s-2} &< \Delta \text{ dB} \end{aligned} \quad \text{En. 17}$$

Kjer je L_s raven spektralne črte "s" in L_{s-1} raven črte "s-1" itd., Δ pa je merilo za iskanje tona, ki je običajno nastavljeno na 1 dB. Za normalne in običajne spektre merilo za iskanje tonov $\Delta = 1 \text{ dB}$ deluje brez težav. Za nepravilne spektre (npr. spektri, izmerjeni s kratkim časom povprečenja, kot je navedeno v členu 4.3) lahko vrednosti do 3 ali 4 dB dajo pravilne rezultate. Priporočljivo je, da pri izvajanju metode s programsko opremo ta parameter določi uporabnik. Konec prekinitve šuma ozadja se določi na negativni (desni) strani lokalnega maksimuma kot črta "e", kjer so izpolnjeni naslednji pogoji Enačbe 18:

$$\begin{aligned} L_e - L_{e+1} &\geq \Delta \text{ dB in} \\ L_{e+1} - L_{e+2} &< \Delta \text{ dB} \end{aligned} \quad \text{En. 18}$$

Vse spektralne črte od vključno "s" do "e" se opredelijo kot del začasne prekinitve šuma ozadja. Iskanje naslednje prekinitve šuma ozadja se začne s črto "e+1". Prekinitve šuma ozadja ima lahko samo en začetek in en konec. Postopek, podoben zgornjemu, se dodatno izvede s pregledovanjem vrstic v spektru od visokih proti nizkim frekvencam (postopek za nazaj). Posledične prekinitve šuma ozadja so črte, ki se z omenjenima postopkoma za naprej in nazaj opredelijo kot predhodne prekinitve šuma.

e) Toni

Toni se nahajajo znotraj prekinitve šuma ozadja. Ton je lahko prisoten, če je raven spektralne črte v prekinitvi šuma ozadja 6 dB ali več nad ravnjo za črti "s-1" in "e+1".

Toni so opredeljeni v členu 2.3.1. Toni so definirani kot čisti toni in kot ozko pasovni hrup. Pasovna širina lokalnega maksimuma se opredeli kot pasovna širina, ki jo določajo frekvence spektralnih črt, katerih amplituda je za največ 3 dB nižja od najvišje črte v prekinitvi šuma ozadja. Kadar je pasovna širina 3 dB manjša od 10 % kritične pasovne širine, se vse spektralne črte z ravnjo znotraj 6 dB od lokalnega maksimuma opredelijo kot ton. Frekvenca tona se določi na podlagi frekvence črte z najvišjo ravnjo znotraj prekinitve šuma ozadja.

Opomba: Kadar je pasovna širina 3 dB večja kot 10 % kritične pasovne širine, se črte ne štejejo niti za tone niti za ozkopasovni hrup. Za tak pojav ni popravka, razen če ga povzroči ton s spremenljivo frekvenco. V takih primerih je treba analizo opraviti s krajšim časom povprečenja.

Toni s spremenljivo frekvenco se lahko v časovno daljšem povprečnem spektru pojavijo kot široki maksimumi. Njihova širina je odvisna od območja spreminjanja frekvence tona in časa povprečenja. Kadar se frekvenca tona v času povprečenja spreminja za več kot 10 % širine kritičnega pasu, se pravilo o 10-odstotni širini pasu ne upošteva (glej člen 2.3.1) in je treba vse črte znotraj širokega maksimuma opredeliti kot tone ali pa je treba uporabiti pomožne analize s krajšim časom povprečenja, vendar tako, da je skupni čas povprečenja 60 sekund.

f) Maskirni hrup

Vse črte, ki niso povezane s prekinitvami šuma ozadja, se opredelijo kot maskirni hrup in se v členu 2.3.3 imenujejo "črte hrupa".

Raven maskirnega hrupa v kritičnem pasu se določi z linearno regresijo prvega reda med ravnjo vseh črt, opredeljenih kot hrup, in frekvenco. Za območje regresije se običajno izbere $\pm 0,75$ kritične pasovne širine okoli centralne frekvence kritičnega pasu.

Pri nepravilnih spektrih ali spektrih s široko prekinitvijo šuma ozadja se lahko območje linearne regresije razširi na ± 1 ali 2 kritična pasova, če to zagotavlja boljšo skladnost s splošnim šumom ozadja. Priporočljivo je, da pri izvajanju metode s programsko opremo območje linearne regresije določi uporabnik.

Vsaki spektralni črti v kritičnem pasu se dodeli raven L_n regresijske črte. Skupna raven zvočnega tlaka maskirnega hrupa v kritičnem pasu L_{pn} se določi kot energijska vsota dodeljenih ravni L_n vseh spektralnih črt v kritičnem pasu, popravljena zaradi vpliva uporabljene okenske funkcije. Skupna raven zvočnega tlaka maskirnega hrupa je definirana z Enačbo 19:

$$L_{pn} = 10 \cdot \log \sum 10^{\frac{L_n}{10}} + 10 \cdot \log \left(\frac{\text{Frekvenčna ločljivost}}{\text{Efektivna pasovna širina frekvenčne analize}} \right) \quad \text{En. 19}$$

4.3.1.2 Določitev poudarjenih tonov in popravka L_T za preiskovano vetrno elektrarno

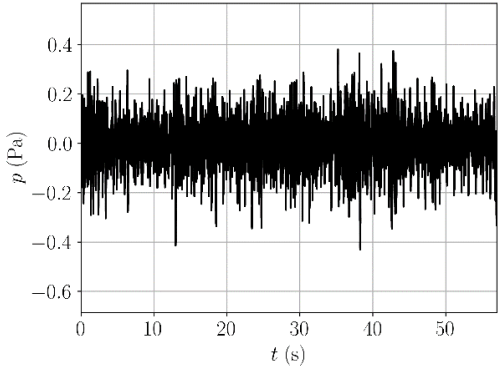
Skladno z opisano metodologijo smo izvedli analizo hrupa vetrne elektrarne z namenom določanja popravka zaradi prisotnosti poudarjenih tonov. Frekvenčna analiza in preverjanje slišnosti tonov je prikazana za en signal. Signal je bil izbran, ker frekvenčna analiza posnetka nakazuje na morebitno prisotnost signifikantnih tonov, ki so povezani z obratovanjem vetrne elektrarne. V splošnem je obratovanje preiskovane elektrarne povezano s pojavom ozkopasovnega hrupa oziroma dveh tonov pri frekvencah okoli 24 Hz in 146 Hz, kar je jasno razvidno iz ozkopasovne FFT analize.

Skladno s predpisano metodologijo smo izvedli ozkopasovno frekvenčno analizo, določili povprečne ravni zvočnega tlaka za tona in maskirni hrup znotraj kritičnega frekvenčnega pasu okoli tonov, izračunali slišnost tonov in določili popravek zaradi poudarjenih tonov K_T .

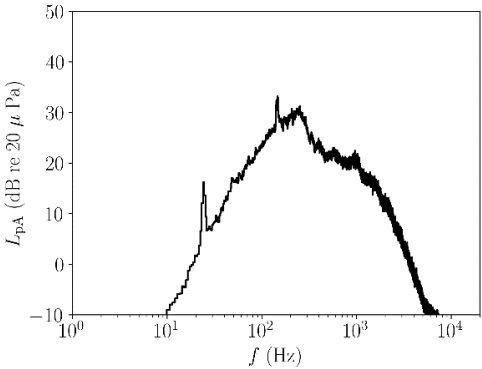
Skladno z metodologijo v spodnjih preglednicah prikazujemo vhodne podatke, parametre izračuna in rezultate. Popravek zaradi poudarjenih tonov K_T je znašal 0 dB.

a) Frekvenčna analiza

Signal:

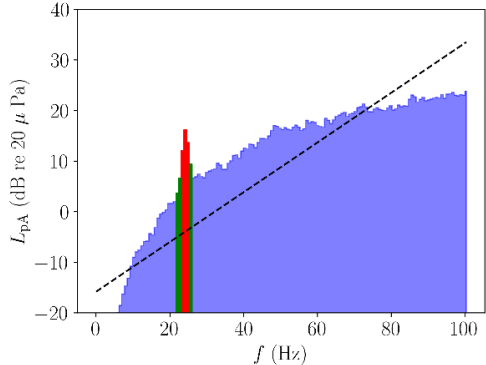
Oznaka signala:	230907151922 - Vetrnica.WAV
Datum:	8.09.2023
Ura:	07:25:00
Hitrost vetra:	7 m/s
Smer vetra:	Veter je pihal v smeri od vetrnice proti merilnemu mestu pod kotom 0^0 glede na smer vektorja, ki povezuje vir in merilno mesto.
Izvorni posnetek:	

Parametri FFT frekvenčne analize

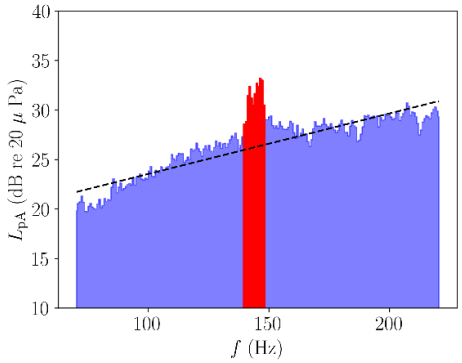
Čas signala:	60 s
Frekvenca vzorčenja:	48000 Hz
Frekvenčno uteženje:	A
Okenska funkcija:	Hanning
Dolžina časovnega okna:	2^{16}
Število spektrov:	1
Frekvenčna ločljivost:	0,732422 Hz
Efektivna pasovna širina frekvenčne analize:	1,098633 Hz
Ozkopasovna FFT frekvenčna analiza:	

b) Izračuni v ključnem kritičnem pasu

Ton 1

Signifikatni ton (Hz)	24,169921875
Rezultat dobljen z:	z vizualnim povprečenjem s samodejnim izračunom
Mejne frekvence za kritični pas:	
Spodnja frekvenca (Hz)	0
Zgornja frekvenca (Hz)	100
Območje za vizualno povprečenje ali linearno regersijo:	
Spodnja frekvenca (Hz)	0
Zgornja frekvenca (Hz)	100
Frekvence in ravni tonov ter skupna raven tonov L_{pti} in L_{pt} v dB re 20 μ Pa	
f_i (Hz)	L_{pti} (dBA re 20 μPa)
23,4375 Hz	12,07872701
24,16992 Hz	16,17740853
24,90234 Hz	13,65481895
Skupna raven tonov L_{pt} v dB re 20 μPa	19,07461
Enačba regresijske premice	
Naklon	0,49165492
Presečišče z ordinatno osjo	-15,81230963
Pasovna širina kritičnega pasu (Hz)	100
Efektivna pasovna širina frekvenčne analize (Hz)	1,098632813
Raven maskirnega hrupa v kritičnem pasu L_{pn} v dB re 20 μPa	42,7063
Slišnost tona(-ov) ΔL_{ta} v dB nad avdiometričnim pragom	-21,6303
Vrednost popravka K_T v dB	0
Spekter z označenimi toni:	

Ton 2

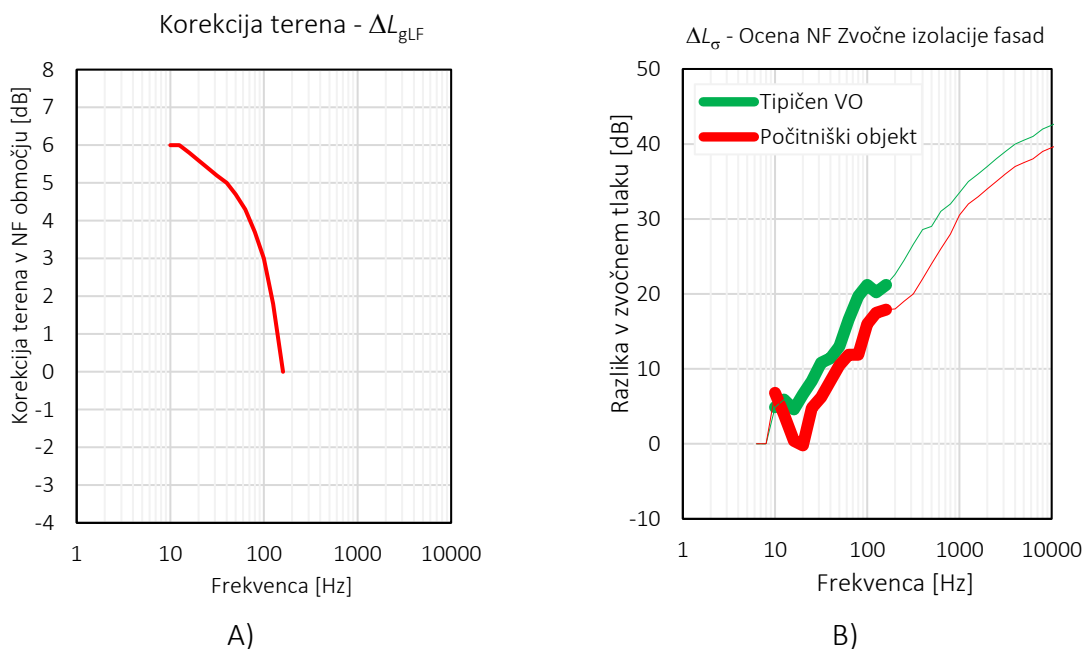
Signifikatni ton (Hz)	146,484375
Rezultat dobljen z:	z vizualnim povprečenjem s samodejnim izračunom
Mejne frekvence za kritični pas:	
Spodnja frekvenca (Hz)	96,484375
Zgornja frekvenca (Hz)	196,484375
Območje za vizualno povprečenje ali linearno regersijo:	
Spodnja frekvenca (Hz)	70,3125
Zgornja frekvenca (Hz)	220,459
Frekvence in ravni tonov ter skupna raven tonov L_{pti} in L_{pt} v dB re 20 μPa	
f_i (Hz)	L_{pti} (dBA re 20 μPa)
139,8926	28,59415
140,625	28,86194
141,3574	31,46256
142,0898	32,38652
142,8223	31,20945
143,5547	30,47273
144,2871	31,6824
145,0195	32,7131
145,752	32,36983
146,4844	33,19383
147,2168	33,01565
147,9492	30,51891
Skupna raven tonov L_{pt} v dB re 20 μPa	42,3915445
Enačba regresijske premice	
Naklon	0,06112531851111258
Presečišče z ordinatno osjo	17,43687729719955
Pasovna širina kritičnega pasu (Hz)	100
Efektivna pasovna širina frekvenčne analize (Hz)	1,098632813
Raven maskirnega hrupa v kritičnem pasu L_{pn} v dB re 20 μPa	44,75314146
Slišnost tona(-ov) ΔL_{ta} v dB nad avdiometričnim pragom	-0,360239362
Vrednost popravka K_T v dB	0
Spekter z označenimi toni:	

4.4 Ocenjevanje ravni zvočnega tlaka v varovanih objektih

Ocenjevanje ravni zvočnega tlaka nizkih frekvenc v prostorih je po Danski uredbi izvedeno po Enačbi 20, ki velja v frekvenčnem območju od 10 Hz do 160 Hz. Poudariti je potrebno da ocenjevanje temelji na frekvenčno "A" vrednoteni ravni zvočne moči L_{WALF} [dBA]. Izhodišče za izračun ravni NF hrupa v varovanih objektih je torej zvočna moč VE, ki ji sledita člena za vpliv razdalje $-10 \cdot \log(l^2 - h^2)$ in sferično širjenje -11 dB. Nato sledi korekcijski člen za vpliv terena ΔL_{gLF} . Korekcija terena je grafično prikazana na sliki 28A. Razberemo da korekcija ΔL_{gLF} zaradi vpliva terena pri najnižjih frekvencah (10Hz) znaša 6 dB in da s poviševanjem frekvenc korekcija pade na 0 dB pri 160 Hz. Ta korekcija torej upošteva odboj zvočnega valovanja od tal. Ker fasade in okna niso pri tleh je vpliv podvojitve amplitude zaradi odboja od tal pri višjih frekvencah manjši.

$$L_{pALF} = L_{WA,ref} - 10 \cdot \log(l^2 + h^2) - 11dB + \Delta L_{gLF} - \Delta L_{\sigma} - \Delta L_{\alpha} + \Delta L_{m'} \quad \text{En. 20}$$

Korekcija ΔL_{σ} predstavlja zvočno izolacijo fasad s fasadnimi elementi. Danski standard ločuje dva razreda fasad, fasade za tipične objekte in fasade za počitniške objekte. Zvočna izolacija je za oba tipa VO ocenjena v nizkofrekvenčnem območju od 10 Hz do 160 Hz, s čimer se omejuje izračun na NF območje. Zvočno izolacijo lahko ekstrapoliramo na standardno frekvenčno območje gradbene akustike, v kolikor bi se izkazala potreba po ocenjevanju hrupa VE v celotnem slišnem spektru. Korekcija absorpcije ΔL_{α} je enaka kot pri določanju ravni zvočnega tlaka. Poudariti je potrebno da je poenostavljena in da velja za 80 % relativno vlažnost pri 10 °C.



Slika 28: a) Korekcija v NF območju v odvisnosti od frekvence, B) Ocena NF zvočne izolacije fasad.

Preglednica 5: Korekcije za ocenjevanje ravni zvočnega tlaka v varovanih objektih.

Osrednja frekvenca 1/3 oktave v Hz	10	12,5	16	20	25	31,5	40
ΔL_{gLF} = korekcija terena (dB)	6,0	6,0	5,8	5,6	5,4	5,2	5,0
ΔL_{σ} = zvočna izolacija fasad (razlika v ravni) (dB)	4,9	5,9	4,6	6,6	8,4	10,8	11,4
ΔL_{σ} = zvočna izolacija fasad počitniških objektov (razlika v ravni) (dB) (dB)	6,8	3,9	0,4	-0,2	4,8	6,2	8,4
α_a v dB/km	0,0	0,0	0,0	0,0	0,02	0,03	0,05

Osrednja frekvenca 1/3 oktave v Hz	50	63	80	100	125	160
ΔL_{gLF} = korekcija terena (dB)	4,7	4,3	3,7	3,0	1,8	0,0
ΔL_{σ} = zvočna izolacija fasad (razlika v ravni) (dB)	13,0	16,6	19,7	21,2	20,2	21,2
ΔL_{σ} = zvočna izolacija fasad počitniških objektov (razlika v ravni) (dB) (dB)	10,5	11,9	11,9	16,0	17,5	17,9
α_a v dB/km	0,07	0,11	0,17	0,26	0,38	0,55

5 REZULTATI MERITEV ZVOČNE MOČI

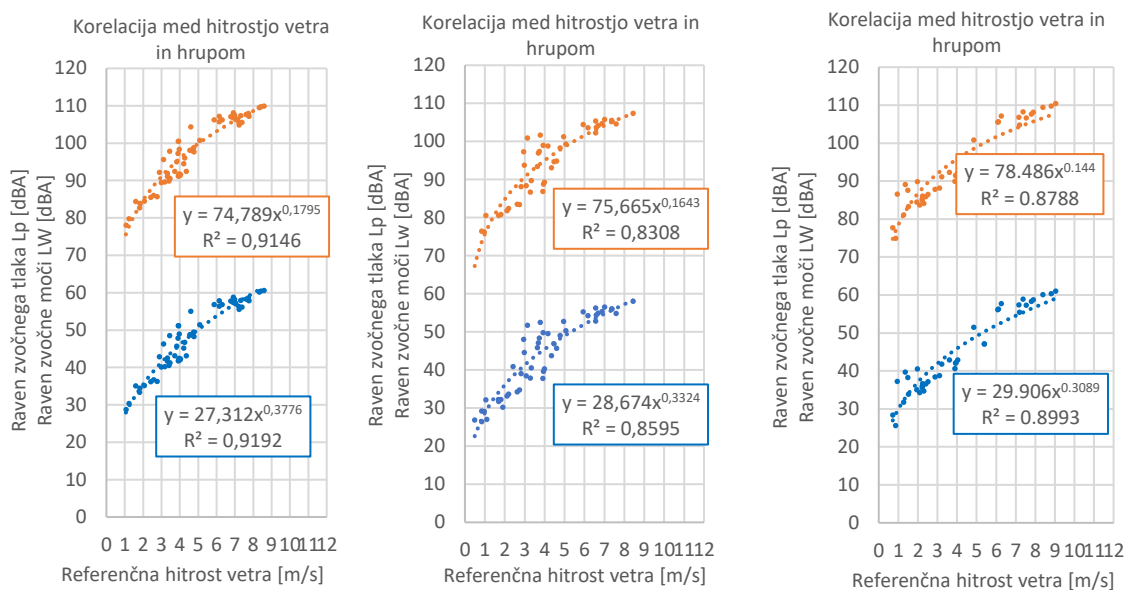
Rezultati so bili iz meritev izluščeni na dva načina:

V prvem načinu smo po strokovni presoji izmerjenih signalov podanih v obliki grafa in poslušanja posnetkov ročno izbrali reprezentativne časovne intervale. Izbrali smo časovna obdobja stabilne ravni hrupa ob konstantni hitrosti vetra, znotraj katerih smo preposlušali zvočne posnetke. Časovni intervali so bili različno dolgi od nekaj minut do nekaj ur. V teh intervalih smo izračunali povprečne vrednosti hitrosti vetra in izmerjenih ravni hrupa ter določili korelacijo med njima. Izvedli smo povprečenje korelacij. Iz teh intervalov smo nato izračunali vse potrebne ocene. Rezultati so predstavljeni v poglavju 5.1 »Rezultati glede na povprečenje dolgotrajnih kontinuiranih meritev po strokovni izbiri intervalov«.

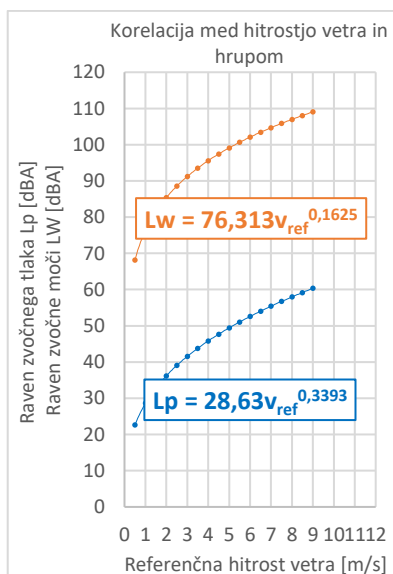
Pri drugem načinu pa smo iz 11000 posnetkov s pripadajočimi pogoji okolja izbrali tiste posnetke ki so bili opravljeni pod pogoji, ki v celoti ustrezajo zahtevam standarda. Dobili smo 25 minutnih posnetkov in analiza je bila opravljena na teh posnetkih. V teh posnetkih nismo zaznali residualnih virov hrupa. Postopek je opisan v poglavju 5.2 »Rezultati po minutnih intervalih ki ustrezajo zahtevam standarda«. Drugi način torej ustreza terminologiji kratkotrajnih meritev in je skladen z Dansko uredbo.

5.1 Rezultati glede na povprečenje dolgotrajnih kontinuiranih meritev po strokovni izbiri intervalov

Na osnovi treh ekspertnih ocenjevanj izmerjenih rezultatov smo dobili tri povezave med referenčno hitrostjo vetra in izmerjeno ravnjo zvočnega tlaka, z vsemi korekcijami (Slika 29). Prav tako smo dobili tri ocene zvočne moči L_w vetrne elektrarne kot funkcijo hitrosti vetra. Na osnovi treh enačb smo določili povprečje in dobili končno povezavo med ravnjo zvočne moči VE in hitrostjo vetra, za katero ocenjujemo, da velja v območju vetra od 2 m/s do 8 m/s (Slika 30).



Slika 29: Rezultati ekspertnih ocenjevanj treh različnih časovnih intervalov.



Slika 30: Korelacija med ravnjo zvočne moči L_w in referenčno hitrostjo vetra (oranžna) in povezava med ravnjo zvočnega tlaka z vsemi korekcijami na mestu meritve in referenčno hitrostjo vetra (modra).

Enačba 21 za oceno zvočne moči VE na osnovi meritev hitrosti vetra (izpeljana iz različnih časovnih intervalov – Slika 30) ima naslednjo obliko:

$$L_W = 76,313 \cdot v_{ref}^{0,1625} [dBA] \quad \text{En. 21}$$

Enota za referenčno hitrost vetra je [m/s]. Referenčno hitrost vetra se izračuna iz meritev hitrosti vetra in lastnosti terena, po postopku opisanem v 4.7.

Preglednica 6: Povprečna izmerjena zvočna moč VE kot funkcija hitrosti vetra in frekvence.

v_{ref} [m/s]	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9
Frekvenca [Hz]																	
6,3	2	5	7	8	12	15	21	21	25	29	29	34	33	35	35	38	38
8	10	13	14	15	20	21	27	28	31	35	35	41	39	41	41	43	44
10	19	21	21	22	27	27	34	35	38	42	42	47	46	47	47	50	49
12,5	28	28	29	31	35	33	41	41	44	48	48	53	51	53	53	56	54
16	42	41	40	44	49	45	48	50	51	53	53	58	56	58	58	61	59
20	44	42	43	45	50	45	52	53	55	58	59	63	62	63	63	66	64
25	47	45	46	50	54	50	57	58	60	67	63	70	70	70	71	72	71
31,5	50	50	52	52	56	55	62	63	65	68	68	73	71	72	72	75	73
40	53	53	55	55	60	60	67	68	70	72	72	76	75	76	76	78	76
50	57	70	65	70	66	66	73	75	75	76	77	80	80	80	80	82	80
63	61	71	73	69	73	72	75	76	79	79	81	83	83	84	83	85	83
80	62	62	67	67	71	76	79	81	83	83	84	86	86	87	87	87	85
100	63	64	69	69	74	77	84	85	87	86	88	88	90	91	90	89	87
125	64	66	71	70	74	77	84	85	88	89	91	91	93	94	93	92	90
160	64	66	70	69	73	78	84	85	89	92	93	96	96	96	96	96	95
200	64	67	70	69	74	79	85	86	90	93	93	94	97	97	95	94	92
250	63	66	69	68	73	77	84	85	90	94	94	96	98	98	96	95	93
315	62	63	65	67	72	75	80	81	86	91	93	94	95	95	96	94	93
400	62	62	64	68	74	74	77	80	83	89	91	93	93	93	93	94	92
500	64	65	66	69	74	75	78	81	83	89	92	94	93	93	93	95	94
630	65	67	68	71	75	77	80	82	85	89	93	96	94	94	96	97	97
800	65	66	68	71	76	78	81	82	87	88	92	95	94	96	97	99	99
1000	67	69	70	72	77	79	83	83	88	88	92	95	95	97	98	100	101
1250	65	67	69	69	75	77	80	81	85	86	90	93	93	96	96	99	100
1600	62	63	64	66	71	73	78	79	84	85	88	91	92	95	96	99	100
2000	60	60	64	62	67	70	74	76	81	82	86	88	90	93	93	96	97
2500	58	58	59	61	64	66	71	72	78	81	84	86	88	90	90	94	95
3150	57	58	58	59	64	63	67	69	74	77	82	87	87	87	87	91	92
4000	57	58	58	57	63	62	63	65	70	71	75	78	80	83	83	87	88
5000	55	56	57	56	61	59	61	62	67	68	72	75	76	78	78	82	83
6300	53	55	55	55	59	57	60	61	64	65	68	71	76	74	74	77	78
8000	51	53	54	53	57	55	57	59	62	62	65	67	70	73	72	73	74
10000	50	52	53	52	57	54	55	56	58	56	59	62	66	71	70	69	70
12500	48	50	51	50	55	51	52	53	54	51	54	56	61	67	65	64	65
16000	46	48	49	48	52	49	48	51	51	47	50	52	58	63	61	59	60
20000	43	45	46	46	49	45	45	47	48	44	46	48	54	59	58	53	54
L_w [dBA]	76	79	81	82	86	89	94	95	99	101	103	105	106	107	107	108	109

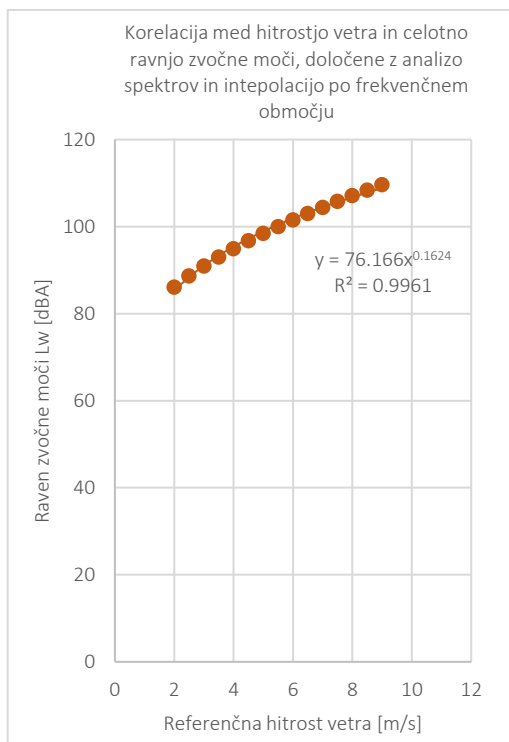
Preglednica 7: Interpolirana zvočna moč VE kot funkcija hitrosti vetra in frekvence.

v_{ref} [m/s]			2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9
Frek. [Hz]	k	b															
6,3	6,67183	0,772	11	14	16	18	19	21	23	25	27	28	30	32	33	35	36
8	11,3661	0,599	17	20	22	24	26	28	30	32	33	35	36	38	40	41	42
10	17,0022	0,48	24	26	29	31	33	35	37	39	40	42	43	45	46	47	49
12,5	23,106	0,391	30	33	36	38	40	42	43	45	47	48	49	51	52	53	55
16	33,0373	0,269	40	42	44	46	48	49	51	52	53	55	56	57	58	59	60
20	34,2259	0,295	42	45	47	50	51	53	55	57	58	59	61	62	63	64	65
25	36,0376	0,32	45	48	51	54	56	58	60	62	64	66	67	69	70	71	73
31,5	44,7061	0,233	53	55	58	60	62	63	65	66	68	69	70	71	73	74	75
40	51,6123	0,191	59	61	64	66	67	69	70	71	73	74	75	76	77	78	79
50	61,1192	0,138	67	69	71	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	82	83
63	61,7361	0,152	69	71	73	75	76	78	79	80	81	82	83	84	85	86	86
80	68,2076	0,122	74	76	78	79	81	82	83	84	85	86	87	87	88	89	89
100	75,2312	0,093	80	82	83	85	86	87	87	88	89	90	90	91	91	92	92
125	71,0741	0,135	78	80	82	84	86	87	88	89	91	92	92	93	94	95	96
160	67,0509	0,177	76	79	81	84	86	88	89	91	92	93	95	96	97	98	99
200	70,3047	0,153	78	81	83	85	87	88	90	91	92	94	95	96	97	98	98
250	66,9994	0,181	76	79	82	84	86	88	90	91	93	94	95	97	98	99	100
315	58,7893	0,233	69	73	76	79	81	83	86	87	89	91	92	94	95	97	98
400	56,5027	0,242	67	71	74	77	79	81	83	85	87	89	90	92	93	95	96
500	56,7994	0,244	67	71	74	77	80	82	84	86	88	90	91	93	94	96	97
630	58,2105	0,241	69	73	76	79	81	84	86	88	90	91	93	95	96	97	99
800	57,9911	0,244	69	73	76	79	81	84	86	88	90	92	93	95	96	98	99
1000	58,9603	0,24	70	73	77	80	82	85	87	89	91	92	94	96	97	99	100
1250	54,9515	0,265	66	70	73	77	79	82	84	86	88	90	92	94	95	97	98
1600	50,3763	0,301	62	66	70	73	76	79	82	84	86	88	90	92	94	96	98
2000	46,7115	0,324	58	63	67	70	73	76	79	81	84	86	88	90	92	94	95
2500	42,9397	0,351	55	59	63	67	70	73	76	78	81	83	85	87	89	91	93
3150	38,9031	0,382	51	55	59	63	66	69	72	75	77	80	82	84	86	88	90
4000	35,4845	0,397	47	51	55	58	62	64	67	70	72	75	77	79	81	83	85
5000	36,1077	0,363	46	50	54	57	60	62	65	67	69	71	73	75	77	79	80
6300	37,1068	0,329	47	50	53	56	59	61	63	65	67	69	70	72	74	75	77
8000	36,3219	0,318	45	49	52	54	56	59	61	62	64	66	67	69	70	72	73
10000	31,9146	0,352	41	44	47	50	52	54	56	58	60	62	63	65	66	68	69
12500	23,9321	0,45	33	36	39	42	45	47	49	52	54	56	57	59	61	63	64
16000	16,9929	0,577	25	29	32	35	38	40	43	45	48	50	52	54	56	58	60
20000	15,1832	0,593	23	26	29	32	35	37	39	42	44	46	48	50	52	54	56
Lw [dBA]			86	89	91	93	95	97	98	100	102	103	104	106	107	108	110

Z enakim postopkom, kot smo določili korelacijo med skupno ravnjo zvočne moči VE in referenčno hitrostjo vetra (En. 21), smo določili tudi korelacije med ravnjo zvočne moči v posameznem frekvenčnem območju (f) in referenčno hitrostjo vetra v_{ref} . Korelacijo smo določili za vsako frekvenčno (terčno) območje od 6,3 Hz do 20 kHz. Uporabili smo enačbo En. 22, ki smo ji določili koeficiente $k(f)$ in $b(f)$ iz interpolacije izmerjenih in izluščenih podatkov.

$$L_W(f) = k(f) \cdot v_{ref}^{b(f)} \text{ [dBA]} \quad \text{En.22}$$

Ker sedaj poznamo korelacije med zvočno močjo v posameznem frekvenčnem območju z referenčno hitrostjo vetra, lahko podamo Preglednico 7, ki prikazuje kako je zvočna moč odvisna od referenčne hitrosti vetra in od frekvenc. Z metodo interpolacije spektrov izluščenih iz rezultatov pri izbranih vrednostih referenčne hitrosti vetra smo torej dobili zvočno moč VE kot funkcijo hitrosti vetra in frekvence.



Slika 31: Totalna raven zvočne moči izračunana iz interpoliranega spektra se kot funkcija hitrosti vetra ujema s totalno ravno kot funkcijo hitrosti vetra, pridobljeno neposredno iz meritev.

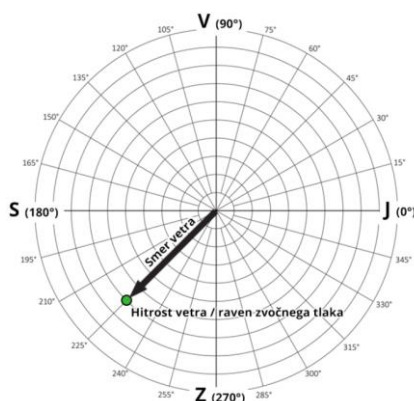
Preglednica 8 prikazuje raven zvočne moči VE v odvisnosti od referenčne hitrosti vetra na podlagi metode interpolacije totalnih ravni, na podlagi analize terčnih spektrov kot funkcije hitrosti vetra in kot končna ocena rezultata.

Preglednica 8: Primerjava ravni zvočne moči VE dveh metod.

Referenčna hitrost vetra [m/s]	Raven zvočne moči VE Z metodo interpolacije totalnih ravni kot funkcije v_{ref} [dBA]	Raven zvočne moči VE Z metodo analize spektrov hrupa kot funkcije v_{ref} [dBA]
5,5	101 (100,7)	100 (100,0)
6	102 (102,1)	102 (101,6)
6,5	103 (103,4)	103 (103,0)
7	105 (104,7)	104 (104,4)
7,5	106 (105,9)	106 (105,8)
8	107 (106,9)	107 (107,1)
8,5	108 (108,1)	108 (108,4)

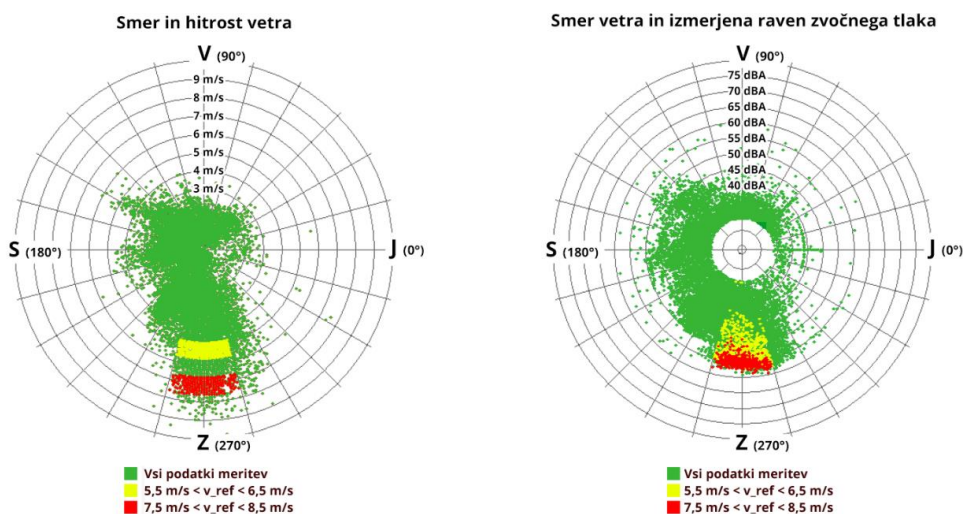
5.2 Rezultati kratkotrajnih meritev po minutnih intervalih ki ustrezajo zahtevam standarda/smernic

Na spodnjih slikah so prikazani podatki za smer in hitrost vetra v kombinaciji z izmerjeno ravno zvočnega tlaka. Vsi podatki predstavljajo 17-dnevno obdobje meritev med času trajanja od 05.09.2023 (12:03) do 22.09.2023 (6:58). Vsaka od točk na spodnji sliki predstavlja 1-minutno meritev. V skladu s smernicami je bilo izluščiti obdobja, kjer je veter na 10 m višine pihal med 5,5 m/s in 6,5 m/s ter med 7,5 m/s in 8,5 m/s. Za vsakega od teh dveh kriterijev je bilo potrebno izračunati raven zvočnega tlaka ter pripadajoči frekvenčni spekter za minimalno obdobje 5-ih minut. Referenca orientacije smeri vetra je prikazana na Sliki 32. Kot točke na polarnem diagramu prikazuje smer v katero je pihal veter. Na Sliki 32 je prikazan primer JV vetra, ki je pihal proti SZ. Kot vetra je v takem primeru 225°. Slika služi za referenco pri razlagi rezultatov v nadaljevanju in služi prevodu orientacije smeri neba med prikazanimi podatki in standardizirano rožo vetrov.



Slika 32: Referenčni polarni diagram orientacije smeri vetra in hitrost vetra/ravni zvočnega tlaka.

Vseh več kot 11000 podatkovnih točk meritev je prikazanih na polarnih diagramih Slike 33. Postavitev merilnega mesta glede na orientacijo vetrnice in smeri vetra se je izkazala za pravilno, saj je veter v 17-dnevem obdobju meritev največkrat pihal iz smeri vzhoda proti vzhodu. Takrat je tudi izražal največje hitrosti.



Slika 33: Polarna diagrama vseh zajetih podatkov v odvisnosti od smeri in hitrosti vetra ter izmerjeno ravno zvočnega tlaka.

Na podlagi smernic so v Preglednicah 9, 10, 11 in 12 prikazani izbrani minutni časovni intervali, ki so služili za vse nadaljnje preračune.

Preglednica 9: Izbrani minutni intervali za referenčno hitrost vetra od 5,5 do 6,0 m/s na višini 10m:

Datum	Ura	Hitrost vetra na višini 5,5 m [m/s]	Smer vetra [°]
7.9.2023	15:29	5,1	267
7.9.2023	18:17	5,1	277
7.9.2023	19:42	4,9	274
8.9.2023	6:20	5,1	268
8.9.2023	6:36	5,0	256
8.9.2023	6:37	4,9	262
8.9.2023	6:48	5,0	257

Preglednica 10: Izbrani minutni intervali za referenčno hitrost vetra od 6,0 do 6,5 m/s na višini 10m:

Datum	Ura	Hitrost vetra na višini 5,5 m [m/s]	Smer vetra [°]
8.9.2023	6:50	5,5	257
8.9.2023	6:55	5,5	263
8.9.2023	7:47	5,5	273
8.9.2023	7:58	5,5	281
8.9.2023	9:53	5,5	278

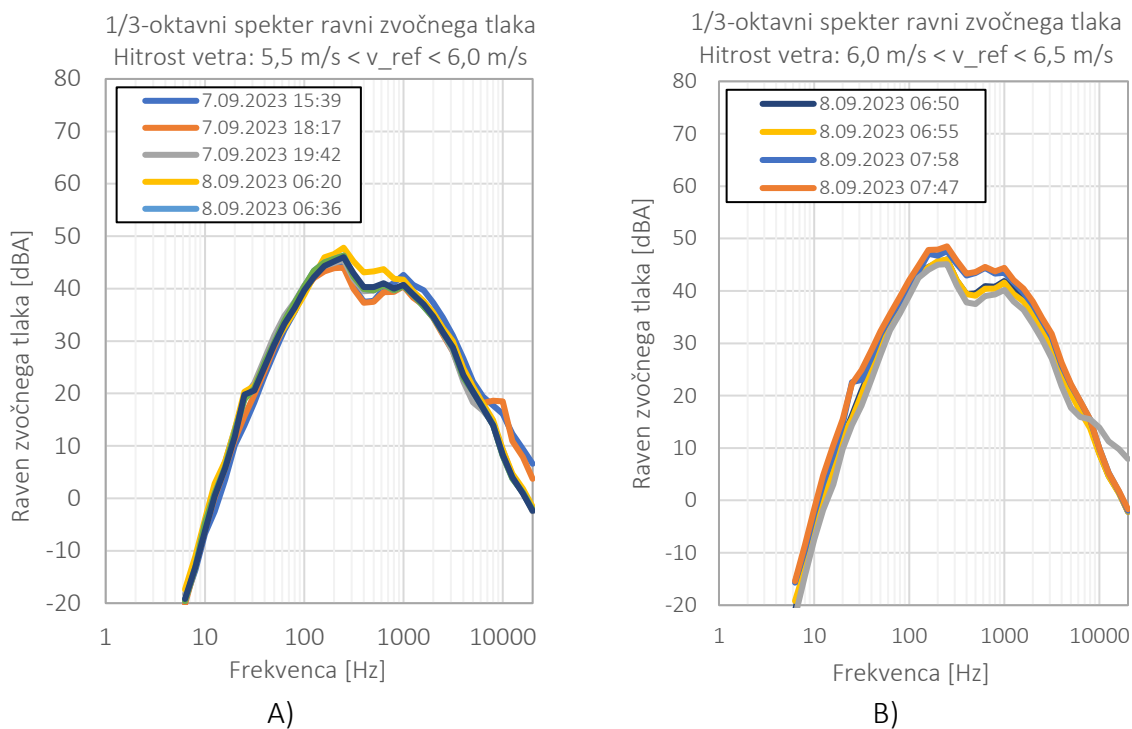
Preglednica 11: Izbrani minutni intervali za referenčno hitrost vetra od 7,5 do 8,0 m/s na višini 10m:

Datum	Ura	Hitrost vetra na višini 5,5 m [m/s]	Smer vetra [°]
7.9.2023	13:35	6,9	270
7.9.2023	13:44	6,9	273
7.9.2023	15:19	7,0	268
8.9.2023	7:25	6,7	264
8.9.2023	7:27	7,0	269
8.9.2023	7:35	7,0	271
8.9.2023	7:37	7,0	266

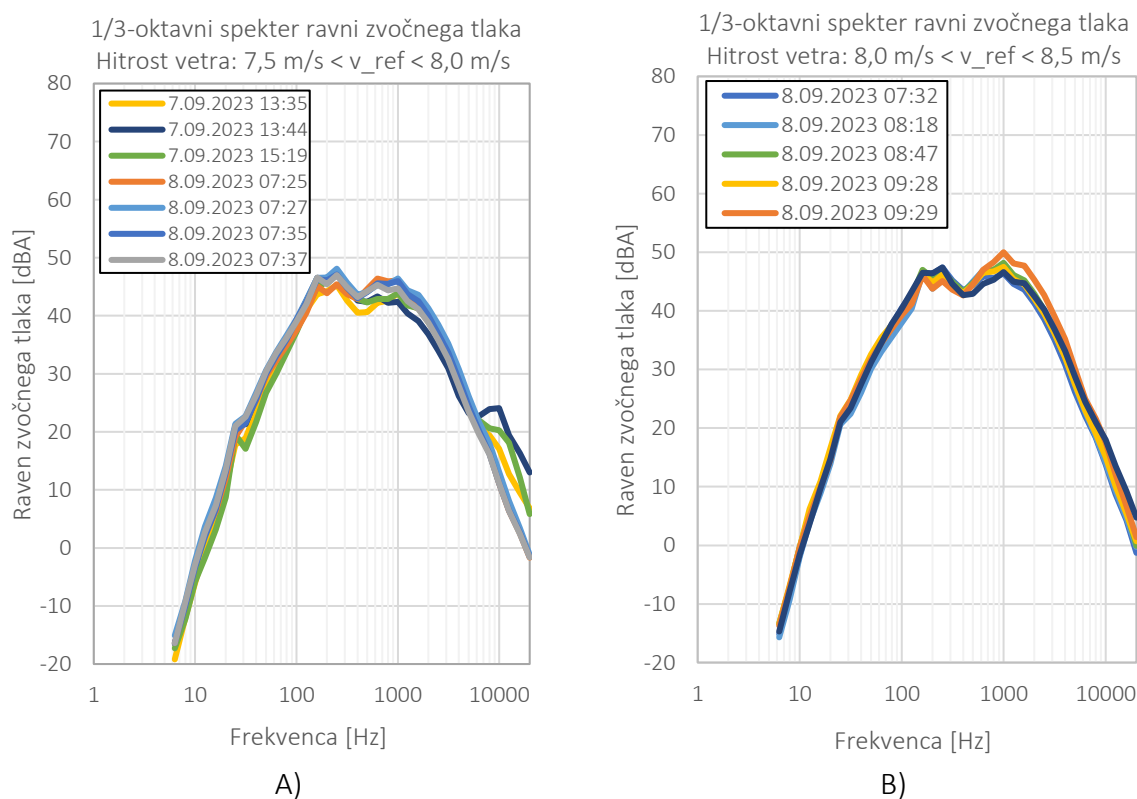
Preglednica 12: Izbrani minutni intervali za referenčno hitrost vetra od 8,0 do 8,5 m/s na višini 10m:

Datum	Ura	Hitrost vetra na višini 5,5 m [m/s]	Smer vetra [°]
8.9.2023	7:32	7,4	267
8.9.2023	8:18	7,5	270
8.9.2023	8:47	7,5	270
8.9.2023	9:28	7,5	274
8.9.2023	9:29	7,4	276
8.9.2023	11:35	7,4	275

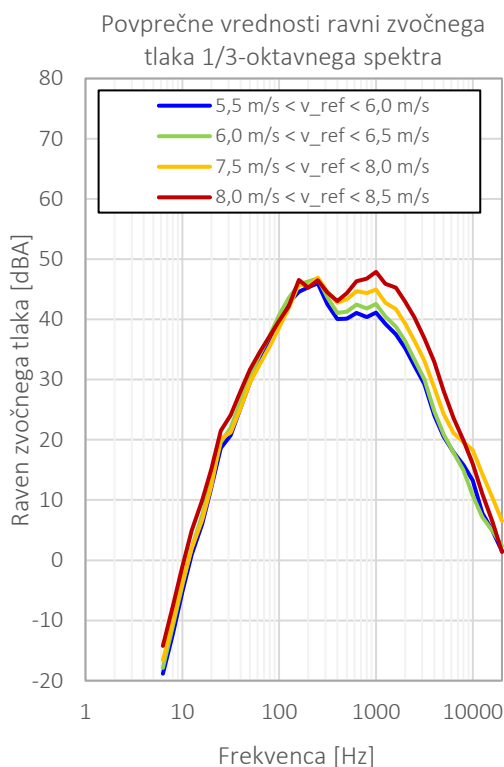
Frekvenčni spektri 1/3-oktave za izbrane minutne posnetke so prikazani na Sliki 34 in Sliki 35. Združeni so v dve skupini, po kriteriju referenčnih hitrosti vetra in sicer za območje od 5,5 m/s do 6,5 m/s (Slika 34) ter za območje od 7,5 m/s do 8,5 m/s (Slika 35). Opaziti je razlike v frekvenčnih spektrih posameznih minutnih obdobjih, kar potrjuje ugotovitve o velikem raztrosu vrednosti ravni zvočnega tlaka, prikazane v poglavju 5.1. Slika 36 prikazuje združene povprečne A utežene frekvenčne spektre 1/3-oktave znotraj vseh štirih območji referenčnih hitrosti vetra.



Slika 34: "A" uteženi frekvenčni spektri 1/3-oktave za (A) Referenčno hitrost vetra od 5,5 m/s do 6,0 m/s ter (B) Referenčno hitrost vetra od 6,0 m/s ter 6,5 m/s.



Slika 35: "A" uteženi frekvenčni spektri 1/3-oktave za A) Referenčno hitrost vetra od 7,5 m/s do 8,0 m/s ter B) Referenčno hitrost vetra od 8,0 m/s ter 8,5 m/s.



Slika 36: Povprečni "A" uteženi frekvenčni spektri 1/3-oktave za referenčne vrednosti hitrosti vetra. Iz izmerjenih spektrov hrupa VE, ki so bili izmerjeni ob izbrani hitrosti vetra, lahko izračunamo njihovo energijsko povprečje in izvedemo korekcije hrupa ozadja, korekcije zaradi hrupa vetra ob kupoli in korekcijo atenuacije zvoka skozi kupolo (Enačba 23). Tako dobimo skupno raven hrupa na merilnem mestu, kot je prikazano za izmerjene vrednosti v Preglednici 13.

$$L_{A,ref,k} = L_{pA,izmerjena} - L_{p.veter\ kupola} + L_{p.korekcija\ kupola} \quad \text{En. 23}$$

Preglednica 13: Povprečne izmerjene vrednosti ravni hrupa za obe območji referenčne hitrosti vetra.

Hitrost vetra	5,5 m/s < v_{ref} < 6,5 m/s	7,5 m/s < v_{ref} < 8,5 m/s
$L_{A,ref,k}$	55,9 dBA	58,5 dBA

Zvočno moč VE za posamezne razrede hitrosti vetra izračunamo po Enačbi 8. Rezultati so prikazani v Preglednici 14:

Preglednica 14: Izračunana zvočna moč VEDV 15 iz povprečnih izmerjenih vrednosti ravni hrupa za obe območji referenčne hitrosti vetra.

Hitrost vetra	5,5 m/s < v_{ref} < 6,5 m/s	7,5 m/s < v_{ref} < 8,5 m/s
$L_{WA,ref}$	105,3 dBA	107,9 dBA

Rezultate meritev zvočne moči v preglednici 14, ki so pridobljeni na osnovi kratkotrajnih meritev izbranih iz nabora 22000 meritev, lahko primerjamo z rezultati meritev, ki smo jih pridobili s povprečenjem izračunov korelacij med hitrostjo vetra in zvočno močjo, podanih v preglednici 8. Na osnovi metode s povprečenjem korelacij lahko ugotovimo da je razlika med zvočno močjo VE pri hitrosti vetra 5.5 m/s in pri hitrosti vetra 6.5 m/s enaka 3 dB. Razlika zvočne moči pri hitrosti 7.5 m/s in pri hitrosti 8.5 m/s pa znaša 2.4 dB.

Prav tako lahko ugotovimo da je zvočna moč iz kratkotrajnih meritev najbližje zvočni moči na osnovi povprečenja korelacij za zgornjo vrednost intervala hitrosti. Razlika med kratkotrajnimi meritvami zvočne moči in meritvami s povprečenjem korelacij tako znaša 2,3 dB za interval hitrosti vetra od 5.5 m/s do 6.5 m/s in 0,5 dB za interval hitrosti vetra od 7.5 m/s do 8.5 m/s.

6 REZULTATI OCEN RAVNI HRUPA NA POLJUBNI RAZDALJI IN V NAJBLIŽJIH VAROVANIH OBJEKTIH

Najbližji varovani objekti (VO) se nahajajo 861, 884 in 899 m od temelja VE, kot je prikazano na sliki 37 spodaj. Z izračuni smo preverili kakšne so ravni hrupa v prostem polju na razdaljah 700, 800 in 900m od VE za dva hitrostna intervala: od 5,5 do 6,5 m/s in od 7,5 do 8,5 m/s. Zvočno raven se lahko izračuna za spodnjo hitrost intervala, in s tem avtomatično dobi nižje vrednosti. Pri prvem načinu določanja zvočne moči VE kot funkcije hitrosti vetra smo uporabili interpolacijo večjega števila izbranih meritev ravni hrupa ob različnih hitrostih vetra, tako da smo iz meritev izluščili aproksimacijsko funkcijo s katero napovemo raven zvočne moči za hitrost vetra znotraj območja od 4m/s do 8,5 m/s



Slika 37: Oddaljenost najbližjih varovanih objektov od VEDV 15.

6.1 Rezultati glede na povprečenje po strokovni oceni dolotrajnih kontinuiranih meritev

Korekcije v 1/3-oktavnem spektru niso podane korektno za vsa frekvenčna območja. Korekcije za nizke frekvence so podane od 10 Hz naprej. Pri terčnih pasovih 6,3 Hz in 8 Hz smo dodali 6 dB, ker je evidentno da korekcija upošteva odboj od tal in posledično povečanje ravni zaradi tega odboja. Rezultati časovnih območij, ki zadostujejo pogoju referenčne hitrosti vetra so prikazana v Preglednicah 15, 16 in 17.

Preglednica 15: Rezultati ocen ravni hrupa po ekspertni oceni 1. časovnega intervala integracije.

Referenčna hitrost vetra [m/s]	LP [dBA] (700 m)	LNF [dBA] (700 m)	LP [dBA] (800 m)	LNF [dBA] (800 m)	LP [dBA] (900 m)	LNF [dBA] (900 m)	LP [dBA] Polje VE	LNF [dBA] Polje VE
5,5 – 6,5	38	12	37	11	36	10	42	16
7,5 – 8,5	39	11	38	10	36	9	43	15

Preglednica 16: Rezultati ocen ravni hrupa po ekspertni oceni 2. časovnega intervala integracije.

Referenčna hitrost vetra [m/s]	LP [dBA] (700 m)	LNF [dBA] (700 m)	LP [dBA] (800 m)	LNF [dBA] (800 m)	LP [dBA] (900 m)	LNF [dBA] (900 m)	LP [dBA] Polje VE	LNF [dBA] Polje VE
5,5 – 6,5	38	12	37	11	36	10	42	16
7,5 – 8,5	40	12	38	10	37	9	43	15

Preglednica 17: Rezultati ocen ravni hrupa po ekspertni oceni 3. časovnega intervala integracije.

Referenčna hitrost vetra [m/s]	LP [dBA] (700 m)	LNF [dBA] (700 m)	LP [dBA] (800 m)	LNF [dBA] (800 m)	LP [dBA] (900 m)	LNF [dBA] (900 m)	LP [dBA] Polje VE	LNF [dBA] Polje VE
5,5 – 6,5	38	12	37	11	35	10	42	16
7,5 – 8,5	40	12	38	11	37	10	43	16

6.2 Rezultati kratkotrajnih meritev po minutnih intervalih, ki ustrezajo zahtevam standarda/smernice

Rezultati izračunov ocen ravni hrupa na razdaljah 700 m, 800 m in 900 m na podlagi kratkotrajnih meritev (minutnih posnetkov, izbranih glede na referenčno hitrost vetra, skladno s smernicami) so prikazani v Preglednici 18.

Preglednica 18: Rezultati ocen ravni hrupa na osnovi minutnih intervalov.

Referenčna hitrost vetra [m/s]	LP [dBA] (700 m)	LNF [dBA] (700 m)	LP [dBA] (800 m)	LNF [dBA] (800 m)	LP [dBA] (900 m)	LNF [dBA] (900 m)	LP [dBA] Polje VE	LNF [dBA] Polje VE
5,5 – 6,5	37,6	12,3	36,3	11,2	35,1	10,1	41,2	16,1
7,5 – 8,5	39,5	12,3	38,2	11,1	36,9	10,1	43,1	16,1

7 ROBUSTNOST METODE IZ PRIMERJAVE DVEH PRISTOPOV

7.1.1 Primerjava zvočnih moči

Primerjava izračunanih zvočnih moči VE VEDV 15 je prikazana v Preglednici 19. Za območje referenčne hitrosti vetra od 5,5 do 6,5 m/s vidimo, da je maksimalna razlika v zvočni moči VE med posameznimi metodami 3,1 dBA, pri referenčni hitrosti vetra od 7,5 do 8,5 m/s pa 0,8 dBA. Pri kratkotrajnih meritvah, kjer je na podlagi strokovne izbire minutnega posnetka hrupa VE, je izračunana raven zvočne moči višja, ker so izbrana časovna obdobja predstavljala tiste primere, kjer je razmerje signal-šum bilo največje in je bila slišnost hrupa VE najbolj očitna. Posledično so izbrani intervali predstavljali obdobja, kjer je bil prisoten samo hrup VE in kjer je hkrati bil tudi dominanten do te mere, da je preglasil residualne vire hrupa, ki so se pojavljali na v bližini merilnega mesta. Pri višjih referenčnih hitrostih vetra je zato razlika med izračunanimi ravnmi zvočne moči VE manjša, ker je tudi pri dolgotrajnih kontinuiranih meritvah razmerje signal-šum izbranih časovnih obdobj večje oziroma primerljivo z obdobji, izbranimi pri kratkotrajnih meritvah. Znotraj posameznih območji referenčnih hitrosti vetra prihaja do velikega raztrosa izmerjenih ravni hrupa, pa čeprav je razpon območja hitrosti vetra samo 1 m/s. Raztrosi so še bolj očitni pri nižjih referenčnih hitrostih vetra, t.j. od 5,5 m/s do 6,5 m/s. Iz Preglednice 19 lahko razberemo, da se ravni zvočne moči VE kratkotrajnih meritev ujemajo z maksimalnimi vrednostmi zvočnih moči dolgotrajnih meritev za obe območji referenčnih hitrosti vetra.

Preglednica 19: Primerjava izračunov zvočnih moči VE VEDV15.

Referenčna hitrost vetra [m/s]	Povprečenje po strokovni oceni dolgotrajnih kontinuiranih meritev		KRATKOTRAJNE MERITVE
	Raven zvočne moči VE Z metodo interpolacije totalnih ravni kot funkcije v_{ref} [dBA]	Raven zvočne moči VE Z metodo analize spektrov hrupa kot funkcije v_{ref} [dBA]	Raven zvočne moči VE Z metodo analize kratkotrajnih meritev, ki so izbrane po kriterijih standarda [dBA]
5,5	101 (100,7)	100 (100,0)	105,3
6	102 (102,1)	102 (101,6)	
6,5	103 (103,4)	103 (103,0)	
7	105 (104,7)	104 (104,4)	/
7,5	106 (105,9)	106 (105,8)	107,9
8	107 (106,9)	107 (107,1)	
8,5	108 (108,1)	108 (108,4)	

7.1.2 Primerjava ocene ravni hrupa na izbrani razdalji

Primerjava ocene ravni hrupa na izbranih razdaljah (700 m, 800m in 900m) ter v primeru polja VE med kratkotrajnimi meritvami in dolgotrajnimi meritvami razkriva minimalne razlike (do 1 dBA). Primerjava je prikazana v Preglednici 20.

Preglednica 20: Primerjava ocene ravni hrupa na izbrani razdalji.

Metoda	Referenčna hitrost vetra [m/s]	LP [dBA] (700 m)	LNF [dBA] (700 m)	LP [dBA] (800 m)	LNF [dBA] (800 m)	LP [dBA] (900 m)	LNF [dBA] (900 m)	LP [dBA] Polje VE	LNF [dBA] Polje VE
Dolgotrajne meritve (Časovni intervali: 1 do 3)	5,5 – 6,5	38	12	37	11	35-36	10	42	16
	7,5 – 8,5	39-40	11-12	38	10-11	36-37	9-10	43	15-16
Kratkotrajne meritve	5,5 – 6,5	37,6	12,3	36,3	11,2	35,1	10,1	41,2	16,1
	7,5 – 8,5	39,5	12,3	38,2	11,1	36,9	10,1	43,1	16,1

7.1.3 Primerjava ocene nizkofrekvenčnih ravni hrupa v varovanih objektih

Primerjava ocene nizkofrekvenčnih ravni hrupa v VO med kratkotrajnimi meritvami in dolgotrajnimi meritvami razkriva minimalne razlike (do 1 dBA). Primerjava je prikazana v Preglednici 21.

Preglednica 21: Primerjava ocene ravni v varovanih objektih.

Metoda	Referenčna hitrost vetra [m/s]	LNF [dBA] (700 m)	LNF [dBA] (800 m)	LNF [dBA] (900 m)	LNF [dBA] Polje VE
Dolgotrajne meritve (Časovni intervali: 1 do 3)	5,5 – 6,5	12	11	10	16
	7,5 – 8,5	11-12	10-11	9-10	15-16
Kratkotrajne meritve	5,5 – 6,5	12,3	11,2	10,1	16,1
	7,5 – 8,5	12,3	11,1	10,1	16,1

8 AMPLITUDNA MODULACIJA

8.1 Osnove

Pri amplitudni modulaciji nas zanimajo časovne variacije hrupa. Variacije zvočnega signala so lahko slučajne ali pa periodične odvisno od faktorjev, ki vplivajo na modulacijo zvoka. Pri vetrni elektrarni nas predvsem zanimajo periodične variacije jakosti zvoka, ki so povezane s frekvenco vrtenja vetrne turbine oziroma rotorja, ki se pri večjih turbinah (med 0.5 in 3 MW) giblje okoli 1 Hz.

V bližini turbine (na oddaljenosti par 100 m) lahko zaznamo tudi zvok, ki mu pravimo 'švistanje' v frekvenčnem območju med 400 in 1000 Hz. Švistanja na večjih oddaljenostih ne zaznamo zaradi večjega slabljenja zvoka v atmosferi in tleh v tem frekvenčnem območju.

Amplitudna modulacija je bolj pomembna, če je prisotna pri nižjih frekvencah. Nizkofrekvenčno amplitudna modulacija lahko nastane zaradi zastožnih vrtincev, zaradi interference zvočnih valov, ki izvirajo iz posameznih rotirajočih lopatic, zaradi periodičnih variacij hrupa, ki izvira iz zobnikov, ki se nahaja v osi rotorja ali pa zaradi interakcije med lopatico in stolpom vetrne elektrarne. Če se amplitudna modulacija zgodi v nizkofrekvenčnem območju, potem se večinoma opisuje kot 'rumbling noise'. Pojav amplitudne modulacije je odvisen od meteoroloških pogojev, zaznavanje amplitudne modulacije pa lahko traja od nekaj sekund do nekaj ur.

8.2 Meritve in analiza amplitudne modulacije

Poznamo več metod s katerimi lahko objektivno ocenimo variabilnost signala in pojava amplitudne modulacije. V sklopu analize smo preskusili delovanje naslednjih metod:

- **Metoda DAM.** Metoda temelji na razliki (ΔL_A) med A vrednotenima ravnema hrupa izmerjenima z dinamiko fast (LAF) in slow (LAS). Obe ravni je potrebno sinhronizirati v času, zato je potrebno uporabiti eksponentno povprečenje. Časovna resolucija izračuna naj bi znašala med 10 ms in 25 ms. Na podlagi kumulativne porazdelitve razlike ΔL_A se določi 5 in 95 percentil porazdelitve $\Delta L_{A,5}$ in $\Delta L_{A,95}$. Prisotnost

amplitudne modulacije se ugotovi na podlagi stopnje amplitudne variacije D_{AM} z Enačbo 24:

$$D_{AM} = \Delta L_{A,5} - \Delta L_{A,95} \quad \text{En. 24}$$

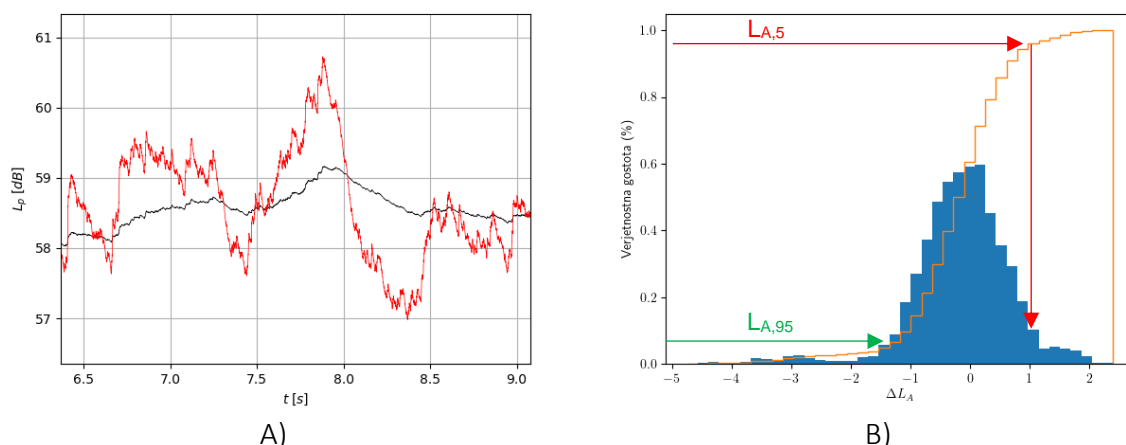
V primeru, da je $D_{AM} > 2$ dB se šteje, da je amplitudna modulacija prisotna.

- **Ugotavljanje amplitudne modulacije z uporabo Hilbertove transformacije.** Pri tej metodi signal najprej filtriramo s širokopasovnim terčnim frekvenčnim filtrom. Ovojnico filtriranega signala nato izračunamo z uporabo Hilbertove transformacije v časovni domeni. Nato ovojnico analiziramo z uporabo hitre Fourierjeve transformacije. V primeru prisotnosti amplitudne modulacije lahko v spektru ovojnice najdemo vrhove, ki ustrezajo frekvenci modulacije, ki je povezana s frekvenco vrtenja rotorja vetrne turbine pomnoženo s številom lopatic.
- **Ugotavljanje amplitudne modulacije na podlagi matematičnega modela amplitudne modulacije.** Pri tej metodi signal najprej filtriramo s širokopasovnim terčnim frekvenčnim filtrom. Filtriran signal analiziramo v časovni domeni tako, da ga primerjamo z matematičnim modelom amplitudne modulacije (Enačba 25):

$$p = (1 + m \cdot \cos(2\pi f_m t)) \cdot A \cdot \sin(2\pi f_c t + \varphi) \quad \text{En. 25}$$

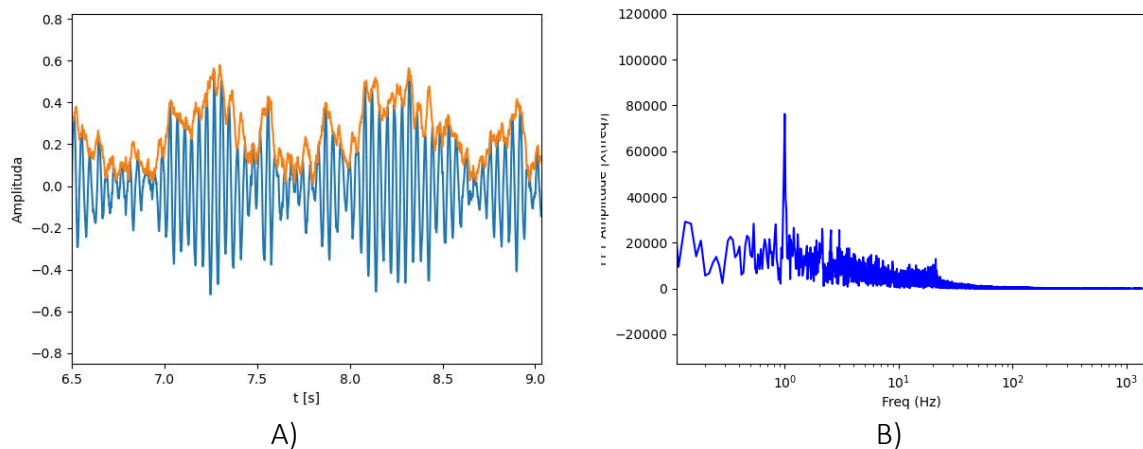
Kjer je f_c centralna frekvenca terčnega filtra, f_m je frekvenca modulacije, m je modulacijsko število.

Kot primer signala, kjer je prisotna amplitudna modulacija si lahko pogledamo signal, ki je bil posnet dne 08.09.2023 ob 7:25 uri (Slika 38).

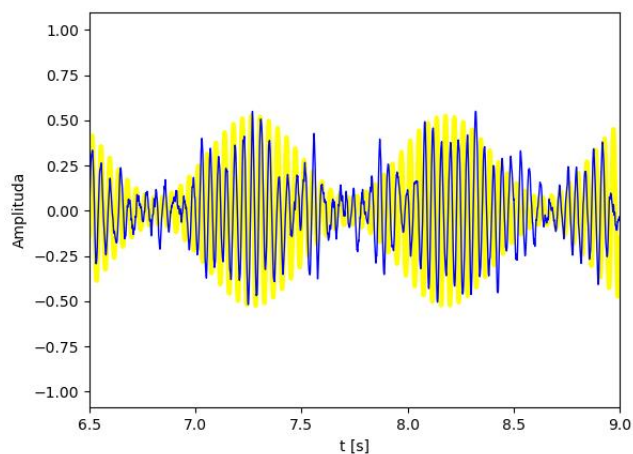


Slika 38: A) Izmerjene ravni hrupa L_A izračunane z dinamiko fast (rdeča črta) in slow (črna črta), B) Porazdelitev razlik ΔL_A .

Na podlagi razlik $L_{A,5} = 1.024$ dB, $L_{A,95} = -1.343$ dB lahko z Enačbo 22 izračunamo $D_{AM} = 2.368$ dB, kar potrjuje prisotnost modulacije. Frekvenca modulacije je razvidna na Sliki 39. Izmerjen signal se očitno ujema z matematičnim modelom, kar potrjuje prisotnost amplitudne modulacije (Slika 40).



Slika 39: A) Izmerjen signal (modra barva) znotraj terčnega frekvenčnega pasu s frekvenco 25 Hz in ovojnica signala (oranžna barva) izračunana s Hilbertovo transformacijo. B) Frekvenčna analiza ovojnice z vrhom pri 1.05 Hz, kar pomeni, da je signal moduliran s periodo 1 Hz.



Slika 40: Izmerjen signal (modra barva) znotraj terčnega pasu s srednjo frekvenco $f_c = 25$ Hz in matematičen model (rumena barva) s parametri $m = 0.75$, $f_m = 1.05$ Hz, $A = 0.3$, $\varphi = 1.9\pi$.

8.3 Ugotovitve analize amplitudne modulacije

Emisijske meritve hrupa v bližini vetrne elektrarne potrjujejo občasno prisotnost amplitudne modulacije nizkofrekvenčnega hrupa. Frekvenca modulacij znaša okoli 1 Hz, kar je verjetno povezano z obratovanjem vetrnice oziroma njeno vrtilno frekvenco pomnoženo s številom lopatic, kar bi lahko potrdili s podatki o vrtilni frekvenci vetrnice, ki bi jih lahko podal lastnik vetrnice.

V primeru prisotnosti amplitudne modulacije na emisijskem mestu v bližini elektrarne je njihovo prisotnost potrebno preveriti tudi na imisijskem mestu pred izpostavljenimi objekti z varovanimi prostori z ustrežno metodo.

9 ZAKLJUČKI

V tej študiji je skladno s projektno nalogo podana analiza metode merjenja hrupa vetrnih elektrarn po Danski uredbi. Analiza podaja izmerjeno zvočno moč VE, oceno ravni hrupa pred najbolj izpostavljenost stavbo z varovanimi prostori in oceno nizkofrekvenčnega hrupa v stavbah z varovanimi prostori. Ocenjene ravni hrupa VE so podane ločeno za hitrosti vetra v intervalu od 5,5 m/s do 6,5 m/s in za hitrosti vetra v intervalu od 7,5 m/s do 8,5 m/s, kot to predvideva metoda po Danski uredbi. Ocenjevanje ravni hrupa je bilo narejeno tudi za primer polja treh enakih vetrnih elektrarn.

Emisijske meritve "A" vrednotene ravni zvočne moči so bile izvedene na VE VEDV 15 pri Dolenji vasi od 05.09.2023 (12:03) do 22.09.2023 (6:58). Izbrano merilno mesto se je nahajalo na razdalji 134 m zahodno od VE VEDV 15. Kalibriran merilni mikrofonski je bil pritrjen na odbojno podlago z dvojno protivetrno zaščito. Preko kabla je bil povezan s kalibriranim merilnikom zvoka NOR 140, ki je v realnem času izračunaval terčne spektre in L_{Aeq} ter jih shranjeval na SD spominsko kartico, kamor je shranjeval tudi izvorni zvočni signal s frekvenco vzorčenja 48000 Hz in 24-bitno amplitudno resolucijo.

Določanje referenčnih hitrosti vetra je bilo opravljeno na podlagi meritev hitrosti in smeri vetra, ki smo jih pridobili z anemometrom na višini 5,5 m ob upoštevanju hrapavosti terena. To so bili edini meteorološki podatki, saj hitrosti in smeri vetra iz anemometra vgrajenega v turbino vetrne elektrarne VEDV 15 s strani upravljavca nismo prejeli.

Za izračun zvočne moči smo uporabili izmerjeno in korigirano raven zvočnega tlaka L_{Aeq} . Pri korekcijah smo upoštevali hrup ozadja, residualni hrup in vpliv dvoslojne protivetrne zaščite mikrofona. Korekcijo zaradi prisotnosti poudarjenih tonov smo ugotavljali na podlagi ozkopasovne FFT analize izvirnega zvočnega signala, vendar se je izkazalo da pod danimi pogoji okolja in obratovanja VE ni bila potrebna.

Iz izmerjenih ravni zvočne moči L_w smo nato ocenili "A" vrednotene ravni zvočnega tlaka L_{Aeq} pred stavbami oziroma ocenili ravni nizkofrekvenčnega hrupa L_{NF} v stavbah z varovanimi prostori. Ocene so bile narejene za primere treh razdalj od VE do objektov, na 700 m, 800 m in 900 m. Izračune smo ponovili še za primer polja treh enakih vetrnih elektrarn.

Analizo meritev zvočne moči smo izvedli na podlagi kratkotrajnih in dolgotrajnih meritev, ki so pokazale sprejemljivo ujemanje znotraj 3 dBA za obe območji hitrosti vetra, kar kaže na zadovoljivo robustnost metode merjenja hrupa vetrnih elektrarn po metodi v Danski uredbi.

V sklopu meritev in analiz smo prišli še do naslednjih ugotovitev in priporočil za modifikacijo in dopolnitev Danske uredbe:

- Prvi del Danske uredbe je namenjen določanju zvočne moči L_w vetrnih elektrarn. Je časovno intenziven. Drugi del predvideva izračune ravni hrupa L_{Aeq} na objektu in v objektu L_{NF} , ki temeljijo na zvočni moči. Te izračune lahko uporabimo za potrebe napovedovanja hrupa. pri tem pa bi lahko uporabili podatke o zvočni moči VE, podane s strani proizvajalca.

- V kolikor imamo na voljo podatke o zvočni moči VE s strani proizvajalca jih lahko uporabimo za potrebe napovedovanja hrupa. Uporabili bi lahko tudi empirične modele za ocenjevanje zvočne moči VE na osnovi njene velikosti, vrtljajev, moči in statistike hitrosti vetra. Prvega dela metode opisane v Danski uredbi torej ni nujno potrebno izvajati.
- Modeliranje hrupa VE ni enostavno, saj zaradi velikosti vetrnice prehajamo iz njenega bližnjega polja (do skupne višine = višina stebra + dolžina lopatice) v daljno polje (razdalja večja od 3-kratnika skupne višine). Zato je modeliranje potrebno izvesti specifično z vetrnico kot krožnim virom hrupa. Krožni vir je sestavljen iz točkovnih virov po vrhu lopatice in dodatnim linijskim virom, ki se nahaja na stebru, kjer ga obletava lopatica.
- Na podlagi izkušenj ocenjujemo da se zvočne moči VE ne more določiti samo na osnovi kratkotrajnih meritev, saj je zahtevane pogoje okolja ob omejitvah terena težko ujeti. Zaradi tega ocenjujemo da je potrebno izvajati meritve v trajanju najmanj nekaj dni, iz česar sledi velika količina podatkov. Pri tem izbira časovnih intervalov meritev lahko povečuje negotovost rezultatov.
- Metoda upošteva le negotovost izračuna, zanemari pa merilno negotovost ravni zvočne moči na podlagi meritev ravni zvočnega tlaka v bližini vetrne elektrarne. Rezultati opravljenih meritev kažejo na pomemben raztros izmerjenih vrednosti akustičnih značilk in meteoroloških spremenljivk.
- Metoda zanemarija vpliv preostalih virov hrupa VE, vključno s hrupom transformatorske postaje in hrupom elektromotorja za premikanje rotorja glede na smer vetra.
- Metoda ne predvideva analize in vpliva pojava amplitudne modulacije.
- Metodologija ocenjevanja tonske korekcije se mora poenostaviti. Metoda nizkofrekvenčni hrup obravnava na podlagi "A" vrednotene ravni hrupa in s tem vpliva na prispevek morebitnih nizkofrekvenčnih tonov.
- Metoda ne upošteva obstoječih ravni hrupa na imisijskih mestih pred izpostavljenimi objekti, ki so nujne pri določanju pogojev in omejitev, ki jih je potrebno v zvezi s hrupom upoštevati pri umeščanju vetrnih elektrarn v prostor.
- Definirati je potrebno postopke za določanje hrupa ozadja, ki se mora meriti pod enakimi pogoji kot so pogoji v katerih obratuje VE, to je v intervalu hitrosti vetra od 5,5 m/s do 6,5 m/s in v intervalu hitrosti vetra od 7,5 m/s do 8,5 m/s.
- Podajanje rezultatov v intervalu hitrosti vetra 5,5 m/s do 6,5 m/s lahko rezultira v razliki izmerjenih vrednostih zvočne moči 3 dBA med $L_w(5,5\text{m/s})$ in $L_w(6,5\text{m/s})$ oziroma razliko 2,4 dBA med $L_w(7,5\text{m/s})$ in $L_w(8,5\text{m/s})$. Zaradi tega bi bilo smiselno natančneje definirati povezavo med ravno zvočne moči L_w in hitrostjo vetra v_{ref} .

ANEX 1: Davy, John L., Kym Burgemeister, and David Hillman. "Wind turbine sound limits: Current status and recommendations based on mitigating noise annoyance." Applied acoustics 140 (2018): 288-295.

STANDARD	QUANTITY	AREA	TIME	BACKGROUND	LIMIT
ETSU-R-97England	LA90(10min)	No financial Involvement	Day	≤30 to 35 dB	35 to 40 dB
ETSU-R-97 England	LA90(10min)	No financial Involvement	Day	>30 to 35 dB	BKGND+5 dB
ETSU-R-97 England	LA90(10min)	No financial Involvement	Night	≤38 dB	43 dB
ETSU-R-97 England	LA90(10min)	No financial Involvement	Night	>38 dB	BKGND+5 dB
ETSU-R-97 England	LA90(10min)	Financial Involvement	Any	≤40 dB	45 dB
ETSU-R-97 England	LA90(10min)	Financial Involvement	Any	>40 dB	BKGND+5 dB
VIC NZS 6808:1998	LA95(10min)	Any	Any	≤35 dB (LA95)	40 dB
VIC NZS 6808:1998	LA95(10min)	Any	Any	>35 dB(LA95)	BKGND+5 dB
SA EPA 2003	LAeq(10min): Prediction LA90(10min): Measurement	Any	Any	≤30 dB	35 dB
SA EPA 2003	LAeq(10min): Prediction LA90(10min): Measurement	Any	Any	>30 dB	BKGND+5 dB
WA 2004	LAeq(10min)	Any	Any	≤30 dB	35 dB
WA 2004	LAeq(10min)	Any	Any	>30 dB	BKGND+5 dB
SA EPA 2009	LAeq(10min): Prediction LA90(10min): Measurement	Standard	Any	≤35 dB	40 dB
SA EPA 2009	LAeq(10min): Prediction LA90(10min): Measurement	Standard	Any	>35 dB	BKGND+5 dB
SA EPA 2009	LAeq(10min): Prediction LA90(10min): Measurement	Rural Living	Any	≤30 dB	35 dB
SA EPA 2009	LAeq(10min): Prediction LA90(10min): Measurement	Rural Living	Any	>30 dB	BKGND+5 dB
VIC NZS 6808:2010	LA90(10min)	Standard	Any	≤35 dB	40 dB
VIC NZS 6808:2010	LA90(10min)	Standard	Any	>35 dB	BKGND+5 dB
VIC NZS 6808:2010	LA90(10min)	High Amenity	Day	≤35 dB	40 dB
VIC NZS 6808:2010	LA90(10min)	High Amenity	Day	>35 dB	BKGND+5 dB
VIC NZS 6808:2010	LA90(10min)	High Amenity	Evening or Night less than 6 m/s	≤30 dB	35 dB
VIC NZS 6808:2010	LA90(10min)	High Amenity	Evening or Night less than 6 m/s	>30 dB	BKGND+5 dB
NSW Draft 2011	LAeq(10min) LA90(10min)+1.5 dB	Any	Day	≤30 dB	35 dB
NSW Draft 2011	LAeq(10min) LA90(10min)+1.5 dB	Any	Day	>30 dB	BKGND+5 dB
NSW Draft 2011	LAeq(10min) LA90(10min)+1.5 dB	Any	Night	≤30 dB	35 dB
NSW Draft 2011	LAeq(10min) LA90(10min)+1.5 dB	Any	Night	>30 dB	BKGND+5 dB
QLD 2016	LAeq Prediction	Non-host lot	Day and Evening	≤32 dB	37 dB
QLD 2016	LAeq Prediction	Non-host lot	Day and Evening	>32 dB	BKGND+5 dB
QLD 2016	LAeq Prediction	Non-host lot	Night	≤30 dB	35 dB
QLD 2016	LAeq Prediction	Non-host lot	Night	>30 dB	BKGND+5 dB
QLD 2016	LAeq Prediction	Host lot	Any	≤40 dB	45 dB
QLD 2016	LAeq Prediction	Host lot	Any	>40 dB	BKGND+5 dB
Demark	LAeq, 8 m/s@10m	Standard	Any	Any	44 dB
Demark	LAeq, 6 m/s@10m	Standard	Any	Any	42 dB
Demark	LAeq, 8 m/s@10m	Noise Sensitive	Any	Any	39 dB
Demark	LAeq, 6 m/s@10m	Noise Sensitive	Any	Any	37 dB
Canada, Ontario	LAeq (1hr)	Urban	Any	≤38 dB RefBG	45 dB
Canada, Ontario	LAeq (1hr)	Urban	Any	>38 dB RefBG	RefBG+7 dB
Canada, Ontario	LAeq (1hr)	Rural	Any	≤33 dB RefBG	40 dB
Canada, Ontario	LAeq (1hr)	Rural	Any	>33 dB RefBG	RefBG+7 dB
Sweden	LAeq, 8 m/s@10m	Standard	Any	Any	40 dB
Sweden	LAeq, 8 m/s@10m	Quiet	Any	Any	35 dB
Netherlands	LAden	Any	Any	Any	47 dB
Netherlands	LAeq	Any	Night	Any	41 dB

ANEX 2: PRIMERJAVA IZMERJENIH ZVOČNIH MOČI Z DEKLARIRANIMI ZVOČNIMI MOČMI

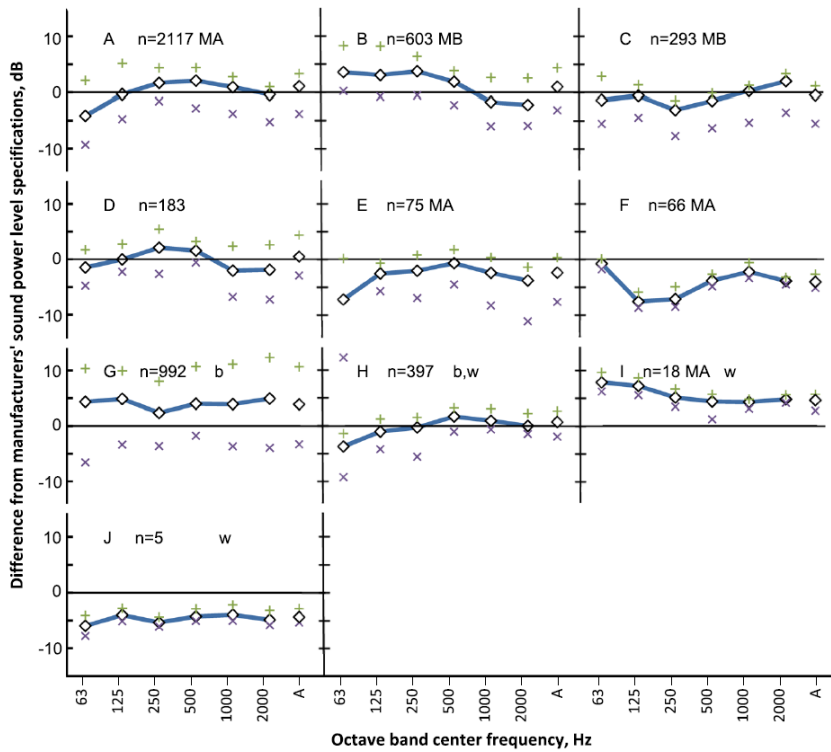


FIG. 3. (Color online) Measured sound power spectra minus manufacturers' data for 8 m/s wind speed. Values below the 0 line indicate the manufacturers' data is higher than the measured data. Crosses represent maximum and minimum values and the open diamonds are the energy average. Two manufacturers (labeled MA and MB) have multiple turbines represented in these data. The spectra are nominally sorted with the best quality data on the upper left. Indicators of reduced quality on the plots include: n, the number of measurements shown in each plot; w, the symbol indicating missing nacelle data for wind speed estimation for plots where it appears; and b, the symbol indicating unidentified ambient noise for plots where it appears.

10 REFERENCE

- [1] Abbott, J., Raspet, R., & Webster, J. (2015). Wind fence enclosures for infrasonic wind noise reduction. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137(3), 1265-1273.
- [2] Tachibana, H., H. Yano, and A. Fukushima. "Assessment of wind turbine noise in immission areas." *Fifth International Conference on Wind Turbine Noise*. 2013.
- [3] Bonsma, I., Gara, N., & McCabe, N. (2017). Insertion Loss and Wind-Induced Noise Results for Secondary Windscreens. *Canadian Acoustics*, 45(4), 24-25.
- [4] Keith, Stephen E., Gilles A. Daigle, and Michael R. Stinson. "Wind turbine low frequency and infrasound propagation and sound pressure level calculations at dwellings." *The Journal of the Acoustical Society of America* 144.2 (2018): 981-996.
- [5] Keith, Stephen E., et al. "Wind turbine sound power measurements." *The Journal of the Acoustical Society of America* 139.3 (2016): 1431-1435.
- [6] Boczar, Tomasz, et al. "Application of correlation analysis for assessment of infrasound signals emission by wind turbines." *Sensors* 20.23 (2020): 6891.
- [7] Calarco, Francesca, et al. "Acoustic and seismic emissions from wind turbines." (2017).
- [8] Rust, M., & Koch, C. (2023). Performance comparison of measurement microphones and microbarometers for sound pressure measurements near wind power plants. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 14613484231200852.
- [9] Blumendeller, E., Kimmig, I., Huber, G., Rettler, P., & Cheng, P. W. (2020, May). Investigations on low frequency noises of on-shore wind turbines. In *Acoustics* (Vol. 2, No. 2, p. 20). MDPI.
- [10] Hansen, K., Zajamsek, B., & Hansen, C. (2014). Identification of low frequency wind turbine noise using secondary windscreens of various geometries. *Noise Control Engineering Journal*, 62(2), 69-82.
- [11] Hessler, G. F., Hessler, D. M., & Bay, K. (2008). Experimental study to determine wind-induced noise and windscreen attenuation effects on microphone response for environmental wind turbine and other applications. *Noise Control Engineering Journal*, 56(4), 300-309.
- [12] Martens, S., Boas, M., Bohne, T., & Rolfes, R. (2019, October). Towards the use of secondary windscreens to improve wind turbine sound measurements. In *Proceedings of 15th EAWC PhD Seminar on Wind Energy, Nantes, France* (Vol. 610).
- [13] D'Amico, Sarah, Timothy Van Renterghem, and Dick Botteldooren. "Measuring infrasound outdoors with a focus on wind turbines: the benefits of a wind-shielding dome." *Applied Acoustics* 178 (2021): 108015.
- [14] Wszolek, T., Pawlik, P., Kłaczyński, M., Stępień, B., Mleczek, D., Małeck, P., & Rozwadowski, K. (2022). Experimental Verification of Windshields in the Measurement of Low Frequency Noise from Wind Turbines. *Energies*, 15(20), 7499.
- [15] Carman, R. A. (2015, August). Measurement procedure for wind turbine infrasound. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* (Vol. 250, No. 1, pp. 6143-6153). Institute of Noise Control Engineering.
- [16] Forssén, J., Schiff, M., Pedersen, E., & Waye, K. P. (2010). Wind turbine noise propagation over flat ground: Measurements and predictions. *Acta Acustica united with Acustica*, 96(4), 753-760.
- [17] Vick, B., & Clark, R. (2008, January). Using Rotor or Tip Speed in the Acoustical Analysis of Small Wind Turbines. In *46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* (p. 1334).

- [18] Raspet, R., Abbott, J. P., Webster, J., Yu, J., Talmadge, C., Alberts II, K., ... & Noble, J. (2019). New systems for wind noise reduction for infrasonic measurements. *Infrasound monitoring for atmospheric studies: challenges in middle atmosphere dynamics and societal benefits*, 91-124.
- [19] Abbott, J., & Raspet, R. (2013, June). Effect of scaling laws for noise reduction optimization of wind fences. In *Proceedings of Meetings on Acoustics* (Vol. 19, No. 1). AIP Publishing.
- [20] Webster, J., & Raspet, R. (2011, December). Wind noise reduction in infrasound and near-infrasound measurements. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 2011, pp. A31A-0046).
- [21] Jones, Z., Cook, M. R., Gee, K. L., Transtrum, M. K., Lympny, S. V., Calton, M. F., & James, M. M. (2020, December). Examining wind noise reduction effects of windscreens and microphone elevation in outdoor acoustical measurements. In *Proceedings of Meetings on Acoustics* (Vol. 42, No. 1). AIP Publishing.
- [22] Shams, Q. A., Zuckerwar, A. J., & Sealey, B. S. (2005). Compact nonporous windscreen for infrasonic measurements. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 118(3), 1335-1340.
- [23] https://www.gov.si/assets/ministrstva/MOPE/Okolje/Hrup/ocena_emisij_hrupa_veternih_elektrarn.pdf
- [24] Yu-Ting Wu, Fernando Port'e-Agel, Atmospheric Turbulence Effects on Wind-Turbine Wakes: An LES Study, *Energies* 2012, 5, 5340-5362; doi:10.3390/en5125340
- [25] Yasuaki Okada, et.al., Radiation characteristics of noise generated from a wind turbine, *Acoust. Sci. & Tech.* Vol.36(5), pp. 419-427, (2015)
- [26] Steven Cooper, Christopher Chan, Determination of Acoustic Compliance of Wind Farms, *Acoustics*, Vol.2, (2020), pp.416-450; doi:10.3390/acoustics2020024
- [27] Bo Lin, Liu Xiaofeng, He Xingxi, Measurement system for wind turbines noises assessment based on LabVIEW, *Measurement*, Vol.44, (2011), pp. 445-453
- [28] Sylvia BRONESKE, Wind turbine noise measurements - How are results influenced by different methods of deriving wind speed?, *InterNoise* 2014