

POBUDA ZA DRŽAVNI PROSTORSKI NAČRT ZA PARK VETRNIH ELEKTRARN SENOŽEŠKA BRDA

**SREČANJA S KRAJANI SENOŽEČ, DOLENJE VASI,
POTOČ IN LAŽ, november 2013**

**VPLIVI (NIZKOFREKVENČNEGA) HRUPA,
KI GA POVZROČA DELOVANJE VETRNIH
ELEKTRARN**

NEKAJ DEJSTEV O HRUPU (ZVOKU)

- **Zvók** v zraku je mehansko **vzdolžno valovanje** (stiskanje in redčenje zraka).
- Zvok lahko opredelimo s **frekvenco** in **amplitudo zvočnega tlaka**. Prva je povezana z **višino tona**, druga z **glasnostjo**.
- **Slišni zvok** je zvočno valovanje s frekvencami v slišnem območju človeškega **ušesa**, to je med 20 Hz in 20.000 Hz.
- Zvok z nižjimi frekvencami imenujemo **infrazvok**, z višjimi pa **ultrazvok**.
- Izmerjene vrednosti zvočnega tlaka izražamo v decibelih, raven zvočnega tlaka = $20 \log (p/p_0)$, kjer je $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$.
- Najtišji zvok ima amplitudo $20 \mu\text{Pa}$ (**mikropaskalov**) ali raven zvočnega pritiska je 0 dB (**decibelov**)



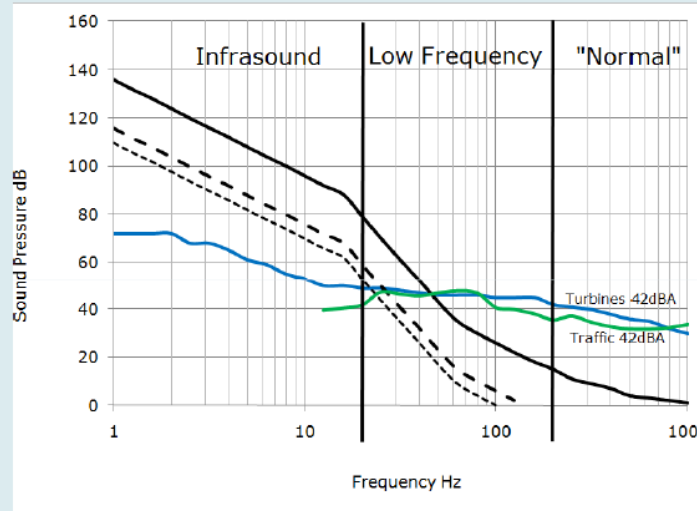
NEKAJ DEJSTEV O HRUPU VETRNIH ELEKTRARN

- Vetrne elektrarne so **vir hrupa**
- Vpliv hrupa vetrnih elektrarn na **počutje ljudi** je odvisen od:
 - **amplitude zvočnega valovanja** – praviloma se amplituda manjša z razdaljo od vetrne elektrarne
 - **frekvence valovanja in časovnega spreminjanja amplitude** – frekvenca valovanja hrupa je odvisna od načina nastanka hrupa
 - **načina zaznave hrupa v ušesu** – način zaznave in dožemanja slišnega zvoka (> 20 Hz) se razlikuje od zaznave infrazvoka



NASTANEK HRUPA VETRNIH ELEKTRARN

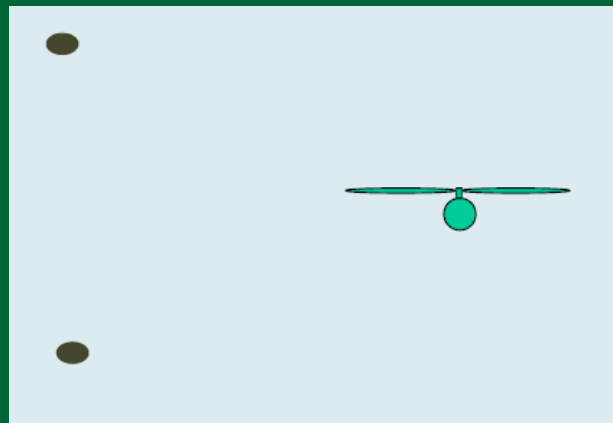
- **nastanek normalno slišnega hrupa** (od 200 do 3.000 Hz):
švistanje turbinskega krila (swish – aerodinamičen zvok)
- **nastanek nizko frekvenčnega hrupa** (od 125 do 250 Hz):
udarjanje turbinskega krila ob sloje nestabilnega zraka (thump)
- **nastanek infrazvočnega hrupa** (od 0,1 do 20 Hz):
udarjanje turbinskega krila v turbulentni tok zraka, ki običajno nastaja ob stebru vetrne elektrarne



NASTANEK NORMALNO SLIŠNEGA HRUPA

švistanje turbinskega krila (swish – aerodinamičen zvok) (od 200 do 3.000 Hz)

- hrup švistanja prihaja iz turbinskega krila, ko gre krilo preko vrha svoje trajektorije
- hrup švistanja se širi v smeri vetra desno
- na višini osi turbine in za vetrno turbino se hrupa švistanja ne sliši
- hrup švistanja je amplitudno moduliran
- jakost hrupa švistanja se zmanjšuje z razdaljo kot običajen hrup

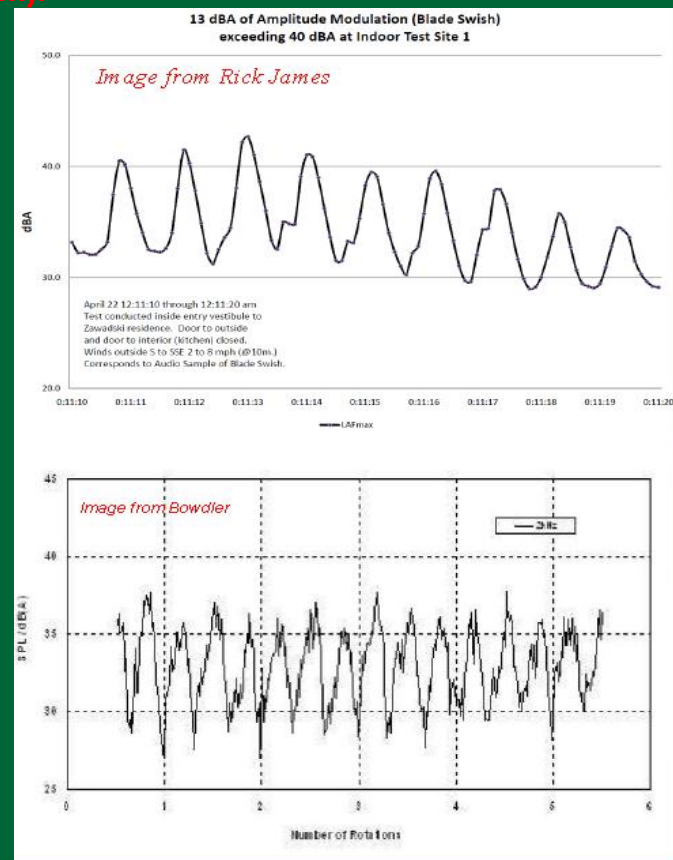
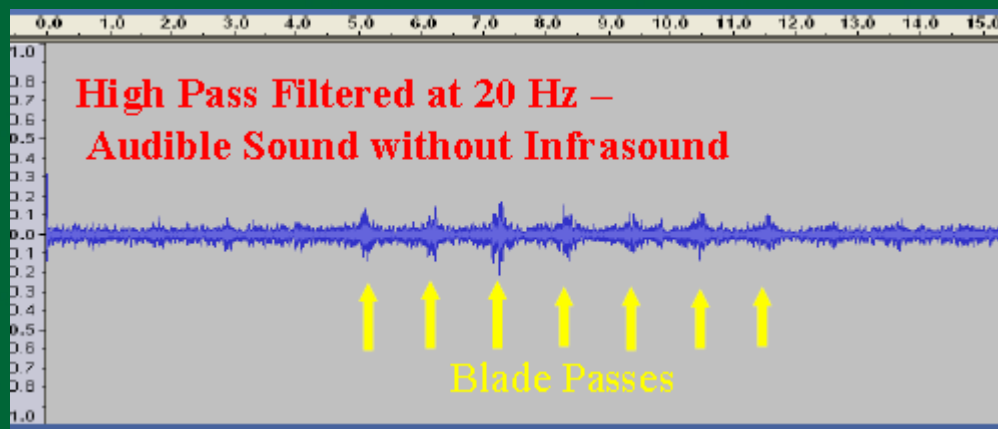


NASTANEK NORMALNO SLIŠNEGA HRUPA

švistanje turbinskega krila (swish – aerodinamičen zvok) (od 200 do 3.000 Hz)

- hrup švistanja je amplitudno moduliran “wuf-wuf”
- jakost hrupa švistanja se zmanjšuje z razdaljo kot običajen hrup

Hrup, izmerjen z merilnikom za vrednotenje ravni zvoka s filtrom A (infrazvok je izločen), je amplitudno moduliran. Ovojnica hrupa je v infrazvočnem frekvenčnem območju. Taka modulacija hrupa moti ljudi, če je le nihanje amplitude dovolj veliko (na krajših razdaljah do VE – do 350 m).



NASTANEK NIZKO FREKVENČNEGA HRUPA

udarjanje turbinskega krila ob sloje nestabilnega zraka (thump)
(od 125 do 250 Hz)

amplitudno moduliran hrup nastane, ko turbinsko krilo prehaja skozi zrak, kateremu se spreminja hitrost in smer (turbulenten zrak lahko nastane zaradi meteoroloških pogojev ali zaradi morfologije terena)

nizkofrekvenčni hrup se širi na levi in desni strani pod kotom 45°
v smeri vetra



NASTANEK INFRAZVOČNEGA HRUPA

udarjanje turbinskega krila v turbulentni tok zraka, ki običajno nastaja ob stebru vetrne elektrarne (od 0,1 do 20 Hz):

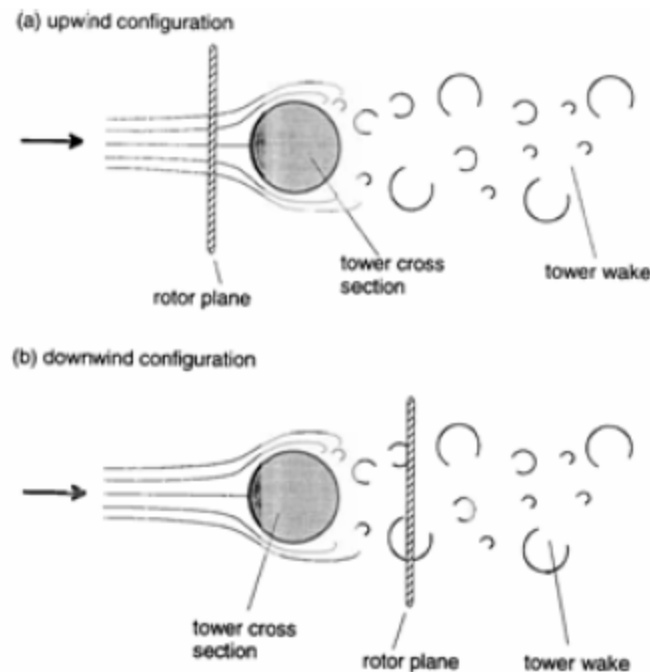


Figure 1 The disturbed flow behind the tower results in highly unsteady aerodynamic blade forces which in the final end is the main cause of low frequency noise (illustration from Wagner⁴).



NASTANEK INFRAZVOČNEGA HRUPA

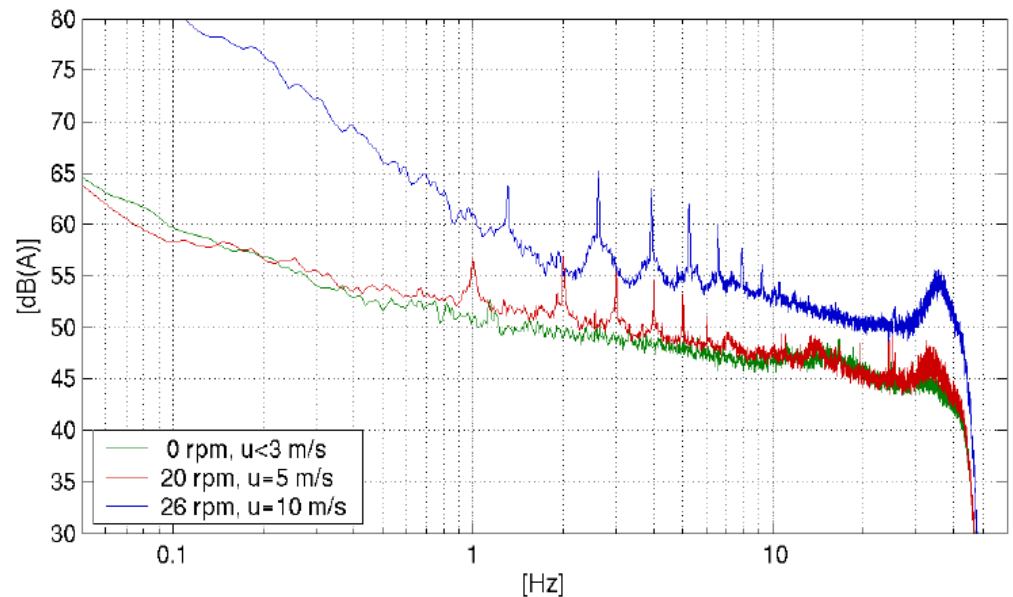
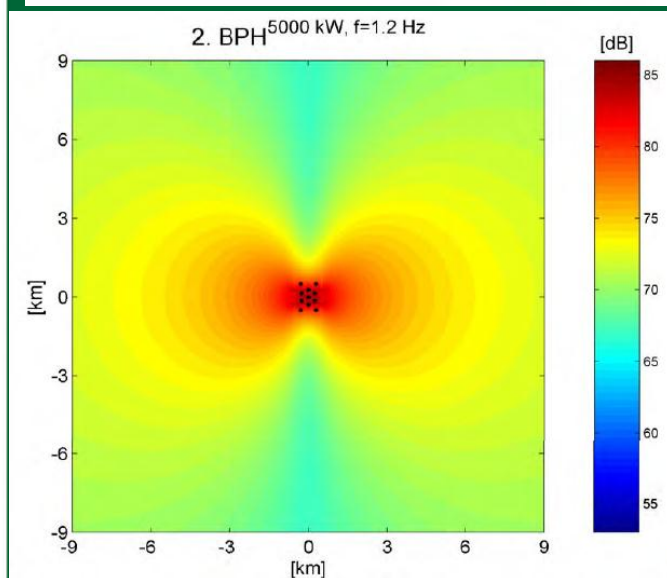
udarjanje turbinskega krila v turbulentni tok zraka, ki običajno nastaja ob stebru vetrne elektrarne (od 0,1 do 20 Hz):

Hubbard & Shepherd (1991, JASA)

$$P_n = \frac{k_n \sqrt{2}}{4\pi d} \sum_m \left(e^{im(\theta - \pi/2)} J_x(k_n R_e \sin \gamma) \right) \cdot \left(a_m^T \cos \gamma - \frac{nB - m}{k_n R_e} a_m^O \right)$$

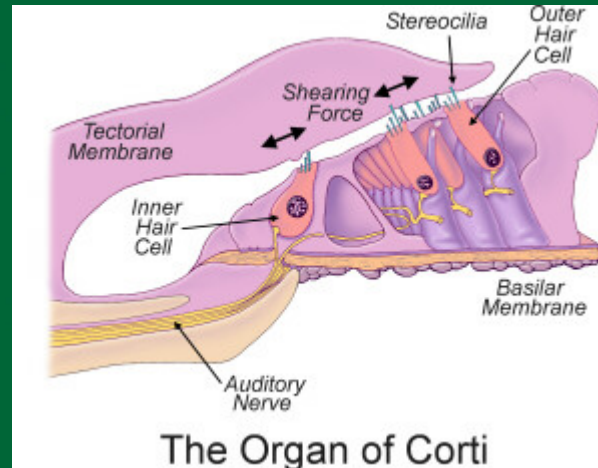
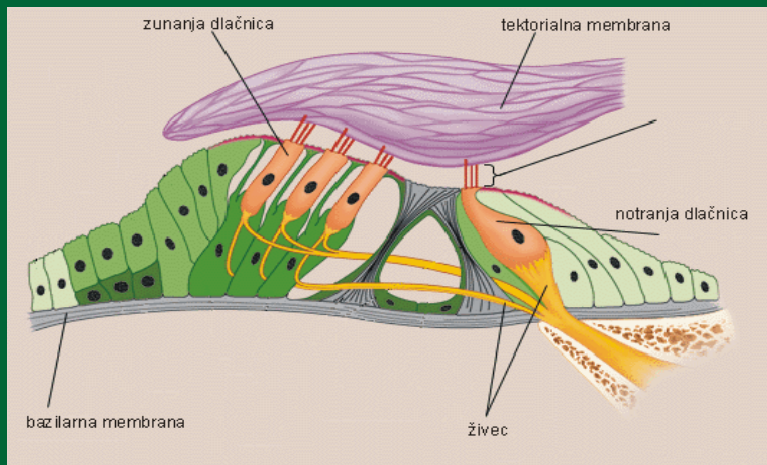
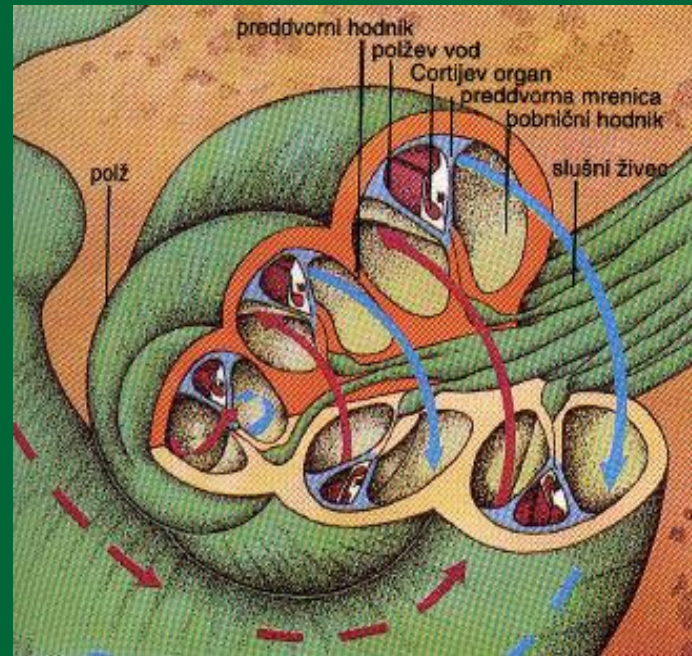
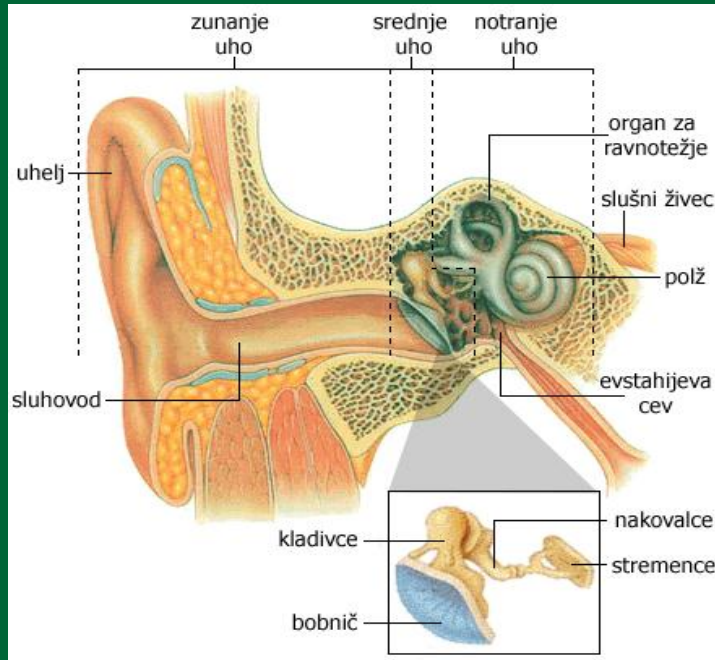
P_n – RMS sound pressure of the n-th harmonic
 n – sound pressure harmonic number
 $k_n = nB\omega/c$
 B – number of blades
 ω – rotor speed
 c_0 – sound speed
 R_e – effective blade radius

d – distance from the rotor
 m – blade loading harmonic index ($m = \dots, -1, 0, 1, \dots$)
 J_x – Bessel function of first kind and of order x
 γ – azimuth to listener
 θ – altitude angle to listener
 a_m^O – complex Fourier coefficients of thrust
 a_m^T – complex Fourier coefficients of torque



SLUH IN DLAČNICE (lasne celice)

- **POLŽ:** Napolnjen je s slušno tekočino in po dolžini z membranami razdeljen na prekate (bobnični in preddvorni kanal).



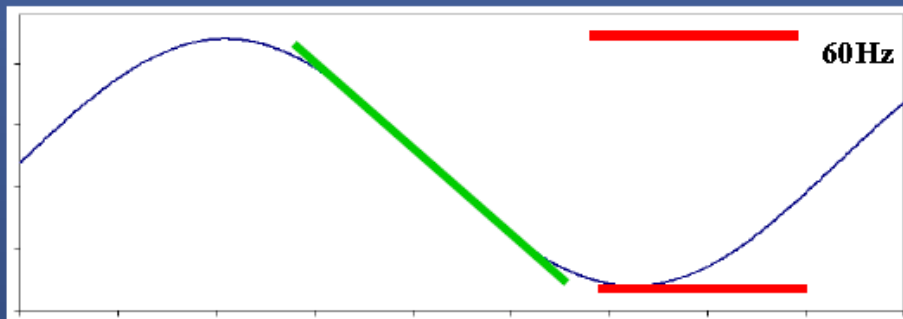
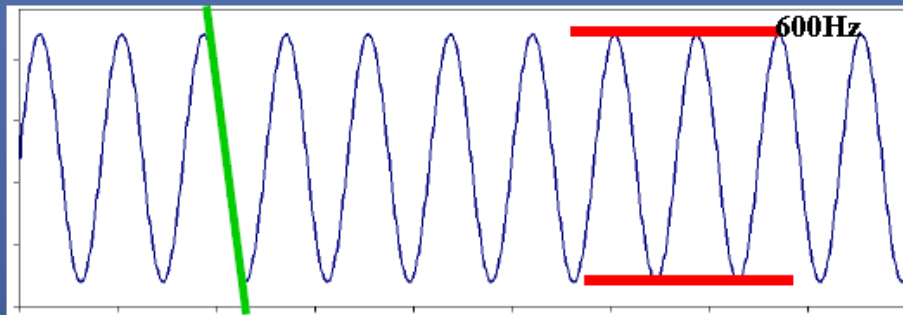
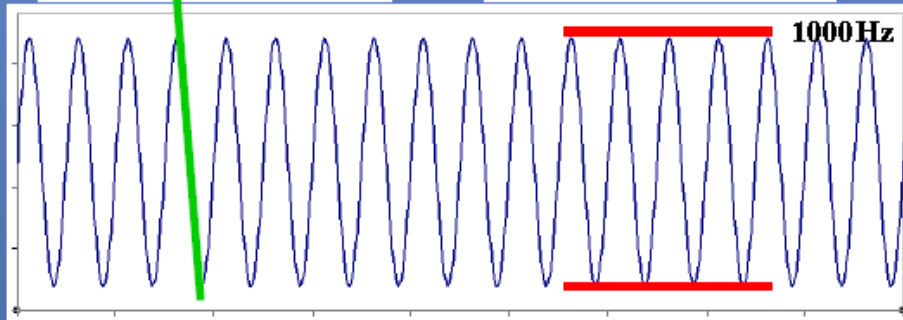
Na bazilarni membrani je Cortijev organ, ki ga zgoraj varuje posebna krovna mrenica. Cortijev organ sestavljata dva loka iz podpornih in čutnih celic z bički (čutnicami). Iz dlačnic vodijo živčna vlakna, ki se združujejo v slušni živec.

NOTRANJE IN ZUNANJE DLAČNICE (lasne celice)

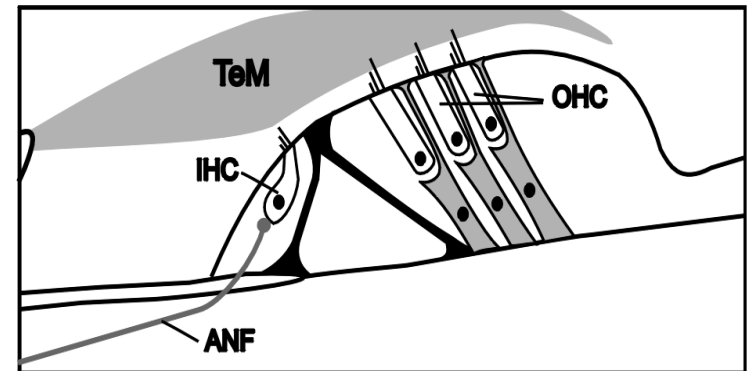
IHC respond to
velocity

OHC respond to
displacement

Displacement



Time

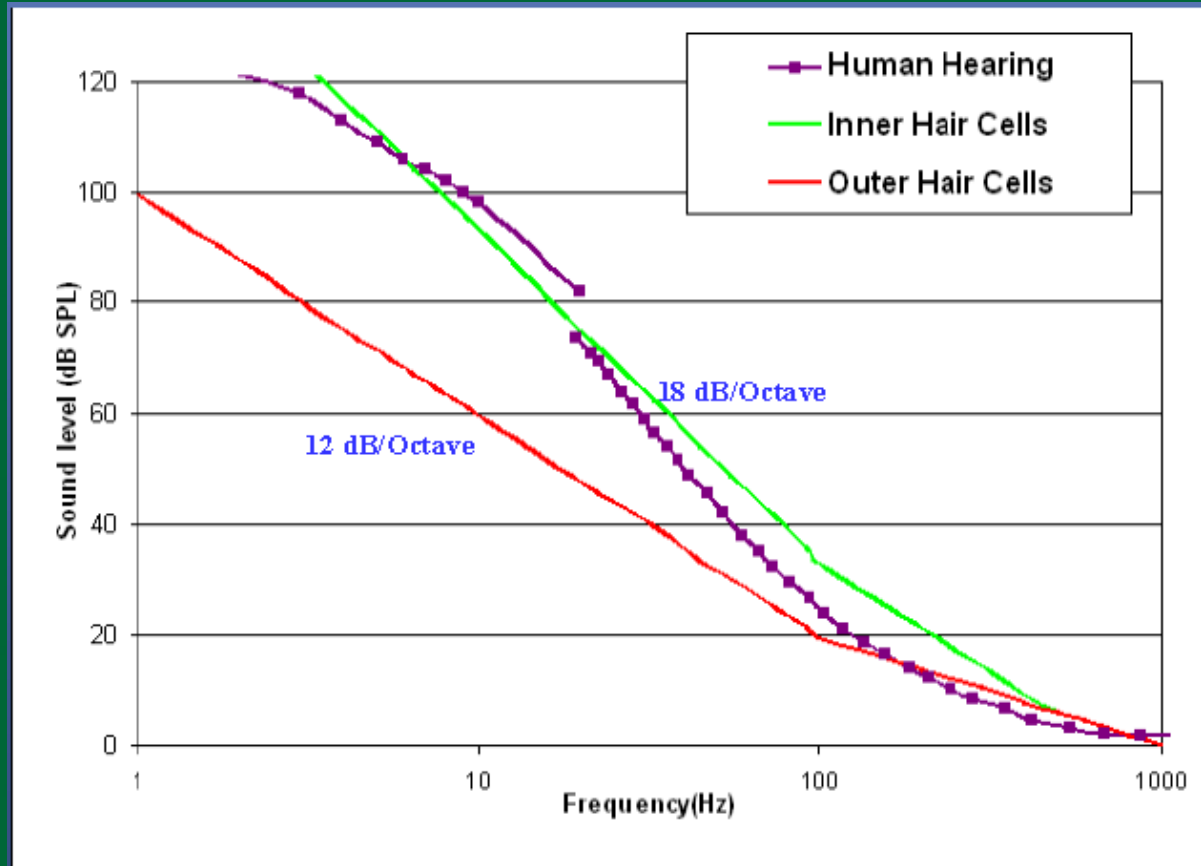


PRAG ZAZNAVANJA ZVOKA

- Zvok povzroči upogibanje dlačnic. Notranji dlačnice preko slušnih živcev prenašajo signale v možgane. Slišimo s svojimi notranjimi dlačnicami.

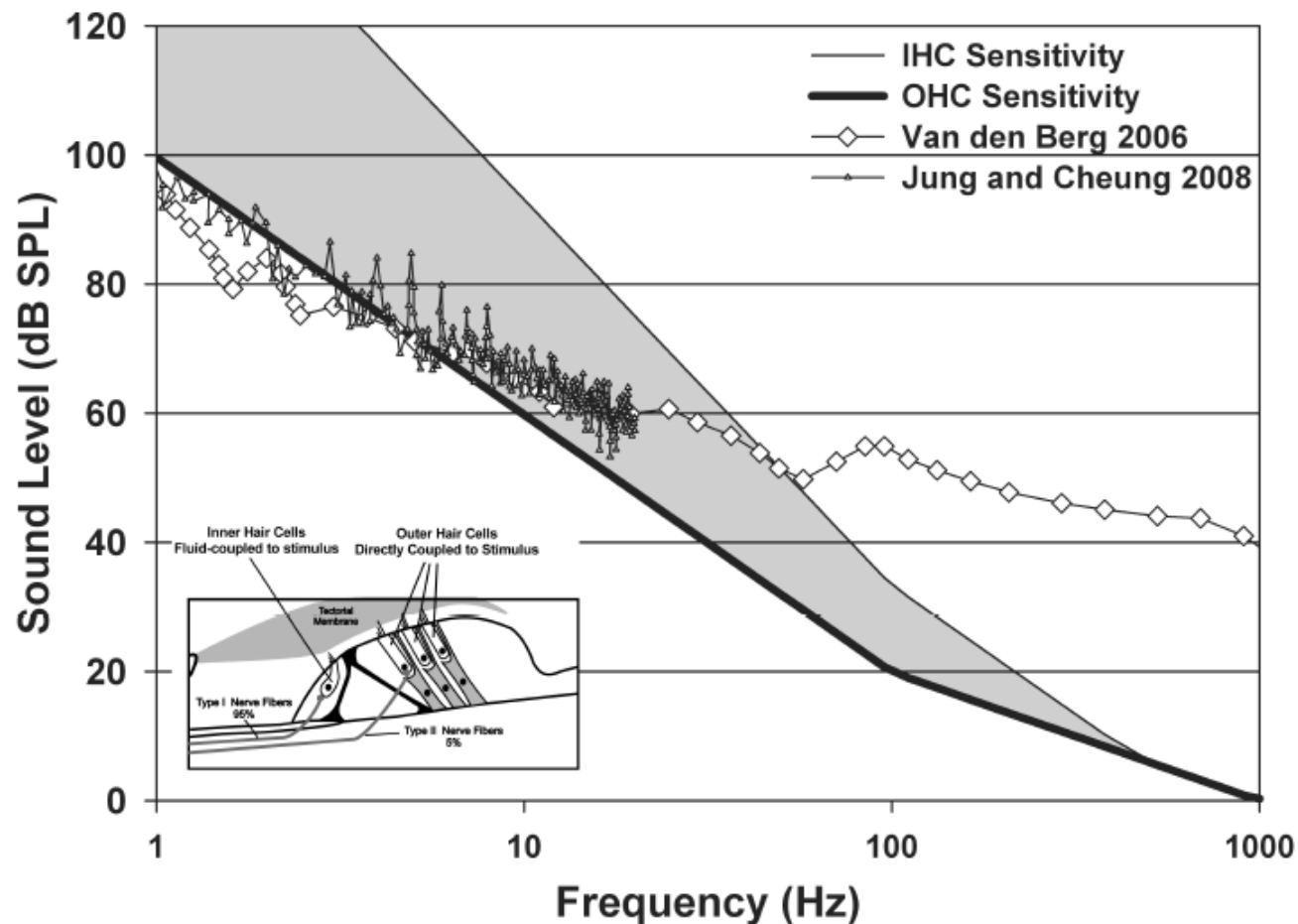
- Zunanje dlačnice zaznajo amplitudo zvoka. Pri majhni amplitudi visokih frekvencah se zunanje dlačnice podaljšajo in s tem spodbudijo notranje dlačnice (ojačajo signal). Ojačanje se zmanjša pri višjih ravneh zvoka, in je ničelno okoli 40 dB nad pragom zvoka.

- Notranje dlačnice se odzivajo na hitrost spreminjanja zvoka (frekvenca), zunanje dlačnice pa na amplitudo zvoka, pri čemer je pri 2 Hz prag zaznave za zunanje dlačnice okoli 40 dB pod pragom zaznave za notranje dlačnice.



INFRAZVOČNI HRUP VETRNIH ELEKTRARN

- Infrazvok - ušesa ga "slišijo", vendar pa tega ne povedo svojim možganom. Zvok, ki ga ne slišimo, lahko vzpodbuja zunanje dlačnice.
- Ali velja to tudi za dovolj oddaljene VE?



INFRAZVOČNI HRUP VETRNIH ELEKTRARN

Infrazvok - ušesa ga "slišijo", vendar pa tega ne povedo svojim možganom. Ali velja to tudi za dovolj oddaljene VE? (vetrna turbina Vestas 2 MW, 2012, razdalja 550 m, Massachusetts).

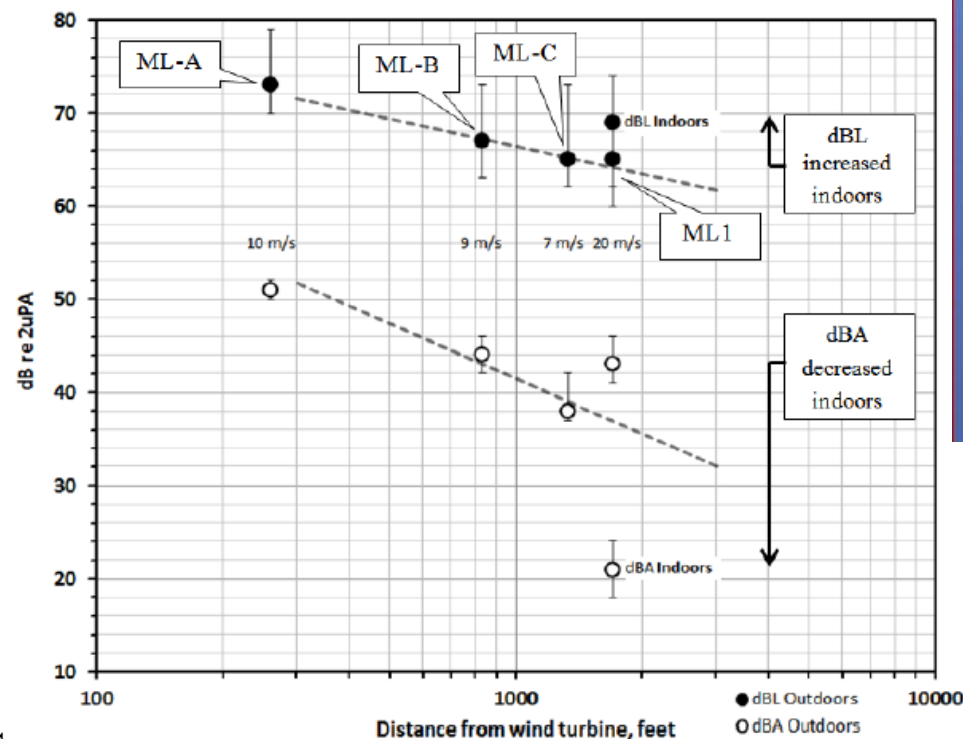


Figure 4 – ITW Sound Level versus Distance



Širjenje infrazvoka – infrazvok je zaradi dolge valovne dolžine neobčutljiv na ovire na tleh in se zaradi njih ne duši tako kot slišni zvok:

$L(r_1) = 20 \cdot \log(p_1/p_0)$ in
daleč od izvora $L(r_2) = 20 \cdot \log((p_1/p_0) \cdot (r_1/r_2))$
blizu izvora $L(r_2) = 20 \cdot \log((p_1/p_0) \cdot (r_1/r_2))$:
infrazvok $L(r_1) - L(r_2) = 3 \text{ dB}$ za $r_2/r_1 = 2$
slišni zvok $L(r_1) - L(r_2) = 6 \text{ dB}$ za $r_2/r_1 = 2$



INFRAZVOČNI HRUP VETRNIH ELEKTRARN

Infrazvok - ušesa ga "slišijo", vendar pa tega ne povedo svojim možganom.
(vetrna turbina Vestas 2 MW, 2012, razdalja 550 m; Massachusetts).

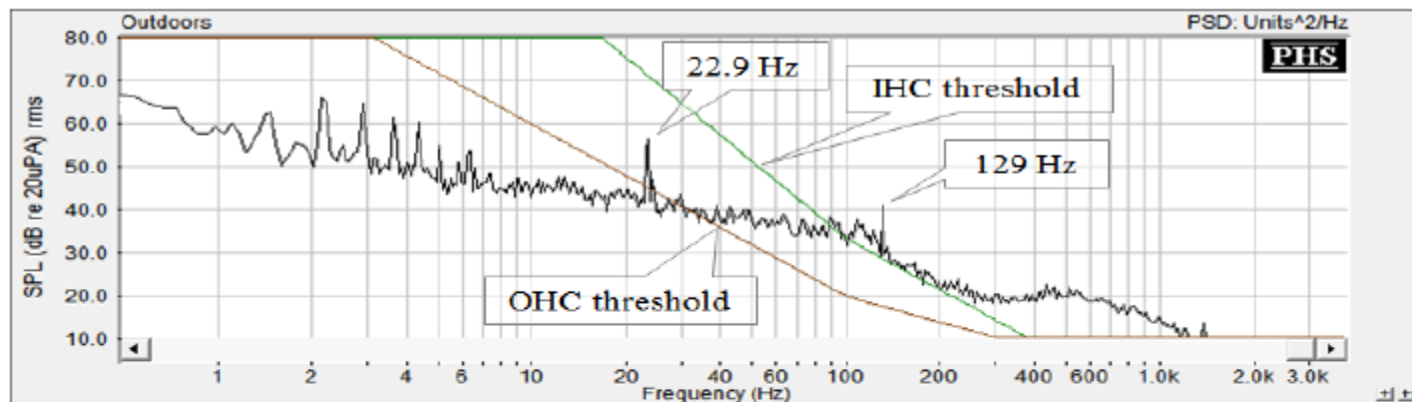


Figure 5 - Outdoor NOTUS sound levels (rms averaged) vs OHC & IHC Thresholds

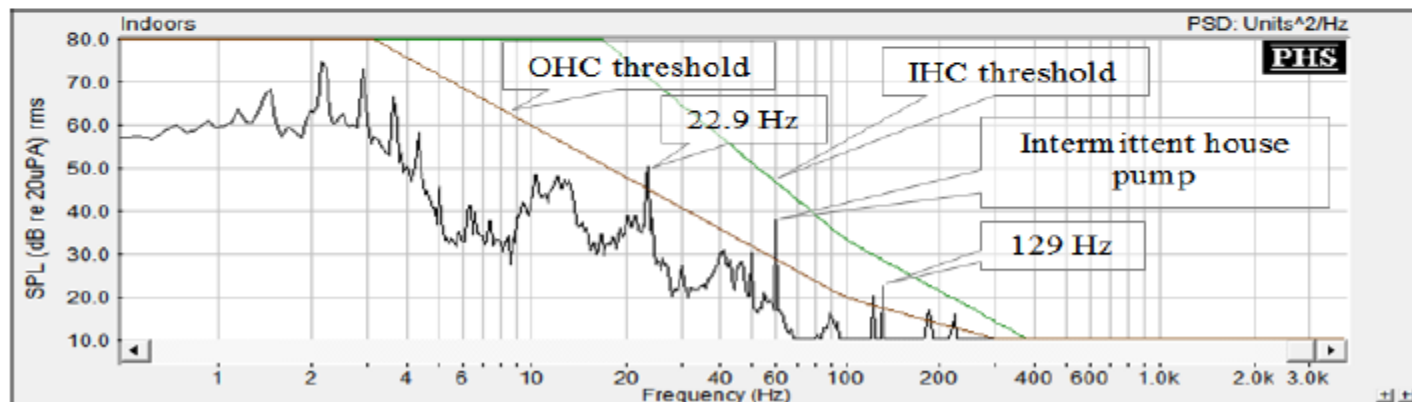


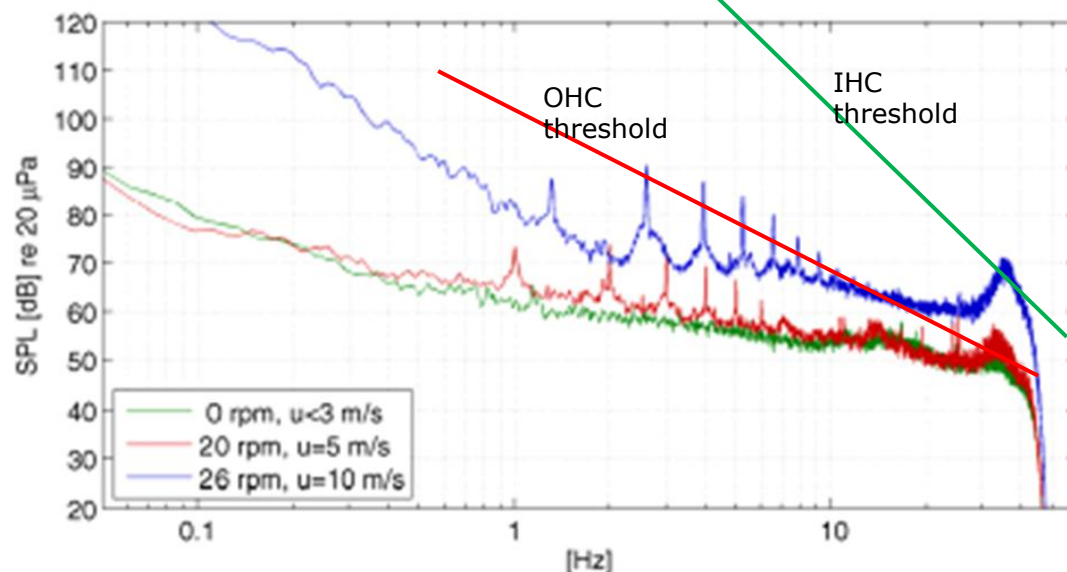
Figure 6 - Indoor NOTUS sound level (rms averaged) vs OHC & IHC Thresholds

INFRAZVOČNI HRUP VETRNIH ELEKTRARN

Infrazvok - ušesa ga "slišijo", vendar pa tega ne povedo svojim možganom.
(vetrna turbina Vestas 200 kW, razdalja 200 m; Nemčija 2005).



VESTAS V47
200 kW
h=65 m, r=24 m
rpm=[20 26]



NASTANEK NORMALNO SLIŠNEGA HRUPA

švistanje turbinskega krila (swish – aerodinamičen zvok) (od 200 do 3.000 Hz)

- hrup švistanja je amplitudno moduliran “wuf-wuf”
- jakost hrupa švistanja se zmanjšuje z razdaljo kot običajen hrup

MOTNJA ZA POČUTJE LJUDI ZARADI AMPLITUDNE MODULACIJE HRUPA:

Amplitudno moduliran hrup, ki ga povzroča gibanje krila vetrne turbine skozi zrak, se lahko meri z merilnikom ravni zvoka, vrednotene s filtrom A. Meritve infrazvočnega hrupa za ocenjevanje morebitnega učinka na počutje ljudi niso potrebne.

Motnja za počutje ljudi nastane, če je modulacija slišnega zvoka tako velika, da pride do takoimenovane BIOLOŠKE modulacije slišnega zvoka. BIOLOŠKA modulacija je posledica ojačitve slišnega zvoka, ki ga povzročajo zunanje dlačnice zaradi odzivanja na amplitudno modulacijo zvoka.

Motnja zaradi pojava BIOLOŠKE modulacije ne šteje za vplive infrazvoka, je pa za počutje ljudi lahko neugodna. Vendar se ta pojav z razdaljo od turbine VE hitro manjša.



VPLIVI NA POČUTJE LJUDI

- normalno slišni hrup (švistanje), ki ga povzročajo 2 MW vetrne turbine, je moteč za ljudi zaradi amplitudne modulacije hrupa na razdaljah do 600 m,
- vplivi nizkofrekvenčnega hrupa na počutje ljudi so opazni pri večjih hitrostih vetra (več kot 10 m/s) in so moteči za ljudi na podoben način kot normalno slišni hrup,
- vplivi infrazvočnega hrupa na počutje ljudi so za 2 MW vetrne turbine z veliko gotovostjo dokazljivi na razdaljah do 500 m,
- infrazvočni hrup na večjih razdaljah od vetrne turbine moti počutje ljudi samo, če njegova jakost presega mejo zaznave zvoka za zunanje dlačnice,
- za stavbe z varovanimi prostori na razdaljah 500-1500 m od vetrnih turbin je treba izvesti predhodne ocene jakosti hrupa in izvajati monitoring hrupa med obratovanjem turbin,
- monitoring infrazvočnega hrupa je treba izvajati zunaj stavb in v varovanih prostorih,

