

Hluk větrných elektráren

Ing. Aleš Jirásk

Zdravotní ústav se sídlem v Pardubicích, pracoviště Ústí nad Orlicí

Národní referenční laboratoř pro měření a posuzování hluku v komunálním prostředí

e-mail: ales.jiraska@zu.cz

www.zupu.cz

www.nrl.cz

Předmluva

V posledních letech se zejména díky internetu šíří množství zavádějících informací o hluku větrných elektráren (dále VTE). Tyto informace pocházejí zjednodušeně ze dvou zdrojů - případových nebo epidemiologických studií, podporovaných lékaři a následně odpůrci VTE a akustických měření, podporovaných techniky a následně příznivci VTE. Laici, kteří se k hluku VTE vyjadřují, si z těchto zdrojů vyberou podle svého pocitu, tzn. převládá vliv emocí, nikoliv racionálního uvažování. Tento článek si dává za cíl seznámit čtenáře se vztahy mezi hlukem VTE a reakcemi obyvatel a jednotlivými obory, které tyto vztahy zkoumají tak, aby se dokázal ve spleti názorů lépe orientovat a případně kvalifikovaně rozhodovat.

Autor článku pracuje v oboru měření a posuzování hluku ve zdravotnictví, má tedy zkušenosti z obou stran pohledu. Vzhledem k dynamickému vývoji v aeroakustice a pozvolnějšímu ve zdravotních oborech popisuje tento článek současný stav, „state-of-art“, nelze tedy v budoucnosti vyloučit změny, které ovlivní i výroky nebo závěry článku.

1. Hygienické limity hluku A v noční době

Hluk VTE se měří a hodnotí v ekvivalentních hladinách akustického tlaku $L_{Aeq,T}$. Kritickým obdobím dne z pohledu hygienického limitu i zdravotních účinků je noční doba - od 22:00 hod. do 6:00 hod. Dále se tedy zaměříme pouze na hygienické limity pro noční dobu. Stanovení limitů je v EU v pravomoci jednotlivých členských států, které své limity odvozují od doporučení Světové zdravotnické organizace WHO [1, 2]:

- $L_{Aeq,T} = 45$ dB [1], resp. 40 dB [2] v chráněném venkovním prostoru staveb (outside bedrooms)
- $L_{Aeq,T} = 30$ dB v chráněném vnitřním prostoru staveb (indoors)

V EU lze nalézt 3 systémy hygienických limitů:

1. jednočíslná hodnota limitu, nejrozšířenější systém, např. Dánsko 1991:

- $L_{Aeq,T} = 45$ dB pro řídké osídlení „neighbouring properties“, 40 dB pro místa hustě osídlená „residential areas“ nebo místa speciální ochrany „institutions, week-end houses, gardens or recreations“

podobně Německo 1998, Polsko 2007 v závislosti na zóně imisního místa (Immissionsorte, rodzaj terenu)

nejliberálnější je Řecko: 50 dB ve venkovním prostoru, 45 dB ve vnitřním prostoru s otevřenými okny

2. vícečíslné hodnoty v závislosti na rychlosti větru, např. Dánsko 2006:

- $L_{Aeq,T} = 44$ dB, resp. 39 dB (analogie osídlení viz výše) při rychlosti větru 8 ms^{-1} v 10 m, pro rychlost větru 6 ms^{-1} je limit o 2 dB menší

podobně Nizozemí s křivkami WNC-40 a WNC-35 od 1 ms^{-1} do 12 ms^{-1}

3. proměnný limit, odvozený od hluku pozadí, který se používá i v kombinaci s jednočíslným, např. Velká Británie ETSU-R-97 [3]:

- $L_{Aeq,T} = 35\text{--}40$ dB v denní době (podle počtu bytů „dwellings“, kWh, doby a hladiny expozice), 43 dB v noční době, 45 dB pro „insidera“, doporučení odstupů 5 dB nad hluk pozadí

podobně Francie, Nový Zéland a Austrálie

V USA neexistuje nařízení federální, pouze některých států či měst (Local or State Noise Ordinances):

- Wisconsin $L_{Aeq,T} = 50$ dB, Michigan 55 dB, California 60 dB pro malé VTE

některé nemají limit žádný

V ČR je systém podobný Švédsku nebo Norsku:

- $L_{Aeq,1h} = 40$ dB v chráněném venkovním prostoru staveb
- $L_{Aeq,1h} = 30$ dB v chráněném vnitřním prostoru staveb

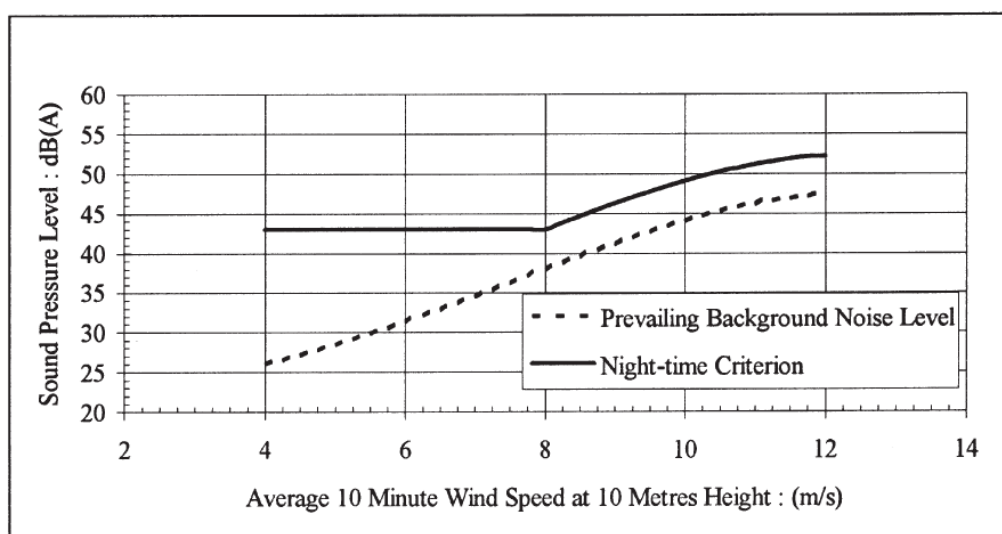
tedy stejné limity jako pro jiné průmyslové zdroje

Britský ETSU-R-97 je zajímavý z více pohledů:

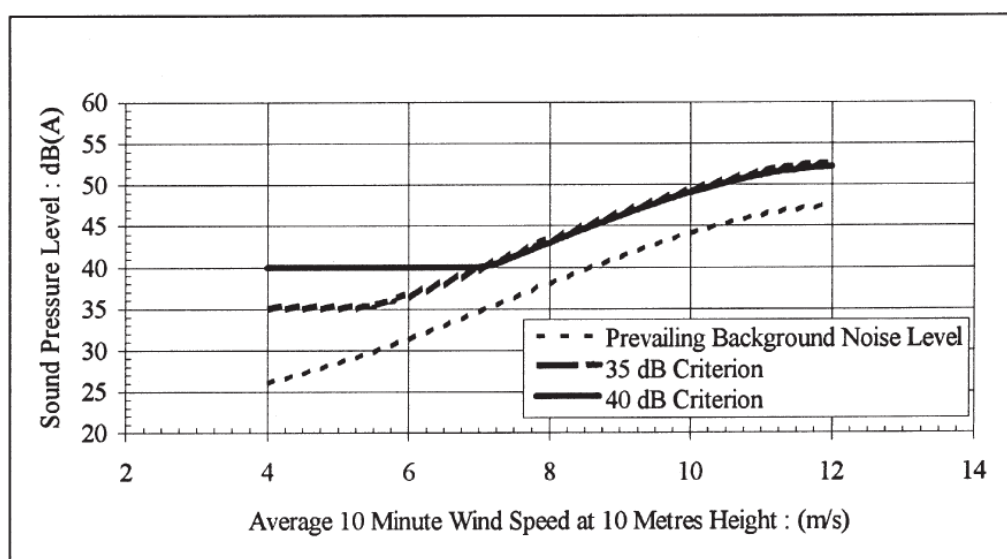
technický: kombinace jednočíselných hodnot (vodorovná čára) a proměnných hodnot odstupů 5 dB nad hluk pozadí (křivka)

právně: člověk spjatý s VTE „insider“ má vyšší limit (je prokázáno i epidemiologicky, že těmto lidem hluk „nevadí“)

zdravotní: limit 43 dB pro noční dobu je vyšší než pro denní dobu (denní dobou jsou myšlena tichá období v průběhu dne: večery od 18:00 hod. do 23 hod., sobotní odpoledne od 13:00 hod. do 18:00 hod. a celá neděle od 7:00 hod. do 18:00 hod.) - limit je odvozen od kritéria rušení spánku $35 + 10$ dB útlumu při otevřeném okně - 2 dB převodu $L_{Aeq,10min} - L_{A90,10min}$; tato konstrukce je silně kritizována



Obr. 1: Britský limit pro noční dobu



Obr. 2: Britský limit pro denní dobu

Závěr:

Systém limitů v ČR je přísnější než v EU a je v souladu s doporučením WHO. Systém limitů v USA je nedostatečný, VTE se běžně staví v těsné blízkosti chráněných prostorů. **Případové studie z USA tedy nemohou být zobecněním hluku VTE. Zdravotní problémy obyvatel nelze zpochybnit, ale tyto situace v ČR díky přísným limitům nemohou nastat.**

Hygienický limit je **zdravotně-ekonomický kompromis**, tzn. není ostrou hranicí mezi poškozením nebo nepoškozením lidského organismu. Hygienický limit je stanoven pro celoživotní expozici, jeho krátkodobé překročení tedy je možné. Hygienický limit je parametrem veřejného zdraví, tzn. že zajišťuje zdraví pro definovanou **většinu** populace, nikoliv pro celou populaci. Pokud je tedy někdo zvláště citlivý, může mít zdravotní problémy i při dodržení hygienického limitu a situace se musí řešit individuálně, buď nadstandardním protihlukovým opatřením, spíše však přestěhováním do jiné lokality. Tato pravidla platí bez ohledu na zdroj hluku, tedy nejen pro lokality VTE.

V některých dokumentech WHO, např. [2] je doporučena cílová „target“ hodnota 30 dB v chráněném venkovním prostoru staveb. Slovy cílová je míněna prevence před subklinickými nepříznivými zdravotními účinky hluku v noční době i u citlivých skupin populace. Při hladinách 30 - 40 dB je sice již pozorováno ovlivnění kvality spánku, avšak vliv je mírný. K strmému nárůstu vlivu na zdraví dochází při hladinách od 40 dB. Doporučená hodnota má zajistit spánek při mírně otevřených oknech kvůli větrání místnosti. Předpokládaná hodnota zvukové izolace fasády s mírně otevřenými okny je cca 10 dB. Systém limitů 40 dB v chráněném venkovním prostoru staveb, resp. 30 dB v chráněném vnitřním prostoru staveb se tedy jeví jako rozumný zdravotně i ekonomicky odůvodněný kompromis. Váhový filtr A je dostatečnou aproximací lidského sluchu křivkami stejné hlasitosti. Váhový filtr C se používá pro impulsní hluky a jako již poněkud archaický detektor nízkofrekvenčního hluku. Požadavky na změnu hodnocení váhovým filtrem A nejsou ani zdravotně zdůvodněné, ani prakticky administrativně zvládnutelné - znamenalo by to nové limity $L_{\text{Geq,T}}$ a nové diskuse, zda je váhový filtr C správný. Praktickým řešením je „limitování“ nízkofrekvenčního hluku.

2. „Hygienické limity“ infrazvuku a nízkofrekvenčního (dále nf) hluku

Infrazvuk je definován jako zvuk o kmitočtu 0 - 20 Hz, nf hluk o kmitočtu 20 - 200 (100, 160) Hz. Hranice mezi infrazvukem a nf hlukem je pouze slovní, nejčastější definice infrazvuku jako lidským uchem neslyšitelného hluku není pravdivá. Infrazvuk může být slyšen při dostatečně vysokých hladinách akustického tlaku na příslušných kmitočtech, je však vhodnější mluvit o vnímání. Slovo „limity“ je napsáno v uvozovkách, protože neexistuje světový nebo evropský normovaný systém hodnocení. To však neznamená, že neexistuje žádné omezení infrazvuku a nf hluku.

V EU lze nalézt 3 systémy posuzování:

1. váhový filtr G, normovaný v ČSN ISO 7196, ale bez limitní hodnoty:

- doporučená hodnota $L_{\text{Geq,T}} = 90$ dB
- doporučená hodnota pro obytné místnosti, třídy a kanceláře v Dánsku $L_{\text{Geq,T}} = 85$ dB

tento systém se již příliš nepoužívá, neboť je navržen pro infrazvuk, nf hluk podhodnocuje

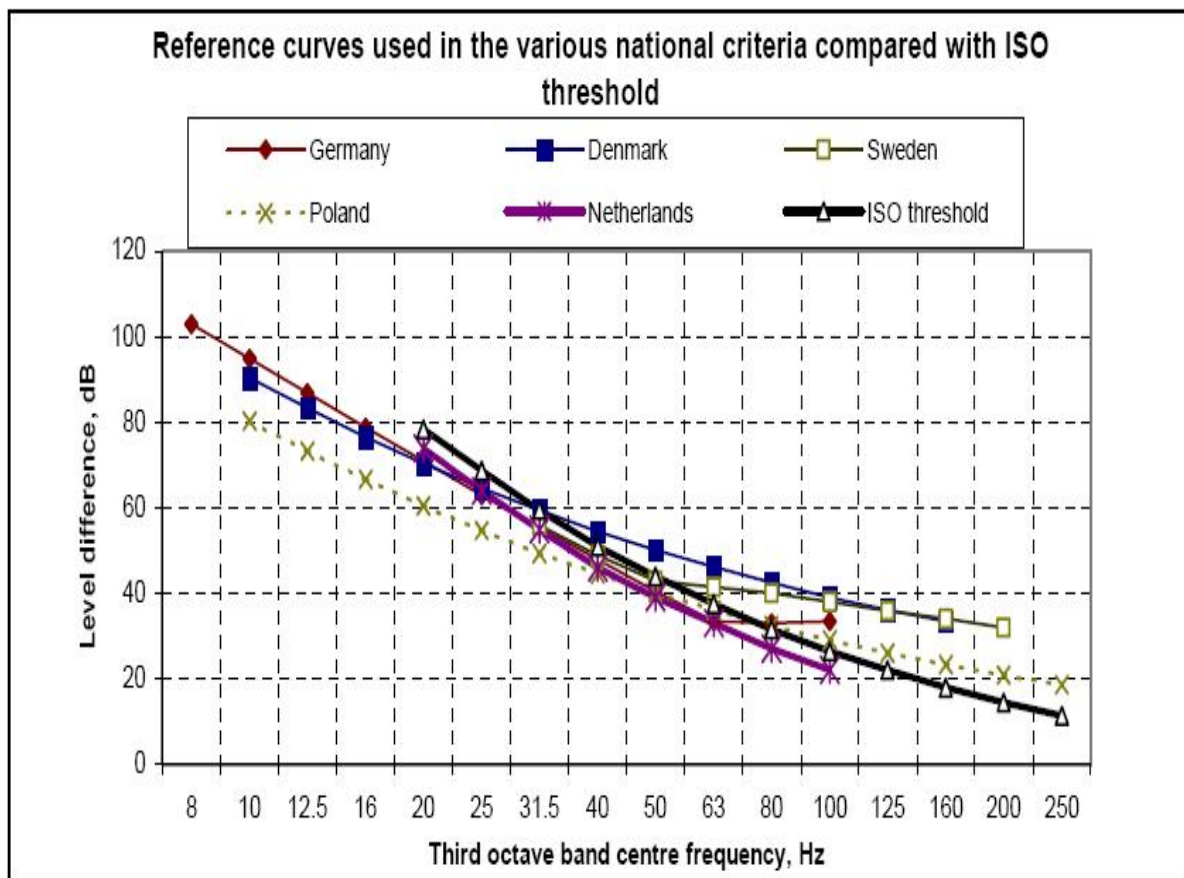
2. limitování váhovým filtrem A v třetinooktávových pásmech 10 - 160 Hz, Dánsko 1997 [4]:

- $L_{\text{pA,LF}} = 20$ dB v chráněném vnitřním prostoru pro večerní a noční dobu, 25 dB pro denní dobu

tento systém dává dobrou shodu s výpovědí obtěžovaných, je vhodný spíše pro harmonické tóny

3. limitování jednotlivých třetinooktávových pásem:

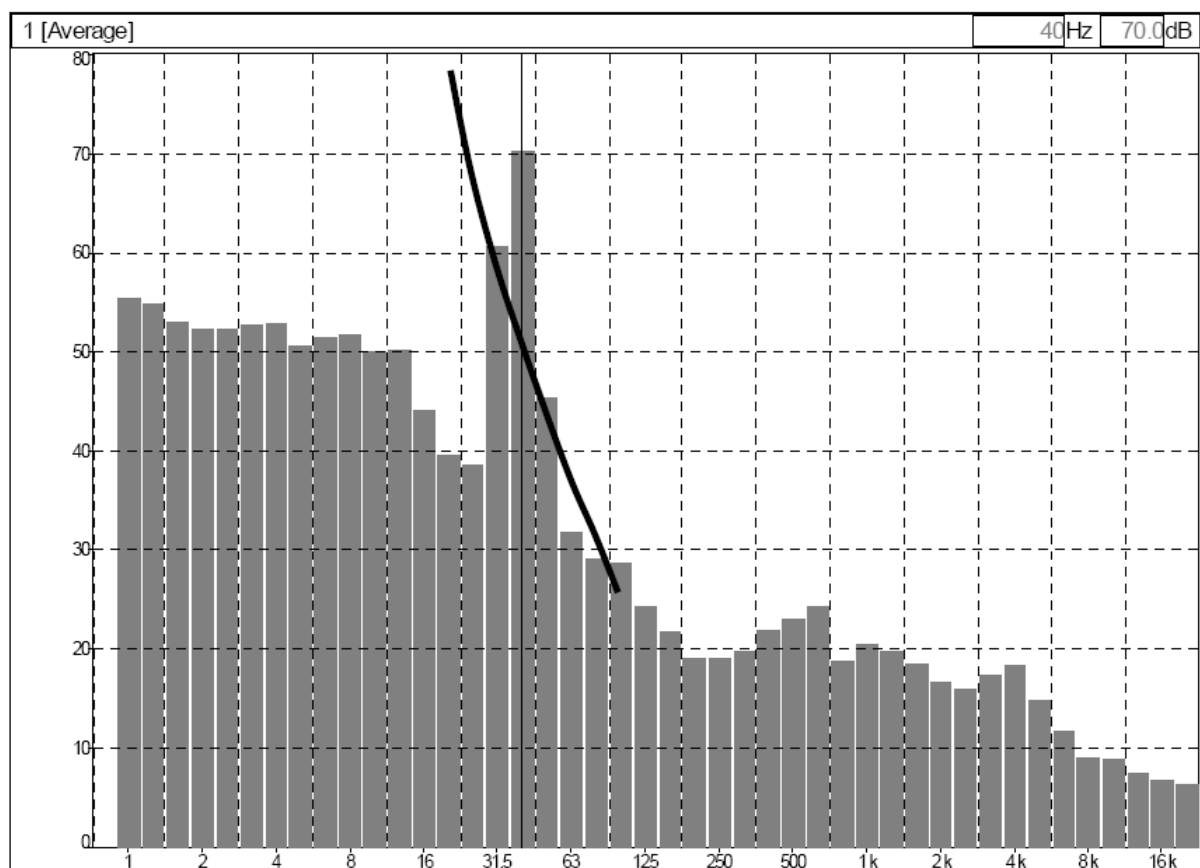
- hladiny prahů slyšení v ČSN ISO 226
- směrné křivky (criterion, reference curves) různé v státech EU: Švédsko SOSFS 1996:7, Německo DIN 45680 1997, Nizozemí 1999, Polsko 2001, návrh Velká Británie 2005 [5]
- ČR: hladiny prahu slyšení L_{PS} v příloze 1 nařízení vlády č.148/2006 Sb., o ochraně před nepříznivými účinky hluku a vibrací [6]



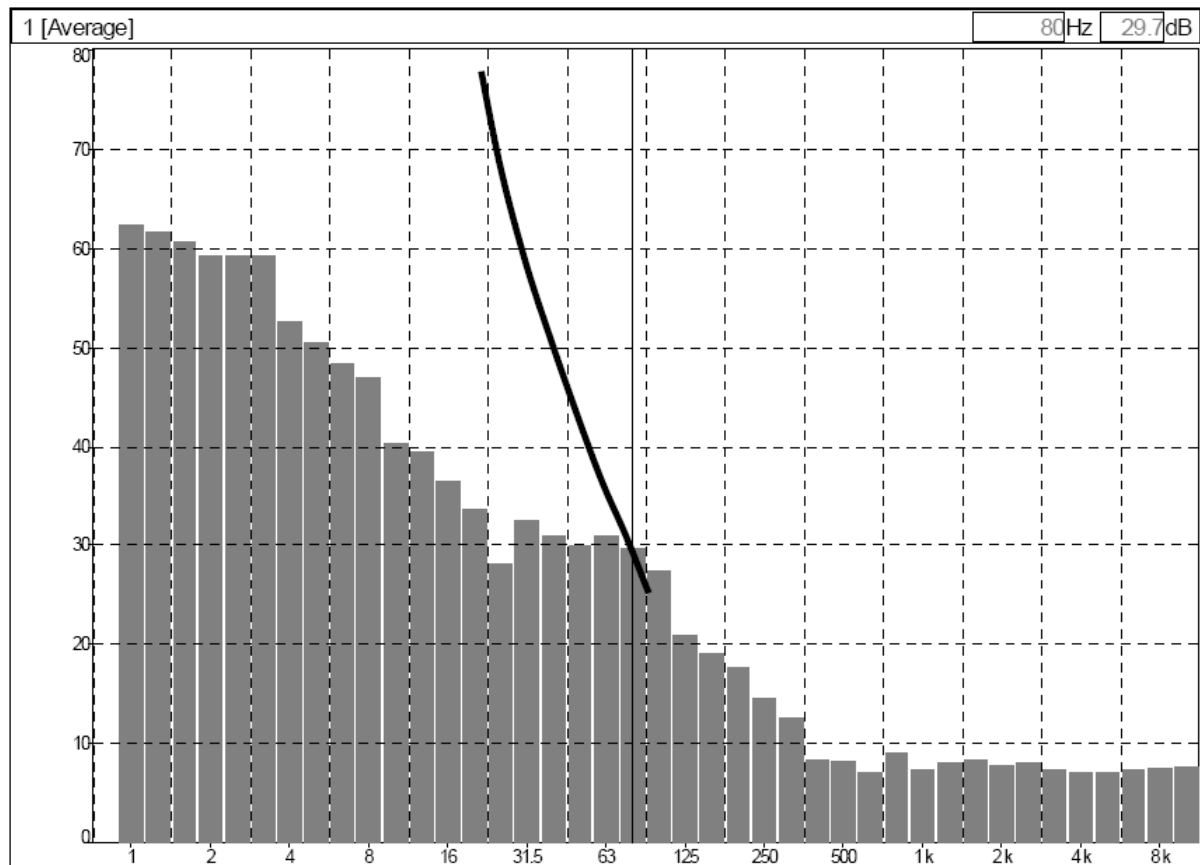
Obr. 3 Porovnání směrných křivek států EU a prahu slyšení v ISO 226 [5], str. 12

U infrazvuku a nízkého hluku je třeba rozlišit hluk tónový a netónový. Tónová složka je dle [6] definována jako: „hluk, v jehož kmitočtovém spektru je hladina akustického tlaku v třetinoctávním pásmu, případně i ve dvou bezprostředně sousedících třetinoctávních pásmech, o více než 5 dB vyšší než hladina akustického tlaku v obou sousedních třetinoctávních pásmech“. Tento hluk se v přírodě běžně nevyskytuje a je velmi obtěžující, člověk ho vnímá jako ohrožení, a v tomto případě je posuzování pouze ekvivalentní hladinou akustického tlaku $L_{Aeq,T}$ **chybné**. Netónový hluk (standardní stav VTE) se v přírodě běžně vyskytuje (les, voda, vítr) a obecně není obtěžující, neboť lidský sluch je mu dlouhodobě uvyklý a posuzování pouze ekvivalentní hladinou akustického tlaku $L_{Aeq,T}$ **není chybné**. Protože však nelze dopředu říci, zda nebude v hluku VTE přítomna tónová složka, provádí se měření a posuzování třetinoctávného spektra **vždy**.

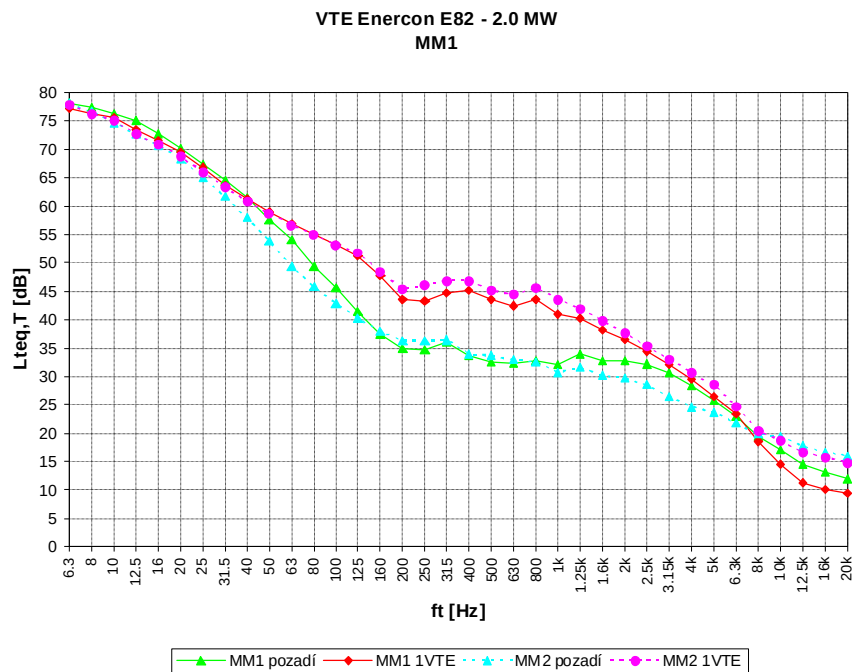
V současné legislativě ČR se používají hladiny prahu slyšení L_{PS} navázané na přítomnost tónové složky. Při podrobné analýze je možné i prosté porovnání hladin v třetinoctávních pásmech s prahy slyšení L_{PS} v chráněném vnitřním prostoru staveb. Toto posouzení je možné provést i v chráněném venkovním prostoru staveb, avšak je třeba uvážit hluk větru, který nelze považovat za zdraví škodlivý. Je též možné použít dánskou metodu výpočtu $L_{pA,LF}$ nebo novější HT (hearing threshold = práh slyšení) vážení v kritických pásmech, které sjednocuje typy používaných analýz od třetinoctávné až po FFT [7]. Tyto analýzy posoudí, zda je nebo není hluk vnímatelný „audible“, nemají však zatím právní důsledky.



Obr. 4 Třetinooktávové spektrum, tónový průmyslový zvuk [5], str. 26

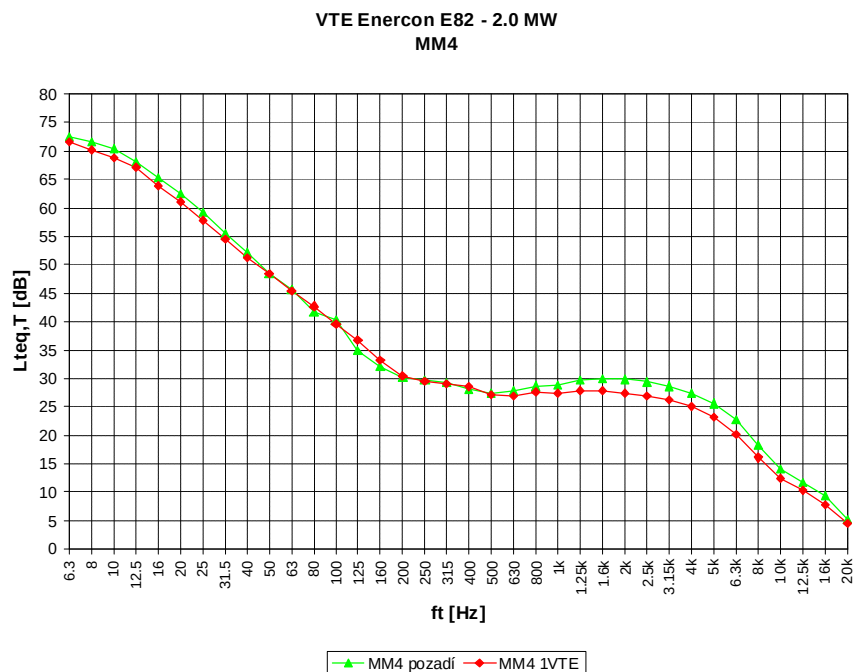


Obr. 5 Třetinooktávové spektrum, netónový průmyslový zvuk [5], str. 76



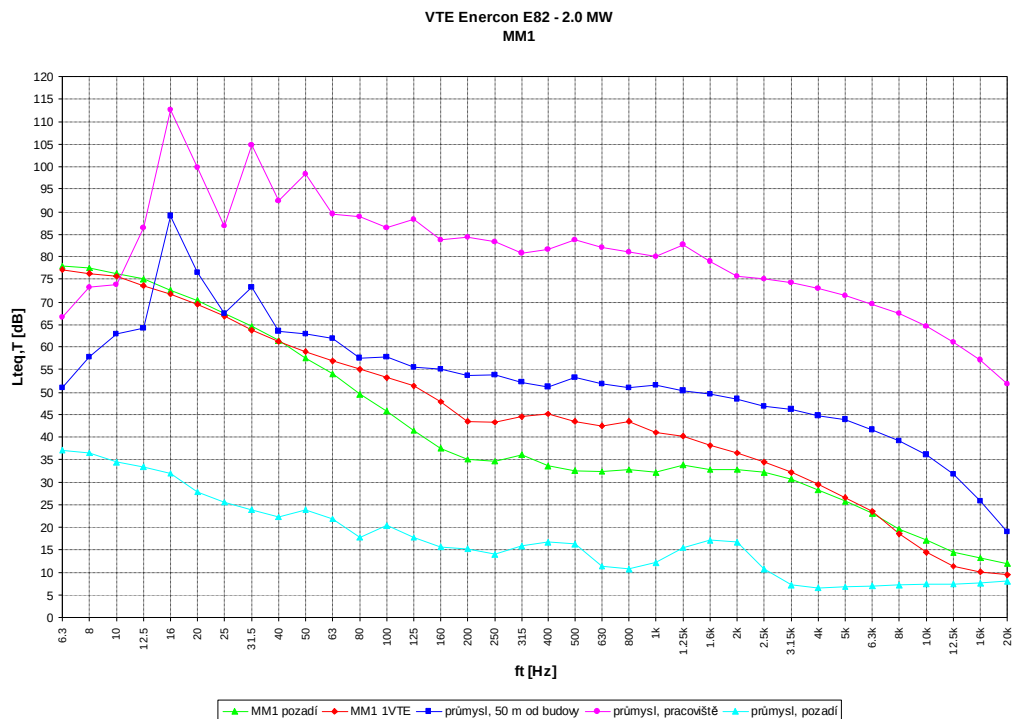
Obr. 6 Třetinoctávové spektrum VTE Enercon E82 - 2.0 MW, vzdálenost 119 m

Na obr. 6 je vidět standardní příklad třetinoctávového spektra moderní VTE o výkonu 2 MW na stožáru o výšce 78 m ve vzdálenosti 119 m na závětrné straně (MM1) a návětrné straně (MM2). Je zřejmé, že v kmitočtové oblasti do 50 Hz se hluk VTE a pozadí neliší - zde převládá hluk větru, rozdíl je až v oblasti středních kmitočtů - zde převládá hluk VTE.



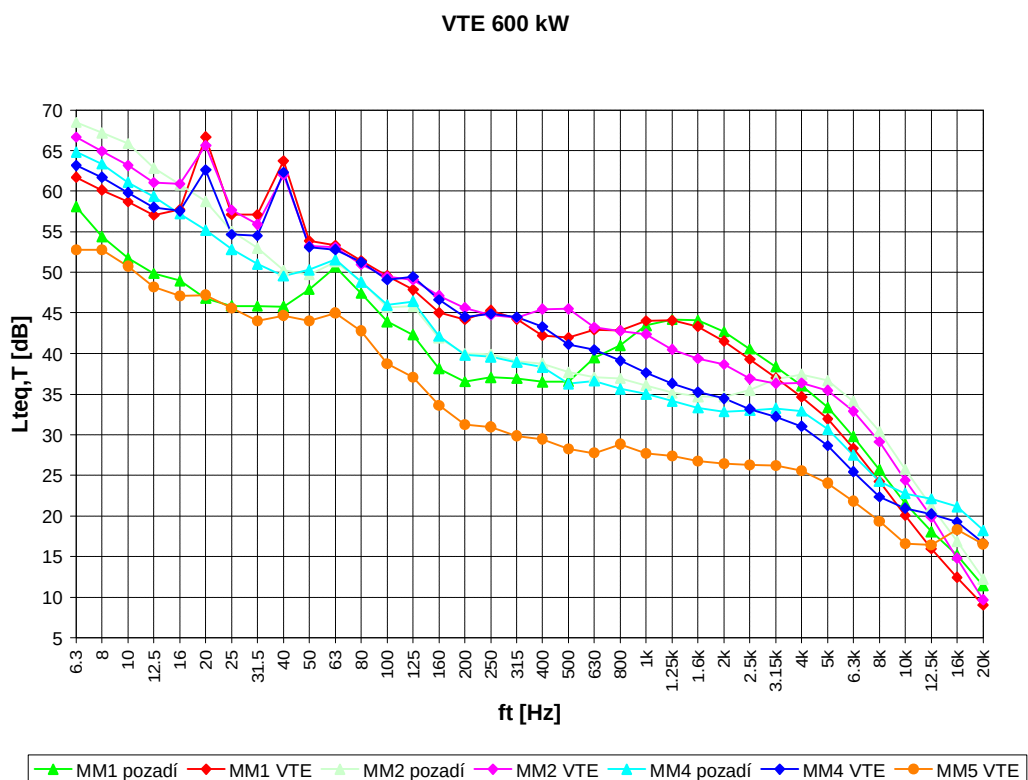
Obr. 7 Třetinoctávové spektrum VTE Enercon E82 - 2.0 MW, vzdálenost 1150 m

Na obr. 7 je třetinoctávové spektrum stejné VTE ve vzdálenosti 1150 m na závětrné straně (MM4). Je zřejmé, že hluk VTE je srovnatelný s hlukem pozadí. Vyšší hladiny akustického tlaku hluku pozadí na vyšších frekvencích mohou být způsobeny meteorologickými vlivy, které regresní analýzou nelze odstranit.



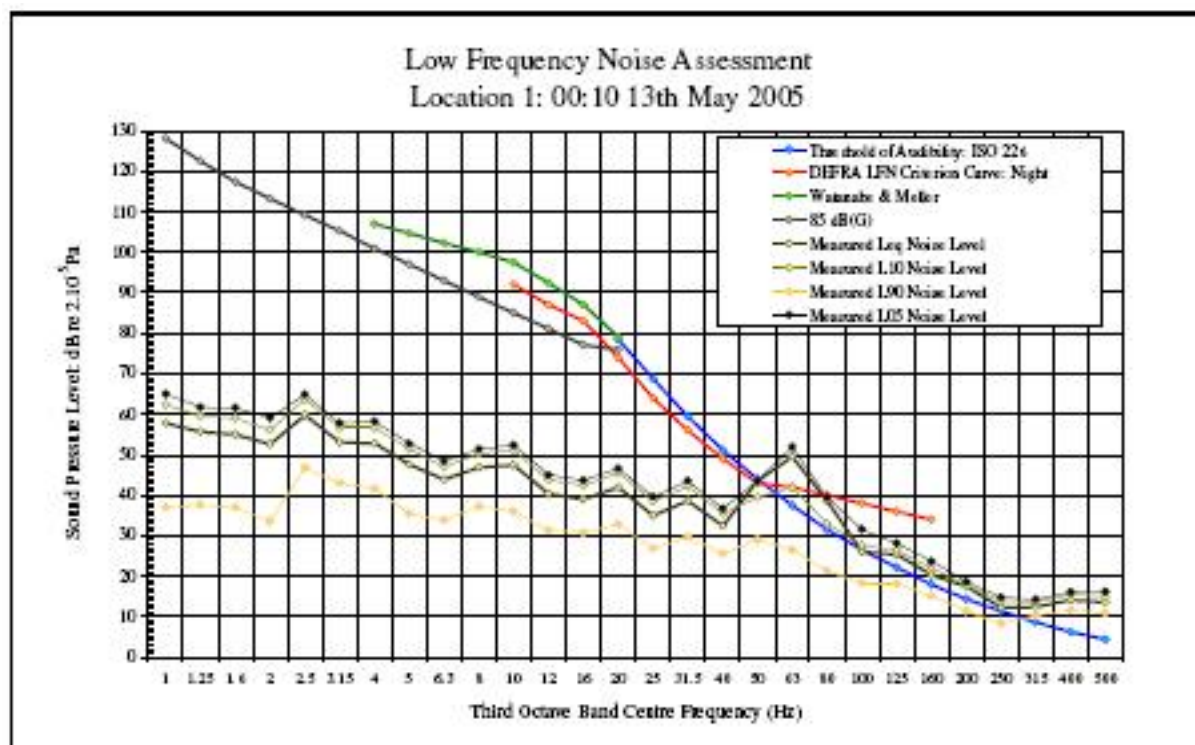
Obr. 8 Porovnání třetinoctákových spekter VTE Enercon E82 (viz obr. 6) a průmyslového hluku vibračních třídičů na pracovišti a ve venkovním prostoru

Na obr. 8 je porovnání třetinoctákových spekter VTE a vibračních třídičů. Z výše uvedených důvodů rozdílů mezi tónovým a netónovým hlukem je zcela zřejmé, že hluk vibračních třídičů je pro obyvatele velmi obtěžující, zatímco hluk VTE obtěžující není a nikdo si na něj nestěžuje. To však neznamená, že hluk VTE nemůže být tónový.



Obr. 9 Třetinoctákové spektrum VTE s tónovým nf hlukem

Na obr. 9 je příklad hluku VTE o výkonu 600 kW na stožáru o výšce 60 m, který může být obtěžující. Vzdálenosti míst měření MM1 84 m na závětrné straně, MM2 84 m přibližně na návětrné straně, MM4 120 m přibližně na návětrné straně, MM5 475 m přibližně na návětrné straně. Měření bylo provedeno v rámci zkušebního provozu VTE a byl identifikován problém se silentbloky hřídele mezi převodovkou a generátorem. Po vyřešení tohoto problému tónové složky na kmitočtech 20 a 40 Hz zmizely. Za povšimnutí stojí, že na imisním místě 5 v chráněném venkovním prostoru staveb již nf hluk není zaznamenán, což však mohlo být způsobeno směrem větru. Další zajímavostí je, že problém vznikl na VTE nižšího výkonu a výšky, takže problémy s hlukem nejsou závislé na těchto parametrech. Poslední poznámkou je, že nf hluk byl měřen ve venkovním prostoru, není tedy podmínkou měření v chráněném vnitřním prostoru, i když zde mohou být účinky nf hluku výraznější.



Obr.10 Třetinooktávové spektrum VTE s tónovým nf hlukem [8]

Na obr. 10 je příklad hluku 7 VTE z Velké Británie [8], který je na pomezí hodnocení tónové složky v kmitočtovém pásmu 63 Hz. Měření je provedeno ve vnitřním chráněném prostoru staveb v rohu místnosti. Kromě hladin akustického tlaku $L_{\text{teq,T}}$ třetinooktávového spektra jsou ještě zobrazeny směrné křivky ISO 226, jejího prodloužení dle Watanabeho a Möllera, britského návrhu DEFRA (tedy i české prahy slyšení L_{PS}) a dánského doporučení $L_G = 85$ dB. VTE bohužel nejsou dokumentovány, takže nelze posoudit, čím je tato skutečnost způsobena. Je však pravděpodobné, že může být obtěžující.

Závěr:

Hygienické limity infrazvuku a nf hluku sice formálně neexistují, avšak existují hodnoty prahů slyšení, které jsou vázány na tónový hluk, přesněji přítomnost tónové složky. Systémy prahů slyšení jsou v různých státech různé, avšak podobné. V ČR je užíván systém shodný s Velkou Británií, vycházející ze spojení systému německého a švédského. Lze provést i podrobnější analýzy dánskými metodami. VTE nejsou standardními zdroji infrazvuku a nf hluku, v třetinooktávové analýze nemají standardně tónovou složku. Tónový hluk se může objevit při poruchovém stavu VTE, funguje tedy jako diagnostika stavu VTE. Přítomnost tónového hluku VTE neznamena automaticky poškození zdraví obyvatel, ale varování pro investora, že s jeho zařízením není něco v pořádku a je třeba najít příčinu problému.

3. Případové studie „case study“

Od roku 2006 se na internetu raketovým tempem množí články s problémovými případy VTE. Nelze zpochybnit pravdivost těchto případů, ale jejich přínos pro řešení problémů je minimální. Existuje totiž daleko větší procento případů, kdy problémy s VTE nejsou. Situace je nutné řádně dokumentovat:

- měřené hladiny akustického výkonu L_{WA} nebo tlaku $L_{Aeq,T}$ ve vzdálenosti a spekter hluku VTE
- měřené hladiny akustického tlaku $L_{Aeq,T}$ ve vzdálenosti x m a spekter hluku pozadí
- měření v chráněném venkovním / vnitřním prostoru
- rychlosti a směry větru
- místo měření a pozice mikrofону
- výrobce, typ, výkon, výška, počet a popis VTE

ideálně

- popis meteorologické situace při měření, popis druhů zvuku, které VTE produkují

Nejznámější odkazy případových studií jsou tyto:

- Amanda Harry: Wind turbines, noise and health [9]
autorka praktická lékařka, dotazníková studie zdravotních obtíží 39 osob, žijících 300 m - 2 km od VTE
- Barbara Frey, Peter Hadden: Noise radiation from wind turbines installed near homes: effects on health [10]
autoři ředitelka biomedicínské knihovny a manažer investičního fondu, seznam výňatků různých článků, často vytržených z kontextu, „černá kronika“ VTE
- Nina Pierpoint: Wind Turbine syndrome [11]
autorka pediatrička, zpočátku případové studie, později velká univerzální databáze odkazů literatury VTE, dnes souhrnná stejnojmenná kniha

Na internetu samozřejmě koluje mnoho dalších případů obtěžování obyvatel hlukem VTE, tyto autory však považuji za stěžejní. Ne náhodou jsou většinou lékaři. Lékařský (epidemiologický) přístup zní: máme případy vlivu hluku VTE na zdraví obyvatel, vymezme vzdálenost VTE od chráněného prostoru, kde k těmto případům nedochází a zkoumejme tyto vlivy. Problémem je, že většina těchto případů je popsána v USA a Velké Británii, kde platí vyšší hygienické limity, případně nejsou žádné. Jak bude popsáno dále, jsou zde i další technické zvláštnosti VTE. Technický (akustický) přístup zní: popišme přesně jednotlivé případy fyzikálními parametry hluku, porovnejme je s prahy slyšení a zkoumejme jejich vlivy na zdraví. Problémem je, že pokud zpochybníme prahy slyšení nebo mechanismus ovlivnění zdraví pouze hlukem, dopustíme se chyby. Oba přístupy se shodují v nutnosti dalšího zkoumání vlivu na zdraví. Jako rozumný kompromis se tedy jeví zpřísnění hygienických limitů hluku v USA a Velké Británii, které jsou benevolentnější, na úroveň Dánska, Švédska a ČR. V USA již existuje návrh kritérií pro umístování VTE pro prevenci zdravotního rizika hluku [12]. Ve Velké Británii byly práce na změnách zatím přerušeny, někteří odborníci však změny doporučují:

- Dick Bowdler: ETSU-R-97 Why it is Wrong [13]
autor akustik, člen Noise Working Group (poradní orgán ministerstva obchodu a průmyslu, nyní DBERR), který rezignoval na protest proti neochotě ke změně předpisu, kritika britské metodiky
- Mike Stigwood, články
autor Environmental Health Officer („hygienik“) se specializací na hluk, nyní nezávislý konzultant, kritika britské metodiky

Jak je zřejmé z povolání obou autorů, alespoň někteří technici a zdravotníci se shodnou na potřebě změny předpisů podle aktuálního výzkumu hluku VTE.

Závěr:

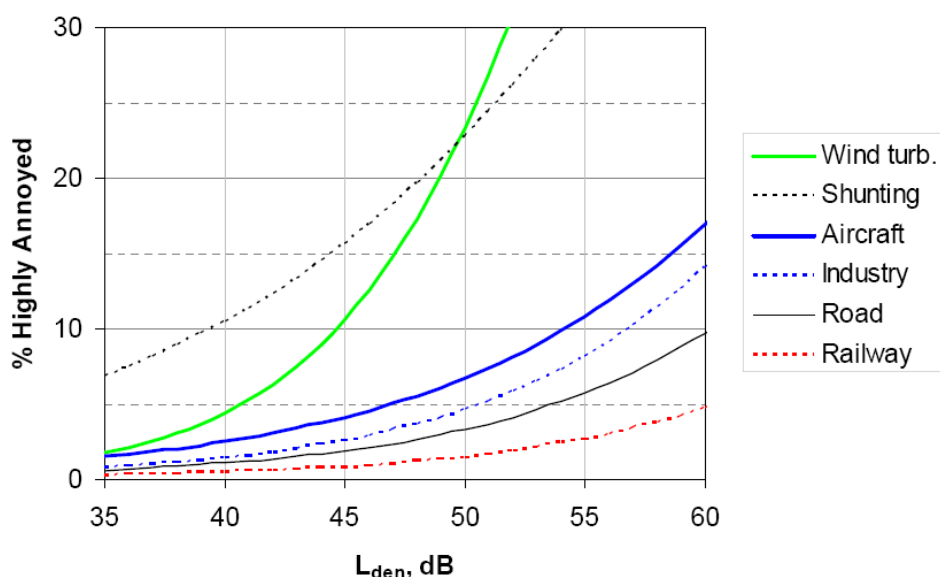
Případové studie jsou vhodné spíše na upozornění na problém hluku VTE, avšak neobsahují dostatečnou dokumentaci situace, nelze tedy na jejich základě udělat univerzální závěry a rozhodnutí. Jsou vhodné pro další zkoumání, získávání informací o vlivu hluku na zdraví a tlak na zpřísnění předpisů tam, kde jsou příliš benevolentní.

4. Epidemiologické studie

Již předchozí případové studie by bylo možné nazvat kvaziepidemiologické, protože vycházejí z příznaků, popisovaných obyvateli. Objektivní epidemiologické studie však zohledňují další faktory - fyzikální (hladina akustického tlaku $L_{Aeq,T}$ na imisním místě, hluk pozadí, vzdálenost, úhel, viditelnost), individuální (pohlaví, věk, vzdělání, zaměstnání, ekonomický zisk z VTE, podmínky bydlení, citlivost na hluk, názory na VTE), působení VTE (vnímání, stupeň obtěžování, výskyt hluku, charakter hluku) zdravotní (dlouhodobé nemoci, psychologické působení, stres, kvalita spánku) a to vše pro relativně velké počty obyvatel, řádově stovky až tisíce respondentů. Hlavními epidemiologickými studiemi jsou:

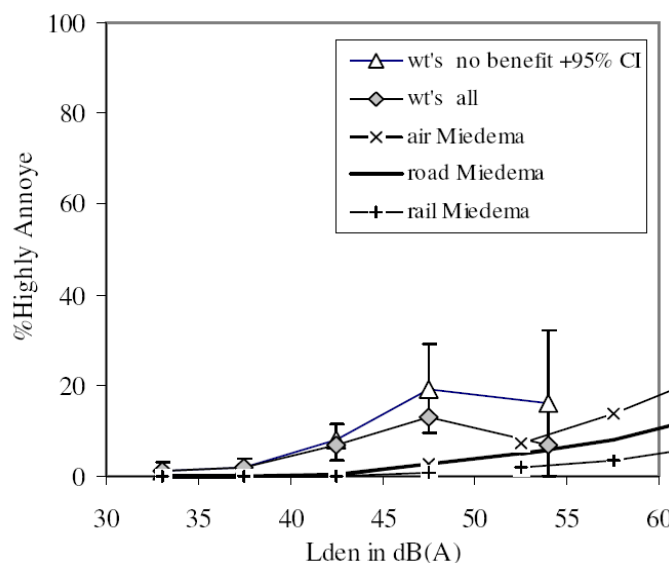
- Eja Pedersen, Kerstin Persson Waye: 4 studie [14,15,16,17]
- Frits van den Berg, Eja Pedersen, Jelte Bouma, Joel Bakker: Project WINDFARMperception Visual and acoustic impact of wind turbine farms on residents [18]
- Torben Holm Pedersen: The "Genlyd" Noise Annoyance Model [19]

Výsledkem těchto rozsáhlých prací je řada závislostí, z kterých jsou vybrány následující:



Obr.11 Porovnání % vysoce obtěžovaných v závislosti na hladině L_{dvn} jednotlivých zdrojů hluku [7, 19]

Na obr.11 je vidět strmý nárůst obtěžování hlukem VTE oproti ostatním zdrojům hluku s výjimkou nárazů vagónů při posunu. Data jsou extrapolována pro hluk VTE a $L_{dvn} > 50$ dB a pro ostatní zdroje $L_{dvn} < 45$ dB. Hodnota $L_{dvn} = L_{Aeq,T} + 6.4$ dB pro konstantní hladinu akustického tlaku zdroje hluku.



Obr.12 Porovnání % vysoce obtěžovaných v závislosti na hladině L_{dvn} hluku VTE a dopravy [18]

Na obr.12 je vidět, že nárůst obtěžování hlukem VTE po dosažení určité hranice klesá bez ohledu na ekonomický zisk z VTE. Může to být způsobeno malým počtem respondentů exponovaných pro EU vysokými hladinami hluku nebo větším procentem respondentů s ekonomickým ziskem z VTE.

Correlation with noise annoyance	Study I n = 223	Study III n = 296		
Swishing	0.718**	0.590**	How would you describe the sound of wind turbines?	
Whistling	0.642**	0.381**	A pure tone	Not annoyed by wind turbine sound
Pulsating/throbbing	0.450**	0.387**	Thumping/throbbing	Annoyed by wind turbine sound
Resounding	0.485**	0.321**	Swishing/lashing	p-values
Scratching/squeaking	0.398**	0.290**	Whistling/screeching	
Tonal	0.335**	0.122	Rustling	
Low frequency	0.292**	0.109	Scratching/squeaking	
Lapping	0.262**	0.162*	A low frequency/low pitch sound	
			Resounding	
			Other	

**p<0.01; *p<0.05.

Obr.13 Korelace charakteru hluku a obtěžování [17] a charakteru hluku v závislosti na obtěžování [18]

Z obr.13 je zřejmé, že hlavním problémem hluku VTE je tzv. swishing, tedy svist rotoru přerušovaný průchodem okolo stožáru, zatímco nf hluk je ve Švédsku [17] až na předposledním místě v pořadí a v Nizozemí [18] na 3. - 4. místě v pořadí. Je však možné, že respondenti neměli stejnou míru interpretace charakteru hluku.

Hluk je uváděn jako nejrušivější faktor VTE. Mezi obyvateli bez ekonomického zisku a s ekonomickým ziskem z VTE není rozdíl ve schopnosti slyšet hluk VTE, avšak je podstatný rozdíl v subjektivním posouzení obtěžování hlukem. Procento obtěžovaných roste se zvyšováním hladiny hluku, roste též pravděpodobnost rušení spánku. Obtěžování je vyšší při přímé viditelnosti, ať už z důvodu přímé hlukové expozice nebo zvýšené pozornosti pohledem na VTE. Zajímavé je vyšší obtěžování v zastavěných územích než ve venkovské krajině s dopravním hlukem při shodném hluku pozadí obou typů lokalit navzdory menší viditelnosti VTE. Schopnost slyšet hluk VTE se snižuje s vyšším hlukem z dopravy, avšak obtěžování zůstává stejné, což je dáno spektrálně, časovým průběhem signálu i utišením hluku pozadí v noční době. VTE jsou vnímány jako hlučnější při vyšší rychlosti větru a směru větru k zástavbě a naopak. Mnoho respondentů si myslí, že hluk VTE je větší v noci, i když rychlost větru je nižší. Obtěžování respondenti měli častěji psychické potíže, které již nebyly závislé na hladině hluku, pravděpodobně i z důvodu pocitu bezmocnosti negativní situaci řešit. Obtěžování VTE je svázáno s negativním názorem na VTE obecně a narušení krajinného rázu.

Závěr:

Epidemiologické studie jsou významné pro rozlišení skutečného obtěžování hlukem od psychologických efektů VTE. Poslední studie dostatečně dokumentují situace včetně typu VTE a významně přispívají v rozlišení, jaký typ hluku obyvatele obtěžuje. Jednoznačným závěrem všech studií je, že hlavním problémem hluku VTE je tzv. swishing.

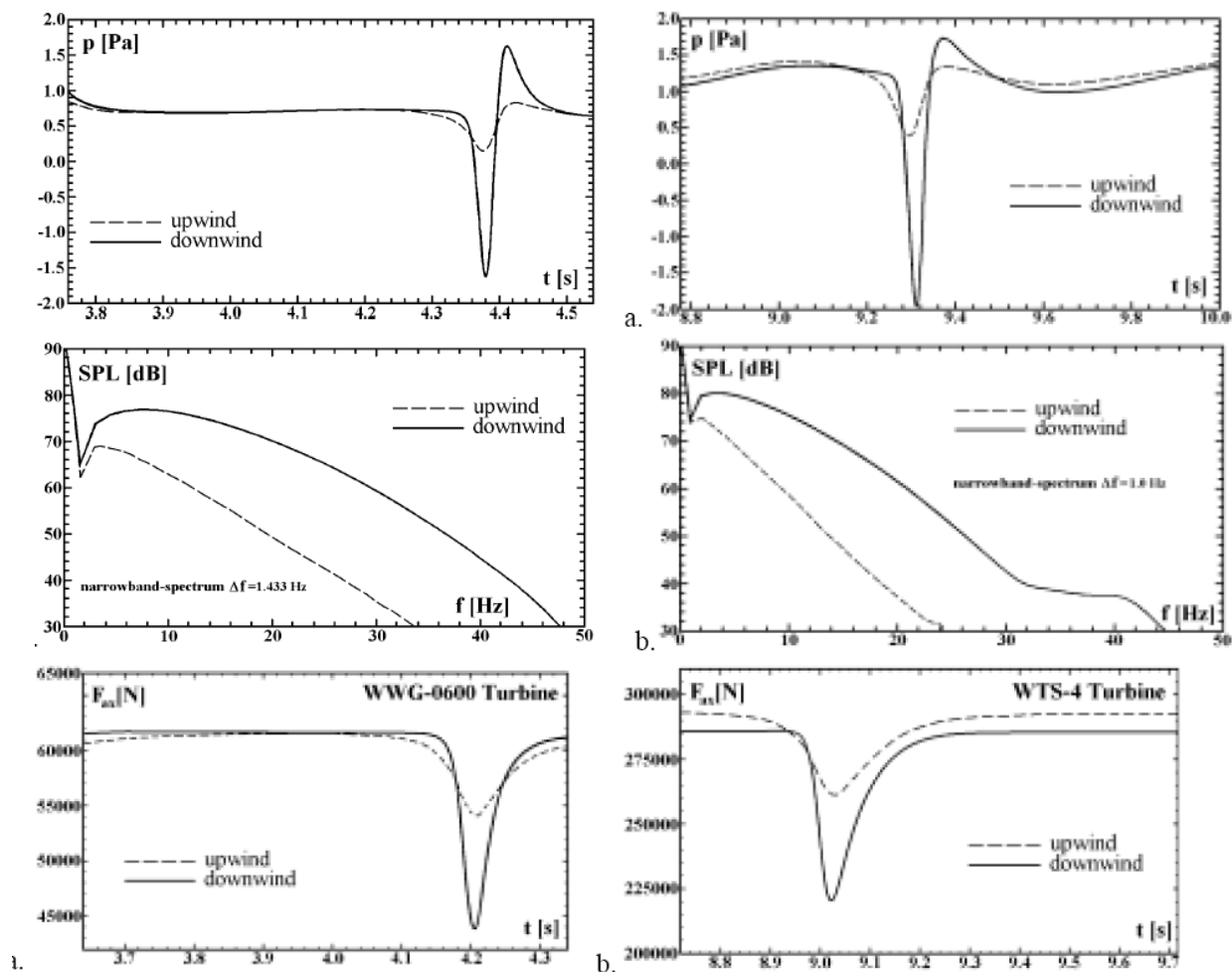
5. Technické studie

Zdroje hluku VTE můžeme rozdělit na 2 kategorie:

- mechanický (převodovka, generátor, pohon natáčení, ventilátory chlazení, pomocné pohony) tyto hluky jsou přirozeně tónové (např. zubová frekvence), mohou se šířit vzduchem i konstrukcí v 80. letech sníženy konstrukcí převodovek, pružným uložením, tlumením gondoly a olejovým chlazením generátoru
- aerodynamický (nf hluk, hluk vstupní turbulence „inflow turbulence“, hluk profilu křídla „airfoil self-noise“)

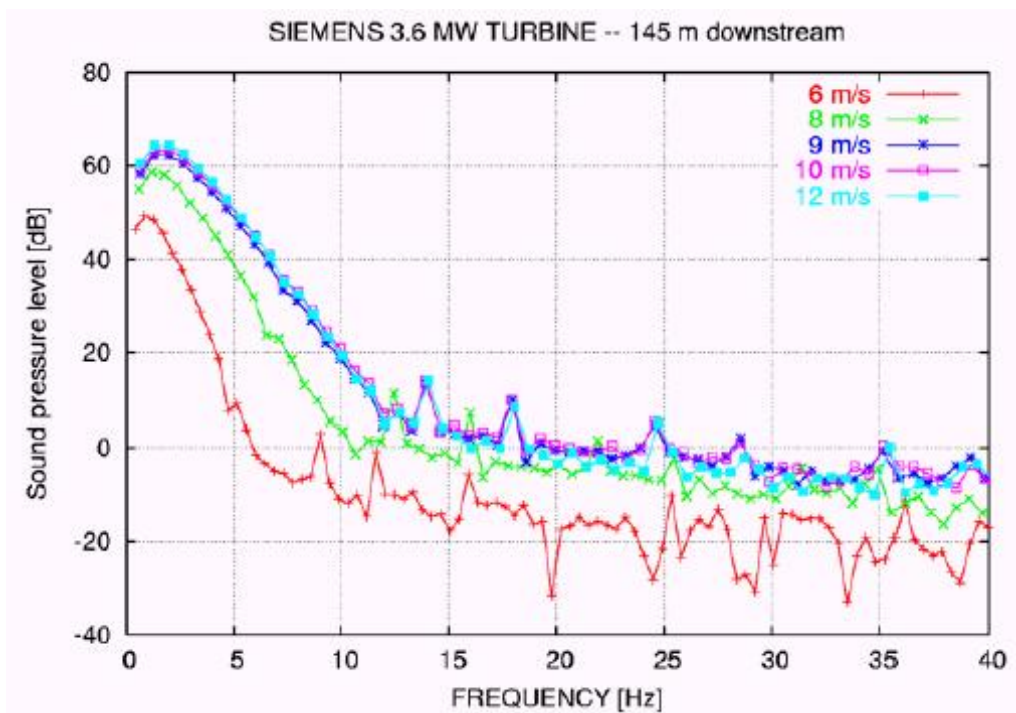
Protože mechanický hluk moderních VTE již není převládajícím hlukem, dále bude rozebírán hluk aerodynamický.

Nízkofrekvenční hluk je důsledkem výškového profilu rychlosti větru, snížení rychlosti větru (vzniku turbulence) za stožárem VTE, případně za jinými VTE. Charakter hluku swishing není přímou emisí nf hluku, ale je amplitudovou modulací (kmitočtem průchodu listů rotoru) hluku s vyššími kmitočty (turbulence na špičce listu rotoru). U tohoto hluku je třeba rozlišit mezi staršími VTE s rotorem po větru „downwind“ a moderními VTE s rotorem proti větru „upwind“:



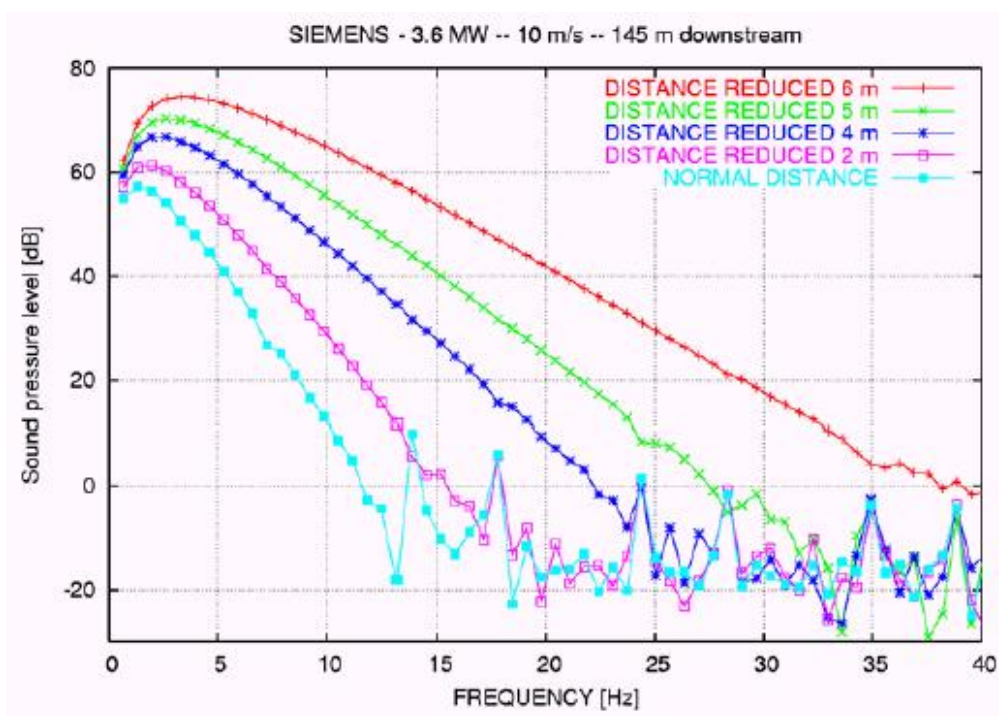
Obr.14 Porovnání časového průběhu akustického tlaku, nf spektra a časového průběhu vztahové síly upwind a downwind VTE [20]

Na obr. 14 je vlevo porovnání výpočtu upwind VTE a přepočtení na downwind podmínky, vpravo výpočet downwind VTE a přepočtení na upwind podmínky. Z časového průběhu akustického tlaku je zřejmé, že downwind VTE má 4x větší pokles tlaku, způsobený turbulencí za stožárem VTE. Tento pokles se projeví vyššími hladinami v nf oblasti hluku až o 20 dB. Změna vztahové síly pak způsobuje i vyšší únavu materiálu. Tyto VTE byly stavěny zejména v USA a Švédsku, opět je tedy třeba rozlišit při posuzování případových studií z USA. Hladiny akustického tlaku a frekvenční rozsah je závislý na rychlosti větru, vzdálenost rotoru od stožáru, rychlosti otáčení rotoru [21]:

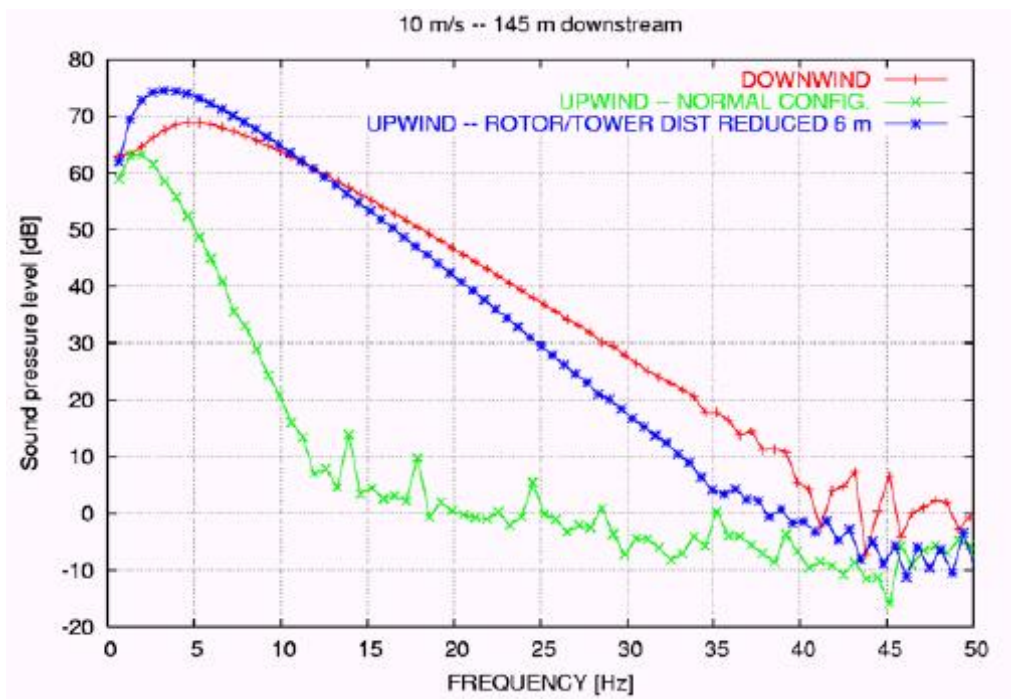


Obr.15 Výpočtové nf spektrum závislosti rychlosti větru ve vzdálenosti 145 m na závětrné straně [21]

Z obr. 15 vyplývá, že při rychlosti větru do 9 ms^{-1} stoupá rychlost otáčení rotoru a tím i nf hluk (infrazvuk).

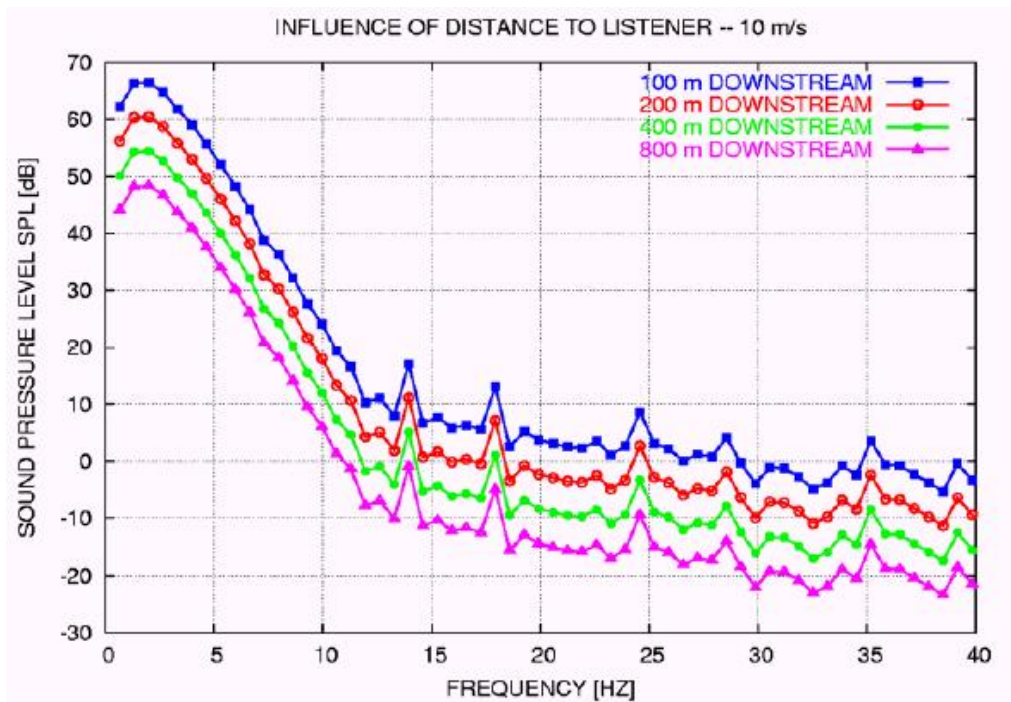


Obr.16 Výpočtové nf spektrum závislosti vzdálenost rotoru od stožáru ve vzdálenosti 145 m na závětrné straně [21]



Obr.17 Porovnání nf spektra menší vzdálenosti rotoru od stožáru a downwind rotoru ve vzdálenosti 145 m na závětrné straně [21]

Z obr. 16 a 17 vyplývá, že snižování vzdálenosti rotoru od stožáru má podobné účinky jako downwind rotor.



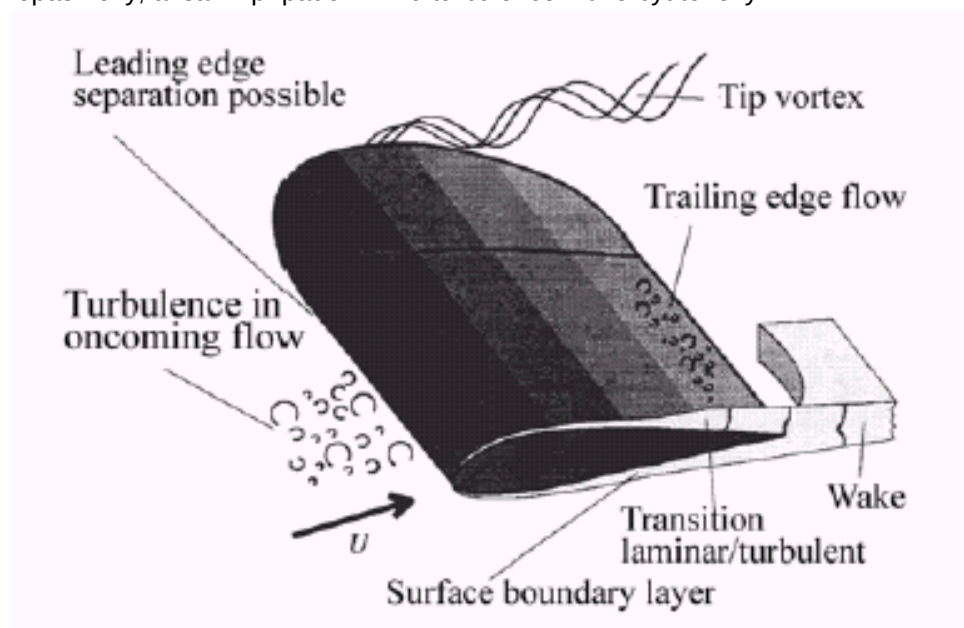
Obr.18 Výpočtové nf spektrum závislosti hladiny akustického tlaku na vzdálenosti na závětrné straně VTE [21]

Tyto výpočty předpokládají snížení hluku o 6 dB v dvojnásobné vzdálenosti. Je vhodné si povšimnout rozdílu mezi výpočtovými hladinami a prahy slyšení pro tyto kmitočty 90 - 100 dB.

Hluk vstupní turbulence „inflow turbulence“ je důsledkem rychlostních fluktuací mezi jednotlivými vrstvami vzduchu (vlivem povrchu země nebo teplotním gradientem), které se projevují vzdušnými víry „eddy“ v proudu vzduchu, procházejícím rotorem. Pokud je vír větší než délka tělvy profilu, vzniká nf hluk stejným mechanismem, jaký je popsán výše, avšak změny nejsou tak velké. Pokud je vír menší, změny jsou pouze lokální a zpravidla nenastávají současně po celé délce listu, vzniká nestálý vysokofrekvenční (vf) hluk.

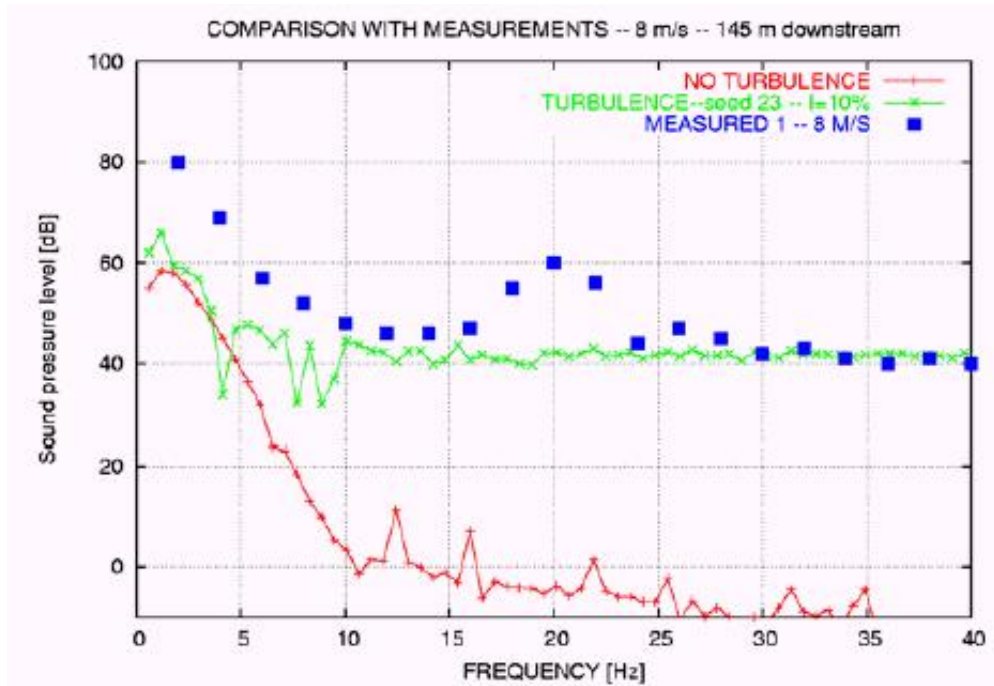
Hluk profilu křídla „airfoil self-noise“ je důsledkem obtékání profilu vzduchem. Tímto hlukem se zabývá aeroakustika a má několik zdrojů:

- hluk turbulentní mezní vrstvy na odtokové hraně „turbulent boundary layer trailing edge noise“ interakce turbulentní vrstvy na obou stranách profilu s odtokovou hranou při malých úhlech náběhu, kdy k profilu přimknutá - neodtržená - turbulentní mezní vrstva přechází do úplavu; hluk je širokopásmový, s maximem na středních frekvencích, významný příspěvek k celkovému hluku
 - hluk odtržené mezní vrstvy „separation stall noise“ se zvyšujícím se úhlem náběhu dochází k odtržení mezní vrstvy na podtlakové straně a vzniku větších rotujících vírů, přecházejících do úplavu; hluk je širokopásmový, s maximem na středních a nižších frekvencích, významný pouze při vysokých úhlech náběhu
 - hluk laminární mezní vrstvy při šíření víru „laminar boundary layer vortex shedding noise“ rychlost větru a délka tělvy profilu se mění po délce listu, což může způsobit rezonanci mezi přechodem laminární a turbulentní mezní vrstvy a odtokovou hranou, vzniká akustická zpětná vazba a nestabilita na přetlakové straně profilu; hluk je tónový na vyšších kmitočtech v závislosti na Reynoldsově číslu a úhlu náběhu, pro moderní VTE s malou úhlovou rychlostí a větším poloměrem náběžné hrany může být za určitých provozních podmínek významný
 - hluk víru na špičce listu „tip vortex formation noise“ na konci listu se vytváří vír jako důsledek přechodu proudu vzduchu z přetlakové strany profilu na stranu podtlakovou, hluk je způsoben interakcí tohoto víru a odtokové hrany, závisí na geometrii špičky listu, pro moderní VTE není významný
 - hluk na tupé odtokové hraně při šíření víru „trailing edge bluntness vortex shedding noise“ vzniká z víru na tupé odtokové hraně, zejména v blízkosti špičky listu rotoru; hluk kombinace širokopásmový a tónový na středních a vyšších kmitočtech
- Hluk se také může zvýšit nečistotami na povrchu profilu - zářezy, škrábanci, hmyzem. Obecně je hluk širokopásmový, avšak v případě vzniku turbulence může být tónový.



Obr.19 Schéma aerodynamického proudění podél listu rotoru VTE [22]

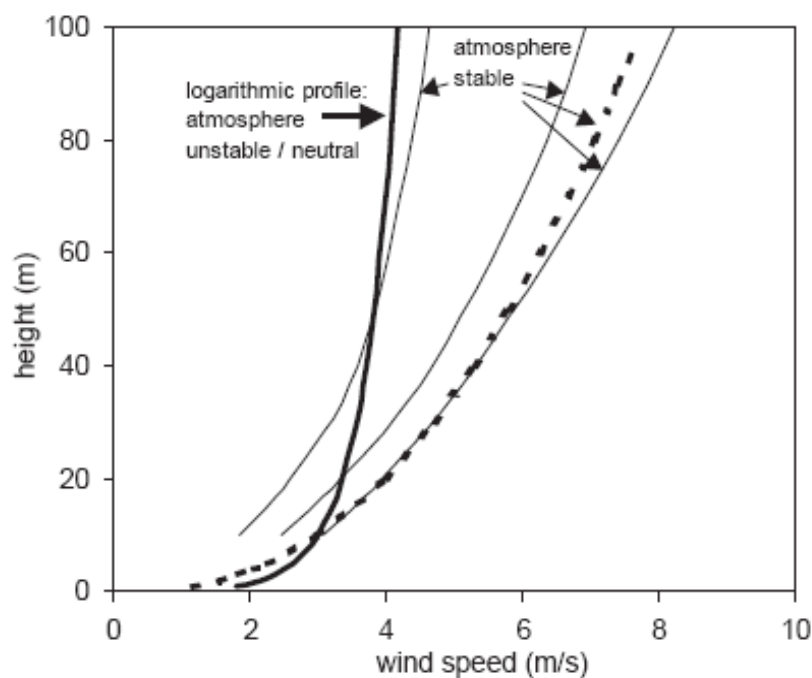
Souběh všech zdrojů lze porovnat s měřením hluku:



Obr.20 Porovnání výpočtového nf spektra bez a s vlivem turbulence a měřením hluku ve vzdálenosti 145 m na závětrné straně [21]

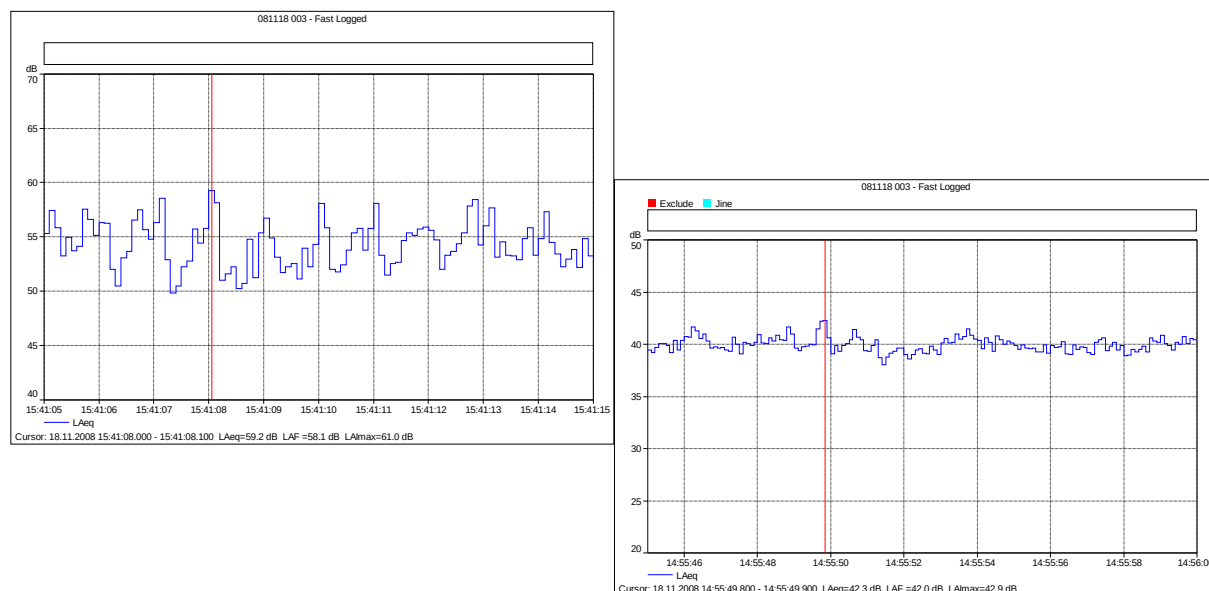
Z obr. 20 je patrné, že hladiny akustického tlaku výpočtu s vlivem turbulence jsou v souladu s měřením. Odchyly na nižších kmitočtech jsou způsobeny hlukem pozadí a v okolí 20 Hz pohonem.

Výškový profil rychlosti větru není konstantní, mění se v průběhu denní doby. Při měření se předpokládá logaritmický profil, van den Berg [23] však zjistil, že v noční době při stabilním proudění se tento profil mění:



Obr.21 Porovnání výškového profilu rychlosti větru v denní době a v noční době [23]

Z obr. 21 vyplývá, že ve výšce moderních VTE je již výrazný rozdíl mezi rychlostmi větru v denní a noční době. Větší rozdíl ve výškovém profilu rychlosti větru při stabilním proudění v noční době znamená také větší změny úhlu náběhu a možnost souběhu pulzů amplitudové modulace více VTE ve větrném parku [24, 25, 26]. V případě měření rychlosti větru v 10 m výšky před VTE by mohla vzniknout odchylka cca 5 dB, kterou popisuje Rudolphi [27]. V případě měření rychlosti větru ve výšce rotoru nebo stanovení z výkonové křivky VTE výsledky měření hluku nezávisí na denní době.



Obr.22 Porovnání časové změny hladiny akustického tlaku ve vzdálenosti 120 m a 600 m

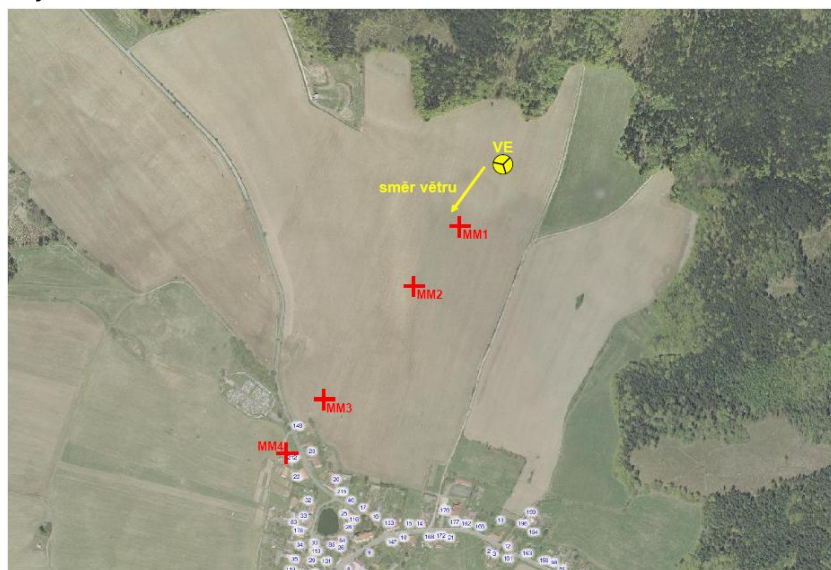
Změny hladiny akustického tlaku v čase dosahují v blízkosti VTE 10 dB, ve vzdálenosti nejbližší obytné zástavby řádově jednotky dB. Práce [7] odvozuje na základě prací prof. Zwickera práh detekce amplitudové modulace cca 3 dB, pro nf hluk (0 - 200 Hz) cca 3.5 dB. Swishing u starších VTE (75 kW) je nejvýraznější ve frekvenčním rozsahu 500 - 2000 Hz s modulačním kmitočtem cca 2 Hz, u novějších VTE (600 kW - 1.3 MW) ve frekvenčním rozsahu 350 - 700 Hz s modulační frekvencí cca 1 Hz. Při stabilním větrném proudění je práh detekce amplitudové modulace při hluku pozadí cca 2.5 dB menším než nekorigovaný hluk „total noise“ VTE nebo při korigovaném hluku VTE cca 1 dB menším než hluk pozadí. Jsou uvažovány hladiny akustického tlaku A v kritickém pásmu.

Závěr:

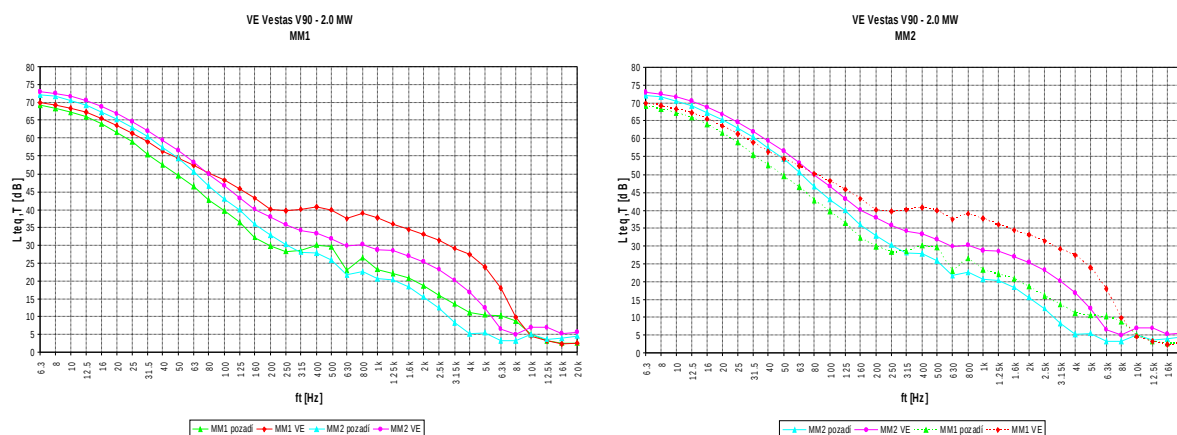
U moderních VTE je již mechanický hluk soustrojí zanedbatelný. Přímá emise nf hluku je relativně malá u konstrukcí VTE s rotorem proti větru „upwind“. Nejrušivější složka aerodynamického hluku, swishing, vzniká amplitudovou modulací (kmitočtem průchodu listů rotoru) hluku s vyššími kmitočty (turbulence na špičce listu rotoru). U VTE s vyšším stožárem a větším průměrem rotoru je tento efekt větší v důsledku větších rozdílů ve výškovém profilu rychlosti větru a stabilního proudění v noční době. Amplitudová modulace může být maskována, lze stanovit práh detekce pro stabilní větrné proudění.

6. Měření hluku

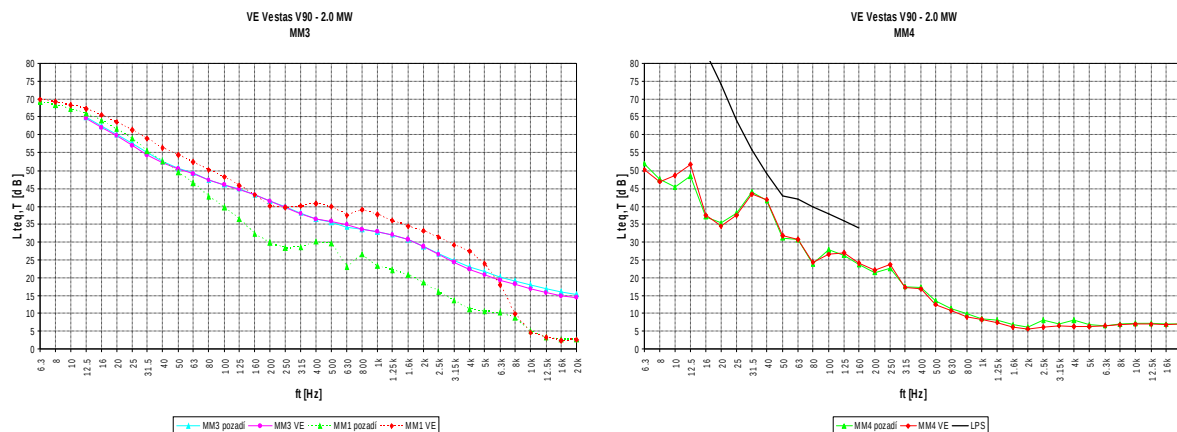
V letech 2007 - 2008 bylo provedena řada měření v chráněném venkovním i vnitřním prostoru moderních VTE o výkonu 2 MW. Ideální měření je měření v několika vzdálenostech po směru větru od VTE k nejbližší obytné zástavbě:



Obr.23 Měření hladiny akustického tlaku VTE Vestas V90 - 2 MW ve vzdálenostech 150 m, 300 m, 575 m a v chráněném vnitřním prostoru staveb



Obr.24 Třetinooktávová spektra VTE Vestas V90 - 2 MW ve vzdálenostech 150 m a 300 m



Obr.25 Třetinooktávová spektra VTE Vestas V90 - 2 MW ve vzdálenosti 575 m a chráněném vnitřním prostoru staveb

Z obr. 24 a 25 vyplývá, že nf hluk je maskován ve vzdálenosti 150 m do cca 40 Hz, ve vzdálenosti 300 m do cca 80 Hz, ve vzdálenosti 575 m je již hluk VTE v celém rozsahu frekvenčního spektra shodný s hlukem pozadí, tzn. není subjektivně vnímatelný, v chráněném vnitřním prostoru staveb je hluk VTE též shodný s hlukem pozadí s drobným rozdílem na kmitočtech 10 - 12.5 Hz a je zcela pod křivkou prahu slyšení L_{PS} (černá křivka).

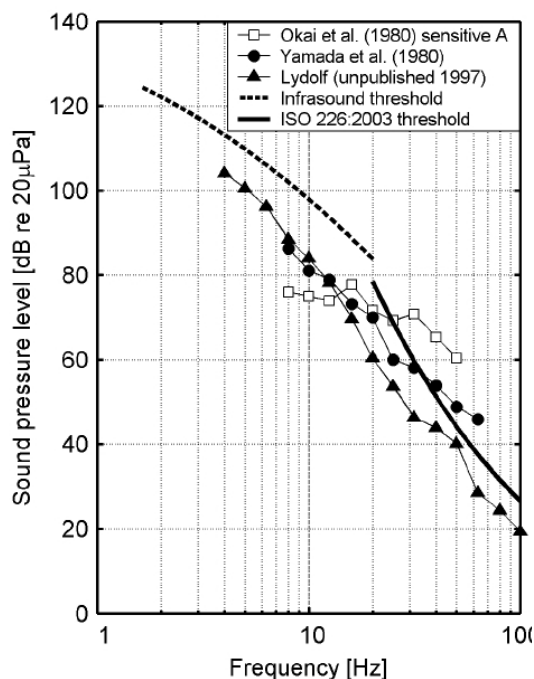
Závěr:

U moderních VTE v ČR měření infrazvuku a nf hluku v chráněném venkovním a vnitřním prostoru staveb neprokázala vliv infrazvuku ani nf hluku. Hluk VTE v nf oblasti je způsoben hlukem pozadí. Detailněji je měření VTE popsáno v článku [Měření a posuzování hluku větrných elektráren](#) [35].

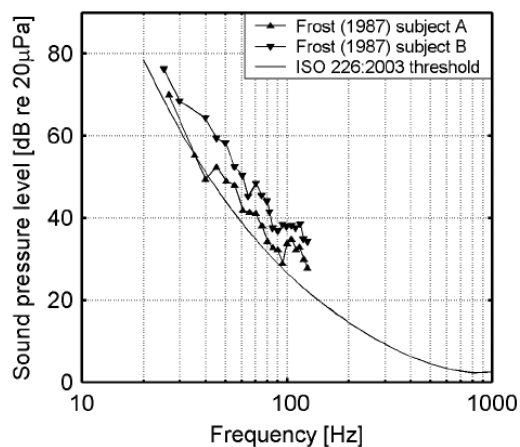
7. Fyziologické studie

Studie prahu slyšení jsou prováděny pomocí sinusových tónů s dostatečnou délkou trvání, aby časová integrace ucha neměla vliv na výsledek. Většina studií je prováděna ve volném nebo přibližně volném poli s elektrodynamickými měniči, např. Robinson a Dadson (1956, 25 Hz - 15 kHz, až 120 osob), Watanabe a Möller (1990, 25 - 1000 Hz, 12 osob), Takeshima (1994, 31.5 Hz - 20 kHz, až 69 osob). Na nejnižších kmitočtech je obtížné vyrobit dostatečně vysokou hladinu akustického tlaku ve volném poli, stěny bezdovukových komor se stávají odrazivé. Důsledkem toho je, že neexistují studie pro kmitočty nižší než 25 Hz. Další badatelé použili tlakovou komoru svázanou s vnějším uchem a elektrodynamický měnič, např. Corso (1958, 5 - 200 Hz, 15 osob), Yeowart (1967, 1.51 Hz, až 10 osob monoaurálně), Yeowart a Evans (1974, 5 - 100 Hz, 5 osob, binaurálně). Jiní badatelé použili tlakovou komoru pro celého posluchače buzenou elektrodynamickými reproduktory, např. Whittle (1972, 3.15 - 50 Hz, až 58 osob), Yeowart a Evans (1974, 2 - 20 Hz, 12 osob), Okai (1980, 8 - 50 Hz, 28 osob), Yamada (1980, 8 - 63 Hz, 24 osob), Nagai (1982, 2 - 40 Hz, 62 osob), Landström (1983, 4 - 25 Hz, 10 osob), Watanabe a Möller (1990, 4 - 125 Hz, 12 osob), Watanabe (1993, 5 - 40 Hz, 20 osob) a Lydolf a Möller (1997, 20-100 Hz, 14 + 9 osob). Výsledkem těchto studií jsou křivky stejné hlasitosti a prahu slyšení, normované v ČSN ISO 226. Práh slyšení je definován jako hladina akustického tlaku, při které za stanovených podmínek osoba uvádí 50% správných zjištění při opakovaných experimentech. Sluch je méně citlivý se snižujícím se kmitočtem. Vnímání tónů a jeho výšky na 20 Hz mizí, dále je tón vnímán jako přerušovaný, pod 10 Hz jako jednotlivé pulzy a vnímání tlaku v uších. Při hladinách o 20 - 25 dB vyšších než práh slyšení je možné vnímat vibrace na různých částech těla, v dolní části páteře, na stehnech, lýtkách, tlaku v horní části hrudi a hrdle. Předpokládá se, že práh slyšení je podobný i pro nesinusové hluky. Práh slyšení je stejný ve volném i tlakovém poli. Prahy slyšení jsou podobné pro muže i ženy, zhoršení stářím nastává po 50 letech, binaurální slyšení je o 3 dB citlivější než monoaurální, směrodatná odchylka prahu v populaci je cca 5 dB (o tento rozdíl jsou nižší směrné křivky oproti prahu slyšení v ČSN ISO 226). Jsou důkazy o zvláště citlivých jedincích s prahy až o 20 - 25 dB nižšími (obr. 26). Práh také nemusí být plynulý, ale může mít zvýšenou citlivost na některých kmitočtech. Frost měřil práh slyšení dvou osob se stejným audiogramem na kmitočtech 250 - 100 Hz s rozdílem 15 dB na kmitočtu 40 Hz (obr. 27). Landström zkoumal 10 osob slyšících a 10 neslyšících s podobnými prahy vibrotaktilního vnímání, u slyšících osob došlo k snížení vnímání při expozici hlukem větším než prahová hladina (obr.28) [28, 29]. Sluchový orgán je tedy považován za nejcitlivější orgán pro vnímání nf hluku. Vnímaná intenzita nf hluku roste mnohem rychleji než u vf hluku, viz zhuštění křivek stejné hlasitosti v nf oblasti. Souhrnem výše uvedených faktů tedy je, že nf hluk jedna osoba nemusí slyšet vůbec (má vyšší práh slyšení), zatímco druhá může být velmi obtěžována (má nižší práh slyšení).

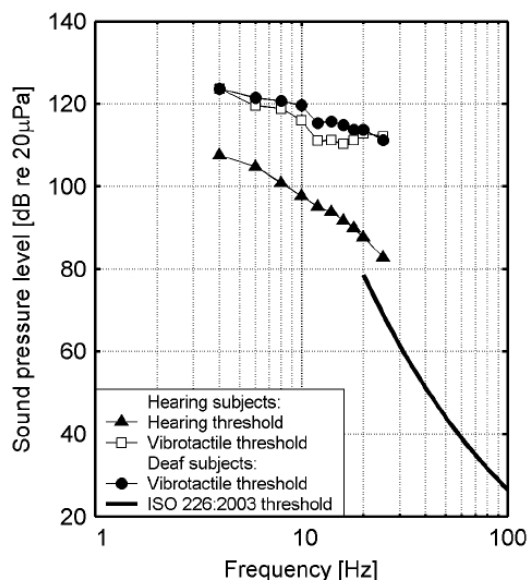
Nejnovější fyziologické experimenty již využívají zvuku přímo nahraného v domech stěžovatelů. C. S. Pedersen, Möller a Persson Waye [30] zkoumali, zda obtěžování způsobuje reálný zvuk nebo fyzikálně neexistující zvuk, tzv. nf tinnitus. Výsledky ukázaly, že část stěžovatelů je obtěžována reálným zvukem o kmitočtech 20 - 180 Hz a část trpí nf tinnitem, vnímaným na kmitočtech 40 - 100 Hz. Žádného ze stěžovatelů neobtěžoval infrazvuk a žádný neměl zvýšenou citlivost vnímání nf hluku.



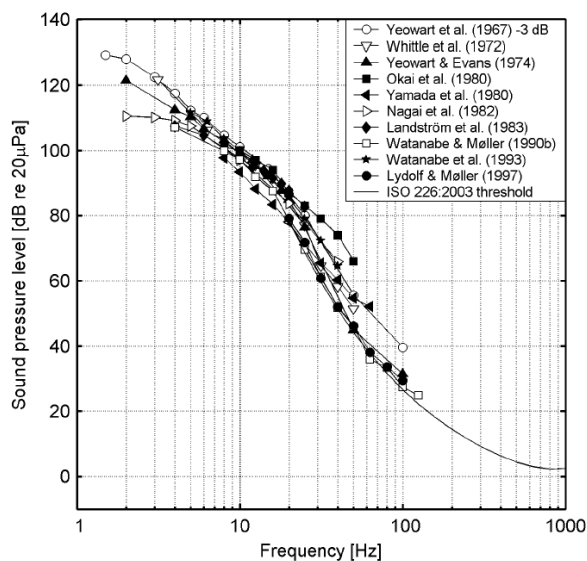
Obr.26 Práh slyšení citlivých jedinců [28]



Obr.27 Práh slyšení osob se stejným audiogramem



Obr. 28 Prahy slyšících a neslyšících osob [28]



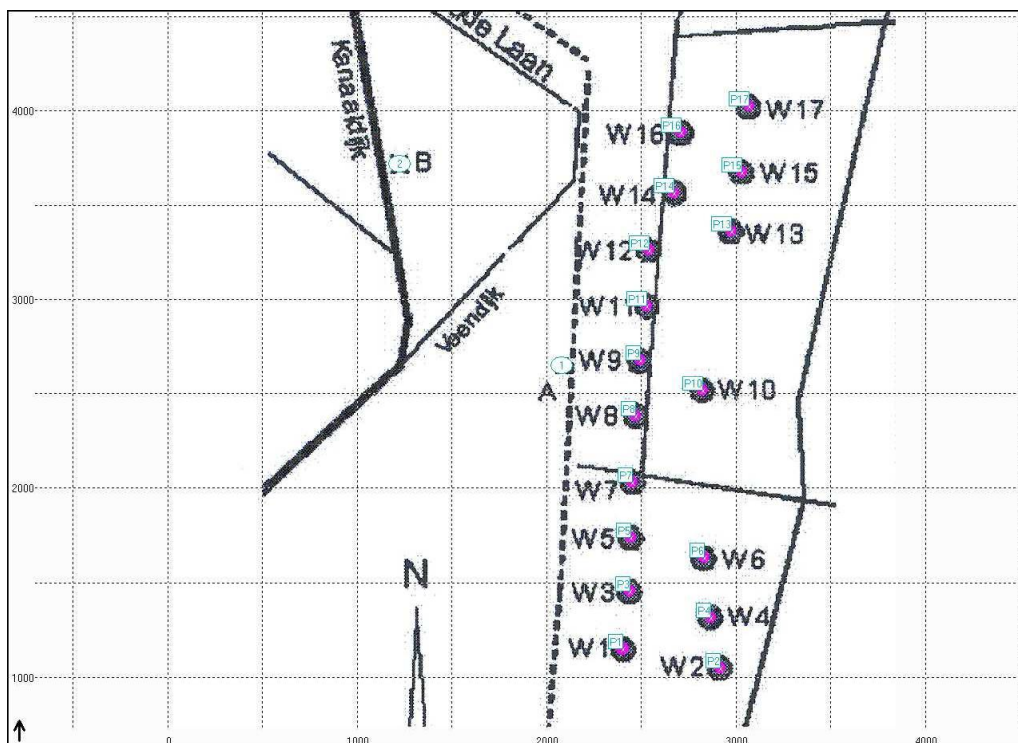
Obr.29 Prahy slyšení nf hluku [28]

Závěr:

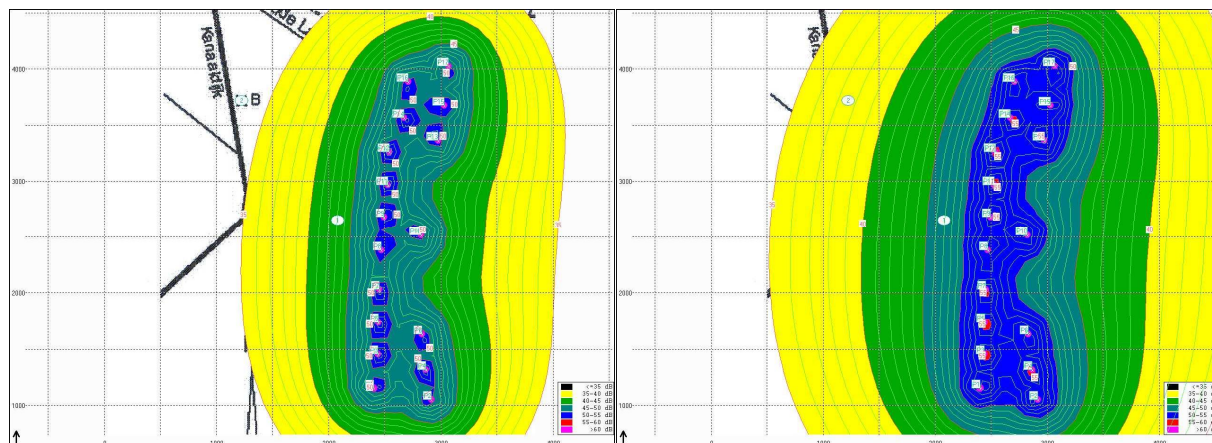
Fyziologické studie prokazují relativně dobrou shodu střední hodnoty prahu slyšení. Rozptyl střední hodnoty však může být větší než směrodatná odchylka, uvažovaná ve směrných křivkách, a je velmi individuální. Vzhledem k rychlému nárůstu obtěžování v nf oblasti může dojít k velmi rozdílnému vnímání mezi dvěma osobami.

8. Výpočtové akustické studie

Práce van den Berga [23 - 26] se opírají o měření v lokalitě Rhede na pomezí Německa a Nizozemí. V lokalitě bylo instalováno 17 VTE Enercon E-66 1.8 MW na stožáru o výšce 98 m s hladinou akustického výkonu $L_{WA} = 103$ dB. Nejbližší obytná zástavba je vzdálena cca 400 m. Výpočet hlukové studie v imisním místě 1 $L_{Aeq,T} = 43$ dB splňuje německý i nizozemský limit. Rozdíl výpočtu od měření za standardních podmínek je 0.1 - 1.2 dB, zvýšení o 2 - 5 dB při stabilním proudění způsobuje swishing.



Obr.30 Pohled na lokalitu Rhede



Obr.31 Porovnání výpočtu s pohltivým (vlevo) a odrazivým (vpravo) terénem

Výpočtem lze zjistit, že výpočet pro pohltivý terén odpovídá výpočtu van den Berga $L_{Aeq,T} = 43$ dB. Avšak výpočet pro odrazivý terén $L_{Aeq,T} = 47$ dB. Rozdíl přibližně odpovídá změně hluku při přechodu z nestabilního do stabilního proudění. V následující tabulce jsou uvedeny rozdíly ve výpočtech při změně vstupních parametrů:

standard	Hluk+ [dB]	jíný parametr	Hluk+ [dB]	rozdííl [dB]
odrazivý	43.0	pohtivý	40.4	2.6
10 °C, 70 %	43.0	15 °C, 50 %	42.7	0.3
Hluk+	43.0	LimA	42.2	0.8
standard	LimA [dB]	jíný parametr	LimA [dB]	rozdííl [dB]
3D s vrst.	42.2	2D, bez vrst.	42.5	-0.3
G 0	42.2	G 0.5	40.2	2.0
G 0	42.2	G 1	38.3	3.9

Up- and downwind propagation

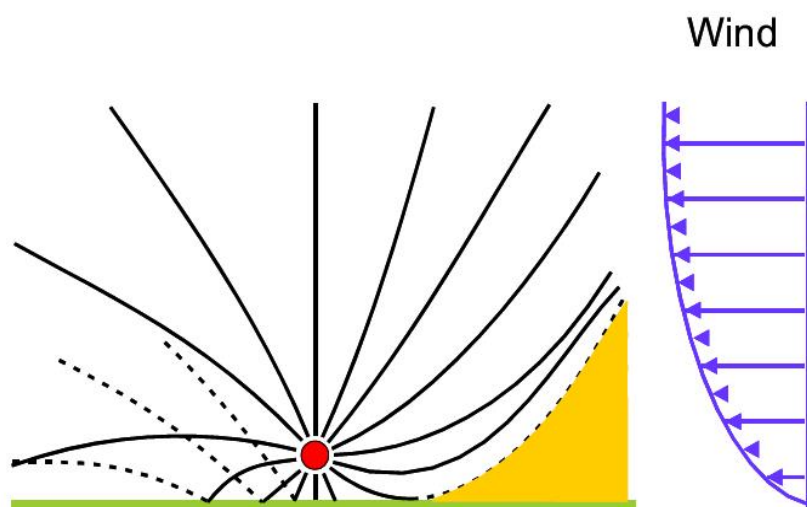


Figure 1
Illustration of wind influence on sound propagation:
Upwind of the source a shadow zone (hatched) occurs.

Obr.32 Šíření hluku VTE podle směru větru [31]

Při šíření hluku na velké vzdálenosti se projevuje stíněná zóna na návětrné straně VTE a větší ohyb a odraz paprsků na závětrné straně VTE. Doporučená metodika ČSN ISO 9613-2 toto šíření nezohledňuje. V některých případech meteorologických podmínek (teplotní inverze, odraz od nízkých vrstev atmosféry) dochází k jevu zvanému „channelling“, změně sférického šíření zvuku (-6 dB se zdvojnásobením vzdálenosti) na cylindrické (-3 dB se zdvojnásobením vzdálenosti) [32].

Závěr:

Speciální výpočtová metodika pro VTE v ČR neexistuje, postupuje se stejně jako u průmyslových zdrojů. Metodika nezohledňuje topograficky a meteorologicky podmíněné faktory, ovlivňující šíření hluku. Největší rozdíl ve výpočtu způsobuje stanovení pohltivosti terénu. Výpočet by měl obsahovat jistou rezervu na meteorologicko-topografické vlivy, např. formou odrazivého terénu. Pokud tato rezerva bude malá, je pravděpodobnější, že i při střední hodnotě splňující hygienický limit může nezanedbatelné procento situací tento limit překročit. Z důvodu šíření hluku je vhodné provádět měření při podmínkách šíření zvuku příznivých - směru větru od VTE k obytné zástavbě do 30°.

9. Závěr

Hygienický limit v ČR $L_{Aeq,1h} = 40$ dB v chráněném venkovním prostoru staveb, stejně jako hodnoty prahů slyšení jsou vhodným systémem pro posuzování vlivu hluku VTE na veřejné zdraví. Je možné uvažovat o zpřesnění limitu jeho navázáním na rychlost větru 8 ms^{-1} analogicky dánskému nebo nizozemskému systému, např. + 2 dB pro 10 ms^{-1} .

Případové i epidemiologické studie by měly rozlišovat konstrukci a parametry VTE.

Technické studie by měly pomoci vyřešit problémy s aerodynamickým hlukem VTE - amplitudovou modulaci - swishing, hluk vstupní turbulence „inflow turbulence“ a hluk turbulentní mezní vrstvy na odtokové hraně „turbulent boundary layer trailing edge noise“.

Výpočtové studie by měly zohlednit výše uvedené vlivy, které mohou zvýšit výsledné hodnoty, buď použitím odrazivého terénu nebo korekcí 2 dB na amplitudovou modulaci - swishing.

V posledních měsících se objevily nové informace, spočívající v možném vysvětlení zvýšeného obtěžování VTE mechanismem vibroakustické nemoci [33]. Proti tomuto mechanismu mluví obyvateli popisovaný směrový charakter obtěžování, nelze ho však vyloučit při přílišné blízkosti VTE k obydlí. Jiným mechanismem by mohlo být ovlivnění rovnovážného systému [34], avšak prozatím je v rozporu s fyziologickými výzkumy. I když se tyto mechanismy zatím nezdají pro vnímání podstatné, budoucím výzkumem nelze vyloučit změnu v pohledu na vnímání vlivu VTE na zdraví obyvatel.

Použitá literatura:

- [1] Guidelines for Community Noise, edited by Birgitta Berglund, Thomas Lindvall, Dietrich H Schwela, WHO, 1999
<http://www.who.int/docstore/peh/noise/Comnoise-4.pdf>
- [2] Night Noise Guidelines for Europe, European Centre for Environment and Health a WHO, 2007
<http://www.who.int/docstore/peh/noise/Comnoise-4.pdf>
- [3] ETSU-R-97
<http://www.berr.gov.uk/files/file20433.pdf>
- [4] "Low frequency noise, infrasound and vibration in the environment" (In Danish). Information from the Danish Environmental Protection Agency no. 9/1997
Orientering fra Miljøstyrelsen, 9/1997. Lavfrekvent støj, infralyd og vibrationer i eksternt miljø
<http://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/1997/87-7810-830-6/pdf/87-7810-830-6.pdf> (dánsky)
<http://www2.mst.dk/udgiv/Publications/2002/87-7944-955-7/pdf/87-7944-956-5.pdf> str.23(anglicky)
- [5] Proposed criteria for assessment of low frequency noise disturbance, DEFRA NANR45 Project report
<http://www.defra.gov.uk/ENVIRONMENT/noise/research/lowfrequency/pdf/nanr45-criteria.pdf>
- [6] Nařízení vlády č.148/2006 Sb., o ochraně před nepříznivými účinky hluku a vibrací
<http://aplikace.mvcr.cz/archiv2008/sbirka/2006/sb051-06.pdf>
- [7] Low Frequency Noise from Large Wind Turbines, DELTA 2008
[http://www.deltainspire.dk/C1256ED60045E95F/sysOakFil/Lavfrekvens_publ_4/\\$File/EFP06-LF%20Noise-Noise%20monitoring%20at%20H%C3%B8vs%C3%B8re%20AV%20139%2008.pdf](http://www.deltainspire.dk/C1256ED60045E95F/sysOakFil/Lavfrekvens_publ_4/$File/EFP06-LF%20Noise-Noise%20monitoring%20at%20H%C3%B8vs%C3%B8re%20AV%20139%2008.pdf)
- [8] The Measurement of Low Frequency Noise at Three UK Wind Farms, Hayes McKenzie partnership DTI 2006
<http://www.berr.gov.uk/files/file31270.pdf>
<http://www.berr.gov.uk/files/file31272.pdf> (obrázek)
- [9] Amanda Harry: Wind turbines, noise and health, 2007
<http://www.berr.gov.uk/files/file31270.pdf>
- [10] Barbara Frey, Peter Hadden: Noise radiation from wind turbines installed near homes: effects on health, 2007
http://www.windturbinenoisehealthhumanrights.com/wtnhhr_june2007.pdf
- [11] Nina Pierpoint: Wind Turbine syndrome, 2009
<http://www.windturbinesyndrome.com/?> (více dokumentů)
<http://www.windturbinesyndrome.com/wp-content/uploads/2008/10/wts-for-non-clinicians-3-4-09-with-pics.pdf>
<http://www.windturbinesyndrome.com/wp-content/uploads/2008/10/references-3-4-09.pdf> (odkazy)
- [12] George W. Kamperman, Richard R. James: The 'how to' guide to criteria for siting wind turbines to prevent health risks from sound, 2008
<http://www.windaction.org/documents/17229>
- [13] Dick Bowdler: ETSU-R-97 Why it is Wrong, 2005
http://www.viewsofscotland.org/library/docs/ETSU-R-97_%20Why_%20it_%20is_%20Wrong.pdf
- [14] Eja Pedersen: Noise annoyance from wind turbines - a review, 2003
<http://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/620-5308-6.pdf>
- [15] Eja Pedersen, Kerstin Persson Waye: Perception and annoyance due to wind turbine noise - a dose - response relationship, 2004
http://www.viewsofscotland.org/library/docs/WT_Perception_and_Annoyance_Pedersen_Dec04.pdf
- [16] Eja Pedersen, Kerstin Persson Waye: Wind turbine noise, annoyance and self-reported health and well-being in different living environments, 2007
<http://www.wind-watch.org/documents/wp-content/uploads/pedersen-windturbinenoiseannoyance-20070310.pdf>

- [17] Eja Pedersen: Human response to wind turbine noise - perception, annoyance and moderating factors, 2007
http://gupea.ub.gu.se/dspace/bitstream/2077/4431/1/Pedersen_avhandling.pdf
- [18] Frits van den Berg, Eja Pedersen, Jelte Bouma, Joel Bakker: Project WINDFARMperception Visual and acoustic impact of wind turbine farms on residents, 2008
<http://www.rug.nl/wewi/deWetenschapswinkels/natuurkunde/publicaties/WFp-final-1.pdf>
- [19] Torben Holm Pedersen: The "Genlyd" Noise Annoyance Model
[http://www.delta.dk/C1256ED60045E95F/sysOakFil/Rapaku%20-%20The%20Genlyd%20Annoyance%20Model%20/\\$File/av110207-%20The%20Genlyd%20Annoyance%20Model.pdf](http://www.delta.dk/C1256ED60045E95F/sysOakFil/Rapaku%20-%20The%20Genlyd%20Annoyance%20Model%20/$File/av110207-%20The%20Genlyd%20Annoyance%20Model.pdf)
- [20] Horia Dumitrescu, Florin Frunzulica: Low Frequency Noise Prediction of Wind Turbines, 2005
http://www.acad.ro/sectii2002/proceedings/doc_2005_1/06Dumitrescu.pdf
- [21] Helge Aagard Madsen: Low Frequency Noise from MW wind turbines - mechanisms of generation and its modeling, 2008
<http://130.226.56.153/rispubl/reports/riso-r-1637.pdf>
- [22] Anthony L. Rogers, James F. Manwell, Sally Wright: Wind Turbine Acoustic Noise, 2006
http://www.ceere.org/rerl/publications/whitepapers/Wind_Turbine_Acoustic_Noise_Rev2006.pdf
- [23] Frits van den Berg: Effects of the wind profile at night on wind turbine sound, 2003
http://ninapierpont.com/pdf/van_den_Berg,_Effects_of_wind_profile_at_night.pdf
- [24] Frits van den Berg: Do wind turbines produce significant low frequency sound levels?, 2004
http://www.viewsofscotland.org/library/docs/LF_turbine_sound_Van_Den_Berg_Sep04.pdf
- [25] Frits van den Berg: The Beat is Getting Stronger: The Effect of Atmospheric Stability on Low Frequency Modulated Sound of Wind Turbines, 2005
http://ninapierpont.com/pdf/van_den_Berg,_The_beat_is_getting_stronger.pdf
- [26] Frits van den Berg: The sounds of high winds: the effect of atmospheric stability on wind turbine sound and microphone noise, 2006
http://dissertations.ub.rug.nl/FILES/faculties/science/2006/g.p.van.den.berg/17_thesis.pdf
- [27] Erik Rudolphi: Wind speed measurements below hub height give poor accuracy, 2003
http://www.viewsofscotland.org/library/docs/Wind_turbine_noise_emission_Rudolphi_May03.pdf
- [28] Henrik Möller, Christian Sejer Pedersen: Hearing at low and infrasonic frequencies, 2004
http://www.noiseandhealth.org/temp/NoiseHealth62337-5319563_144635.pdf
- [29] Geoff Leventhall: A Review of Published Research on Low Frequency Noise and its Effects, 2003
<http://www.defra.gov.uk/environment/noise/research/lowfrequency/pdf/lowfreqnoise.pdf>
- [30] Christian Sejer Pedersen, Henrik Möller, Kerstin Persson Waye: A study of twenty-one cases of low-frequency noise complaints, 2008
<http://intellagence.eu.com/acoustics2008/acoustics2008/cd1/data/articles/002204.pdf>
- [31] Bo Sondergaard: Propagation of Noise from Wind Turbines on-shore and off-shore, 2005
http://www.nationalwind.org/events/siting/presentations/sondergaard-noise_propagation.pdf
- [32] Jörgen Jakobsen: Infrasound Emission from Wind Turbines, 2005
<http://www.hayswind.com/info/low%20frequency%20noise%20-%20jakobsen.pdf>
- [33] Nuno Castelo Branco, Mariana Alves-Pereira: Vibroacoustic Disease, 2004
http://www.wind-watch.org/documents/wp-content/uploads/branco__alves-pereira_vibroacoustic_disease.pdf
- [34] Neil McAngus Todd, Sally Rosengren, James Colebatch: Tuning and sensitivity of the human vestibular system to low-frequency vibration, 2008
<http://batr.net/cohoctonwindwatch/Todd%20et%20al%20Human%20vestibular%20system%20%20low%20frequency%20vibration%202008.pdf>
- [35] Aleš Jiráská: Měření a posuzování hluku větrných elektráren, 2004, revize 2009
<http://www.zupu.cz/index.php?pid=260>