

Tuulikuheli tajumine

Eja Pedersen – Halmstadi Ülikool ning Töö- ja Keskkonnameditsiin, Göteborgi ülikool

Jens Forssén – Rakendusakustika, Chalmersi Tehnikaülikool

Kerstin Persson Waye – Töö- ja keskkonnameditsiin, Göteborgi Ülikool

Sisukord

Kokkuvõte

Sammanfattning (rootsi keeles)

1. Taust

2. Projekti eesmärgid

3. Projektirühm

4. Meetodid

4.1. Uurimispiirkonnad

4.2. Epidemioloogilised uurimused

4.3. Päevikuuurimus

4.4. Heli- ja ilmastikumõõtmised

4.5. Heli levimise modelleerimine

5. Tuulikuheli tajumine

5.1. Seos helitaseme, heli kuulmise võimalikkuse ja häirituse vahel

5.2. Tuulikuheli tajumist mõjutavad situatsioonilised tegurid

5.3. Tuulikumüra tajumisega seotud individuaalsed tegurid

5.4. Mõjutavate tegurite mitme muutujaga analüüsid

5.5. Tuulikuheli mõju tervisele ja heaolule

5.6. Tuulikuhest tingitud häirituse seos tervise ja heaoluga.

6. Kui sageli kuulatakse tuulikuheli

7. Heli levimine

8. Arutelu ja järeldused

9. Kasutatud kirjandus

10. Aruanded projektiperioodil 2006–2008

Kokkuvõte

Tuulikute püstitamisele eelneb keskkonnamõju hinnang tuulikute mõjust lähielanikele. Üheks hinnatavaks mõjuks on heli. Seega on olulised teaduspõhised teadmised sellest, kuidas tuulikuheli tajutakse, et välistada selle heli kahjulikku mõju antud piirkonna elanike tervisele. Käesolevas ettekandes esitatakse kahe varasema väliuurimuse, milles uuriti tuulikuheli tugevuse ja tajumise seost elamute juures, tulemuste analüüs. Selles kirjeldatakse ka seda seost mõjutavaid tegureid. Päevikuuurimuses teatasid vastanud, kui sageli nad kodus olid, ja kui olid, siis kas olid õues ja kas kuulsid tuulikuid. Käesoleva uurimuse eesmärgiks oli kirjeldada, kui sageli ja millistes ilmastikutingimustes oli tuulikuheli kuulda. Täiendavas väliuurimuses uuriti tänapäeval kasutatava helilevimudeli täpsust, võrreldes pikaajaliste helimõõtmiste tulemusi erinevate mudelite abil arvatud väärtustega. Käesolevas uurimuses uuriti ka, kas muutused ilmastikutegurites mõjutasid heli levikut niivõrd, et neid tuleks arvestada helitasemearvutustes.

Kahe väliuurimuse ühisanalüüsid kinnitavad ja toetavad varesitatud andmeid. Nii tuulikuheli tajunud kui sellest helist häiritud vastanute protsent kasvas helitasemete tõustes. Häirituse tõenäosus oli suurem maapiirkondades ja juhtudel, kui tuulikud olid elamust näha. Maastikuerinevustel aga statistiline mõju puudus. Ainus seos helitasemete ja tervisega seotud muutujate vahel peale häirituse oli häiritud uni.

Päevikuuurimuses teatasid vastanud tuulikuheli kuulmisest sagedamini, kui elektrienergia suurenes (s.t. kui elektritootmine suurenes). Leiti statistiliselt oluline seos heli kuulmise sageduse ja arvutusliku helitaseme vahel elamu juures, isegi kui osalejate õuesveedetud aeg oluliselt varieerus; mida kõrgem oli arvutuslik helitaseme, seda sagedamini kuuldi heli. Samuti andis päevikuuurimus aimu seosest kuuldavuse ja tuule kiiruse vahel. Tulemused näitavad, et tuulikuheli oli kuulda isegi suhteliselt suurte tuulekiirustel, kus oleks võinud eeldada selle summutamist.

Pikaajalised tuulikuheli mõõtmised umbes 550 meetri kaugusel moodsast tuulikust näitasid, et arvatud ja mõõdetud tasemete kokkulangevus oli hea. Ilmastikutegurite muutusi arvestava paraboolvõrrandmudeli abil arvatud helitasemed ei pakkunud

paremaid prognoose kui tavaliselt keskkonnaloa menetlustes kasutatava mudeli abil arvutatud [Naturvårdsverket 2001]. Muutused ilmastikus on tõenäoliselt olulised vaid heli levimisel pikemate vahemaade taha. Küll aga võivad ilmastikutingimused osutada olulisteks helitasemete hindamiseks allikal, mis on suurim määramatuse element arvutustes.

Uurimused näitavad, et helitasemed kõiguvad ühel ja samal tuulekiirusel, ja et tuuliku heli on kuuldav isegi tuulekiirustel, kus muud tuule tekitatud helid oleks pidanud ta summutama. See viitab sellele, et lähialanikele kuuldava heli keskkonnamõju hindamise kirjeldust tuleks avardada, isegi kui tänapäeval kasutatav helilevimudel on adekvaatne. Vajalikud on edasised uurimused heli kuulmise võimalikkusest suurtel tuulekiirustel, kuna päevikuurimuses osalejate arv oli väike. Tulemused viitavad ka vajadusele uurida täiendavalt unehäirete ohtu.

Sammanfattning

I samband med uppförandet av vindkraftverk görs en miljökonsekvensbeskrivning som också innefattar en bedömning av hur människor som bor i området kommer att påverkas av vindkraftverken. En påverkansfaktor är ljud. För att korrekt beskriva hur ljudet kan komma att uppfattas och för att säkerställa att inte verken placeras så att ljudet påverkar de kringboende negativt, är det viktigt att ta fram vetenskapligt baserad kunskap. I den här rapporten presenteras resultaten från flera studier. Samanalyser av resultaten från två fältstudier hade som syfte att visa sambanden mellan ljudnivån från vindkraftverk vid bostaden och upplevelsen av ljudet, och att beskriva faktorer som påverkade detta samband. En dagboksstudie, där deltagarna bl.a. fick fylla i hur ofta de var hemma och i så fall om de var ute, syftade till att beskriva hur ofta vindkraftsljudet hördes och vid vilka meteorologiska situationer. För att undersöka hur väl den ljudutbredningsmodell som används idag stämmer med fältmätningar och om den meteorologiska variationen har så stor betydelse för ljudutbredningen att de bör tas med vid beräkningen av ljudnivåerna, gjordes långtidsmätningar av ljudet där resultatet jämfördes med olika modeller för beräkningar.

Den sammanvägda analysen av de två störningsstudierna bekräftar och förstärker tidigare rapporterade data. Såväl andelen som märkte vindkraftljud och andelen som stördes av ljudet ökade med ökande ljudnivåer. Sannolikheten att störas av ljud var större om verken var synliga från bostaden och om man bodde i jordbrukslandskap, medan terrängen inte hade någon inverkan. Bland andra studerade hälsorelaterade variabler fanns endast ett samband mellan att störas i sömnen och ljudnivå.

I dagboksstudien noterade deltagare oftare att de hörde ljud från vindkraftverk när den momentana effekten, d.v.s. elproduktionen, ökade. Även om det var stora individuella variationer i hur mycket tid människor tillbringade utomhus vid sin bostad kunde ett statistiskt säkerställt samband mellan hörbarhet och beräknad ljudnivå påvisas; ju högre beräknad ljudnivå, ju oftare hördes verket vid utomhusvistelse. Dagboksstudien gav även viss kunskap om samband mellan hörbarhet och vindhastighet. Resultaten indikerar att

vindkraftsljud hörs även vid relativt höga vindhastigheter då ljudet från vindkraftverket förväntas vara maskerat.

Långtidsmätningar av vindkraftverksljud 550 meter från ett modernt verk visade att de beräknade ljudnivåerna stämde väl med de uppmätta. Ljudnivåer beräknade med parabolisk ekvationsmodell, som tar hänsyn till variationer hos meteorologiska variabler, gav inte bättre överensstämmelse jämfört med den modell som oftast används vid tillståndsprovning [Naturvårdsverket 2001]. Meteorologiska variationer har sannolikt bara betydelse för ljudutbredelsen på längre avstånd. Meteorologiska förhållanden kan dock ha betydelse vid skattningen av källljudnivån, som är den största osäkerheten vid beräkningen.

Studierna visar att ljudnivån varierar vid en och samma vindhastighet, och indikerar att vindkraftsljud hörs även när det blåser så mycket så att vindkraftsljudet borde maskeras av andra ljud åstadkomna av vinden. Det innebär att även om den ljudutbredningsmodell som används idag fungerar väl, så bör presentationen i miljökonsekvensbeskrivningen av det ljud som de närboende kan komma att höra utvidgas. Fler studier kring hörbarheten vid höga vindhastigheter behövs också eftersom dagboksstudien hade relativt få deltagare. Studierna pekar på att risken för sömnstörningar kan vara angeläget att undersökas vidare.

1. Taust

Kui Rootsisis võeti 1990ndate lõpus kasutusele moodsad tuulikud, oli vähe teavet selle kohta, kuidas mõjub see tuulikute piirkonnas elavatele inimestele. Polnud selge, kui lähedale elamutele võib tuulikut paigutada ilma elanikke häirimata. Aeg-ajalt esitati tuulikutega omavalitsuste keskkonna- ja tervishoiuosakondadele kaebusi müra kohta [Pedersen and Persson Waye 2004], kuid puudus süstemaatiline uurimus seostest tuuliku heli tugevuse ja tuulikumürast tingitud häirituse vahel. On teada, et kodutingimustes mõjutab keskkonnamüra (nt. liiklusest ja lähedalasuvatest tööstusettevõtetest) heaolu. On leitud ka märke heli seosest stressiga seotud haiguste, nagu südame-veresoonkonnahaigustega [Babisch et al. 2005]. Seetõttu on tungivalt vajalik uurida tuuliku heli tasemeid, millel esineb inimeste tüütamise oht, et saadud tulemuste põhjal anda soovitusi tuuleparkide asukoha kohta.

Seos muudest keskkondlikest allikatest, nagu liiklusest ja tööstusest, pärit heli ja müra häirituse vahel on kindlaks tehtud ja teada antud. Tuulikud aga erinevad varem uuritud heliallikatest mitmel moel. Tuuliku heli tekitab peamiselt õhupöörised tiivikulabade ümber, kui tuul puhub labale ja kui laba liigub läbi õhu. Tekib vihisev heli, mis labade pöörlemisel tugevneb ja nõrgeneb. Sellised muutused on vältimatud, kuna tuule kiirus on erinevatel kõrgustel maapinnast erinev ning mast ise vähendab tuule kiirust. Seetõttu saab heli iseloomu muuta vaid pisut. Sedalaadi muutliku rõhutasega heli on kerge tajuda ja see on leitud olevat häirivam kui ühtlasema iseloomuga helid [Bradley 1994, Bengtsson et al. 2004].

Samuti paistavad tuulikud maastikul silma ja paigutatakse sageli maakohtadesse, kus neid võidakse tajuda võõrkehadena. Sissetungi taju tugevus on osaliselt seotud selle keskkonna karakteristikutega, kuhu tuulik paigutatakse. Hoonete vahel saab tuulikust lihtsalt üks paljudest hoonetest ja võib eeldada, et seetõttu on ta vähem häiriv linnalikus piirkonnas. Samuti võib tuulikute hindamist mõjutada pinnamood. Künklikul maastikul on tuulik üks mitmest vertikaaljoonest, tasasel aga poolitab ta horisondi ja teda on raskem maastiku osaks pidada. Võib oletada, et visuaalne mõju, k.a.

tiivikulabade pöörlemine, võib füsioloogiliselt suurendada heli mõju; kaks samaaegselt stimuleeritud meelt põhjustavad teadaolevalt teravdatud tähelepanu [Calvert 2001].

Göteborgi Ülikooli Töö- ja Keskkonnameditsiini Osakond teostas alates 2000. a. kaks läbilõikeuurimust eesmärgiga tuvastada seos tuulikuheli tasemete ja müra häiritud inimeste suhtarvu vahel. Tulemused on juba varem esitatud [Pedersen and Persson Waye 2004; 2007], kuid andmekogu mitme muutujaga analüüsid suurendavad teadmisi sellest, kuidas mõjutab helitaju erinevates keskkondades tuulikute nägemine. Ka pole selge, kui sageli esinevad häiritust põhjustavad olukorrad, s.t. kui sageli on tuulikuheli tugevus elamu juures piisavalt suur võrreldes taustatuule heliga, et see oleks kuuldav kodus ja õues viibides.

Tuulikutelt lähtuv heli tekib kõrgel maapinna kohal, reeglina 50-150 m kõrgusel. Mida kaugemale heli levib, seda nõrgemaks ta muutub. Maapinna liik ja ilmastikuolud määravad, kui kiiresti heli kauguse kasvades nõrgeneb. Immissiooniheli tasemete arvutamisel elamu juures kasutatakse standardina olukorda, milles tuule kiirus on 8 m/s kõrgusel 10 meetrit allatuult tuulikult elamuni. Rootsi Keskkonnakaitseamet on esitanud soovitusel helitasemete arvutamiseks [Naturvårdsverket 2001]. Kuid lihtsustatud algoritm ei arvestata ilmastiku muutustega, nagu suhteline niiskus ja temperatuur (mis mõjutavad heli neelduvust õhus), vaid eeldatakse keskmisi olusid. Keskmistest oludest erineva tuule kiiruse puhul võib heli levida paremini ja olla tugevam kui oodatud [van den Berg 2006]. Tänapäeval kasutatava lihtsustatud mudeli paikapidavust tuleb kontrollida immissioonitasemete mõõtmisega ja võrdluses muude arvutusmudelitega.

2. Projekti eesmärgid

Tuuliheli tajumist on uuritud nii katseliselt kui välitingimustes Rootsi uurimisprogrammide Vindforsk ja Vindval mitmetes projektides. Üldisteks eesmärkideks on olnud:

- kirjeldada seost elamu juures tuuliheli tasemete ja mürast häiritud inimeste protsendi vahel,
- kirjeldada seda seost mõjutavaid tegureid

Viimased uurimused, mis viidi läbi koostöös Chalmers'i Tehnikaülikooli

Rakendusakustika Osakonnaga, on keskendunud kolmele täiendavale küsimusele:

- Kuidas on mürast tingitud häiritust mõjutanud tuulikute nähtavus erinevail maastikel?
- Kui sageli on tuuliheli kuuldav lähialanikele ja kui sageli on see häiriv?
- Kui täpne on tänapäeval kasutatav helilevimudel ja kas ilmastikutegurite mõju on piisav nende arvessevõtmiseks heli immissiooni arvutustes?

Nende uurimuste tähtsamad tulemused on esitatud käesolevas ettekandes.

3. Projektirühm

Uurimisrühmas osalesid järgmised isikud:

Kerstin Persson Waye, professor, keskkonnameditsiini doktor. Töö- ja Keskkonnameditsiin, Sahlgrenska Akadeemia, Göteborgi Ülikool. Projekti koordinaator.

E-post: kerstin.persson-waye@amm.gu.se

Eja Pedersen, keskkonnameditsiini doktor. Töö- ja Keskkonnameditsiin, Göteborgi Ülikool. Ettevõtlus- ja Tehnikakool, Halmstadi Ülikool

Jens Forssén, dotsent, akustikadoktor. Rakendusakustika, Chalmers'i Tehnikaülikool

Irène Lauret Ducosson, akustikamagister. Rakendusakustika, Chalmers'i Tehnikaülikool

Martin Björkman, meditsiiniteaduste doktor akustikas. Töö- ja Keskkonnameditsiin, Göteborgi Ülikool

Agneta Agge, uurimistehnik, Töö- ja Keskkonnameditsiin, Göteborgi Ülikool

Yvonne Löfquist, uurimisassistent, Töö- ja Keskkonnameditsiin, Göteborgi Ülikool

Martin Schiff, akustikamagister. Rakendusakustika, Chalmers'i Tehnikaülikool

4. Meetodid

4.1. Uurimispiirkonnad

Kaheks läbilõikeuurimuseks, mis viidi läbi 2000. ja 2005. a., valiti välja kokku kaksteist tuulikutepiirkonda, kus elanikkond oli piisavalt suur statistilise usaldusväarsuse tagamiseks (Tabel 1). Need kaksteist uurimispiirkonda erinesid pinnamoe (tasane või künklik) ja linnastumisastme (maakoht või asula) poolest. Uurimustesse kaasati ainult piirkonnad, kus vähemalt ühe tuuliku nimivõimsus oli 500 kW või enam, kuid heli immissioonitasemete arvutustes võeti arvesse ka antud piirkondade väiksemate tuulikute helitasemeid.

Tabel 1. Uurimispiirkonnad

Piirkond	Omavalitus	Tuulikud				Maastik	Linnastumisaste
		Nr.	Võlli kõrgus (m)	Võimsus (kW)	Algusaasta		
A	Laholm	2	50	600	1998	Tasane	Maakoht
B	Laholm	3	50	600	1998	Tasane	Maakoht
C	Laholm	8	50	600	1998	Tasane	Maakoht
D	Laholm	1	47	600	1999	Tasane	Asula
		1	40	150	1995		
E	Laholm	1	65	500	1999	Tasane	Maakoht
F	Öckerö	1	50	660	1999	Künklik	Asula
G	Tjörn	1	60	850	2004	Künklik	Maakoht
H	Orust	1	65	600	2001	Künklik	Maakoht
I	Lysekil	2	55	750	2000	Künklik	Asula
		2	40	550	1995		
J	Varberg	3	41	600	1995	Tasane	Maakoht
		1	30	250	1993		
		7	30	225	1991		
		2	30	225	1994		
K	Landskrona	2	65	1500	2002	Tasane	Maakoht
		2	41	550	1996		
L	Simrishamn	1	42	500	1996	Tasane	Asula
		3	32	225	1993		

Läbilõikeuurimuste maapiirkondadest kolmes (piirkond K, piirkond H ja piirkond G) uuriti ka ilmastikutegurite mõju heli levimisele erinevate pinnamoodide korral, samuti seda, kui sageli ja millistes olukordades piirkondade elanikud tajusid tuulikuheli. Piirkonnas K uuriti ainult ala, kus asuvad kaks suuremat tuulikut. Piirkondades G ja H on maapind künklik ja tuulikud asuvad kõrgendikul, mida ümbritseb korrapärase maastik

(väikesed põllud, künnad, puud). Ülevaade tuulikute ja mõõtmistest nendes kolmes piirkonnas on esitatud tabelis 2.

Tabel 2. Kolme põhjalikumaks uurimiseks valitud piirkonna kirjeldus

	Piirkond H	Piirkond G	Piirkond K
Tuulikud			
Tuulikute arv	1	1	2
Turbiinitüüp	Enercon E40 600 kW	Vestas V52 850 kW	Enercon E66 1,5 MW
			Kaugus tuulikute vahel: 290 m
Võlli kõrgus, m	65	60	65
Tiiviku diameeter, m	44	52	70
Helivõimsuse tase, dB(A)*	100,0	100,0	100,5
Helimõõtmised			
Mõõtmisperiood	5.–25. sept. 2006	-	16. nov.–15. det. 2006
Kaugus mõõtmispunktist tuulikuteni, m	434	-	534
Ligipääs tuuliku tööandmetele	Jah	Ei	Jah
Päevikuuurimus			
Väljavalitud majapidamiste arv	19	21	38
Osalejate arv	5	11	8
Uurimisperiood	9.–24. sept. 2006	25. okt.–14. nov. 2006	1.–8. juuni 2007

* tuule kiirus 8 m/s 10 m kõrgusel turbiini juures, määramatus ± 1 dB, tootja andmed.

4.2. Epidemioloogilised uurimused

Eelnevalt teostati helilevi arvutused, et määratleda uuritav elanikkond, s.t. iga majapidamine, kus tuuliku heli tugevus oli 30 dB(A) või enam. Paljude majapidamistega piirkondades vähendati majapidamiste arvu juhuslikkuse põhimõttel, et läbilõikeuurimused ei läheks liiga kulukaks. Igas majapidamises paluti ühel juhuslikult valitud inimesel täita küsimustik (n = 1822). Küsimustikus käsitleti tegurite taju elukeskkonnas üldiselt, aga see sisaldas ka konkreetseid küsimusi tuulikute kohta. Mitmete küsimustega mõõdeti reageeringut tuuliku helile. Käesolevas ettekandes tuuliku heli taju mõõdupuuna kasutatud küsimuseks oli: “Palun nimetage iga alltoodud tüütu puhul, kas te märkate seda või kas see häirib teid väljaspool teie elamut”, millele järgnes loetelu võimalikest stressitekitajatest, millest üks oli tuuliku heli. Vastamisel tuli kasutada 5-punktilist verbaalhinnanguskaalat, kus 1 = “ei kuule”, 2 = “kuulen, kuid ei

häiri”, 3 = “veidi häirib”, 4 = “üsna palju häirib” ja 5 = “väga häirib”. Käesolevas ettekandes tähistab väljend “tuulikuheli kuulma” nelja kõrgemat skaalapunkti (alates “kuulen, kuid ei häiri” kuni “väga häirib”). Väljend “tuulikuheli häirib” aga tähistab kaht kõrgeimat skaalapunkti (“üsna palju häirib” ja “väga häirib”).

Osavõtjad hindasid ka, millist kaheksast etteantud helitunnusest tajuti häirivana. Neid helitunnuseid hinnati varasemas katselises uurimuses, et määrata tuulikuheli sagedusjaotuse olulisus [Persson Waye ja Öhrström 2002], ning täiendati käesolevas uurimuses kohalike hindamistega.

Suhtumisi tuulikutesse mõõdeti mitmete küsimustega. Üldist suhtumist ja suhtumist tuulikute mõjusse maastikule mõõdeti 5-punktilisel skaalal alates “väga positiivsest” kuni “väga negatiivseni”. Osavõtjatel paluti ka teostada hindamine 14 tuulikudeskriptori abil, mille töötas välja Karin Hammarlund ja mida kasutati tema loal. Müratundlikkust mõõdeti 4-punktilisel skaalal alates “täiesti tundetust” kuni “väga tundlikuni”. Küsimustik sisaldas ka küsimusi vanuse, soo ja tervisliku seisundi kohta, milles päriti pikaajaliste haiguste, uneprobleemide, stressiga seotud sümptomite jm. järele.

Arvutati tuulikuheli tasemed väljaspool elamuid kõikide inimeste kohta uuritavas elanikkonnas, kasutades tootja esitatud helivõimsustasemeid ja Rootsi Keskkonnakaitseameti soovitatud helilevimudelit [2001]. Enam kui ühe tuulikuga piirkondades summeeriti helirõhutasemed elamute juures logaritmiliselt. Uurimuse valim jagati vastavalt arvutatud helitasemetele gruppidesse intervalliga 2,5 dB(A), et oleks võimalik võrrelda ja graafiliselt kujutada häirituse valdavust erinevatel helitasemetel.

Kõik küsimustikus mõõdetud muutujad, nagu ka arvutatud helirõhutasemed vastajate elamute juures, sisestati samasse andmebaasi. Valitud uurimusvalimist tagastas küsimustiku ja vastas analüüsid kasutatud põhiküsimustele 1095 inimest (vastamisprotsent: 60).

Tulemused on esitatud absoluutarvudena ja vastanute protsentidena (%). 95%-sed usaldusvahemikud (CI) arvutati Wilsoni meetodil [Altman et al. 2000]. Usaldusvahemikud näitavad piire, mille sisse jääb vastanute protsent 95% usaldusväärsusega, kui uurimust korratakse lõpmatu arv kordi erinevate valimitega uuritavast elanikkonnast. Kahe muutuja vaheliste seoste hindamiseks kasutati Spearman'i astakorrelatsioonitesti (r_s). Selle teksti tulemuseks on väärtus vahemikus -1 kuni 1. Miinus ühele või ühele lähedased väärtused märgivad statistiliselt olulist seost (negatiivset või positiivset) muutujate vahel, mida näitavad ka p-väärtused < 0.05 ; nullile lähedased väärtused tähendavad, et selline seos puudub. Erinevusi kahe grupi vahel testiti Mann-Whitney U-testiga (Z); p-väärtusi < 0.05 tõlgendati statistiliselt oluliste erinevustena. Binaarse logistilise regressiooniga testiti seoseid mitme muutuja vahel samaaegselt. Tulemused on esitatud šansside suhetena (OR) 95% usaldusvahemikuga. Seost tõlgendati statistiliselt olulisena, kui usaldusvahemiku mõlemad otsad olid > 1 (positiivne seos) või < 1 (negatiivne seos).

Keerukamate seoste testimiseks kasutati struktuurse modelleerimise meetodit. Kõigepealt töötati varasematest analüüsides saadud tähelepanekute põhjal välja mudel. Seejärel testiti mudelit erinevatel vastajarühmadel. Tulemused on esitatud joonisel 4. Statistiliselt olulised seosed on näidatud katkematute joontena ja standardiseeritud regressioonikaaludena vahemikus 0-1; mida lähemal 1'le, seda tugevam seos. Katkendjooned näitavad seose puudumist.

4.3. Päevikuuurimus

Kolme tuulikupiirkonna elanikele saadeti kiri palvega osaleda uurimuses, et selgitada välja, kui sageli oli tuulikuheli kuuldav nende elukeskkonnas. Valimi koostamine ei olnud juhuslik. Kaubaveofirmadelt osteti nimekirjad tuulikust 1000 m raadiuses elavatest majapidamistest ning kiri saadeti ühele isikule igas majapidamises. Seejärel võeti nende isikutega ühendust telefonitsi. Kes osaleda ei soovinud, jäeti uurimusest välja. Mõnel juhul leidis väljavalitud isik enda asemel uurimuses osalema teise inimese samast majapidamisest. Osalejad said tasu.

Iga osaleja täitis kolmenädalase uurimisperioodi igal päeval päevikuprotokolli (Tabel 2). Protokoll tagastati tähtajale järgnenud päeval, vältimaks selle mälu järgi täitmist alles hiljem, kui osaleja oli unustanud selle täitmata (Tabel 2). Osalejail paluti märkida oma asukoht igal tunnil nii päeval kui öösel (elamu sees, õues, jalutamine või muu sarnane elamu piirkonnas, polnud kodus) ja tuulikuheli kuuldavus (ei kuulnud, kuulsin, kuid ei häirinud, kuulsin ja häiris). Osalejatel soovitati ka kirjeldada muid olulisi helisid väljas, samuti teha märkusi. Uurimisperioodi lõpul vastasid osalejad küsimustele oma suhtumisest tuulikutesse ja oma müratundlikkuse kohta. Andmeid tuulikute kohta saadi tootmisstatistikast ja need sisaldasid igatunniseid keskmisi tuulekiiruseid võlli kõrgusel, turbiini kiirust (pöördeid minutis) ning toodetud elektrienergiat.

Päevikuuurimuse tulemused on esitatud arvudena ja protsentidena (%). Seoseid arvatatud helitasemete ja õues tuulikuheli kuulmise juhtude suhtarvu vahel analüüsiti lineaarse regressiooni meetodil (r). Erinevusi elektrienergia, turbiinikiiruse ja tuulekiiruse keskmiste vahel testiti Student'i t -testiga (t).

4.4. Heli- ja ilmastikumõõtmised

Tuulikuheli salvestati ja mõõdeti (immissiooni mõõtmine) mobiilsesse mõõtmisjaama (haagismajasse) paigutatud seadmetega. Jaama juurde, 1,5 m kõrgusele maapinnast ja 10 cm kaugusele püstise puutahvli (1 x 1,2 m) keskpunktist kinnitati mikrofoni. Mikrofonile kohale paigutati esmane (läbimõõt 10 cm) ja teisene (läbimõõt 40 cm) tuuletõke. Heli salvestati 10 minutit igal täistunnil 24 tunni jooksul mõõtmisperioodi igal ööl ja päeval.

Ilmastikutingimusi mõõdeti mõõtmisjaamaga, milles kasutati Davis'e ilmajälgimisjaama II (Davis Weather Monitor II) koos logeriga. Tuuleandmed (keskmise kiirus ja suund, samuti maksimumväärtus) salvestati 10 meetri kõrgusel iga üheminutilise perioodi kohta. Sarnaselt salvestati muud ilmastikuandmed 1 meetri kõrgusel (temperatuur, suhteline niiskus ja staatiline õhurõhk). Andmed tuule kiiruse kohta turbiini võlli kõrgusel, toodetud elektrienergia kohta ja turbiini kiiruse kohta võeti tootmisandmetest, mida energiafirma Vattenfall AB säilitab kõikide Rootsi tuulikute kohta. Andmed esitati 10 minuti keskmistena kogu mõõtmisperioodi kohta. Andmete kogumine ühest tuulikust

uurimispiirkonnas G ebaõnnestus vaatamata tootja ja omaniku visadele pingutustele. Seetõttu puuduvad selle piirkonna tuuliku tööandmed.

Piirkonna K tuuliku helivõimsustasemete mõõtmine (emissiooni mõõtmine) teostati võimalikult lähedaselt standardile [IEC 2002]. See standard kirjeldab meetodit A-korrigeeritud helivõimsustaseme tuletamiseks tuule kiiruse funktsioonina 10 m kõrgusel. Selle meetodi kasutamiseks tuleb helirõhutase mõõta tuuliku lähedal, et saada hea signaali-müra suhe ja vähendada atmosfääriliste helilevitingimuste mõju; samal ajal ei tohi mikrofoni olla liiga lähedal võrreldes heliallika suurusega. Selle standardi järgi mõõdeti A-korrigeeritud tasemed, samuti kolmanda oktaavi sagedusriba tasemed, akustilise tahvliga maapinna kõrgusel 100 m tuulikust allatuult. Tahvel oli jäik, nelinurkne (1,12 x 1,25 m), valmistatud 12 mm vineerist. Tuule kiirus ja suund mõõdeti samuti standardi järgi punktis, kus tuulik mõjutas õhuvoolu vähe või üldse mitte. Tuuleandmetest ja heliandmetest võeti keskmised üheminutiliste perioodide kohta; see hõlmas andmeid nii turbiini töötamise ajal kui taustatasemete mõõtmistest. Piirkonnas oli veel üks tuulik, uuritavast tuulikust umbes 300 meetrit lõunasse. Sellepärast välditi emissiooni mõõtmisi ajal, mil tuule suund oli põhja poole, et ei tuleks mikrofoni paigutada tuulikute vahele ja seega saastata mõõtmisi heliga teiselt tuulikult. Tausthelitasemete mõõtmiseks lülitati mõlemad tuulikud välja.

Standardi kohaselt saadakse A-korrigeeritud helirõhutasemed tuule kiiruse täisarvulistel väärtustel (meetrit sekundis). Mõõdetud helitasemetest tuletatakse tuule kiiruse funktsioonina teise astme polünoom. Igal tuulekiirusel leitakse vähemalt kolme helirõhumõõtmise põhjal helirõhutasemete keskmine (energia keskmine). Teise astme polünoomid tuletatakse nii töötava tuulikuga helitasemetest kui tausthelitasemetest. Et võtta arvesse tausthelitasemeid, arvutatakse tuuliku lõplik helivõimsustase kahe polünoomi põhjal. Selle helivõimsustaseme abil arvutati helirõhutasemed immissioonipunktis.

Akustilised mõõtmised teostati müramõõturiga Brüel & Kjær 2260, mis oli pikendusjuhtme kaudu ühendatud mikrofoni. See seade taadeldi enne ja pärast iga

mõõtmisteseeriat. Kasuti nii esmast kui teisest tuuletõket, et vähendada tuule tekitatud müra mikrofonil. Kahekordsest tuuletõkkest tingitud helikadu arvutati välja kõlaruumis juhuhelimõõtmiste abil ning vastav parandus viidi sisse mõõdetud andmetesse (umbes 1 dB(A)).

4.5. Heli levimise modelleerimine

Helitasemed mõõtmispunktis arvutati nii Rootsi Keskkonnaameti soovitatud mudeli [2001] kui paraboolvõrrandmudeli (PE meetod) järgi. Rootsi Keskkonnaameti mudel teeb vahet heli levimisel maa ja vee kohal; meie kasutasime lihtsustatud levialgoritmi maa kohal kaugustele alla 1 km. Mudelis eeldatakse allatuult ja tuule kiirust 8 m/s kõrgusel 10 m. PE meetod on numbriline arvutusmeetod, milles arvestatakse levikuteel esinevaid tingimusi, nagu maapinna kuju ja tuuleprofiilid, võimalusega kasutada muidki tuulekiiruse profiile peale logaritmilise jaotuse. Mudelisse kaasati järgmised parameetrid: tuulekiirus 19 m kõrgusel eeldatava tuuleprofiili kohta, akustiline võimsus erinevatel helisagedustel, temperatuurigradient ja temperatuur, suhteline niiskus ja staatiline õhurõhk (temperatuur, niiskus ja õhurõhk määravad heli neeldumise õhus). Nende arvutuste näidiseks võeti kaksteist mõõtmist piirkonnas K. Arvutustes jäi tuule kiirus vahemikku 3,3 m/s-9,1 m/s (10 m kõrgusel), kusjuures salvestistes oli tuulikute heli kuulda.

5. Tuulikuuheli tajumine

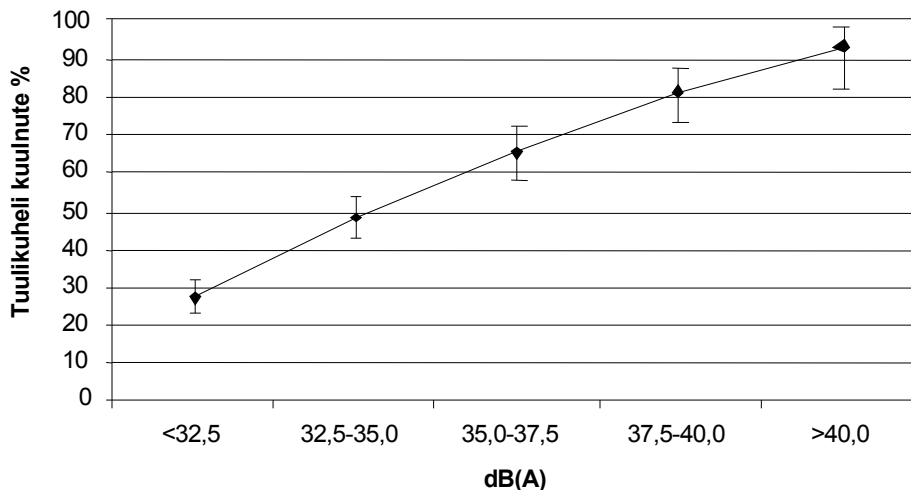
5.1. Seos helitaseme, heli kuulmise võimalikkuse ja häirituse vahel

Vastanud jagati rühmadesse vastavalt tuulikuuheli arvatud tasemetele nende elamute juures. Vastanute arv iga 2,5 dBse intervalli kohta on esitatud tabelis 3.

Tabel 3. Vastanute arv viie helitaseme intervalli piires

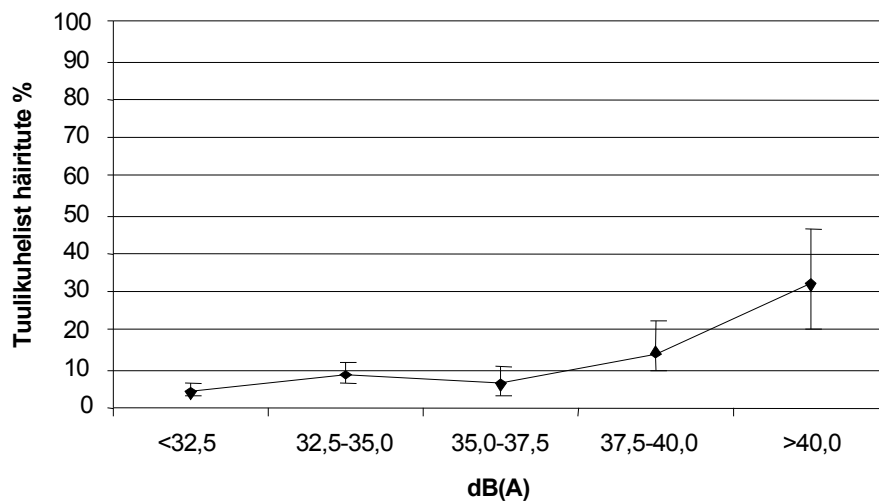
dB(A)	< 32,5	32,5–35,0	35,0–37,5	37,5–40,0	> 40,0	Kokku
n	445	332	168	106	44	1095

Leiti statistiliselt oluline seos elamute juures tuulikuuheli tasemete ja heli kuulnud või helist häiritud vastanute osakaalu vahel ($r_s = 0,401$, $n = 1095$, $p < 0,001$). Üle 80% vastanutest heliintervallides 37,5–40,0 dB(A) ja > 40,0 dB(A) kuulsid elamu juures heli (joonis 1).



Joonis 1. Tuulikuuheli kuulnute osakaalu seos helitasemetega elamu juures, usaldusvahemik 95% ($n = 1095$)

Helitasemete tõustes suurenes ka häiritud vastanute osakaal (joonis 2). Madalama helitasemega vahemikes oli häirituid alla 10%. Häiritute osakaal suurenes 14%lt vahemikus 37,5–40,0 dB(A) 32%le vahemikus > 40,0 dB(A). Kuid kõrgeima helitasemega vahemikku iseloomustas suur määramatus väikese elanike arvu tõttu selles rühmas.



Joonis 2. Tuulikumürast üsna või väga häiritute osakaalu seos helitasemetega elamu juures, usaldusvahemik 95% (n = 1095)

Tuulikumürast häiritutest (n = 84) 85% häiris heli vihisev iseloom, 72% vilistav iseloom, 57% mühisev iseloom ja 55% pulseeriv/tukslev iseloom. Vähem häiris heli laksuv, kriipiv, madalsageduslik või kõlaline iseloom.

5.2. Tuulikuuheli tajumist mõjutavad situatsioonilised tegurid

Vastanutest 78% teatasid, et näevad oma elamust vähemalt üht tuulikut (tabel 4). Helitaseme tõustes kasvas ka nende osakaal. Üle 35 dB(A)se helitasemega piirkondade elanikest nägid enam kui 90% oma elamutest vähemalt üht tuulikut. 66% vastanutest elasid piirkondades, mille pinnamood oli tasane, mitte künklik. Veel enam, 30% elasid maakohtades, mitte asulates.

Tuulikuid nägevate ja tasasel maastikul elavate vastanute protsendid ei olnud teineteisest sõltumatud. Seetõttu kasutati mitme muutujaga logistilist regressiooni, uurimaks nähtavuse, maastiku ja linnastumisastme mõju tuulikuuheli kuulmise või selle häiriva toime tõenäosusele.

Tabel 4. Nähtavuse, maastiku ja linnastumisastme seos helitasemetega: vastanute osakaal

	< 32,5	32,5–35,0	35,0–37,5	37,5–40,0	> 40,0	Kokku
<i>Nähtavus, %</i>						
Nähtav	66	80	92	94	98	78
Mittenähtav	34	20	8	6	2	22
<i>Maastik %</i>						
Tasane	52	65	84	89	86	66
Künklik	48	35	16	11	14	34
<i>Linnastumisaste, %</i>						
Maakoht	33	22	27	32	66	30
Asula	67	78	73	68	34	70

Tuulikuheli kuulmise tõenäosus suurenes helitaseme tõustes (tabel 5). Heli kuulmise tõenäosus oli suurem vastanute puhul, kes nägid tuulikut oma elamust ja kes elasid maakohtades. Maastik ei avaldanud olulist mõju tuulikuheli kuulmise tõenäosusele.

Tabel 5. Tuulikuheli kuulmise tõenäosuse seos nähtavuse, maastiku ja linnastumisastmega, kohandatud helitasemele.

Kuulsid tuulikuheli	OR	95 % CI
Helitase, 5 dB(A)-intervallid	2,08	1,81–2,40
Nähtavus (ei näinud/nägid)	2,40	1,67–3,45
Maastik (tasane/künklik)	0,78	0,57–1,07
Linnastatus (asula/maakoht)	1,45	1,06–1,99

Helitasemete tõustes suurenes ka tuulikumüra üsna või väga suure häirivuse tõenäosus (tabel 6). Tõenäosus oli suurem, kui tuulikud olid elamust näha. 82% vastanust, kes ütlesid, et neid häirib tuulikumüra, oli 81% le oma elamust näha vähemalt üks tuulik. Äärmiselt tugev seos häirivuse ja nähtavuse vahel põhjustab eksitavaid väärtusi; tabelis 6 esitatud nähtavuse väärtus on suuresti liialdatud. Samuti oli häirivuse tõenäosus suurem maakohtades, maastik aga ei avaldanud mingit mõju.

Tabel 6. Tuulikumürast häirituse seos nähtavuse, maastiku ja linnastumisastmega, kohandatud helitasemele

Tuulikuhelist häiritud	OR	95% CI
Helitase, 5 dB(A)-intervallid	1,46	1,22–1,75
Nähtavus (ei näinud/nägid)	13,97*	1,90–102,83
Maastik (tasane/künklik)	0,99	0,53 –1,87
Linnastumisaste (asula/maakoht)	2,90	1,78 –4,74

*Liialdatud väärtus tugeva seose tõttu häirituse ja nähtavuse vahel.

5.3. Tuulikuuheli tajumisega seotud individuaalsed tegurid

Vastanute keskmine vanus oli 50 aastat (standardhälve: 15 aastat) ning 59% neist olid naised. Heli tajumise ning vanuse või soo vahel seoseid ei leitud.

51% vastanutest ütles, et nad on heli suhtes tundlikud või väga tundlikud. Helitundlikkus oli naiste seas suurem kui meestel: 54% naistest ja 48% meestest ($z = -3,04$, $n = 1072$, $p < 0,01$). Müratundlikkuse ja tuulikuuheli täheldamise vahel seost ei leitud. Vastanud, kes väitsid end olevat üsna või väga helitundlikud, ei täheldanud tuulikuuheli rohkem kui need, kes ei väitnud end olevat müratundlikud (tabel 7).

Tabel 7. Tuulikuuheli täheldamise seos müratundlikkusega, kohandatud helitasemele

Tuulikuuheli täheldanud	OR	95 % CI
Helitase, 5 dB(A)-intervallid	2,29	2,00–2,62
Müratundlikkus* (4-punktilisel skaalal, "täiesti tundetust" väga "tundlikuni")	1,15	0,99–1,34

*Kohandatud ka soole.

Siiski olid sama tugevusega heli korral müratundlikud vastanud sagedamini häiritud tuulikumurast kui müratundetud (tabel 8).

Tabel 8. Tuulikumurast häirituse seos müratundlikkusega, kohandatud helitasemele

Tuulikuuhelist häiritud	OR	95 % CI
Helitase, 5 dB(A)-intervallid	1,70	1,42–2,04
Müratundlikkus* (4-punktilisel skaalal, "täiesti tundetust" "väga tundlikuni")	1,73	1,32–2,27

*Kohandatud ka soole.

Vastanutest teatasid 10%, et nende suhtumine tuulikutesse oli negatiivne või väga negatiivne, ning 24%, et neile ei meeldi tuulikute mõju maastikule. Leiti seos nende kahe suhtumismuutuja vahel ($r_s = 0,603$, $n = 1070$, $p < 0,001$): inimestele, kellele ei meeldinud tuulikud üldiselt, ei meeldinud ka tuulikute mõju maastikule. Leidus aga üks vastanuterühm, kelle üldine suhtumine tuulikutesse ei olnud küll negatiivne, kuid kellele ei meeldinud nende mõju maastikule (15%).

Ei leitud seost elamu juures mõõdetud helitasemete ja tuulikutesse suhtumise ($r_s = -0,005$, $n = 1083$, $p = 0,869$) ning maastikule mõjusse suhtumise ($r_s = 0,023$, $n = 1079$, $p = 0,445$) vahel. Tuulikutele lähemal elavate inimeste suhtumine ei olnud negatiivsem kui kaugemal elavate inimeste oma. Küll aga olid positiivselt seotud suhtumine ja häiritus. Vastanud, keda häiris tuulikumüra, olid tuulikute suhtes sagedamini negatiivselt häälestatud kui need, keda see ei häirinud, sõltumata helitasemest (tabel 9). Käesolevast läbilõikeuurimusest pole võimalik järeldada, kas mürast häiritute suhtumine tuulikutesse muutus negatiivseks just sellepärast või olid algusest peale negatiivselt häälestatud ka suurema tõenäosusega häiritud. Võib vaid öelda, et nende muutujate vahel oli seos.

Tabel 9. Tuulikuhest häirituse seos suhtumisega, kohandatud helitasemele.

Tuulikuhest häiritud	OR	95 % CI
Helitase, 5 dB(A)-intervallid	1,67	1,39–2,01
Suhtumine tuulikutesse (5-punkti skaalal, "väga positiivsest" "väga negatiivseni")	2,24	1,80–2,79

Müra häiritud vastanute suhtumine tuulikute mõjusse maastikule oli ka sagedamini negatiivsem kui mittehäiritutel (tabel 10). Jällegi pole võimalik teha järeldusi põhjuse ja tagajärje kohta.

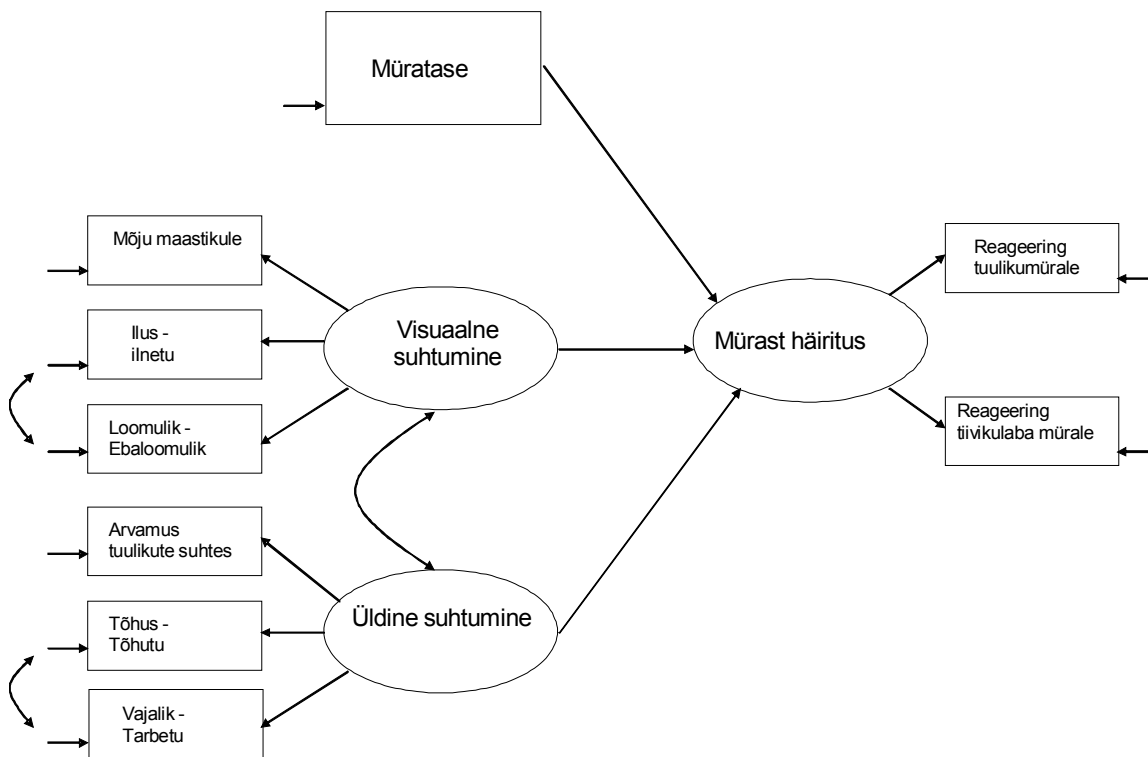
Tabel 10. Tuulikuhest häirituse seos visuaalse suhtumisega, kohandatud helitasemele

Tuulikuhest häiritud	OR	95 % CI
Helitase, 5 dB(A)-intervallid	1,53	1,25–1,88
Suhtumine tuulikute mõjusse maastikule (5-punktiline skaala, "väga positiivsest" "väga negatiivseni")	5,24	3,86–7,10

Vastanute sagedasimad valikud neljateistkümnest pakutud liigitusest olid "keskkonnasõbralik" (80%), "vajalik" (42%), "tõhus" (33%) and "inetu" (31%).

5.4. Mõjutavate tegurite mitme muutujaga analüüsid

Koostati nii latentseid (otseselt mittemõõdetavaid) kui mõõdetud muutujaid sisaldav teoreetiline mudel, uurimaks tuulikute visuaalset mõju müra häiritusele (joonis 3).



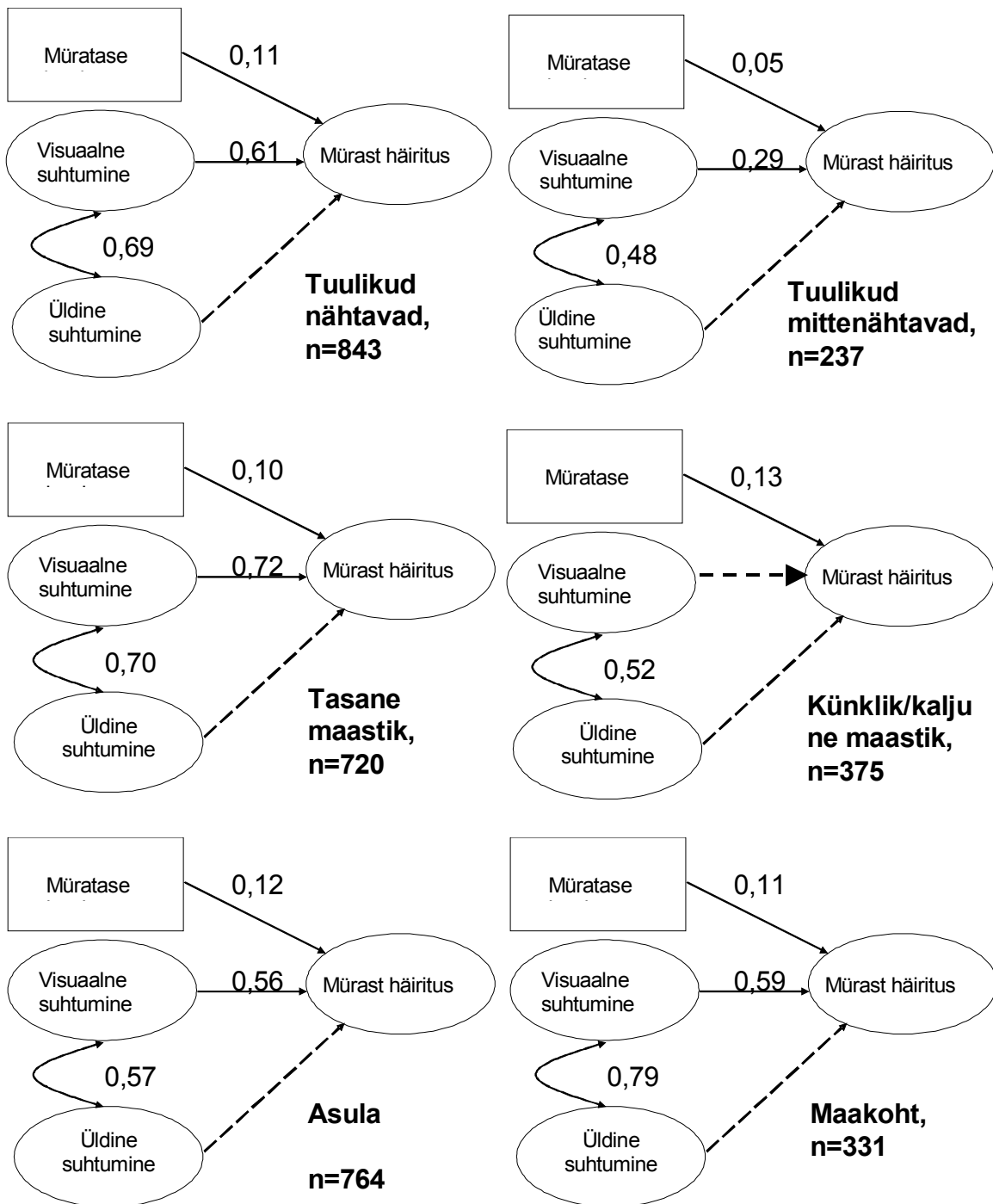
Joonis 3. Teoreetiline mudel, mis kirjeldab, kuidas visuaalne ja üldine suhtumine tuulikesse mõjutavad tuulikuhelist häirituse ohtu

Eeldati, et mürast häiritus sõltub helitasemest, aga ka vastaja suhtumisest tuulikute visuaalsesse mõjusse ja üldisest suhtumisest. Heli tajumist (s.t. kas vastanu täheldas või oli häiritud tuulikumürast, aga ka rotorilabade heli tajumist) kasutati mürast häirituse mõõdupuuna. Visuaalset suhtumist hinnati küsimusega tuulikute mõjust maastikule ja tuulikute liigitamisega kas ilusaks või inetuks ja loomulikuks või ebaloomulikuks. Üldist suhtumist mõõdeti küsimusega vastaja arvamus kohta tuulikutest ning tuulikute liigitamist kas tõhusaks või tõhutuks ja vajalikuks või tarbetuks.

Mudelit katsetati oma elamust tuulikut nägevatel ja võrdluseks mittenägevatel vastajatel. Lisaks sellele võrreldi tasasel maastikul elavaid vastajaid künklikul maastikul elavatega ja asulais elavaid vastajaid maakohtades elavatega (joonis 4). Häirituse tõenäosus suurenes helitaseme tõusuga kõigis rühmades. Esines erinevus tuulikuid nägevate ja mittenägevate inimeste vahel. Kõikumised reageeringutes (s.t. häirituses) olid tuulikuid

nägevate vastanute seas seletatavad helitasemetega suuremal määral kui mittenägevate seas. Üldine suhtumine tuulikutesse ei mõjutanud tuulikuhelist tingitud häiritust üheski rühmas. Kuid mitmes rühmas nähtus seos visuaalse suhtumise ja müra häirituse vahel. Seos oli tugevam tuulikuid oma elamust nägevate kui mittenägevate inimeste seas. Samuti oli seos tugevam tasasel maastikul elavate inimeste hulgas võrreldes künklikul maastikul elavatega, kelle puhul seos ei olnud statistiliselt oluline. Erinevus asulates ja maakohtades elavate inimeste vahel oli väike.

Mudelisse sobitusid andmed kõikide rühmade kohta (normeeritud $\chi^2 \leq 2,8$; CFI $\geq 0,99$; RMSEA $\leq 0,05$; selgitusi vt. Pedersen ja Larsman [2008]).



Joonis 4. Võrdlused tuulikuid nägevate ja mitterägevate vastanute vahel (esimene rida, tasasel ja künklikul maastikul elavate vastanute vahel (teine rida) ja asulates ja maakohtades elavate vastanute vahel (viimane rida). Pidevjooned tähistavad statistiliselt

olulisi seoseid, kus on näidatud standardiseeritud regressioonikaalud; katkendjooned näitavad, et statistiliselt olulisi seoseid ei leitud.

5.5. Tuulikuuheli mõju tervisele ja heaolule

Edasi uuriti tuulikuuheli seost vastajate märkustega tervisliku seisundi ja heaolu kohta, v.a. häirituseoht. Kuna tervist mõjutavad vanus ja sugu, kohandati kõik analüüsid nendele kahele parameetrile. Ei leitud seoseid tuulikuuheli tasemete ja vastajate märkuste vahel oma tervisliku seisundi sümptomite või haiguste kohta, mida mõõdeti küsimustiku abil (pikaajalised haigused, suhkurtõbi, kõrgvererõhktõbi, tinin kõrvus, südame-veresoonkonna haigused, kuulmisvaegus). Samuti ei leitud seoseid helitasemete ja vähenenud heaolu või stressisümptomite vahel (peavalu, liigväsimus, kaela-, õla- või liigesevalu, pinget ja stress, kergestiärrituvus).

Vastanutest 25% teatasid, et nende uni pole viimasel ajal olnud nii hea, halb või väga halb. Puudus seos une kvaliteedi ja tuulikuuheli tasemete vahel. Küll aga esines seos mistahes allikast pärit müra häirituse (jah/ei) ja helitasemete vahel (OR = 1,16; 95% CI: 1,00–1,34; kohandatud vanusele ja soole, helitasemed 5 dB(A)-intervalliga). Vastanud rühmas > 40 dB(A) olid mistahes allikast pärit müra sagedamini häiritud kui muud vastanud (tabel 11).

Tabel 11. Vastanute osakaal, kes teatasid, et nende und häiris mistahes müraallikas

	< 32,5 n = 441	32,5–35,0 n = 328	35,0–37,5 n = 168	37,5–40,0 n = 106	> 40,0 n = 44
Uni häiritud mistahes müraallika tõttu	12%	16%	14%	15%	25%

5.6. Tuulikuuhelist häirituse seos tervise ja heaoluga

Pikaajalised haigused ei olnud seotud tuulikuuhelist häiritusega, kui võeti arvesse helitasemed, vanus ja sugu. Sama kehtis suhkurtõve, kõrgvererõhktõve, tinina, südame-veresoonkonna haiguste või kuulmisvaeguse kohta.

Inimesi, kes olid pinges või stressis enam kui kord nädalas, häiris tuulikuuheli sagedamini kui teisi (OR = 1,17; 95 % CI: 1,01–1,34; kohandatud helitasemetele, vanusele ja soole).

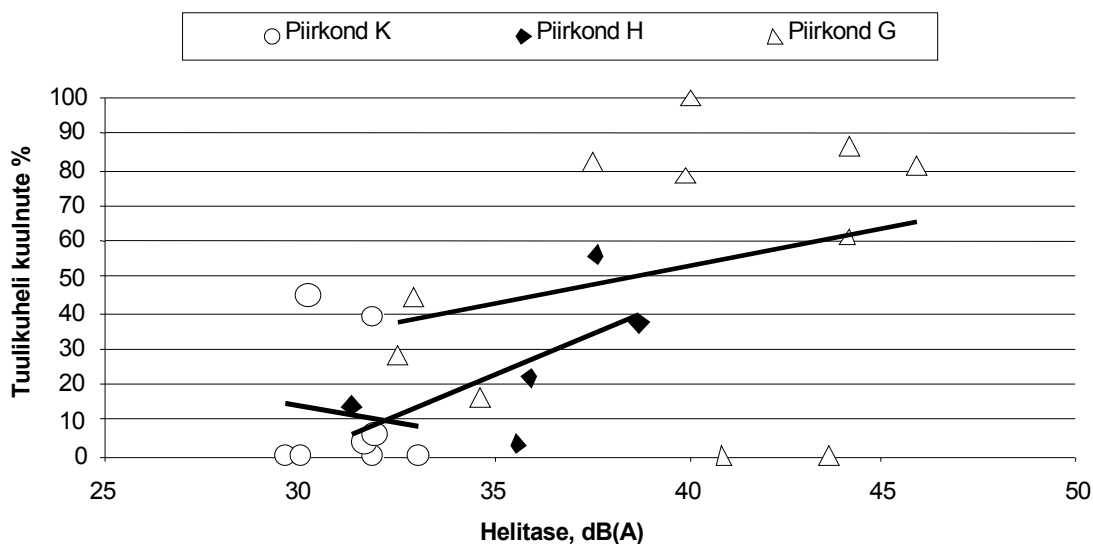
Ei leitud seost häirituse ning peavalu, liigväsimumuse või kaela-, õla- ja liigesevalu sümptomite vahel.

Seos une kvaliteedi ja tuulikuhest häirituse vahel oli statistiliselt oluline (OR = 1,33; 95 % CI: 1,03–1,71; kohandatud helitasemetele, vanusele ja soole). Inimesed, kes tajusid oma und halvana (5-punkti skaalal “väga heast” “väga halvani”), teatasid sagedamini, et neid häirib tuulikuhest. Samuti olid inimesed, kelle und häiris mistahes müraallikas, sagedamini häiritud ka sellest helist (OR = 2,06; 95 % CI: 1,75–2,41; kohandatud helitasemetele, vanusele ja soole).

6. Kui sageli kuuldakse tuulikuheli

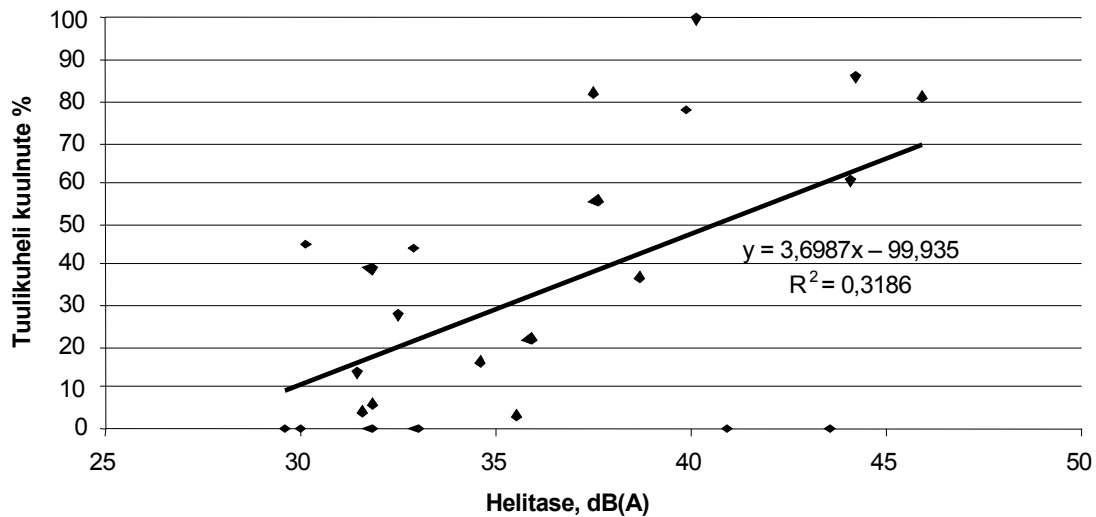
Kokku 24 inimest täitsid päevikud, millest nähtus, kui sageli nad kuulsid heli tuulikutelt. Kõikide vastanute puhul oli tegemist püsielukohtadega, mitte suvilatega. Keskmine vanus oli 52 a. (vanusevahemik 26–77 a.), ja 21 olid naised. Enamus vastanutest nägi oma elamust või aiast üht või enamat tuulikut, ainult 3 vastanut ei näinud ühtki. Vastanute harjumustes olid suured erinevused. Vastanud veetsid 52%-95% uurimuse ajast kodus (keskmiselt 76%). Samuti olid suured erinevused õuesviibimise kordades. Vastanud viibisid õues keskmiselt 59 mõõtmiskorral. Üks vastanu käis õues ainult 10 korda, teine aga 140 korda.

Neli vastanut ei kuulnud kolme uurimisinädala vältel kordagi tuulikut. Nende vastanute kohta arvatud tuulikuheli tasemed olid < 33.0 dB(A). Üks vastanu elamus, mille arvatud helitase oli 40,1 dB(A), kuulis õues viibides alati tuulikut. Ülejäänud vastanute puhul jäi tuuliku kuulmise protsent õues viibides vahemikku 14%-56% piirkonnas H, 16%-86% piirkonnas G ja 4%-45% piirkonnas K. Regressioonijooned joonisel 5 näitavad seost õues viibides tuuliku kuulmise sageduse ja arvatud helitasemete vahel iga piirkonna kohta.



Joonis 5. Seos arvatud helitasemete ja õues tuuliku kuulmise protsendi vahel iga piirkonna kohta.

Seos arvatud helitasemete ja õues tuuliku kuulmise protsendi vahel oli statistiliselt oluline, kui kõiki vastanuid analüüsiti ühes samaaegses regressioonis. ($r = 0,564$, $n = 24$, $p < 0,01$). Joonisel 6 on näidatud seos lineaarse regressioonina. Lineaarne regressioon sobis andmetega paremini kui logistiline funktsioon. Kuid joont ei saa üldistada muudele helitasemetele ja muudele olukordadele.



Joonis 6. Arvatud helitasemete seos õues tuuliku kuulmise protsendiga.

Kordi, mil õues viibides oli tuulikuheli kuulda, võrreldi tuuliku tolle hetke töönäitajatega (s.t. toodetud elektrienergia, turbiini kiirus ja tuule kiirus võlli kõrgusel) kahes piirkonnas, mille kohta andmeid oli. Kaheksa vastanu kohta üheksast, kes kuulsid tuulikuheli vähemalt üks kord uurimisperioodi vältel, olid elektrienergia, turbiini kiiruse ja tuule kiiruse keskväärtused kõrgemad tuuliku kuulmise kordadel kui mittekuulmise kordadel (tabel 12). Kuid erinevused olid statistiliselt olulised vaid nelja vastanu korral.

Tabel 12. Keskmised erinevused toodetud elektrienergiast, turbiini kiiruses ja tuule kiiruses tingimustes, mil tuulikut polnud kuulda ja mil seda oli kuulda; andmed lähimast tuulikust piirkonnas K vastanute kohta.

Vastanu	Polnud kuuldav	Oli kuuldav	Erinevus	p-väärtus
<i>Toodetud energia (kW)</i>				
H 1	68	137	69	< 0,01
H 2	71	1	-70	0,456
H 3	68	126	58	< 0,05
H 4	61	190	130	< 0,001
H 5	68	151	83	< 0,001
K 2	247	293	46	0,729
K 3	204	265	61	0,117
K 4	190	209	19	0,659
K 8	218	455	237	0,123
<i>Turbiini kiirus (p/min)</i>				
H 1	19,8	23,9	4,1	< 0,05
H 2	20,0	13,9	-6,1	0,293
H 3	20,0	23,9	4,2	< 0,01
H 4	19,4	25,7	6,3	< 0,001
H 5	19,8	24,0	4,2	< 0,05
K 2	12,8	14,7	1,9	0,354
K 3	12,6	13,2	0,7	0,291
K 4	11,7	12,7	1,1	0,234
K 8	12,7	16,5	3,8	0,139
<i>Tuule kiirus (m/s)</i>				
H 1	4,79	6,08	1,29	< 0,05
H 2	4,84	2,60	-2,24	0,251
H 3	4,79	6,06	1,27	< 0,05
H 4	4,67	6,92	2,25	< 0,001
H 5	4,80	6,06	1,26	< 0,05
K 2	5,69	6,83	1,13	0,333
K 3	5,48	5,99	0,51	0,142
K 4	4,82	5,04	0,21	0,595
K 8	5,55	7,85	2,30	0,141

Andmeid analüüsiti ka kombineeritult, et uurida, kas leidub üldisi statistilisi toodetud elektrienergia, turbiini kiiruse ja tuule kiiruse erinevusi tuulikute kuulmise ja mittekuulmise kordade vahel. Arvutati keskmised erinevused nende kolme muutuja vahel üheksa vastanu kohta, kes uurimisperioodi vältel kuulsid tuulikuheli vähemalt ühe korra. Erinevus toodetud elektrienergiast kordade vahel, mil heli kuuldi ja mil seda ei kuuldud, oli 70 kW. Erinevus oli statistiliselt oluline (tabel 13). Ülejäänud kahe muutuja kohta statistiliselt olulisi erinevusi ei leitud.

Tabel 13. Keskmised erinevused toodetud elektrienergias, turbiini kiiruses ja tuule kiiruses üheksa vastanu kohta piirkondades H ja K, kes kuulsid tuulikuid vähemalt ühe korra uurimisperioodi vältel.

	Keskmised erinevused	t	Vabadusastmed	p-väärtus
Elektrienergia (kW)	70	2,54	8	< 0,05
Turbiini kiirus (p/min)	2,2	1,87	8	0,098
Tuule kiirus (m/s)	0,89	1,96	8	0,086

Huvitav küsimus on, millistel tuulekiirustel oli tuulikuid kuulda. Võiks oletada, et tuulikuid ei olnud kuulda väikestel tuulekiirustel, mil emiteeritava heli tasemed on madalad, ja samuti suurtel tuulekiirustel, mil muud tuule tekitatud helid (nt. puude müha) summutavad tuulikuheli. Seega suurim tõenäosus tuulikuheli kuulmiseks oleks keskmistel tuulekiirustel. Kuid sellist seaduspära ei leitud. Nelja vastanu puhul oli heli kuulmise tõenäosus statistiliselt oluliselt suurem tuule kiirustel üle 5 m/s kui nõrgema tuule korral. Ülejäänud vastanute puhul sarnast väärtust ei leitud.

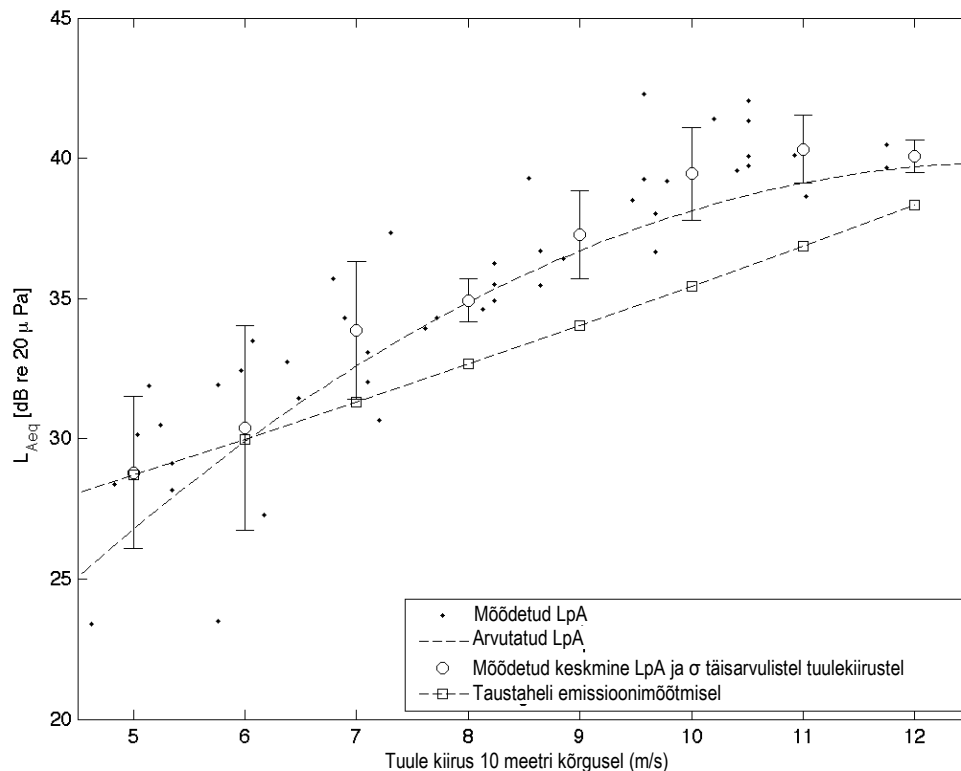
Samuti puudus seos tuule suuna ja kuuldavuse vahel. Olukorras, mil tuul puhus tuuliku poolt elamu poole ($\pm 45^\circ$), ei leitud suuremat heli kuulmise tõenäosust kui muudes olukordades.

7. Heli levimine

Immissiooni helitasemeid mõõdeti 500 m kaugusel tuulikust, kusjuures teine tuulik oli veel 300 m kaugemal. Analüüsiti igas tunnis 10 minuti jooksul salvestatud kümne üheminutilise helisignaali A-korrigeeritud rõhutasemeid. Iga 10-minutilise perioodi keskmine helirõhutase kanti diagrammile tuule kiiruse funktsioonina 10 m kõrgusel. Tuule kiirus 10 m kõrgusel arvutati võlli kõrgusel (65 m) mõõdetud tuule kiiruse põhjal, mis saadi tuuliku tööandmetest sama perioodi kohta. Seos 10 m kõrguse kohta arvatud ja võlli kõrgusel mõõdetud tuule kiiruse vahel põhines emissioonimõõtmiste andmetel ja tuletati lineaarse regressiooni teel. Kasutati just tuule kiirust võlli kõrgusel, mitte tuule kiiruse mõõtmist 10 m kõrgusel, kuna immissiooni helitaseme määrab peamiselt helirõhutase allikal (s.t. vastastikmõju tuuliku ja tuulikule mõjuva tuule kiiruse vahel).

Allpool on esitatud kokkuvõtte tulemustest allatuule tingimustes (tuule kiirus $\pm 45^\circ$ piires suunal allikalt vastuvõtukohtale). Mõõtmistes on arvestatud teise tuuliku hinnangulist mõju (1.5 dB(A)) ja tuuletõkete lisamisest tingitud kadu (1 dB(A)). Pärast helisignaalide kuulamist jäeti välja kõrvalistest allikatest heli sisaldavad üheminutilised perioodid. Tuule kiirustel alla 5 m/s tehtud salvestistel oli tuuliku heli üldiselt nõrk võrreldes kõrvaliste helidega ja seetõttu neid salvestisi ei arvestatud. Mõõdetud helitasemeid ei kohandatud taustahelitasemetele (mõõdetud emissioonimõõtmiste ajal, vt. 4.4), kuna need tasemed olid liiga kõrged võrreldes tulemustega immissioonimõõtmistest (s.t. immissioonandmed ei olnud üle 3 dB(A) suuremad kui taustahelitasemed, nagu need mõõdeti emissioonimõõtmiste ajal). See oli tõenäoliselt tingitud väiksemast tuuletekkelisest müra-st immissioonimõõtmistel, mil mikrofon kinnitati püstise laua külge, kui emissioonimõõtmistel, mil laud oli paigutatud maa peale.

Mõõdetud A-korrigeeritud helirõhutasemed on näidatud joonisel koos arvatud tasemetega. Mõõdetud tasemed on samuti rühmitatud täisarvulistele tuulekiirustele, kus keskväärtus on näidatud tühja ringikesena ja standardhälve püstjoontena.



Joonis 7. Mõõdetud ja arvutatud immissioonitasemed allatuule tingimustes erinevatel tuulekiirustel tuulikul 10 m kõrgusel.

Kokkulangevus mõõdetud ja arvutatud andmete vahel oli hea tuulekiirustel 5-12 m/s. Erinevused mõõdetud ja arvutatud helitasemete vahel jäid statistiliselt lubatud vea piiridesse. Üsna suur kõikumine keskmise helitaseme ümber näitab, et tuuliku heli tugevus samal tuulekiirusel võib tugevasti varieeruda. Samuti leiti helisignaalide kuulamisel, et tuulik oli kuuldav suhteliselt suurtel tuulekiirustel, kuni 12 m/s. Signaalid kuulati üle kõrvaklappidega siseruumides ja seetõttu nad erinesid välitingimustest, milles kõrvaline tuulemüra pea ja kõrvade ümber võis heli tajumist segada.

Rootsi Keskkonnaameti väljapakutud helilevimudeli [2001] ja PE meetodi kohaselt arvutatud immissioonitasemete võrdlus näitas, et erinevused olid väikesed ja statistiliselt ebaolulised. Heli allika (tuuliku) suur kõrgus ja sellega võrreldes üsna väike vahemaa (550 m) tähendab, et ilmastikutingimuste muutuste mõju heli levimisele ei muuda

oluliselt A-korrigeeritud helirõhku. Seetõttu saab väikeste vahemaade korral, kui ei esine muid probleeme, tuuliku heli tasemeid arvutada rahuldava täpsusega lihtsustatud mudelite abil.

Mõõtmistest 550 m kaugusel tuulikust ilmnes suurem helitaseme kõikumine ühel tuulekiirusel kui võis prognoosida täiustatud helilevimudeli (PE meetodi) põhjal, isegi kui võeti arvesse muutusi refraktsioonis levimise ajal. Helitaseme kõikumised on tõenäoliselt tingitud helirõhutasemete kõikumistest heliallikal (s.t. et emissioonitasemed tuulikult võivad kõikuda).

8. Arutelu ja järeldused

Töö- ja Keskkonnameditsiini Osakonnas läbiviidud kahe epidemioloogilise uurimuse kombineeritud analüüsid kinnitavad ja toetavad varem esitatud andmeid. Nii kuuldavus kui häiritus suurenevad tuulikuaheli tasemetega tõusuga. Analüüsid näitavad ka, et häirituse oht on suurem, kui tuulikud on elamutes näha. Samuti oli häirituse oht suurem maapiirkondades võrreldes asulapiirkondadega, maastiku iseärasused aga mõju ei avaldanud. Tulemused on kooskõlas ühest Gotlandil, Rootsis, teostatud juhtumiuuringust [Widing et al., 2005] esitatud tulemustega. Häiritute protsent maakohtades vastab häiritute protsendile Gotlandi uurimuses igas helitasemerühmas.

Ainus tervisega seotud muutuja peale häirituse, mis oli otseses seoses tuulikuaheli tasemetega, oli uni. Tuulikuahelist tingitud unehäired võivad peamiselt olla probleemiks inimestele, kes magavad avatud akendega. Seda oletust kinnitasid kahe erandiga kõik vastanud, kelle und müra häiris; nad kõik magasid avatud või praakil aknaga. Magamine avatud akendega on levinud. Meie uurimused näitavad, et praakil aknaga magavad maakohtade elanikest umbes kolm neljandikku suvel ja 18% talvel [Pedersen and Persson Waye 2004]. Kuid on vaja rohkem teadmisi otsustamiseks, kas unehäired on selliseks probleemiks, mida tuleb edaspidi arvesse võtta tuuleparkide planeerimisel.

Päevikute kasutamisest on teaduskirjanduses harva juttu, kuid käesoleval juhul leiti see olevat kasulik. Selle meetodi kehtivust kinnitab statistiliselt oluline seos kuuldavuse ja helitasemetega vahel, aga ka turbiinil elektrienergia tootmise erinevuste seotus erinevustega kuuldavuses. Tuulikute kuulmise protsent õues viibides varieerus 4-86% ja oli, nagu varem kirjeldatud, statistiliselt oluliselt seotud helitasemetega. Päevikuuurimus näitas ka, et inimeste vahel on suured erinevused kodus viibimise kestvuses ja õues viibimise kordade sageduses; see on kõikumine, mis võib teatud määral seletada epidemioloogilistest uurimustest leitud kõikumist häirituses sama tugevusega heli kuulnud vastanuterühmas.

Oli võimalik teostada piisavaid tuulikuaheli välimõõtmisi (immissioonimõõtmisi), kuna mobiilset mõõtmisjaama sai viia erinevatesse kohtadesse, salvestamiseks heli korraga mitu

nädalat järjest erinevates ilmastikutingimustes. Me suutsime hankida tuulikute tööandmeid kõikidest kohtadest peale ühe tänu heale koostööle tuulikute tootjate ja omanikega. Polnud võimalik parandada immissioonandmeid taustahelitasemete võrra, kuna taustahelitasemed olid liiga kõrged. See tähendab, et tuuliku heli tegelikud tasemed 550 m kaugusel võisid olla mõõdetutest veidi madalamad. Kuid mõõtmised on kooskõlas arvutatud väärtustega, mis näitab, et taustaandmetest tingitud viga on väike.

Oletus, et PE meetod prognoosib mõõdetud väärtusi paremini kui Rootsi Keskkonnakaitseameti mudel [2001], ei leidnud kinnitust. Oletus põhines eeldusel, et heli levimisel allatuult tekib koondumise efekt. Koondumist võiks selgitada kiirtemudeli abil. Ühtlase atmosfääri ja tasase maapinna korral järgib heli levik kaht kiirteed allikalt vastuvõtupunkti, üks tuleb otse teed ja teine peegeldub maapinnalt. Allatuult heli murdub alla maapinna poole ja seega võib kiir piisavalt tugeva tuule korral peegelduda kaks või enam korda. Mitmekordselt peegeldunud kiirte heli lisandub otse teed tulnud helile ja esimest korda maapinnalt peegeldunud helile. Kuid arvutused PE meetodil näitavad, et tuule mõju heli levimisele on väike ja et väikeste vahemaade korral, käesoleval juhul 550 m, saab tuuliku heli ekvivalenttasemete prognoosimiseks kasutada lihtsustatud meetodeid. Olulist koondumist allatuule tingimustes võib eeldada vaid pikemate vahemaade korral. Stabiilsest atmosfäärist tingitud koondumine, kus õhutemperatuur kõrguse suurenedes maapinnast tõuseb (langemise asemel, mis on kõige tavalisem olukord), võib samuti põhjustada tugevamat refraktsiooni. Tuuliku heli puhul eeldatakse temperatuuri pöördgradiendist tingitud koondumine olevat väiksem kui tuulest tingitud koondumine ja seetõttu avaldavat mõju vaid suurte vahemaade korral.

Määramatus allikal (s.t. emissioonitaseme määramatus) on peamine määramatus mõjutav tegur helitasemete arvutustes vastuvõtupunkti kohta (s.t. immissioonitasemete arvutustes). Standardikohased mõõtmised võivad viia vigadeni mõõdetud väärtustes, kuna turbiini kiirus ei ühtlustu tuule kiirusega hetkeliselt. Tuulekiiruse profiil (s.t. kui palju tuule kiirus suureneb kõrguse kasvades) võib samuti erineda eeldatavast profiilist, mis mõjutab mõõdetud väärtuste teisendamist standardolukorrale 8 m/s 10 m kõrgusel.

Veel enam, tootja esitatud emissioonitasemete kasutamiseks ei tohi mõõdetud turbiin erineda tüübist, mille kohta emissioonitasemed esitati.

Suur kõikumine mõõdetud helitasemetes ühel ja samal tuulekiirusel võib viidata sellele, et inimesed kuulevad mõnikord tugevamat heli kui standardsele 8 m/s tuulekiirusele arvutatud heli. Tulemused näitavad ka, et heli on võimalik kuulda isegi suurematel tuulekiirustel. Helisignaali kuulamisel leiti, et tuulikuuheli on kuuldav vähemalt kiirusteni 12 m/s. Isegi kui olukord ei olnud täiesti võrreldav tegeliku olukorraga (mikrofoniga tehtud salvestisi nõrgendasid kaks tuuletõket ja tegelikkuses tekitab tuul kuulaja kõrvade ümber heli, mis võib mõjutada tuulikuuheli kuulmise võimalikkust), on usutav, et teatud olukordades võib tuulikuuheli kuulda suurematel tuulekiirustel.

Päevikuuurimuse tulemused osutavad samas suunas. Varasemad oletused, et tuulikuuheli on kõige kergem tajuda tuulekiirustel vahemikus 5-8 m/s, ei leidnud seega kinnitust. Vastupidi, tuulikuuheli kuulmise oht näib suurenevat alates 5 m/s, ja kiirustel kuni 10-12 m/s vähenemist ei täheldatud. Tulemusi tuleks tõlgendada ettevaatusega väikese vastanute hulga tõttu, kuid nad näitavad, et heli kuulmise kirjeldustes tuleks arvestada muudegi tingimustega kui 8 m/s.

Kokkuvõtteks, meie uurimused näitavad, et tuulikuuheli kuulmise võimalikkus ja sellest häirituse oht suureneb helitasemete tõustes. Heliga ei kaasnenud otsesid kahjulikke tervisemõjusid, ehkki unehäirete oht vajab edasist uurimist. Uute tuuleparkide püstitamisele eelnevates keskkonnaloa menetlustes kasutatav mudel prognoosib helitasemeid hästi. Kuid kõikumised helitasemetes allikal (emissioonitasemetes), aga ka heli kuuldavuse võimalikkus suurtel tuulekiirustel näitab, et keskkonnamõju hindamise standardeid heli kuuldavuse kohta lähiümbruse elanikele tuleb tõsta.

9. Kasutatud kirjandus

- Altman, D.G., Machin, D., Bryant, T.N., Gardner, M.J. (2000). *Statistics with Confidence*, 2nd ed. London: BMJ Books.
- Babisch, W., Beule, B., Schust, M., Kersten, N., Ising, H. (2005). Traffic noise and risk of myocardial infarction. *Epidemiology*, 16, 33–40.
- Bengtsson, J., Persson Waye, K., Kjellberg, A. (2004). Sound characteristics in low frequency noise and their relevance for the perception of pleasantness. *Acta Acoustica*, 90, 171–180.
- Bradley, J.S. (1994). Annoyance caused by constant-amplitude and amplitude-modulated sound containing rumble. *Noise Control Engineering Journal*, 42, 203–208.
- Calvert, G.A. (2001). Crossmodal processing in the human brain: Insights from functional neuroimaging studies. *Cerebral Cortex*, 11, 1100–1123.
- IEC (2002). International Electrotechnical Commission: *IEC 61400-11: Wind turbine generator systems – Part 11: Acoustic noise measurement techniques*, 2nd edition.
- Naturvårdsverket (2001). *Ljud från vindkraftverk*. Rapport nr 6241. Stockholm, Sverige.
- Pedersen, E., Persson Waye, K. (2004). Perception and annoyance due to wind turbine noise: a dose-response relationship. *Journal of the Acoustical Society of America*, 116, 3460–470.
- Pedersen, E., Persson Waye, K. (2007). Wind turbine noise, annoyance and self-reported health and well-being in different living environments. *Occupational and Environmental Medicine*, 64, 480–486.
- Pedersen, E., Larsman, P. (2008). The impact of visual factors on noise annoyance among people living in the vicinity of wind turbines. *Journal of Environmental Psychology*, 2008, 28, 379–389.
- Persson Waye, K., Öhrström, E. (2002). Psycho-acoustic characters of relevance for annoyance of wind turbine noise. *Journal of Sound and Vibration*, 250, 65–73.
- Van den Berg, G.P. (2006). The sound of high winds: The effect of atmospheric stability on wind turbine sound and microphone noise. Doctoral thesis. Groningen, The Netherlands; Rijksuniversiteit Groningen.
- Widing, A., Britse, G., Wizelius, T. (2005). *Vindkraftens miljöpåverkan, fallstudie av vindkraftverk i boendemiljö*. Centrum för Vindkraftsinformation vid Högskolan på

Gotland.

10. Aruanded projektiperioodil 2006–2008

Doktoriväitekiri

Pedersen, E. Human response to wind turbine noise: Perception, annoyance and moderating factors. Doctoral thesis. Göteborg University, 2007.

<http://hdl.handle.net/2077/4431>

Magistriväitekiri

Lauret Ducosson I. Wind turbine noise propagation over flat ground: Measurement and predictions using a parabolic equation method. Dept of Civil and Environmental Engineering, Division of Applied Acoustics, Chalmers University of Technology, Göteborg Sweden. Master thesis 2006:10.

Teadusartiklid

Pedersen, E., Persson Waye, K. Wind turbine noise, annoyance and self-reported health and well-being in different living environments. *Occupational and Environmental Medicine*, 2007, 64, 480-486. doi:10.1136/oem.2006.031039.

Pedersen, E., Hallberg, L. R-M., and Persson Waye, K. Living in the vicinity of wind turbines: A grounded theory study. *Qualitative Research in Psychology*, 2007, 4 (1-2), 49 – 63. doi: 10.1080/14780880701473409.

Pedersen, E., Persson Waye, K. Wind turbine: A low level noise source interfering with restoration? *Environmental Research Letters*, 2008, 3 (1), 015002. doi: 10.1088/1748-9326/3/1/015002.

Pedersen, E., and Larsman, P. The impact of visual factors on noise annoyance among people living in the vicinity of wind turbines. *Journal of Environmental Psychology*, 2008, 28, 379-389. doi: 10.1016/j.jenvp.2008.02.009.

Rootsi aruanne

Pedersen E, Persson Waye K. Ljud från vindkraftverk - hörbarhet i kuperad och flack terräng. Rapport från Arbets- och miljömedicin Sahlgrenska akademien, Göteborgs universitet, nr 120. ISSN -1650-4321, ISBN-978-91-7876-119-7.

Rahvusvaheliste konverentside materjalid

Pedersen, E., Persson Waye, K., Differences in perception and annoyance of wind turbine noise between dissimilar environs. In: Proceedings of the 6th European Conference on Noise Control, Tampere, Finland, 30 May – 1 June 2006. Paper ID:164.

Pedersen, E., Larsman, P., Aesthetical aspects of attitude towards the noise source influencing noise annoyance example from a study on response to wind turbines. In: Proceedings of Internoise 2007, International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Istanbul, Turkey, 28-31 August 2007, Paper 833100.