

ORIENTERING FRA MILJØSTYRELSENS REFERENCELABORATORIUM FOR STØJMÅLINGER

Genevirkning af vibrationer

Orientering nr. 49

PFi/THP/ilk

27. januar 2014

- Vibrationer fra godstog er mere generende end vibrationer fra passagertog
- Vibrationer fra anlægsarbejder er tydeligt mere generende end vibrationer fra jernbaner ved samme vibrationsbelastning
- Vibrationer opleves mere generende om aftenen end om dagen
- Vibrationer opleves mere generende om natten end om aftenen
- En given vibrationsbelastning opleves tydeligt mere generende, hvis støjbelastningen samtidig er høj
- En given støjbelastning opleves tydeligt mere generende, hvis vibrationsbelastningen samtidig er høj

Indhold

1. Indledning.....	2
2. Mærkbare vibrationer	2
3. Målestørrelser og indikatorer	4
4. Genevirkning – dosis-respons	6
5. Togvibrationer	7
6. Anlægsarbejder.....	11
7. Samtidig støj- og vibrationsbelastning fra jernbaner.....	14
8. Relationer til danske forhold	17
9. Resume	18
10. Referencer	19
Appendiks 1: Evaluering af vibrationspåvirkning efter BS 6472-1.....	20

1. Indledning

Inden for de seneste år har der særligt i Europa været fokus på genevirkning af vibrationer. I takt med fremkomsten af højhastighedsbaner og forøget opmærksomhed på store anlægsarbejder har behovet for at skabe et bedre grundlag for at forstå og forudsige naboernes reaktioner på vibrationer vist sig særligt påkrævet.

I Storbritannien er der netop afsluttet et mangeårigt projekt, hvor blandt andet Salford University har undersøgt folks oplevede gene af vibrationer fra jernbaner og fra anlægsarbejder [1]. EU-projekt "Rivas" [2] har sideløbende arbejdet med vibrationer fra jernbaner. Et andet EU-projekt CargoVibes [3] handler om reduktion af vibrationer fra godstog for de nærmeste naboer til banerne.

I Japan og i Sverige [4] er der udført tilsvarende undersøgelser af gener fra vibrationer fra jernbaner.

Generelt er der i mange år arbejdet ud fra et grundlag etableret i 1970'erne og 1980'erne, hvor etableringen af miljølovgivningen krævede bedre forståelse for vibrationers påvirkning af mennesker og den medfølgende genevirkning. I nyere undersøgelser ses der også på genevirkningen af samtidig støj- og vibrationspåvirkning og på vibrationer fra jernbaner i sammenhæng med trafikintensiteten på banen, altså på hyppigheden af togpassagerne på en given strækning, og på hvad det betyder for genevirkningen.

Formålet med denne orientering er at give et indblik, i hvilken retning resultaterne af de nye undersøgelser peger. Hvad er der sket på området, og kan der gives nogle kvalitative forklaringer? Fokus er lagt på de britiske undersøgelser beskrevet i [1].

Det er ikke formålet med denne orientering at foreslå nye målemetoder eller nye grænseværdier.

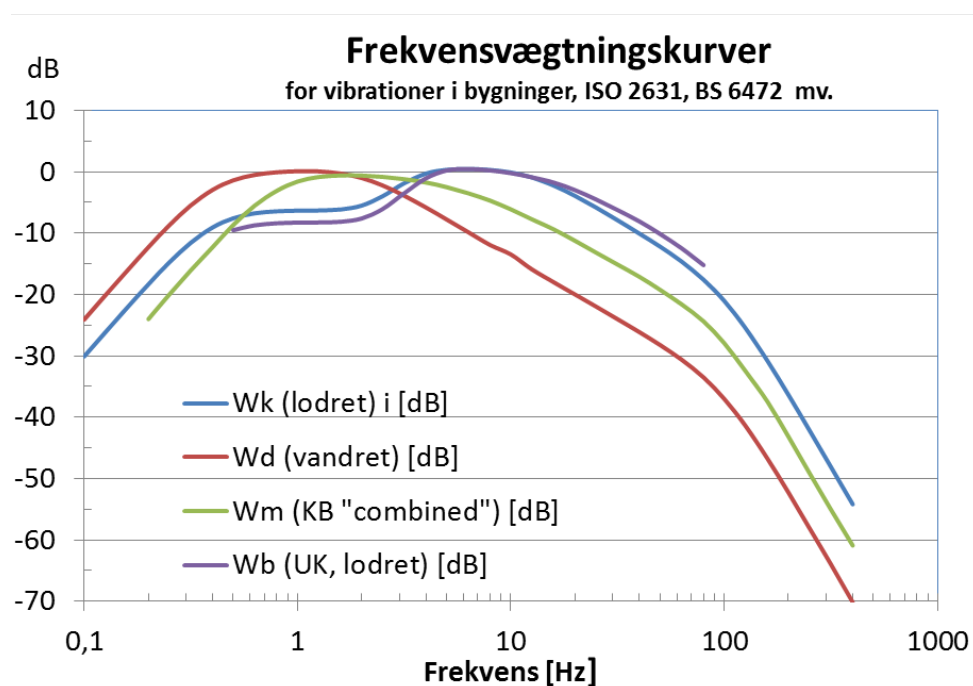
2. Mærkbare vibrationer

Det er gennem tiden undersøgt i flere sammenhænge, hvordan vi oplever og mærker vibrationer, herunder hvad vores føletærskel er. Undersøgelser er typisk relateret til oplevet gene i boliger (helkropsvibrationer) eller til arbejdsmiljø (hånd-arm-vibrationer) og skader ved fx at benytte vibrerende håndværktøj. Det følgende omhandler udelukkende virkningen på mennesker fra vibrationer i bygninger forårsaget af eksterne kilder såsom togpassager og anlægsarbejder. Som en sidebemærkning kan nævnes, at vibrationer kan føles ved vibrationsniveauer, der er lavere end de niveauer, der kan forårsage skader på bygninger. Risikoen for skader på bygninger behandles ikke i denne orientering, men det skal nævnes, at frygten for bygnings-skader måske kan have indflydelse på graden af gene.

Standarderne i ISO 2631-serien [5], [6] handler om mekaniske vibrationer og chok, hvoraf Del 1 handler om vurderinger af helkropsvibrationer og Del 2 om vibrationer i bygninger. I Danmark bruger vi ikke direkte sidstnævnte standard til eksterne vibrationer, men den refereres

ofte som en væsentlig standard på området. Den indeholder frekvensvægtningskurver i lighed med den vægtningskurve, som vi i Danmark benytter til eksterne vibrationer - KB-vægtningen.

Mennesker er ikke lige følsomme for vibrationspåvirkninger i alle retninger. Ved helt lave frekvenser under 3-4 Hz er den menneskelige følsomhed størst i kroppens tværretning (frem/tilbage, dvs. sideværts for stående personer) og mindre i kroppens længderetning (op/ned ved stående personer). Ved frekvenser over 3-4 Hz er det omvendt. Hvis vibrationsbelastningen er under 3-4 Hz og lodret, er vi med andre ord mest følsomme, når vi ligger ned. På samme måde som ved A-vægtning af støjsignaler benyttes frekvensvægtningskurver til at korrigere vibrationssignalet, så det svarer til vores frekvensafhængige følsomhed for vibrationer. På Figur 1 ses kurver for vibrationsfølsomhed W_k (lodret) og W_d (vandret), som benyttes i ISO 2631-1 til at korrigere accelerationssignaler [5]. På figuren er tillige vist en "kombineret kurve" (W_m), som benyttes uafhængigt af måleretning, og denne er identisk med KB-vægtning. W_b -kurven, som indgår i den britiske standard BS 6274-1 [7], er stort set identisk med W_k , men benyttes for frekvensområdet 0,5 Hz til 80 Hz.



Figur 1

Frekvensvægtningskurver for vandrette (W_d) og lodrette (W_k) vibrationer i bygninger samt en kombineret kurve (W_m), som er identisk med KB-vægtning. Til sammenligning er også vist W_b , som indgår i mange af de efterfølgende figurer i denne tekst. W_b er stort set identisk med W_k . Efter [6], [7].

KB-vægtningen, som benyttes i Danmark, er i frekvensområdet 1-80 Hz identisk med W_m -kurven (tidligere W.B. (whole body) combined). Ved højere frekvenser er KB en "middel"-kurve mellem W_k og W_d . I Danmark benyttes frekvensområdet mellem 1 Hz og 80 Hz, dvs. signalet KB-vægtes og båndpasfiltreres mellem 1 Hz og 80 Hz, se reference [8] [9].

3. Målestørrelser og indikatorer

En tværgående sammenstilling af måleresultater fra forskellige lande kompliceres af, at der benyttes meget forskellige målestørrelser og indikatorer for mærkbare vibrationer i bygninger. Yderligere måles i op til tre retninger (lodret og to vandrette). I nogle lande skal der måles både vandret og lodret; i andre lande kun lodret.

Vibrationer kan måles og angives ved:

- Forskydning, som angives i m (eller mm)
- Hastighed (svingningshastighed), som oftest angives i mm/s (eller $\mu\text{m/s}$ eller nm/s)
- Acceleration, som angives i $\mu\text{m/s}^2$

Ved acceleration er det rms-værdien af accelerationsniveauet i dB re $1 \mu\text{m/s}^2$, der hyppigst benyttes, og ved hastighed er det svingningshastighedsniveauet i dB re 1 nm/s. Det er vigtigt at notere sig, hvilken reference der benyttes for målestørrelsen. Nogle gange ses også referencen 50 nm/s angivet for svingningshastighed, særligt i forbindelse med strukturstøj, dvs. støj genereret af vibrationers udbredelse gennem jorden til bygninger.

Indikatorer (målestørrelserne) varierer fra land til land. På Internoise-konferencen i 2013 blev der i en præsentation [10] vist en oversigt over nogle af de indikatorer, der er benyttet i den seneste væsentlige litteratur. Tabel 1 viser (ukommenteret) denne oversigt. Til sammenligning er de danske måleparametre vist under tabellen.

Study	Metric	Unit	Time	Weighting	Direction
Germany	KB	-	0.125s	DIN 4150	Vertical
Norway	V_{w95}	mm/s	1s	NS 8176 /ISO W_m	Vertical dominant
Japan	L_{Vmax}	dB re 10^{-5} m/s ²	0.63s	JIS C1510	Vertical
USA/Canada	Passby maximum velocity ($\mu+2\sigma$)	dB re $1 \mu\text{in/s}$	1s	-	Vertical
UK	Passby RMS; 24 hr VDV	m/s ² ; m/s ^{1.75}		ISO W_b , W_d ; BS 6472 W_b , W_d	Vertical/horizontal
Sweden	Maximum velocity	mm/s	1s	SS 460 48 61/ W_m	Vertical
Netherlands	V_{max}	-	0.125s	DIN 4150 /SBR-B	Vertical/horizontal
Poland	$V_{d,max}$	-	0.125s	ISO W_b , W_d	Vertical/horizontal
Danmark	L_{aw} max (KB)	dB re $1 \mu\text{m/s}^2$	1 s (SLOW)	KB	vertikalt/horisontalt

Tabel 1

Eksempler på måleparametre og indikatorer som benyttes i en række europæiske lande, Japan og USA til at karakterisere vibrationer fra tog. Efter [10]. Til sammenligning er de danske måleparametre vist under tabellens bundlinje.

Ud over at der benyttes forskellige parametre (hastighed/acceleration), er der forskel på tidsvægtning og midlingstid. Alt i alt giver det et ret forvirrende udtryk, især ved sammenligning af resultater opnået i forskellige lande.

I Danmark [8] blev det i starten af 1980'erne besluttet at benytte den tyske vægtningsstandard for mærkbare vibrationer (KB-vægtning) som mål for genevirkningen (se Figur 1). Det blev ligeledes besluttet at basere vurderingen af vibrationsgener på maksimalt accelerationsniveau med tidsvægtning S (Slow) med betegnelsen L_{aw} . Det gælder ikke bare for togvibrationer, men for alle former for eksterne vibrationer. Retningslinjerne er senere opdateret [9], men baggrunden for de valg, der i sin tid blev taget, er fint beskrevet i den oprindelige udgave. Der skal i Danmark måles i tre retninger, og resultatet for den retning, hvor vibrationsniveauet er højest, sammenlignes med grænseværdien.

I [8] og [9] er det beskrevet, at den gennemsnitlige føletærskel er ca. 71 dB, og grænseværdien for boliger er 75 dB (begge KB-vægtet accelerationsniveau L_{aw}).

I det følgende vil der blive refereret en del til britiske undersøgelser, hvor resultaterne er givet ved VDV (Vibrations Dose Value). Definitionen af VDV er:

$$VDV = \left(\int_0^T a^4(t) dt \right)^{1/4} \quad (1)$$

hvor VDV har enheden $m/s^{1.75}$. $a(t)$ er accelerationssignalet i m/s^2 og T er måletiden i sekunder.

Kvantitativt kan VDV ikke sammenlignes med danske målestørrelser dels på grund af måleenheden, dels på grund af at danske værdier er baseret på maksimalniveauer og de britiske på middelværdier over mange timer (24 for jernbaner). Denne midling kan bedre sammenlignes med den måde, vi bruger til at karakterisere støj fra virksomheder (L_{Aeq}) som et ækvivalentniveau over et givet tidsrum. Dog er der den forskel, at der ved beregningen af L_{Aeq} benyttes potensen 2 mod potensen 4 i VDV. Det betyder, at kraftige hændelser får større vægt og betydning for resultatet af VDV end for L_{Aeq} .

4. Genevirkning – dosis-respons

Som for støjområdet bestemmes genevirkningen af vibrationer ved interviewundersøgelser, og resultaterne angives ved hjælp af såkaldte dosis-respons sammenhænge. På engelsk kaldes dette dose-response eller exposure-response.

Dosis-respons beskriver sammenhængen mellem en påvirkning (exposure, dose) og en virkning - med andre ord beskrives sammenhængen mellem dosis af en vibrationspåvirkning og andelen af befolkningen, hvor genen eller effekten optræder. Dette svarer fuldt og helt til de velkendte genekurver for trafikstøj, hvor sammenhængen mellem støjbelastning L_{den} og andelen af befolkningen, der føler sig generet (eller stærkt generet), er vist grafisk i form af dosis-respons kurver.

Sammenhængen dannes ved at spørge en del af befolkningen (respondenterne), om deres reaktioner på en given belastning. På støjområdet er der en international standard [11] for socio-akustiske undersøgelser - ISO 15666: "Assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys". Standarden beskriver, hvordan støjgene undersøges og dosis-respons sammenhængen etableres. Kort fortalt bliver respondenterne spurgt om mange forhold, hvor oplevet støjgene indgår i en del af spørgsmålene. Undersøgelsen af støjgene er altså kamufleret ved hjælp af spørgsmål om andre forhold. Respondenterne bliver bedt om at angive genegraden dels med verbale genebeskrivelser (5-punkts beskrivelse), og dels med en 11-punkts tal-skala fra 0 til 10. Tilsvarende verbale genebeskrivelser på dansk kan findes i [12].

Spørgsmålene om vibrationsgener var i de britiske undersøgelser [1] baseret på ISO 15666; fx blev spørgsmålet om vibrationer fra jernbanen formuleret således:

"Thinking about the last 12 months or so, when indoors at home, how bothered, annoyed or disturbed have you been by feeling vibration or shaking or hearing or seeing things rattle vibrate or shake caused by the railway including passenger trains, freight trains, track maintenance or any other activity from the railway?" Dette kan oversættes til: *"Hvis du tænker på de seneste ca. 12 måneder, når du er hjemme og indendørs, hvor meget føler du dig irriteret, generet eller forstyrret af mærkbare vibrationer eller rystelser - eller ved at høre eller se ting rasle, vibrere eller ryste på grund af jernbanen, inklusive passagertog, godstog, vedligeholdelsesarbejder eller hvilken som helst aktivitet på jernbanen"*.

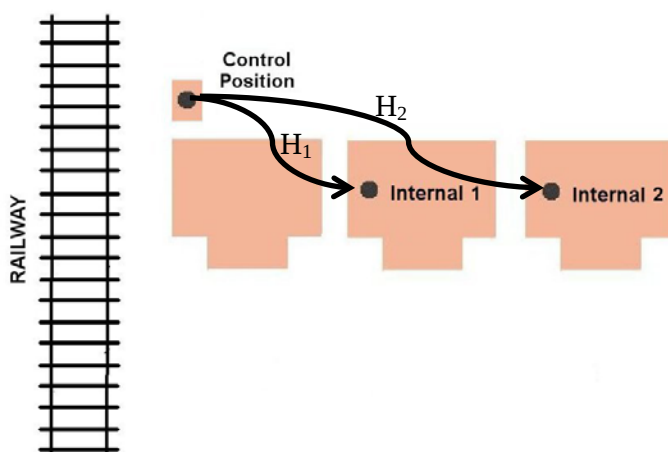
Respondenten bliver bedt om at tænke på de seneste 12 måneder og ikke kun den umiddelbare situation. Desuden omfatter spørgsmålene afledte virkninger af vibrationer, herunder de sædvanlige genemæssige symptomer: raslende genstande og klirrende glas i vitrineskabet og lignende. (Efter de danske vejledninger er det kun gener fra de følte vibrationer, der indgår i bedømmelsen af ulemperne). Yderligere bliver der spurgt ind til alle regelmæssige aktiviteter knyttet til jernbanen, ikke kun gener fra forbipasserende tog.

I mange af de efterfølgende figurer er vist de engelske tekster for genegraden efter ISO 15666, hvor Stærkt generede (Highly annoyed) er alle, der har givet svar i de numeriske kategorier 8, 9 og 10, Generede (Annoyed) er alle der har givet svar i kategorierne 5 til 10 og Lettere generede (Little annoyed) er alle, der har givet svar i kategorierne 3 til 10.

5. Togvibrationer

De britiske undersøgelser [1] blev udført som en kombination af vibrationsmålinger og spørgeskemaundersøgelser. Ved målingerne blev der etableret en kontrolmålestation tæt ved sporet som en "overvågningsstation", hvor vibrationsniveauet af mange togpassager blev målt. Herudover blev der for et færre antal togpassager målt samtidigt i boligerne (Figur 2), således at overføringsfunktionen mellem de udendørs kontrolpositioner og boligerne kunne etableres. Genevirkningen blev bestemt ved interviews af beboerne.

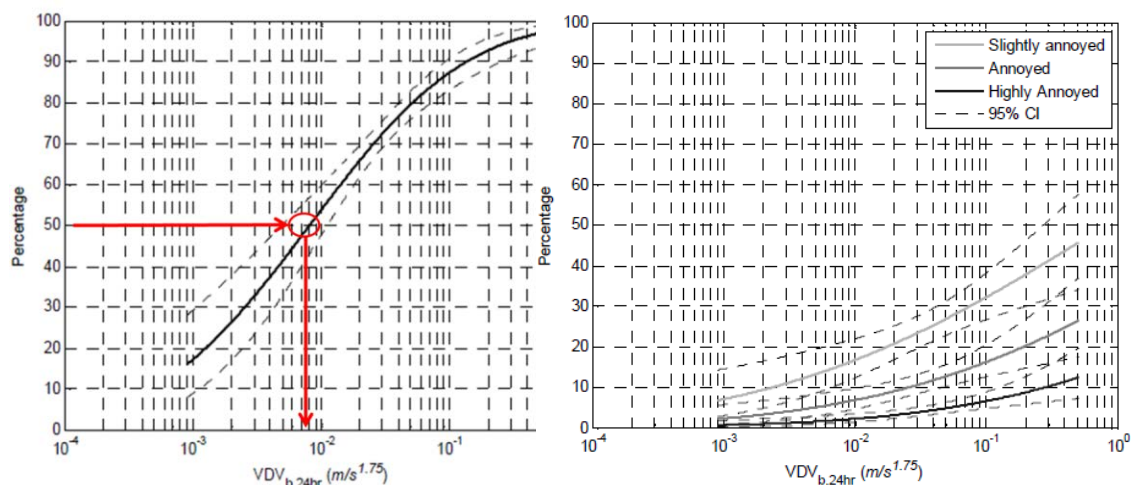
Målingerne blev foretaget 12 steder - både ud for højhastighedsbaner og konventionelle baner med persontog og godstog. Et af stederne var ved en undergrundsbane, og et andet sted var ved en almindelige jernbane (ikke højhastighedstog), tæt ved en station. I alt omfatter undersøgelsen 931 respondenter.



Figur 2

Måleopstilling - jernbanevibrationer. Skitsen viser, at der var etableret en udendørs kontrolposition (Control Position) tæt ved jernbanen. Vibrationsniveauet indendørs blev bestemt ud fra målinger af overføringsfunktioner mellem kontrolpositionen og de indendørs målepositioner (Internal 1, Internal 2, etc.). Efter [1].

Venstre side af Figur 3 viser, hvilken andel af befolkningen, som netop kan mærke et vibrationsniveau i boligen som funktion af vibrationsbelastningens størrelse i VDV. Til venstre i Figur 3 er med rød markering vist, at 50 % af befolkningen angiver at kunne mærke vibrationer ved $VDV = 0,007 \text{ m/s}^{1,75}$. De stiplede kurver over og under de enkelte genkurver svarer til et 95 % konfidensinterval. Det bemærkes, at dette ikke er en føletærskel, idet VDV er midlet over 24 timer, og samme værdi af VDV kan fremkomme ved mange forskellige kombinationer af togtrafik med forskellig trafikintensitet og forskellig vibrationsniveau fra de enkelte tog, der passerer.



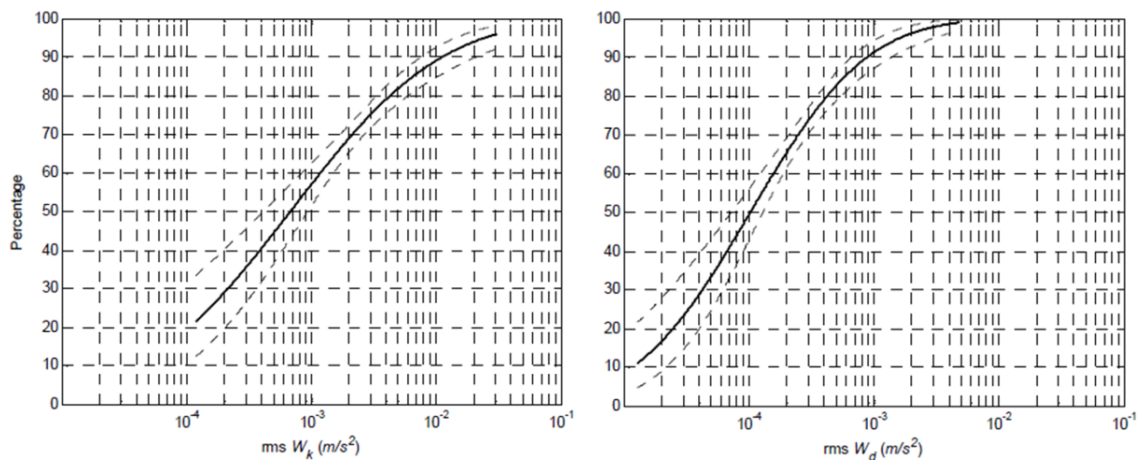
Figur 3

Til venstre se andelen af befolkningen, der angiver at kunne mærke vibrationer (VDV). Til højre ses genekurver med andel generede, lettere generet og stærkt generede. Efter [1].

Til højre i Figur 3 er genegraden vist som funktion af vibrationsbelastningen. Det ses - ikke uventet - at genegraden øges med stigende vibrationsbelastning. Ved $VDV = 0,007 \text{ m/s}^{1,75}$, hvor ca. 50 % af befolkningen netop kan mærke vibrationerne, er der ca. 3 % som angiver, at de er stærkt generede, ca. 5 % er generede, og ca. 15 % som er lettere generede.

I Danmark er det typisk på støjområdet, at grænseværdier svarer til et niveau, hvor ca. 10 % er stærkt generede. Ved dette vibrationsniveau ($VDV = 0,3 \text{ m/s}^{1,75}$) vil ca. 22 % være generede og 42 % lettere generede ifølge de engelske undersøgelser (Figur 3).

I [1] er der gennemført enkelte analyser med rms-værdien af accelerationsniveauet som supplement til VDV, Figur 4.



Figur 4

Andel af befolkning der angiver netop at kunne mærke vibrationer. Disse kurver er baseret på rms-værdi af accelerationsniveau i lodret (venstre) og vandret (højre) retning med vægtning efter ISO 2631-1. Efter [1].

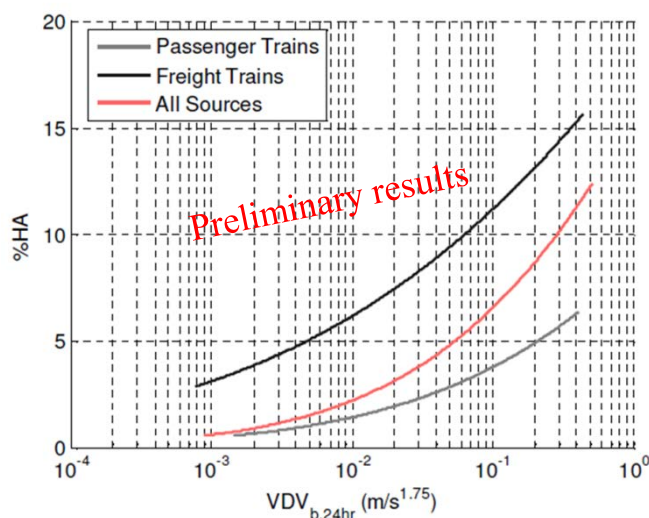
Værdierne er vægtet med henholdsvis W_k for lodrette vibrationer og W_d for vandrette vibrationer i henhold til ISO 2631-1. Kurven til venstre (lodrette vibrationer) viser, at omkring $7 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2$ vil 50 % af befolkningen mærke vibrationer, mens det i vandret retning vil være netop mærkbart omkring 10^{-4} m/s^2 .

De to kurver er ikke fuldt sammenlignelige. W_k - og W_d -kurven vægter forskelligt, men der er tydelige indikationer af, at vibrationer i vandret retning er mere generende end vibrationer i lodret retning. Kurverne i Figur 4 svarer til føletærskler, idet rms-værdien er bestemt over de enkelte togpassager og ikke, som ved VDV i Figur 3 (tv.) , midlet over 24 timer [13].

Styrkeforholdet mellem vandrette og lodrette vibrationer er ikke særligt godt beskrevet i litteraturen, og man kan undre sig over, at det så ikke er følsomheden for de vandrette vibrationer, der bestemmer den resulterende vibrationsbelastning. At det forholder sig sådan, kan skyldes, at frekvensspektret for togpassager - og mange andre eksterne kilder - typisk har maksimum ved noget højere frekvenser (for tog omkring 20-40 Hz), så det er følsomheden i lodret retning, som er mest relevant i bygninger. En anden årsag kan være, at bygningers struktur og dynamiske egenskaber gør, at lodrette vibrationer bedre kan forplantes og sætte gulve i sving inde i bygningen end de vandrette vibrationspåvirkninger. Der er en del vage udsagn i litteraturen om dette, og oftest er de vandrette vibrationspåvirkninger udeladt ved behandling af de indendørs vibrationer. I Danmark skal vibrationer måles i vandret og lodret retning. Men hvis vibrationerne i den ene retning er dominerende, kan man nøjes med at måle i denne [9].

Der er indikationer på, at vi reagerer forskelligt, om vibrationerne hidrører fra godtog eller persontog. Typisk er godstog meget længere end persontog, og passagehastigheden er ofte også længere som følge af lavere fart. Godstog er ofte tungere end persontog, men der er ikke noget, som tyder på, at det specielt er akseltrykket, der er afgørende for vibrationsgenen. I [14] ses der på, om der er en sammenhæng mellem togtype (passager/gods) og den oplevede gene. De foreløbige resultater ses på Figur 5, hvor det understreges, at resultaterne i skrivende stund er foreløbige. Figuren viser andelen af stærkt generede (% HA) og hvordan genevirkningen tilsyneladende er forskellig for passagertog (grå kurve) og godstog (sort kurve). Ved $VDV = 0,3 \text{ m/s}^{1,75}$, svarende til 10 % stærkt generede af den samlede trafik, ses, at der er ca. 15 %, som er stærkt generet af godstog, og ca. 5-6 %, som er stærkt generet af persontog.

En mulig forklaring på forskellen i dosis-respons kurven for vibrationer fra person- og godstog kan være, at godstog generelt er betydeligt mere støjende end persontog. Kildestyrken for støj kan være 10 dB højere for godstog end persontog og herudover er godstog ofte længere og langsommere end persontog, så støjpåvirkningen af en passage bliver mere langvarig. Støjniveauets indvirkning på oplevet vibrationsgene er behandlet i afsnit 7.

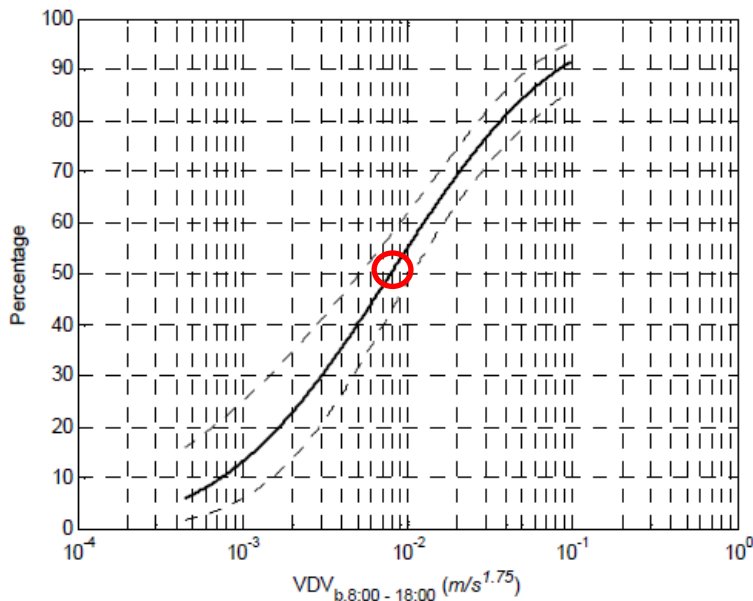


Figur 5

Genevirkning af passagertrafik, godstrafik og samlet trafik. Efter [14]. Resultaterne er foreløbige.

6. Anlægsarbejder

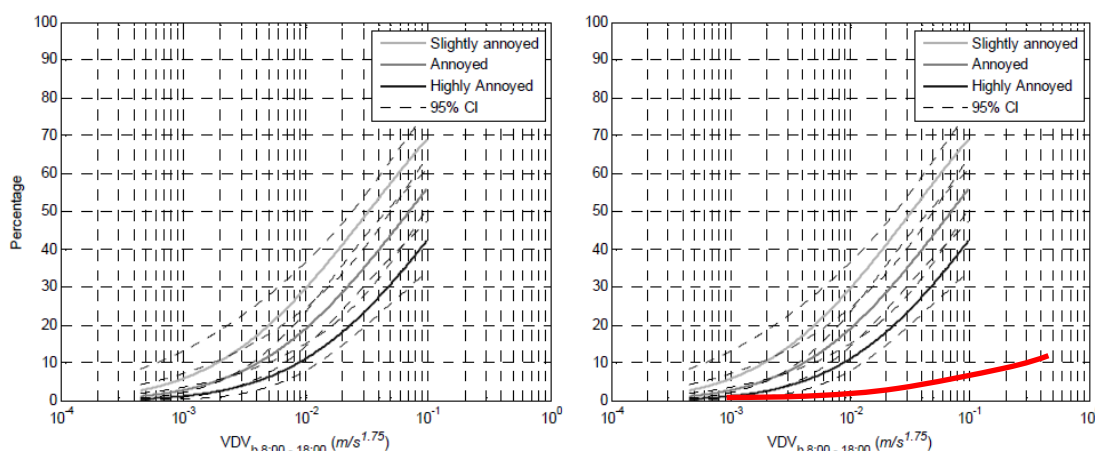
Figur 6 viser, at ved en vibrationsbelastning på ca. $VDV = 0,008 \text{ m/s}^{1,75}$ reagerer 50 % af befolkningen på vibrationer fra anlægsarbejder (markeret med rød ring). Dette er stort set identisk med den tilsvarende kurve for togvibrationer (Figur 3).



Figur 6

Andel af befolkningen der angiver at kunne mærke vibrationer fra anlægsarbejder. Vibrationsniveau i VDV. Efter [1].

Figur 7 viser graden af genevirkningen ved stigende vibrationsbelastning. Begge figurer viser andelen af befolkningen, der føler sig generet af vibrationer fra anlægsarbejder i dagtimerne mellem kl. 08 og 18. I forhold til de tilsvarende kurver for togvibrationer (Figur 3) ses, at genevirkningen øges betydeligt hurtigere med stigende vibrationspåvirkning fra anlægsarbejder end tilfældet er for togvibrationer. På den højre figur er den tilsvarende (røde) kurve for stærkt generede af togvibrationer indtegnet til sammenligning.



Figur 7

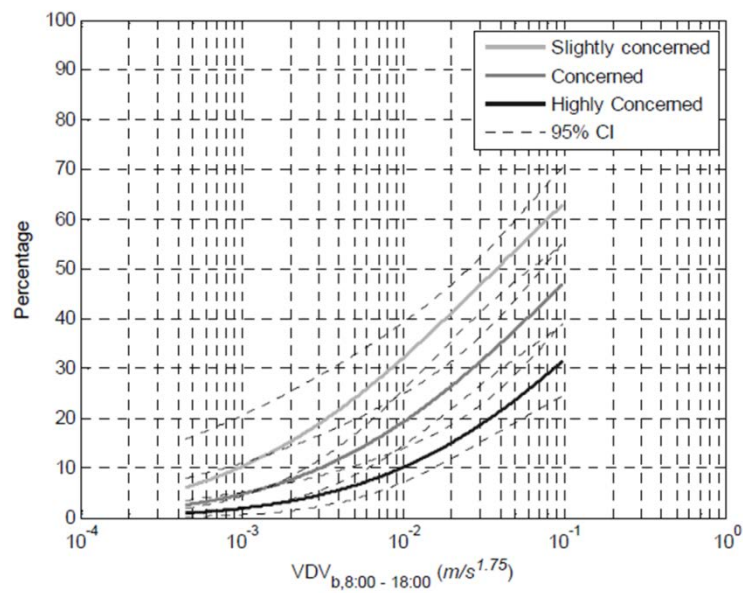
Genevirkning af vibrationer fra anlægsarbejder. Figuren viser, hvilken vibrationsbelastning der opfattes som henholdsvis lettere generende, generende og stærkt generende. På højre figur er til sammenligning vist den tilsvarende kurve (rød) for togvibrationer (% HA) for et døgn efter Figur 3. Efter [1].

Til forskel for togvibrationer er vibrationsbelastningen VDV for anlægsarbejderne bestemt over dagtimerne (kl. 08-18). Der er ikke i rapporten undersøgt gener indenfor sammenlignelige tidsrum for anlægsarbejder og togpassager.

Kvalitativt konkluderes det, at genen fra vibrationer fra anlægsarbejder øges relativt kraftigt med øget vibrationsbelastning. Genen er generelt tydeligt større fra anlægsarbejder end genen fra togvibrationer med samme belastning.

En anden interessant konklusion af de britiske undersøgelser er, at bekymringen for, at der skal opstå skader på ejendommen, øges med vibrationsbelastningen ved anlægsarbejder. Det er ikke så overraskende i sig selv, men Figur 8 viser, at bekymringen øges forholdsvis kraftigt som funktion af vibrationsbelastningen.

Figur 8 viser andelen af befolkningen, som føler sig lettere bekymret (Slightly concerned), bekymret (Concerned) og stærkt bekymret (Highly concerned) som funktion af vibrationsbelastningen VDV. For eksempel ses ved $VDV = 0,01 \text{ m/s}^{1.75}$, at 10 % er stærkt bekymret, 20 % er bekymret, og ca. 32 % er lettere bekymret for skader på deres ejendom. Dette gælder tilsyneladende ved en vibrationsbelastning, som ligger tydeligt under grænsen for, hvornår der ifølge BS 6472-1 kan forventes reaktioner eller klager fra naboerne, jf. Appendiks 1. Det konkluderes i rapporten [1], at det er en af forklaringerne på, at vibrationer fra anlægsarbejder opleves mere generende end togvibrationer.

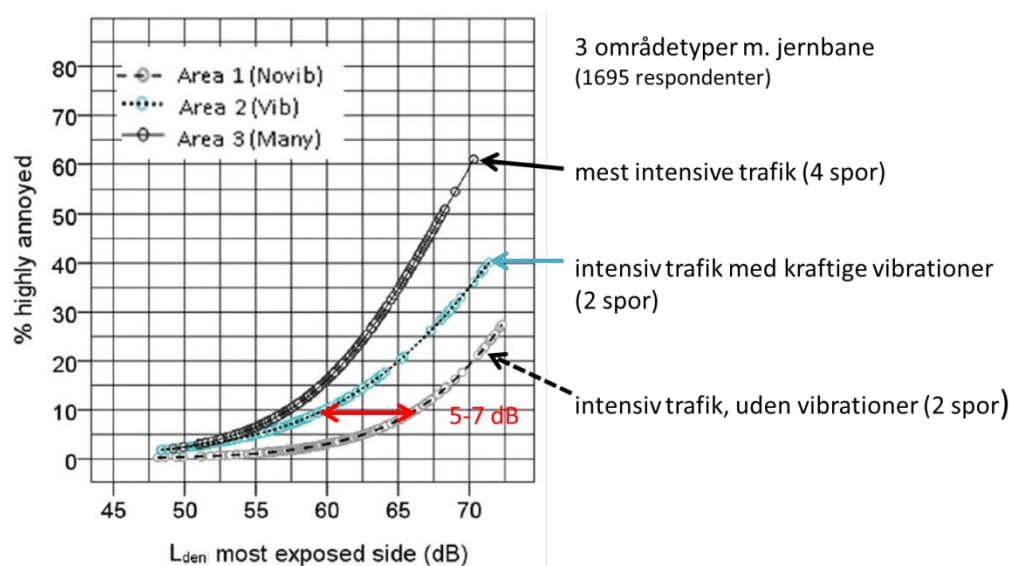


Figur 8

Graden af bekymring for skader på ens ejendom som følge af vibrationsbelastningen VDV i dagtimerne. Efter [1].

7. Samtidig støj- og vibrationsbelastning fra jernbaner

I Sverige [4] er genevirkningen af jernbanevibrationer undersøgt med et lidt andet formål end i Storbritannien. I de svenske undersøgelser indgik nogle boligområder med forskellig trafikbelastning fra jernbaner, og formålet var at undersøge, om personer, som er både støj- og vibrationsbelastede, er mere generet af vibrationer end de, som ikke samtidig er støjbelastede. Indvirkningen fra banernes trafikintensitet indgik altså som en væsentlig parameter sammen med jernbanestøjen ved den mest udsatte facade i form af L_{den} . Figur 9 viser resultater fra de svenske undersøgelser.



Figur 9

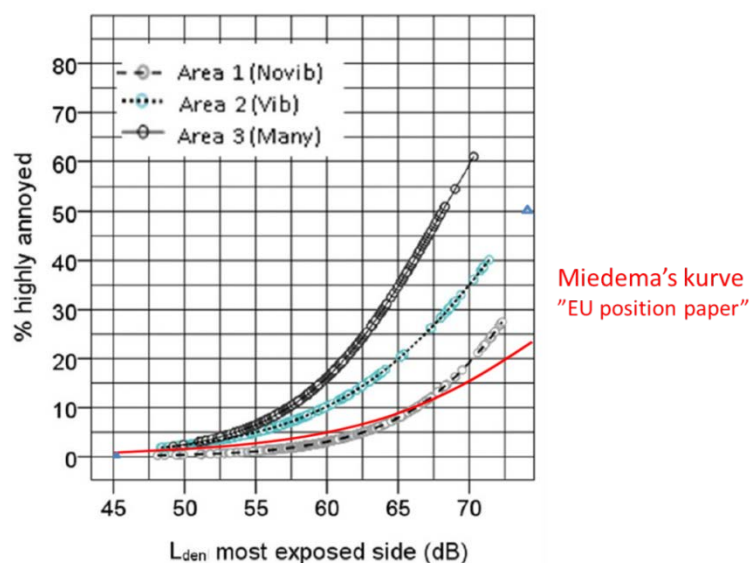
Andel af befolkning der føler sig stærkt generet som funktion af støjbelastningen for tre områder med forskellig trafikintensitet på jernbanen. Bemærk, at resultaterne for område 3 (Area 3) ikke indgår i denne sammenhæng, men er medtaget for at undgå modifikationer i de originale figurer. Efter [4].

Figuren viser flere interessante resultater:

- 1) Ved samme støjbelastning er befolkningen tydeligt mere generet, hvis der er kraftige vibrationer (Area 2), end hvis der ikke er vibrationer. Ved en støjbelastning på L_{den} 65 dB på den mest støjbelastede facade, er andelen, der føler sig stærkt generet (% HA) omtrent fordoblet, i forhold til et område uden vibrationer (Area 1).
- 2) Den forøgelse af genevirkningen, der er ved tilstedeværelsen af kraftige vibrationer, svarer til, at støjen er øget med 5-7 dB i forhold til området, hvor der ingen vibrationsgener er. Dette gælder ved støjbelastning omkring L_{den} 60-65 dB (markeret med en rød pil i Figur 9).

Figur 9 er gentaget i Figur 10. Her er tilsammenligning vist EU's officielle dosis-respons kurve [15] (Miedema) for støjbelastning, dvs. hvor der er midlet over andre forekommende genefaktorer i de undersøgelser, der ligger til grund for kurven (man ved altså ikke, om der er andre gener end støj fra jernbanetrafikken).

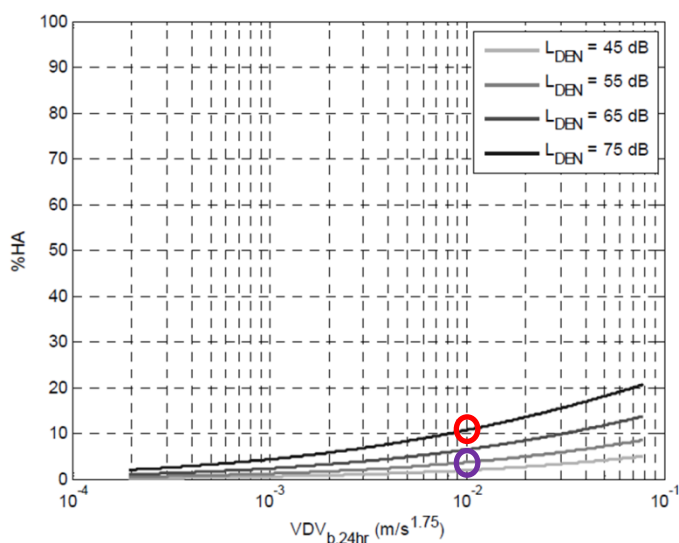
Der ses en meget fin og god overensstemmelse mellem Miedemas kurve (rød) og den svenske undersøgelse for området uden vibrationsbelastning (Area 1, novib) op til ca. $L_{den} = 70$ dB.



Figur 10

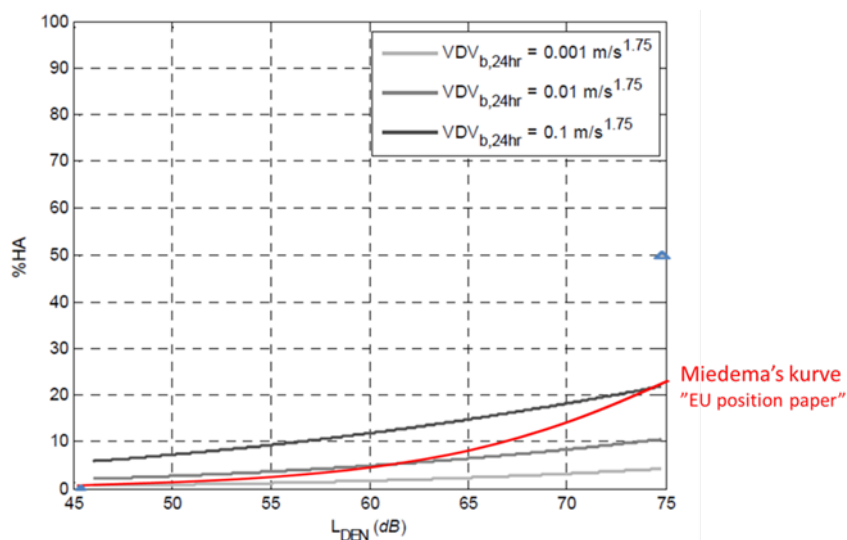
Andel af befolkning, der føler sig stærkt generet som funktion af støjbelastningen for tre områder med forskellig trafikintensitet. Til sammenligning (røde kurve) er vist Miedemas kurve [15] (stærkt generede som funktion af støjbelastning L_{den}). Efter [4], [15]. Se i øvrigt kommentarer i figurtekst til Figur 9.

Resultatet af de britiske undersøgelser ses på Figur 11-12. Figur 11 viser vibrations-genevirkningen ved forskellige støjbelastninger, og Figur 12 viser den oplevede gene for støjbelastningen L_{den} ved forskellige vibrationsbelastninger.



Figur 11

Andel af befolkning der føler sig stærkt generet (Highly Annoyed) af støj som funktion af vibrationsbelastningen. Ved L_{den} 75 dB (VDV ca. 10^{-2}) er der ca. 10 % som er stærkt generet af vibrationer (markeret med rød ring på figuren). Ved en lavere støjbelastning på L_{den} 55 dB er andelen af stærkt generede ca. 3 % ved samme vibrationsbelastning (lilla ring). Efter [1].



Figur 12

Andel af befolkning, der føler sig stærkt generet (Highly Annoyed) som funktion af støjbelastningen for tre områder med varierende vibrationsbelastning. Til sammenligning (røde kurve) er Miedemas kurve indtegnet (stærkt generede som funktion af støjbelastning L_{den}). Efter [1].

Ved en støjbelastning på 65 dB ses, at andelen af stærkt generede varierer mellem ca 2 % og 15 %, afhængigt af vibrationsbelastningens størrelse ($VDV_{b,24h}$ mellem 0,001 og 0,1 $m/s^{1,75}$). Ved højere støjbelastninger ses større variationer i forhold til Miedemas kurve.

8. Relationer til danske forhold

Der er megen nyttig information i disse undersøgelser. Der har ikke i de seneste år været udført gennemgribende undersøgelser af genevirkning af eksterne vibrationer og med disse undersøgelser er der tilført nyttig viden om vores reaktioner på samtidig støj- og vibrationsbelastning fra meget væsentlige kilder som jernbaner og anlægsarbejder.

En egentlig brug af resultaterne bliver unægtelig kompliceret af, at der benyttes forskellige målestørrelser og målemetoder i de forskellige lande, og derfor er tværgående sammenligninger ikke umiddelbart mulige. En af konklusionerne må være, at de forskellige undersøgelser hver især og samstemmende uddyber vores viden om menneskers reaktioner på vibrationspåvirkning, men en egentlig brug og sammenligning med danske forhold ikke er umiddelbart mulig.

Der vil dog være situationer, hvor det kan være relevant på en kvalitativ måde at tage hensyn til resultater opnået i disse britiske og svenske undersøgelser. Det kan for eksempel være VVM- undersøgelser, hvor der netop ses på mange miljømæssige aspekter og deres gensidige virkning.

9. Resume

Der er samstemmende og tydelige indikationer af følgende:

- **Vibrationer fra anlægsarbejder er mere generende end vibrationer fra jernbaner.**
Dette er tydeligt indikeret på Figur 7, men genekurver for anlægsarbejder og tog er ikke helt sammenlignelige på grund af forskelle i midlingstid. Vibrationer fra anlægsarbejder vurderes over 10 timer og jernbanevibrationer over 24 timer. Et af holdepunkterne er, at respondenterne netop reagerer på vibrationer fra de to kildetyper ved nogenlunde samme vibrationsbelastning (Figur 4 og Figur 6), men ved ændringer i belastningen øges genen meget forskelligt. Ud af de besvarelser, der indgår i undersøgelsen, var der 37,9 %, der var stærkt generet af anlægsarbejder (antal 350) og 9,7 % af togvibrationer (antal 931). I [1] er der tillige vist en sammenhæng mellem graden af bekymring for skader på ens ejendom som følge af vibrationsbelastningen (Figur 8). Dette har højst sandsynligt en betydning for, at anlægsarbejder opfattes mere generende end togvibrationer ved nogenlunde samme vibrationsbelastning.
- **Vibrationer fra godstog er betydeligt mere generende end vibrationer fra persontog.**
Hvorvidt det gælder for gammeldags loko-trukne persontog eller kun for togsæt af nyere dato, ved vi ikke noget om. Det fremgår også, som en del af undersøgelserne, at genevirkningen af togvibrationer er højere om natten end om aftenen og højere om aftenen end om dagen. Alt i alt taler det for at bruge en form for day-evening-night level til beskrivelse af belastningen, som vi kender det for trafikstøjbelastning (L_{den}).
- **Ved en given vibrationsbelastning øges genen af vibrationerne, når støjbelastningen øges. Og tilsvarende gælder for en given støjbelastning, at støjgenen øges, når vibrationsbelastningen øges.** Figur 11 og Figur 12 viser tydeligt, at samtidig påvirkning af vibrationer og støj øger genevirkningen. For at kunne beskrive den samlede gene, folk oplever fra en kilde, er der altså behov for at kende de forskellige genefaktors gensidige påvirkning.

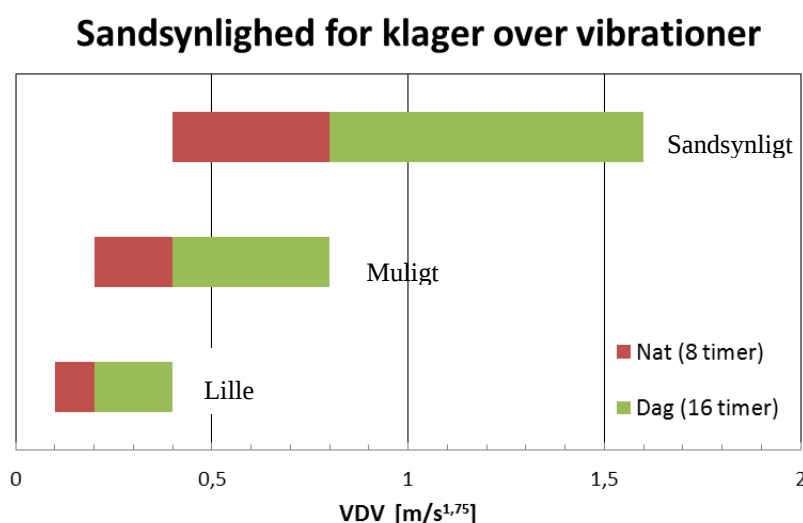
Det er vanskeligt direkte at sammenligne resultaterne med de danske vurderings- og målemetoder. Et ønske for fremtiden kunne være at skabe sammenhænge mellem de enkelte landes indikatorer. Dette vil kunne etableres ud fra detaljeret kendskab til måleresultaterne og måske endda føre til harmonisering af indikatorerne på sigt.

10. Referencer

- [1] "Human response to vibration in residential environments".
Waddington, D., Moorhouse, A., Steele, A., Woodcock, J., Condie, J., Peris, E.,
Sica, G., & Koziel, Z.: (NANR209), Final Project Report, Defra (London), 2011.
- [2] "RIVAS-Railway Induced Vibration Abatement Solutions": www.rivas-project.eu
- [3] "CargoVibes -Attenuation of ground-borne vibration affecting residents near freight
railway lines": www.cargovibes.eu
- [4] "Railway noise annoyance and the importance of number of trains, ground vibration,
and building situational factors"
Anita Gidlöf-Gunnarsson, Mikael Ögren, Tomas Jerson, Evy Öhrström, Noise &
Health 2012 Volume 14, pp190-201, 2012.
- [5] DS/ISO 2631-1:"Mekaniske vibrationer og chok – Vurdering af helkropsvibrationer
– Del 1: Generelle krav".
- [6] DS/ISO 2631-2:"Mekaniske vibrationer og chok – Vurdering af helkropsvibrationer
– Del 2: Vibrationer i bygninger (1 Hz til 80 Hz)".
- [7] BS 6472-1:2008: "Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings.
Part 1: Vibrations sources other than blasting". British Standard Institution, 2008.
- [8] "Retningslinjer for måling og vurdering af vibrationer i det eksterne miljø."
Nyt fra Miljøstyrelsen, 1983.
- [9] "Lavfrekvent støj, infralyd og vibrationer i det eksterne miljø". Orientering fra Mil-
jøstyrelsen nr. 9/1997.
- [10] "A meta-analysis of surveys into vibrations annoyance from railway". Sabine A.
Janssen, Henk Vos, Arnold Koopman. Proceedings of Internoise 2013.
- [11] ISO 15666:2003:"Assessment of noise annoyance by means of social and socio-
acoustic surveys", 2003.
- [12] "Translation into Danish of the questions and modifiers for socio-acoustic surveys"
Preben Kvist and Torben Holm Pedersen. Proceedings of Euronoise 2006.
- [13] Personlig kommunikation med James Woodcock, University of Salford.
- [14] "Human response to vibration from passenger and freight railway traffic in residen-
tial environments. James Woodcock, Calum Sharp, Gennaro Sica, Eulalia Peris, An-
drew T. Moorhouse, David C. Waddington. Proceedings of 19th International Con-
gress on Sound and Vibration 2012.
- [15] "Position paper on dose response relationships between transportation noise and an-
noyance". EU's Future Noise policy, WG2 - Dose/effect, 2002.

Appendiks 1: Evaluering af vibrationspåvirkning efter BS 6472-1

I Storbritannien vurderes vibrationsbelastning efter BS 6472-1. Der skelnes mellem, ved hvilke niveauer af VDV (Vibration Dose Value) der kan forventes klager (probability of adverse comment) som følge af vibrationsgener. Tabel 1 i [3] definerer de acceptable niveauer af VDV. Resultaterne er gengivet her i Figur 13 for boliger gældende for dagperioden (16 timer) og natperioden (8 timer).



Figur 13

Grafisk fremstilling af evaluering af vibrationspåvirkninger efter BS 6472-1 [7] for boliger i dagperioden (grøn) og natperioden (rød).

Ved VDV-værdier mellem 0,1 og 0,2 om natten og mellem 0,2 og 0,4 om dagen er der ifølge standarden en lille sandsynlighed for, at der vil fremkomme klager (low probability of adverse comment). Er VDV mellem 0,2 og 0,4 om natten og mellem 0,4 og 0,8 om dagen er det sandsynligt, at der vil fremkomme klager (adverse comment possible), og er VDV mellem 0,4 og 0,8 om natten og mellem 0,8 og 1,6 om dagen er det sandsynligt, at der vil fremkomme klager (adverse comment probable). Dette er gældende for boliger. For kontorer skal kriterieværdierne for dagperioden ganges med 2, og for værksteder ganges med 4.