

TEKNISK NOTAT

Måle- og integrationstider for kortvarige lavfrekvente støjhændelser. Del 4 & 5: Vurderingsmetoder

Udført for Miljøstyrelsen

Sagsnr.: 122-22123

TC-102027

Side 1 af 60

Hørsholm, 26. april 2023

Akustik, støj og vibrationer

Kvalitetssikret af

Udfærdiget af

OVERSIGT

Titel	Måle- og integrationstider for kortvarige lavfrekvente støjhændelser. Del 4 & 5: Vurderingsmetoder
Sagsnr.	122-22123
TC-nr.	TC-102027
Kunde	Miljøstyrelsen Tolderlundsvej 5 5000 Odense C Tlf.: +45 72544000
Kontaktperson	Jens Schultz Thers E-mail: jesha@mst.dk
Revisioner	Originalrapport
Testlokation	Venlighedsvej 4, 2970 Hørsholm
Vores ref.	Udarbejdet af: Morten Bording Lindskow, Rasmus Lyngdal-Christensen Kvalitetssikret af: Per Finne, Torben Holm Pedersen

Rapporten må kun gengives i sin helhed.

Gengivelse i uddrag kræver skriftlig accept fra FORCE Technology.

Rapporten er kun gyldig med to digitale signaturer fra FORCE Technology. Rapporten forefindes som original i FORCE Technologys database og sendes som elektronisk duplikat til kunden. Den hos FORCE Technology lagrede original har forrang som dokumentation for rapportens indhold og gyldighed.

INDHOLDSFORTEGNELSE

1	Baggrund og hidtidige konklusioner	5
1.1	Baggrund	5
1.2	Danske grænseværdier og målestørrelser	5
1.3	Målemetode for lavfrekvent støj	8
2	Luftlyd	9
2.1	Eksisterende beregningsmetoder	9
2.2	Lydudbredelse	9
2.3	Kildedata	11
2.4	Lydisolation	13
2.5	Eksisterende lydisolutionsdata	13
2.6	Dæmpning af luftlyd	15
2.7	Forbedret lavfrekvent lydisolation	16
2.8	Sammenfatning og delkonklusioner	18
3	Strukturlyd	19
3.1	Miljøstyrelsen og Referencelaboratoriet	21
3.2	The U.S. Department of Transportation, Federal Transit Administration, FTA	22
3.3	Vibrationer og strukturlyd fra køretøjer – vurderingsmetoden	23
3.4	Vibrationer og strukturlyd fra andre kilder	27
3.5	L.G. Kurzweil	28
3.6	Østrigsk Standard ONR 199005	31
3.7	Brekke & Strand	32
3.8	GroundVib	34
3.9	Sammenfatning, delkonklusioner og forslag til yderligere arbejde	36
3.10	Dæmpning af vibrationer og strukturlyd	37
3.11	Dæmpning ved kilden	37

3.12	Dæmpning i transmissionsvejen	39
3.13	Dæmpning ved modtageren	40
4	Cases	41
4.1	Case 1: Lufttransmitteret lavfrekvent støj.....	41
4.2	Måleobjekt	41
4.3	Metode	42
4.4	Beregningsmetode.....	42
4.5	Case 2: Vibrations- og strukturlydstransmitteret lavfrekvent støj.....	44
4.6	Måleobjekt	44
4.7	Beregningsresultater	45
4.8	Vurdering og konklusion.....	45
5	Samlede konklusioner og anbefalinger	46
5.1	Luftlyd	46
5.2	Vibrationer og strukturlyd.....	47
6	Referencer	49
	Bilag 1 Konklusioner fra Del 1 og 2.....	52
	Bilag 2 Case 1: Resultater pr. 1/3-oktavbånd	55

1 Baggrund og hidtidige konklusioner

Dette notat omhandler vurderingsmetoder for luft- og strukturtransmitteret lavfrekvent støj og skal ses som en foreløbig afrunding af en projektrække med forslag til målestørrelser og grænseværdier for kortvarige lavfrekvente støjhændelser i det eksterne miljø.

I Bilag 1 er resultaterne fra de hidtil udarbejdede rapporter resumeret. Rapporterne har betegnelsen "Måle- og integrationstider for kortvarige lavfrekvente støjhændelser" og omfatter:

- "Del 1: Litteraturstudie", 2021, [1].
- "Del 2 & 3: Lyttetests og forslag", 2022, [2].

1.1 Baggrund

Miljøstyrelsen udgav i 1997 retningslinjer for måling og vurdering af lavfrekvent støj, infralyd og vibrationer i eksternt miljø Orientering 9/1997, [3]. For lavfrekvent støj introduceredes et referencetidsrum på 10 min. og en indikator bestemt som et ækvivalentniveau i frekvensområdet 10-160 Hz: $L_{pA,LF}$ (10 min.). Orientering 9/1997 indeholder en foreslået grænseværdi for $L_{pA,LF}$ på 20 dB om aftenen og natten i boliger, se Tabel 1. Hvis støjen er impulsagtig, skærpes de foreslåede grænser med 5 dB. De foreslåede grænseværdier for lavfrekvent støj gælder indendørs og er mere restriktive om aftenen og natten end om dagen. Det bemærkes, at der ikke er anført retningslinjer for støj med hørbart toneindhold.

Der har på det seneste vist sig situationer i praksis, som tyder på, at et 10 min. ækvivalentniveau ikke er repræsentativt for den gene, støjen giver anledning til. Støjproblemerne er relateret til kortvarige hændelser som fx vibrationsgenereret støj fra forbikørsler med metrotog i tunneler eller støj fra fitnesscentre, hvor der sker hyppige kast med eller tab af vægte. Der er formentlig andre lignende eksempler som fx støj fra pæleramning og skrotvirksomheder, der giver tilsvarende problemer. På baggrund af mere end 20 års erfaringer og indførelsen af blandt andet metro under store dele af København og letbaner i flere større byer, er det erfaret, at der fremkommer mange borgerreaktioner, selvom grænseværdien for lavfrekvent støj i boliger om aftenen på 20 dB ikke overskrides. Noget tyder på, at målestørrelsen $L_{pA,LF}$ (10 min.) ikke tilgodeser alle typer af støjklender, som kortvarigt udsender lavfrekvent støj til nabobygninger.

I Danmark såvel som i andre lande er grænseværdier for metroer, sporvogne og letbaner typisk lokalt reguleret. Det vil sige, at det er den lokale myndighed (bystyret), som stiller kravene til et anlæg. Det kan derfor meget vel være, at der ingen nationale grænseværdier eksisterer. Dette kan også betyde, at fx metroer i forskellige byer i samme land ikke er underlagt samme grænseværdier – i særdeleshed ikke, hvis metroerne er anlagt på forskellige tidspunkter.

Måleparametrene eller indikatorerne i nærværende rapport er angivet, som de typisk vil blive benævnt i Danmark. Men i litteraturen både fra Miljøstyrelsen og fra udlandet kan der forekomme afvigende notationer.

1.2 Danske grænseværdier og målestørrelser

I Danmark reguleres lavfrekvent støj og vibrationer i henhold til Orientering 9/1997, [3]. Orienteringen omhandler administrationen af miljøsager om lavfrekvent støj, infralyd og vibrationer samt målemetode og muligheder for dæmpning. Orienteringen indeholder ikke nogen metode til beregning af lavfrekvent støj, hvilket kan være medvirkende til, at problemer med lavfrekvent støj ikke bliver kvantificeret og taklet i selve planlægningsfasen.

Grænser for støj

Orientering 9/1997, [3], foreslår grænseværdier til lavfrekvent støj jf. Tabel 1.

Anvendelse		A-vægtet Lydtrykniveau (10-160 Hz), dB
Beboelsesrum, herunder børneinst. og lignende	Aften/nat (kl. 18-07)	20
	Dag (kl. 07-18)	25
Kontorer, undervisningslokaler og andre lignende støjfølsomme rum		30
Øvrige rum i virksomheder		35

Tabel 1 Tabel med foreslåede grænseværdier for lavfrekvent støj målt indendørs.
Fra [3], Tabel 3.3.

Værdierne i tabellen er grænserne for det A-vægtede ækvivalentniveau målt over de 10 minutter, hvor støjen er kraftigst indenfor perioden.

I tilfælde, hvor støjen er impulsagtig, reduceres de foreslåede grænseværdier med 5 dB.

Målemetoden og grænserne er gældende for både luftlydstransmitteret lavfrekvent støj, strukturtransmitteret lavfrekvent støj og en blanding heraf.

Vibrationer og strukturtransmitteret lyd eller støj (strukturlyd) er også behandlet i:

- Referencelaboratoriets Orientering nr. 10/1989: "Vibrationer fra jernbaner", [4].
- Miljøstyrelsen NFM 2/1983: "Retningslinjer for måling og vurdering af vibrationer i det eksterne miljø", [5].
- Miljøstyrelsens vejledning 1/1997: "Støj og vibrationer fra jernbaner", [6].
- Referencelaboratoriets Orientering nr. 49/2014: "Genevirkning af vibrationer", [7].

For passager med tog, metro eller andre kortvarige hændelser, der giver anledning til støj, der ligger betydeligt over baggrundsstøjen, bestemmes $L_{Aeq,10min}$ (10-160 Hz) i dB re 20µPa tilnærmet ved nedenstående formel, som er en mindre omskrivning fra [8]:

$$L_{Aeq,10min} = 10 * \log_{10} \left(\frac{N_{10min} T}{600s} 10^{\frac{L_{pAmax}}{10}} \right)$$

hvor N er antallet af hændelser indenfor tidsintervallet 10 min, T er tiden for hændelsen i sekunder.

Det bemærkes, at grænseværdierne for lavfrekvent støj ikke kun gælder strukturtransmitteret lavfrekvent støj, men det gælder for den samlede lavfrekvente støj, der i princippet også kan være transmitteret gennem luften. Dog vil luftbåren lyd fra fx metrostrækninger i undergrunden næppe forekomme.

Orientering 9/1997 specificerer ikke, hvilke støjkloder grænserne gælder for, men anses at gælde for fx tog, metrotog og andre kilder, der giver anledning til betydende strukturlyd. Det er nærliggende at antage, at orienteringen er tiltænkt anvendt til nogenlunde stationær støj fra fx ventilations- og fyringsanlæg. Med en midlingstid på 10 min. og manglende grænser for maksimalværdier er Orientering 9/1997 i praksis ikke egnet til at regulere kortvarige hændelser som fx tog- og metropassager.

Målinger foretaget af FORCE Technology har i øvrigt vist, at strukturlyd fra metrotog i boliger har betydeligt støjindhold i frekvensbånd over 160 Hz, dog med ubetydelig lydenergi over ca. 315 Hz.

Selvom det ikke er udtrykkeligt beskrevet for lavfrekvent støj, er der en række generelle grænseværdier, som må antages at gælde også for kortvarige, lavfrekvente hændelser. I forbindelse med togstøj er der grænseværdier, der skal overholdes, oprindeligt beskrevet som en døgnmiddelværdi, $L_{Aeq,24h} = 30$ dB, men som efter overgangen til årsmiddelværdier antages at være $L_{den} = 33$ dB. Denne grænseværdi gælder sædvanligvis luftlyd og er beskrevet i Miljøstyrelsens vejledning fra 1997: "Støj og vibrationer fra jernbaner", (inkl. tillæg fra 2007 ifm. overgangen til L_{den}), [6].

Grænser for vibrationer

Miljøstyrelsen har i Orientering 9/1997 og i vejledningen om jernbaner, [6], foreslåede grænseværdier for vibrationer i boliger på 75 dB (KB-vægtet accelerationsniveau, L_{aw}). KB-vægtningen udgør en tilpasning til menneskers gennemsnitlige følsomhed for mærkbare vibrationer (svarende nogenlunde til A-vægtning på støjområdet). Dette er beskrevet i [7].

Den anbefalede grænseværdi er en maksimalværdi af L_{aw} – det KB-vægtede accelerationsniveau med tidsvægtning Slow. Den højeste værdi af L_{aw} betegnes $L_{aw,max}$. Der er tale om et indendørs niveau, og den enkelte bygningskonstruktion har indflydelse på niveauet. Grænsen på 75 dB gælder for vibrationer på gulv i opholdsrum. Den gennemsnitlige føletærskel for vibrationer på gulv er ca. 71 dB. For togdrift gælder, at den værdi, der skal sammenlignes med grænseværdien, bestemmes som et estimat af middelværdien af L_{aw} for den togtype, der giver anledning til de kraftigste vibrationer.

For at undgå vibrationsgener indendørs er der desuden i i vejledningen om jernbaner, [6], anført mindsteafstande mellem jernbane og boliger på 50 m for strækninger med fjern tog, hvor der forekommer mere end 10 tog pr. døgn, og mindsteafstande på 25 m for øvrige jernbanestrækninger. Hvis der overvejes byggeri indenfor kortere afstande, bør det ved målinger på stedet eftervises, om den ovennævnte grænseværdi for vibrationsniveauet kan forventes overholdt.

Vejledning fra Miljøstyrelsen nr. 5/1984 om ekstern støj fra virksomheder, [9], angiver i afsnit 2.3 vejledende grænseværdier for støj, hovedsageligt transmitteret gennem bygningskonstruktioner, hvilket fx kan være tilfældet, når en virksomhed og en bolig eller et kontor ligger i samme bygning. Der angives vejledende indendørs grænseværdier for L_{Aeq} på 30 dB og 25 dB i henholdsvis dag- og aftenperioden kl. 07-22 samt natperioden kl. 22-07. Midlingstiderne (referenceperioderne) er som for den luftbårne støj henholdsvis 8, 1 og 1/2 time, og grænserne gælder for den mest belastede referenceperiode.

For natperioden kl. 22-07 angives desuden en vejledende grænseværdi på 40 dB for maksimalværdien $L_{pA,max,F}$. I Vejledning fra Miljøstyrelsen nr. 6/1984, [10], er det i afsnit 4.5.4 angivet, at $L_{pA,max,F}$ fastlægges som den aritmetiske middelværdi af mindst 5 målte $L_{pA,max,F}$ -værdier. I afsnit 6 (om målepositioner indendørs) er det angivet, at den aritmetiske middelværdi af støjen målt i mindst 3 målepositioner skal benyttes som resultat. Dette gælder (uden at det er nævnt eksplicit) for både målinger af L_{Aeq} og $L_{pA,max,F}$.

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

Vibrationer kan angives som:

- forskydning, fx i m eller mm,
- hastighed (svingningshastighed), fx m/s, mm/s eller nm/s,
- acceleration, fx m/s², mm/s² eller i $\mu\text{m/s}^2$.

Forskydning anvendes ikke i forbindelse med eksterne vibrationer. Svingningshastighed anvendes ofte fx ved vurdering af risiko for bygningsskadelige vibrationer. Den tyske norm DIN 4150, del 3, [11], har vejledende grænser for forskellige typer af bygninger og ses ofte refereret i forbindelse med krav til anlægsarbejder.

Ved måling af 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, fx ses også referencen 50 nm/s anvendt for svingningshastighed, og de mange forskellige referencer kan skabe forvirring, medmindre disse specifikt er givet.

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

I Danmark blev det i starten af 1980'erne besluttet at benytte den tyske vægtningsstandard for mærkbare vibrationer (KB-vægtning) som mål for genevirkningen. Det blev ligeledes besluttet at basere vurderingen af vibrationsgener på maksimalt accelerationsniveau med tidsvægtning S (Slow). Vibrationsniveauet betegnes L_{aw} . Det gælder ikke kun for togvibrationer, men for alle former for eksterne vibrationer. Retningslinjerne er senere opdateret, men baggrunden for de valg, der i sin tid blev taget, er fint beskrevet i den oprindelige udgave for retningslinjer i [5]. Der skal i Danmark måles i tre retninger, og resultatet for den retning, hvor vibrationsniveauet er højest, sammenlignes med grænseværdien.

1.3 Målemetode for lavfrekvent støj

Kort opsummeret er målemetoden for lavfrekvent støj beskrevet i Orientering 9/1997, [3]. Metoden er baseret på målinger i det opholdsrum, som af beboerne er udpeget som det mest støjbelastede. Efter måleteknikerens skøn kan der suppleres med målinger i andre af beboernes opholdsrum, fx i soveværelset.

Lyden måles normalt i mindst 3 positioner om muligt. Alle positioner skal have en afstand på mindst 0,5 m til vægge, gulv og loft. Ofte kan beboerne udpege punkter i opholdsarealer, hvor støjen opleves som kraftigst, og det er væsentligt at måle i mindst to af disse målepunkter. Kan beboerne eller måleteknikerens ikke udpege sådanne punkter, vælges målepunkterne tilfældigt efter anførte retningslinjer:

- Målepunkterne skal have forskellige afstande til rummets vægge, gulv og loft, dog mindst 0,5 m.
- De forskellige målepunkter må ikke have samme afstand til de samme vægge og skal også have forskellige højder over gulvet.
- Målepunkterne skal så vidt muligt have mere end 2 m i indbyrdes afstand.
- Målepunkterne skal ikke vælges i nærheden af rummets midte.
- Målepunkterne bør have en afstand på mere end 0,5 m både til større lydreflekterende inventar og møbler samt til lydabsorberende møbler.

Når støj skal måles i store (over 30 m²) eller irregulære rum, der ikke er kasseformede, bør der vælges mere end tre målepunkter.

Det er altså vigtigt, at en eventuel beregningsmetode giver repræsentative resultater i forhold til ovenstående målemetode, da det er denne metode, grænseværdierne også er defineret ud fra.

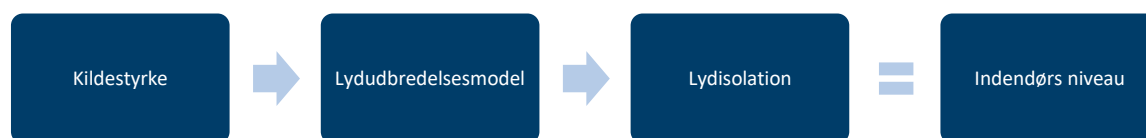
2 Luftlyd

Dette afsnit handler udelukkende om luftlydstransmitteret lavfrekvent støj og fokuserer på mulighederne for beregning af et indendørs lavfrekvent støjniveau.

2.1 Eksisterende beregningsmetoder

Der findes i Danmark ikke en officielt godkendt separat metode til beregning af lavfrekvent industristøj. Der findes to eksisterende beregningsmetoder til at beregne et indendørs lavfrekvent støjniveau. De to metoder er beskrevet i henholdsvis hurtigfærgebekendtgørelsen, BEK 1735/2015 seneste udgave, [12], og vindmøllebekendtgørelsen BEK 135/2019 seneste udgave, [13].

Fælles for metoderne er, at de er opbygget efter nedenstående model:



Figur 1 Flowdiagram for beregning af indendørs støjniveau.

Hurtigfærger

I bekendtgørelsen om miljøgodkendelse af hurtigfærgeruter (BEK 1735/2015) er angivet en metode til beregning af indendørs lavfrekvent støj, $L_{pA,LF}$, baseret på den fælles nordiske beregningsmetode for industristøj [14]. Det beregnede lavfrekvente støjbidrag udendørs ved boliger omregnes til et indendørs støjniveau vha. tabelværdier for lydisolation angivet i 1/1-oktavnband fra 16-125 Hz.

Vindmøller

Støjudbredelse fra vindmøller er karakteriseret ved, at støjilden befinder sig i en forholdsvis stor højde over terræn eller vand. I vindmøllebekendtgørelsen (BEK 135/2019) er angivet en metode til beregning af udbredelsen af lavfrekvent støj baseret på en simplificering af Nord2000-metoden. Det beregnede lavfrekvente støjbidrag udendørs ved boliger omregnes til et indendørs støjniveau vha. tabelværdier for lydisolation angivet i 1/3-oktavnband fra 10-160 Hz. Der er angivet lydisolutionsværdier både for boliger og for sommerhuse. Støjgrænsen for den lavfrekvente støj indendørs, $L_{pA,LF}$, fra vindmøller er 20 dB, og der differentieres ikke mellem dag- og aften-/natperioden.

På grund af kildens højde og den typiske placering af vindmøller på landet eller på havet er beregningsmetoden simplificeret til ikke at indregne terrænets konjunkturer samt refleksioner fra bygninger.

2.2 Lydudbredelse

Beregningsmetoden Nord2000 kan bruges til at beregne lavfrekvent støj (om end den ikke er godkendt til dette i Miljøstyrelsens vejledninger) og medregner også lavfrekvent støj ned til 10 Hz [15]. Denne metode vurderes at give et mere korrekt resultat, hvad angår lavfrekvent støj end den fælles nordiske beregningsmetode.

Til planlægningsbrug er der behov for at kunne beregne lavfrekvent støj fra andre kilder end vindmøller og hurtigfærger, baseret på en forholdsvis simpel beregningsmodel, som ikke kræver avanceret software som fx Nord2000-software.

Den forsimplede Nord2000-metode til vindmøller er dokumenteret i rapporten "Beregningsmetode for lavfrekvent støj fra vindmøller", [15] fra 2011. Det skal nævnes, at Nord2000-beregningsmetoden kun er valideret med målinger for hhv. trafikstøj og vindmøllestøj og kun ned til 25 Hz [16], [17].

Kort summeret er metoden til beregning af lavfrekvent støj fra vindmøller gældende for vindmøller med en navhøjde fra ca. 35 m til omkring 180 m. Det betyder, at den mindste relevante afstand fra kilde til modtager bliver 200-1000 m (4 gange totalhøjden). Terrænkorrektionen i vindmøllemetoden er fundet som et gennemsnit af en række udbredelsesafstande (200-2000 m), vindhastigheder (6 m/s og 8 m/s) og terrænrønder (0,0001 m, 0,01 m, 0,05 m og 0,3 m). Generelt viser resultaterne, at afvigelserne i terrænkorrektion skyldes variabler som højde og afstand og ikke de meteorologiske variabler som vindhastighed og terrænrønder, [15]. Gennemsnitlig viser metoden en meget lille variation i resultatet ved beregningen af $L_{pA,LF}$ (Nord2000 sammenlignet med forsimplet Nord2000) i afstandsintervallet fra mindste afstand til den dobbelte afstand (elevationsvinkel 5-10°), og at den simplificerede metode giver ca. 1 dB højere lavfrekvent støjniveau ved fire gange den mindste afstand (2,6°). Luftabsorption er inkluderet i vindmøllemetoden, men er generelt så lille, at den kunne ignoreres ved beregningen af lavfrekvente støjniveauer – specielt i en planlægningsituation. Ligningen til bestemmelse af lavfrekvent støj fra vindmøller over land er vist i nedenstående:

$$L_{pALF} = L_{WA,ref,LF} - 10 \log(l^2 + h^2) - 11 \text{ dB} + \Delta L_{gLF} - \Delta L_{\sigma} - \Delta L_a \quad (1)$$

hvor

l afstanden fra vindmøllens fod til beregningspunktet (i meter)

h vindmøllens navhøjde (i meter)

11 dB korrektion for afstand $10 \times \log 4 \pi$

ΔL_{gLF} korrektion for terræn ved lave frekvenser

ΔL_{σ} lydisolation ved lave frekvenser

ΔL_a luftabsorption, $(\alpha_a \cdot \sqrt{l^2 + h^2})$

Terrænkorrektionen ΔL_{gLF} for en landplaceret mølle er:

1/3-oktavbånd centerfrekvens [Hz]	10	12,5	16	20	25	31,5	40
ΔL_{gLF} [dB]	6,0	6,0	5,8	5,6	5,4	5,2	5,0
1/3-oktavbånd centerfrekvens [Hz]	50	63	80	100	125	160	200
ΔL_{gLF} [dB]	4,7	4,3	3,7	3,0	1,8	0,0	-

Tabel 2 Terrænkorrektion for lavfrekvent støj for vindmøller placeret på land, [13].

Da formålet er at undersøge metodens brugbarhed for andre typer støjklender end vindmøller, dvs. støjklender med en lavere kildehøjde, kortere afstand mellem kilde og modtager og med et terræn, som måske er mere akustisk hårdt end antaget for vindmøller placeret på en mark (200 kPas/m^2 , klasse D), er der regnet et scenarie med nærmest inverse forhold til en vindmøllesituation. Dvs. der er relativt kort afstand mellem kilde og modtager, lav kildehøjde og hårdt akustisk terræn.

Et scenarie med en kildehøjde (h_s) på 1,5 m, modtagerhøjde (h_r) på 1,5 m, afstand mellem kilde og modtager (x) 50 m, en terrænrødhed (z_0) på 0,025 m, hårdt akustisk terræn, luftstrømningsmodstand (FR) på 20.000 kPas/m^2 svarende til klasse G giver terrænkorrrektion som vist i Tabel 3.

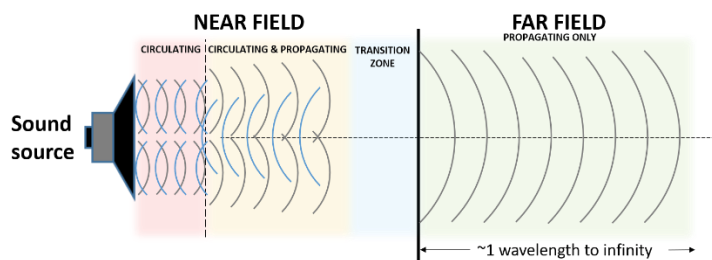
1/3-oktavbånd centerfrekvens [Hz]	10	12,5	16	20	25	31,5	40
ΔL_{gLF} [dB]	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
1/3-oktavbånd centerfrekvens [Hz]	50	63	80	100	125	160	200
ΔL_{gLF} [dB]	6,0	6,0	5,9	5,9	5,8	5,7	5,5

Tabel 3 Terrænkorrrektioner for et scenarie med $h_s = 1,5 \text{ m}$; $h_r = 1,5 \text{ m}$; $x = 50 \text{ m}$; $z_0 = 0,025 \text{ m}$; $FR = 20.000 \text{ kPas/m}^2$.

Det betyder, at en smalspektret lavfrekvent kilde med dominerende støj i frekvensbåndet 125 Hz vil blive underestimeret med 4 dB (5,8 dB - 1,8 dB, jf. Tabel 3 og Tabel 2) ved beregning med den forsimplede metode, baseret på terrænkorrrektioner fra vindmøllebekendtgørelsen. Det er derfor relevant at udarbejde et beregningsværktøj til terrænkorrrektioner for forskellige scenarier eller at udarbejde en række tabeller til opslag.

2.3 Kildedata

En vigtig del af beregningsmodellen er pålidelige kildedata. Metoderne til måling af kildestyrker indenfor normal industristøj indgår i Vejledning nr. 5/1993 fra Miljøstyrelsen, [14]. Vejledningen indeholder 4 metoder til måling af kildestyrke hhv. kuglemetoden, kassemetoden, metode til procesanlæg og ekstrapolationsmetoden. Målinger udført efter kuglemetoden og kassemetoden tager udgangspunkt i den karakteristiske dimension af kilden og tager ikke udgangspunkt i kildens frekvensspektrum. Disse to metoder er baseret på måling af lydtrykniveau i et frit felt under betingelsen af, at der måles i kildens fjernfelt. Målinger i kildens nærfelt kan introducere signifikante fejl. Nærfeltet er typisk defineret som området inden for 1 bølgelængde af kilden eller 2-3 gange den karakteristiske dimension og er det område, hvor lydfeltet er reaktivt, og lydbølgerne ikke udbreder sig, men bevæger sig frem og tilbage, jf. Figur 2.



Figur 2 Visuel fremstilling af nær- og fjernfelt. Kilde: Siemens Community

Ved måling på små lavfrekvente kilder i frekvensområdet 10-160 Hz med bølglængder mellem 34,3 m og 2,1 m er det derfor nødvendigt at være meget opmærksom på afstanden til kilden, der måles, af hensyn til afstandskorrekturen der anvendes i kildestyrkeberegningen.

Andre udfordringer i forbindelse med lavfrekvente kildestyrker kan være stående bølger (i forbindelse med indendørs målinger), høje baggrundsstøjniveauer, vindstøj i mikrofonen og evt. strukturlyd.

Ved målinger på kortvarige hændelser er det nødvendigt at være opmærksom på stabiliseringstiden for de relevante 1/3-oktavsfiltere, hvis der benyttes klassiske oktavsfiltere og ikke syntetiserede filtere baseret på smalbånds FFT-analyse. Stabiliseringstiden T for et 1/3-oktavsfilter er defineret som:

$$T = 5/båndbredden \quad (2)$$

Båndbredden af et 1/3-oktavsfilter er ca. 23 % af centerfrekvensen. For 1/3-oktavsbandet 10 Hz er stabiliseringstiden $T = 5 / (10 \times 23 \%) = 2,2$ sekunder.

Nedenfor er det ved et enkelt eksempel undersøgt, om den indendørs lavfrekvente støjgrænse er mere restriktiv end den udendørs støjgrænse. Scenariet er en gravemaskine med grab, der sorterer træ til neddeling på en affaldsplads. Den målte kildestyrke (hele frekvensområdet) er:

$$L_{WA} = 110 \text{ dB(A)}, L_{WA,F,Max} = 127 \text{ dB(A)}$$

og den lavfrekvente kildestyrke (10-160 Hz) er:

$$L_{WA,LF} = 90 \text{ dB(A)}, L_{WA,LF,F,Max} = 103 \text{ dB(A)}.$$

Beregningsscenariet er for en situation, hvor gravemaskinen er i drift i 10 minutter ud af 8 timer i dagperioden. Grænseværdien, der sammenlignes med, er 45 dB(A), hvilket er den gældende grænseværdi i dagperioden for boligområder med åben og lav boligbebyggelse. Den foreslåede grænseværdi, jf. [2], for lavfrekvent støj er $L_{pA,LF} = 20 \text{ dB(A)}$ og $L_{A,max,F} = 30 \text{ dB(A)}$.

Ved en afstand på 100 m overskrider støjniveauet grænsen for den udendørs støj (i hele det hørbare frekvensområde) på 45 dB(A) ved 10 minutters drift ud af et referencetidsrum på 8 timer.

Benyttes metoden i vindmøllebekendtgørelsen beregnes i afstanden 100 m et indendørs lavfrekvent støjniveau på $L_{pA,LF} = 20,8 \text{ dB(A)}$ og $L_{pA,LF,Max} = 32,9 \text{ dB(A)}$ ved 10 minutters drift ud af et referencetidsrum på 10 minutter.

Beregningsscenariet viser, at hvis der er stor forskel på referencetidsrummets længde og den tid, hvor kilden er aktiv, kan der være situationer, hvor der normalvist kun måles og beregnes udendørs støj i hele frekvensområdet også bør tages stilling til, om støjen overholder de lavfrekvente indendørs støjgrænser.

Det er uden for dette projekts omfang at etablere en egentlig database med lavfrekvente kildestyrker for typiske kilder. Men som eksempler på referencer på lavfrekvente kildestyrker kan nævnes:

- Case 1 om impulser fra et fitnesscenter, afsnit 4.1. Her er den gennemsnitlige lavfrekvente kildestyrke $L_{WA,LF} = 88 \text{ dB(A) re 1 pW}$.
- For en stor entreprenørmaskine (dumper) er der ved forbikørselsmålinger ved lav hastighed (7 km/t) målt en lavfrekvent kildestyrke på $L_{WA,LF} = 89 \text{ dB(A) re 1 pW}$.

2.4 Lydisolation

Lydisolation af bygningsdele er oftest beskrevet i frekvensområdet 100 Hz-5.000 Hz, og viden om lavfrekvent lydisolation i området 10-160 Hz er derfor meget begrænset. De typiske anvendte betegnelser for bygningers lydisolation, R' og R^1 , kan derfor anvendes til at betegne den generelle lydisolation af bygningsdele, men ikke nødvendigvis lydisolationen for lavfrekvent støj mellem 10 og 160 Hz.

2.5 Eksisterende lydisolutionsdata

I Danmark findes der lavfrekvente lydisolutionsdata for boliger i områder med vindmøller. Lydisolutionsdata, som er implementeret i vindmøllebekendtgørelsen (BEK 135/2019) dækker fritliggende huse og sommerhuse. Herudover eksisterer der lydisolutionsdata til beregning af lavfrekvent støj fra hurtigfærger, som er implementeret i bekendtgørelsen om miljøgodkendelse af hurtigfærger (BEK 1735/2015).

Grundlaget for lydisolutionsdata i vindmøllebekendtgørelsen (BEK 135/2019) og hurtigfærbekendtgørelsen (BEK 1735/2015) stammer fra en række af Miljøstyrelsens projekter udført af hhv. DELTA (Nu FORCE Technology), [18]-[21], og SWECO [22]-[23]. Supplerende dækker en rapport til Forsvarsministeriets Ejendomsstyrelse, udført af FORCE Technology, [24], en gennemgang af de ovenstående eksisterende lydisolutionsdata. Undersøgelserne dækker grundigt lydisolationen af nye huse, huse i det åbne land samt sommerhuse bygget med letvægtskonstruktioner. Sommerhuse opført i tunge konstruktioner har samme lydisolation som land- og byhuse generelt, [22]. De endelige lydisolationstal er valgt, så 67 % af måleresultaterne fra de to måleserier for hhv. huse og lette sommerhuse er højere end tabelværdierne, se Tabel 4. Det betyder, at der i 33 % af dem, som bliver udsat for lavfrekvent støj med et niveau omkring grænseværdien eller højere, vil være flere stærkt generede beboere.

¹ R er et udtryk for lydisolationen angivet som et reduktionstal målt i et laboratorium. R' er et udtryk for lydisolation angivet som det tilsyneladende reduktionstal målt i felten.

1/3-oktavbånd centerfrekvens [Hz]	10	12,5	16	20	25	31,5	40
ΔL_{σ} [dB]	4,9	5,9	4,6	6,6	8,4	10,8	11,4
ΔL_{σ} [dB] sommerhusområder	6,8	3,9	0,4	-0,2	4,8	6,2	8,4
1/3-oktavbånd centerfrekvens [Hz]	50	63	80	100	125	160	200
ΔL_{σ} [dB]	13,0	16,6	19,7	21,2	20,2	21,2	-
ΔL_{σ} [dB] sommerhusområdet	10,5	11,9	11,9	16,0	17,5	17,9	-

Tabel 4 Værdier for lydisolation (niveaudifferens) fra vindmøllebekendtgørelsen (BEK 1735/2015).

Datagrundlaget er baseret på feltmålinger af lavfrekvent lydisolation. Fælles for målingerne er, at de tager udgangspunkt i måling af det indendørs lavfrekvente støjniveau baseret på metoden i Orientering 9/1997, [3]. Den lavfrekvente lydisolation i studierne relateret til vindmøller definerer lydisolationen som lydniveau-differensen mellem et udendørs lydniveau (frit felt) og et indendørs, energimidlet lydniveau, målt i møbleret rum uden korrektion for efterklangstid. Dette svarer til udtrykket "indsætningsdæmpning". Formålet er, at omregningen fra udendørs fritfelts-lydniveau fratrukket niveaudifferensen skal give resultater tilsvarende en måling fra Orientering 9/1997.

Af undersøgelser om lavfrekvent lydisolation, som ikke er inkluderet eller nævnt i de danske rapporter udarbejdet for Miljøstyrelsen, er der fundet en finsk undersøgelse, [25], hvor der er udført målinger af facaders lavfrekvente lydisolation. Den finske undersøgelse dækker målinger på 26 facader fordelt på murede, træ- og bjælkefacader med og uden vinduer. Den finske metode er baseret på måling af en niveaudifferens ved brug af 5 udendørs og 9 indendørs positioner (4 hjørnepositioner og 5 positioner fordelt jævnt i rummet). Metoden følger standarden ISO 16283-3 (feltnmålinger af facaders lydisolation). Det er ikke sikkert, at de finske måleresultater umiddelbart kan overføres til danske forhold grundet forskelle i byggestil. Data fra den finske undersøgelse svarer til, at 84 % af typiske finske boliger har en lydisolation ved lave frekvenser, der overstiger disse værdier. Generelt ligger de finske værdier for lydisolationen over de danske i frekvensområdet op til 25 Hz, mens de danske værdier er højere end de finske fra 25 Hz og opefter.

Resultaterne af de finske målinger er vist i Tabel 5.

1/3-oktavbånd centerfrekvens [Hz]	5	6,3	8	10	12,5	16	20
ΔL_{σ} [dB]	5,5	5,7	5,9	6,2	6,6	7,1	7,6
1/3-oktavbånd centerfrekvens [Hz]	25	31,5	40	50	63	80	100
ΔL_{σ} [dB]	8,3	9,2	10,3	11,5	13,0	14,8	16,8
1/3-oktavbånd centerfrekvens [Hz]	125	160	200				
ΔL_{σ} [dB]	18,8	21,1	22,8				

Tabel 5 Værdier for lydisolation (niveaudifferens) fra den finske undersøgelse, [25].

De danske undersøgelser dækker generelt fritliggende huse, herunder ældre landejendomme, nye huse samt lette sommerhuse. I tilfælde med træhuse kan der tages udgangspunkt i data fra rapporten "Lavfrekvent støj fra vindmøller", [26]. For at dække samtlige bygningstyper anbefales det, at den lavfrekvente lydisolation undersøges for hhv. rækkehuse og lejlighedsbyggerier, herunder forskellige bygningstyper af begge boligtyper.

2.6 Dæmpning af luftlyd

Orientering 9/1997 anviser muligheder for dæmpning af lavfrekvent støj, infralyd og vibrationer. I relation til luftlyd er der en række forslag til dæmpning ved kilden. Kort opsummeret er disse:

- Indkapsling af støjkilden.
- Afstivning af store flader.
- Afkobling (vibrationsisolering).
- Lyddæmpere i relation til pulserende luft.
 - Absorptionsdæmpere (bedst virkning ved høje frekvenser).
 - Reaktive dæmpere, herunder reflektionsdæmpere og resonatordæmpere.
- Samt aktive metoder, fx aktiv støjdæmpning eller aktiv vibrationsdæmpning.

Ift. dæmpning af lavfrekvent støj under udbredelsen anviser Orientering 9/1997 muligheder for at anvende støjskærme.

Af nye teknologier, som ikke er indeholdt i Orientering 9/1997, kan nævnes brugen af metamaterialer. Det kan fx være dæmpning af vibrationerne i en plade ved brug af mindre to- eller tredimensionelle tuned resonatorer (fjeder-masse-systemer) som en integreret del af pladens opbygning, og som kan være med til at dæmpe lydudstrålingen fra pladen eller indbyggede akustiske resonatorer for at forbedre lydisolation. Et eksempel på forbedring af lydisolationen vha. metamaterialer kan fx ses i en artikel fra Applied Sciences, [27].

Andre metoder, hvor der kan opnås en dæmpning af den lavfrekvente lydudstråling fra en plade, er anvendelsen af viskoelastiske materialer i en opbygning typisk benævnt "constrained layer damping" (CLD). Grundtanken bag CLD er at indsætte et dæmpningslag mellem to stive lag i en struktur. Dæmpningslaget er et viskoelastisk materiale med en høj dæmpning, fx viskoelastisk polymer, der omsætter den kinetiske energi fra lyd eller vibrationer til varme og derved reducerer mængden af energi, der transmitteres gennem strukturen og udstråles som strukturlyd fra overfladen.

2.7 Forbedret lavfrekvent lydisolation

Rapporten for Forsvarsministeriets Ejendomsstyrelse, [24] indeholder en gennemgang af metoderne til optimering af lavfrekvent lydisolation, der er fundet i de to danske undersøgelser af støj fra vindmøller:

- "Ny viden om lavfrekvent lydisolation af boliger i områder med vindmøller", [23] og
- "Lavfrekvent støj fra vindmøller", [26].

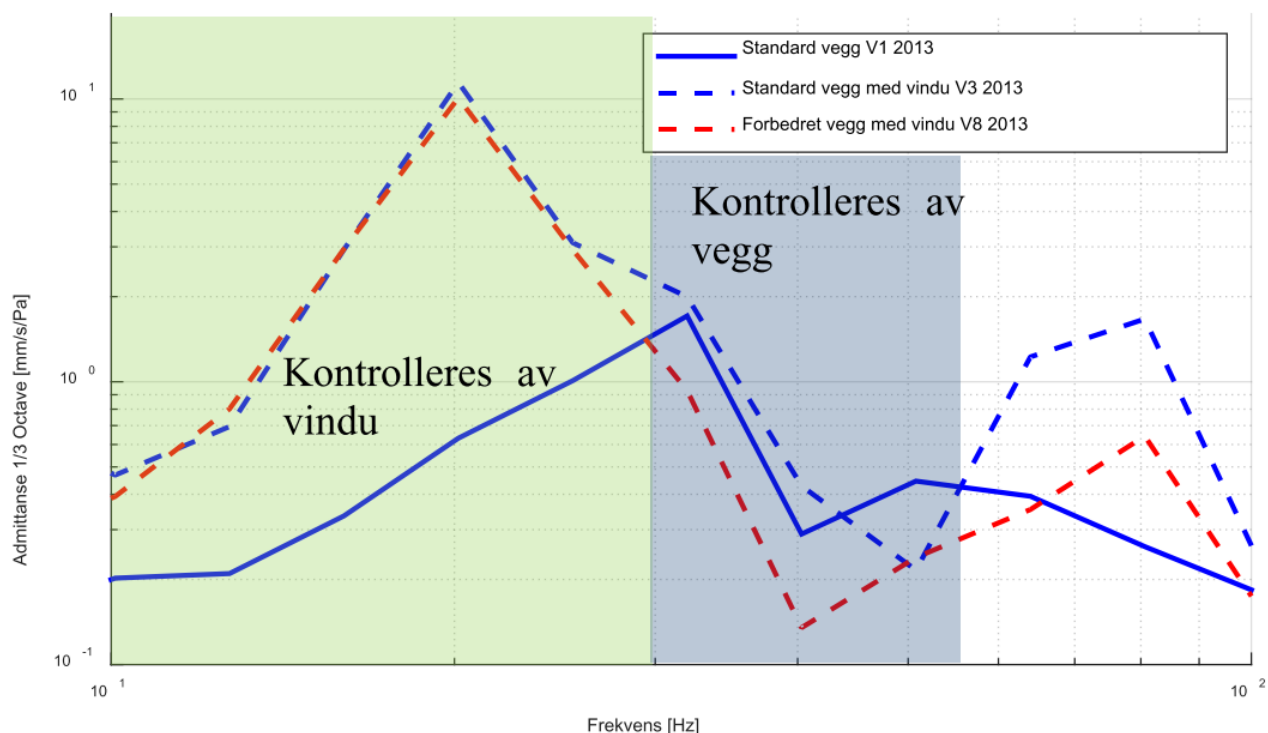
Den overordnede konklusion af begge rapporter er opsummeret herunder med følgende generelle virkemidler, som foreslås:

- Forøgelse af konstruktionens vægt
- Forøgelse af konstruktionens stivhed
- Ændring af konstruktionens dybde
- Adskillelse mellem ydre og indre delkonstruktioner
- Udendørs afskærmning
- Forøgelse af lydabsorption i beboelsesrum
- Basfælder i facadekonstruktionen
- Aktiv støjdæmpning.

Konkrete løsninger præsenteres i [23] og indeholder:

- For tunge facader er indvendige gipsforsatsvægge med tungt forsatsvindue effektive løsninger:
 - Forsatsbeklædninger med – 15 cm hulrum og kontakt mellem eksisterende facademur og forsatsvæg, med tungt forsatsvindue – er stort set lige så effektivt som en fritstående forsatsvæg – med 30 cm hulrum og ingen kontakt til eksisterende facademur, med tungt forsatsvindue.
- For tunge facader er udvendig facadeisolering med gipsplader og puds en næsten lige så effektiv lydisolerende løsning ved de lave frekvenser som indvendig forsatsbeklædning.
- For lette facader er det vigtigt, at:
 - anvende flere tunge gipspladelag ved indvendig efterisolering.
 - supplere med lydisolering af interne skillevægge omkring det/de rum, hvis facader ønskes isoleret.
- Montageformen ved indvendig efterisolering af lette facader har mindre betydning for indsætningsdæmpningen ved frekvenser over 50 Hz, hvor der ikke er forskel mellem direkte montage af gipsplader og forøget hulrum i forsatsvæggene.
- Lavfrekvensabsorbenter i hjørner kan reducere indendørs lavfrekvent støj i frekvensområdet over 50 Hz.
- En lille cirkulær åbning påvirker ikke den lavfrekvente lydisolation i en tung facade.
- Delvist åbne vinduer påvirker den lavfrekvente lydisolation og vil eliminere effekten af efterisoleringen.
- Der er ingen effekt af karmabsorbenter mellem facadevinduer og forsatsvinduer i det lavfrekvente område eller ved at stille forsatsvinduer på skrå.

SINTEF i Norge har udført en række lydisolationsmålinger i laboratoriet i perioden 2014-2015, hvor vinduers betydning for lydisolationen i skillevægge er undersøgt, [28]. Målingerne er udført med en standard skillevæg (12 mm træpanel, 48 x 418 mm regler, 150 mm mineraluld og 9 mm gips), en forbedret skillevæg med øget stivhed samt 3 forskellige vinduestyper (2-lags rude, 3-lags rude med laminat og en dobbelt konstruktion med en 2-lags rude, 100 mm luft, 3-lags rude med laminat). Resultaterne viser, at vinduerne har en stor betydning for lydisolationen i frekvensområdet under 30 Hz.



Figur 3 Vindues betydning for lavfrekvent lydisolation, vist ved den målte admittans, dvs. vibrationshastighed målt på skillevæg/vindue i modtagerum og lydtryk i senderum, [28]. Standardvæg med vindue V3 består af 13 mm gips, 48x148 træreglar, 150 mm glasuld isolering, 9mm gips, og et vindue med 6-12-4 glas med en spalteventil og karmmålt 1190 x 1190 mm. Forbedret væg med vindue V8 består af 13 mm gips, 48x148 træreglar + 50x100 mm pladeprofiler i stål skruet fast på træreglarne, 100+150 mm glasuld isolering, 22 mm krydsfiner monteret på stålprofilerne og 9 mm gips, og et vindue med 6-12-4 glas med en spalteventil og karmmålt 1190 x 1190 mm.

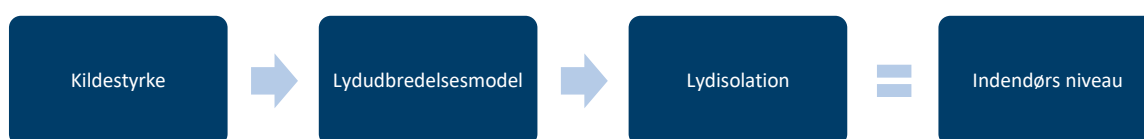
I det norske projekt blev det undersøgt, hvordan vinduers lydisolation kan forbedres lavfrekvent. Konklusionerne i [28] er:

- Trelagsruder, hvor mindst et og helst to af lagene er lamineret, bør benyttes til forbedring af den lavfrekvente lydisolation.
- Konstruktioner med dobbeltvinduer giver ikke væsentlig forbedring ift. den øgede omkostning. Tolagsruder med laminat bør undgås pga. tydelig resonansfrekvens i det lavfrekvente område sammenlignet med en trelagsrude, hvilket i uheldige situationer kan give en kraftig forringelse af lydisolationen.

Samme rapport viser desuden, at hvis der benyttes lyddæmpede ventiler til udluftning, har disse ikke væsentlig betydning for den lavfrekvente lydisolation af en skillevæg, [28]. Det er samme konklusion, som der er fundet frem til for ydervægge i [23].

2.8 Sammenfatning og delkonklusioner

Nedenstående beregningsmetode er fundet anvendelig til en indledende vurdering af, hvorvidt de lavfrekvente støjgrænser kan være overskredet.



Det er afgørende at kende kildestyrken og udbredelsesvejen (helt eller delvist) samt den lavfrekvente lydisolation.

Hovedkonklusionerne er anført i følgende tre punkter, men læs også de efterfølgende bemærkninger.

- Kildestyrken kan findes ved hjælp af en af de fire kendte metoder (kuglemetoden, kassemetoden, metode til procesanlæg og ekstrapolationsmetoden). Dog skal målingen udføres i en afstand uden for nærfeltet, som er området indenfor en bølgelængde af kilden eller 2-3 gange den karakteristiske dimension. Ved frekvensanalyse skal man være opmærksom på, at indsvingningstiden for de laveste 1/3-oktavbåndsfiltre er flere sekunder.
- Det vurderes, at Nord2000-udbredelsesmetoden kan bruges til beregninger af lydudbredelsen også ned til 10 Hz. Den er dog kun valideret ned til 25 Hz. Det vurderes ligeledes, at den simplificerede Nord2000-udbredelsesmodel kan benyttes ved brug af andre terrænkorrigeringer end dem, der er anført i vindmøllebekendtgørelsen (BEK 135/2019).
- Vindmøllebekendtgørelsens (BEK 135/2019) data for lydisolation for de relevante bygningstyper kan benyttes til vurderingerne. Dog mangler der konkrete data for rækkehuse og lejlighedsbyggerier.

Af hensyn til beregningsnøjagtigheden anbefales det at etablere en kildedatabase med typiske kildestyrker for lavfrekvente kilder, som kan anvendes til overslagsberegninger i planlægningssituationer.

Beregningsmetoden for lavfrekvent støj, som indgår i vindmøllebekendtgørelsen (BEK 135/2019), er evalueret i forhold til brug ved beregning af lavfrekvent støj fra andre kilder. Det er vurderet, at de terrænkorrigeringer, som anvendes i vindmøllebekendtgørelsen, ikke er anvendelige for andre beregningsscenarier end vindmøller, og at der kan regnes op til ca. 4 dB for lave niveauer ved brug af forkert terrænkorrektion. Det anbefales derfor, at der udvikles et simplificeret værktøj til beregning af terrænkorrigeringer for forskellige scenarier, eller at der udarbejdes en række tabeller med terrænkorrigeringer til opslag for kilder med lavere højde over terræn end vindmøller.

Der er udført et beregningsscenarie (afsnit 2.3) som viser, at der ved store forskelle for referencetidsrum og den periode, en kilde er aktiv, kan være situationer, hvor den lavfrekvente støj giver anledning til overskridelser af grænseværdien for indendørs lavfrekvent støj, selvom den udendørs (almindelige) støj ikke overskrider grænsen for udendørs støj.

De danske undersøgelser dækker generelt fritliggende huse, herunder ældre landejendom og nye huse samt lette sommerhuse. I tilfælde med træhuse kan der tages udgangspunkt i data fra rapporten "Lavfrekvent støj fra vindmøller", [26]. For at dække samtlige bygningstyper anbefales det at den lavfrekvente lydisolation af hhv. typiske rækkehuse og lejlighedsbyggerier undersøges, herunder forskellige bygningstyper af begge typer.

Det bemærkes, at de endelige lydisolationstal i vindmøllebekendtgørelsen er valgt, så 67 % af danske huse og lette sommerhuse har en højere lydisolation end tabelværdierne. Det betyder også, at der blandt 33 % af dem, der bliver udsat for lavfrekvent støj med et niveau omkring grænseværdien eller højere, vil være flere stærkt generede beboere.

Der er udarbejdet en opsummering af ny viden om dæmpning af lavfrekvent støj, som ikke er indeholdt i Orientering nr. 9/1997.

Den nye viden omfatter:

- Dæmpning af støj ved kilden ved brug af metamaterialer eller constrained layer damping (CLD),
- Lavfrekvent lydisolation gennem hhv. SWECO's og DELTA's (nu FORCE Technology) undersøgelser, [18]-[23], [26] samt
- En norsk undersøgelse om lavfrekvent lydisolation af vinduer, [28].

3 Strukturlyd

Vibrationer i strukturer, som kan høres, kaldes strukturlyd eller strukturstøj. Strukturlyd kan opstå som følge af vibrationer, der udbreder sig fra en kilde gennem jorden eller andre strukturer til bygninger. Hvis vibrationerne er kraftige nok, kan bygningens indvendige flader bringes til at vibrere og som konsekvens heraf udstråle hørbar lyd til rummet. Der skelnes mellem følgerne af vibrationer og strukturlyd. Vibrationer, typisk i frekvensområdet 1-80 Hz kan mærkes og føles på den flade, hvor en person opholder sig – fx på en stol, et gulv eller lignende. Strukturlyden er i det hørbare frekvensområde (inklusive lavfrekvensområdet) og opstår typisk som lyd fra vibrationer i vægge, lofter, vinduer og gulve, der er tilpas høje til at kunne høres. Hvis det er tilfældet, virker bygningselementerne i princippet som en slags højttaler for lavfrekvent lyd.

Hvis strukturlydskilden fx er et tog, er det afgørende at kende til vibrationskildens styrke, udbredelsen i jorden og i bygningen samt at have kendskab til de akustiske egenskaber af bygningselementer og modtager-rum. Ved jordbårne vibrationer er den resulterende strukturlyd oftest lavfrekvent, fordi vibrationer, der transmitteres gennem jord, ofte er godt dæmpet i det høje frekvensområde og mindre godt dæmpet i det lavfrekvente område. Lavfrekvent strukturlyd i et rum opfattes typisk som dyb og "rumlende" og kan være vanskelig at stedbestemme.

Der findes forskellige numeriske beregningsmetoder til detaljerede vurderinger af udbredelse af struktur-transmitteret lyd. Beregningsmetoderne baserer sig både på avancerede modeller som Finite Element Analyse (FEA), Boundary Element Method (BEM) og Statistical Energy Analysis (SEA) og på modeller, som er mere simple og enten semi-empiriske eller "rent" empiriske.

Der findes kommercielle værktøjer til at beregne udbredelsen af jordbårne vibrationer og støj, fx:

- VIBRA, udviklet af ZIEGLER Consultants i Schweiz,
- Mefissto, udviklet af CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), https://www.safecoustics.com/Pdf/Mefissto_Leafet_EN.pdf
- og frit tilgængeligt software GroundVib, udviklet af Aarhus Universitet (www.soilmodels.com) til at beregne transmissionstab i jorden.

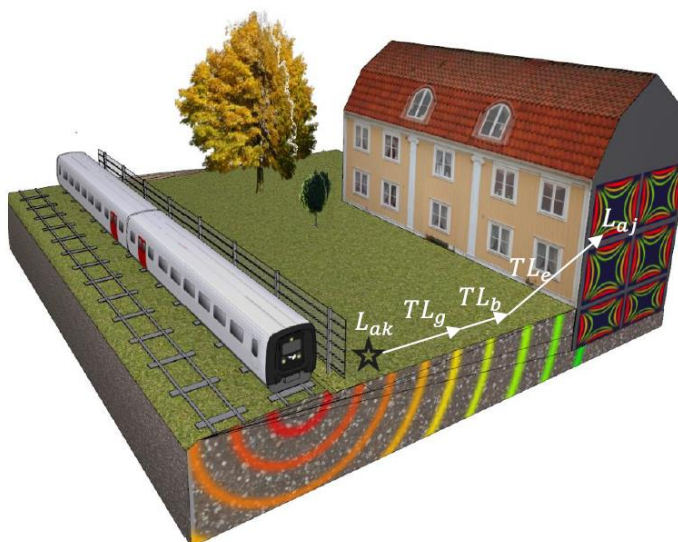
Metodikken for GroundVib er beskrevet i en artikel, [29]. Der findes desuden et EU-finansieret projekt Silvarstar, [30], hvis formål er at udvikle en almindeligt accepteret, praktisk og valideret metode inklusive et brugervenligt beregningsværktøj til vibrationsundersøgelser med fokus på togindustrien. I følge Silvarstar's projekthjemmeside arbejdes der for nuværende på at udvikle et auraliserings- og visualiseringsværktøj samt at forbedre projektets beregningsmodel, [30]. Dvs. der er flere muligheder for en detaljeret vurdering af vibrations- og strukturlyd niveauer, hvis dette findes relevant.

I det følgende er der primært fokus på eksisterende "simple" beregningsmetoder til planlægningsbrug og overslagsberegninger baseret på enten empiriske eller semi-empiriske modeller.

Den klassiske matematiske formulering for beregning af vibrationers udbredelse fra tog til vibrationer på gulvet på en given etage i en bygning er iht. [31] givet ved:

$$L_{aj} = L_{ak} + TL_h + TL_g + TL_b + TL_e \quad (3)$$

L_{aj}	beregnet accelerations niveau (på gulv på en given etage, nr. j)
L_{ak}	"kildestyrke" af toget i dB (vibrationsniveau tæt ved sporet, typisk 7-8 m.
TL_h	korrektion for hastighed af toget i dB
TL_g	korrektion for jordbåren vibrationstransmission i dB
TL_b	korrektion for koblingstab ved bygningens fundament i dB
TL_e	korrektion for koblingstab mellem bygningens fundament og en given etage i dB



Figur 4 Transmission af vibrationer/strukturlyd fra tog til nærliggende bygning. Skitse fra [31].

Kildens vibrationsniveau (L_{ak}) dæmpes via transmission i jorden, TL_g . Herefter transmitteres vibrationer til bygningsfundamentet med et transmissionstab, TL_b og videre til en given etage med transmissionstab, TL_e . Vibrationsniveauet er ofte højere på gulv end på bygningsfundament. Det beregnede vibrationsniveau, L_a , kan omregnes til et støjniveau ved hjælp forskellige egenskaber af modtagerrum og flader beskrevet i afsnit 3.6.

Det er samme metodik, der danner udgangspunkt i ISO 14837, [32], og i VDI 3837, [33].

I det følgende tages der udgangspunkt i formel (3). Hvis det drejer sig om stationære kilder, som ikke har en hastighed, udelades TL_h , og L_{ak} erstattes med kildestyrken for den pågældende stationære kilde.

Herunder gives en gennemgang af metoder beskrevet af Miljøstyrelsen og Referencelaboratoriet, Federal Transit Administration (FTA), L.G. Kurzweil, Brekke & Strand og Aarhus Universitet. De forskellige metoder tager i princippet udgangspunkt i den model, der er vist i Figur 4, eller giver data til delelementer i modellen fx transmissionstab igennem jorden. I afsnit 4.5 forsøges FTA's screeningmetode anvendt på en case sat i dansk sammenhæng.

3.1 Miljøstyrelsen og Referencelaboratoriet

For at undgå vibrationsgener indendørs er der i Miljøstyrelsens Vejledning 1/1997, [6], angivet mindsteafstande mellem tog og boliger på 50 m for strækninger med fjern tog, hvor der forekommer mere end 10 tog pr. døgn. For øvrige jernbanestrækninger (lokalbaner, S-baner mv.) er denne mindsteafstand 25 m. Overvejes byggeri i kortere afstand, bør det ved målinger på stedet eftervises, om grænseværdien for vibrationsniveauet kan forventes overholdt.

I Orientering nr. 10/1989 fra Referencelaboratoriet, [4], er der opsat retningslinjer for vurdering og beregning af vibrationer. Målinger rapporteret i [4] viser, at det maksimale KB-vægtede accelerationsniveau fra togpassager varierer mellem 61 dB og 79 dB ved 16 forskellige målesteder i afstande 10-15 m fra sporene. Med lokomotivtrukne passagertog som reference giver godstog 2-4 dB højere og S-tog 2-5 dB lavere vibrationsniveauer. Der er ikke fundet nogen sammenhæng mellem hastighed af togene i området 50-120 km/t og vibrationsniveauet.

Forskellen mellem vibrationsniveauet i afstanden a og i den kortere afstand b er givet til:

$$\Delta L_{a-b} = 0,4 - 17,1 \log_{10} \left(\frac{a}{b} \right), \text{ dB} \quad (4)$$

Ubestemtheden på måleresultaterne skønnes til ± 5 -6 dB.

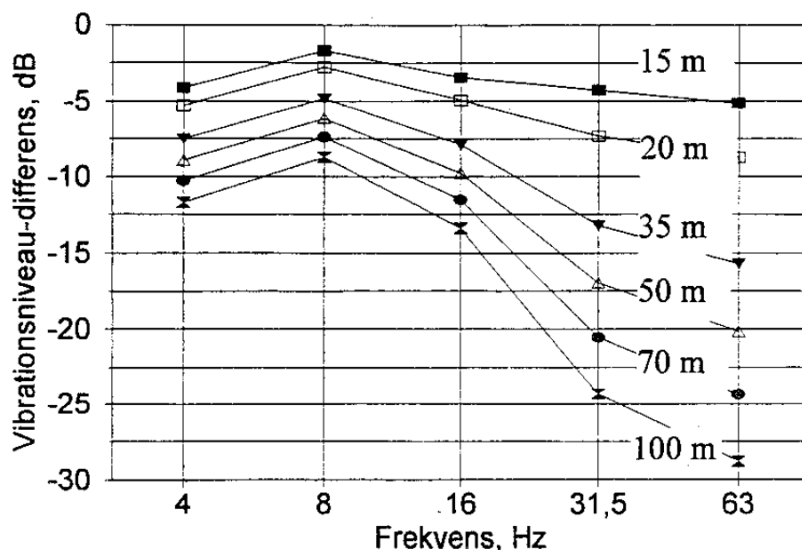
Desuden konkluderes i [4], at:

- Bygninger med kælder generelt har et lavere vibrationsniveau end bygninger på jord.
- De laveste vibrationsniveauer findes på gulve af beton og tilsvarende stive konstruktioner. Vibrationsniveauer er her ca. 0-7 dB højere end i jorden udenfor.
- Gulve på træbjælkelag kan forstærke vibrationerne med 5-10 dB sammenlignet med vibrationsniveauet i jorden udenfor. På en 1.sal med gulv på træbjælkelag er der observeret op til 15 dB højere niveauer end i jorden.

Hvis vibrationerne skal belyses nøjere, anbefales det at måle vibrationerne mellem spor og området, hvor en bygning planlægges opført. Målingerne bør foretages i en afstand af 10-20 m under en række passager med forskellige typer tog. Vibrationsdæmpningen til det sted, hvor bygningen regnes opført, bestemmes herefter med formel (4). Typisk adderes der 10-15 dB for at finde det forventede totale accelerationsniveau på et typisk gulv. Hvis gulvet forventes stift eller af beton adderes 7 dB i stedet.

Det bemærkes, at Orientering nr. 10/1989, [4], er af ældre årgang, hvorfor de fleste togtyper omhandlet heri ikke eksisterer i dag. Det kan betyde, at absolutte niveauer angivet i orienteringen ikke er helt aktuelle, hvorimod relative forskelle må opfattes som mere aktuelle.

I Orientering 9/1997, [3], er der gengivet en figur med det forventede transmissionstab i oktavbånd (4-63 Hz) som funktion af forskellige afstande i forhold til en referenceposition 10 m fra sporet, jf. Figur 5. Bemærk, at dæmpningen især stiger ved de højere frekvenser som funktion af afstand.



Figur 5 Dæmpning af vibrationer fra jernbanetrafik. Niveaudifferens af vibrationer i forhold til niveauet i 10 m afstand. Målt med accelerometer nedgravet ca. 30 cm i jorden efter [3].

Ifølge Orientering 9/1997, [3], er strukturlydsbidraget fra eksterne kilder ofte mest betydende i frekvensområdet fra 20-80 Hz, hvor forskellen mellem det ikke-vægtede (lineære) lydtrykniveau i rummet og det KB-vægtede accelerationsniveau på gulvet er 0 dB.

3.2 The U.S. Department of Transportation, Federal Transit Administration, FTA

Et speciale fra DTU, "Assessment of Ground-Borne Vibrations from Urban Rail Transit", [34], gennemgår blandt andet forskellige vurderingsmetoder til at beregne vibrationer fra letbaner. Iht. [34] er en empirisk screeningsmetode udviklet af The U.S. Department of Transportation, Federal Transit Administration, FTA, velkendt.

FTA har udgivet rapporten "Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual", [35], som beskriver metoder til at vurdere udbredelsen af jordbårne vibrationer fra tog, busser etc. og fra konstruktionsarbejder til bygninger. Der er beskrevet en indledende screeningsprocedure, som ikke inkluderer beregninger, men kun baserer sig på iagttagelser såsom tilstedeværelse af vibrationsfølsomme arealer i en given afstand fra et kommende projekt.

Hvis screeningsproceduren indikerer, at der er en risiko for betydelige vibrationer og strukturlyd ved fx nærliggende beboelse, er næste skridt at bruge FTA's vurderingsmetode. Vurderingsmetoden er relativ simpel og er beskrevet i følgende afsnit. Indledningsvist bemærkes det, at metoden er simplificeret til kun at forholde sig til totalniveauer og dermed ikke at tage hensyn til forskellige frekvensbånd. Metoden er i det følgende frit oversat fra engelsk til dansk.

FTA-metoden anvender amerikanske enheder. Fx angives hastighed i [in/s].

Vibrationshastigheden i dB er givet ved:

$$L_v = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{v}{v_{ref}} \right) \quad (5)$$

$$v_{ref}(\text{USA}) = 1 \mu\text{in/s}, \quad v_{ref}(\text{Internationalt}) = 1 \text{ nm/s}$$

For at ændre fra amerikanske enheder til internationale kan følgende konvertering bruges:

$$L_v = L_{v,USA} + 28.1 \text{ dB} \quad (6)$$

3.3 Vibrationer og strukturlyd fra køretøjer – vurderingsmetoden

FTA's vurderingsmetode er beskrevet i nedenstående:

Ifølge FTA kan vibrationsniveauerne for forskellige køretøjer i en given afstand beregnes til:

Kilde	Formel, USA
Lokomotivdrevet passager eller godstog (50 mph)	$L_{v,USA} = 92.28 + 14.81 \log(D) - 14.17 \log(D)^2 + 1.65 \log(D)^3$
Hurtige transit- eller letbanekøretøjer (50 mph)	$L_{v,USA} = 85.88 - 1.06 \log(D) - 2.32 \log(D)^2 - 0.87 \log(D)^3$
Køretøjer med gummidæk (30 mph)	$L_{v,USA} = 66.08 + 34.28 \log(D) - 30.25 \log(D)^2 + 5.40 \log(D)^3$

Tabel 6 Generaliserede vibrationsberegninger for forskellige køretøjer på terræn. D er afstanden fra midten af kilden til en modtagerposition og angivet i feet. 1 foot er ca. 0,3 m. $L_{v,USA}$ er dB re 1µin/s.

Ovenstående formler kan omskrives til hastighedsniveauer dB re 1nm/s ved følgende tabel:

Kilde	Formel, international
Lokomotivdrevet passager eller godstog (~80 km/t)	$L_v = 120.38 + 14.81 \log(D_m \cdot k) - 14.17 \log(D_m \cdot k)^2 + 1.65 \log(D_m \cdot k)^3$
Hurtige transit- eller letbanekøretøjer (~80 km/t)	$L_v = 113.98 - 1.06 \log(D_m \cdot k) - 2.32 \log(D_m \cdot k)^2 - 0.87 \log(D_m \cdot k)^3$
Køretøjer med gummidæk (~50 km/t)	$L_v = 94.18 + 34.28 \log(D_m \cdot k) - 30.25 \log(D_m \cdot k)^2 + 5.40 \log(D_m \cdot k)^3$

Tabel 7 Generaliserede vibrationsberegninger for forskellige køretøjer på terræn. D_m er afstanden fra midten af kilden til en modtager position og angivet i meter. k er defineret som 39,4 inch/m. L_v er hastighedsniveauet, dB re 1nm/s i den givne afstand.

FTA-metoden giver i [35] yderligere beskrivelse af, hvornår og hvilke formler i Tabel 6 eller Tabel 7 der skal bruges for forskellige typer køretøjer.

Hvis kildestyrken er kendt eller skønnet ved en given hastighed, kan den korrigeres til andre hastigheder ved:

$$Adj_{speed}(dB) = 20 \cdot \log\left(\frac{speed}{speed_{ref}}\right) \quad (7)$$

I Tabel 8–Tabel 11 er givet yderligere data for korrektioner til kildestyrken, korrektioner for vibrationsudbredelse i jorden, kobling til forskellige husfundamenter etc. I princippet beregnes det endelige vibrationsniveau og strukturlydniveau som givet i formel (3).

Transmissionskorrektionsbeskrivelse	Justering	Kommentar
Elastisk understøtning af jernbanesveller	-10 dB	Elastisk understøtning af spor har vist god vibrationsisolering – især lavfrekvent
Banestruktur (Skal ikke adderes. Kun største værdi gælder)		
Spor på jorden – hævet på lille dæmning	-10 dB	Jo tungere strukturer, desto lavere vibrationer. Nedgravede ikke overdækkede tunneler kan dæmpe vibrationerne en smule. Tunneler i klipper genererer vibrationer ved højere frekvenser.
Spor på jorden – åben/nedgravet	0 dB	
Tunnel – Station	-5 dB	
Tunnel, cut & cover	-3 dB	
Tunnel boret i klippe	-15 dB	
Jordbåren transmissionskorrektioner		
Effektiv transmission i jord	+10dB	Hvor der er risiko for effektiv transmission er videre beskrevet i [35]
Transmission i klipper (afstand)		Den positive korrektion tager den lavere transmissionsdæmpning i klippe frem for almindelig jord i betragtning. Det er sværere at sætte klippelag i vibrationer fremfor jord.
15 m	+2 dB	
30 m	+4 dB	
46 m	+6 dB	
61 m	+9 dB	
Kobling til husfundament		
Huse med træfundament	-5 dB	Tommelfingerregel: jo tungere bygningskonstruktion, desto større transmissionstab
1-2 Etager murstenshuse	-7 dB	
3-4 Etager murstenshuse	-10 dB	
Store murstenshuse på pælefundament	-10 dB	
Store murstenshuse på punktfundamenter	-13 dB	
Fundament på klippe	0 dB	

Tabel 8 Korrektionsværdier for transmissionstab til vurdering af jernbanevibrationer.

Kildekorrektionsbeskrivelse	Justering	Kommentar
Hastighed	$20 \cdot \log_{10} \left(\frac{v}{v_{ref}} \right)$	Elastisk understøtning af spor har vist god vibrationsisolering især lavfrekvent
Køretøjskorrektioner (Skal ikke adderes. Kun største værdi gælder)		
Køretøj med stift ophæng	+8dB	Køretøjer med stift ophæng giver høje vibrationsniveauer, hvis ophænget har en egenfrekvens større end 15 Hz.
Bløde hjul	0 dB	Bløde hjul reducerer kun ved frekvenser over 80 Hz
Slidte hjul	+10dB	Slidte hjul og hjul med flader kan skabe høje vibrationsniveauer
Banelegemekorrektioner		
Slidte eller korrugerede skinner	+10dB	Korrugerede skinner er et almindeligt problem. Hvis der allerede er inkluderet køretøjskorrektioner, skal der kun inkluderes en enkelt korrektion.
Skiner tæt på sporskifte og lign. Indenfor 60 m afstand	+10dB (indenfor 30 m) +5dB (Mellem 30 m og 60 m)	"Hjulslag" over fx sporskifte kan øge vibrationerne betydeligt. Der skal ikke justeres for dette ved afstand over 60 m.
Spor med laskede (boltede) skinner	+5 dB	Spor med laskede skinner kan forårsage højere vibrationer end svejste skinner
Ujævn vejbelægning	+5 dB	Slidte veje eller veje med dilatationsfuger er en kilde til forøgede vibrationer for køretøjer med gummihjul.
Banelegemeforbedringer (Skal ikke adderes. Kun største værdi gælder)		
Flydende spor Betonspor, afkoblet fra omgivelser med dæmpningsmateriale	-15 dB	Hvor stor reduktionen er, er reelt meget afhængig af frekvenskarakteristikken af vibrationerne
Ballastmåtter Dæmpningsmateriale under ballast	-10 dB	Hvor stor reduktionen reelt er meget afhængig af frekvenskarakteristikken af vibrationerne
Skiner med 'meget' blød befæstelse Fx elastisk afkoblede sveller vha. dæmpningsmateriale	-5 dB	Banelegemer med befæstelse, der er meget blød i vertikal retning, kan reducere vibrationerne ved frekvenser større end 40 Hz.

Tabel 9 Kildekorrektioner.

Modtagerkorrektioner		
Etage til etage – 1-5 etage over stueetage	-2 dB/etage	Korrektion for og dæmpning mellem etager
Etage til etage – 5-10 etage over stueetage	-1 dB/etage	
Forstærkning, grundet resonans af gulve, vægge og loft	+6 dB	Den faktiske forstærkning er meget afhængig af den faktiske konstruktion. Forstærkningen er lavere tæt på samlinger ved væg/gulv og væg/loft

Tabel 10 Modtagerkorrektioner.

Omregning til A-vægtet strukturlyd ved modtageren		
Lavfrekvent (<30 Hz)	-50 dB	Undergrundsbaner omgivet af sammenhængende sandjord Vibrationsisolerende sporstøttesystemer Banelegemer på terræn
Frekvensområde (30 – 60 Hz)	-35 dB	Generel for undergrundsbaner Banelegemer på terræn, hvis jorden er stiv eller meget lerholdig.
Højfrekvent (> 60 Hz)	-20 dB	Undergrundsbaner i klipper Undergrundsbaner i meget stiv eller meget lerholdig jord.

Tabel 11 Omregning af vibrationsniveauer ved modtageren til strukturlyd (A-vægtet støjniveau) i dB(A) re 20 µPa. Bemærk, at værdierne er baseret på vibrationsniveauer, dB re 1µin/s. Er vibrationsniveauet beregnet i dB re 1nm/s, skal der yderligere korrigeres med -28,1 dB for at omregne. Korrektionen vælges med udgangspunkt i teksten. Bemærk yderligere, at resultatet er for totalværdier i hele frekvensområdet og ikke for $L_{pA,LF}$.

Beregningseksempel

En letbane kører med 40 mph (64 km/t, 18 m/s) på svejsede skinner på terræn i en afstand af 125 feet (38 m) fra et hus med træfundament med en lejlighed på 1 sal. Der antages effektiv transmission af vibrationerne gennem lerholdig jord. Der er 260 togpassager pr. dag. Hvis togpassagerne antages jævnt fordelt over dagen, svarer det til ca. 2 passager pr. 10 min. Togsættet er ca. 40 m langt.

Bemærk, at beregningen foretages med amerikanske enheder dvs. dB re 1µin/s.

1. Overfladevibrationer jf. Tabel 6:
Hurtige transit- eller letbanekøretøjer (50 mph), afstand 125 feet
 $L_v = 65 \text{ dB, dB re } 1\mu\text{in/s}$
2. Hastighedsjustering til 40 mph jf. Tabel 7:
 $L_v = 65 \text{ dB} - 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{40 \text{ mph}}{50 \text{ mph}} \right) = 63,1 \text{ dB, dB re } 1\mu\text{in/s}$

3. Transmissionskorrektioner jf. Tabel 8:
 Effektiv transmission: +10 dB
 Kobling til bygningsfundament: -5 dB
 $L_v = 63,1 \text{ dB} + 10 \text{ dB} - 5 \text{ dB} = 68,1 \text{ dB, dB re } 1\mu\text{in/s}$

4. Modtagerkorrektioner jf. Tabel 10:
 Gulvresonans (Fx træbjælke gulv): +6 dB
 Første sal: -2 dB
 $L_v = 68,1 \text{ dB} + 6 \text{ dB} - 2 \text{ dB} = 72,1 \text{ dB, dB re } 1\mu\text{in/s}$

Dvs. der beregnes et hastighedsniveau på gulvet i lejligheden på $L_v = 72,1 \text{ dB, dB re } 1\mu\text{in/s}$, hvilket tilsvare 100,2 dB re 1 nm/s i internationale enheder.

På basis af vurderingen, vibrationsgrænserne i USA og antallet af passager anbefaler FTA i eksemplet at gennemføre en detaljeret undersøgelse.

Vurderingen kan sættes i dansk sammenhæng ved at vurdere den potentielle støj ved hjælp af FTA-metoden.

5. A-vægtet støj jf. Tabel 11:
 Banelegemer på jorden, hvis jorden er stiv eller meget lerholdig: -35 dB (Frekvensområde 30-60 Hz)
 $L_{pA, \max} = 72,1 \text{ dB} - 35,0 \text{ dB}$
 $L_{pA, \max} = 37,1 \text{ dB(A)}$
 Under antagelse af et konstant maksimalstøjniveau under passagen, intet støjbidrag uden for passagen og 2 passager pr. 10 min. af en varighed af ca. 2 sekunder:

$$L_{eq,10\min} = 10 * \log_{10} \left(\frac{2 * 2s}{600s} 10^{\frac{37.1 \text{ dB(A)}}{10}} \right) = 15,4 \text{ dB(A)}$$

Baseret på ovenstående beregning er de danske lavfrekvente støjkrav for beboelsesrum på 25 dB(A) i dagtimerne og 20 dB(A) i nattetimerne, jf. Tabel 1 og afsnit 1.2, umiddelbart ikke overskredet, men med en ubestemthed på ±5-6 dB kan det ikke med sikkerhed afgøres, om grænseværdien om natten er overholdt.

3.4 Vibrationer og strukturlyd fra andre kilder

I FTA-rapporten, [35], er der anført gennemsnitlige og forventelige jordbårne vibrationer i 'peak-particle-velocity'-niveauer (svingningshastigheder) for forskelligt maskineri i en afstand af 25 feet gældende for forskellige jordtyper. En afstand på 25 feet svarer i SI-enheder til ca. 7.6 m. Den resulterende partikelhastighed til et givent tidspunkt kan findes som vektorsummen af målte hastighedsniveauer i tre på hinanden ortogonale retninger (transvers, longitudinal, vertikal):

$$v_R(t) = \sqrt{v_T(t)^2 + v_L(t)^2 + v_V(t)^2} \quad (8)$$

Den maksimalt resulterende partikelhastighed v_R til et givent tidspunkt kaldes 'peak particle velocity', PPV. Det tilsvarende rms-niveau kan iht. FTA estimeres med en topfaktor "crest factor" på 4. I [35] er listet en række PPV samt rms-niveauer i dB med reference til amerikanske enheder og internationale enheder for forskelligt maskineri.

Tabellen er frit oversat fra [35] og omregnet til internationale enheder.

		25 ft / 7.6 m		
		PPV in/s	dB* re. μ inch/s	dB* re. nm/s
Pælehammer (Slag)	Øvre	1.518	112	140
	Gennemsnitlig	0.644	104	132
Pælehammer (Sonisk)	Øvre	0.734	105	133
	Gennemsnitlig	0.17	93	121
Drop af Grab (Installation slidsevæg)		0.202	94	122
Rendeskærer (Installation slidsevæg)	Jord	0.008	66	94
	Klippe	0.017	75	101
Tromle		0.21	94	123
Hydraulisk hammer på gravemaskine		0.089	87	115
Stor Bulldozer		0.089	87	115
"Caisson" boring		0.089	87	115
Læssede lastbiler		0.076	86	114
Nedbrydningshammer		0.035	79	107
Lille Bulldozer		0.003	58	86

Tabel 12 Sandsynlige vibrationsniveauer for forskellige maskiner til anlægsaktiviteter i en afstand af 25 ft svarende til 7,6 m. Vibrationsniveauerne er givet i PPV, inch/s, som rms-værdi i dB re 1 μ inch/s og som rms-værdi i dB re 1nm/s.

Iht. FTA kan vibrationsniveauet i en given afstand beregnes ved nedenstående:

$$L_{v,distance} = L_{vref} - 30 \log \left(\frac{D}{25 \text{ ft}} \right)$$

L_{vref} er vibrationsniveauet fra maskineriet i referenceafstanden 25 feet. D er afstanden mellem maskineri og modtagerpunktet i feet. $L_{v,distance}$ er det beregnede vibrationsniveau i den givne afstand. Der kan beregnes med internationale enheder ved en lettere omskrivning af udtrykket:

$$L_{v,distance} = L_{vref} - 30 \log \left(\frac{D}{7.6m} \right) \quad (9)$$

Her indsættes dB re nm/s vibrationsniveauerne og D afstand i meter.

Hvorvidt vibrationsvurderingen fra maskineriet kan sættes i sammenhæng med den i afsnit 3.3 beskrevne sammenhæng mellem vibrationer fra forskellige køretøjer og støj i en bolig eller den i afsnit 3.6 beskrevne sammenhæng mellem niveauer af vibrationer på en flade og resulterende lydtrykniveau i et rum vides ikke, men det kunne være relevant at undersøge. Hastighedsniveauerne kan ikke umiddelbart omsættes til accelerationsniveauer til vurderinger ift. til danske vibrationsgrænser uden kendskab til frekvensindhold.

3.5 L.G. Kurzweil

I en ældre artikel fra 1979 "Ground-borne noise and vibration from underground rail systems", [36], gives der et bud på simpel sammenhæng mellem det A-vægtede lydtryk i et kælderrum placeret i en afstand af 1-20 m fra en metrovæg. Sammenhængen er givet som:

$$L_A = 59 - 20 \log_{10} \left(\frac{r}{r_0} \right) \pm (10 \text{ dB}) \quad (10)$$

Hvor L_A er det A-vægtede lydtrykniveau dB(A) re $20\mu\text{Pa}$, r er afstanden mellem tunnelvæg og bygningsvæg. r_0 er referenceafstanden på 1 m. Umiddelbart skulle udtrykket omfatte en række af forskellige metrotyper, hastigheder, sportyper, jordtyper etc.

Bemærk, at udtrykket ikke indeholder korrektioner for jordforhold, hastighed af tog, vibrationsdæmpende tiltag, bygningsforhold etc.

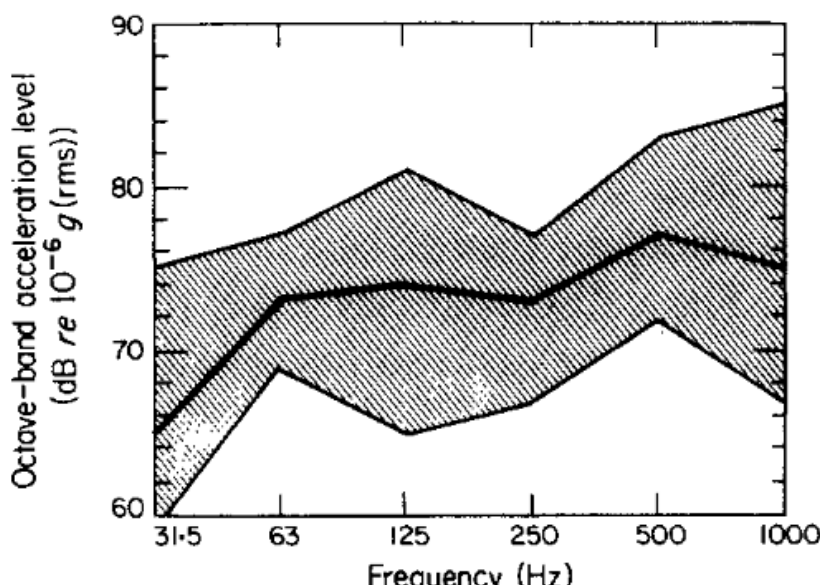
I artiklen er der videre beskrevet en mere dybdegående metode til vurdering af strukturlyd fra tunneler. Det resulterende vibrationsniveau angives at kunne findes ved:

$$L_a(\text{room}) = L_a(\text{tunnel wall}) - C_g - C_{gb} - C_b \quad (11)$$

Hvor $L_a(\text{room})$ er de beregnede gulvvibrationer i acceleration i dB re μg ; $L_a(\text{tunnel wall})$ er vibrationsniveauet af tunnelvæggen i acceleration; C_g er transmissionstabet gennem jorden; C_{gb} er transmissionstabet mellem jord og bygningsfundament, og C_b er transmissionstabet igennem bygningen. I princippet den samme opbygning som givet i udtryk (3). Beregningerne foretages i 1/1-oktavbånd.

Bemærk, at accelerationsreferencen for niveauerne er dB re μg . For at konvertere til internationale enheder dvs. dB re $\mu\text{m/s}^2$ skal der adderes 20 dB.

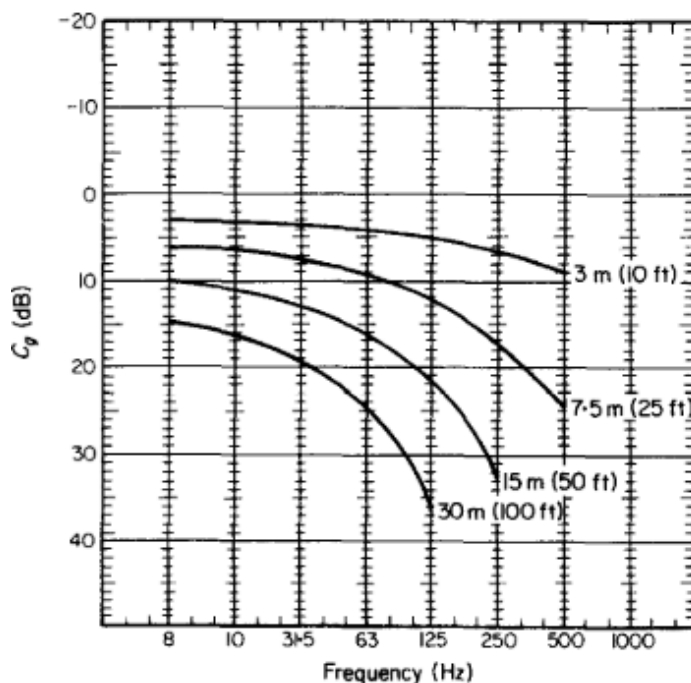
I nedenstående figur vises accelerationsniveauer i 1/1-oktavspektra for en række forskellige tunneler i jord – både ballastede og almindeligt monterede banelegemer for metrotog med en hastighed på ca. 60 km/t. Vibrationsniveauer for tunneler i klipper vil typisk være 6 dB lavere end vist i figuren.



Figur 6 Accelerationsniveauer på tunnelvæg i 1/1-oktavspektra, dB re μg , for en række forskellige tunneler i jord – både ballastede og med almindeligt monterede spor for metrotog med en hastighed på ca. 60 km/t.

Iht. [36] er der en række faktorer, som påvirker tunnelvæggens vibrationsniveau. Fx vil en hastighedsfordobling i hastighedsområdet 24-113 km/t resultere i en øgning af vibrationsniveauet på 4-6 dB på tunnelvæggene. En fordobling af aksellast vil resultere i 2-4 dB forøgelse af vibrationsniveauet på tunnelvæggene. Andre betydende faktorer er hjulophæng, tilstand af hjul og banelegeme, samt hvordan banelegemet er monteret.

Det gennemsnitlige transmissionstab i 'almindelig' jord som funktion af forskellige afstande og 1/1-oktavnåbånd er givet i Figur 7.



Figur 7 Transmissionstab i 'almindelig' jord som funktion af forskellige afstande og 1/1-oktavnåbånd.

Transmissionstabet mellem jord og bygningsfundament C_{gb} er for 'lette' bygninger 0 dB og for 'tunge' etagebyggerier 15 ± 5 dB.

Transmissionstabet for 'tunge' etagebyggerier er mellem 1 dB og 4 dB pr. etage. For 'lette' bygninger er der ikke en forøgelse af transmissionstabet som funktion af højden. I nogle tilfælde er en forøgelse af vibrationsniveauet fundet på øvre etager grundet resonanser.

Det resulterende strukturlydsniveau kan iht. [36] findes ved:

$$L_p(\text{room}) = L_a(\text{room}) - 20 \log_{10}(f) + 37 \quad (12)$$

hvor L_p , dB re μPa er det beregnede lydtrykkniveau i rummet, L_a det beregnede accelerationsniveau, dB re μg i 1/1-oktaver og f er oktavnåbåndets centerfrekvens. Kendes accelerationsniveauet i dB re $\mu\text{m/s}^2$, skal der adderes 20 dB.

3.6 Østrigsk Standard ONR 199005

I østrigsk Standard ONR 199005, [37], er givet en simplificeret sammenhæng mellem hastighedsniveau på flader i et rum og middellydtrykniveau i rummet beskrevet som:

$$L_p = L_{v, \text{østrig}} + 10 \cdot \log_{10}(S) + 10 \cdot \log_{10}(V) + 10 \cdot \log_{10}(T) + 14 \quad (13)$$

hvor L_p er middellydtrykniveauet i modtagerrummet i dB re 20μPa; $L_{v, \text{østrig}}$ er middelhastigheden på pladen i dB re 5·10⁻⁸ m/s; S er pladens areal, m² og T er efterklangstiden, s.

For små kvadratiske rum på 50-70 m² med en typisk efterklangstid på 0,5 s kan (4) iht. [37] simplificeres til:

$$L_p = L_{v, \text{østrig}} + 6 \quad (14)$$

hvor L_p er middellydtrykniveauet i modtagerrummet i dB re 20μPa, og $L_{v, \text{østrig}}$ er middelhastigheden på pladen i dB re 5·10⁻⁸ m/s.

Iht. SBI-anvisning 166, [38], kan lydtrykniveauet forårsaget af en vibrerende plade estimeres ved formel 15:

$$L_p = L_v + 10 \cdot \log_{10}(\sigma) + 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{S}{A}\right) - 28 \quad (15)$$

hvor L_p er middellydtrykniveauet i modtagerrummet i dB re 20μPa; L_v er middelhastigheden på pladen i dB re 1m/s; S er pladens areal; A er modtagerrummets ækvivalente lydabsorptionsareal i m², og σ er strålingsfaktoren.

Sammenhængen mellem det ækvivalente lydabsorptionsareal og efterklangstid kan findes ved hjælp af Sabine formel, [37]:

$$T = 0,16 \cdot \frac{V}{A} \quad (16)$$

Dvs. (13) kan omskrives til

$$L_p = L_v + 10 \cdot \log_{10}(\sigma) + 10 \cdot \log_{10}(S) + 10 \cdot \log_{10}(V) + 10 \cdot \log_{10}(T) - 20 \quad (17)$$

En strålingsfaktor på $\sigma = 1$ er en rimelig antagelse for fx beton. Hvis strålingsfaktoren antages at være $\sigma = 1$, og der tages højde for de forskellige antagne dB-referencer til beregning af hastighedsniveauer i dB, er formel 13 og formel 17 ens.

For små kvadratiske rum på 50-70 m² med en typisk efterklangstid på 0,5 s kan (17) iht. simplificeres til:

$$L_p = L_v - 28 \quad (18)$$

med L_v -referencen dB re 1m/s og L_p i dB re 20μPa. Formel (18) er tilsvarende (14), hvis der tages hensyn til de forskellige hastighedsniveaureferencer.

For rum med flere vibrerende flader, fx gulv, vinduer, loft og vægge, summeres støjbidragene fra de enkelte flader til et totalt lydtrykniveau.

Af formel (17) ses det også, at lydtrykniveauet i et rum i praksis kan reduceres ved:

- at reducere vibrationsniveauet på fladen,
- reduktion af efterklangstiden.

Vibrationsniveauet på et bygningselement kan ændres ved at reducere vibrationer ved kilden, fx ved at opstille kilden elastisk. Vibrationsniveauet af et gulv kan reduceres ved at gøre det flydende, dvs. gulvet lægges på mineraluld, vibrationsisolatorer eller lignende. Tabsfaktoren og dermed vibrationsresponsen af et bygningselement kan forøges ved fx at installere et dæmpende mellemlag. Efterklangstiden kan reduceres ved fx at øge mængden af lydabsorberende materiale i rummet.

Lavfrekvent støj i rum kan oftest ikke betragtes som værende diffust, som det forudsættes i (17). Der kan være store variationer i det lavfrekvente lydtrykniveau i et rum på grund af akustiske egenfrekvenser. Schroeder-frekvensen definerer denne frekvens for, hvorover der er tilpas modal-overlap til at kunne retfærdiggøre en statistisk tilgang til beregning af støj som i (17).

Schroeder-frekvensen er typisk skrevet som, [39]:

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T_{rev}}{V}} \quad (19)$$

hvor f_s er Schroeder-frekvensen, [Hz], T_{rev} efterklangstiden i sekunder [s], og V er volumen af rummet i $[m^3]$. Med rumantagelser, som er sat som forudsætning for udledning af (18), fås en Schroeder-frekvens på $f_s = 170-200$ Hz. I Orientering 9/1997, [3], er strukturelydsbidraget fra eksterne kilder ofte betydende i frekvensområdet fra 20-80 Hz. Orienterende målinger af støjen i to lejligheder foretaget af FORCE Technology i 2019 i København, har vist, at hovedparten af støjen fra passager med et metrotog i undergrunden ligger i det lavfrekvente område 10-160 Hz, delvist dog over 160 Hz, men hovedsageligt under 315 Hz. Denne observation indikerer usikkerhed ved brug af (18) til beregning af strukturelyd med en statistisk tilgang.

Det skal tilføjes, at ved frekvenser under den laveste egenfrekvens vil lydfeltet i teorien optræde som et trykkammer med næsten ens lydtrykniveau i hele rummet.

3.7 Brekke & Strand

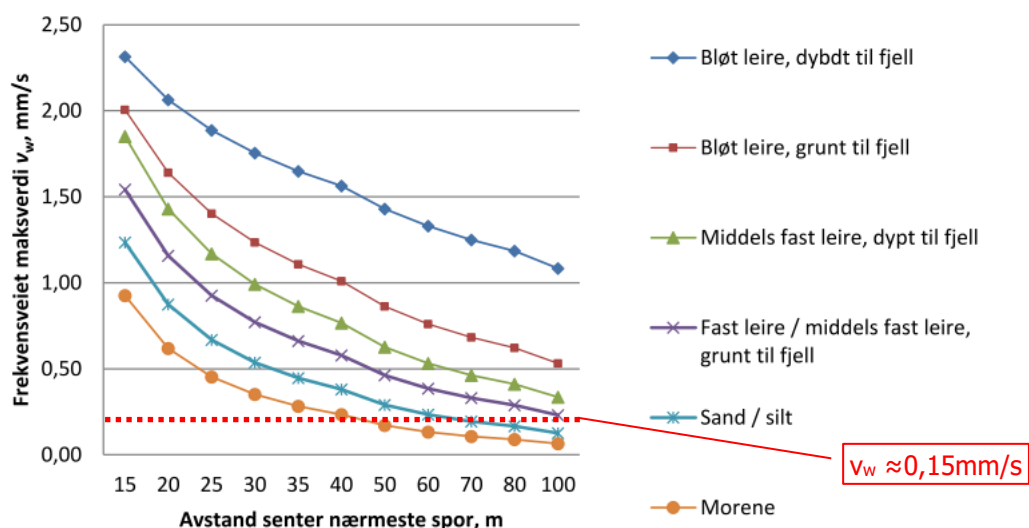
I en præsentation "Akustisk rådgivers ansvar og opgaver vedrørende vibrationer" fra 2019 af Brekke & Strand, [40], gennemgås grænseværdier i Norge for vibrationer i bygninger, anbefalede resonansfrekvenser i bygningsbetondæk og gulvkonstruktioner samt beregninger til vurdering af vibration og strukturelyd.

Brekke & Strand tager i beregninger af strukturelyd også udgangspunkt i et udtryk svarende til det "klassiske udtryk" (3) i afsnit 3. Der tages udgangspunkt i en kildestyrke/vibrationsniveau fra et tog, hvorefter der korrigeres for tunneltype, hastighed af toget, transmissionstab i jorden, afstand mellem kilde og modtager, husstype, antal etager etc. Figur 8 viser de beregnede maksimale, vægtede vibrationsniveauer fra et tog ved 200 km/t i forskellige afstande fra sporet til boliger bygget på forskellige jordtyper.

De beregnede vægtede totale hastighedsvibrationsniveauer kan omregnes til vægtede accelerationsniveauer i dB, jf. [41], til sammenligning med de vejledende grænser i Orientering 9/1997:

$$L_{aw} = 20 \log_{10} \left(\frac{v_w}{0.028 \cdot 1 \mu m/s^2} \right), [dB] \quad (20)$$

Vibrasjoner i boliger fra flytog 200 km/t



Figur 8 Beregnede maksimale vægtede vibrationsniveauer fra et tog med 200 km/t i boliger placeret på forskjellige jordtyper og i forskjellige afstande. Efter [40].

For boliger er den danske grænseværdi 75 dB (KB-vægtet accelerationsniveau), [4], svarende til et totalt, vægtet hastighedsvibrationsniveau på 0,15 mm/s (ca. 104 dB re 1nm/s) jf. formel (20). Tages der ikke hensyn til vægtningen af accelerationen, dvs. det antages uvægtet, kan et lineært, uvægtet lydtrykniveau på 76 dB med afsæt i udtryk (18) jf. afsnit 3.6 findes. Med samme udgangspunkt kan der med FTA-metoden beskrevet i afsnit 3.2 findes et A-vægtet lydtrykniveau på 25-40 dB(A) afhængigt af jordbundstypen. Da det KB-vægtede vibrationsniveau er lavere end det uvægtede, må ovenstående vurderede lydtrykniveauer antages at være konservative. I Figur 8 er grænsen på 0,15 mm/s indikeret med en linje, hvilket muliggør vurderingen af den nødvendige afstand mellem jernbane og bolig for at overholde grænseværdien.

Et beregningseksempel fra [40] af strukturlyden i en bolig forårsaget af et tog er vist i Figur 9. Det ses, at tilgangen er relativ simpel og inkluderer en forventet kildestyrke baseret på togtype, hastighed, afstand til bolig, jordlag, etagedæmpning etc. Det er i princippet den samme tilgang som beskrevet i formeludtrykket (3).

Beregningsmetode for strukturstøj fra tog i fjelltunnel

BEREGNING AV STRUKTURLYDNIVÅ FRA FJELLTUNNEL

T-bane

Bane: Lørenbanen

Adresse: -

Inngangsverdier

Avstand spor - fundament

13 meter

Type fjell

Leirskifer

Type tunnel

Ny, eksponert fjell

Skinne

S49

Mellomleggs plate

50 kN/mm

Dimensjonerende togtype

MX3000

Hastighet

70 km/t

Tykkelse løsmasser under fundament

0 m

Type bygning/etasjeskiller:

Boligblokk

Antall etasjer fra bolig til kjeller

1

Beregnete verdier

Utgangsverdi

47 dBA

Korreksjon for fjelltype

0

Korreksjon for type tunnel

-2

Korreksjon for spor

-2

Korreksjon for togtype

2

Korreksjon for hastighet

0

Korreksjon for sporveksler

0

Korreksjon for løsmasser

0

Korreksjon for hustype

0

Korreksjon for antall etasjer

-3

Beregnet strukturstøynivå:

42

Sikkerhetsfaktor

3

Dimensjonerende strukturstøynivå

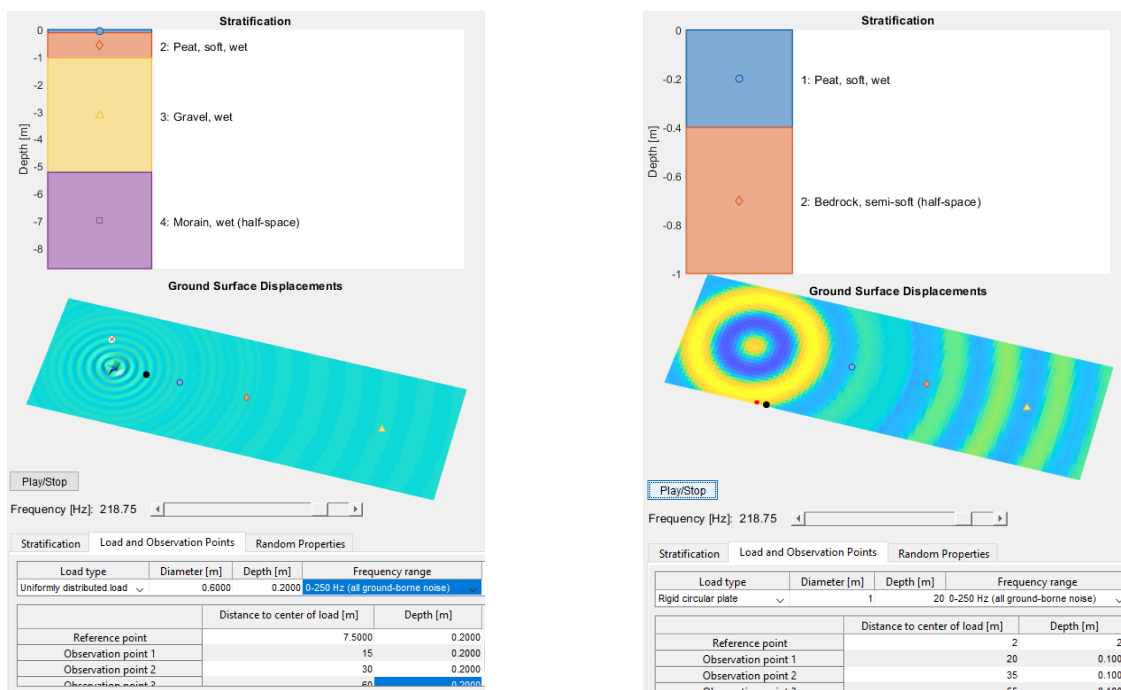
45 dBA

Figur 9 Eksempelberegning af strukturlyd i en bolig fra en tog tunnel i en klippe. Efter [40].

3.8 GroundVib

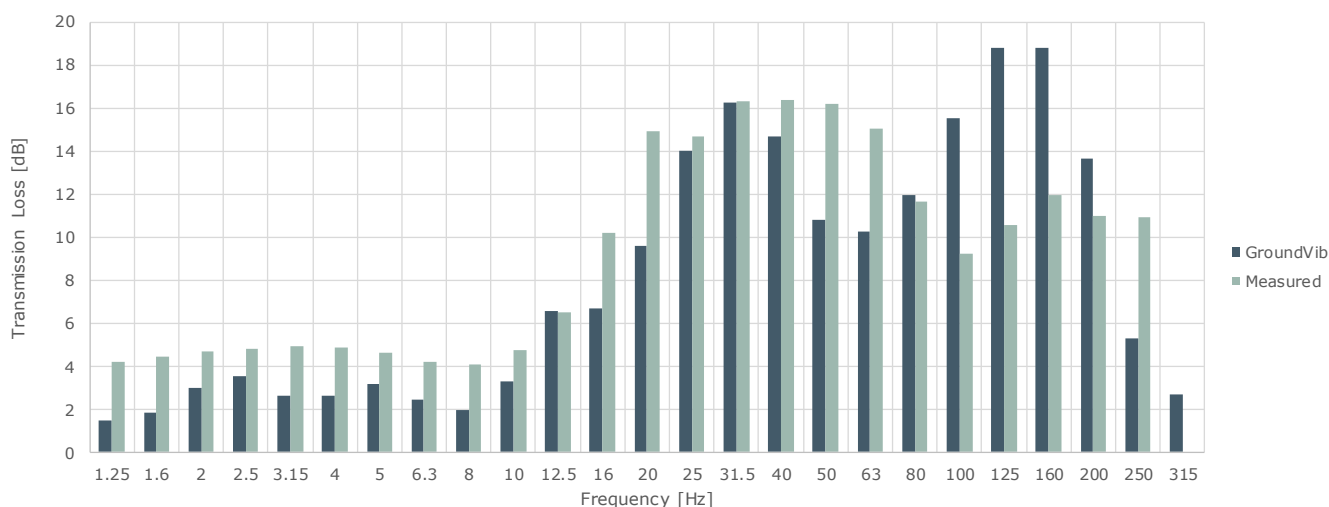
GroundVib er et program udviklet af Aarhus Universitet som del af et EU-finansieret projekt: Interreg V project "Urban Tranquility", [31]. Formålet med programmet var at etablere redskaber til at foretage relativt hurtige vurderinger af transmissionstabet ved jordbårne vibrationer i lagdelt jord mellem en vibrationskilde og en position i en given afstand fra kilden. Programmet er baseret på en stokastisk model af jordens egenskaber og anvender Monte Carlo-simuleringer for at bestemme middelværdier og stokastiske værdier for transmissionstabet.

Kort fortalt foretages Monte Carlo-simuleringer ved hjælp af computerberegninger med en række af algoritmer, en serie af tilfældige tal og forskellige parametre for at finde sandsynligheden for forskellige udfald. Der er mulighed for at placere en vibrationskilde, referencepunkter og observationspunkter i forskellige afstande og dybder. Jordtyper og lagtykkelser implementeres som en del af vurderingen. Transmissionstabet kan enten beregnes som smalbandsfrekvensspektre eller 1/3-oktavbånd. Programmet er frit tilgængeligt og kan downloades på <https://soilmodels.com/groundvib/>. I [31] er der lavet beregninger på to eksempler, hvor der også findes målinger. Det ene beregningseksempel er fra Kværkeby i Danmark med et banelegeme på terræn til en etagebolig. Det andet eksempel er fra Oslo-området med en jernbanetunnel til en etagebolig. Beregningsopsætning i GroundVib for de to eksempler er vist i Figur 10, gengivet fra [31].

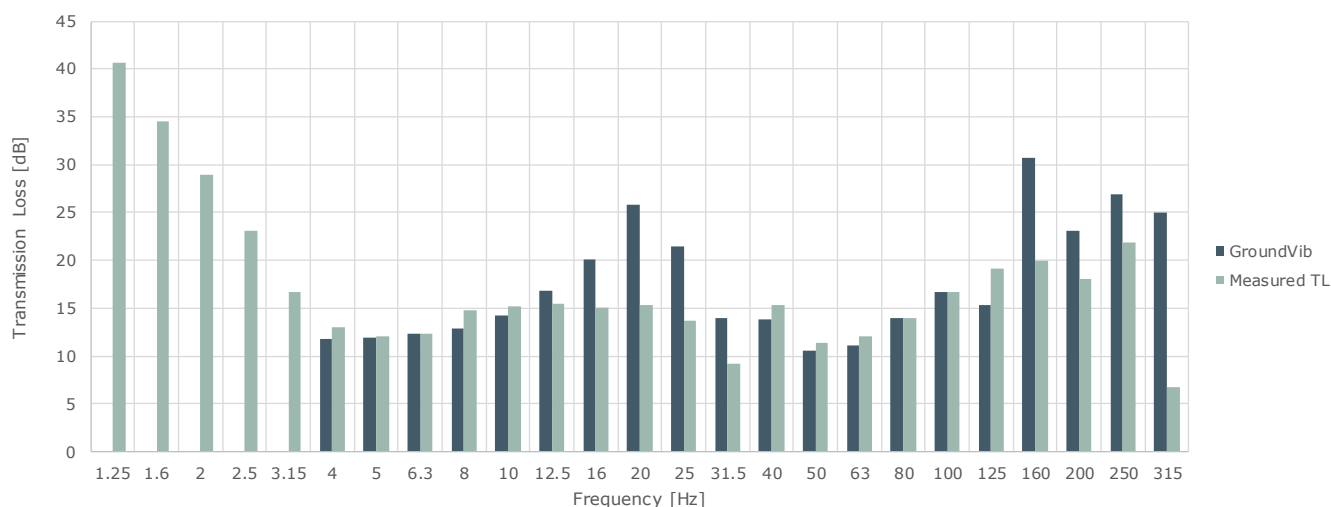


Figur 10 Eksempel på opsætning af beregninger i GroundVib. Det ene eksempel er fra Kværkeby, Danmark, med et banelegeme på terræn til en etagebolig. Det andet eksempel er fra Oslo-området med en togtunnel til en etagebolig. Efter [31].

Jf. [31] er der observeret en fin korrelation mellem målinger og model. Beregnede og målte transmissionstab i 1/3-oktavbånd er gengivet i Figur 11 og Figur 12. I eksemplet Kværkeby (Danmark) er der observeret god overensstemmelse i frekvensområdet 10-80 Hz. For tunnelen viser den teoretiske modellering af transmissionstabet generelt en fin korrelation med faktisk målinger i Oslo i frekvensområdet 4-125 Hz. Afvigelser er sandsynligvis forårsaget af overestimeret materialedæmpning, at beregningsmodellen ikke helt præcist repræsenterer fysikken til transmission og endelig overvurderet materialedissipation (varmetab) etc.



Figur 11 Målte og beregnede transmissionstab mellem 7,5 m (referencepunkt) og et punkt 15 m fra et jernbanespor i Kværkeby, Danmark. Efter [31].



Figur 12 Målte og beregnede transmissionstab mellem et referencepunkt på en tunnelvæg 20 m under jorden til et punkt i afstanden 35 m fra tunnelvæggen, Oslo, Norge. Efter [31].

3.9 Sammenfatning, delkonklusioner og forslag til yderligere arbejde

Ved litteraturstudier er fundet flere både ældre og nyere referencer, der lægger op til forholdsvis simple empiriske tilgange til at vurdere strukturlyd fra forskellige kilder – dog især fra tog. Den mest simple metode er baseret på en ren afstandsbetragtning mellem en metrotunnel til en kælderlejlighed, jf. afsnit 3.5, men de fleste er baseret på en metodik, hvor der indgår betragtninger om kildestyrke, vibrationsdæmpende tiltag, transmissionstab gennem jorden, transmissionstab fra jord til fundament, transmissionstab gennem bygningen for en endelig beregning af et strukturtransmitteret støjniveau indendørs.

Der kan i metoderne se ud til at være en smule diskrepans i forventningen om transmissionstab i koblingen mellem jord og fundament. Fx nævnes der i Referencelaboratoriets Orientering nr. 10/1989, [4], 0-7 dB højere vibrationer på gulve af beton og tilsvarende stive konstruktioner sammenlignet med vibrationsniveauet i jorden udenfor. I FTA's screeningsmetode, [35], forventes en reduktion på 0 til 13 dB afhængigt af bygningstypen.

Noget tilsvarende gør sig gældende for hastighedskorrektionen, hvor FTA forventer 6 dB forøgelse af vibrationsniveauet ved en fordobling af et køretøjs hastighed. Referencelaboratoriet har ikke fundet nogen sammenhæng mellem toghastighed i området 50-120 km/t og vibrationsniveauet.

FTA's vurderingsmetode beskrevet i afsnit 3.2 virker relativt gennemarbejdet og med en simpel tilgang, hvor der på et spinkelt grundlag kan foretages en vurdering af risikoen for strukturlydsproblemer fra forskellige typer køretøjer. I afsnit 4.5 er metoden forsøgt sat i sammenhæng med en enkelt case, hvor FORCE Technology har foretaget støjmålinger i en lejlighed fra en metro. Resultatet af denne ene case ser umiddelbart ud til at stemme overens med måledata. Det anbefales at foretage flere vurderinger ved at sammenligne flere måledata med modelberegninger for at se, om der er en rimelig sammenhæng, som kan bruges ved screenings. Herefter kunne en tilsvarende metode i dansk kontekst overvejes indarbejdet i Orientering 9/1997. Hvis der ved første screening findes risiko for strukturlydsproblemer, kunne en mere dybdegående undersøgelse bestå i en databehandling i 1/3-oktavbånd.

I orienteringen vil der være behov for:

1. Et katalog over forventede kildestyrke for forskellige kilder, der erfaringsmæssigt giver anledning til betydende strukturlyd.
2. Information om forskellige typer jordlag i Danmark til brug for vurdering af transmissionstab i jordlagene.
3. Et katalog over typiske transmissionstab mellem terræn og bygningsfundament for forskellige bygningstyper.
4. Data for typiske transmissionstab pr. etage.
5. Et katalog over den typiske udstrålingskarakteristik og transmissionstab af forskellige bygningselementer: vinduer, tunge/lette vægge, gulve etc.

Transmissionstab i jordlagene kunne evt. belyses nøjere ved måling som allerede foreslået i Orientering 9/1997 eller beregnes ved hjælp af GroundVib. For at kunne indgå i en opdatering af Orientering 9/1997 bør metoderne dog yderligere valideres og vurderes i en dansk sammenhæng ved flere studier og/eller målinger.

3.10 Dæmpning af vibrationer og strukturlyd

For at reducere strukturlyd er det nødvendigt også at se på muligheder for at dæmpe vibrationers udbredelse. Helt generelt kan støjen i en modtagerposition dæmpes ved at reducere vibrationer ved kilden, i transmissionsvejen mellem kilde og modtager eller ved vibrationsdæmpende tiltag ved modtageren, jf. Figur 4 og formeludtryk (17).

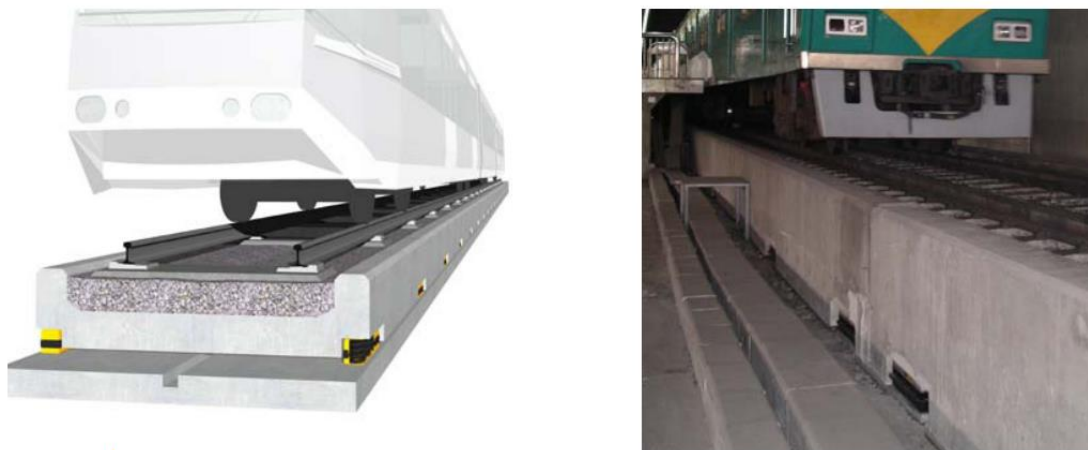
3.11 Dæmpning ved kilden

I en rapport fra "International Union of Railways" (UIC), [42], er der givet en helt række eksempler på, hvordan jordbårne vibrationer og støj fra jernbaner kan reduceres. Ifølge rapporten er hovedårsagen til jordbåren støj fra jernbaner kontakten mellem toghjul og skinner. På en blød jordtype kan massen af togvognen på bogien dominere støjen i det lave frekvensområde. På en stiv jordtype kan slidte toghjul være kilde til højfrekvent støj. Derfor kan støjen i nogle tilfælde reduceres ved at slibe toghjulene eller ved at forbedre hjulophænget. Til vurdering af støjen fra køretøjer gives i FTA's screeningsmetode jf. afsnit 3.3 et tillæg for det forventede støjniveau på 10 dB for både slidte hjul og/eller slidte jernbaneskinner og 8 dB for et stift hjulophæng. I UIC-rapporten, [42], gennemgås en række tiltag, hvor skinnerne monteres elastisk, dvs. vibrationsisoleres. Jernbaneskinne monteres enten direkte i vibrationsisolatorer/gummi eller ved at introducere en masse/ballast, hvor skinnerne er monteret på. Massen monteres elastisk på vibrationsisolatorer eller bløde ballastmåtter.

Alt efter løsning angives i rapporten dæmpning af strukturlyden på op til 20 dB. I FTA's screeningsmetode, jf. afsnit 3.3 Tabel 9, angives den forventede dæmpning ved en screening eller vurdering for flydende spor til 15 dB, ballastmåtte 10 dB og skinner i blød befæstelse 5 dB.

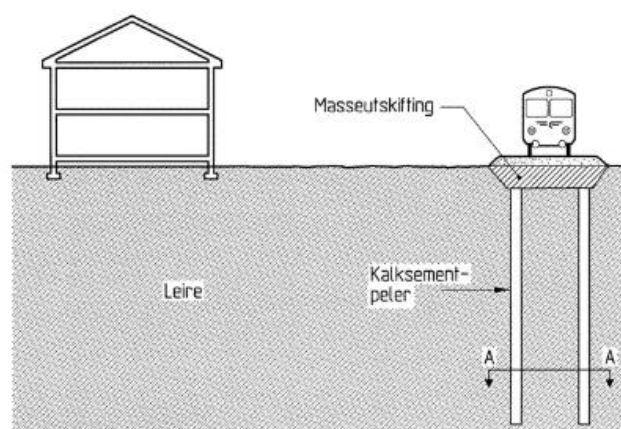


Figur 13 Eksempel på et elastisk skinnemonteringssystem, [42].



Figur 14 Eksempel på et skinneresystem med masse-stålfjeder, [42].

I præsentationen, [40], foreslås bedre fundering af fx banelegemer for at reducere jordbårne vibrationer.



Figur 15 Eksempel på fundering af jernbaneskiner, [40].

3.12 Dæmpning i transmissionsvejen

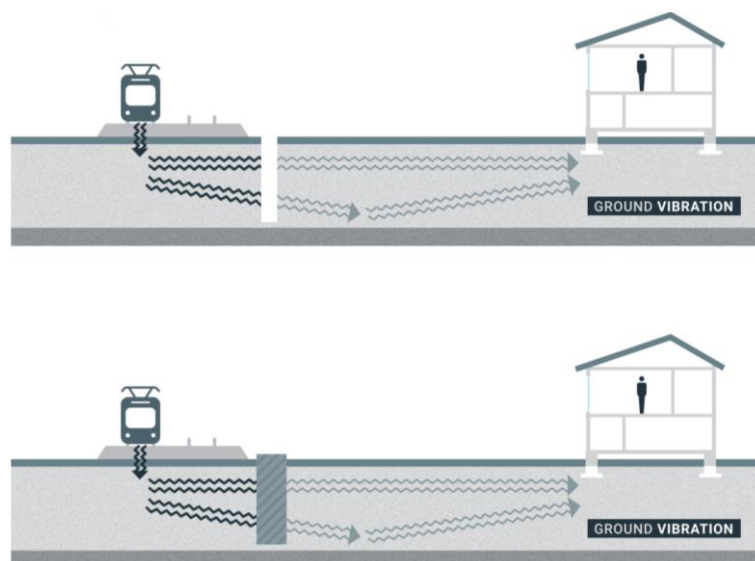
I en artikel af L. Andersen og S. R. K. Nielsen: "Reduction of ground vibration by means of barriers or soil improvement along a railway track, [43], gennemgås en række fordele og ulemper ved metoder til at reducere støj og vibrationer i transmissionsvejen mellem kilde og modtager. I Tabel 13 er tabellen oversat og gengivet på dansk.

Iht. UIC-rapporten, [42], kan render og barrierer ikke opfattes som gennemprøvet og bevist vibrationsdæmpende. Men rapporten nævner, at andre har fundet reduktioner på 0-2 dB for fyldte render og 2-6 dB for ikke fyldte render. Vandrender med en dybde på 2-5 m langs et jernbanespor har vist en vibrationsdæmpning på op til 3 dB.

Reduktionsmetode	Fordele	Ulemper
Åben rende	Mere effektiv end jordforbedring. Dybe render giver god vibrationsreduktion selv ved lave frekvenser. Billigt tiltag	Forøgede vibrationer i renderen. Snævre render kan resultere i forøgede vibrationer udenfor renderen. Siderne i renderen skal stabiliseres.
Gummi/bentonite barrierer	God skærmning ved høje køretøjshastigheder. Genbrugsmaterialer som gamle bildæk kan bruges.	Omkostningstungt hvis der bruges nye materialer. Der kan ikke placeres strukturer ovenpå barrieren.
Betonbarrierer	Effektiv ved lave frekvenser og lave køretøjshastigheder ved vertikal last. Kan installeres under fortove/vejbælægninger.	Forstærkning af vibrationer udenfor barrieren ved lave frekvenser og horisontale laster.
Jordforbedring	Reduktion af vibrationer ved alle frekvenser, køretøjshastigheder og afstande til sporet. God løsning for områder med blød jordtype.	Generelt mindre effektiv sammenlignet med en løsning med en barriere.
Udskiftning af jord eller jordafstivning	Reducerer vibrationerne især umiddelbart under køretøjet.	

Tabel 13 Muligheder for reduktion af jordsbårne vibration i transmissionsvejen inkl. fordele og ulemper, [43].

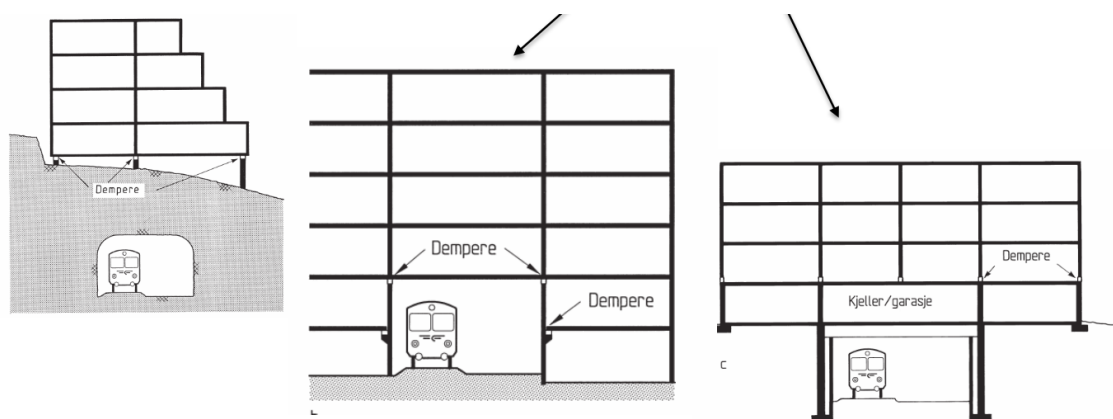
Figur 16 viser princippet for reduktion af vibrationsudbredelse ved hjælp af render og betonbarrierer, [42]:



Figur 16 Princippet for reduktion af jordbårne vibrationer ved hjælp af rende (øverst) og betonbarrierer (nederst).

3.13 Dæmpning ved modtageren

I afsnit 3.6 gives et udtryk for sammenhængen mellem vibrationer af forskellige flader og det resulterende lydtrykniveau, jf. udtryk (17). Af udtrykket ses, at lydtrykniveauet i et rum i praksis kan reduceres ved at reducere vibrationsniveauet på en flade eller reduktion af efterklangstiden. Vibrationsniveauet kan ændres ved at reducere vibrationer ved kilden, vibrationer af fladen, fx flydende gulv, elastisk nedhængte lofter, vibrationsisolerede vægge, dæmpede vinduer etc. Hvilket tiltag, der vil virke mest effektivt, bør vurderes ved beregning inden implementering. Afkobles/vibrationsisoleres hele bygningsstrukturen, kan strukturlyden også reduceres. Et eksempel på en afkoblet bygningsstruktur er vist i Brekke & Strand's præsentation, [40], som er gengivet i Figur 17.



Figur 17 Vibrationsisolering af bygningsstruktur, [40].

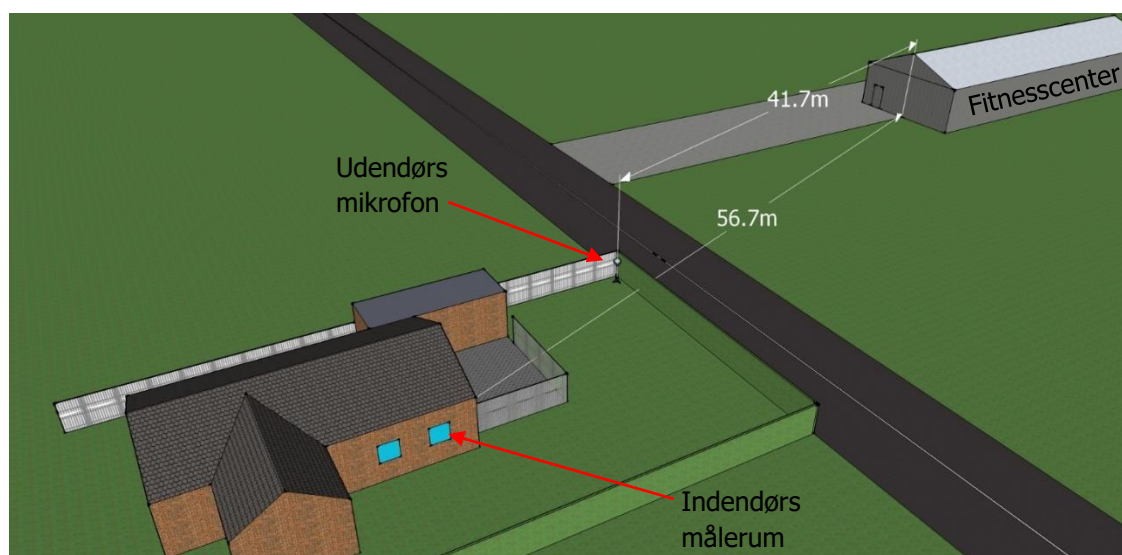
Efterklangstiden kan reduceres ved fx at øge mængden af lydabsorberende materiale eller andre typer absorberer i rummet. Da strukturlyd oftest er lavfrekvent, er det vigtigt, at de anvendte absorberer er effektive i det lavfrekvente område og fx virker som membranabsorberer, Helmholtz resonatorer etc.

4 Cases

I det følgende beskrives to cases om henholdsvis lufttransmitteret lavfrekvent støj fra et fitnesscenter (Case 1) og vibrationer og strukturlyd fra metrotog i tunnel (Case 2).

4.1 Case 1: Lufttransmitteret lavfrekvent støj

Denne case beskriver et eksempel på beregning af indendørs lavfrekvente impulser fra et fitnesscenter. Den er baseret på en konkret opgave udført af FORCE Technology og beskrives i anonymiseret form.



Figur 18 Situationsplan for Case 1 med luftlydstransmitteret støj fra fitnesscenter.

4.2 Måleobjekt

Fitnesscentret er placeret i en hal opbygget af ståltrappezpaneler, hvor indersiden er beklædt med isolering og mdf-plader. Gulvet er et betongulv belagt med 2,5 cm gummiplader (granulerede dæk). Væggene i fitnesscentret er ikke afkoblet fra betongulvet, og når der i fitnesscentret bliver kastet vægte ned på gulvet, transmitteres vibrationer i gulvet fra disse kast ud til væggene, hvorved de store stålpaneler virker som en stor, lavfrekvent højttaler. I det aktuelle scenarie er der målt vibrationer på gulvet hos en nabo og vurderet, at der ikke er strukturlyd, som kobler fra fitnesscenter til nabobygningen. Den transmitterede lavfrekvente lyd er primært lufttransmitteret.

4.3 Metode

Udendørs er der målt med 1 mikrofon i skel i 1,5 m højde, i afstanden 41,7 m fra mikrofon til nærmeste facade af fitnesscentret.

Indendørs er der målt i et rum på 3,3 x 3,3 m. Målerummet er det rum, hvor vinduet er tættest på facaden mod fitnesscentret. Målingerne indendørs er udført efter Orientering nr. 9/1997 med tilhørende korrektionsblad.

For denne case tages der udgangspunkt i 4 impulser genereret af en atlet, som inde i fitnesscentret kaster en vægtstang på 80 kg fra en position med strakte arme over hovedet.

4.4 Beregningsmetode

Beregningsmetoden er baseret på en kildestyrke beregnet på baggrund af målte $L_{Amax,F}$ i skel ved naboen og en udbredelsesmodel baseret på metoden i vindmøllebekendtgørelsen (BEK 135/2019), [13].

Kildestyrke

$L_{Amax,F}$ er maksimalniveauet af lydtrykniveauet målt med eksponentiel tidsvægtning på 125 ms (integrations-tid Fast). En god tilnærmelse til tidsvægtningen Fast opnås ved at benytte lineær midlingstid på 2 gange den eksponentielle tidskonstant for Fast, dvs. den lineære integrationstid er 250 ms, [44].

Til beregning af kildestyrken er målingerne for positionen udendørs analyseret ved hjælp af "slice analyser" i programmet NoiseLAB Batch Processor 4.1, med en slice periode på 250 ms. Ved "slice analyser" opdeler programmet lydfile i successive dele af 250 ms. Maksimalniveauet udgøres af den slice, hvor det A-vægtede totalniveau beregnet i frekvensområde 10-200 Hz er højest. 1/3-oktavspektret for denne slice er brugt som input til beregningen af kildestyrken.

Kildestyrken er beregnet med kuglemetoden med en halvkugle, jf. MST Vejledning nr. 5/1993, [14]:

$$L_W = \overline{L_p} + 10 \log S \text{ [dB re 1 pW]}$$

hvor

$$S = \{2\pi R^2 \text{ [m}^2\text{]} \text{ (halvkugle)}\}$$

$$S = 2\pi 41,68^2 = 10915,3$$

Beregningsmetode

Beregningsmetoden er baseret på den samme metode som benyttes til bestemmelse af lavfrekvent støj fra vindmøller. Det lavfrekvente støjniveau indendørs hos naboen bestemmes ved nedenstående ligning:

$$L_{Amax,250ms} = L_{WA,ref} - 10 \log(l^2 + h^2) - 11dB + \Delta L_{gLF} - \Delta L_{\sigma} - \Delta L_a$$

hvor

l = afstanden fra vindmøllens fod til beregningspunktet

h = højde af kilde over terræn

11 dB = korrektion for afstand $10 \times \log 4\pi$

ΔL_{gLF} = korrektion for terræn ved lave frekvenser

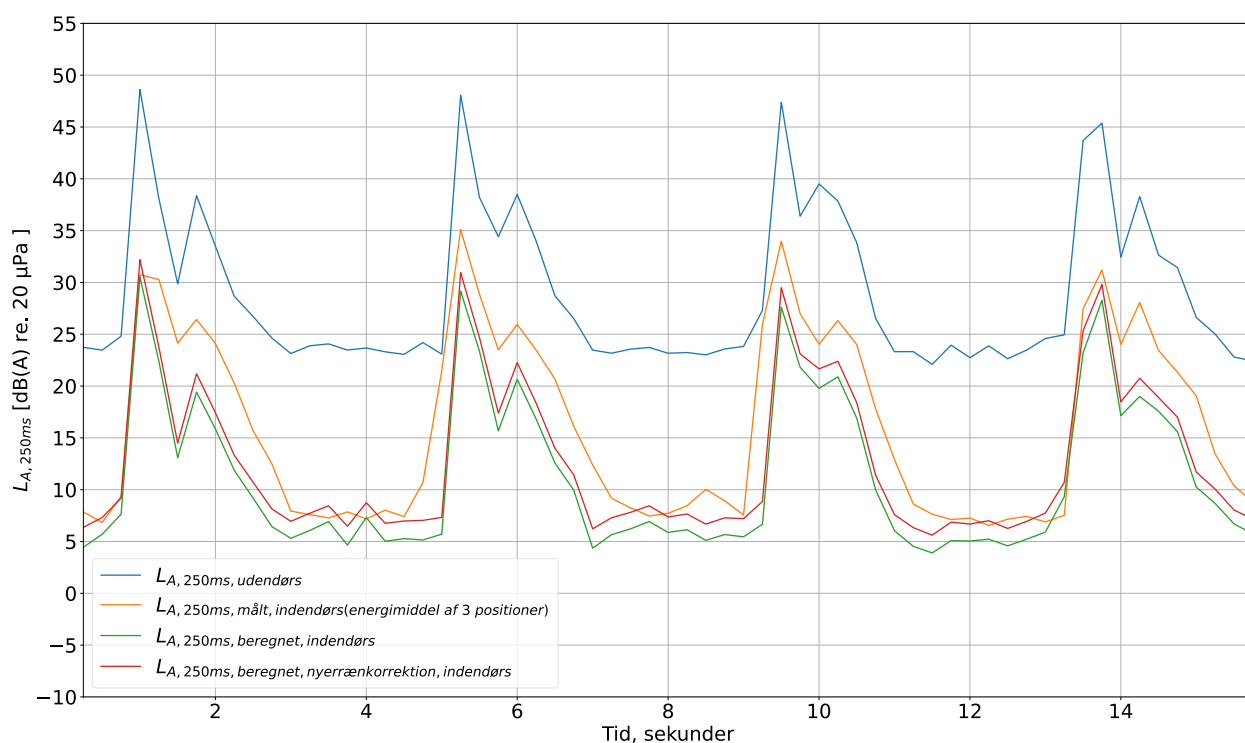
ΔL_{σ} = lydisolation ved lave frekvenser

ΔL_a = luftabsorption, $(\alpha_a \cdot \sqrt{l^2 + h^2})$

Værdier for terrænkorrektion, lydisolation og luftabsorption findes i Vindmøllebekendtgørelsen (BEK 135/2019).

Resultater

Nedenstående figur viser de målte og beregnede A-vægtede lydtrykniveauer hhv. udendørs og indendørs. Niveauerne er 250 ms slices (tilnærmet $L_{A,max,F}$) og baseret på energien i frekvensbåndet 10-200 Hz. Da de to målepositioner oprindeligt ikke er optaget på samme målesystem, er de på nedenstående grafer synkroniseret tidsmæssigt efter bedste vis.



Figur 19 Målte og beregnede A-vægtede lydtrykniveauer angivet som $L_{A,250ms}$ (tilnærmet $L_{A,max,F}$). Den blå linje viser det udendørs målte støjniveau i skel. Den orange linje viser det målte indendørs niveau som et energimiddel af 3 indendørs målepositioner. Den grønne linje viser det indendørs beregnede niveau baseret på terrænkorektioner fra (BEK 135/2019). Den røde linje viser det indendørs beregnede niveau baseret på nye terrænkorektioner angivet i Tabel 3.

Detaljerede resultater pr. 1/3-oktavniveau er vist i Bilag 2 med terrænkorektioner angivet i henholdsvis Tabel 2 og Tabel 3.

Konklusion på case

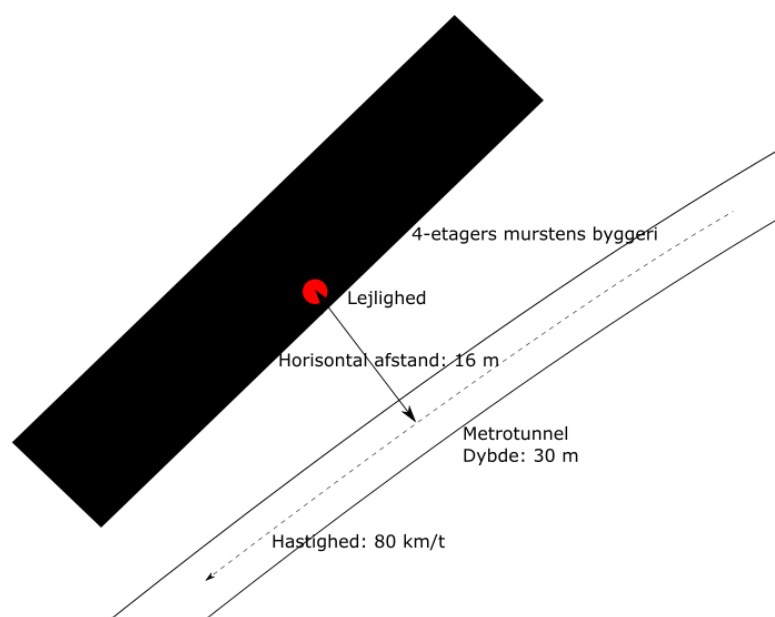
Givet, at metoden er udarbejdet til screeningsformål, er det FORCE Technology's vurdering, at en usikkerhed på $\pm 5-6$ dB vil være tilfredsstillende. Beregningerne med hårdt terræn ligger i denne case inden for 1,4-4,5 dB af de målte resultater, og forskellen i middelværdien af 4 målte og beregnede impulser er 2,1 dB.

4.5 Case 2: Vibrations- og strukturlydstransmitteret lavfrekvent støj

FORCE Technology har foretaget støjmålinger i flere lejligheder i forbindelse med undersøgelse af støjgener fra en undergrundsmetro. I det følgende er FTA's vurderingsmetode anvendt til at vurdere risiko for jordbåren støj i en af disse lejligheder, hvor tunnelrør ligger relativt tæt på under lejligheden. FTA-metoden er beskrevet i afsnit 3.3. De anvendte data er baseret på umiddelbart tilgængelige informationer om metroen, jordbundsforhold og bygningen, hvor lejligheden er placeret. Lignende data bør være tilgængelige ved igangsættelse af en screening. De beregnede værdier er sammenholdt med målte data, og casen er anonymiseret.

4.6 Måleobjekt

Metroen kører i en tunnel med en hastighed på maksimalt 80 km/t i en dybde af ca. 30 m. Den horisontale afstand mellem nærmeste tunnelrør og lejlighed er ca. 16 m. Lejligheden er placeret i stueplan, dvs. den direkte afstand mellem center af sporet til lejligheden er 34 m. Lejligheden ligger i en 4-etagers murstensbygning. Jordlagene mellem tunnel og lejlighed antages at bestå af kalk og ler, men jordforhold er ellers relativt ukendte. Med en konservativ tilgang antages det, at vibrationstransmissionen er 'effektiv'. Desuden antages det, at der ikke er installeret specielle støj- og vibrationsdæmpende tiltag i sporet, tunnelen eller udbredelsesvejen. En skitse af metrotunnelen og lejlighedsbygningens placering er vist i Figur 20.



Figur 20 Situationsplan for Case 2 om strukturlyd. Placering af metrotunnel og bygning er omtrentlig.

4.7 Beregningsresultater

Beregningerne er i nedenstående foretaget i amerikanske enheder, dvs. beregnede vibrationsniveauer er givet i dB re 1µin/s. Hvis vibrationsniveauerne ønskes omregnet til SI enheder, dvs. dB re 1nm/s, tillægges 28.1 dB, jf. afsnit 3.5.

1. Overfladevibrationer jf. Tabel 6:
Hurtige transit- eller letbanekøretøjer 80 km/t eller 50 mph. Afstand: 34 m (112 feet).
 $L_v = 66,5 \text{ dB, dB re } 1\mu\text{in/s}$
2. Hastighedsjustering til 50 mph jf. Tabel 9:
 $L_v = 66,5 \text{ dB} - 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{50 \text{ mph}}{50 \text{ mph}} \right) = 66,5 \text{ dB, dB re } 1\mu\text{in/s}$
3. Transmissionskorrektioner jf. Tabel 8:
Effektiv transmission: +10 dB
Kobling til bygningsfundament: -10 dB
 $L_v = 66,5 \text{ dB} + 10 \text{ dB} - 10 \text{ dB} = 66,5 \text{ dB, dB re } 1\mu\text{in/s}$
4. Modtagerkorrektioner jf. Tabel 10:
Ingen korrektioner
Stue: 0 dB
 $L_v = 66,5 \text{ dB, dB re } 1\mu\text{in/s}$
Dvs. der beregnes et hastighedsniveau på gulvet i lejligheden på 66,5 dB, dB re 1µin/s, hvilket tilsvarende 94,6 dB re 1 nm/s i internationale enheder.
5. A-vægtet støj (Undergrundsbaner i meget stiv eller meget lerholdig jord.), jf. Tabel 11:
 $L_{pA} = 66,5 \text{ dB} - 20 \text{ dB} = 46,5 \text{ dB(A)}$

Det forventede A-vægtede lydtrykniveau (i et kælderrum) kan også findes ved simpel beregning, jf. Kurzweil afsnit 3.5 udtryk (10), hvor r er afstanden mellem tunnelvæg og bygningsvæg er fundet til 33 m:

$$L_A = 59 - 20 \log_{10} \left(\frac{33 \text{ m}}{1 \text{ m}} \right) \pm (10 \text{ dB}) = 28.6 \text{ dB(A)} \pm (10 \text{ dB})$$

Bemærk, at udtrykket i princippet kun gælder i afstandsintervallet 1-20 m.

4.8 Vurdering og konklusion

Iht. støjmålinger foretaget af FORCE Technology i lejligheden af i alt 27 metropassager, er det aritmetiske gennemsnit af de 5 højeste værdier af $L_{pA, \max, \text{FAST}}$ 40,7 dB(A). Generelt varierer støjen pr. passage mellem 26,3 og 44,0 dB A). I disse værdier indgår også passager fra den anden nærliggende metrotunnel, hvor metrotogene kører i den anden retning. Denne tunnel ligger lidt længere væk fra lejligheden.

Givet, at FTA-metoden er udarbejdet til vurderingsformål og overslagsberegninger, er det FORCE Technology's vurdering, at en usikkerhed på ca. 6 dB er rimelig for sådanne 'worst-case'-resultater. Det bemærkes, at det ikke indgår i ovenstående vurdering, om der er ekstra vibrationsdæmpende tiltag, eller om hjulene på enkelte metrotog har været slidte på måletidspunktet.

Bemærk også, at skal støjen i lejligheden sammenholdes med de lavfrekvente grænseværdier, jf. Tabel 1, skal antallet af passager, passagetid og gennemsnitlig støj pr. passage indgå i vurderingen jf. afsnit 1.2.

5 Samlede konklusioner og anbefalinger

Formålet med denne opgave har været at udpege mulige vurderingsmetoder for lufttransmitteret og strukturtransmitteret lavfrekvent støj. Orientering 9/1997 definerer lavfrekvent støj som støj i frekvensområdet 10-160 Hz. I arbejdet med at vurdere metoderne – og i tidligere arbejder – har denne definition naturligvis været omdrejningspunktet. Imidlertid viser de gennemgåede cases om togpassager i et metrosystem og lavfrekvent støj fra et fitnesscenter, at den indendørs støj indeholder betydelige bidrag i både 200, 250 og formentlig også i 315 Hz-båndet. Dette kunne tale for at undersøge, om den øvre grænse for lavfrekvent støj burde udvides. Der er ikke i Orientering 9/1997 fundet en begrundelse for, at den øvre grænse for lavfrekvent støj skal være 160 Hz.

På baggrund af en gennemgang af en række metoder til beregning af lavfrekvent lufttransmitteret og strukturtransmitteret støj er der foreslået separate metoder til beregning af det lufttransmitterede og det strukturtransmitterede bidrag til den indendørs støj.

5.1 Luftlyd

For luftlyd anbefales det at basere vurderinger på en opdatering af metoden i vindmøllebekendtgørelsen (BEK 135/2019), der med nogle modificeringer er fundet anvendelig.

Beregningsmetoden for lavfrekvent støj, som indgår i vindmøllebekendtgørelsen (BEK 135/2019) er evalueret i forhold til brug ved beregning af lavfrekvent støj fra andre kilder end vindmøller. Det er vurderet, at de terrænkorriger, som anvendes i vindmøllebekendtgørelsen, ikke er direkte anvendelige til andre beregningsscenarier end vindmøller, og at der kan regnes op til ca. 4 dB for lave niveauer ved brug af forkert terrænkorrektion.

Der er gennemført et beregningsscenarie, som viser, at der ved store forskelle på referencetidsrum og den periode, en kilde er aktiv, kan være situationer, hvor den lavfrekvente støj giver anledning til overskridelser af grænseværdien for indendørs lavfrekvent støj, selvom den udendørs (almindelige) støj ikke overskrider grænsen for udendørs støj.

De danske undersøgelser dækker generelt fritliggende huse, herunder ældre landejendomme, nye huse samt lette sommerhuse. I tilfælde med træhuse kan der tages udgangspunkt i data fra rapporten "Lavfrekvent støj fra vindmøller", [26].

Til forbedring af metoden og datagrundlaget **anbefales** det, at:

- der med udgangspunkt i metoden beskrevet i vindmøllebekendtgørelsen udvikles et simplificeret beregningsværktøj til beregning af terrænkorriger for forskellige scenarier eller at der udarbejdes en række tabeller med terrænkorriger til opslag for kilder i lavere højde over terræn end vindmøller.
- der igangsættes etablering af en kildedatabase med typiske kildestyrker for lavfrekvente kilder, som kan anvendes til overslagsberegninger i planlægningssituationer.
- at den lavfrekvente lydisolation af hhv. typiske rækkehuse og lejlighedsbyggerier undersøges, herunder forskellige bygningstyper af begge typer.

Det bemærkes, at de endelige lydisolationstal er valgt, så 67 % af danske huse og lette sommerhuse har en højere lydisolation end tabelværdierne. Det betyder også, at der i 33 % af dem, som bliver udsat for lavfrekvent støj med et niveau omkring grænseværdien eller højere, vil være flere stærkt generede beboere.

I forbindelse med revision af Orientering nr. 9/1997 er der udarbejdet en opsummering af ny viden om dæmpning af lavfrekvent støj, som ikke er indeholdt i orienteringen.

Den nye viden omfatter:

- Dæmpning af støj ved kilden ved brug af metamaterialer eller constrained layer damping.
- Lavfrekvent lydisolation gennem hhv. SWECO's og FORCE Technology's undersøgelser, jf. [18]-[23], [26], samt
- en norsk undersøgelse om lavfrekvent lydisolation af vinduer, [28].

5.2 Vibrationer og strukturlyd

For vibrationer og strukturlyd er FTA's vurderingsmetode beskrevet i afsnit 3.2 foreslået. Den virker gennem arbejdet og med en simpel tilgang, hvor der på et relativt spinkelt grundlag kan foretages en vurdering af risikoen for strukturlydsudfordringer fra forskellige typer køretøjer. I afsnit 4.5 er metoden sat i sammenhæng med en case, hvor FORCE Technology har foretaget støjmålinger fra en metrotunnel i en lejlighed. Resultatet af denne ene case ser umiddelbart ud til at passe nogenlunde med måledata. Det kunne overvejes at foretage flere vurderinger ved at sammenligne flere måledata med modelberegninger, for at se om der også her er en rimelig sammenhæng. Herefter kunne en tilsvarende metode i dansk kontekst overvejes indarbejdet i Orientering 9/1997. Hvis denne vurderingsmetode viser, at der er risiko for væsentlig strukturlyd, kunne en mere dybdegående undersøgelse bestå i at databehandle i 1/3-oktavbånd. Her ville der i orienteringen skulle udarbejdes et katalog over den forventede kildestyrke for forskellige kilder, der erfaringsmæssigt giver anledning til betydende strukturlyd. Information om forskellige typer jordlag i Danmark til brug for beregning af transmissionstab i jordlagene kan fx bestemmes med GroundVib. Her findes et forventet transmissionstab fra jord til fundament for forskellige bygningstyper.

Der er ved litteraturstudiet fundet flere både ældre og nyere referencer, der lægger op til forholdsvis simple empiriske tilgange til at vurdere strukturlyd fra forskellige kilder – især fra tog. Den mest simple metode er baseret på en ren afstandsbetragtning mellem en metrotunnel og en kælderlejlighed jf. afsnit 3.5, men de fleste er baseret på en metodik, hvor der indgår betragtninger om:

- Kildestyrke,
- vibrationsdæmpende tiltag,
- transmissionstab gennem jorden,
- transmissionstab fra jord til fundament,
- transmissionstab gennem bygningen,

som grundlag for en beregning af et strukturtransmitteret indendørs støjniveau.

Der kan i metoderne se ud til at være en smule diskrepans i forventningen om transmissionstab i koblingen mellem jord og fundament. I Referencelaboratoriets Orientering nr. 10, jf. afsnit 3.1, nævnes 0-7 dB højere vibrationer på gulve af beton og tilsvarende stive konstruktioner sammenlignet med vibrationsniveauet i jorden udenfor. I vurderingsmetoden fra Federal Transit Administration (FTA), jf. afsnit 3.3, forventes en reduktion på 0-13 dB afhængigt af bygningstype. Det samme gør sig gældende for hastighedskorrektion, hvor FTA har en forventning om 6 dB forøgelse af vibrationsniveauet ved en fordobling af et køretøjs hastighed. Referencelaboratoriet har ikke fundet nogen sammenhæng mellem toghastighed i området 50-120 km/t og vibrationsniveauet.

For at forbedre grundlaget for pålidelige overslagsberegninger af strukturlyd kan det anbefales, at:

- Undersøge om FTA 'grove' vurderingsmetode kan bruges i dansk sammenhæng ved i første omgang at lave flere sammenligninger med modelberegnete støjniveauer og målte støjniveauer. FORCE Technology har flere målinger tilsvarende den ene præsenterede i Case 2.
- Igangsætte etablering af en kildedatabase med typiske kildestyrker for lavfrekvente kilder, som kan anvendes til overslagsberegninger i planlægningssituationer.
- Udføre målekampagner for at bestemme kildestyrker for typiske danske kilder til strukturlyd og for at bestemme transmission og dæmpning i typiske danske jordbundsforhold sammenlignet fx med numeriske metoder.
- Udføre målekampagner til bestemmelse af vibrationstab mellem jord og bygningsfundamenter og transmissionstab pr. etage for forskellige typer af typiske danske bygninger.
- Etablere en database over typiske løsninger til reduktion af strukturlyd.

6 Referencer

- [1] FORCE Technology, "Måle- og integrationstider for kortvarige, lavfrekvente støjhændelser. Del 1: Litteraturstudie", TC-101630, 2021.
- [2] FORCE Technology, "Måle- og integrationstider for kortvarige, lavfrekvente støjhændelser. Del 2 & 3: Lyttetests og forslag," TC-101905, 2022.
- [3] Miljøstyrelsen, "Lavfrekvent støj, infralyd og vibrationer i eksternt miljø", Orientering nr. 9/1997.
- [4] Miljøstyrelsens Referencelaboratorium, "Vibrationer fra Jernbaner", Orientering nr. 10, 1989.
- [5] Miljøstyrelsen, Retningslinier for måling og vurdering af vibrationer i det eksterne miljø NFM 2, no. December, 1983.
- [6] Miljøstyrelsen, "Støj og vibrationer fra jernbaner" (inkl. tillæg udgivet 2007), Vejledning nr. 1, 1997.
- [7] Miljøstyrelsens Referencelaboratorium, "Genevirkning af vibrationer", Orientering nr. 49, 2014.
- [8] Y. Bamnios and A. Trochides, "I-INCE Classification: 1.0 RAILWAY NOISE IN GREECE: MEASUREMENT AND PREDICTION," in Inter Noise, 2000.
- [9] Miljøstyrelsen, "Ekstern støj fra virksomheder", Vejledning nr. 5/1984.
- [10] Miljøstyrelsen, "Måling af ekstern støj fra virksomheder", Vejledning nr. 6/1984.
- [11] Deutsche Norm, "DIN 4150-3: "Erschütterungen im Bauwesen", 2016.
- [12] Miljø- og fødevareministeriet, Bekendtgørelse om miljøgodkendelse af hurtigfærgeruter. Denmark: Retsinformation, 2015. [Online]. Available: <https://www.retsinformation.dk/eli/lta/2015/1735>
- [13] Miljø- og fødevareministeriet, "Bekendtgørelse om støj fra vindmøller nr. 135 af 07/02/2019", [Online]. Available: <https://www.retsinformation.dk/Forms/R0710.aspx?id=206666>
- [14] Miljøstyrelsen, "Beregning af ekstern støj fra virksomheder", Vejledning nr. 5/1993.
- [15] Miljøstyrelsen, "Beregningsmetode for lavfrekvent støj fra vindmøller," Arbejdsrapport nr. 2, 2011.
- [16] DELTA (Now FORCE Technology), "Nord2000. Validation of the Propagation Model", AV 1117/06, 2006.
- [17] DELTA (Now FORCE Technology), "Validation of the Nord2000 propagation model for use on wind turbine noise," AV 1236/09, 2009.
- [18] DELTA (Now FORCE Technology), "EFP-06 project - Low Frequency Noise from Large Wind Turbines - Measurements of Sound Insulation of Facades", 2008.
- [19] Miljøstyrelsen, "Vurdering af lavfrekvent støj fra færger – 2". Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen nr. 10/1997.
- [20] D. Hoffmeyer, J. Jakobsen, "Sound insulation of dwellings at low frequencies", Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control, vol. 29, no. 1, 2010.

- [21] Miljøstyrelsens Referencelaboratorium, "Teknisk notat - Supplerende databehandling af resultater af lydisolationsmålinger gennemført i projektet 'Lavfrekvent støj fra store vindmøller' - RL 20/08", 2015.
- [22] Miljøstyrelsen, "Udvidet datagrundlag for danske boligers lydisolation mod lavfrekvent støj", Miljørapport nr. 1866, 2016.
- [23] Miljøstyrelsen, "Ny viden om lavfrekvent lydisolation af boliger i områder med vindmøller", Miljørapport nr. 1960, 2017.
- [24] FORCE Technology *et al.*, "Litteraturundersøgelse vedrørende lavfrekvent støj", TC-101554, 2021.
- [25] J. Keränen, J. Hakala, and V. Hongisto, "The sound insulation of façades at frequencies 5-5000 Hz," Building and Environment, Volume 156, 2019.
- [26] "Lavfrekvent støj fra vindmøller," DELTA (now FORCE Technology), 2012.
- [27] G. Kyaw Oo D'Amore, S. Caverni, M. Biot, G. Rognoni, and L. D'alessandro, "A Metamaterial Solution for Soundproofing on Board Ship," Applied Sciences (Switzerland), vol. 12, no. 13, Jul, 2022.
- [28] "Bygningssmessige tiltak mot lavfrekventstøy og lydinduserte vibrasjoner fra militær aktivitet. Sluttrapport – Resultater fra numeriske beregninger, laboratoriemålinger og fullskalaforøk," NGI, 2016.
- [29] L.V. Andersen, P. Bucinskas, P. Person, "Probabilistic assessment of ground-vibration transfer in layered soil", Numerical Methods in Geotechnical Engineering IX, Volume 2, 2018.
- [30] A. Geert Degrande *et al.*, "SILVARSTAR Soil Vibration and Auralisation Software Tools for Application in Railways - Deliverable D1.1 STATE-OF-THE-ART -CONCEPT OF THE VIBRATION PREDICTION TOOL", 2021.
- [31] S. R. J. Egede Andersen, Lars Vabbersgaard Andersen, "A general model for predicting railway traffic ground-borne vibrations", ResearchGate, 2019.
- [32] ISO, "ISO DIS 14837-1 Mechanical vibration-Ground-borne vibration arising from rail systems in tunnels-Part 1: Guidance on prediction models," 2003.
- [33] "VDI 3837 - Ground-borne vibration in the vicinity of at-grade rail systems Spectral prediction method." Verein Deutscher Ingenieure, 2013.
- [34] I. E. Martos, "Assessment of Ground-Borne Vibrations from Urban Rail Transit", DTU, Kgs. Lyngby, 2022.
- [35] L. M. Antoinette Quagliata, Meghan Ahearn, "Transit Noise and Vibration Impact Assessment Manual," The U.S. Department of Transportation, Federal Transit Administration (FTA), 2018.
- [36] L. G. Kurzweil, "Ground-borne noise and vibration from underground rail systems", Journal of Sound and Vibration, vol. 66, no. 3, pp. 363–370, 1979.
- [37] ONR 199005, "Berechnung des sekundären Luftschallpegels aus Schwingungsmessungen," pp. 1-8, Austrian standard, 2008.
- [38] Statens Byggeforskningsinstitut, SBI-Anvisning 166: "Bygningssakustik, Teori og praksis", 1989.
- [39] F. Jacobsen; P.M. Juhl, "Fundamentals og General Linear Acoustics". Wiley, 2013.

- [40] A. Brekke, "Akustisk rådgivers ansvar og oppgaver vedrørende vibrasjoner - NAS høstmøte 25-26. oktober 2019." Brekke & Strand, 2019. [Online]. Available: [http://www.norskakustisk-selskap.org/uploads/hostmote/2019/02_Akustisk rådgivers ansvar og oppgaver vedrørende vibrasjoner.pdf](http://www.norskakustisk-selskap.org/uploads/hostmote/2019/02_Akustisk_rådgivers_ansvar_og_oppgaver_vedrørende_vibrasjoner.pdf)
- [41] ISO 20283-5, "Mechanical vibration — Measurement of vibration on ships — Part 5: Guidelines for measurement, evaluation and reporting of vibration with regard to habitability on passenger and merchant ships", 2016.
- [42] UIC (International Union of Railways), "Railway induced vibration - State of the art report", 2017.
- [43] L. Andersen and S. R. K. Nielsen, "Reduction of ground vibration by means of barriers or soil improvement along a railway track," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 25, no. 7–10, pp. 701–716, 2005.
- [44] Brüel & Kjær application notes, "Averaging time of measurements".

Bilag 1 Konklusioner fra Del 1 og 2

Litteraturstudie om regler og grænseværdier i andre lande, [1]

En gennemgang af forskellige landes regler og grænseværdier, som kan anvendes for kortvarige, lavfrekvente hændelser, efterlader et indtryk af, at der ikke er mange fællestræk. Danmark har som et af de eneste lande specifikke foreslåede grænseværdier for lavfrekvent støj målt som A-vægtet energimiddelværdi over 10 min. med 5 dB skærpelse for impulsholdig karakter. I Norge findes der kriterier for antal hændelser (maksimalt 10) for udendørs aktiviteter (veje, jernbaner, industri) og en særlig kriteriekurve for 1/1-oktav-frekvensbåndene 31,5, 63 og 125 Hz med maksimalværdier for 1/1-oktavbåndene. Disse er knyttet til lavfrekvent støj i boligmiljøet i forbindelse med lydklassedefinitioner. I Sverige har Socialstyrelsen anbefalede kriteriekurver for støjen mellem 31,5 Hz og 200 Hz.

Det er karakteristisk, at de fleste af de undersøgte lande har regler for maksimalværdier svarende til L_{pAmax} bestemt med hhv. tidsvægtning FAST eller SLOW. I Norge er der for en anlægssituation anvendt $L_{A5\%}$, som betegner det støjniveau, der er overskredet i 5 % af tiden, og som også kan betragtes som en middelværdi af de 5 % højeste støjniveauer. Anvendelse af $L_{A5\%}$ har den fordel, at værdien konvergerer, så bestemmelsen kommer tættere og tættere på den sande værdi, mens maksimalværdier ikke nødvendigvis konvergerer, men afhænger af antallet af midlede hændelser, og hvornår disse forekommer.

I New South Wales i Australien anvendes begrebet "Intrusive Noise Level", hvor grænseværdien er defineret som et niveau over baggrundsstøjniveauet baseret på målinger af $L_{Aeq,15min}$ (baggrundsstøjen kan også bestemmes ud fra målinger af $L_{A90\%}$). Hvis der er tale om lavfrekvent støj korrigeres de målte støjniveauer med 2 dB om dagen og 5 dB om natten.

Sammenfattende kan det siges, at følgende indikatorer og kriterier anvendes i de undersøgte lande:

- Maksimalværdien (integrationstid SLOW, FAST eller som statistisk niveau $L_{A5\%}$).
- Kriterieværdier i de enkelte oktaver eller 1/3-oktaver ved de laveste frekvenser.
- Tillæg for impulskarakter.
- Antallet af hændelser.

En sammenfatning af de værdier, der er fundet i litteraturgennemgangen af andre landes regler og guidelines, er vist i tabelform i [1]. Det blev konkluderet, at målestørrelserne udgør et virvar med forskellige integrationstider, frekvensvægtninger og specialtilfælde i form af fx baggrundsstøj og kriterieværdier ved forskellige lave frekvensbånd.

Litteraturstudie om genevirkning, [1]

Litteraturstudiet om genevirkning af kortvarige, lavfrekvente hændelser viser, at den danske skærpelse af grænseværdierne med 5 dB i forbindelse med impulser kan retfærdiggøres. Der er dog indikationer i studierne, som medfører, at det bør undersøges, hvorvidt en skærpelse på 5 dB er nok.

I forhold til kortvarige, lavfrekvente hændelser, som relaterer sig til støj fra forbikørsel (der ikke kan karakteriseres som en impuls), viser artiklerne mere blandede resultater.

En generel konklusion blandt flere studier er, at antallet og gentagelsesfrekvensen af hændelser har indvirkning på den oplevede gene og også indvirkning på søvn, hvis det er støj om natten. Herudover er det også generelt, at metoder, som tager hensyn til den tidsmæssige variation, viser den bedste korrelation med den oplevede gene. I forhold til søvnforstyrrelser er maksimalniveauer en god metode.

Det kan også konkluderes, at analyser af kortvarige, lavfrekvente hændelser er komplekse. Definitionen er i dette tilfælde bred, og der kan være forskel på, om en metode er anvendelig til analyse af både impulser og forbiørsler som eksempler på to kortvarige, lavfrekvente hændelser, hvor de uafhængige variabler kan være vidt forskellige. Det er heller ikke givet, at en metode korrelerer med både genevirkning i dag-/aftentimer og søvnforstyrrelser om natten.

Eksempler på uafhængige variabler i analysen af kortvarige, lavfrekvente hændelser:

- Repetitionen af hændelser, herunder om frekvensen af hændelser er konstant eller varierende
- Frekvensindhold
- Stejlhed og henfaldstid
- Tydeligheden (relativt til baggrundsstøjen)
- Varighed.

Litteraturstudiet af kortvarige, lavfrekvente hændelser efterlader et indtryk af et sparsomt antal tilgængelige undersøgelser, artikler, rapporter mv., hvilket indikerer, at det er et område, som bør undersøges yderligere.

Lyttetests og forslag til målestørrelser, [2]

Lyttetesten foregik i SenseLabs lyttebokse hos FORCE Technology med lav baggrundsstøj over hovedtelefoner, som var kalibreret ned til 10 Hz. 21 personer (ikke ekspertlyttere) bedømte genevirkningen af i alt 66 stimuli af 1 minuts varighed hver med 1-4 støjhændelser. Lytterne svarede på en skala med verbale ankerpunkter, og databehandlingen blev udført på en bagvedliggende skala for genegrader mellem 0 og 10. En genegrad på 0 svarer til slet ikke generet, og en genegrad på 2,5 svarer til lettere generet. Genen skulle bedømmes for en situation, hvor man sad og slappede af hjemme om aftenen. Det er ikke undersøgt, i hvor høj grad genevirkning i aftentimer korrelerer med søvnforstyrrelser om natten.

I lyttetesten indgik også en referencyd med simuleret vejstøj hørt indendørs. Bl.a. ved sammenligning med responsen på denne med gældende grænser for trafikstøj i nye boliger blev det konkluderet, at en genegrad på 1 er et passende udgangspunkt for at overveje grænseværdier.

Lyttetestens resultater for genevirkningen blev sammenholdt med fysiske målinger på stimuli med mere end 35 forskellige støjindikatorer (der i denne sammenhæng betyder måleparameter, fx L_{Aeq} og $L_{pA,LF}$). Det var forskellige indikatorer, der gav den bedste overensstemmelse med genen for tog (inkl. metrotog) i tunneler og for de virksomhedsrelaterede støjtyper. Derfor blev undersøgelsen opdelt i disse to grupper:

1. For strukturtransmitteret støj fra tog i tunneler viste lyttetesten, at de A-vægtede indikatorer er de bedst egnede. Resultaterne indikerede, at en grænseværdi på $L_{Aeq} = 20$ dB kombineret med en grænse på $L_{Amax,F} = 30$ dB bør overvejes. Det bør også overvejes at bruge et af de statistiske niveauer $L_{A01,F}$ eller $L_{A05,F}$ i stedet for maksimalværdier, da der er måletekniske fordele ved dette.
2. For de virksomhedsrelaterede støjtyper viste det sig, at en høretærskelvægtet indikator, L_{HTEq} med impuls- eller tonetillæg (det, der er størst) var den, der gav langt den bedste sammenhæng med genen. Uanset det gode resultat må grundlaget dog anses for at være for spinkelt til at ændre den nuværende målepraksis, men det vil være relevant at se nærmere på denne indikator.

Lyttetesten indikerede også, at det er fornuftigt at bibeholde en støjgrænse for $L_{pA,LF}$ (L_{ALFeq}) på 20 dB. Der bør fortsat være en grænse for L_r (som måske skal være mere restriktiv end den nuværende), og at det vil være en forbedring at benytte graduerede tillæg ved beregning af L_r . Denne kan med fordel suppleres med en grænse for maksimalværdier (evt. formuleret som $L_{A01,F}$ eller $L_{A05,F}$) både om aftenen og om natten for at komme problematikken omkring gener fra kortvarige lyde til livs.

Endelig kan det være relevant at lade de indendørs støjgrænser gælde generelt og ikke kun for bygnings-transmitteret støj.

Lyttetesten giver ikke grundlag for at anbefale andre integrationstider end det referencerum på 10 minutter, hvor støjen er kraftigst, som anbefales i Orientering nr. 9, 1997, [3].

Lyttetestens stærke side er, at den under samme betingelser kan sammenligne forskellige indikatorer. Da støjgene i høj grad er påvirket af ikke-akustiske faktorer er det uvist, i hvor høj grad de indikerede støjgrænser er repræsentative for personer, der i deres hjem er udsat for støjen. Resultaterne skal også tages med det forbehold, at testen kun har omfattet et begrænset antal typer af støjkluder.

Praktiske og politiske hensyn kan også betyde, at en anden genegrad end 1 findes mere hensigtsmæssig, som det endelige valg for at fastsætte grænseværdier. Det er Miljøstyrelsens opgave at overveje dette.

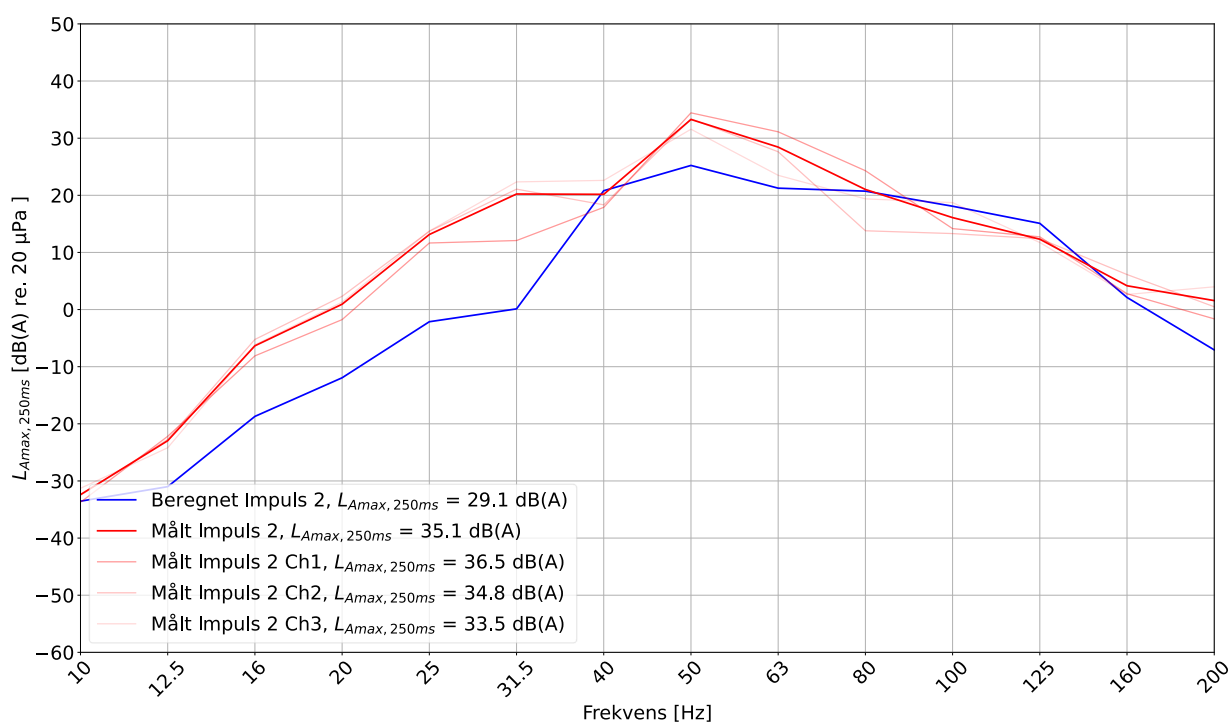
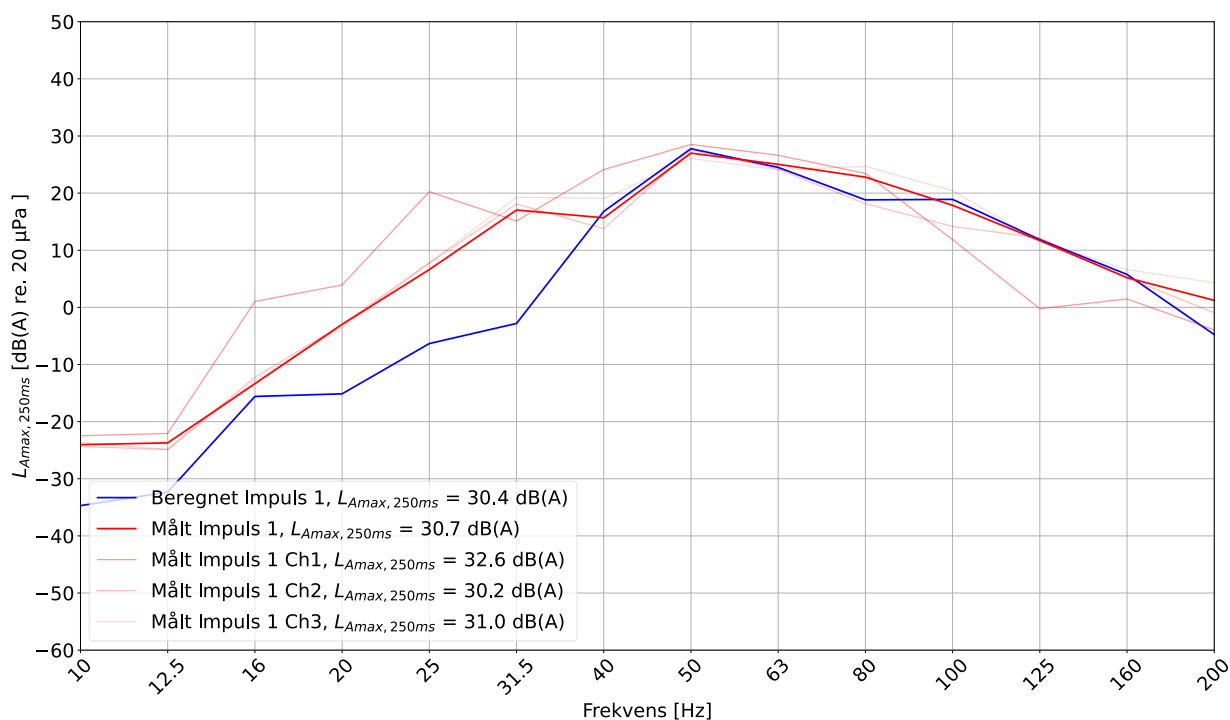
Resultaterne er ikke direkte sammenlignelige med støjgrænser i andre lande, men de foreslåede grænser er nogenlunde i tråd med de grænser, der gælder i Norge, Sverige og Tyskland, om end de er mere restriktive.

Den genevirkning, personer oplever i deres hjem, kan undersøges vha. socioakustiske undersøgelser. Det er undersøgelser, hvor man sammenholder resultatet af spørgeskemaundersøgelser af gene med den støjbelastning, personerne er udsat for. Da metro og andre tog i tunneler udgør forholdsvis ensartede støjkluder, vil det give god mening at iværksætte en sådan undersøgelse.

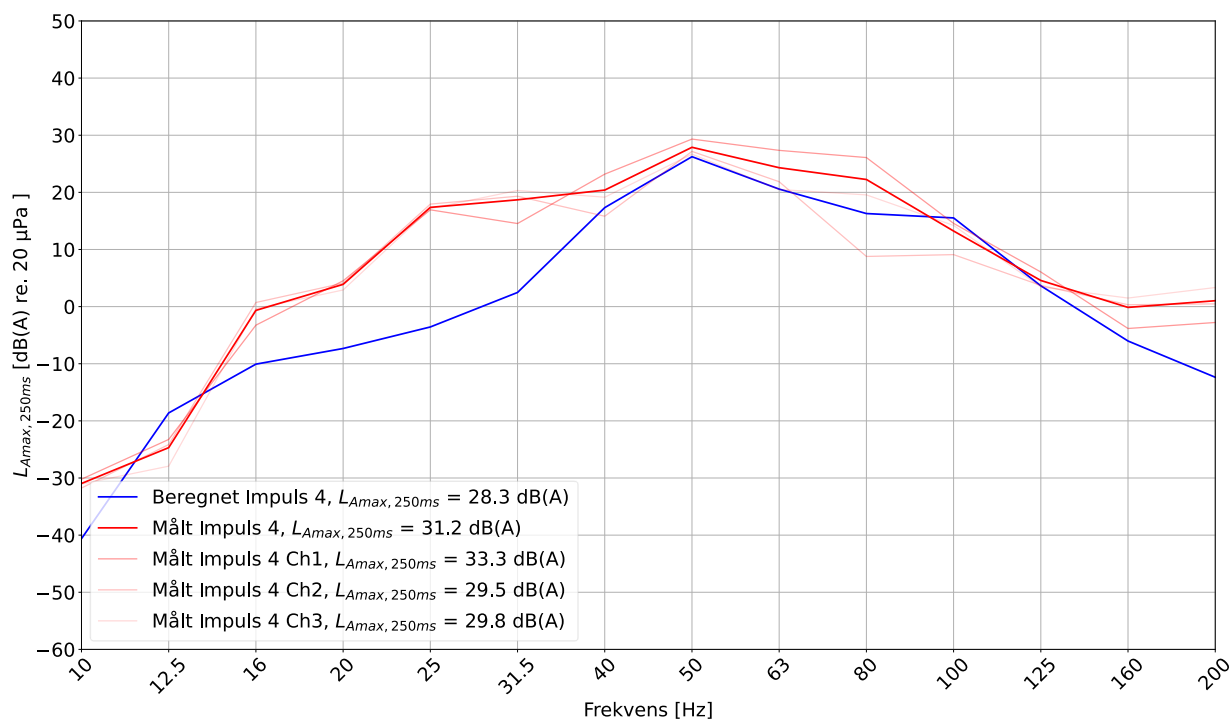
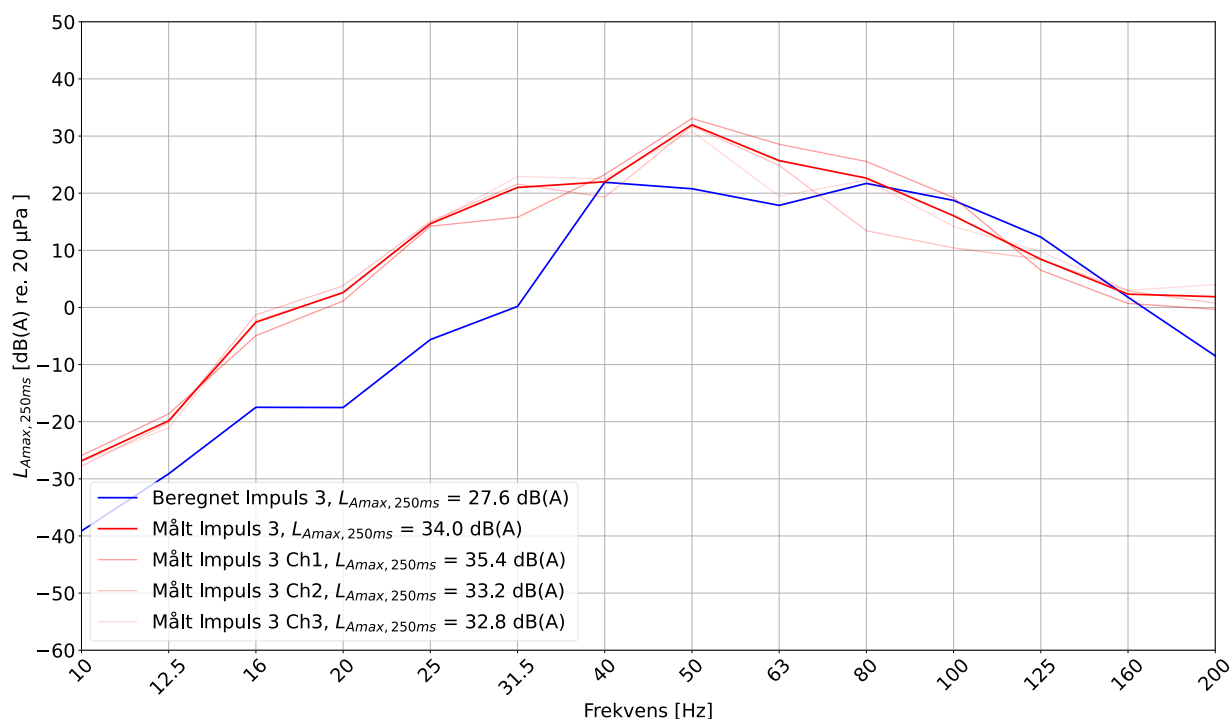
Bilag 2 Case 1: Resultater pr. 1/3-oktavbånd

Analysen af impulser fra fitnesscenter målt og beregnet pr. 1/3-oktavbånd med terræncorrektion fra vindmøllebekendtgørelsen (Tabel 2). For yderligere beskrivelse, se afsnit 4.1.

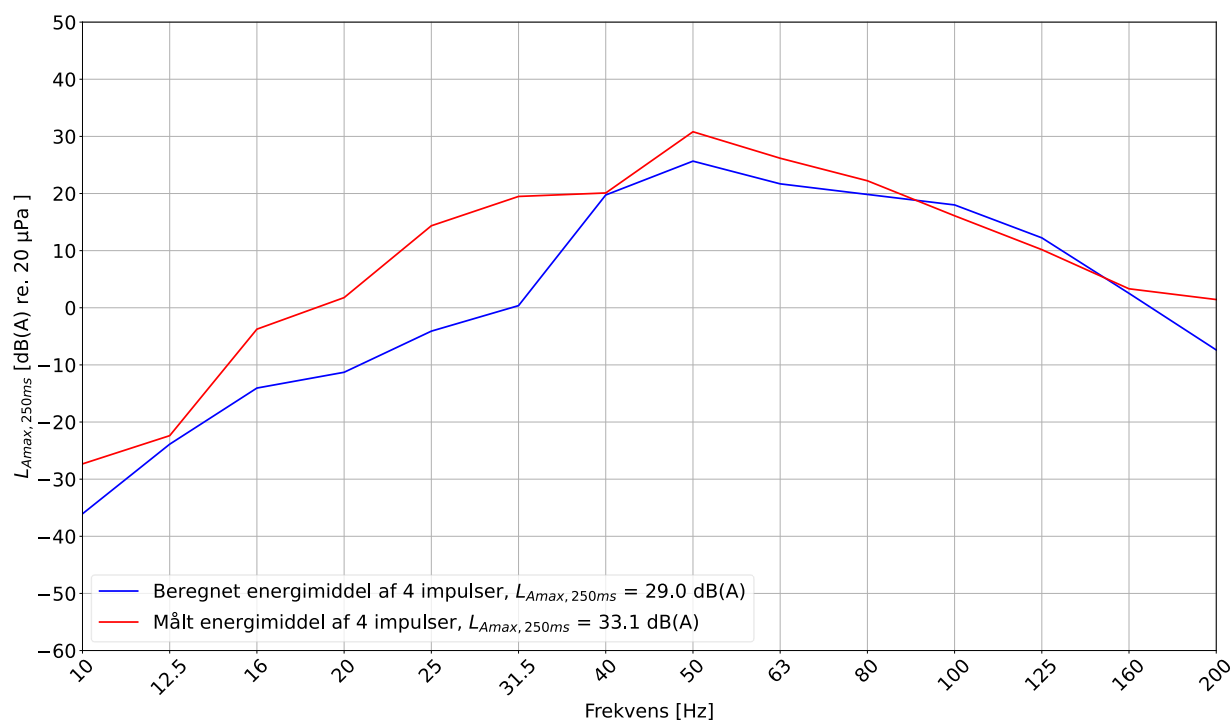
Impuls nr. 1 og 2



Impuls nr. 2 og 3:



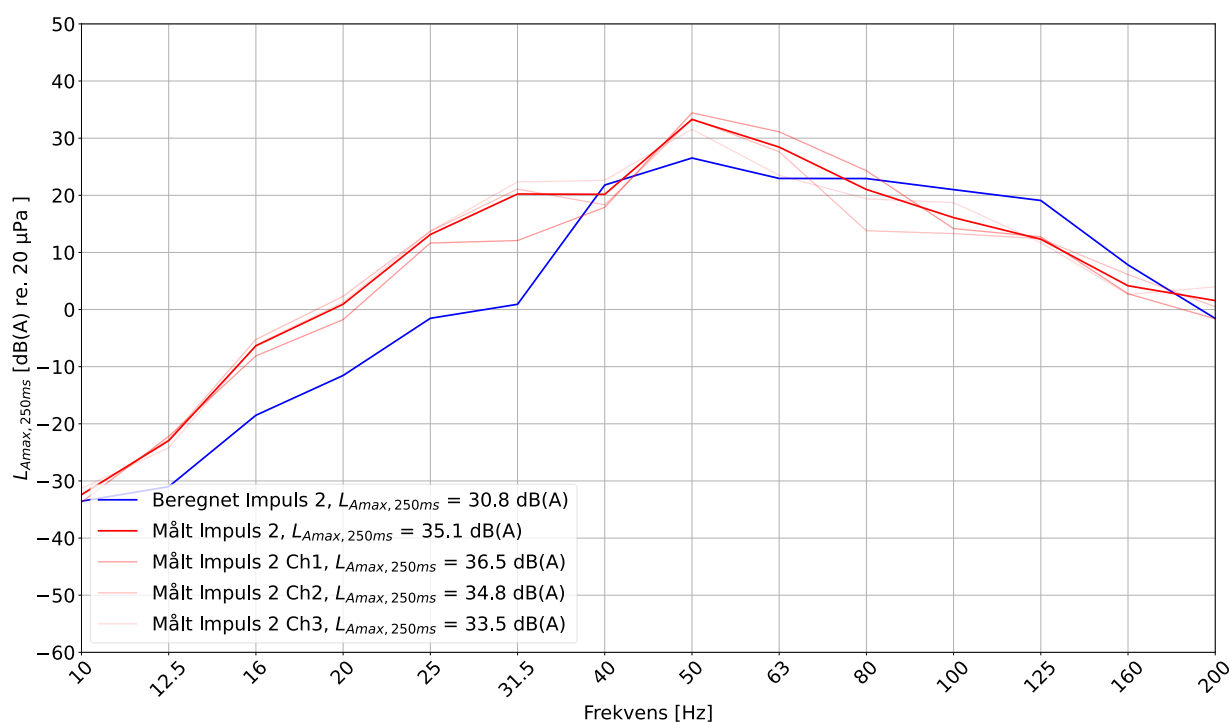
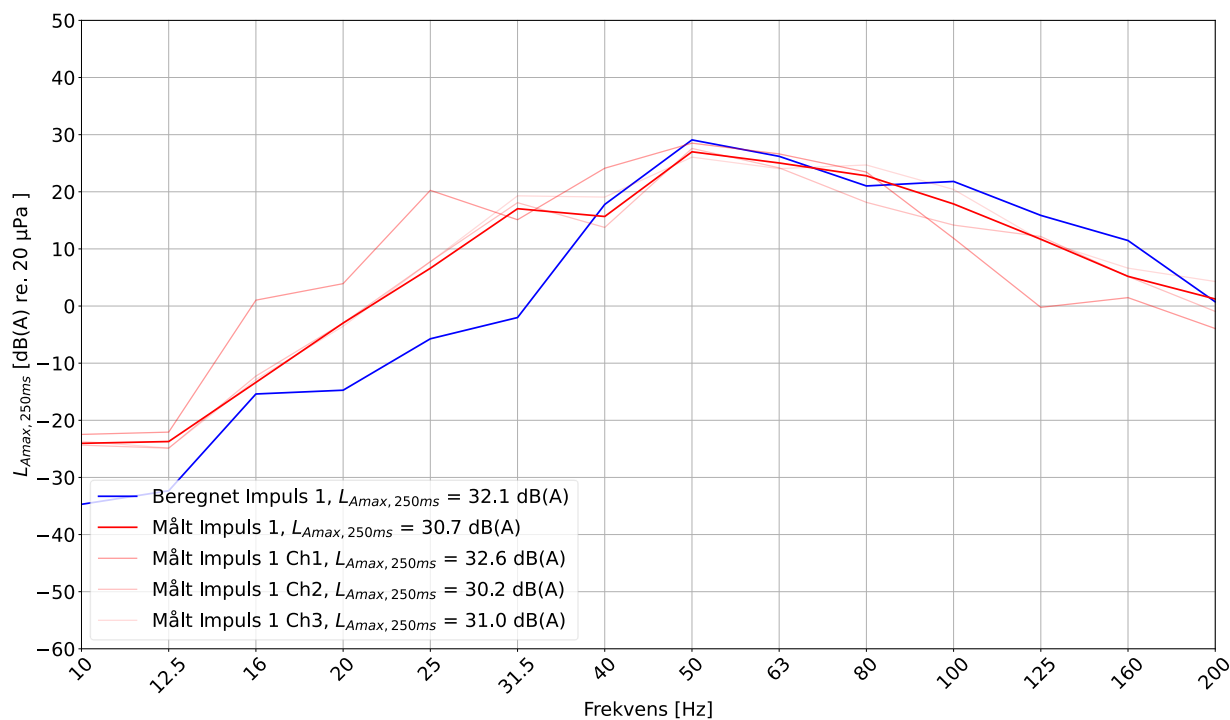
Energimiddel af maksniveauerne for alle 4 impulser:



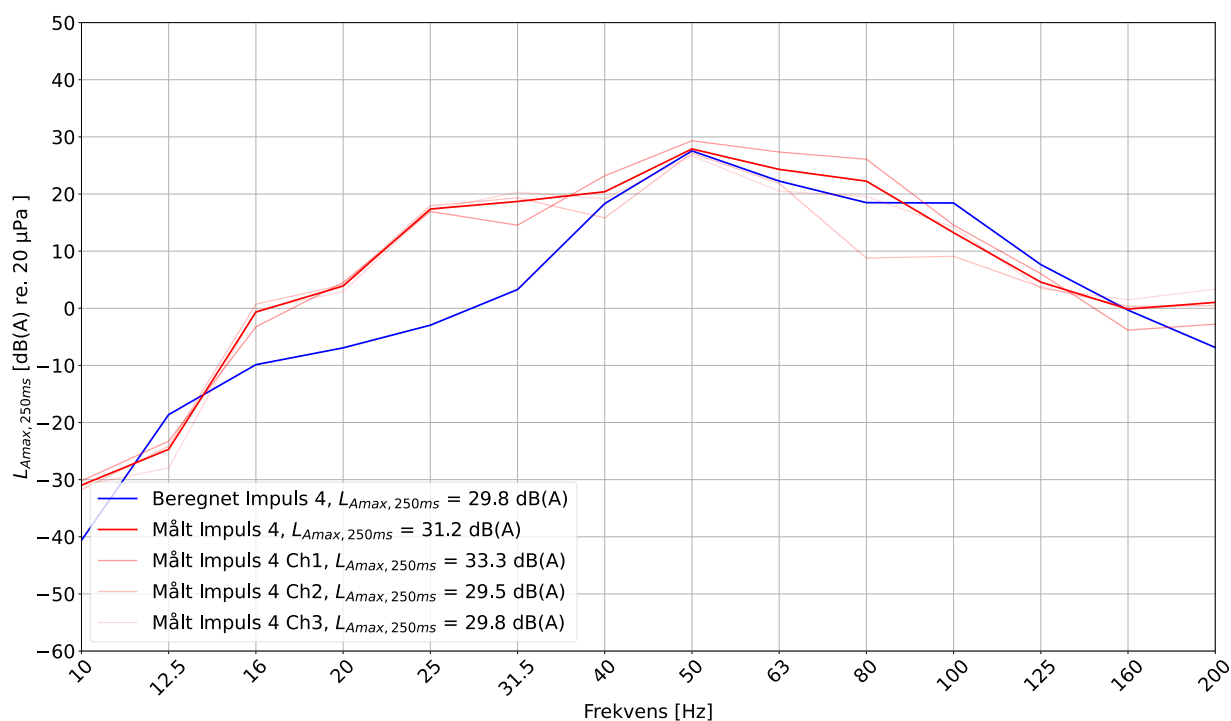
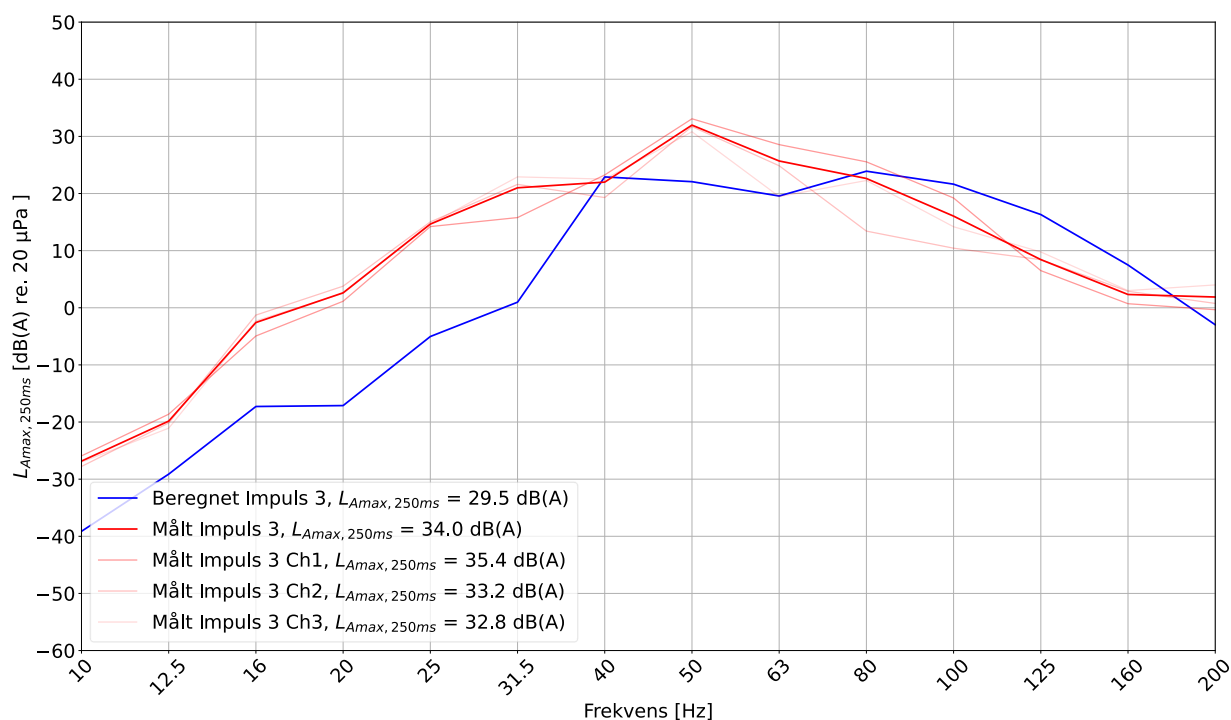
Beregningsresultater med ændret terrænkorrektion i henhold til vindmøllebekendtgørelsen

Analyser af impulser fra fitnesscenter målt og beregnet pr. 1/3-oktavgbånd med ændret terrænkorrrektioner fra vindmøllebekendtgørelsen (Tabel 3). For yderligere beskrivelse, se afsnit 4.1.

Impuls nr. 1 og 2:



Impuls nr. 3 og 4:



Energimiddel af maksniveauerne for alle 4 impulser beregnet med ændret terrænkorrektion:

