



TEKNISK RAPPORT

Litteraturundersøgelse vedrørende lavfrekvent støj, infralyd og lydskabte vibrationer fra fly

Udført for Forsvarsministeriets Ejendomsstyrelse

Projekt nr.: 119-32987

TC-101554

Side 1 af 77

Hørsholm, 18. november 2021



Akustik & SenseLab

Kvalitetssikret af

Udfærdiget af



FORCE Technology
Venlighedsvej 4
2970 Hørsholm, Denmark
Tel. +45 43 25 14 00
Fax + 45 43 25 00 10

FORCE Technology Norway AS
Nye Vaks vei 32
1395 Hvalstad, Norway
+47 64 00 35 00
+47 64 00 35 01
info@forcetechnology.no

FORCE Technology
Park Allé 345
2605 Brøndby, Denmark
+45 43 25 00 00
+45 43 25 00 10
info@forcetechnology.dk
www.forcetechnology.com

OVERSIGT

Titel	Litteraturundersøgelse vedrørende lavfrekvent støj, infralyd og lyd-skabte vibrationer fra fly
Projekt nr.	119-32987
TC-nr.	TC-101554
Kunde	Forsvarsministeriets Ejendomsstyrelse Arsenalvej 55 9800 Hjørring FES@mil.dk 72 81 30 00
Resumé	Rapportens resumé er anbragt på side 3-4.
Revision	Original version
Forfattere	Torben Holm Pedersen: <i>Redaktion, begreber, gene- og helbredseffekter</i> Erik Thysell og Jens Oddershede: <i>Flystøj, beregningsmetoder, effekter af flystøj</i> Rasmus Lyngdal-Christensen: <i>Vibrationer</i> Jens Elgaard Laursen: <i>Regler om lavfrekvent støj, infralyd og vibrationer</i> Rasmus Stahlfest Holck Skov: <i>Lydisolation og støjbeskyttelse</i> Claus Backalarz: <i>Kvalitetssikring</i> Inge Lis Kjær: <i>Layout og korrektur</i>

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.

RESUMÉ

Forsvarsministeriets Ejendomsstyrelse har iværksat denne litteraturundersøgelse vedrørende lavfrekvent støj, infralyd og lydskabte vibrationer fra fly, herunder jagerflyene F-16/F-35, helikoptere og evt. andre typer fly. Formålet er at give et overblik over, hvad der findes af viden på disse områder generelt og sat i relation til den støj, der kan forekomme i naboerområder til flyvestationer i forbindelse med operationer med de nævnte flytyper.

Arbejdet er udført som et samarbejde af et hold af specialister fra FORCE Technology. Litteratursøgningen har ikke været begrænset til peer-reviewede artikler, og der er inddraget offentlig tilgængelig litteratur og rapporter, som har virket kvalificerede ud fra en faglig bedømmelse. Nedenfor er der givet et resume af rapporten.

Støj defineres som uønsket lyd uanset lydens styrke og varighed. Fysisk set er lyd og støj det samme, og de fysiske egenskaber kan også måles på samme måde. Øret er menneskets mest følsomme organ for lyd, og vi kan høre lyd ned til få Hz, hvis lyden er kraftig nok. Det hørbare frekvensområde angives normalt til 20-20.000 Hz.

Lydtrykniveau måles i dB med forskellige frekvens- og tidsvægtninger. Frekvensvægtningerne er fx A, C og Lin (uvægtet). Miljøstyrelsens vejledende grænseværdier er i det væsentlige fastsat i form af A-vægtede lydtrykniveauer. A-vægtningen er en bedre tilnærmelse til hørelsens følsomhed end C-vægtningen.

En særlig størrelse er L_{den} i dB, som er gennemsnitsværdien af det A-vægtede støjniveau over et døgn udenfor facaden, hvor der tages hensyn til, at støjen er mere generende om aftenen og om natten. Her tillægges 5 dB til støjen om aftenen og 10 dB til støjen om natten, før gennemsnittet udregnes. For civile flyvepladser i Danmark anvendes gennemsnittet i de tre mest trafikerende måneder, mens for Forsvarets flyvestationer anvendes gennemsnittet i de tre mest støjbelastede måneder.

For flystøj optræder lavfrekvent støj ikke, uden at der også er støj i det normale hørbare område. Lavfrekvent støj kan give anledning til støjgener og søvnforstyrrelser. Flere forskellige undersøgelser konkluderer dog, at der endnu ikke er grundlag for at angive pålidelige sammenhænge mellem lavfrekvent støj og dens effekter. Laboratorieforsøg indikerer, at både for lavfrekvent støj og infralyd hænger støjgenen tæt sammen med den opfattede lydstyrke.

Kroppen er mest følsom for vibrationer i frekvensområdet 1-4 Hz. Føletærsklen for vibrationer ligger omkring et vægtet vibrationsniveau, L_{aw} , på 71-72 dB. Indendørs vibrationer anses for generende, når de kan føles. For vibrationer, der opstår på grund af høje støjniveauer fra fly i det hørbare område, må det antages, at støjgenerne er væsentligt større end vibrationsgenerne. Kraftige lavfrekvente støjniveauer kan give anledning til mærkbare vibrationer i huse. Når der forekommer mærkbare vibrationer samtidigt med støjen, forstærkes støjgenen. Støjgenen kan også forstærkes, hvis vibrationerne giver anledning til raslen fra genstande i hjemmet.

For de fleste jetfly gælder, at det er turbulensen fra jetstrålen, som bidrager mest til støjbelastningen, især ved start. Ved start støjer jagerfly mere end de fleste andre flytyper. Spektret fra startende F-16 fly adskiller sig dog ikke nævneværdigt fra civile jetfly. Det betyder, at støjens dæmpning under udbredelsen er den samme for civile jetfly som for jagerfly.

Lydtrykniveauet fra et landende jagerfly (F-16) er omtrentligt sammenligneligt med de fleste almindelige civile jetflytyper i Danmark.

Den højfrequente del af støjen dæmpes mere med afstanden end den lavfrequente del. Støjen fra propelfly og helikoptere har en forholdsvis større andel af lavfrekvent energi end jetfly (herunder jagerfly). Bladpassagefrekvensen ¹for helikoptere kan ligge i infralydområdet. Helikoptere har en forholdsvis stor andel lavfrekvent støj, især ved landing.

Lydskabte vibrationsniveauer på bygningsdele stiger lineært med eksterne støjniveauer uafhængigt af flytype, herunder jagerfly, helikoptere, propelfly og almindelige kommercielle fly. Det skal tages i betragtning, at hustypen har betydning for de vibrationsniveauer, der kan opstå. Hvis der er mærkbare vibrationer, stiger genen ved overflyvninger.

Grundet fokus på lavfrekvent støj fra vindmøller i Danmark og Norge er der i disse lande foregået en del undersøgelser af lydisolering ved lave frekvenser. Lydisolationen for luftbåren støj afhænger ikke af støjilden, hvorfor data for lydisolering erhvervet i forbindelse med vindmølleprojekter også kan være repræsentative overfor flystøj.

Der er i måledata fokus på facaders lydisolering (inkl. døre og vinduer), idet tagkonstruktioner typisk yder en højere lydisolering end den samlede facade. Hvilken støjsikring af huse, det er muligt at udføre, afhænger som udgangspunkt af husenes opbygning.

I Danmark og i Norge er lavfrekvent støj og infralyd fra flystøj indeholdt i totalstøj, hvor gennemsnitsstøjen er reguleret i støjvejledninger og retningslinjer. Der findes for flystøj ingen særskilte grænseværdier for lavfrekvent støj eller infralyd.

Terminalstøj reguleres i Danmark på samme måde som virksomhedsstøj, hvorom der findes vejledende grænseværdier for lavfrekvent støj, infralyd og vibrationer i Orientering fra Miljøstyrelsen nr. 9/1997. De vejledende grænseværdier for lavfrekvent støj og infralyd fra Miljøstyrelsen gælder for frekvensområdet 9-180 Hz (1/3-oktavbåndene 10-160 Hz) for lavfrekvent støj og i frekvensområdet op til 20 Hz for infralyd.

Den gældende beregningsmetode for flystøj i Danmark tager ikke specielt højde for fly (fx helikoptere), der har en større andel af lavfrekvent støj eller infralyd end almindelige jetfly. De beregningsmetoder, der er gældende for terminalstøj, herunder opstartsprocedurer med F-16 og F-35, tager højde for lavfrekvent støj, jf. Miljøstyrelsens vejledning om beregning af ekstern støj fra virksomheder. Der findes i Danmark ikke nogen særskilt officielt angiven metode til beregning af lavfrekvent støj, infralyd eller vibrationer fra fly, og som er godkendt af Miljøstyrelsen.

Reguleringen af den samlede totalstøj fra Flyvestation Skrydstrup, som skal huse F-35 flyet i Danmark, er udmøntet i en bekendtgørelse om støj fra Flyvestation Skrydstrup, bekendtgørelse nr. 940 af 22/06/2020, som finder anvendelse på både flystøj og terminalstøj.

¹ Bladpassagefrekvensen er lig med antallet rotorblade multipliceret med rotorens omdrejningstal.

INDHOLDSFORTEGNELSE

1. Indledning	7
1.1 Opgaven.....	7
1.2 Formål.....	7
1.3 Arbejdsmetode.....	7
2. Begreber og notationer.....	8
2.1 Frekvensområder	8
2.2 Lydtrykniveauer	8
2.3 Vibrationer.....	13
2.4 Lydisolation	13
2.5 Turbojet, LBPR, HPBR – forskellige motortyper	14
2.6 Resumé	14
3. Opfattelse af lyd og vibrationer	16
3.1 Høretærskel.....	16
3.2 Opfattet lydstyrke	17
3.3 Følsomhed af vibrationer	18
3.4 Resumé	20
4. Lavfrekvent støj, infralyd og vibrationer fra fly	21
4.1 Generelt om lavfrekvent støj fra jetfly.....	21
4.2 Frekvensspektrum for civile og militære fly	24
4.3 Maksimale støjniveauer for civile og militære fly.....	26
4.4 Forskelle mellem civile og militære fly.....	27
4.5 Lydskabte vibrationer fra fly og helikoptere.....	28
4.6 Resumé	32
5. Genevirkning og sundhedseffekter	34
5.1 Støjgener.....	34

5.2	Søvnforstyrrelser	34
5.3	Helbredseffekter.....	35
5.4	Studier af lavfrekvent støj, infralyd og vibrationer	35
5.5	Gener ved samtidig støj og vibrationspåvirkning.....	38
5.6	Hollandske overvejelser om genetillæg for raslelyde fra lavfrekvent støj og infralyd ..	39
5.7	Resumé	41
6.	Regler om lavfrekvent støj, infralyd og vibrationer	43
6.1	Generelt	43
6.2	Regler i Danmark	43
6.3	Regler i Norge.....	46
6.4	Resume	47
7.	Beregningsmetoder	48
7.1	Beregningsmetoder for støj fra flyvning	48
7.2	Lavfrekvent støj, infralyd og vibrationer på terminalstøjberegninger	49
7.3	Resume	50
8.	Lydisolation mod lavfrekvent støj og infralyd	51
8.1	Forbedring af lydisolation.....	56
8.2	Resume	61
9.	Referencer	63
10.	Bibliografi	69

1. Indledning

1.1 Opgaven

Ved Forsvarsministeriets Ejendomsstyrelses offentlige høring af miljøkonsekvensvurderingen af de nye jagerfly på Flyvestation Skrydstrup vedrørte flere af de indkomne høringsvar lavfrekvent støj, infralyd og lydskabte vibrationer fra de nye jagerfly og helikoptere samt effekten heraf på børns og voksnes sundhed.

Derfor iværksatte Forsvarsministeriets Ejendomsstyrelse denne litteraturundersøgelse vedrørende lavfrekvent støj, infralyd og lydskabte vibrationer fra flyvning med luftfartøjer, herunder F-16/F-35, helikoptere og evt. andre typer jagerfly samt civile fly.

Litteraturstudiet gennemgår følgende:

- Begreber og notationer
- Opfattelse af lyd og vibrationer
- Lavfrekvent støj, infralyd og vibrationer fra fly
- Genevirkning og sundhedseffekter
- Regler om lavfrekvent støj, infralyd og vibrationer
- Beregningsmetoder
- Lydisolation mod lavfrekvent støj og infralyd.

1.2 Formål

Formålet med denne litteraturundersøgelse er at give et overblik over, hvad der er af tilgængelig viden på disse områder generelt og sat i relation til lavfrekvent støj, infralyd og lydskabte vibrationer, der kan forekomme i naboerområder i forbindelse med operationer med de nævnte flytyper.

1.3 Arbejdsmetode

Arbejdet er udført som et samarbejde af et hold specialister fra FORCE Technology med indsigt i forskellige fagområder. Der er søgt viden i umiddelbart tilgængelig litteratur fra tidsskrifter, konferencer o.l. Søgningen har således ikke været begrænset til peer-reviewede artikler, men vi har begrænset studiet til litteratur, som vi har vurderet kvalificeret ud fra vores faglige bedømmelse.

Litteraturstudiet er udført som en screening af, hvad der findes af viden og litteratur, uden at det har været muligt at nå til bunds i det hele. Det er søgt at sætte generel viden i relation til lydniveauer og frekvenser, der kan tænkes at forekomme i naboerområderne, men der er ikke foretaget konkrete beregninger og sammenligninger.

Rapporten bygger på offentligt tilgængeligt materiale.

2. Begreber og notationer

2.1 Frekvensområder

Uden at der er nogen fysisk eller fysiologisk begrundelse, opdeler man traditionelt frekvensområdet i infralyd (0-20 Hz), lavfrekvent lyd (20-200 Hz), det man kalder det normale hørbare område (20-20.000 Hz) og ultralydsområdet (over 20.000 Hz). Denne opdeling af frekvensområdet er ikke fastsat i nogen form for standard og bruges derfor heller ikke stringent.

De fleste støjkilder udstråler støj i et bredt frekvensområde og mange også i det lavfrekvente område. Der er fx lavfrekvent indhold i både trafikstøj (veje, tog og fly) og vindmøllestøj. Den mandlige stemme med en grundfrekvens omkring 100 Hz ligger også i det lavfrekvente område.

På trods af benævnelsen infralyd, som antyder, at fænomenet ligger under det hørbare, kan man godt høre infralyd, hvis bare den er tilstrækkeligt kraftig. Kraftig infralyd kan høres (eller mærkes som en varierende trykken for ørerne), hvis man åbner sideruderne i en bil ved motorvejshastighed. Der er ikke noget mystisk ved infralyd, og den opfattes med ørerne længe før, man mærker den som vibrationer.

Reglerne for lavfrekvent støj og infralyd fra den danske miljøstyrelse, jf. [53], gælder for frekvensområdet 9-180 Hz (1/3-oktavbåndene 10-160 Hz) for lavfrekvent støj og i frekvensområdet op til 20 Hz for infralyd.

2.2 Lydtrykniveauer

Frekvensvægtet lydtrykniveau, dB(A) og dB(C)

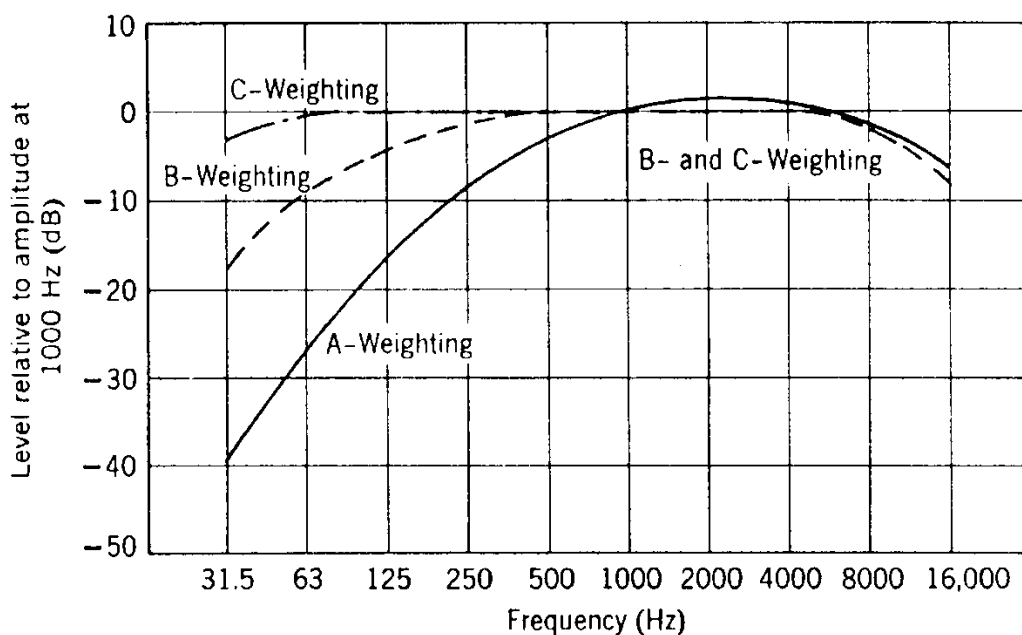
Når man angiver styrken af en lyd, angives den sædvanligvis med betegnelsen dB(A).

”dB” er en logaritmisk måleenhed, der for lyd angiver lydtrykniveau og kan fortolkes som følger:

- En ændring på 1 dB er ubetydelig og kan kun opfattes ved direkte sammenligning af lyde med denne niveauforskel.
- En forskel på 10 dB svarer til en fordobling af den subjektivt opfattede lydstyrke.
- En forskel på 20 dB svarer til en firedobling af den subjektivt opfattede lydstyrke.

”(A)” angiver, at der er foretaget en vægtning af de forskellige frekvenser nogenlunde svarende til ørets følsomhed. Øret er fx mindre følsomt for lave frekvenser (fx under 200 Hz) end for middelfrekvenser (omkring 1.000 Hz), så A-vægtningen undertrykker de lave frekvenser i overensstemmelse hermed.

Ørets følsomhed afhænger af lydtrykniveauet, se afsnit 3.2. Man har derfor defineret andre frekvensvægtninger, B og C, se Figur 1, hvor C-vægtningen i sin tid var tænkt anvendt ved meget høje lydtrykniveauer. Måling med C-vægtningen betegnes kort med dB(C). Hvis der ikke er foretaget nogen frekvensvægtning, taler man om det lineære lydtrykniveau, dB(Lin).



Figur 1 Frekvensvægtningsskurver for lydtrykmålinger. Kurverne angiver, hvor meget lyd-signalet skal forstærkes eller dæmpes (negative tal på y-aksen) ved forskellige frekvenser i forhold til referencefrekvensen 1.000 Hz.

Efterhånden bruges næsten udelukkende A-vægtningen i forbindelse med støjmålinger i Danmark og internationalt. De danske vejledende grænseværdier for flystøj, se afsnit 6.2, er formuleret som L_{DEN} -værdier, som er baseret på A-vægtede lydtrykniveauer, og WHO's rapport om støjens sundhedseffekter, jf. [79], sætter også disse i relation til de A-vægtede støjniveauer i form af L_{den} , se definitionen senere i dette afsnit. Støjbarometret i Figur 2 illustrerer, hvilke A-vægtede lydtrykniveauer man kan forvente fra forskellige lyd-kilder.

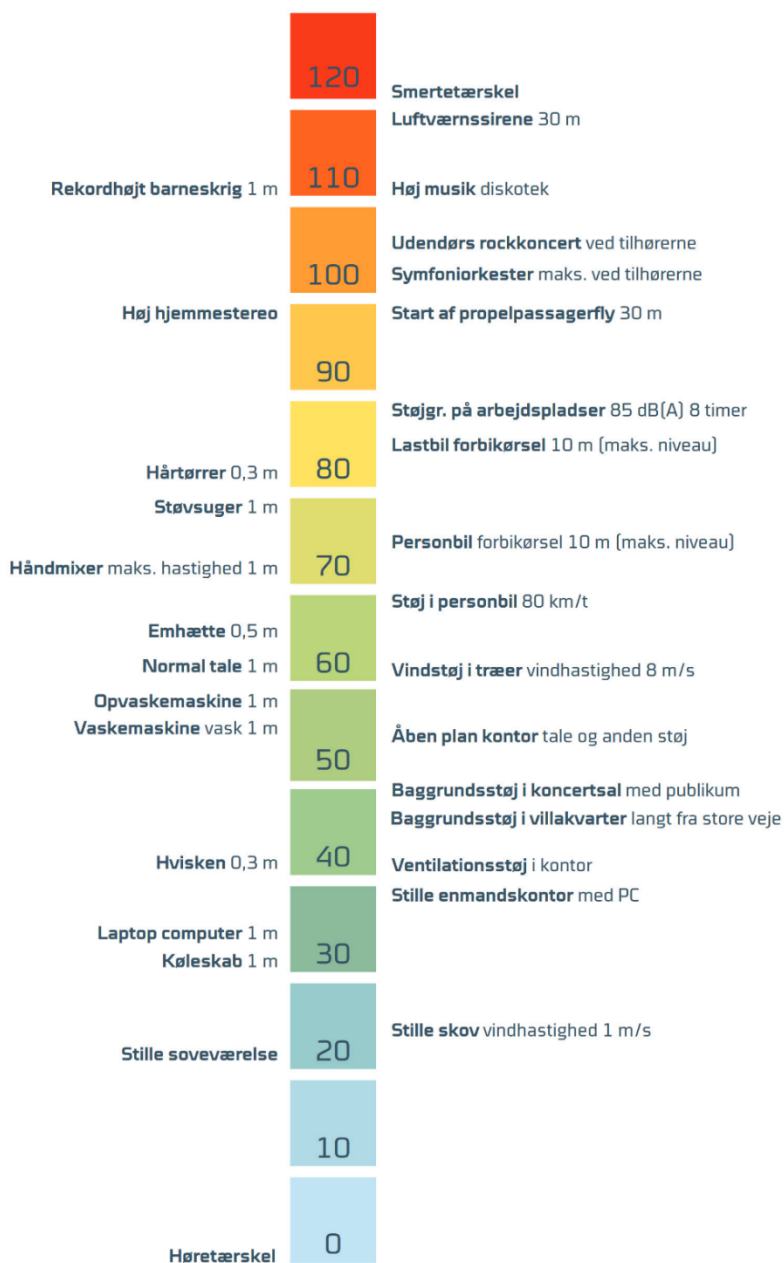
Tidsvægtninger og støjens maksimalniveau

Støjens maksimale niveauer kan måles med forskellige reaktionstider. Den tekniske betegnelse for disse er tidskonstanter eller tidsvægtninger. Jo kortere tidskonstanter, jo større udslag får man på korte hændelser, som fx skud eller bankelyde. Ved længere hændelser (> 1 sekund) er forskellen lille. Den standardiserede tidskonstant F (*Fast*) er den, der er bedst i overensstemmelse med hørelsens opfattelse af kortvarige lyde. Det maksimale A-vægtede lydtrykniveau med tidsvægtning F betegnes L_{pAmaxF^2} . Der findes også en fire gange så langsomt reagerende tidsvægtning kaldet S (*Slow*); Denne bruges i forbindelse med flystøj, jf. [13].

² Der er her angivet Miljøstyrelsens betegnelse. Den nugældende internationale betegnelse er L_{AFmax} , jf. [34].

Støjbarometer

Lydtrykniveau dB (A)



Figur 2 Støjbarometer, der angiver omtrentlige A-vægtede lydtrykniveauer [dB(A)] for forskellige lydkilder, jf. [17].

Ækvivalent konstant lydtrykniveau, L_{Aeq}

Selvom støjen fra forskellige lydkilder ikke er konstant, har det vist sig, at der er god sammenhæng mellem menneskers oplevelse af støjen, fx genevirkningen, og støjen angivet som en gennemsnitsværdi af det A-vægtede lydtrykniveau, L_{Aeq} i dB, over en nærmere defineret tidsperiode. Miljøstyrelsens grænseværdier for virksomhedsstøj gælder fx for L_{Aeq} over 8 timer i dagperioden (kl. 07-18), 1 time i aftenperioden (kl. 18-22) og en halv time i natperioden (kl. 22-07).

Dag-aften-nat niveau, L_{den} og L_{DEN}

Støj er mere generende om aftenen og om natten end om dagen. For virksomhedsstøj i Danmark har vi således forskellige støjgrænser for dag, aften og nat.

Man kan også tage hensyn til den øgede genevirkning aften og nat ved at bruge måleenheden L_{den} . Det er en gennemsnitsværdi af det A-vægtede støjniveau over et døgn, hvor der lægges 5 dB til støjen om aftenen og 10 dB til støjen om natten, før gennemsnittet udregnes. For flystøj svarer det til, at et fly om aftenen tæller lige så meget som støjen fra tre fly om dagen, og støjen fra et fly om natten tæller 10 gange så meget som et fly om dagen.

For etageejendomme beregnes L_{den} på den mest støjbelastede facade. For villakvarterer og rækkehuse beregnes L_{den} i haven.

I forbindelse med flystøj i Danmark bruges størrelsen L_{DEN} , som er beregnet på samme måde som L_{den} , men er baseret på trafikken over de tre "travleste" måneder på et år, jf. [55]. Denne notation vil også blive benyttet i denne rapport.

L_{DEN} for flystøj fra Forsvarets flyvestationer beregnet for de tre mest støjbelastede måneder på et år med de mest støjende fly.

Dag-nat niveau, L_{dn}

L_{dn} er sammenlignelig med L_{den} , som er en gennemsnitsværdi af det A-vægtede støjniveau over et døgn. Dog ses der bort fra tillægget om aftenen på de 5 dB, og der tillægges 10 dB til støjen om natten, før gennemsnittet udregnes.

Natstøjniveau, L_{night}

L_{night} er det gennemsnitlige, natlige, A-vægtede støjniveau beregnet i haven eller ved den mest støjbelastede facade for alle natperioder over et år.

Lavfrekvent lydtrykniveau, $L_{pA,LF}$

Lavfrekvent støj måles i Danmark som det A-vægtede lydtrykniveau i frekvensområdet 9-180 Hz (1/3-oktavbåndene 10-160 Hz), som betegnes $L_{pA,LF}$ i dB, jf. [53].

Figur 3 giver et indtryk af, hvilke niveauer af lavfrekvent lyd, $L_{pA,LF}$, vi er omgivet af.

Notation og enheder for lydtrykniveauer

I forbindelse med ekstern støj vil de angivne måle- og beregningsresultater oftest været angivet som A-vægtede støjniveauer, ligesom Miljøstyrelsens vejledende grænseværdier for støj sædvanligvis gælder det A-vægtede niveau. I forskellige andre referencer bruges også lineære (dvs. ikke vægtede værdier) samt C- og G-vægtede værdier.

For at undgå tvivl og misforståelser vil der i denne rapport som hovedregel blive anvendt enheden dB(A) for A-vægtede niveauer og dB(Lin) for lineære niveauer. Sidstnævnte betegnelse er ikke standardiseret, men erfaringsmæssigt kan der opstå tvivl, om resultatet er vægtet eller ej, hvis der alene angives enheden dB.

For mange notationer er det "indbygget", at værdien er A-vægtet, fx i L_{pAmaxF} . I sådanne tilfælde vil der kunne optræde resultater i denne rapport med enheden dB.

Specielt for L_{den} (og L_{DEN} for flystøj) er resultaterne altid A-vægtede, uden at det afspejles i notationen. For at undgå tvivl vil resultater blive angivet med enheden dB(A).

Generelt er dB-værdier, der vedrører støj, angivet relativt til 20 μ Pa. Formelt bør en dB-værdi derfor angives som dB re 20 μ Pa. Dette er af hensyn til læsevenligheden ikke benyttet i denne rapport.

2.3 Vibrationer

Vibrationsniveau, L_{aw}

Vibrationskomfort i bygninger i Danmark bliver vurderet på baggrund af det totale, målte, vægtede accelerationsniveau L_{aw} , dB re. 1 μ m/s². Vægtningen foretages som defineret i standarden ISO 2631-2, jf. [35], og tager hensyn til den kombinerede følsomhed for både stående, siddende og liggende personer. Dvs. at de målte niveauer er et udtryk for de oplevede helkropsvibrationer. Vibrationerne vurderes i frekvensområdet 1-80 Hz. Vægtningskurven tager hensyn til, at personer generelt er mere følsomme for vibrationer i frekvensområdet 1-4 Hz.

2.4 Lydisolation

Lydisolation, R_w

Lydisolation af bygningsdele er oftest beskrevet i frekvensområdet 100-5.000 Hz og evalueret op til 3.150 Hz. Bygningselementers lydisolation bliver enten dokumenteret ved målinger i bygninger, hvor de er monteret, eller i bygningsakustiske laboratorier. Målinger af facaders lydisolation foregår efter DS/EN ISO 16283-3 (felt), jf. [9], eller DS/EN ISO 10140-2 (laboratorie), jf. [8], og betegnes primært med R'_w , R_w eller lignende parametre ifølge DS/EN ISO 717-1, jf. [10]. Målinger udført i laboratorier betegnes R_w , mens målinger udført i felten betegnes R'_w . Målingerne udføres som standard i frekvensområdet 100-5.000 Hz og kan udvides ned til 50 Hz, hvis målefaciliteterne tillader det. Entalsværdien R'_w eller R_w vægtes efter en referencekurve i området 100-3.150 Hz, som klassificeres ved 500 Hz.

Udover enkelttalsværdien for luftlydisolationen, R_w , findes der spektrale korrektioner til specifik anvendelse, hvor der ønskes at beskrive lydisolationen med en anden frekvensvægtning. Der er defineret to forskellige korrektioner, C og C_{tr} , med henblik på at beskrive henholdsvis indendørs støj og vejtrafikstøj. Disse spektrale korrektioner anvendes typisk i frekvensområdet 100-3.150 Hz. Hvis fx C-korrektionen anvendes, vil det C-korrigerede udtryk for lydisolationen betegnes R_w+C .

Lydniveaudifferens

Lavfrekvent lydisolering er i flere studier defineret som lydniveaudifferensen mellem et udendørs frit felt lydniveau og et indendørs, energimidlet lydniveau målt i møbleret rum uden korrektion for efterklangstid. Dette svarer til udtrykket "indsætningsdæmpning". Der findes forskellige betragtninger for, hvilken er den mest hensigtsmæssige målemetode til måling og beregning af lydniveaudifferensen, og derfor skal lydisoleringen ses i relation til, hvilke målemetoder der er anvendt.

2.5 Turbojet, LBPR, HPBR – forskellige motortyper

En jetmotor består simpelt beskrevet af to dele: en kompressor der suger luft ind i motoren og en turbine, hvor selve forbrændingen sker. I en "ren" turbojetmotor passerer al luft, der suges ind i kompressoren, gennem turbinen. I en LBPR (*Low ByPass Ratio*) motor passerer en del af luften der suges ind i motoren udenfor turbinen, mens der i en HBPR (*High ByPass Ratio*) motor passerer en større del af luften udenfor turbinen. Kort fortalt medfører et stort bypass-forhold generelt mindre støj. De fleste jagerfly, der findes i dag, klasseres som *low* eller *medium* bypass, mens jettfly, som ikke skal flyve supersonisk (hurtigere end lydhastigheden), mestendels er udstyret med HBPR-motorer.

2.6 Resumé

Det hørbare frekvensområde angives normalt til 20-20.000 Hz. Lavfrekvent lyd dækker frekvensområdet 20-200 Hz. Infralyd (som også er hørbar) er lyd i frekvensområdet 0-20 Hz. Denne opdeling af frekvensområdet er ikke fastsat i nogen form for standard og bruges derfor heller ikke stringent.

Reglerne for lavfrekvent støj og infralyd fra den danske miljøstyrelse gælder således for frekvensområdet 9-180 Hz (1/3-oktavbåndene 10-160 Hz) for lavfrekvent støj og i frekvensområdet op til 20 Hz for infralyd.

Lydtrykniveau måles i dB med forskellige frekvens- og tidsvægtninger. Frekvensvægtningerne er fx A, C og Lin (uvægtet), og der bruges betegnelserne dB(A), dB(C) osv. I forbindelse med ekstern støj vil de angivne måle- og beregningsresultater oftest været angivet som A-vægtede støjniveauer, ligesom Miljøstyrelsens vejledende grænseværdier for støj sædvanligvis gælder det A-vægtede niveau, herunder flystøj.

Tidsvægtningerne kan være korte fx F (*Fast*), S (*Slow*), eller der kan integreres over længere tid, hvor niveauerne så kaldes fx L_{Aeq} i dB.

En særlig størrelse er L_{den} i dB, som er gennemsnitsværdien af det A-vægtede støjniveau over et døgn udenfor facaden, hvor der tages hensyn til, at støjen er mere generende om aftenen og om natten. Dette sker ved at tillægge 5 dB til støjen om aftenen og 10 dB til støjen om natten, før gennemsnittet udregnes. (L_{DEN} anvendes generelt for flystøj i Danmark, både for lufthavne og flyvestationer). For civile flyvepladser i Danmark anvendes gennemsnittet for de tre mest trafikerede måneder, mens for Forsvarets flyvestationer anvendes gennemsnittet for de tre mest støjbelastede måneder.

Lydtrykniveauet om natten, L_{night} , beregnes som gennemsnitsværdien af det A-vægtede støjniveau over et år udenfor facaden.

Vibrationsniveauer måles også i dB. Når de måles med en frekvensvægtning, der svarer til følsomheden for helkropsvibrationer, betegnes niveauet med L_{aw} .

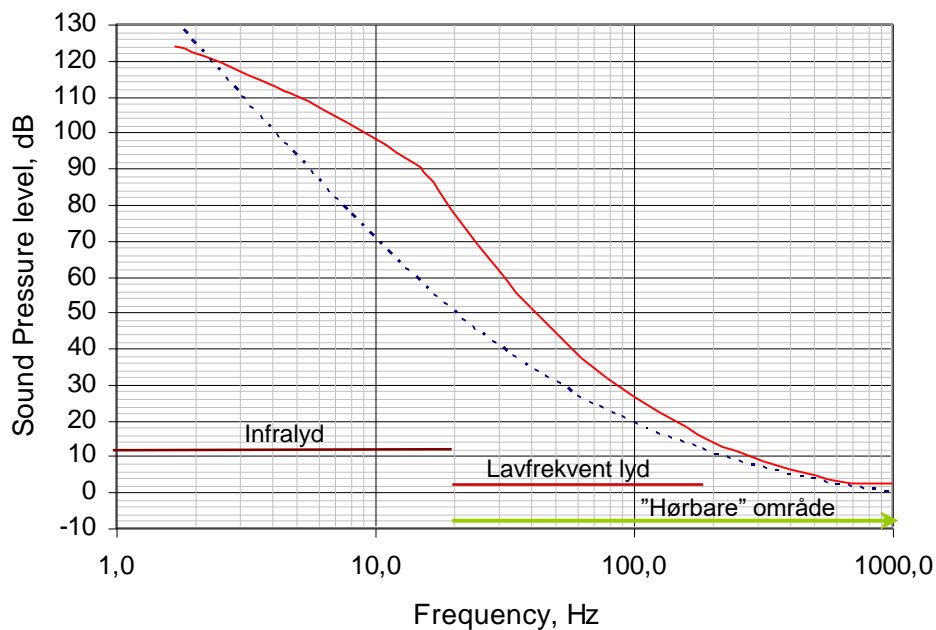
Luftlydisolationen af en bygningsdel beskrives med parameteren R_w , som beskriver frekvensområdet 100-3.150 Hz. Der kan supplerende tilføjes spektrale korrektioner, der beskriver fx den indendørs støj.

I studier af lavfrekvent støj er lydisolationen typisk opgivet som en niveaudifferens, som beskriver forskellen i lydniveauet udenfor og inde i boligen.

3. Opfattelse af lyd og vibrationer

3.1 Høretærskel

Øret er menneskets mest følsomme organ for lyd, dvs. følsom for trykssvingninger i luften. Det gælder også for infralyd, som ved højere lydstyrker også kan opfattes som vibrationer, jf. [58].



Figur 4 Den gennemsnitlige høretærskel for toner og smalbandsstøj (fuldt optrukket rød kurve). Kurven viser, hvilket lydtryk niveau der er nødvendigt ved en given frekvens, for at normalthørende med 50 % sandsynlighed netop kan høre lyden. Kurven er konstrueret på basis af data fra ISO 389-7, jf. [36], ved 20-1.000 Hz, Møller & Pedersen, jf. [58], ved 2-14 Hz og Watanabe & Møller, jf. [77], ved 16 Hz. Til sammenligning er med punkteret linje vist den inverse kurve af den frekvensvægtning (A-kurven), der bruges i måleudstyr til bestemmelse af det A-vægtede lydtryk niveau, dB(A). De forskellige frekvensområder er navngivet som vist på figuren³.

På Figur 4 er A-vægtningen vendt "på hovedet" i forhold til Figur 1. Det skyldes, at Figur 1 viser, hvor meget de lave frekvenser skal dæmpes for at svare til hørelsens nedsatte følsomhed ved lave frekvenser, medens Figur 4 viser, hvor højt lydtryk niveauet skal være, for at lyden kan høres.

³ Denne figur og dele af teksten i dette afsnit stammer fra [64].

Ved bedømmelsen af mulige effekter af lyd og støj⁴ er det derfor relevant at sammenligne med høretærsklen, som er vist i Figur 4. Figuren viser, at man kan høre lyd helt ned til nogle få Hz, men i så fald kræves der meget høje lydtrykniveauer (over 120 dB).

Ifølge [58] er spredningen på de individuelle høretærskler på omkring 5 dB både for det "normale" hørbare frekvensområde og i infralydområdet. Afvigelser på flere gange denne spredning forekommer, men er sjældne.

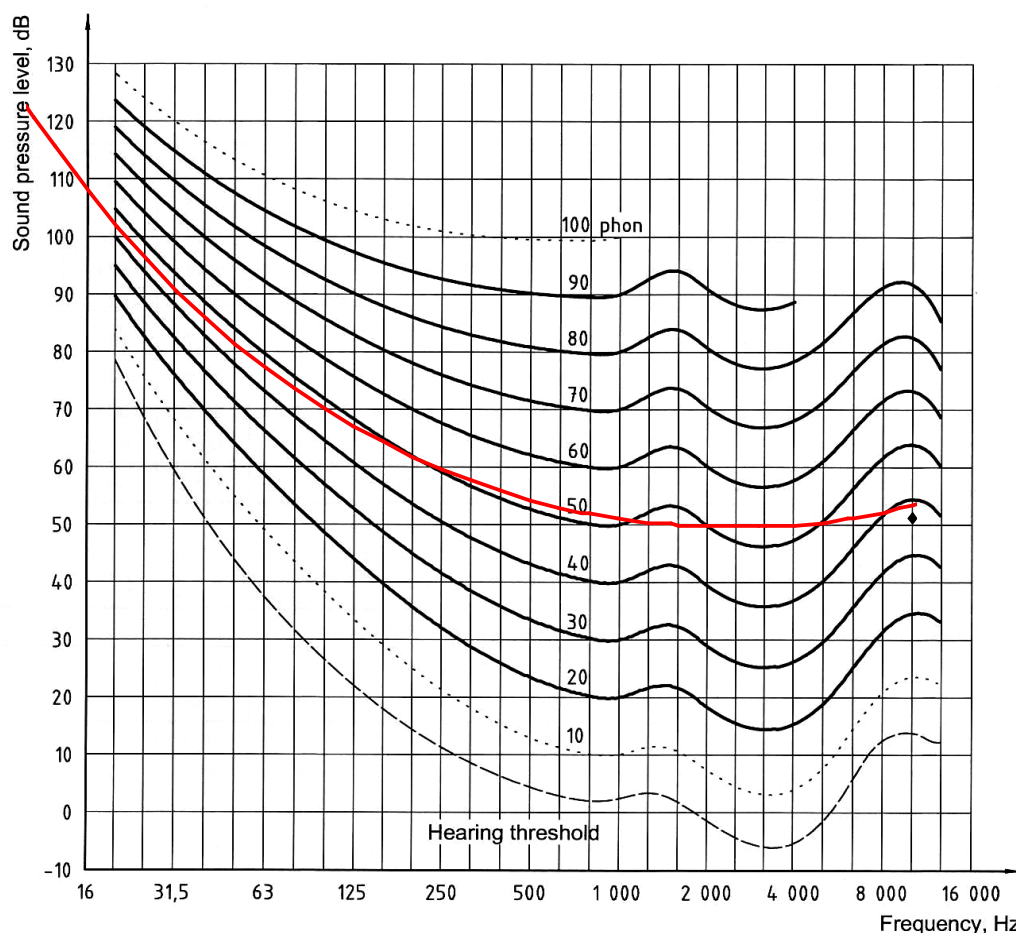
Ifølge Miljøstyrelsen skal A-vægtningen anvendes til måling og beregning af støj fra fly og virksomheder, jf. [52], [53] og [55]. Det hævdes af og til, at A-vægtningen dæmper de lave frekvenser for meget, og derved undervurderer hørbarheden, men af Figur 4 ses, at det faktisk forholder sig omvendt ved høretærsklen. Her overvurderer A-vægtningen faktisk hørbarheden af lavfrekvent lyd og infralyd sammenlignet med det mellemste frekvensområde.

3.2 Opfattet lydstyrke

Som omtalt i afsnit 2.2 er A-vægtningen en tilnærmelse til ørets følsomhed ved forskellige frekvenser. Denne er angivet i standarden ISO 226 om hørestyrkeniveau, jf. [33], se Figur 5. Hver af hørestyrkeniveaukurverne på figuren viser toner ved forskelle frekvenser, der opfattes som lige kraftige, dvs. med samme hørestyrkeniveau (som måles i phon). Figuren gælder også for smalle støjband. Den inverse A-vægtningskurve er også vist på figuren. Det ses, at den er en udmærket tilnærmelse til ørets følsomhed ved middelniveauer omkring 40-60 dB.

Hvis man forestiller sig, at man forskyder A-kurven op og ned, kan man se, at A-vægtningen vil overvurdere de lave frekvenser ved lavere niveauer (herunder ved høretærsklen, jævnfør Figur 4) og undervurdere de lave frekvenser ved højere niveauer end de nævnte 40-60 dB. Selv om A-vægtningen, som bruges til støjmålinger generelt, undervurderer de laveste frekvenser ved høje niveauer i forhold til hørestyrkekurverne, som vist på Figur 5, er A-vægtningen alligevel en bedre tilnærmelse til hørestyrken end C-vægtningen, se Figur 1, i hvert fald ved niveauer op til 90 phon (øverste kurve på Figur 5).

⁴ Støj defineres som uønsket lyd uanset lydets styrke og varighed. Fysisk set er lyd og støj det samme, og de fysiske egenskaber kan også måles på samme måde.



Figur 5 Hørestyrkekurver (Equal loudness contours) fra ISO 226, jf. [33], vist sammen med den inverse A-vægtningsskurve (rød).

Afstanden mellem hver af kurverne på Figur 5 svarer til en fordobling af den opfattede lydstyrke. Det ses, at ved 1.000 Hz er afstanden mellem kurverne 10 dB. Ved lavere frekvenser ligger kurverne tættere, så en fordobling af den opfattede lydstyrke ved 20 Hz kun kræver 5 dB forøgelse af lydtrykniveauet. Ifølge [57] og [58] svinder denne afstand ind til ca. 3 dB ved 10 Hz.

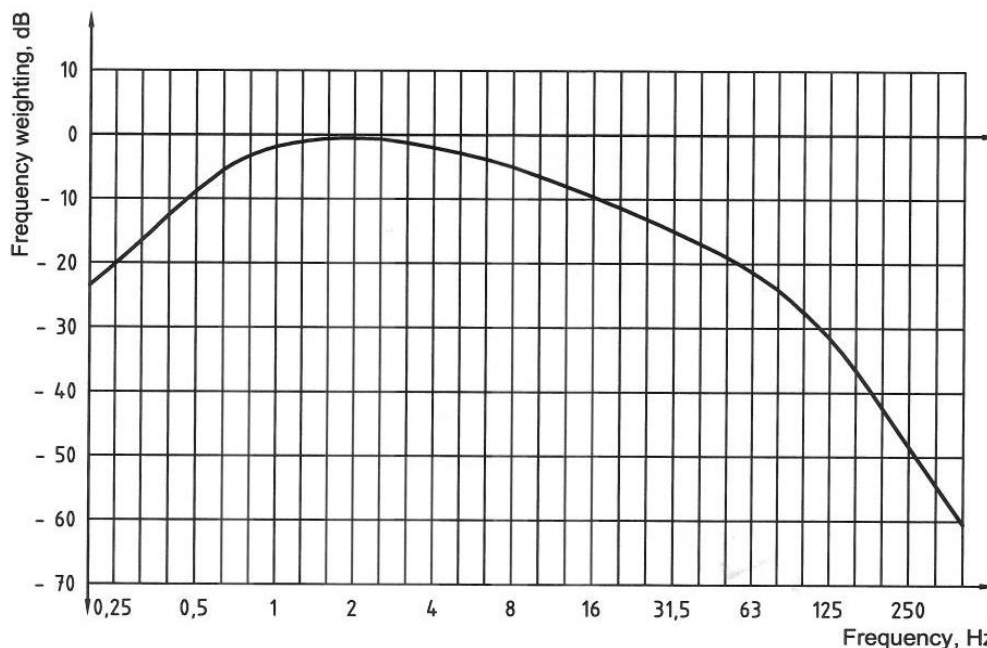
Det betyder kort sagt, at ved lave frekvenser opfattes forskelle i lydtrykniveauer subjektivt større end ved middelfrekvenser.

3.3 Følsomhed af vibrationer

Når man er i berøring (stående, liggende eller siddende) med vibrerende flader, skal der et vis vibrationsniveau til, før man kan mærke vibrationerne. Føletærsklen afhænger af kroppens stilling og berøringsflade samt frekvensen af vibrationerne. Disse forhold er beskrevet i standarden ISO 2631-2, jf. [35]. Da personer i deres hjem udsættes for vibrationer både stående, siddende og liggende, bruger man en vægtningsskurve, der tager hensyn til den kombinerede følsomhed. Kurven betegnes W_m og er den samme, som tillige kaldes W.B-combined eller KB-vægtet accelerationsniveau.

Ved vægtning af et målt vibrationsfrekvensspektrum bruges den samme vægtningskurve for tre ortogonale måleretninger. Den retning, der har det største vægtede niveau, bruges til evalueringen af måleresultatet.

Vægtningskurven givet i dB er vist i Figur 6. Det ses, at kurven tager hensyn til, at følsomheden for helkropsvibrationer er størst i frekvensområdet 1-4 Hz.



Figur 6 Frekvensvægtning W_m , i dB, med acceleration som inputparameter fra ISO 2631-2, jf. [35]. Vægtningen bruges til måling og vurdering af helkropsvibrationer i bygninger.

Vibrationsniveauerne måles som minimum i frekvensområdet 1-80 Hz, fx som acceleration i dB re. 10^{-6} m/s² i 1/3-oktav frekvensbånd. Vibrationsniveauerne vægtes og summeres til et totalniveau. I henhold til ISO 2631-2, jf. [35], bør komfort og irritation over vibrationer i bygninger vurderes ved vægtede totalniveauer.

I Orientering fra Miljøstyrelsen nr. 9/1997, jf. [53] (som ikke gælder for flystøj), er der foreslået grænseværdier for vibrationer i det eksterne miljø, se Tabel 3, side 45. Ekstern betyder i denne sammenhæng, at det er støjkilden, der er ekstern (fx udenfor boligen), idet grænseværdierne gælder indendørs. Vægtningen kaldes i orienteringen KB. Det totale vibrationsniveau gives som det totale vægtede accelerationsniveau, L_{aw} . Vibrationsniveauet vurderes ved måling på gulv i soveværelse og/eller i stue i den/de positioner, hvor vibrationerne skønnes højest. Der måles i udgangspunktet ikke på flader, hvor der ikke er ophold, fx vinduer og vægge.

De foreslåede grænseværdier for boliger er, afhængigt af området de ligger i, mellem $L_{aw} = 75-80$ dB. Mærkbare vibrationer optræder, når niveauer på $L_{aw} = 71-72$ dB overskrides svarende til et accelerationsniveau i det mest følsomme frekvensområde på $\sim 0,004$ m/s² ved 2 Hz eller i hastighed til $\sim 0,3$ mm/s. Klirrende inventar, raslen etc. kan opstå ved vibrationsniveauer, der er betydeligt lavere end føletærsklen.

Føletærsklen ligger noget under de vibrationsniveauer, der kan give skader på bygninger. Vibrationer, der kan give skader (fx revner) på bygninger, er fx beskrevet i DIN 4150-3, jf. [7]. Skader på almindelige boliger kan opstå ved niveauer over 5 mm/s i frekvensområdet 1-10 Hz, dvs. 10 gange så kraftige vibrationer som ved føletærsklen. Niveauerne gælder for vibrationer målt på fundamentet af bygningen. Målt på øvre dæk/gulve i en bygning er den tilsvarende værdi 20 mm/s vertikalt.

Vibrationer i bygninger og huse kan opstå på grund af fx jernbaner, veje med tung trafik samt bygge- og anlægsvirksomhed. I disse tilfælde udbreder vibrationerne sig som regel fra kilden gennem jorden til modtageren, jf. [53]. Dog vil enhver fast struktur, der udsættes for et lydtryk, i nogen grad reagere på det svingende tryk og som konsekvens vibrere, jf. [15]. Kraftig lyd i det lavfrekvente område kan sætte flader (fx vinduer, vægge og gulve) i vibrationer, så føletærsklen overskrides, men da tabene ved overgangen fra lyd i luften til vibrationer i faste stoffer er store, vil man i det normale frekvensområde tydeligt høre lyden også. Potentielt kan ekstern støj fra luftfartøjer derfor skabe vibrationer i bygningsdele og mærkbare vibrationer for personer i deres hjem. Som en ikke uvæsentlig bieffekt kan ting i hjemmet begynde at rasle.

3.4 Resumé

Støj defineres som uønsket lyd uanset lydets styrke og varighed. Fysisk set er lyd og støj det samme, og de fysiske egenskaber kan også måles på samme måde.

Øret er menneskets mest følsomme organ for lyd, og vi kan høre lyd ned til få Hz, hvis lyden er kraftig nok. Ved højere lydstyrker kan infralyd også opfattes som vibrationer. Miljøstyrelsens vejledende grænseværdier er i det væsentlige fastsat i form af A-vægtede lydtrykniveauer. Når lyden måles med A-vægtning, dB(A), vil lave frekvenser blive overvurderet ved lave niveauer og undervurderet ved høje niveauer i forhold til ørets følsomhed.

Når man sammenligner A-vægtningen, som bruges til støjmålinger generelt, med ørets frekvensafhængige følsomhed, kan man se, at A-vægtningen overvurderer de lave frekvenser ved lave niveauer (herunder ved høretærsklen) og undervurderer de lave frekvenser ved høje niveauer. Selvom A-vægtningen undervurderer de laveste frekvenser ved høje niveauer i forhold til hørestyrkekurverne, er A-vægtningen alligevel en bedre tilnærmelse til hørelsens følsomhed end C-vægtningen, som også ses anvendt i litteraturen. Forskelle i lydtrykniveauer ved lave frekvenser opfattes subjektivt større end ved middelfrekvenser.

Vibrationer med samme fysiske niveau opfattes med forskellig styrke afhængigt af frekvensen. Kroppen er mest følsom for vibrationer i frekvensområdet 1-4 Hz. Føletærsklen for vibrationer ligger omkring $L_{aw} = 71-72$ dB. Klirrende inventar, raslen etc. kan opstå ved vibrationsniveauer, der er betydeligt lavere end føletærsklen. Føletærsklen ligger noget under de vibrationsniveauer, der kan give skader på bygninger. Kraftig lyd i det lavfrekvente område kan sætte flader (fx vinduer, vægge og gulve) i vibrationer, så føletærsklen eventuelt kan overskrides, og ting i hjemmet kan også begynde at rasle.

4. Lavfrekvent støj, infralyd og vibrationer fra fly

Den norske vejledning fra Miljødirektoratet M-128/2014, jf. [48], beskriver nogle af forskellene mellem flystøj og andre typer af trafikstøj:

- Varigheden af en enkel flypassage er lang, og niveauvariationerne er store under en passage.
- Flyene følger ikke faste baner på samme måde som fx tog og biler.
- Den største del af energien i støj fra fly ligger i ørets mest følsomme område.

For jetfly gælder, at det er turbulensen i udstødningsluften efter motorerne, som bidrager mest til støjbelastningen, især ved start. For propelfly og helikoptere bidrager propeller og rotor mest til støjbelastningen. I det følgende er dette i beskrivelsen samlet under ét og kaldet støj fra motorerne. I takt med, at motorerne bliver mindre støjende, vil aerodynamisk støj fra flykroppen udgøre en voksende andel af støjbidraget.

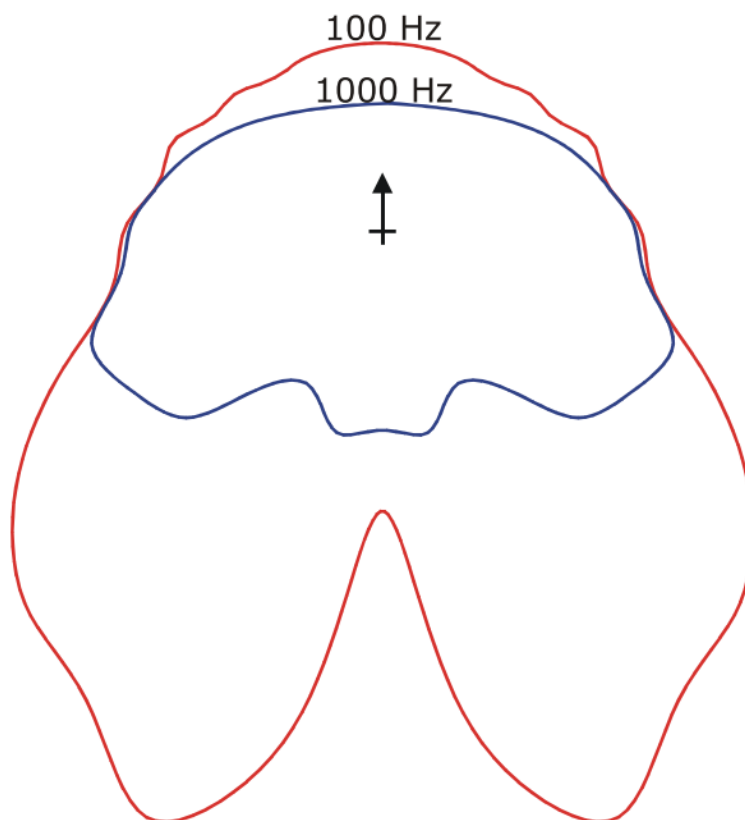
4.1 Generelt om lavfrekvent støj fra jetfly

Dette afsnit, som bygger på informationer fra WYLE's rapport vedrørende lavfrekvent støj fra jetfly fra 2001, jf. [72], beskriver principielle forhold omkring støjen.

Støj fra jetfly genereres primært fra to kilder, jetudstødning og interne systemer. De varme udstødningsgasser blandes med den omgivende luft og skaber lavfrekvent støj bag flyet, som giver den velkendte rumlende eller brølende lyd. Der genereres intern støj af den roterende kompressor og turbineblade, som udstråles forud og bagud i mellem- og højfrekvensområdet. Andre kilder, såsom vibrationer i motorens ydre og luftstrømme over flystrukturen, bidrager til den samlede støj under visse betingelser, men er relativt mindre. Udviklingen af motorer med højt bypass-forhold (HBPR), hvor udstødningsgasserne blandes med luft, der føres ind i motoren gennem blæseren, men udenom kompressor og turbine, reducerer jetmotorens lavfrekvente udstødningsstøj betydeligt. Indførelsen af blæseren introducerer en ekstra støjkilde, der har den velkendte tonale karakteristik.

I Figur 7 er vist direktiviteten⁵ for en lidt ældre motortype (JT8D – en LBPR-motor, se afsnit 2.5) ved henholdsvis 100 Hz og 1.000 Hz. Den illustrerer, hvordan det meste af støjen, der udsendes bagud, er lavfrekvent.

⁵ Udtrykket "direktiviteten" anvendes indenfor akustik til at beskrive lydkildens retningskarakteristik, som er et udtryk for lydtrykket i forskellige retninger.



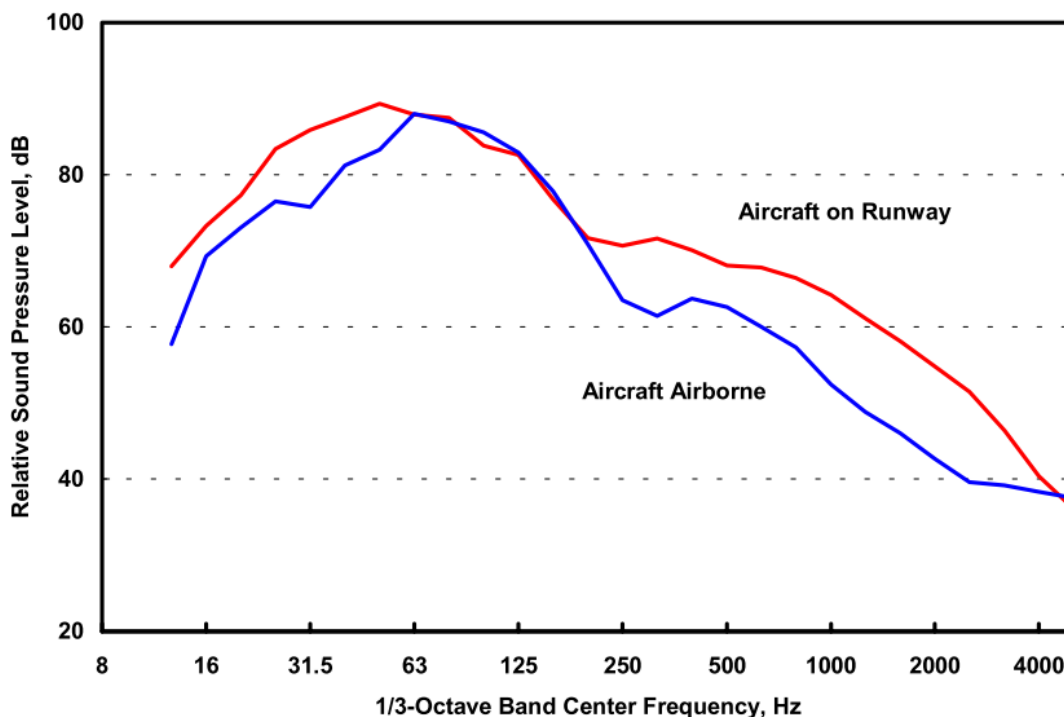
Figur 7 Retningskarakteristik for en LBPR-jetmotor (JT8D) ved henholdsvis 100 Hz og 1.000 Hz. Afstanden fra kurverne til centrum indikerer det relative støjniveau i den pågældende retning, målt i samme afstand fra flyet rundt om det, jf. [72]. Bemærk, at [72] ikke specificerer frekvensvægtningen, men det formodes, at konturerne er uvægtede (det vil sige ikke A-vægtede).

De fleste mennesker, som bor i nærheden af lufthavne eller flyvestationer, er bekendt med støj fra overflyvende jettfly, hvor støjen gradvist øges, når flyet nærmer sig, og efterfølgende falder, når flyet fjerner sig. Når flyet nærmer sig, høres forholdsvis meget højfrekvent støj fra motorens luftindtag, og når flyet passerer, skifter støjen til en mere lavfrekvent støj fra udstødningen. Af Figur 7, som viser den fysiske lydstyrke uden frekvensvægtning, kan man få det indtryk, at de lave frekvenser også er dominerende i fremadretningen for den pågældende motortype. Det skal dog erindres, at hørelsen ikke er så følsom for de lave frekvenser, så høremæssigt kan den røde kurve ligge indenfor den blå i fremad- og sideretningen. Folk, der bor i nærheden af start- og landingsbaner i lufthavnen (og dermed oftest hører støjen fra motorenes udstødning ved start fra banen nær boligen), udsættes for støj, der er forskellig fra støjen fra overflyvninger både med hensyn til det frekvensmæssige indhold, da den højfrekvente del af støjen dæmpes mere med afstanden end den lavfrekvente del, og med hensyn til varighed. Idet den relative afstand og vinkel til flyet ændrer sig hurtigere ved positioner tæt ved banen, varierer støjens frekvensmæssige sammensætning og lydtrykniveau hurtigere her end ved positioner, der er længere væk fra banen.

Hvis man bor i nærheden (i størrelsesordenen 1 km) af startbanens begyndelse, kan man opleve et støjforløb med to maksima fra startende fly. Det første maksimum forekommer ved startens begyndelse, hvorefter støjniveauet falder, efterhånden som flyet fjerner sig langs banen.

På et tidspunkt efter flyets start letter flyet og stiger væk fra banen. Under opstigningen er jetudstødningen rettet mod den hårde baneoverflade, hvilket kan medføre et forøget støjbidrag, det andet maksimum hos naboerne. Når flyet letter og stiger fra landingsbanen, "forsvinder" enhver terrændæmpning (selvom den er lille), og flyets orientering i forhold til vandret ændres. Dette retter potentielt direktivitetens bagudvendte "buler" (se Figur 7) mere mod jorden. Det menes, at det er disse to faktorer (terrændæmpning og flyets orientering i forhold til vandret), der er årsagen til en pludselig stigning i støjniveauet, hvilket introducerer det andet maksimum i støjens tidshistorik. En yderligere faktor kan meget vel være tilstedeværelsen af temperatur- eller vindgradienter, der bliver markante over et par hundrede meters højde.

Frekvensspektret for støjen, der høres ved naboer nær banens ender (når der startes i retning væk fra disse), er vist i Figur 8 ved tidspunktet for de to toppe i tidsforløbet. Den lavfrekvente del ændrer sig lidt, når flyet er i luften, og de højere frekvenser reduceres relativt mere på grund af luftabsorptionen, der virker mere dæmpende i det højfrekvente område.

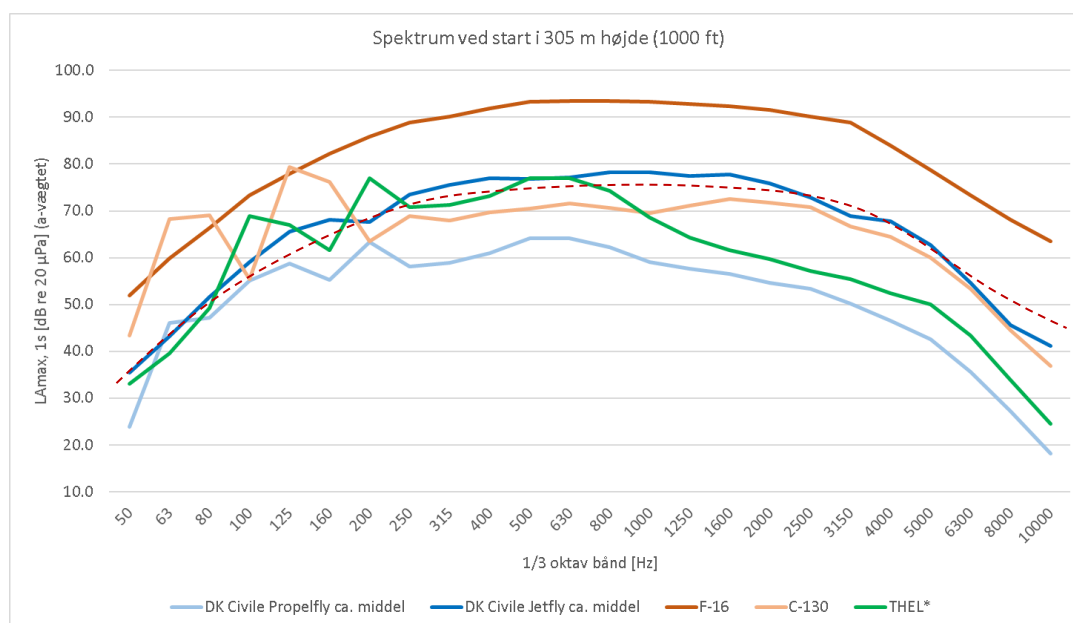


Figur 8 Eksempel på støjens frekvensspektrum bag et startende fly, når et fly er henholdsvis på startbanen (Runway - rød kurve) og i luften (Airborne – blå kurve). Frekvensspektrene er uvægtede, dvs. ikke A-vægtede, jf. [72]. Bemærk, at disse kurver varierer med blandt andet afstand til flyet og betragtningsvinkel.

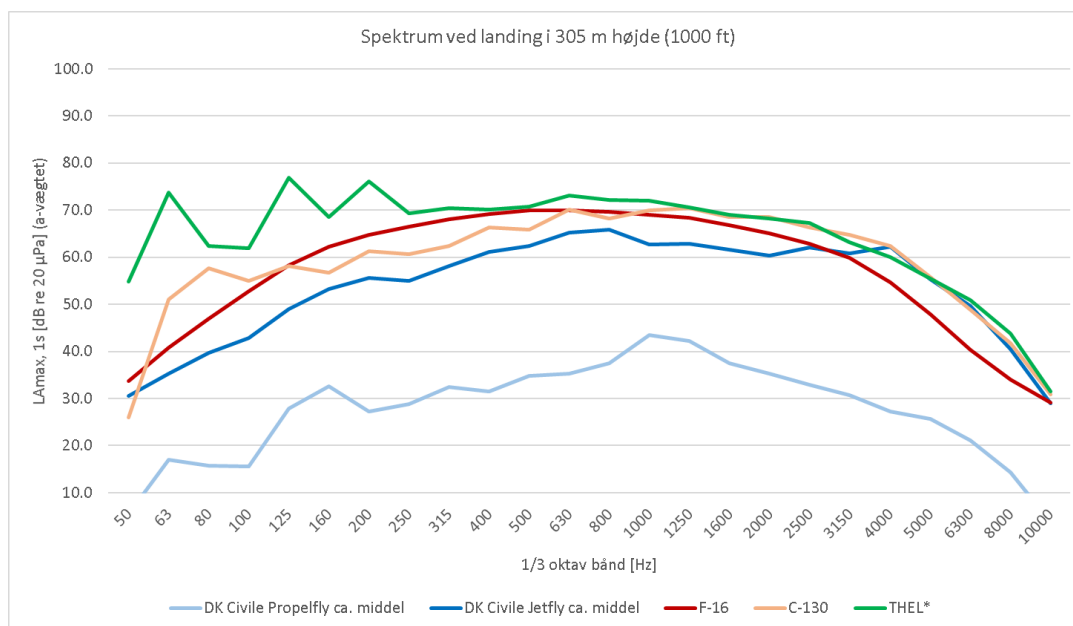
4.2 Frekvensspektrum for civile og militære fly

I Figur 9 og Figur 10 er vist frekvensspektre for henholdsvis start og landing for en række forskellige flytyper. Støjdata for disse flytyper er hentet fra EU-direktiv 2015/996 (END), jf. [12] og flystøjberegningssoftware AEDT-version 2d. Disse to figurer viser 1/3-oktavnådspektre fra 50-10.000 Hz af støjen på jorden, når flyet befinder sig i en højde af 305 m (1.000 ft). Der er vist data for et skønnet middel af henholdsvis civile danske propelflyoperationer, civile danske jetflyoperationer, F-16, C-130 (Hercules - militært propelfly) og tung helikopter (THEL) med en *Maximum Take-Off Mass* (MTOM) > 6.000 kg. Data for THEL er hentet fra EU-direktiv 2015/996 (END), jf. [12]. I [12] har alle helikopter kategorier de samme spektre.

Det ses, at spektrets form for startende F-16 fly ikke adskiller sig nævneværdigt fra civile jetfly. Det betyder, at støjens dæmpning under udbredelsen er omtrentligt lige stor for civile jetfly og for jagerfly.



Figur 9 $L_{Amax,1s}$ frekvensspektre ved start hentet fra AEDT 2d. * Data for THEL er hentet fra EU-direktiv 2015/996 (END), jf. [12]. Kurven for F-16 er også vist som punkteret kurve og forskudt nedad for at lette sammenligningen med de civile fly. Der bemærkes, at dette viser et eksempel på støjens maksimalniveau i ét punkt.



Figur 10 $L_{Amax,1s}$ frekvensspektre ved landing hentet fra AEDT 2d. * Data for THEL (tung helikopter) er hentet fra EU-direktiv 2015/996 (END), jf. [12]. Der bemærkes, at dette viser et eksempel på støjens maksimalniveau i ét punkt.

Det ses, at den A-vægtede lydenergi ved frekvenser under 50 Hz generelt er forholdsvis lille sammenlignet med lydenergien i frekvenser derover. For immissionspunkter, der ligger langt væk (> 5-10 km) fra flyets nærmeste del af en passage, er dette dog mere usikkert. Det samme gør sig gældende generelt for helikoptere under landing.

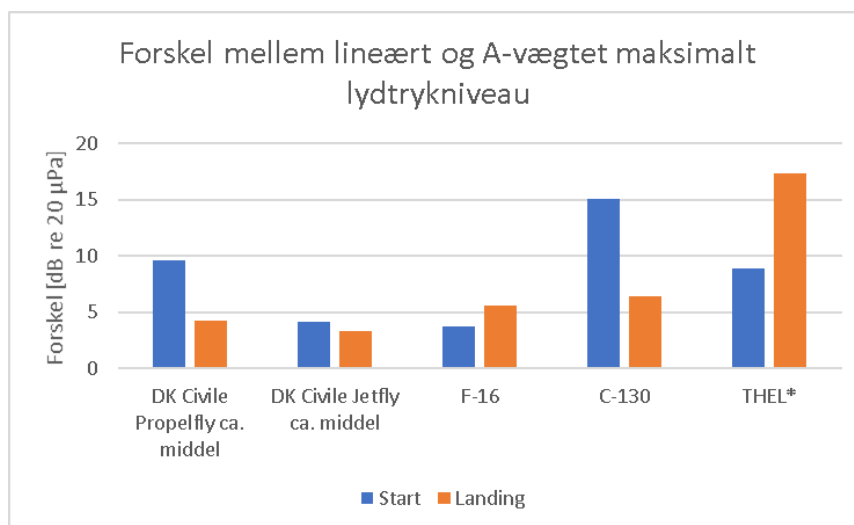
Civile fly og militære fly af samme type (der flyver på den samme måde som de civile), støjer momentant generelt lige meget. Der kan dog være forskelle på flyveprocedurer, der medfører en anden støjbelastning for militære fly sammenlignet med de civile.

Generelt støjer propelfly mindre end jetfly. Dog har propelfly relativt set en større andel lavfrekvent støj i forhold til den totale støj fra den pågældende flytype sammenlignet med jetfly. Støjen fra propelfly og helikoptere karakteriseres af det, man kalder for bladpassagefrekvens, jf. [75], hvilket medfører, at antallet af blade og propellens omdrejningstal hovedsageligt er bestemmende for støjens frekvensspektrum i den lavfrekvente del.

Jagerfly støjer mere end de fleste andre flytyper i forbindelse med start.

Ud fra støjdata for helikoptere i [12] kan det konkluderes, at helikoptere til forskel fra fastvingede fly støjer mindst lige så meget ved landing som ved start. Helikoptere har i lighed med propelfly en forholdsvis stor andel lavfrekvent støj, især ved landing.

For at få et indtryk af den relative andel af lavfrekvent støj kan man se på forskellen mellem det ikke frekvensvægtede lydtrykniveau, dB(Lin), og det A-vægtede lydtrykniveau, dB(A). Jo større denne forskel er, jo større er andelen af lavfrekvent støj. Disse forskelle er vist i Figur 11 for de samme flytyper som i Figur 9 og Figur 10. Det ses, at disse forskelle er større for propelfly og helikoptere, som altså har en højere andel af lavfrekvent støj end støjen fra jetfly (herunder jagerfly).



Figur 11 Forskel i dB mellem lineært (uvægtet) og A-vægtet lydtrykniveau for de enkelte flytyper ved henholdsvis start og landing, når flyet er i en højde af 305 m (1.000 ft). Figuren viser kun forskellen mellem uvægtet og A-vægtet lydtrykniveau og siger ikke noget om de absolutte niveauer. * Data for THEL (tung helikopter) er hentet fra EU-direktiv 2015/996 (END), jf. [12]. Bemærk, at dette kun viser den "individuelle" forskel for hver type/gruppe af fly.

4.3 Maksimale støjniveauer for civile og militære fly

Civile jetfly har i dag et forholdsvis stort bypass-forhold (HBPR), se afsnit 4.1. De maksimale støjniveauer målt på jorden fra civile jetfly, der under en start passerer i en højde af ca. 305 m (1.000 ft), varierer typisk mellem ca. 70-95 dB(A) eller 80-105 dB(Lin) (uvægtet) ved start.

Militære jagerfly støjer generelt mere end andre flytyper. Dette er blandt andet på grund af, at dens motor enten er en "ren" jetmotor uden bypass eller er et lavt bypass-forhold (LBPR).

Ifølge oplysninger fra Forsvarsministeriets Ejendomsstyrelse er de danske F-16 fly udrustet med en Pratt & Whitney F100-PW-220 motor. De kommende F-35 fly vil være udrustet med en F135-PW-100 motor.

Ifølge oplysninger fra Forsvarsministeriets Ejendomsstyrelse giver F-16 et maksimalt støjniveau på ca. 103 dB(A) med *Military Power* (uden efterbrænder)⁶, når flyet ved en start er i højden 305 m (1.000 ft). Tilsvarende for F-16 med efterbrænder⁷ er 111 dB(A). For F-35 vil tilsvarende støjniveauer være henholdsvis ca. 111 dB(A) med *Military Power* og 117 dB(A) med efterbrænder⁸.

⁶ Denne motorindstilling svarer til fuld motorkraft uden brug af efterbrænder.

⁷ Denne motorindstilling svarer til fuld brug af efterbrænder.

⁸ Force Technology har ikke fundet offentligt tilgængelige data vedrørende frekvensspektre for F-35, hvorfor det ikke er muligt at vurdere, hvad det uvægtede støjniveau er.

I [19] skriver det norske Forsvarsbygg uden at specificere en kilde, at den relative andel af lavfrekvent støj for F-35 er mindre end for F-16.

Det bemærkes, at de støjniveauer, der er præsenteret i dette afsnit, er beregnet på jorden, når flyet ved start har nået højden 305 m (1.000 ft). Forskellige fly når ved start denne højde i forskellige afstande fra startposition (*brake-release*). Civile fly stiger normalt med et sted mellem 8-14 grader, hvilket giver en afstand fra *lift-off* (hvor flyet letter fra jorden) på mellem 1-2 km. Rulleafstand (*brake-release* til *lift-off*) varierer mellem 400 m for små propelfly og 3 km for store fly). Dette er blot ét punkt i stigningsproceduren, og normalt stiges der til større højde så hurtigt som muligt, dog under afvejning af sikkerhed, brændstofforbrug, støj etc.

Militære jagerfly har generelt en højere stigningstakt end civile fly.

Den menneskelige hørelse har en følsomhed, der omtrent følger A-vægtningskurven ved lydtrykniveauer omkring 40-60 dB, jf. Figur 1 og Figur 5, dvs. at følsomheden aftager væsentlig med lavere frekvenser. Ved højere lydtrykniveauer aftager følsomheden med lave frekvenser relativt mindre. Denne forskel medfører, at støj med et højere lydtryk niveau, men samme frekvensmæssige fordeling, opfattes som mere lavfrekvent end samme støj ved et lavere lydtryk niveau.

Det militære fragtfly C-130 Hercules, som er et propelfly, har et maksimalt støjniveau målt på terræn på ca. 85 dB(A), når flyet er i ca. 305 m (1.000 ft) højde under en start. Det tilsvarende uvægtede støjniveau er 100 dB(Lin).

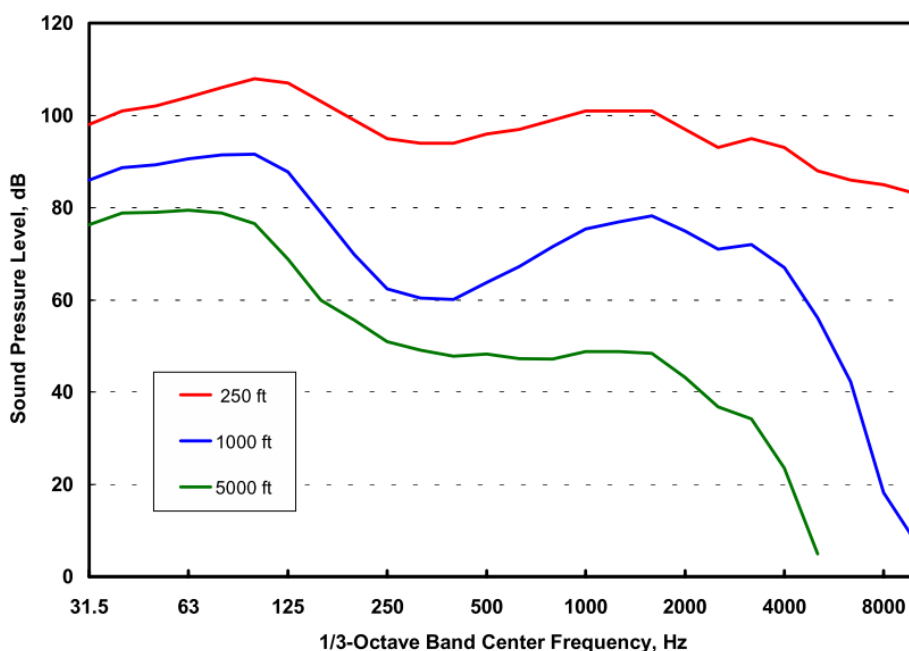
Vægtkategorien tunge helikoptere giver et maksimalt støjniveau på jorden både ved start og landing på ca. 84 dB(A), når de er i en højde af ca. 305 m (1.000 ft). Tilsvarende uvægtede støjniveauer er for start 93 dB(Lin) og for landing 101 dB(Lin). Dette skyldes forskelle i frekvensspektrenes energifordeling, jf. Figur 9 og Figur 10. Bladpassagefrekvensen ligger typisk mellem 10 og 20 Hz, jf. [24]. Herudover bidrager også støjen fra halerotoren fra frekvenser mellem 50-100 Hz.

4.4 Forskelle mellem civile og militære fly

De to tydeligste forskelle mellem civile og militære fly er, dels at de har forskellige procedurer eller måder at flyve på (flyvehøjder, hastigheder, mv.), dels jagerflyenes forholdsvis høje støjniveau i forbindelse med start.

Ved landing er støjniveauerne for jagerfly mere sammenlignelige med andre typer af jetfly, civile som militære.

Luftabsorptionen, som dæmper højfrekvent støj mere end lavfrekvent, har den effekt, at med en stigende afstand fra lydkilden bliver den relative andel lavfrekvent energi større og omvendt ved faldende afstand. Det betyder, at hvis et fly er meget støjende, vil det kunne høres længere væk, og her høres støjen som mere lavfrekvent. Dette er illustreret i Figur 12, hvor der vises et eksempel på, hvordan lyden dæmpes med afstanden. Dykket i kurverne ved ca. 250 Hz, som er tydeligst i afstanden 305 m (1.000 ft, blå kurve), skyldes terræneffekten (interferens med refleksionen i terrænoverfladen).



Figur 12 Støjens frekvensspektrum i forskellig afstand fra et fly.

4.5 Lydskabte vibrationer fra fly og helikoptere

Norske studier vedrørende vibrationer omkring to flybaser

I et norsk studie udarbejdet af Forsvarsbygg, jf. [18], er der foretaget beregninger og vurderinger af vibrationer i et område omkring en flybase, Ørland Hovedflystasjon i Norge, der huser F-35 flyet i dag. I studiet konkluderes det, at der i værste tilfælde kan være et begrænset område på op til 500 m under neutrale vindforhold og 1.000 m i medvind fra en F-35 flyrute til huse, hvor der vil kunne være betydelige lydskabte vibrationsniveauer i husene. Dvs. vibrationer der overskrider grænserne som angivet i Norsk Standard informativt tillæg B til NS 8176 Klasse C "Anbefalede grænseværdier for vibrationer i nye boliger" eller 0,33 mm/s, w, jf. [63]. I det følgende refereres denne grænse som NS 8176 Klasse C. NS 8176 er ikke gældende for fly, men bruges som sammenligningsgrundlag i mangel af andre retningslinjer. F-35 studiet viser desuden, at lavfrekvente støjreducerende tiltag i husene samtidig reducerer vibrationsniveauerne og dermed afstanden mellem F-35 flyrute og huse, inden grænsen overskrides.

I et andet norsk studie, jf. en præsentation lavet af Norges Geotekniske Institutt (NGI) for det norske Forsvarsbygg, [43], vises vibrationsmålinger fra et hus tæt på Bodø Lufthavn og en F-16 flyrute. Huset er placeret ca. 1 km fra flyruten. Målingerne viser overskridelser af NS 8176 Klasse C. I præsentationen nævnes det, at det er kritisk at dæmpe det lavfrekvente støjbidrag for at reducere vibrationerne.

I [60] er det nævnt, at andre tidligere studier har vist, at gulvvibrationer forårsages af lavfrekvent støj, der transmitteres gennem bygningens vægge og tag. Effektive lavfrekvente støjreducerende tiltag vil derfor også reducere gulvvibrationerne. Det må desuden antages, at eventuelle mærkbare vibrationer vil være kortvarige grundet flyenes passagehastighed.

Det bør bemærkes, at dansk byggeskik kan afvige fra den norske, og at de norske erfaringer muligvis ikke kan overføres direkte til en dansk sammenhæng.

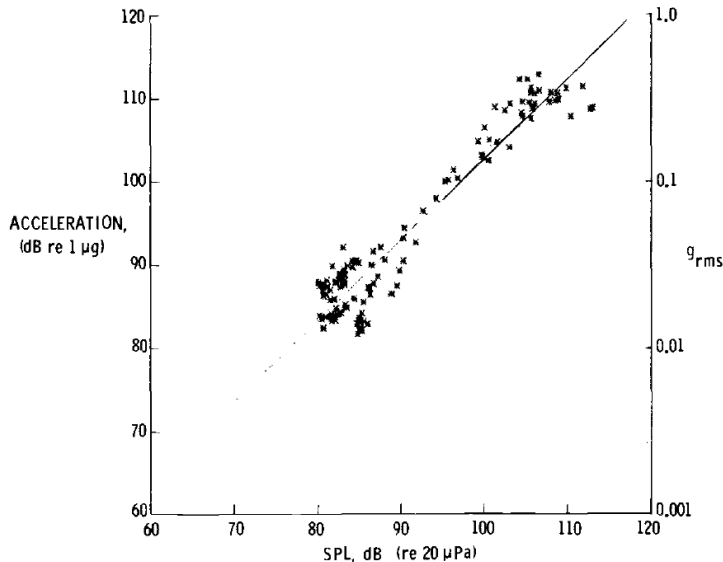
Studier vedrørende vibrationer fra Concorde fly, propelfly og helikoptere

Concorde flyet var et kommercielt fly, der sammenligneligt med F-16 og F-35 kan flyve med overlydshastighed. Concorde flyet er ikke længere i brug, men de viste målinger i dette afsnit illustrerer en sammenhæng mellem de eksterne lydtrykniveauer og lydskabte vibrationer, som også kan forventes fra andre jetfly med tilnærmelsesvis samme lydspektrum.

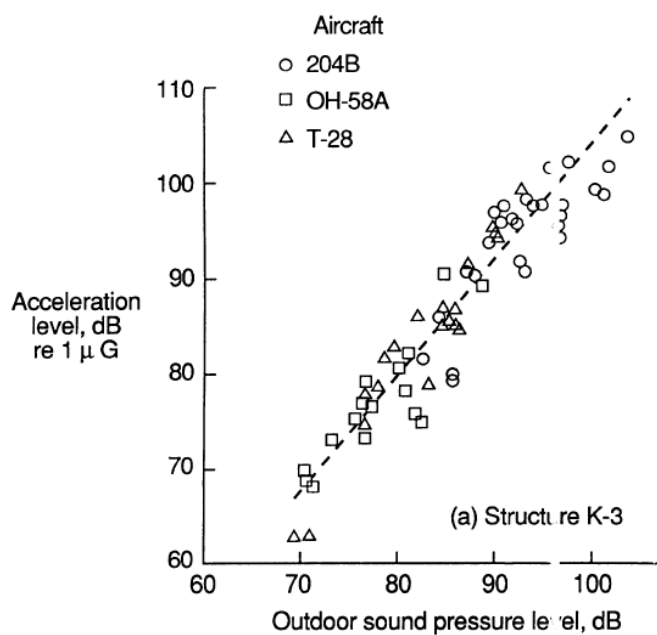
I forbindelse med brugen af Concorden til kommercielle flyvninger er lydskabte vibrationer i bygningsdele som fx vinduer, vægge og gulve undersøgt, jf. [74]. Et sammenligneligt studie for helikoptere og propellerfly er rapporteret i [73]. Dette studie er også foretaget i USA.

I begge studier er vibrationsniveauerne målt på forskellige bygningsdele under overflyvning. De målte vibrationsniveauer er af en størrelsesorden, der er sammenlignelig med almindeligt forekommende begivenheder i hjemmet, såsom døre og vinduer der lukkes.

Sammenhængen mellem det eksternt målte, ikke-vægtede støjniveau og vibrationsniveauet målt på et vindue i de to studier er gengivet i Figur 13 og Figur 14. Det bemærkes, at der er en tilnærmelsesvis lineær sammenhæng mellem eksternt støjniveau og vibrationsniveau på vinduet, samt at den interpolerede kurve for de to studier i høj grad er sammenlignelig til trods for, at der er målt på forskellige flytyper og helikoptere.

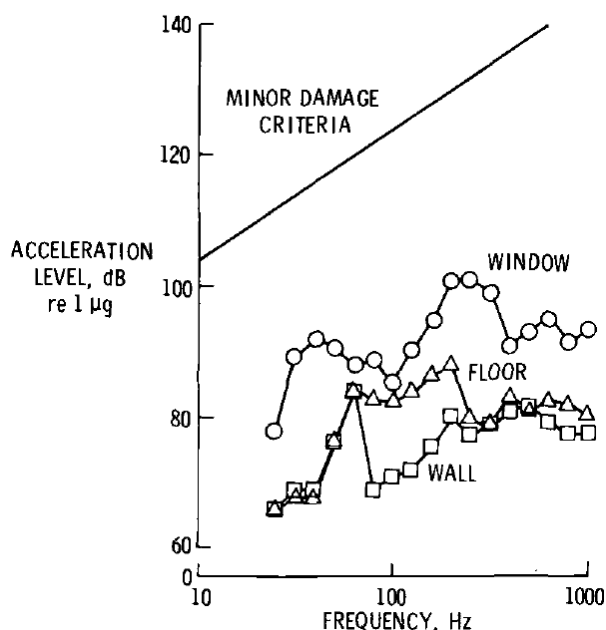


Figur 13 Vinduets vibrationsrespons under en Concorde-afgang som funktion af eksternt målte, ikke vægtede lydtrykniveauer, jf. [74]. Bemærk, at vibrationsniveauet er givet i dB re. $1 \mu\text{g}$ og ikke dB re. $\mu\text{m/s}^2$.



Figur 14 *Vinduets vibrationsrespons for to helikoptere (Bell 204B og Bell OH-58A) og propelfly (North American T-28) afgang som funktion af eksternt målte, ikke vægtede lydtrykniveauer, jf. [73]. Bemærk, at vibrationsniveauet er givet i dB re. 1 μg og ikke dB re. μm/s².*

Figur 15 viser de i studie [74] højeste målte vibrationsniveauer i 1/3-oktaver for tre bygnings-elementer (vindue, gulv og væg) i frekvensområdet 25-1.000 Hz ved en Concordes afgang. I figuren er der også givet en vurderingskurve, jf. [59], for risikoen for vibrationsrelaterede små skader på bygningsdele. De højeste målte eksterne lydtrykniveauer er ca. 115 dB(Lin), jf. Figur 13. De højeste vibrationsniveauer målt på vinduet er ca. 20 dB mindre end vibrationsniveauet, hvor der er risiko for mindre bygningsrelaterede skader, jf. Figur 15.



Figur 15 Målte maksimale vibrationsniveauer på bygningselementer under en Concorde-afgang, jf. [74]. Bemærk, at vibrationsniveauet er givet i dB re. $1 \mu\text{g}$ og ikke i dB re. $\mu\text{m/s}^2$.

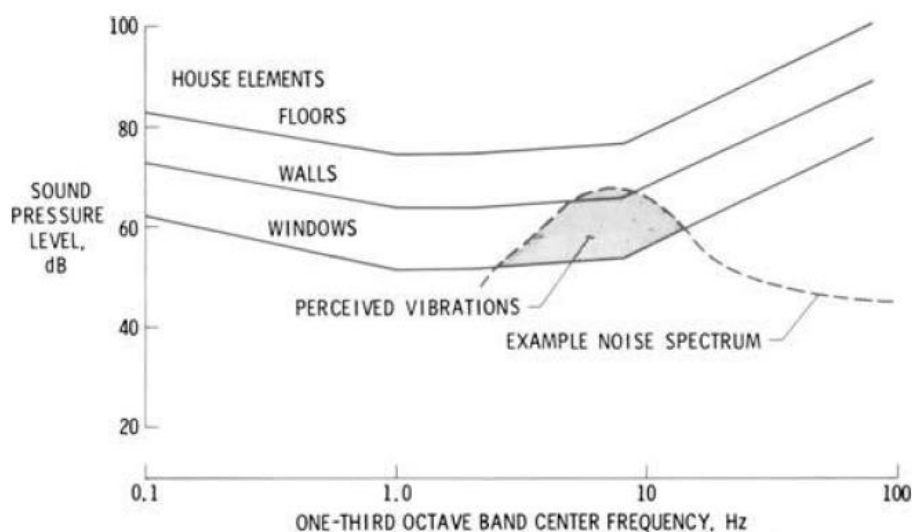
Det skal bemærkes, at vibrationsniveauerne i Figur 15 kun er givet for frekvensområdet 25 Hz til 1.000 Hz og ikke for det mest vibrationsfølsomme område under 25 Hz, jf. vægtningskurven i Figur 6. Desuden kan gulvopbygningen kan have en væsentlig indflydelse på det resulterende vibrationsniveau, især ved resonansfrekvenser. Ifølge Orientering fra Miljøstyrelsen nr. 9/1997, jf. [53], ses der ofte svagt dæmpede resonanser i både beton- og træbjælkedæk ved 15 Hz. Der er i studiet, jf. [74], ikke givet specifik information om opbygningen af gulvet. Der er derfor en risiko for, at vibrationsniveauet undervurderes.

Aflæses vibrationsniveauerne for gulvet i Figur 15, omregnes til SI-enheder og vægtes i henhold til Orientering fra Miljøstyrelsen nr. 9/1997, jf. [53], findes et vægtet vibrationsniveau på $L_{aw} \approx 85$ dB. Til sammenligning er den af Miljøstyrelsen foreslåede grænseværdi for vibrationer i boliger i boligområder, som dog ikke gælder vibrationer fra fly, jf. [53], $L_{aw} = 75$ dB. Det bør noteres, at dansk byggeskik kan afvige fra amerikansk, derfor kan resultaterne muligvis ikke bruges direkte i en dansk sammenhæng.

Baseret på Figur 13 kan det slutes, at vibrationsniveauet målt på gulvet i Figur 15 relaterer til et eksternt støjniveau på ca. 115 dB(Lin), hvilket som nævnt ovenfor sandsynligvis svarer til et vægtet vibrationsniveau på $L_{aw} \approx 85$ dB. Det betyder, at hvis det eksterne støjniveau reduceres med 10 dB, dvs. til ca. 105 dB(Lin), er vibrationsniveauet på gulvet $L_{aw} = 75$ dB. Reduceres det eksterne støjniveau med yderligere 3-4 dB, dvs. til ca. 101 dB(Lin), er vibrationsniveauet på tærsklen til mærkbare vibrationer i gulvet, som ifølge [53] ligger ved $L_{aw} = 71-72$ dB. Ved et eksternt støjniveau på mindre end 100 dB(Lin) burde der således ikke kunne føles vibrationer i gulvet. Dette er i overensstemmelse med [74], som finder, at tærsklen for mærkbare vibrationer overskrides, når det eksterne støjniveau er højere end 100 dB(Lin). Det påvises også, at hvis der detekteres vibrationer, stiger genen ved en overflyvning.

Det bør som nævnt bemærkes, at der er en generel forskel på dansk og amerikansk byggestil, hvilket kan betyde en forskel på sammenhængen mellem udendørsstøjniveau og gulvvibrationer.

Der findes en ældre amerikansk rapport fra 1982, jf. [31], som fint illustrerer, hvordan forskellige bygningsdele i boligen påvirkes af vibrationer afhængigt af frekvensen. Den er baseret på beboerens indikation af, hvornår vibrationerne er mærkbare (ikke raslen). Kilderne er hovedsagelig flystøj, helikopterstøj og overlydsbrag. For støjeksmplet i Figur 16 (støjspektret angivet med den stiplede linje) betyder det, at vibrationer i vinduer og døre ville kunne mærkes, men ikke i væggene. Det skal bemærkes, at undersøgelsen omhandler amerikanske huse, som ikke nødvendigvis kan sammenlignes med danske forhold.



Figur 16 Lydtrykniveauer pr. 1/3-oktaver udendørs, der kan fremkalde mærkbare vibrationer og raslen fra forskellige typer bygningsselementer i boligerne ved forskellige frekvenser, jf. [31].

Klirrende inventar, raslen etc. kan opstå ved vibrationsniveauer, der er betydeligt lavere end føletærsklen, jf. [53]. Raslen og gener forårsaget af helikopterstøj er viderebehandlet i afsnit 5.6.

4.6 Resumé

For de fleste jetfly gælder, at det er den turbulens, der opstår, når udstødningsluften fra motorerne blandes med den omkringliggende relativt stillestående luft, som bidrager mest til støjbelastningen, især ved start, hvor den lavfrekvente buldren, der overvejende sendes bagud i forhold til flyveretningen, er karakteristisk.

Spektret fra startende F-16 fly adskiller sig ikke nævneværdigt fra civile jetfly. Det betyder, at støjens dæmpning under udbredelsen er den samme for civile jetfly som for jagerfly. Den A-vægtede lydenergi ved frekvenser under 50 Hz er forholdsvis lille for jetfly sammenlignet med lydenergien i frekvenser derover.

Den højfrequente del af støjen dæmpes mere med afstanden end den lavfrequente del.

Støjen fra propelfly og helikoptere har en forholdsvis større andel af lavfrekvent energi end jetfly (herunder jagerfly). Bladpassagefrekvensen for helikoptere kan ligge i infralydområdet. Helikoptere har en forholdsvis stor andel lavfrekvent støj, især ved landing.

Ved start støjer jagerfly mere end de fleste andre flytyper. Lydtrykniveauet fra et landende jagerfly (F-16) er omtrentligt sammenligneligt med de fleste almindelige civile jetflytyper i Danmark.

Støj med et højt lydtrykniveau opfattes som mere lavfrekvent end støj med samme frekvensmæssige fordeling ved et lavere lydtrykniveau.

Luftabsorptionen, som dæmper højfrequente støj mere end lavfrekvent, har den effekt, at med en stigende afstand fra lyd-kilden bliver den relative andel lavfrekvent energi større og omvendt ved faldende afstand.

Lydskabte vibrationsniveauer på bygningsdele stiger lineært med eksterne støjniveauer uafhængigt af flytype, herunder jagerfly, helikoptere, og almindelige civile fly.

I en afstand på op til 500 m under neutrale vindforhold og 1 km i medvind fra en F-35 flyrute kan lyden potentielt skabe vibrationer i (norske) huse, der overstiger grænser for vibrationer angivet i NS 8176, jf. [63], dvs. overskridelse af den norske Klasse C "Anbefalede grænseværdier for vibrationer i nye boliger" eller 0,33 mm/s, w. Da dansk byggeskik kan afvige fra den norske, kan de norske erfaringer ikke overføres direkte.

Ved flyskabte eksterne støjniveauer på ca. 105 dB(Lin) er gulvvibrationerne i (amerikanske) huse sandsynligvis i størrelsesordenen $L_{aw} \sim 75$ dB og ved ca. 100 dB(Lin) sandsynligvis lige under følegrænsen for vibrationerne. Til sammenligning er Miljøstyrelsens foreslåede grænseværdier for vibrationer i boliger i boligområder, som dog ikke gælder vibrationer fra fly, $L_{aw} = 75$ dB. Hvis der er mærkbare vibrationer, stiger genen ved overflyvninger. Genen kan yderligere forstærkes, hvis der opstår raslen og klirren. Det skal tages i betragtning, at hustypen, bygningens konstruktion og materialer har betydning for de vibrationsniveauer, der kan opstå.

5. Genevirkning og sundhedseffekter

5.1 Støjgener

Nogle af støjens negative virkninger skyldes, at vi føler os generet og forstyrret af støjen. Helt generelt betyder mere støj i gennemsnit højere støjgene. Hvis vi nedbringer støjen, går støjgenerne i gennemsnit ned, men der er også andre faktorer, der har betydning for støjgenen. Der er ikke én til én sammenhæng mellem støj i dB og støjgene. Støjgene er en følelsesmæssig og holdningsmæssig reaktion fra en person, der er udsat for støj i en given kontekst. Støjgenen afhænger således også af de omstændigheder, som støjen optræder i, og hvilke personer der er udsat for støjen.

Støj er defineret som uønsket lyd. Konteksten er de sammenhænge, støjen optræder i – det vil sige alle de omstændigheder og betingelser, som har betydning for den subjektive følelse eller vurdering; støjkilden, holdningen til støjkilden, tidspunktet på døgnet, varigheden, stedet (eksempelvis indendørs-udendørs), omgivelserne, arbejds- eller fritidssituationen og lignende. Personens alder, køn, baggrund, forventninger, humør og støjfølsomhed har også betydning for den oplevede støjgene.

Støjgene måles ved at spørge personer, der er udsat for støjen, hvor generede de er. Dette kaldes den selvrapporterede støjgene. Ved at spørge på en struktureret og veldefineret måde kan man få pålidelige resultater, som kan sammenlignes med andre undersøgelser. Dette er nærmere defineret i ISO/TS 15666, jf. [37]. Man bruger blandt andet en numerisk skala fra 0 til 10, hvor 0 svarer til ingen gene og 10 svarer til ekstrem gene. Personer, der har svaret i kategorierne 8, 9 eller 10, benævnes "stærkt generet".

10 % "stærkt generet" angives i WHO-rapporten, jf. [79], som tærsklen for en relevant risikoforøgelse. WHO-rapporten betegner støjgene som en helbredseffekt. De 10 % kan tages som udgangspunkt ved fastsættelse af grænseværdier. Politisk betragtes det ofte som en acceptabel balance mellem støjgener og andre interesser, at en vis del af den omboende befolkning (10-15 %) vil føle sig "stærkt generet" af støjen fra en flyveplads, jf. [55].

Der findes mange undersøgelser af sammenhængen mellem støjgene og flystøj generelt, men der er ikke fundet kilder, der konkret angiver en sammenhæng mellem støjgener og lavfrekvent støj, infralyd eller lydskabte vibrationer fra fly, se også afsnit 5.4.

5.2 Søvnforstyrrelser

Hvis støjniveauerne er høje nok, kan der forekomme søvnforstyrrelser. Søvnforstyrrelser kan måles på forskellige måder:

- Vækninger, som skal følges af en handling, fx et tryk på en knap.
- Ændringer i søvnmønster, detekteret med EEG-målinger.
- Forøget bevægelsesmønster.
- Selvrapporterede søvnforstyrrelser.

Både i "*Position paper on dose-effect relationships for night-time noise*", jf. [76], og WHO-rapporten, jf. [79], bruger de selvrapporterede søvnforstyrrelser som et mål for støjens negative effekt. WHO-rapporten betegner søvnforstyrrelser som en helbredseffekt.

Som for støjgene måles den selvrapporterede søvnforstyrrelse ved at spørge personer, der er udsat for støjen, hvor meget de er forstyrrede i deres søvn.

Man bruger også her en numerisk skala fra 0 til 10, hvor 0 svarer til ingen forstyrrelser og 10 svarer til ekstreme forstyrrelser. Personer, der har svaret i kategorierne 8, 9 eller 10, benævnes "stærkt søvnforstyrret".

Der findes en del undersøgelser af sammenhængen mellem søvnforstyrrelser og flystøj generelt, men der er ikke fundet kilder, der direkte behandler sammenhængen mellem søvnforstyrrelser og lavfrekvent støj, infralyd eller lydskabte vibrationer fra fly, se også afsnit 5.4.

5.3 Helbredseffekter

De generelle sammenhænge mellem støjgener, stress og sundhedseffekter er ifølge [25]: *"En af de formodede sundhedsskadelige mekanismer er, at støj stresser os. Akut udsættelse for støj kan udløse en stressreaktion, som aktiverer nervesystemet og forhøjer niveauet af stresshormoner. Reaktionen er en del af et naturligt alarmsystem, hvor kroppen mobiliserer ressourcer til enten at kæmpe eller flygte fra en situation, som opfattes som farlig ved blandt andet at øge pulsen, hjerterytmen og energiforsyningen. Systemet er normalt selvbegrænsende, og når "truslen" er væk vender stress- og hormonniveauer tilbage til normal. Når en stress-faktor er konstant til stede, forbliver stress-responset dog tændt, hvilket kan være skadelig for helbredet."*

Der findes en del undersøgelser af sammenhængen mellem helbredseffekter, fx forhøjet blodtryk, hjerte-kar-sygdomme m.m. og flystøj generelt, men der er ikke fundet kilder, der direkte behandler sammenhængen mellem helbredseffekter og lavfrekvent støj, infralyd eller lydskabte vibrationer fra fly. Heller ikke WHO-rapporten, jf. [79], indeholder noget specifikt om sundhedseffekter af lavfrekvent støj og infralyd.

5.4 Studier af lavfrekvent støj, infralyd og vibrationer

I 2004 konkluderede en undersøgelse, at der synes at være en sammenhæng mellem lavfrekvent støj og genevirkning samt søvnforstyrrelser. Forfatteren konkluderer dog, at angivelserne af den lavfrekvente støjeksponering i mange af undersøgelser ikke er tilstrækkelige til at opnå en tilfredsstillende forståelse af sammenhængen mellem lydeksponeringen og dens effekter, jf. [78].

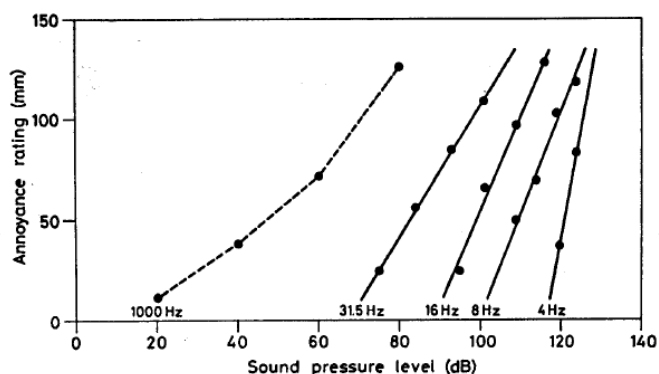
Der er udført et systematisk litteraturstudie af effekten af lavfrekvent støj, jf. [3] og [4]. Forfatterne påpeger, at der indtil da ikke er udført en ajourført systematisk evaluering af fagfællebedømt observationsepidemiologisk litteratur om sammenhængen mellem lavfrekvent støj og sundhed. Artiklen har til formål at udfylde dette hul.

Artiklen konkluderer, at de fundne undersøgelser antyder en sammenhæng mellem eksponering med lavfrekvent støj og støjgene samt forskellige andre symptomer. Resultaterne skal dog fortolkes med forsigtighed på grund af det lille antal undersøgelser. Der kan være sundhedsmæssige virkninger, men beviserne er begrænsede og ikke konkluderbare. Der er behov for mere forskning med flere respondenter og en bedre metodologisk kvalitet med hensyn til eksponering og resultatvurdering.

En systematisk hollandsk litteraturundersøgelse fra 2017, jf. [39], som også refererer til ovennævnte, har fundet bevis for, at lavfrekvent støj har betydning for genevirkning og søvnforstyrrelser, men tilhørende metaanalyser har ikke været i stand til at etablere en egentlig dosis-responsammenhæng. Undersøgelsen viste, at genevirkning forekommer, men resultaterne for søvnforstyrrelser og hjerte-kar-sygdomme kunne ikke konkluderes.

Der findes en del laboratorieforsøg på området. Nogle synes at vise, at de A-vægtede lydtrykniveauer undervurderer den laboratoriemålte gene, i hvert fald ved højere lydtrykniveauer, jf. [42].

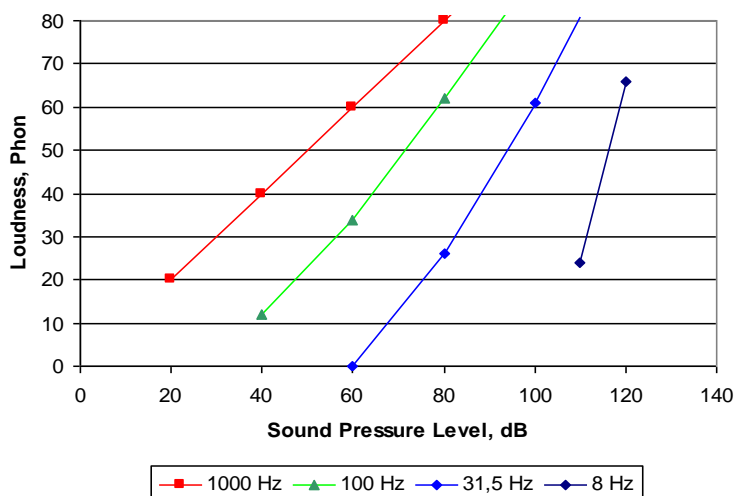
Ved laboratorieforsøg er det også fundet, at støjgenen stiger mere brat med lydtrykniveauet, jo lavere frekvensen er, se Figur 17.



Figur 17 Den gennemsnitlige støjgene (målt i laboratoriet) for 18 forsøgspersoner med normal hørelse. Genen blev angivet på en 15 cm lang svarskala. Stimuli var rene toner ved forskellige frekvenser. Ved 1 kHz var stimulus 1/1-oktavbåndsfiltret støj, jf. [57].

Genekurverne på Figur 17 kan sammenlignes med hørestyrkeniveaukurverne på Figur 18. Det ses tydeligt, at der er tilsvarende sammenhænge, hvilket indikerer, at hørestyrkeniveauet (i hvert fald i laboratorieforsøg) kan være en rimelig indikator for genen.

Et helt nyt studie med kun 7 deltagere har fundet de principielt samme resultater som ovenfor, jf. [68]. Dog lå resultaterne op til 15 dB anderledes for nogle frekvenser.



Figur 18 Sammenhæng mellem lydtrykniveau og hørestyrkeniveau (i Phon). Data i figuren er sammensat fra Figur 5 og [58].

Vibrationer anses for generende, når de kan føles. Tærsklen for netop mærkbare vibrationer ligger omkring $L_{aw} = 71-72$ dB, jf. [53].

Undersøgelser af vibrationers helbredsreaktioner er ofte knyttet til arbejdsmiljø og transport, hvor de forekommende vibrationsniveauer er væsentligt kraftigere end de, der forekommer i forbindelse med vibrationer i det eksterne miljø. Grænser for arbejdsrelaterede vibrationer er fastsat af arbejdstilsynet, jf. [1].

Kraftige helkropsvibrationer er klart forbundet med lændesmerter og kan bidrage til fordøjelses- og vandladningsbesvær. Derfor er der fastsat en grænse (ANSI-standard) for en 8-timers dag på $0,3 \text{ m/s}^2$ i det mest følsomme område, jf. [14]. Det er 38 dB højere end føletærsklen.

Meget kraftige lavfrekvente lyde (100 dB(Lin)) kan føles, men sætter ikke kroppens indre organer i svingninger. Dels er der store tab på grund af de store impedansforskelle mellem luft og kroppen, og dels er der tale om kompressionsbølger med stor bølgelængde, jf. [14].

Balanceorganet (det vestibulære system, buegangene ved det indre øre), som spiller en væsentlig rolle i balancesansen og ved stabilisering af synsindtryk, er følsomt for vibrationer og trykændringer (fx lydtryk) ved forskellige frekvenser. Ved høje lydtrykniveauer (140-170 dB⁹) ved lave frekvenser kan der optræde kvalme samt ændringer i blodtryk og hjerterytme, jf. [5] og [14].

I forbindelse med vurderinger af lavfrekvent støj og infralyd fra fly skal man gøre sig klart, at dette ikke forekommer, uden at der også er støj i det normale hørbare område. Den logiske konsekvens af dette er, at de dosis-responskurver mellem støjniveauer og fx støjgene, der gælder for flystøj, ikke bør "korrigeres" for lavfrekvent indhold, fordi det allerede er indeholdt i den dosis-responskurve, der gælder for denne støjkilde.

⁹ Kilden oplyser ikke, hvilken frekvensvægtning der er brugt. Sandsynligvis er det ikke vægtet (Lin).

Kun for flytyper, fx helikoptere og propelfly, der har et unormalt stort indhold af særlige karakteristika, som fx lavfrekvent støj eller impulser, er det relevant at overveje, om der skal korrigeres for disse effekter i forhold til de generelle dosis-responskurver for flystøj. Det skal dog betones, at overvejelser om brug af korrektioner og mulige beslutninger herom ligger indenfor Miljøstyrelsens ressortområde.

5.5 Gener ved samtidig støj og vibrationspåvirkning

For at beskrive effekten af samtidig støj og vibrationspåvirkning refereres der i dette afsnit til forskellige artikler, hvor kilderne er tog, vejtrafik og fly.

I det følgende refereres dels til en svensk undersøgelse af togvibrationer og støj, jf. [26], og dels en britisk undersøgelse udført for *Department for Environment, Food and Rural Affairs* (DEFRA) om genevirkning af vibrationer. Disse belyser de generelle forhold for gener ved samtidig eksponering for støj og vibrationer.

Konklusionen på de to undersøgelser er:

- En given vibrationsbelastning opleves tydeligt mere generende, hvis støjbelastningen samtidig er høj.
- En given støjbelastning opleves tydeligt mere generende, hvis vibrationsbelastningen samtidig er høj.

I den svenske undersøgelse indgik boligområder med forskellig trafikbelastning fra jernbaner. Formålet var at undersøge, om personer, som både er støj- og vibrationsbelastede, er mere generet af vibrationer end de, som ikke samtidig er støjbelastede. Indvirkningen fra banernes trafikintensitet indgik som en væsentlig parameter sammen med jernbanestøjen ved den mest udsatte facade i form af L_{den} . Konklusionen i disse undersøgelser var:

- Ved samme støjbelastning er befolkningen tydeligt mere generet, hvis der er kraftige vibrationer, end hvis der ikke er vibrationer.
- Ved en støjbelastning på L_{den} 65 dB(A) på den mest støjbelastede facade er procentdelen, der føler sig stærkt generet, omtrent fordoblet i forhold til et område uden vibrationer.

Den forøgelse af genevirkningen, der er ved tilstedeværelsen af kraftige vibrationer, svarer til, at støjen er øget med 5-7 dB i forhold til området, hvor der ingen vibrationsgener er. Dette gælder ved støjbelastning omkring $L_{den} = 60-65$ dB.

De britiske undersøgelser omhandlede primært vibrationer fra jernbaner og anlægsarbejder. Som en del af undersøgelsen indgik samtidig støj- og vibrationsbelastning fra jernbaner.

Også her vises der en generel sammenhæng mellem et givet støjniveau og forskellig vibrationspåvirkning. Ved et givet støjniveau vil andelen af stærkt generede øges med øget vibrationspåvirkning, og ved et givet vibrationsniveau vil andelen af stærkt generede øges med øget støjniveau. Ved en støjbelastning på fx $L_{den} = 65$ dB(A) varierer andelen af stærkt generede mellem ca. 2 % og 15 % afhængigt af vibrationsbelastningens størrelse.

På grund af anvendelsen af andre indikatorer for vibrationspåvirkning (*Vibrations Dose Value* (VDV)) kan dette ikke kvantificeres på samme måde som de svenske undersøgelser.

Generelt kan det konkluderes, at genen af støjen vokser, hvis der samtidig er gener fra vibrationer. De aktuelle niveauer og stigninger i genen kan formodentlig ikke overføres direkte til flystøj, da dosis-responskurverne mellem påvirkning og gene er forskellige for togstøj og flystøj.

I tilfælde, hvor der er flere samtidige støjkilder af forskellig type, fx veje og jernbaner, er der kun en betydende forøgelse af genen, hvis genen fra hver af støjkilderne alene er af omtrent samme størrelse, jf. [41]. For vibrationer, der opstår på grund af høje støjniveauer fra fly i det hørbare område, må det antages, at støjgenerne er væsentligt større end vibrationsgenerne.

Vibrationer kan medvirke til en forøgelse af genen, jf. [5]. Det gælder især, hvis vibrationerne ledsages af hørbar raslen, som kan forstærke genen svarende til 13 dB for lyd fra sprængninger, jf. [69].

En hollandsk undersøgelse med støj fra helikoptere, se afsnit 5.6, viste, at hvis der forekom mærkbare vibrationer, svarede forøgelsen i genen til en stigning af L_{Amax} på 2,5 dB.

5.6 Hollandske overvejelser om genetillæg for raslelyde fra lavfrekvent støj og infralyd

I en hollandsk rapport, jf. [11], har man fundet, at den raslen (*rattle noise*), som helikoptere kan forårsage, gennemæssigt svarer til støj fra helikoptere uden raslen, der er 6 dB højere målt som L_{pAmaxF} .

Raslen opstår ved, at ting i husene (fx løsmonterede ruder i rammerne, fotorammer på væggen, borde eller skabe, hårde genstande i skabe, vaser på borde eller i vindueskarme) kommer i bevægelse og derved genererer yderligere støj (raslen) udover den lavfrekvente støj.

Den raslen, der kan forekomme, optræder typisk i forbindelse med helikopterstøj over et vist niveau. I undersøgelsen, der også er rapporteret i kort form i [38], deltog 60 mænd og 60 kvinder i et forsøg, hvor de inde i tre forskellige huse skulle bedømme genen af flystøj og helikopterstøj. De tre huse var en bungalow (ca. fra 1975), en villa (ca. fra 1930) og en lejlighed (ca. fra 1960). Optagelser af Boeing CH-47 Chinook helikopter, jagerfly (F-16) og en civil Airbus (A-319) blev afspillet på kraftige højttalere med subwoofere udenfor husene. Forsøgspersonerne skulle sammenligne helikopterstøjen med de to andre fly.

Kun helikopterstøjen gav anledning til raslelyde, der forekom ved L_{Amax} -niveauer (tidsvægtning ikke angivet) på 75-85 dB(A), alt efter hvilket af husene der var tale om.

Resultaterne viste, at når der forekom raslelyde fra helikopterstøjen, steg genen svarende til en øgning af L_{pAmaxF} på 6 dB. Hvis der kun forekom vibrationer, svarede stigningen i genen til en øgning af L_{pAmaxF} på 2,5 dB.

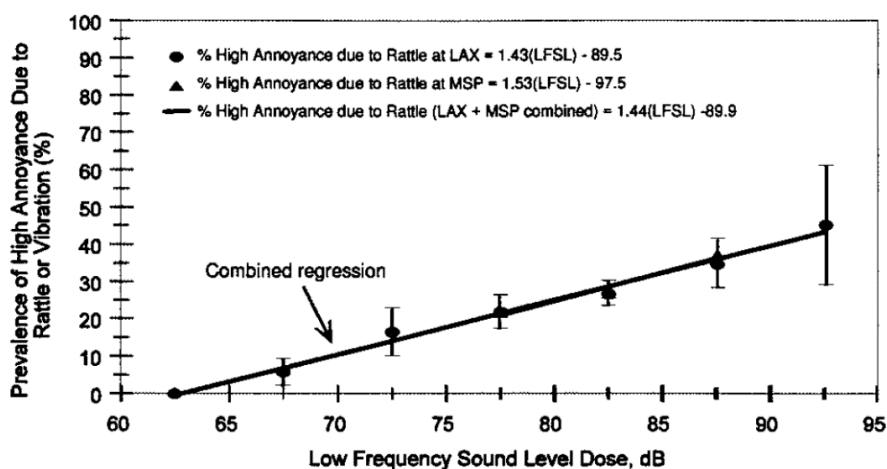
Resultaterne blev sammenlignet med ældre undersøgelser, jf. [70] og [71], som med en anden forsøgsteknik (sammenligning med hvid støj som referencestimulus i stedet for helikopterstøj) fandt geneækvivalente stigninger i lydtrykniveauet på op til 10 dB for helikopterstøjen.

Undersøgelsen konkluderer, at hvis man vil indføre et tillæg på 6 dB til det målte/beregnete niveau af støjen fra helikoptere, bør det kun gives i tilfælde, hvor L_{Amax} på facaden overstiger 75 dB(A).

To amerikanske undersøgelser er foretaget med 495 beboere nær Minneapolis-St. Paul International Airport (benævnt MSP) i 2001 og Los Angeles International Airport i 1999.

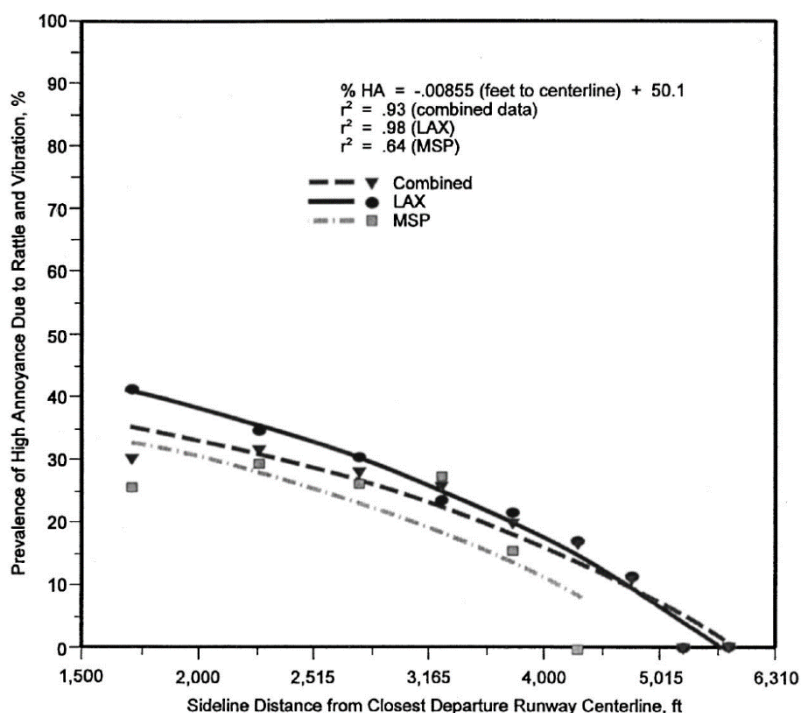
Forfatterne konkluderede, at de største årsager til flystøjinduceret raslen i boliger var vinduer (61 %), vægge (16 %) og billeder (14 %), jf. [16]. Sammenhængen mellem procentdel stærkt generede beboere og lavfrekvensstøjniveauet udendørs er vist i Figur 19.

Den lavfrekvente del af støjen (i frekvensområdet 25-80 Hz) blev i denne undersøgelse beregnet ud fra det målte C-vægtede niveau for en overflyvning. Lydtrykket blev beregnet vha. formlen: *Low Frequency Sound Level* (LFSL) = $0,46 \cdot L_{C,max} + 34,8$ dB. Parameteren LFSL er ikke generelt benyttet i flystøjliteraturen. Den benyttes mest af Sanford Fidell, som er forfatter til ovenstående artikel.



Figur 19 Forholdet mellem A-vægtet lavfrekvent udendørs støj (Low Frequency Sound Level Dose) fra lufthavnene benævnt MSP og LAX og genevirkningen overfor vibrationer og raslen. Y-aksen er procentdel stærk generede, jf. [16].

Figur 20 nedenfor er fra samme undersøgelse. Den viser genevirkningen som funktion af den vinkelrette afstand fra flystartbanen til boligen.



Figur 20 Forholdet mellem den vinkelrette afstand (i ft) fra startbane til boliger og genevirkningen overfor vibrationer og raslen. Y-aksen er procent stærkt generede, jf. [16].

Både i den hollandske undersøgelse om helikopterstøj og den amerikanske undersøgelse om lufthavnstøj konkluderes, at raslen (støjinducerede vibrationer) kan optræde ved udendørs lavfrekvente maksimalværdier på 75 dB(A), hvis det er rimeligt at sammenligne den amerikanske parameter LFLS-dosis med den hollandske L_{pAmaxF} . På Figur 19 svarer en LFLS-dosis på 75 dB(A) til, at 15 % af beboerne er stærkt generet. Dette niveau svarer til en vinkelret afstand til boliger på 1,3 km på Figur 20 baseret på den stiplede kurve for de samlede data fra LAX- og MSP-undersøgelsen.

Ifølge kurven på Figur 19 betyder en reduktion af støjen, der modsvarer et +6 dB-genetillæg for raslen, at kun ca. 10 % af beboerne vil være stærkt generede. Dette svarer til en vinkelret afstand til beboere på 1,4 km ifølge Figur 20.

5.7 Resumé

Støj er defineret som uønsket lyd. Mere støj betyder i gennemsnit højere støjgene, men der er også andre faktorer, der har betydning for støjgenen.

10 % "stærkt generet" kan tages som udgangspunkt ved fastsættelse af grænseværdier, og politisk betragtes det ofte som en acceptabel balance mellem støjgener og andre interesser, at en vis del af den omboende befolkning (10-15 %) vil føle sig "stærkt generet" af støjen fra en flyveplads, jf. [55].

I forbindelse med vurderinger af lavfrekvent støj og infralyd fra fly skal man gøre sig klart, at disse fænomener ikke forekommer, uden at der også er støj i det normale hørbare område.

Den logiske konsekvens af dette er, at de dosis-responskurver mellem støjniveauer og fx støjgene, der gælder for flystøj, ikke bør "korrigeres" for lavfrekvent indhold, fordi det allerede er indeholdt i den dosis-responskurve, der gælder for denne støjkilde. Kun for flytyper, der har et unormalt stort indhold af særlige karakteristika, som fx lavfrekvent støj eller impulser, er det relevant at overveje, om der skal korrigeres for disse effekter i forhold til de generelle dosis-responskurver for flystøj. Det skal dog betones, at overvejelser om brug af korrektioner og mulige beslutninger herom ligger indenfor Miljøstyrelsens ressortområde.

Lavfrekvent støj kan give anledning til støjgener og søvnforstyrrelser. Flere forskellige undersøgelser konkluderer, at der endnu ikke er grundlag for at angive pålidelige sammenhænge mellem lavfrekvent støj og dens effekter. Laboratorieforsøg indikerer, at både for lavfrekvent støj og infralyd hænger støjgenen tæt sammen med den opfattede lydstyrke.

Indendørs vibrationer anses for generende, når de kan føles. Tærsklen for netop mærkbare vibrationer ligger omkring $L_{aw} = 71-72$ dB. Meget kraftige lavfrekvente lyde (100 dB(Lin)) kan føles, men sætter ikke kroppens indre organer i svingninger.

Ved et givet støjniveau vil andelen af stærkt generede øges med øget vibrationspåvirkning, og ved et givet vibrationsniveau vil andelen af stærkt generede øges med øget støjniveau.

For vibrationer, der opstår på grund af høje støjniveauer fra fly i det hørbare område, må det antages, at støjgenerne er væsentligt større end vibrationsgenerne.

Kraftige, lavfrekvente støjniveauer kan give anledning til mærkbare vibrationer i huse. Når der forekommer mærkbare vibrationer samtidig med støjen, forstærkes støjgenen. Støjgenen kan også forstærkes, hvis vibrationerne giver anledning til raslen fra genstande i hjemmet.

I en hollandsk undersøgelse overvejes det at indføre et tillæg til det målte/beregnete niveau af støjen fra helikoptere på grund af en ekstra gene fra evt. raslende genstande i hjemmet. Det fremgår af undersøgelsen, at tillægget kun bør gives i tilfælde, hvor maksimalniveauet af den lavfrekvente støj på facaden overstiger 75 dB(A).

6. Regler om lavfrekvent støj, infralyd og vibrationer

6.1 Generelt

Flystøj reguleres – både i Danmark og flere andre lande – som anden trafikstøj med en gennemsnitsværdi af det A-vægtede støjniveau over døgnet, hvor der lægges 5 dB til støjen om aftenen og 10 dB til støjen om natten, før gennemsnittet udregnes. I Danmark er flystøjniveauet, L_{DEN} , baseret på trafikken for de tre mest trafikerede måneder, hvilket normalt er de mest støjende måneder, hvorimod man i de fleste andre lande beregner støjniveauet, L_{den} , baseret på trafikken for hele året. Dog beregnes støjen fra Forsvarets flyvestationer i Danmark for de tre mest støjende måneder, hvilket for flyvestationer ikke nødvendigvis er det samme som de mest trafikerede måneder. De i Danmark beregnede L_{DEN} værdier er for civile lufthavne ca. 0,5-1,5 dB større, end hvad tilsvarende L_{den} -værdi ville være. Dette svarer til, at andelen af trafikken i de tre mest trafikerede måneder udgør 28-35 % af hele årets trafikmængde. For flyvestationer er denne forskel lidt større, ca. 2-4 dB (oplyst af Forsvarsministeriets Ejendomsstyrelse), men den er mere kompliceret at regne ud, fordi flyvemønstret skifter i løbet af året. Forskellene mellem L_{DEN} og L_{den} skal tages i betragtning, når man sammenligner grænseværdier, genevirkning og sundhedseffekter.

Herudover har mange lande yderligere støjindikatorer for at belyse støjniveauet i natperioden, fx L_{night} og L_{pAmaxF} .

6.2 Regler i Danmark

Flystøj i Danmark reguleres efter Miljøstyrelsens vejledning nr. 5/1994, jf. [55]. De vejledende grænseværdier for en flyvestation, se Tabel 1, er baseret på A-vægtede støjniveauer og gælder for den samlede støjbelastning fra alle flyaktiviteter på en flyvestation, herunder jagerfly, helikoptere, transportfly m.v.

I Miljøstyrelsens vejledning nr. 5/1994 skelnes der mellem støj fra fly i forbindelse med start og landing (start og landing samt taxikørsel i forbindelse med start og landing) og støj fra terminalaktiviteter (alle andre støjklender, herunder taxikørsel i forbindelse med den anden kørsel end start og landing, motorafprøvninger, kørsel med andre typer af køretøjer, stationære støjklender, m.v.).

Flystøjen skal sammenholdes med de vejledende grænseværdier for L_{DEN} i Miljøstyrelsens vejledning nr. 5/1994, se Tabel 1. Lavfrekvent støj og infralyd er en del af den samlede støj, som er reguleret af grænseværdierne, og der er ikke formuleret specifikke krav til disse støjtyper.

Arealanvendelse	Almenflyveplads 1)	Lufthavn 2) Flyvestation 3)
Boligområder og støjfølsomme bygninger til offentlige formål (skoler, hospitaler, plejehjem o.l.)	45dB 4)	55 dB
Spredt bebyggelse i det åbne land	50 dB	60 dB 5)
Liberale erhverv (hoteller, kontorer o.l.)	60 dB	60 dB
Rekreative områder med overnatning (sommerhuse, kolonihaver, campingpladser o.l.)	45 dB	50 dB
Andre rekreative områder uden overnatning	50 dB	55 dB

Tabel 1 Vejledende grænseværdier for støjbelastning udendørs fra startende og landende fly beregnet efter DENL-metoden, jf. Miljøstyrelsens vejledning nr. 5/1994, jf. [55].

I Miljøstyrelsens vejledning nr. 5/1994 skelnes der blandt de vejledende grænseværdier mellem almenflyveplads og lufthavn/flyvestation (tallene henviser til noterne i Tabel 1):

- 1) Almenflyveplads – flyveplads, hvor trafikken næsten udelukkende består af almenflyvning (civilflyvning foruden trafik- og charterflyvning) og specielle trafik kategorier som skoleflyvning m.v.
- 2) Lufthavn – flyveplads, hvor en væsentlig del af trafikken består af erhvervsmæssig transport af passagerer, fragt og post med store fly.
- 3) Flyvestation – flyveplads, der udelukkende eller hovedsageligt beflyves af Forsvarets luftfartøjer. Der kan være tale om særlige hensyn for militære flyaktiviteter, jf. afsnit 1.1.2 i Miljøstyrelsens vejledning nr. 5/1994.

Det er desuden for spredt bebyggelse i det åbne land bemærket (ad. note 5) at: *"Nye boliger bør som udgangspunkt ikke lægges, hvor støjbelastningen (L_{DEN}) er over 55 dB eller maksimalværdien (L_{Amax}) er over 70 dB."*

Ud over de vejledende grænseværdier for L_{DEN} bør for starter og landinger om natten tilstræbes, at maksimalværdien af det A-vægtede lydtrykniveau ikke overstiger 80 dB(A) for flyvestationer. For taxikørsel i forbindelse med start og landing tilstræbes, at maksimalværdien ikke overstiger 70 dB(A) i boligområder og rekreative områder med overnatning.

Støj fra terminalaktiviteter reguleres i henhold til Miljøstyrelsens vejledning nr. 5/1984, jf. [52], hvori der findes vejledende støjgrænser for støjbelastningen L_r (støjbelastningen er L_{Aeq} plus et eventuelt genetillæg på 5 dB for tydeligt hørbare toner og/eller impulser).

Der er hverken i Miljøstyrelsens vejledning nr. 5/1994, jf. [55], eller i Miljøstyrelsens vejledning nr. 5/1984, jf. [52], særskilte grænser for lavfrekvent støj eller infralyd, men Miljøstyrelsen har i 1997 foreslået grænseværdier for lavfrekvent støj, infralyd og vibrationer i det eksterne miljø hidrørende fra virksomheder, jf. [53], som gengivet i Tabel 2 og Tabel 3.

Disse orienterende grænseværdier er relevante at benytte i forbindelse med terminalaktiviteter, der som nævnt reguleres som virksomhedsstøj. For den øvrige flystøj (start, landing og dertil hørende taxikørsel) er der i Danmark hverken for den civile eller militære luftfart grænseværdier eller præcedens for at regulere lavfrekvent støj og infralyd separat.

Anvendelse		A-vægtet lydtrykniveau (10-160 Hz), dB	G-vægtet infralydniveau, dB
Beboelsesrum, herunder i børneinst. og lignende	aften/nat (kl. 18-07)	20	85
	dag (kl. 07-18)	25	85
Kontorer, undervisningslokaler og andre lignende støjfølsomme rum		30	85
Øvrige rum i virksomheder		35	90

Tabel 2 Foreslåede grænseværdier for lavfrekvent støj ($L_{PA,LF}$) og infralyd (LG) i det eksterne miljø i dB re 20 μ Pa hidrørende fra virksomheder, jf. [53]. Måleperioden er 5-10 minutter og referencetidsrummet er 10 minutter.

Anvendelse	Vægtet accelerationsniveau, L_{av} i dB
Boliger i boligområder (hele døgnet), Boliger i blandet bolig/erhvervsområde kl. 18-7 Børneinstitutioner og lignende	75
Boliger i blandet bolig/erhvervsområde kl. 7-18 Kontorer, undervisningslokaler, o.l.	80
Erhvervsbebyggelse	85

Tabel 3 Foreslåede grænseværdier for vibrationer i det eksterne miljø i dB re 1 μ m/sek² hidrørende fra virksomheder. Grænserne gælder for det maksimale KB-vægtede accelerationsniveau (L_{av}) med tidsvægtning Slow, jf. [53].

Reguleringen af den samlede støj fra Flyvestation Skrydstrup, som skal huse F-35 flyet i Danmark, er udmøntet i bekendtgørelse nr. 940 om støj fra Flyvestation Skrydstrup, jf. [20]. Den samlede støj fra Flyvestation Skrydstrup er endvidere behandlet i en miljøkonsekvensvurdering, jf. [21] og [22], samt i en væsentlighedsvurdering omhandlende ændring af Flyvestation Skrydstrup (udarbejdet i juni 2019), jf. [23].

Hurtigfærger

Dag/aften/nat-niveauet, L_{DEN} , og maksimalniveauet, L_{AFmax} , svarer til de støjmål, der benyttes ved vurdering af flystøj.

For hurtigfærger er der i Bekendtgørelse nr. 1735, jf. [45], angivet grænser for lavfrekvent støj som vist i Tabel 4. Grænserne er angivet for støjen indendørs.

Anvendelse	A-vægtet lydtrykniveau (10-160 Hz), dB	
Beboelsesrum, herunder i børneinstitutioner og lignende	aften/nat (kl. 18 - 07)	25
	Dag (kl. 07 – 18)	30
Kontorer, undervisningslokaler 35 og andre lignende støjfølsomme rum	35	
Øvrige rum i virksomheden		

Tabel 4 Vejledende grænseværdier for lavfrekvent støj fra hurtigfærger i dB(A) re 20 μ Pa. Grænserne gælder for støjen indendørs, jf. [45]. Grænseværdierne gælder for det maksimale A-vægtede lydtrykniveau (i frekvensområdet 10-160 Hz) indendørs midlet over et tidsrum på 2 minutter ($L_{pA,LF}$).

Kildestyrken fra hurtigfærger måles for repræsentative delstrækninger på færgens rute, og midlingstiden er ca. 1 minut. Støjudbredelsen fra hurtigfærger beregnes med den nordiske beregningsmodel til beregning af industristøj, jf. [51]. Det beregnede lavfrekvente udendørs støjbidrag ved boliger korrigeres til et indendørs støjbidrag med værdierne i 1/1-oktavbånd angivet i Tabel 9.

Hurtigfærger er – ligesom fly – karakteriseret ved ikke-stationær støj. Støjudbredelsen fra færger foregår dog tæt over terræn/vand i modsætning til støjudbredelsen fra fly, som efter *take-off* opererer i en højere højde, hvor terrænets lyddæpende egenskaber har minimal betydning. Støjen beregnes i hele frekvensområdet, men ved lave frekvenser har højdens indflydelse dog mindre betydning for terrændæmpningen ved støjudbredelsen.

Vindmøller

Støjudbredelsen fra vindmøller er karakteriseret ved, at støjkilden befinder sig i en forholdsvis stor højde over terræn/vand. I Bekendtgørelse nr. 135, jf. [46], er angivet en metode til beregning af udbredelsen af lavfrekvent støj baseret på Nord2000-metoden, jf. [66] og [67]. Det beregnede lavfrekvente støjbidrag udendørs ved boliger omregnes til et indendørs støjniveau vha. tabelværdier for lydisolations angivet i 1/3-oktavbånd fra 10-160 Hz, som både er angivet for boliger og for sommerhuse. Støjgrænsen for den lavfrekvente støj $L_{pA,LF}$ fra vindmøller er 20 dB(A). Vindmøllestøj er dog at betragte som stationær støj i modsætning til den varierende støj fra flypassager.

6.3 Regler i Norge

Ekstern støj reguleres i Norge efter retningslinjerne angivet i T-1442, jf. [47], og den tilhørende vejledning fra Miljødirektoratet M-128/2014, jf. [48], herunder også flystøj. Der er heri ikke særskilte grænser for lavfrekvent støj eller infralyd.

Der anvendes i Norge støjindikatoren, L_{den} , for trafikstøj (veje, fly og tog). Derudover benyttes et tillægskriterium for maksimalniveauet, L_{5AS} , i natperioden, der tager højde for særligt støjende hændelser i trafikken. L_{5AS} er en statistisk parameter, der angiver det A-vægtede lydtrykniveau målt med tidsvægtning S (*Slow*), (se under tidsvægtning i afsnit 2.2), der overskrides i 5 % af hændelserne i løbet af en natperiode.

I Norge anvender kommunerne til planlægningsformål en zoneopdeling til at synliggøre støjen i kommunen. Røde zoner illustrerer fx tætte byområder eller områder med industri, og støjgrænsen for flystøj er her sat til $L_{den} = 62$ dB(A) og $L_{5AS} = 90$ dB(A).

Gule zoner er fx boligområder og støjgrænsen er her $L_{den} = 52 \text{ dB(A)}$ og $L_{5AS} = 80 \text{ dB(A)}$. Grønne zoner angiver stilleområder, hvorom der dog ikke angives nogen støjgrænse. Beregningshøjden for støjzoner er 4 m.

Der stilles i T-1442 ikke krav til det indendørs støjniveau, men der henvises til den byggetekniske forskrift NS 8175 fra Norsk Standard, jf. [62]. Heri findes i Tillæg A vurderingskurver (RC-kurver) til påvisning af lyde, der giver anledning til generende vibrationer, og der angives grænser for "klart følbare" og "lidt følbare" støjinducerede vibrationer i lette konstruktioner. Grænser for, hvilke lydtryk niveauer der kan give anledning til de "klart følbare" vibrationer, er sat til 75 dB(A) i hvert af 1/1-oktavnåbne 16 Hz og 31,5 Hz, og 80 dB(A) i 1/1-oktavnåbnet 63 Hz. Grænserne for "lidt følbare vibrationer" er angivet til at være 10 dB lavere for alle tre oktavnåbne end for "klart følbare" vibrationer.

6.4 Resume

I Danmark og i Norge er lavfrekvent støj og infralyd indeholdt i totalstøjen, hvor gennemsnitsstøjen er reguleret i støjvejledninger og retningslinjer. Der findes for flystøj ingen særskilte grænseværdier for lavfrekvent støj eller infralyd.

Terminalstøj reguleres i Danmark på samme måde som virksomhedsstøj, hvorom der findes foreslåede grænseværdier for lavfrekvent støj, infralyd og vibrationer i Orientering fra Miljøstyrelsen nr. 9/1997, jf. [53].

Reguleringen af den samlede totalstøj fra Flyvestation Skrydstrup, som skal huse F-35 flyet i Danmark, er udmøntet i bekendtgørelse nr. 940 om støj fra Flyvestation Skrydstrup, jf. [20], som finder anvendelse på både flystøj og terminalstøj.

I bekendtgørelsen for hurtigfærger, jf. [45], og vindmøllebekendtgørelsen, jf. [46], findes der beregningsmetoder og tabelværdier for lydisolering, der gør det muligt at beregne den lavfrekvente støj indendørs ud fra det udendørs støjniveau.

7. Beregningsmetoder

De almindelige beregningsmetoder for støjuddbredelse fra fly, der er tilgængelige (fx Miljøstyrelsens vejledning nr. 5/1994, jf. [55], ECAC Doc 29, jf. [13], INM m.v.) beregner totalstøjen (L_{Aeq} , L_{DEN} , L_{Amax} mv.). Der er ikke nogen af disse, som separat beregner lavfrekvent støj, infralyd eller vibrationer.

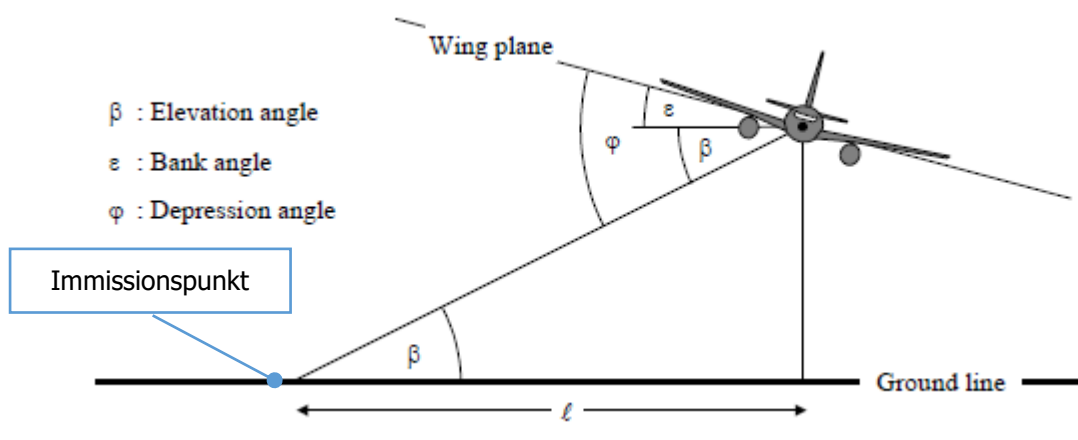
7.1 Beregningsmetoder for støj fra flyvning

I Danmark regnes støj fra selve start- og landingsoperationerne samt taxikørsel i forbindelse med start og landing som flystøj.

Beregningsmetoderne, der er specificerede eller benyttes i CNOSSOS-EU, jf. [12], ECAC doc 29 4. udgave, jf. [13], samt INM/AEDT, benytter sammenlignelige metoder til beregning af støjuddbredelsen af flystøj. Den gældende vejledning for flystøj, jf. [55], i Danmark har en lignende metodik, selvom de andre nævnte metoder er mere forfinede. Alle disse metoder benytter støjdata fra NPD-tabeller (Noise-Power-Distance) med tabulerede støjværdier for specifikke motorindstillinger og afstande for hver flytype.

De støjdata, der er angivet i disse tabeller, er forudberegnete/målte og svarer til, at et fly passerer lige over en mikrofon, der er placeret 1,2 m over akustisk blødt terræn, hvor flyets højde er lig med den afstand, der er specificeret i NPD-tabellen. Når et immissionspunkt befinder sig et andet sted end lige under flyet, benyttes en metode til at beregne en lateral dæmpning (forskel i lydtrykniveau mellem at flyet er lige ovenfor, og at flyet befinder sig et sted med en vis horisontal afstand til immissionspunktet). Den laterale dæmpning er defineret i [12] som en funktion af den horisontale afstand mellem fly og immissionspunkt og vinklen mellem det vandrette plan og sigtelinjen mellem fly og immissionspunkt, se l og β i Figur 21. Den beregnes således uafhængigt af flyets frekvensspektrum.

Udover de nævnte metoder findes der andre metoder for at beregne lydudbredelse, som kan beregne mere nøjagtigt, men disse er ikke sammenlignelige med den i vejledningen, jf. [55], angivne metode.



Figur 21 Definition af vinkler og afstand mellem fly og immissionspunkt.

Det bør nævnes, at titlen på [13] er *Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports*, og at der i rapporten står følgende: "Calculated levels at 4 m or higher are sometimes requested. Comparison of measurements at 1.2 m and 10 m and theoretical calculation of ground effects show that variations of the A-weighted sound exposure level are relatively insensitive to receiver height. The variations are in general smaller than one decibel, except if the maximum angle of sound incidence is below 10° and if the A-weighted spectrum at the receiver has its maximum in the range of 200 to 500 Hz." Der er i [13] beskrevet en metode til at korrigere støjdata. Den citerede tekst indikerer, at denne korrektion skulle bruges, når der beregnes støj fra flytyper med forholdsvis stor andel lavfrekvent støj (fx helikoptere og propelfly). Denne korrektion er ikke en del af den gældende metode for beregning af støj fra fly i Danmark.

7.2 Lavfrekvent støj, infralyd og vibrationer på terminalstøjberegninger

Terminalstøjberegninger omfatter blandt andet alle stationære og ikke stationære kilder på en flyvestation og støjen fra opstartsprocedurer, der foregår før start af flyene. Kun taxikørsel til og fra baner i forbindelse med start og landing samt selve start- og landingsoperationerne beregnes som flystøj, se afsnit 6.2 og 7.1.

Der findes i Danmark ikke nogen officielt godkendt separat metode til beregning af lavfrekvent støj, infralyd eller vibrationer fra fly.

I den fælles nordiske beregningsmetode, jf. [51], som er den metode, som vejledningen specificerer, skal bruges til støj fra virksomheder i Danmark, herunder terminalstøj, benyttes information om støjklunders frekvensspektrum, hvorfor der tages højde for evt. lavfrekvent støj ned til 50 Hz. Såfremt det er nødvendigt at regne lavfrekvent støj ned til 10 Hz, vil det være nødvendigt at benytte en anden metode, som ikke er godkendt af Miljøstyrelsen.

Som beskrevet i afsnit 4.4 vil den lavfrekvente relative andel af støjen stige med afstanden på grund af luftabsorptionen, der dæmper den lavfrekvente del af støjen betydeligt mindre end den mere højfrekvente del.

Dette medfører, at støjen i store afstande potentielt kan være meget lavfrekvent. Støjskærme håndteres normalt i beregningsmetoderne som faste objekter, som støjen passerer over og rundt om. Dette er normalt en fornuftig antagelse, når der er tale om almindelige støjklunder og moderate støjniveauer. Dog vil der gennem støjskærme og lignende objekter altid være en mulighed for, at støjen transmitteres gennem om end som dæmpet støj. For støjskærme gælder generelt i lighed med lydisolerende bygningsdele som fx vinduer, døre og facader, at lydisolationen er større for høje frekvenser end for lave frekvenser. Der forudsættes her, at støjskærmen er tæt og tilstrækkelig høj. En skærm med større fladevægt dæmper generelt bedre end en skærm med mindre fladevægt. Fordi støjniveauet kan være meget højt og derved nå større afstande, samtidig med at frekvensindholdet bliver mere lavfrekvent, kan det være nødvendigt at benytte støjskærme med større fladevægt end de 10 kg/m², som normalt anbefales. Specielt hvis man ganske tæt på en kraftigt støjende kilde (fx en prøvestand til jetmotorer) ønsker at opføre en støjafskærmning, skal denne opføres i tunge materialer.

7.3 Resume

Flystøjberegningerne omfatter selve start- og landingsoperationerne samt taxikørsel i forbindelse med start og landing.

Den gældende beregningsmetode for flystøj i Danmark tager ikke specielt højde for fly (fx helikoptere), der har en større andel af lavfrekvent støj eller infralyd end almindelige jetfly.

Terminalstøjberegninger omfatter blandt andet alle stationære og ikke stationære kilder på en flyvestation og støjen fra opstartsprocedurer, der foregår før start af flyene.

De beregningsmetoder, der er gældende for terminalstøj, herunder opstartsprocedurer med F-16 og F-35, tager højde for lavfrekvent støj, jf. [51]. Den fælles nordiske metode kan regne ned til 50 Hz.

Der findes i Danmark ikke nogen særskilt officielt angiven metode til beregning af lavfrekvent støj, infralyd eller vibrationer fra fly, som er godkendt af Miljøstyrelsen.

Det anbefales, at en støjafskærmning skal opføres i tunge materialer ved en kraftigt støjende kilde (fx en prøvestand til jetmotorer).

8. Lydisolation mod lavfrekvent støj og infralyd

Lydisolation af bygningsdele er oftest beskrevet i frekvensområdet 100-5.000 Hz, og viden om lavfrekvent lydisolation i området 10-160 Hz er derfor begrænset. De typiske anvendte betegnelser for bygningers lydisolation, R'_w og R_w , kan derfor anvendes til at betegne den generelle lydisolation af bygningsdele, men ikke nødvendigvis lydisolationen for lavfrekvent støj eller infralyd. Begreberne for lydisolation er beskrevet i afsnit 2.4.

I Norge har der typisk været anvendt 3 forskellige normtal for facadelydisolation afhængigt af lufthavnstype til brug for zoneopdeling af arealudnyttelse i kommuner. I 2018 er dette udvidet til 5 forskellige normtal grundet indføringen af helikoptertypen Sikorsky S-92. Estimering af det indendørs støjniveau foretages på basis af det beregnede eller målte døgnækvivalente støjniveau udendørs, $L_{pAeq,24t}$, fratrukket facadens lydisolation angivet i Tabel 5.

Flyplastype/vanlig anvendelse	Dominerende flytype	Minimum fasadeisolasjon i vanlig bebyggelse* [dBA]
Regionale flyplasser	Propellfly	22
Stamruteplasser med mil jagerfly	Eldre jetfly og jagerfly	27
Stamruteplasser	Støysvake fly	27
Offshoretransport	Sikorsky S-92	20
Annen anvendelse i Norge	Andre typer helikoptre	23

* Normalt forekommende isolasjonsverdier i eksisterende bebyggelse er ofte høyere.

Tabel 5 Minimumstal for nødvendig lydisolation overfor flystøj. Fra vejledning til retningslinje for behandling af støj i arealplanlægning, T-1442, jf. [49].

Af tabellen fremgår ikke en kategori for militærfly alene, men en kategori med "stamruteflyplass med militære jagerfly". I denne kategori er facadeisolationen i version af vejledning T1442 fra 2005 på 23 dB, jf. [48]. Af [19] fremgår det på baggrund af foreliggende informationer om støj fra F-35, at normtallet for minimum facadelydisolation kan hæves til 25 dB. I revisionen af 2018 er den nødvendige lydisolation for denne kategori dog hævet til 27 dB. Der understreges yderligere, at normtallene er konservative, og at de normalt forekommende lydisolationsverdier oftest er højere.

I forbindelse med rapporten "Ny viden om lavfrekvent lydisolation af boliger i områder med vindmøller", jf. [54], udgivet af Miljøstyrelsen 2017 er der udført målinger og et litteraturstudie af lavfrekvent lydisolation. Af litteraturstudiet fremgår det, at de danske undersøgelser skiller sig ud ved at indeholde data for lydisolation i frekvensområdet 10-100 Hz.

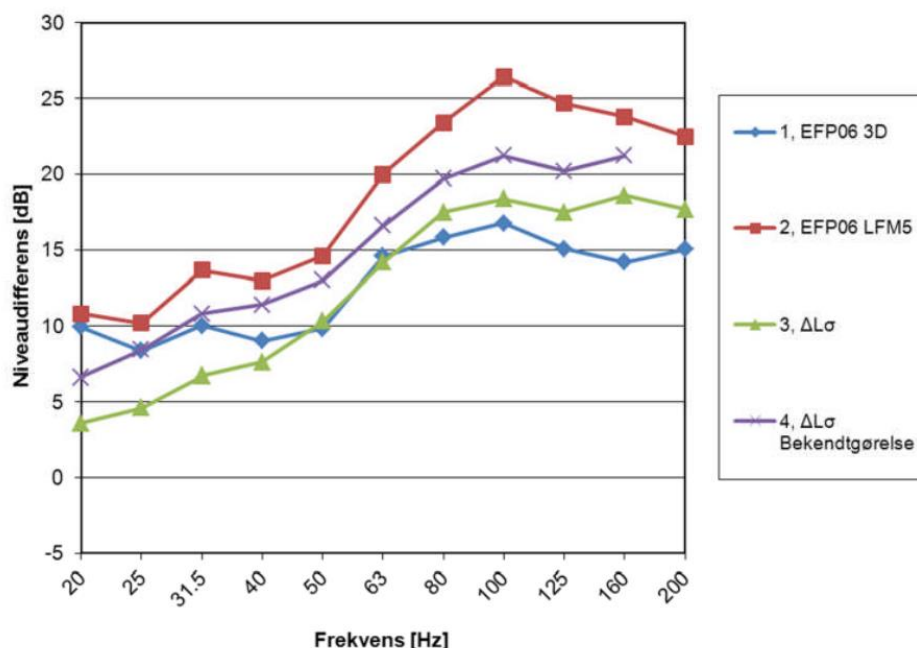
I litteraturundersøgelsen fremgår det, at der i Norge er foregået en del undersøgelser omkring lavfrekvent lydisolation med udgangspunkt i trafikstøj, støj fra militære fly og sprængninger, jf. [44] og [61].

I de fleste undersøgelser af lavfrekvent lydisolations er det facader inkl. vinduer, der er undersøgt. I EFP06-projektet, jf. [29], er målingerne foretaget af facadernes lydisolations under antagelsen af, at lydisolations gennem tag, loftrum og loft tilsammen yder en højere lydisolations end facaden. Dette bekræftes af laboratoriemålinger udført af SINTEF, jf. [30], hvor lydisolations for tage ikke kommer under 20 dB i området 50-200 Hz, mens det for facader kan være 10 dB eller lavere i samme frekvensområde, jf. [65].

I [65] er samlet forskellige undersøgelser af lavfrekvent lydisolations. I Tabel 6 og Figur 22 er vist en række data for lavfrekvent støjreduktion for bygningsfacader. Data kan benyttes ved vurdering af bygningers støjreduktion, fx i forbindelse med beregning af indendørs støjniveau fra vindmøller. Da der kan foretages forskellige betragtninger for anvendelse af den mest hensigtsmæssige målemetode, skal lydisolations ses i relation til, hvilke målemetoder de er udviklet til.

Data-sæt	Reference	Frekvens [Hz]										
		20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
1	EFP06, 3D [29]	9,9	8,3	10,0	9,0	9,8	14,6	15,8	16,8	15,1	14,2	15,0
2	EFP06, LFM5 [29]	10,8	10,2	13,7	13,0	14,6	20,0	23,4	26,4	24,7	23,8	22,5
3	ΔL_{σ} [28]	3,6	4,6	6,7	7,6	10,3	14,2	17,5	18,4	17,5	18,6	17,7
4	ΔL_{σ} Bekendtgørelse [50]	6,6	8,4	10,8	11,4	13,0	16,6	19,7	21,2	20,2	21,2	-

Tabel 6 Data for lavfrekvent lydniveaudifferens for bygninger. Niveaudifferens i dB per 1/3-oktav. Datasæt 1 er baseret på indendørs måling i fire 3D-positioner. Datasæt 2 til 4 er baseret på indendørs måling i et hjørnepunkt og to opholds-positioner, jf. [65].



Figur 22 Data for lavfrekvent lydniveaudifferens for bygninger. Niveaudifferens i dB per 1/3-oktav. Datasæt som i Tabel 6, jf. [65].

Lavfrekvent lydisolations er i disse studier defineret som lydniveaudifferensen mellem et uden-dørs frit felt lydniveau og et indendørs, energimidlet lydniveau målt i møbleret rum uden korrektion for efterklangstid. Dette svarer til udtrykket "indsætningsdæmpning".

Beskrivelser af måledata i Tabel 6 er fra [65].

"Datasæt 1 stammer fra EFP06-målingerne udført af DELTA, jf. [29]. De angivne data er en middelværdi for 10 rum i 5 huse. Bruges data som disse, må kravfastsættelsen til det indendørs støjniveau tage højde for, at niveauet måles i 3D-positioner, der i nogle dele af det lavfrekvente frekvensområde (fra 50-200 Hz) giver 5-10 dB højere støjniveauer end målinger, der foretages i opholdspositioner og almindelige hjørnepositioner.

Datasæt 2 i Tabel 6 hidrører fra de samme målinger blot med andre indvendige målepositioner - dog mangler data for et enkelt rum i den anførte middelværdi. Der er ved målingerne anvendt en hjørneposition og to opholdspositioner i rummet. Dette svarer overens med de af Miljøstyrelsen i orientering om lavfrekvent støj, jf. [53] fastlagte positioner. Benyttes data som disse, må lavfrekvensstøjgrænser fastsættes under hensyn til dette valg af målepositioner.

Datasæt 3 er fremkommet ved en statistisk behandling af resultaterne fra [6] og [29] og omfatter 26 rum i 14 boliger. Data, der er beregnet som middelværdien minus standardafvigelsen, er gengivet fra artikel [28]. Data svarer ifølge artiklen til, at 80-90 % af typiske danske boliger har en lydisolations ved lave frekvenser, der overstiger disse værdier.

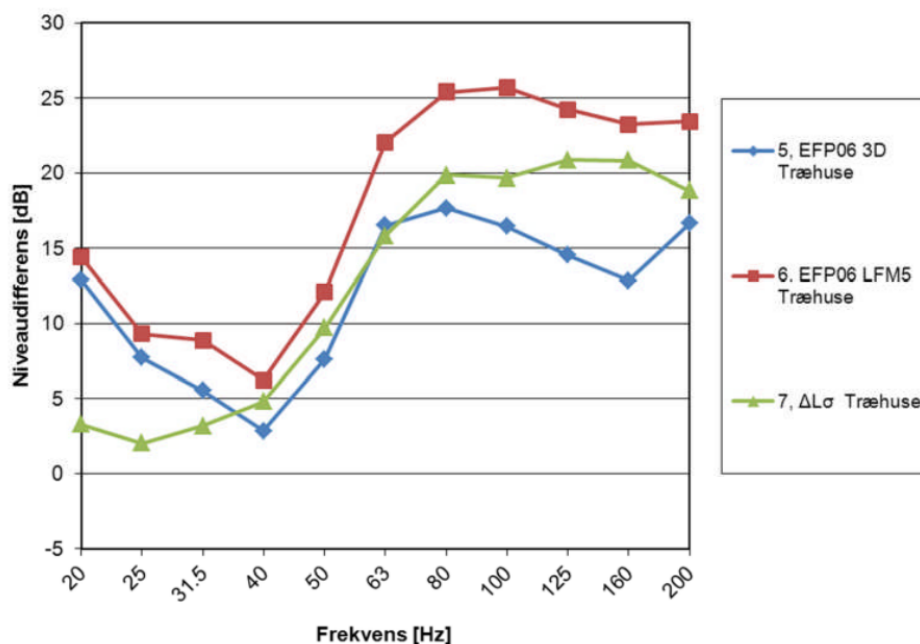
Data i datasæt 3 er efter yderligere statistisk bearbejdning blevet en del af grundlaget for de nye danske støjgrænser fastsat i vindmøllebekendtgørelsen, jf. [50]. Disse lydisolationsdata er vist i datasæt 4. Ifølge vejledning til vindmøllebekendtgørelsen, jf. [56], er de anførte værdier af lydisolations i bekendtgørelsen valgt, så 67 % af måleresultaterne fra de to måleserier (omtalt her) er højere end tabelværdierne."

I forbindelse med de omtalte norske undersøgelser, jf. [65], er lydisolationsdata tilpasset til norske forhold, hvor der vurderes, at andelen af huse med træskeletfacade er mere udbredt.

I Tabel 7 er der fra DELTA's målinger, jf. [6], [27] og [29], uddraget data fra 7 målerum i 4 huse med lette træfacader og vinduer med termoruder. De tilsvarende data er vist i kurveform i Figur 23. Datasæt 5 viser middelværdien af niveaudifferensen fra EFP06-projektet for målinger med 3D-hjørnepositioner for 4 rum i 2 boliger med lette facader. Datasæt 6 giver tilsvarende fra EFP06-projektets målinger middelværdien af niveaudifferensen for indendørs målinger med en hjørneposition og to udvalgte opholdspositioner.

Data-sæt	Reference	Frekvens [Hz]										
		20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
5	EFP06 3D Træhuse	12,9	7,7	5,5	2,9	7,6	16,5	17,7	16,5	14,6	12,8	16,7
6	EFP06 LFM5 Træhuse	14,4	9,3	8,9	6,2	12,1	22,1	25,4	25,7	24,3	23,3	23,5
7	ΔL_{σ} Træhuse	3,3	2,0	3,2	4,8	9,7	15,9	19,9	19,7	20,9	20,8	18,9

Tabel 7 Data for lavfrekvent lydniveaudifferens for bygninger med træfacader og vinduer med termoruder. Frit felt ude/inde niveaudifferens i dB per 1/3-oktav. Datasæt 5 er baseret på indendørs måling i fire 3D-positioner. Datasæt 6-7 er baseret på indendørs måling i et hjørnepunkt og to opholdspositioner, jf. [65].



Figur 23 Data for lavfrekvent lydniveaudifferens for bygninger med træfacader og vinduer med termoruder. Frit felt ude/inde niveaudifferens i dB per 1/3-oktav. Datasæt som i Tabel 7, jf. [65].

Siden litteraturundersøgelsen, jf. [54], er der i Finland, jf. [40], udført målinger af facaders lydisolations med udgangspunkt i undersøgelserne i Danmark. Målingerne i Finland er foretaget, fordi der har været usikkerhed, om de danske målinger er repræsentative for typiske facader i Finland. I det finske studie er der målt på 26 facader fordelt på murede-, træ- og bjælkefacader med og uden vinduer. De finske studier har med udgangspunkt i de danske studier haft fokus på at opnå et bedre signal-støjforhold i frekvenser under 20 Hz, hvilket har været en udfordring i nogle af de danske studier. Dette er lykkedes i Finland, men grundet forskelle i byggestil er det ikke sikkert, at måleresultaterne kan overføres til danske forhold. I det finske studie har der ligesom i de danske været fokus på, hvilke måle- og beregningsmetoder, der vil være de mest repræsentative. Der er i Finland anvendt en metode, der i høj grad er sammenlignelig med metoden i den danske vindmøllebekendtgørelse, jf. [46]. Data svarer ifølge artiklen til, at 84 % af typiske finske boliger har en lydisolations ved lave frekvenser, der overstiger disse værdier. Resultaterne af målingerne er vist i Tabel 8.

Frekvens [Hz]																
5	6,3	8	10	12	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
5,5	5,7	5,9	6,2	6,6	7,1	7,6	8,3	9,2	10,3	11,5	13,0	14,8	16,8	18,8	21,1	22,8

Tabel 8 Data for lavfrekvent lydniveaudifferens for et udsnit af finske facader i dB per 1/3-oktav, jf. [40].

For hurtigfærger er der i Bekendtgørelse nr. 1735, jf. [45], givet lavfrekvente lydisolationsværdier til beregning af det indendørs støjniveau på basis af det udendørs støjbidrag ved boliger som vist i Tabel 9 i 1/1-oktavbånd.

Oktavbånd, Hz	16	31,5	63	125
Korrektion ude/ inde, dB	3	3	12	18

Tabel 9 Forskel mellem lydtrykniveauet udendørs i praktisk frit felt og indendørs i dB anvendes til at korrigere det målte eller beregnede lavfrekvente udendørs støj-niveau, jf. [45].

8.1 Forbedring af lydisolations

Det er muligt at "støjsikre" huse ved at forbedre lydisolations mod lavfrekvent støj. Udskiftning af vinduer og opstilling af forsatsvægge kan give 0-12 dB forbedring af lydisolations i det lavfrekvente område (20-200 Hz), jf. [54].

Hvilken støjsikring af huse, der er mulig at udføre, afhænger som udgangspunkt af husenes opbygning. Derfor er tiltagene for forøgelse af husenes lydisolations ligesom i foregående afsnit meget regionalt præget.

I Norge er der udført undersøgelser i relation til trafik, vindmøller, sprængninger og støj fra militære fly. De norske projekter resumeres i [54]:

"De norske laboratoriemålinger er en opdatering af laboratoriedata for eksisterende facader, vinduer, tage og udeluftventiler og inkluderer målinger af foranstaltninger til forbedring af lydisolations for de eksisterende bygningsdele. Det store måleprogram omfatter 17 facadevarianter, 40 vinduesmålinger, 29 varianter af tagkonstruktioner og 36 varianter af udeluftventiler i åben og lukket tilstand. Alle måleresultater er angivet fra 50 Hz, men enkelte målinger af en let facadetype med forskellige forbedringer er gennemført ned til 31,5 Hz. Herudover er der i forbindelse med projekterne om lavfrekvent støj fra militære aktiviteter, se herom nedenfor, udført målinger ned til 10 Hz for udvalgte konstruktioner.

De norske projekter om lavfrekvent støj fra militære aktiviteter omhandler mulighederne for forbedring af lydisolations for huse blandt andet ved meget lave frekvenser. Det skal bemærkes, at støjbelastningen i det norske projekt - til forskel fra vindmøllegenereret lavfrekvent støj - stammer fra hændelser med høje og/eller impulsagtige lydtryk - fra flypassager og sprængninger. Projektet viser blandt andet, at den lavfrekvente støj transmitteret gennem facade og tag genererer vibrationer i bygningens gulv. Det primære virkemiddel til at reducere gulvets vibrationer er at øge den lavfrekvente lydisolations gennem øget stivhed af lette tag- og facadekonstruktioner, men også husets lufttæthed indgår. Projekterne omfatter feltmålinger, laboratoriemålinger, teoretiske FEM-analyser (Finite Element Method), og senest feltforsøg med intervention i et hus."

I forbindelse med reguleringsplanen for Ørland Hovedflystation er der set på at øge stivheden af facader og tag på huse med trækonstruktioner, jf. [18]. Teorien er, at trykbølgerne fra jagerflyene overføres via luften og exciterer bygningens tag og facade. Svingningerne kan, hvis de er kraftige nok, medføre et indendørs lydtryk, der igen kan sætte lette træbjælkelag i svingninger.

Disse svingninger kan opleves som vibrationer. Svingningerne i lette træbjælkelag kan medføre, at (indhold i) skabe og andet, der står på gulv eller fæstnet til vægge, genererer raslende støj. De bygningsmæssige tiltag mht. lydreduktion er dokumenteret i forskningsrapport udarbejdet af Norges Geologiske Institut (NGI), og er opsummeret med følgende tiltag til forøgelse af konstruktionernes stivhed:





- 100 mm stålprofiler skrues og limes udvendigt på vægstolperne eller uden på tagspærene.
- 22 mm plader af krydsfiner limes og skrues på stålstoelperne.

Det fremgår yderligere af [19], at der er grundlag for at øge lydisoleringen med størrelsesordenen 10 dB for facader med vindue. Udgangspunktet er en trækonstruktion, som forstærkes med ovenstående tiltag, og at vinduer skiftes fra rudeopbygningen 4-12-4¹⁰ ($R_w + C_{tr} = 29$ dB) til specielle lydrunder med opbygningen 8-18-4/1/4¹¹ ($R_w + C_{tr} = 38$ dB). Desuden skal luftventiler udskiftes til lyddæmpende ventiler. Beregningerne viser, at for en stue på 35 m² med to ydervægge og et vinduesareal på 7 m², opnås en lydreduktion på 7 dB. Med de yderligere tiltag på vægge og tag er der beregnet en ændring i niveauforskelle mellem inde og ude fra 31 dB før tiltag til 44 dB efter tiltag.

Yderligere kan facaden afblændes af gasbeton, der kan isættes forsatsvinduer, og der kan benyttes en balanceret ventilation, hvor der ikke er åbninger i facaden. Med disse tiltag er det teoretisk beregnet, at det er muligt at opnå yderligere 5 dB lydreduktion. I et norsk projekt om bygningsmæssige tiltag mod lavfrekvent støj og lydinducerede vibrationer fra militæraktivitet, jf. [60], er der bl.a. undersøgt vinduers lydisolering ved lave frekvenser. I projektet sammenlignes tre forskellige vinduesopbygninger monteret i den samme type væg. Målingerne beskriver lydisoleringen af væggen i kombination med vinduet. Konstruktionerne er illustreret i Tabel 10.

¹⁰ Rudeopbygningen 4-12-4 er en rude, der består af 4 mm glas - 12 mm luft - 4 mm glas.

¹¹ Rudeopbygningen 8-18-4/1/4 er en rude, der består af 4 mm glas - 18 mm luft - 2 stk. 4 mm glas, der er sat sammen med et laminat.

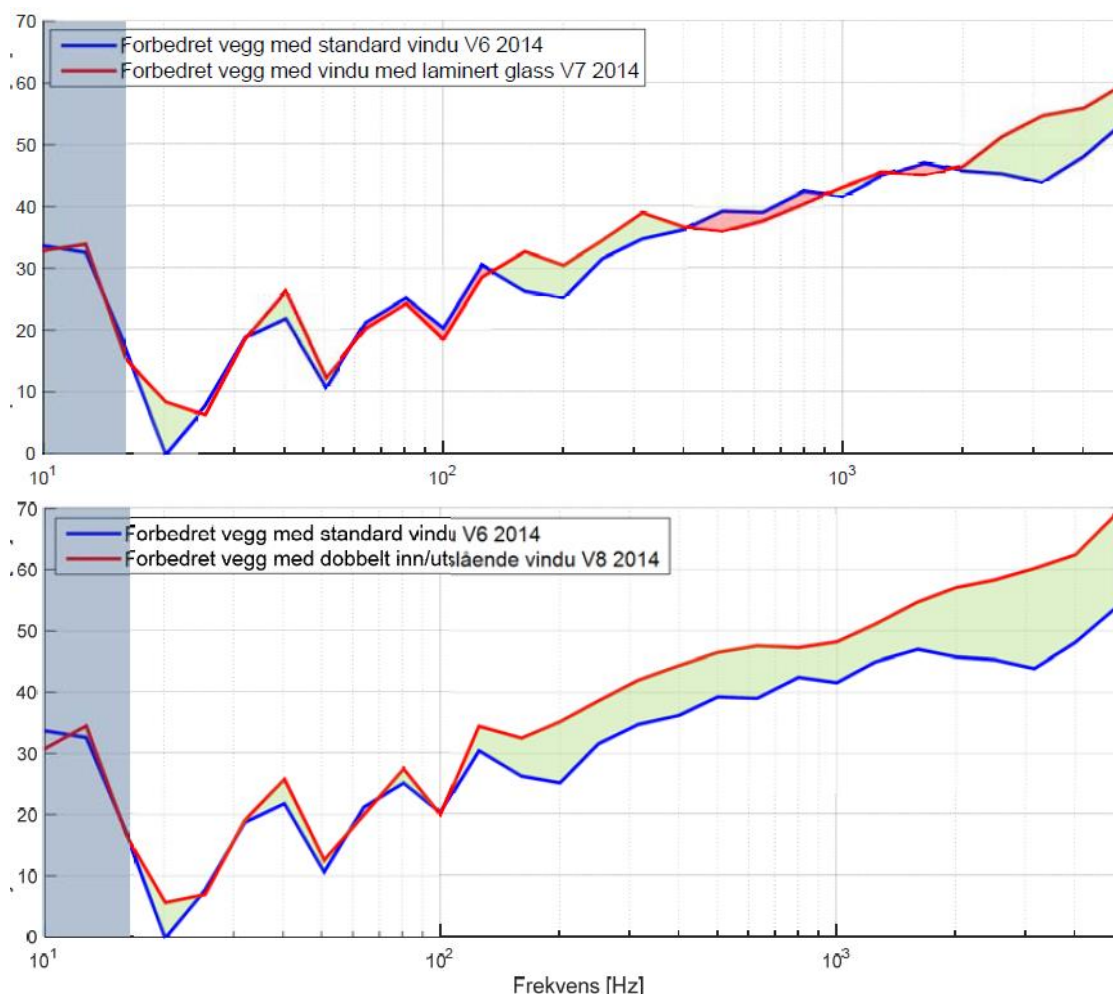
Vegg	Beskrivelse	
V5 2014	<i>Forbedret vegg:</i> Som V4-2013, men med 12 mm trepanel istedenfor 13 mm gips på innsiden.	
V6 2014	V5-2014 med isolerglassvindu (6-12-4) med spalteventil. Karm mål: 1190 x 1190 mm.	
V7 2014	V5-2014 med vindu med laminert glass: 8,76 laminert – 10 argon – 4 – 8 argon – 8,76 laminert. $R_w + C_{tr} = 38$ dB.	
V8 2014	V5-2014 med inn/utslående vindu med laminert glass på en side: 6-15-4, 100 mm, 8,76 laminert-24-4. $R_w + C_{tr} = 44$ dB.	

Tabel 10 Uddrag af vægoversigt fra norske laboriemålinger af lavfrekvent lydisolasjon, jf. [60].

Af måleresultaterne fremgår, at løsning V7 med lamineret trelagsrude har højere lydisolasjon end tolagsrude. Ligeledes fremgår det, at V8 med to dobbeltruder har højere lydisolasjon end V7, hvor ruden i V7 har $R_w + C_{tr} = 38$ dB, og ruden i V8 har $R_w + C_{tr} = 44$ dB. $R_w + C_{tr}$ beskriver kun lydisolasjonen i området 100-3150 Hz. På Figur 24 ses løsning V6 sammenlignet med henholdsvis V7 og V8.

Øverst: V6 sammenlignet med V7. Væggen med lamineret glas (V7) har tilsvarende eller bedre lydisolasjon end væggen med standard lydrudd (V6) i området 16-50 Hz, fra 125-400 Hz og over 2.000 Hz. At vinduet ikke yder bedre lydisolasjon i frekvensområdet 400-2.000 Hz formodes at være en fejl ved monteringen af vinduet.

Nederst: V6 sammenlignet med V8. Væggen med dobbelt vindue med lamineret glas på den ene side (V8) har tilsvarende eller bedre lydisolasjon end væggen med standard lydrudd (V6) i området 16-100 Hz og bedre lydisolasjon over 100 Hz.



Figur 24 Forskel i lydtrykniveau mellem sende- og modtagerum.
 Blå linje: Forbedret væg (V5), med standard vindue (V6) monteret.
 Øverste graf: Rød linje: Forbedret væg med vindue med lamineret glas (V7) monteret.
 Nederste graf: Rød linje: Forbedret væg med dobbelt vindue med et lamineret glas (V8) monteret.

På baggrund af ovenstående målinger af lydisolations af vinduerne er der udført beregninger af lydisolationsen af forskellige tiltag i forhold til ruderne. Konklusionerne er:

- Vinduer med trelagsrude, hvor et eller flere af glassene er lamineret, giver kraftig forbedring af lydisolationsen i del af frekvensområdet 15-30 Hz.
- Vinduet med et ikke-lamineret glas kombineret med to laminerede glas giver den bedste effekt. I dele af spektret ses ingen forbedring.
- Bekostelige tiltag som dobbeltvindue med lydglas giver ikke væsentlig bedre lydisolations i det lavfrekvente område end en trelagsrude med lamineret glas.
- I beregningerne er lamineringen lagt ind som en dæmpning. Både beregningerne og målingerne tyder på, at kombinationen af dæmpning og trelagsrude medfører, at ruden resonansfrekvens bliver mindre tydelige.

- Forbedrede vinduer med tolagsruder med laminering har en tydeligere resonansfrekvens end trelagsruder. Tolagsruder bør derfor ikke anvendes til tiltag mod lavfrekvent lyd, da der kan opstå kraftig forværring af resonansfrekvensen.
- Hovedkonklusionen er, at trelagsruder, hvor mindst et og helst to af lagene er lamineret, bør benyttes til lavfrekvent lydisolering.

I projekt om Lavfrekvent støj fra vindmøller, jf. [65], beskrives ligeledes en række tiltag til at forbedre den lavfrekvente lydisolering af træfacader med vinduer. De generelle virkemidler er:

- Forøgelse af konstruktionens vægt - Kan forventes at forøge lydisoleringen også ved lave frekvenser, dog begrænset effekt i resonansområdet.
- For vinduer svarer det fx til at isætte tykkere glas - For lette ydervægge svarer det til fx at montere yderligere pladelag eller supplere med tung formur.
- Forøgelse af konstruktionens stivhed - Kan primært i frekvensområdet under 50 Hz evt. forøge lydisoleringen - For lette ydervægge svarer det fx til at benytte stolper med større stivhed.
- Forøgelse af konstruktionens dybde - Er ikke helt så effektivt ved frekvenser omkring 50-80 Hz og vil i nogle tilfælde blot flytte resonansfrekvensen en smule. Effektivt for frekvenser over 100 Hz.
- For vinduer svarer det fx til montering af en ekstra rude - For lette ydervægge svarer det til fx til at påmontere yderligere isolering bag yderbeklædningen.
- Adskillelse mellem ydre og indre delkonstruktioner - Må forventes at give forbedringer, men er i praksis vanskeligt at etablere for mange facadetyper. For vinduer svarer det fx til montering af en uafhængig forsatsrude. For lette ydervægge svarer det fx til at benytte adskilte stolpesystemer.

Af mere utraditionelle virkemidler nævnes:

- Udendørs afskærmning af facader - Kunne fx være en tung, selvstændig glasfacade/overdækning med stor afstand (> 2 m) til eksisterende facade.
- Forøgelse af lydabsorption i beboelsesrum - Kraftige hjørneabsorbenter eller tilsvarende basabsorbenter vil i nogle tilfælde kunne reducere lavfrekvent støj indendørs.
- Basfælder i facadekonstruktion - Ved forudbestemte lave frekvenser kan resonante basabsorbenter indbygget i den lette facadekonstruktion evt. reducere transmissionen af støj.
- Aktiv støjdemping med modlyd - Lyd- eller vibrationskilder anbragt i konstruktionens hulrum med henblik på at udsende signaler i modfase til støjen udefra.

I projekt "Ny viden om lavfrekvent lydisolering af boliger i områder med vindmøller", jf. [54], er der udført en række målinger af forbedringer af lavfrekvent lydisolering af lette og tunge facader. Hovedresultaterne af undersøgelserne er:

- Hørbar indendørs vindmøllestøj er domineret af frekvenskomponenter fra 50 Hz og derover.
- Indendørs vindmøllestøj i eksisterende bygninger kan være hørbar, når de påvirkes af udendørs vindmøllestøjniveauer med et A-vægtet lydtrykniveau på 44 dB.

- Det er dog muligt med traditionel indendørs lydæssig efterisolering eller med uden-dørs facadelydisolering at forbedre den lavfrekvente lydisolation, så hørbarheden af indendørs lavfrekvent vindmøllestøj bliver reduceret og i nogle tilfælde kan blive ikke hørbar eller lige netop hørbar.
- For lette facader er det vigtigt at anvende flere tunge gipspladelag ved indvendig efterisolering og at supplere med lydisolering af interne skillevægge omkring det/de rum, hvis facader ønskes lydisolerede.
- For tunge facader er indvendige gipsforsatsvægge med tungt forsatsvindue effektive løsninger til at forbedre lavfrekvent lydisolation.
- 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 vigtigste lave frekvenser som en indvendig forsatsbeklædning.
- Delvist åbne vinduer kan ikke anvendes sammen med lydisolerende tiltag – da åbningen vil eliminere effekten af efterisoleringen. Rummene skal derfor ventileres på anden vis.
- Der opnås ingen ekstra lydisolerende effekt i det undersøgte frekvensområde 8-200 Hz ved at placere absorbenter mellem facadevindue og forsatsvindue og heller ikke ved at stille et forsatsvindue på skrå.

Projektet og målingerne er udført med henblik på at kunne foretage genevurderinger af vindmøllestøj, men effekten af tiltagene for øget lavfrekvent lydisolation er målt med støjsignaler, der ikke er specifikke for vindmøller. Det vurderes derfor, at målingerne også vil være repræsentative for andre lavfrekvente støjklender.

8.2 Resume

Hvilken støjsikring af huse, der er mulig at udføre, afhænger som udgangspunkt af husenes opbygning. Derfor er tiltagene for forøgelse af huses lydisolation meget regionalt præget.

Viden om lavfrekvent lydisolation af bygningsdele er relativt begrænset i sammenligning med lydisolutionsdata i området 100-5.000 Hz, hvor bygningsdeles lydisolation normalt beskrives.

Grundet fokus på lavfrekvent støj fra vindmøller i Danmark og Norge er der i disse lande foregået en del undersøgelser af lydisolation ved lave frekvenser. Bygningsmaterialerne er altafgørende for facaders lydisolation, og byggeskik og valg af byggematerialer medfører, at man ikke uden videre kan anvende lydisolutionsdata fra andre lande. Lydisolationen for luftbåren støj afhænger ikke af støjklenden, hvorfor at data for lydisolation erhvervet i forbindelse med vindmølleprojekter også kan være repræsentative overfor flystøj.

Der er i måledata fokus på facaders lydisolation (inkl. døre og vinduer), idet tagkonstruktioner typisk yder en højere lydisolation end den samlede facade.

Lavfrekvente lydisolutionsdata skal ses i lyset af, hvilken beskyttelse anvendelsen af data er tiltænkt, idet der både foreligger data, hvor der i målemetoden er indlagt en sikkerhedsmargin i form af valg af måleposition (3D-målinger) og andre i form af en middelværdi fratrukket standardafvigelsen.

Ifølge Miljøstyrelsens vejledning nr. 1/2012, jf. [56], er de anførte værdier af lydisolering i bekendtgørelsen valgt, så 67 % af måleresultaterne fra to måleserier er højere end tabelværdierne. Det betyder altså, at man regner med, at 67 % af husene har bedre lydisolering end anført i tabellerne.

Der er til brug i Norge sammenstillet lydisolationsdata for bygninger, der repræsenterer norske forhold, dvs. lette træfacader og vinduer med termoruder.

I Finland er der med inspiration i danske målinger udført målinger af facaders lydisolering ned til 5 Hz. Grundet forskelle i byggestil mellem Danmark og Finland kan de finske målinger ikke uden videre anvendes til beskrivelse af danske forhold.

Med hensyn til lydisolering af infralyd er det primært de finske målinger, som indeholder valide data for dette frekvensområde, hvorfor det ikke er muligt generelt at beskrive lydisolering overfor infralyd.

I norske undersøgelser om lavfrekvent støj fra militær aktivitet har der været fokus på at øge lydisoleringen med vinduer, og yderligere er der set en tydelig forbedring af lavfrekvent lydisolering ved at øge stivheden af lette facadedele i husene.

Hovedkonklusionen i norske undersøgelser af vinduer viser, at trelagsruder, hvor mindst et og helst to af lagene er lamineret, bør benyttes til lavfrekvent lydisolering.

I danske undersøgelser af støj fra vindmøller er der udført målinger af forskellige tiltag til at øge lydisoleringen. Nogle af hovedkonklusionerne er:

- For lette facader er det vigtigt at anvende flere tunge gipspladelag ved indvendig efterisolering og at supplere med lydisolering af interne skillevægge omkring det/de rum, hvis facader ønskes lydisoleret.
- Delvist åbne vinduer kan ikke anvendes sammen med lydisolering, da åbningen vil eliminere effekten af efterisoleringen. Rummene skal derfor ventileres på anden vis.
- For tunge facader er indvendige gipsforsatsvægge med tungt forsatsvindue effektive løsninger til at forbedre lavfrekvent lydisolering.
- For tunge facader er udvendig facadeisolering med gipsplader og puds en næsten lige så effektiv lydisolering ved de vigtigste lave frekvenser som en indvendig forsatsbeklædning.

9. Referencer

I dette afsnit er anført litteratur, som der refereres til i teksten. Referencerne står i alfabetisk orden efter forfatter. Titlen står med kursiv.

- [1] Arbejdstilsynet
Bekendtgørelse om beskyttelse mod udsættelse for vibrationer i forbindelse med arbejdet.
BEK nr. 63 af 6/2/2006.
- [2] Backalarz, C.
Målt og beregnet støj ved Avedøre Holme.
DELTA, rapport nr. AV 1099/08, 2008.
- [3] Baliatsas, C., van Kamp, I., van Poll, R.
Low frequency noise in relation to health effects: A systematic review.
EuroNoise 2015.
- [4] Baliatsas, C., van Kamp, I., van Poll, R., Yzermans, J.
Health effects from low-frequency noise and infrasound in the general population: Is it time to listen? A systematic review of observational studies.
Science of the Total Environment 557, pp. 163-169, 2016.
- [5] Berglund, B., Hassmén, P., Soames Job, R. F.
Sources and effects of low-frequency noise.
The Journal of the Acoustical Society of America 99, pp. 2985, 1996.
- [6] DELTA Akustik og Vibration
Vurdering af lavfrekvent støj fra færger - 2.
Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen nr. 10, 1997.
- [7] DIN 4150-3:2016
Erschütterungen im Bauwesen - Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen.
DIN Deutsches Institut für Normung.
- [8] DS/EN ISO 10140-2
Akustik - Laboratiormåling af bygningselementers lydisolations - Del 2: Måling af luftlydisolation.
Dansk Standard.
- [9] DS/EN ISO 16283-3
Akustik - Feltmåling af lydisolations i bygninger og af bygningselementer - Del 3: Faceres lydisolations.
Dansk Standard.
- [10] DS/EN ISO 717-1
Akustik - Vurdering af lydisolations i bygninger og af bygningsdele - Del 1: Luftlydisolation.
Dansk Standard.
- [11] Eisses, A. R., Claire S., van Koot, L., Koopman, A., Bronkhorst, O.
Inventarisatie van Maatregelen Tegen Rattle Noise Door Chinook-Helikopters Voor Woningen Rond de Vliegbasis Gilze-Rijen.
TNO, report no. R10771A, 2017.
- [12] Europa-Kommissionen
Kommissionens Direktiv (EU) 2015/996 af 19. Maj 2015 om fastlæggelse af fælles støjvurderingsmetoder i henhold til Europa-Parlamentets og Rådets direktiv 2002/49/EF.

- [13] European Civil Aviation Conference
Report on standard method of computing noise contours around civil airports.
ECAC.CEAC Doc 29, 4th Edition, Volume 2: Technical Guide, 2016.
- [14] Expert Panel: Colby, D., Dobie, R., Leventhall, G., Lipscomb, D. M., McCunney, R. J., Seilo, M.T., Søndergaard, B. (Medical doctors, audiological professor Phd's and M.Sc.)
Wind turbine sound and health effects - An expert panel review.
Prepared for the American and the Canadian Wind Energy Association, 2009.
- [15] Fahy, F.
Sound and structural vibration - Radiation, transmission and response.
Academic Press, 1985.
- [16] Fidell, S., Pearsons, K., Silvati, L., Sneddon, M.
Relationship between low-frequency aircraft noise and annoyance due to rattle and vibration.
The Journal of the Acoustical Society of America 111, pp. 1743, 2002.
- [17] FORCE Technology (tidligere DELTA) - Akustik
Støjbarometer.
<https://forcetechnology.com/-/media/force-technology-media/pdf-files/acoustics-sound-and-vibration/5000-to-6000/5163-akustik-stoejbarometer-lavfrekvent-stoej-a4-print-ready.pdf>
- [18] Forsvarsbygg kampflybase (Norge)
Reguleringsplan for Ørland hovedflystasjon. Planbeskrivelse med konsekvensutredning. Tilleggsnotat nr 06 - lavfrekvent lyd og vibrasjoner. Presiseringer til temautredning støy, 29.04.2014.
- [19] Forsvarsbygg kampflybase (Norge)
Reguleringsplan og konsekvensudredning for Ørland hovedflystasjon - Temaudredning støy, 21.01.2014.
- [20] Forsvarsministeriet
Bekendtgørelse om støj Fra Flyvestation Skrydstrup.
BEK nr. 940 af 22/06/2020.
- [21] Forsvarsministeriets Ejendomsstyrelse
Miljøkonsekvensvurdering for ændring af Flyvestation Skrydstrup.
Afgrænsningsrapport, 2018.
- [22] Forsvarsministeriets Ejendomsstyrelse
Miljøkonsekvensvurdering for ændring af Flyvestation Skrydstrup.
Miljøkonsekvensrapport, 2019.
- [23] Forsvarsministeriets Ejendomsstyrelse
Nye kampfly ved Flyvestation Skrydstrup.
Væsentlighedsvurdering, 2019.
- [24] Foster, C. R.
Helicopter external noise requirements - FAA perspective.
NASA Conference Publication 2052, Helicopter Acoustics, Part I, pp. 402, 1978.
- [25] GATE 21, Rambøll og FORCE Technology
Trafikstøj kræver handling - Fakta, udfordringer og løsninger.
April 2020.
- [26] Gidlöf-Gunnarsson, A., Ögren, M. J., Tomas Öhrström, E.
Railway noise annoyance and the importance of number of trains, ground vibration, and

- building situational factors.*
Noise & Health 14, pp. 190-201, 2012.
- [27] Hoffmeyer, D.
Supplerende databehandling af resultater af lydisolationsmålinger gennemført i projektet "Lavfrekvent støj fra store vindmøller".
Miljøstyrelsens referencelaboratorium for støjmålinger, rapport nr. RL 20/08, 2008.
- [28] Hoffmeyer, D., Jakobsen, J.
Sound insulation of dwellings at low frequencies.
Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control 29(1), 2010.
- [29] Hoffmeyer, D., Søndergaard, B.
Low frequency noise from large wind turbines - Measurements of sound insulation of facades.
DELTA, rapport nr. EFP06, AV 1097/08, April 2008.
- [30] Homb, A., Hveem, S., Høiland-Kaupang, H.
Lydmåling i laboratorium av vinduer, yttervegger, tak og ytterveggventiler Konstruksjonsdata for eldre og nye konstruksjoner for beregning.
SINTEF projektrapport 102, 2012.
- [31] Hubbard, H. H..
Noise induced house vibrations and human perception.
Noise Control Engineering Journal 19(2), pp. 41-55, 1982.
- [32] ISO - DS/ISO 7196:1995
Akustik. Frekvensvægtning til brug ved måling af infralyd.
International Organization for standardization, 1995.
- [33] ISO 226
Normal equal-loudness level contours.
International Organization for standardization, 2003.
- [34] DS/ISO 1996-1:2016
Beskrivelse, måling og vurdering af ekstern støj - Del 1: Grundlæggende størrelser og vurderingsmetoder Acoustics - Description, measurement and assessment assessment procedures.
International Organization for standardization, 2016.
- [35] ISO 2631-2 1989/2003
Mekaniske vibrationer og chok - Vurdering af helkropsvibrationer - Del 2: Vibrationer i bygninger (1 Hz til 80 Hz).
International Organization for standardization, 1989/2003.
- [36] ISO 389-7:2005(E)
Acoustics - Reference zero for the calibration of audiometric equipment Part 7: Reference threshold of hearing under free-field and diffuse-field listening conditions.
International Organization for standardization, second edition, 2005.
- [37] ISO/TS 15666
Assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys. Technical Specification, Acoustics, 2003.
- [38] Janssen, S., Heblj, S., Van Veen, T.
Annoyance response to helicopter noise.
ICBEN 2017.

- [39] Kamp, I. V., Breugelmans, O., van Poll, R., Baliatsas, C.
Burden of disease from exposure to low frequency noise: a Dutch inventory.
ICBEN 2017.
- [40] Keränen, J., Hakala, J., Hongisto, V.
The sound insulation of façades at frequencies 5-5.000 Hz.
Building and Environment 156, 2019.
- [41] Kragh, J., Plovsing, B.
Vurdering af sammensat støj.
Orientering fra Miljøstyrelsens Referencelaboratorium nr. 27, 1997.
- [42] Leventhall, H. G.
Low frequency noise and annoyance.
Noise & Health 6(23), pp. 59-72, 2004.
- [43] Løvholt, F., Madshus, C., Karin Norén-Cosgriff, K.
Low frequency noise and induced vibration from airtraffic and military training - Processes and new mitigation measures.
Norwegian Geotechnical Institute. https://www.ecde.info/sites/default/files/docs/30_presentation_lovholt.pdf
- [44] Løvholt, F., Norén-cosgriff, K., Madshus, C., Brekke, A.
On the low frequency sound transmission and induced vibration from aircrafts.
Inter-Noise 2013.
- [45] Miljø- og Fødevarerministeriet
Bekendtgørelse om miljøgodkendelse af hurtigfærgeruter.
BEK nr. 1735 af 21/12/2015.
- [46] Miljø- og Fødevarerministeriet
Bekendtgørelse om støj fra vindmøller.
BEK nr. 135 af 07/02/2019.
- [47] Miljødirektoratet, Norge
Retningslinje for behandling av støy i arealplanlegging.
T-1442, 2012.
- [48] Miljødirektoratet, Norge
Veileder til retningslinje for behandling av støy i arealplanlegging, T-1442/2016.
Veileder M-128, 2014.
- [49] Miljødirektoratet, Norge
Veileder til retningslinje for behandling av støy i arealplanlegging, T-1442/2016.
Veileder M-128, 2014, revideret januar 2020.
- [50] Miljøministeriet
Bekendtgørelse om støj fra vindmøller.
BEK nr. 1284 af 15/12/2011.
- [51] Miljøstyrelsen
Beregning af ekstern støj fra virksomheder.
Vejledning fra Miljøstyrelsen nr. 6/1993.
- [52] Miljøstyrelsen
Ekstern støj fra virksomheder.
Vejledning fra Miljøstyrelsen nr. 5/1984.
- [53] Miljøstyrelsen
Lavfrekvent støj, infralyd og vibrationer i eksternt miljø.
Orientering fra Miljøstyrelsen nr. 9/1997, samt rettelse til afsnit 3.4.1 "Måleposition", 2011.

- [54] Miljøstyrelsen
Ny viden om lavfrekvent lyd isolation af boliger i områder med vindmøller.
Miljøprojekt nr. 1960, 2017.
- [55] Miljøstyrelsen
Støj fra flyvepladser.
Vejledning fra Miljøstyrelsen nr. 5/1994.
- [56] Miljøstyrelsen
Støj fra vindmøller.
Vejledning fra Miljøstyrelsen nr. 1/2012.
- [57] Møller, H.
Annoyance of audible infrasound.
Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control 6, pp. 1-17, 1987.
- [58] Møller, H., Pedersen, C. S.
Hearing at low and infrasonic frequencies.
Noise & Health 6(23), 2004.
- [59] Nicholls, H. R., Johnson, C. F., Duwall, W. I.
Blasting vibrations and their effects in structures.
Bureau of Mines Bulletin 656, 1971.
- [60] Norén-Cosgriff, k., Løvholt, F.
Bygningsmessige tiltak mot lavfrekventstøy og lydinduserte vibrasjoner fra militær aktivitet. Sluttrapport - resultater fra numeriske beregninger, laboratoriemålinger og fullskalaforsøk.
Norwegian Geotechnical Institute Dok.nr. 20140314-01-r rev.nr. 0 / 13/09/2016.
- [61] Norén-Cosgriff, K., Løvholt, F., Madshus, C.
Measurements and FE-simulations of low frequency sound transmission and induced building vibrations from aircrafts.
Inter-Noise 2015.
- [62] NS 8175
Lydforhold i bygninger, Lydklasser for ulike bygningstyper.
Norsk Standard, 2019.
- [63] NS 8176
Vibrasjoner og støt - Måling i bygninger av vibrasjoner fra landbasert samferdsel, vibrasjonsklasser og veiledning for bedømmelse av virkning på mennesker.
Norsk Standard, 2005.
- [64] Pedersen, T. H.
Low frequency noise from large wind turbines - A procedure for evaluation of the audibility for low frequency sound and a literature study.
DELTA, report no. AV 1098/08, 2008.
- [65] Pedersen, T. H., Backalarz, C., Hoffmeyer, D., Laursen, J. E., Søndergaard, L. S., Nielsen, O. W.
Lavfrekvent støj fra vindmøller.
DELTA, rapport nr. TC-100227, 2012.
- [66] Plovsing, B.
Beregningsmetode for lavfrekvent støj fra vindmøller.
Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen nr. 2, 2011.
- [67] Plovsing, B.
Proposal for Nordtest method: Nord2000 - Prediction of outdoor sound propagation.
DELTA, report no. AV 1106/07, 2007, revised 2014.

- [68] Rajala, V., Hakala, J., Hongisto, V.
Equal annoyance contours at frequencies 4-1.000 Hz.
International Congress on Acoustics, 2019.
- [69] Schomer, P. D., Averbuch, A.
Indoor human response to blast sounds that generate rattles.
The Journal of the Acoustical Society of America 86, pp. 665, 1989.
- [70] Schomer, P. D., Neathammer, R. D.
The role of helicopter noise-induced vibration and rattle in human response.
The Journal of the Acoustical Society of America 81, pp. 966, 1987.
- [71] Schomer, P. D., Wagner, L. R.
Human and community response to military sounds: results from field- laboratory tests of small arms, 25 mm cannon, helicopters and blast sound.
Noise Control Engineering Journal 43, pp. 1-13, 1995.
- [72] Sharp, B. H., Gurovich, Y. A., Albee, W. W.
Status of low-frequency aircraft noise research and mitigation.
Wyle Acoustics Group, report no. WR 01-21, 2001.
- [73] Shepherd, K. P., Hubbard, H. H.
Building vibrations induced by noise from rotorcraft and propeller aircraft flyovers.
NASA technical memorandum no. 104170, 1992.
- [74] Stephens, D. G., Mayes, W. H.
Aircraft noise-induced building vibrations.
Community Noise, ed. R. Peppin and C. Rodman (West Conshohocken, PA: ASTM International, 1979), pp. 183-194.
- [75] Stich, C.
Designed reduction of radiated noise characteristics from two-bladed general aviation propellers.
Embry-Riddle Aeronautical University.
- [76] Van den Berg, M. et al.
Position paper on dose-effect relationships for night time noise.
Working Group on Health and Socio-Economic Aspects, 2004.
- [77] Watanabe T., Møller H.
Low frequency hearing thresholds in pressure field and in free field.
Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control 9(3), pp. 106-115.
- [78] Waye, K.
Effects of low frequency noise on sleep.
Noise & Health 6, pp. 87-91. 2004.
- [79] WHO - Europe
Environmental noise guidelines for the European region.
WHO Regional Office for Europe, 2018.

10. Bibliografi

I dette afsnit er anført den litteratur, som vi er stødt på i forbindelse med litteratursøgningen, og som vi skønner, har relevans for emnet. Det er ikke nødvendigvis litteratur, vi har gennemgået. Referencerne står i alfabetisk orden efter forfatter. Titlen står med kursiv.

1. Acoustical Design Collaborative, Ltd
BWI low frequency noise analysis for allwood neighborhood.
Project No. 96.01, 1997.
2. Acoustical Design Collaborative, Ltd
Low frequency residential noise isolation study for BWI Airport.
Project No. 95.08, 1996.
3. Airport Cooperative Research Program Synthesis Program; Transportation Research Board; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine.
Effects of aircraft noise: research update on selected topics.
Academies Press, 2008.
4. Bartels, S., Márki, F., Müller, U.
The influence of acoustical and non-acoustical factors on short-term annoyance due to aircraft noise in the field - The COSMA study.
Science of The Total Environment 538, pp. 834-843, 2015.
5. Barrett, D.
Airport ground operations noise and low frequency noise.
Florida Airports Council, 7th Annual Environmental and Noise Conference, Delray Beach, 2003.
6. Bengtsson, J., Persson Waye, K., Kjellberg, A.
Evaluations of effects due to low-frequency noise in a low demanding work situation.
Journal of Sound and Vibration 278, pp. 83-99, 2004.
7. Berglund, B., Hassmén, P., Soames Job, R. F.
Sources and effects of low-frequency noise.
The Journal of the Acoustical Society of America 99, pp. 2985, 1996.
8. Boeker, E., Schulz, N.
Examination of the low frequency limit for helicopter noise data in aviation environmental design tool and integrated noise model.
The Journal of the Acoustical Society of America 127, pp. 1835, 2010.
9. Brunskog, J., Jacobsen, F.
Measurements of low-frequency noise in rooms.
Acoustic Technology, Departments of Electrical Engineering, DTU, 2008.
10. Cant S. M., Breyse P. A.
Aircraft noise induced vibration in fifteen residences near Seattle-Tacoma International Airport.
AIHA Journal 34(10), pp. 463-468, 1973.
11. Celi R. N. D.
Time-frequency analysis of helicopter noise.
Department of Aerospace Engineering, University of Maryland.
12. Clark, C., Stansfeld, S. A.
The effect of transportation noise on health and cognitive development: A review of recent evidence publication date.
International Journal of Comparative Psychology 20(2), 2007.

13. DS/ISO 1996-1 2016
Beskrivelse, måling og vurdering af ekstern støj - Del 1: Grundlæggende størrelser og vurderingsmetoder. Acoustics - Description, measurement and assessment procedures.
Dansk Standard.
14. Eisses, A.
Ridges against ground noise. Ground noise mitigation at Amsterdam Airport Schiphol.
TNO, presentation at UC Davis Aviation Noise and Air Quality Symposium, 2015.
15. European Aviation Safety Agency
Type certificate data sheet for EH101-500.
European Aviation Safety Agency, Type Certificate Data Sheet No. EASA.R.013, 2016.
16. Feldmann, J., Pitten, F.A .
Effects of low frequency noise on man - A case study.
Noise & health 7(25), pp. 23-28, 2009.
17. Fidell, S., et al,
Field study of the annoyance of low-frequency runway sideline noise.
The Journal of the Acoustical Society of America 106, pp 1408, 1999.
18. Fidell, S., Pearsons, K., Barbara, G.
Effects on sleep disturbance of changes in aircraft noise near three airports.
The Journal of the Acoustical Society of America 107, pp. 2535, 2000.
19. Fidell, S.
A modern standardized method for predicting community response to aircraft noise.
Civil Engineering and Architecture 6(2), pp. 71-77, 2018.
20. Fields J. M., Powell C. A.
Community reactions to helicopter noise: Results from an experimental study.
The Journal of the Acoustical Society of America 82, pp. 479, 1987.
21. Gibbs, B. M., Maluski, S.
The interrelation between the modal characteristics of the rooms and the separating wall, in the sound insulation between dwellings at low frequencies.
University of Liverpool, Pacs ref.: SS-RBA- 07, 2007.
22. Gibbs, B. M., Maluski, S.
Airborne sound level difference between dwellings at low frequencies.
Building Acoustics 11(1), pp. 61-78, 2004.
23. Gibson, R. G., Stusnick, E.
Experimental investigation of low-frequency noise from USAF hush houses, Volume I: Noise source characterization.
Wyle Laboratories Inc., report no. WR 95-28, 1995.
24. Gibson, R. G., Stusnick, E, Smith, J. P., Burdisso, R. A., Fuller, C. R.
An investigation of active noise reduction of jet engine runup noise.
Wyle Laboratories, Inc. and Virginia Polytechnic Institute and State University, report no. WR 94-26, 1994.
25. Gibson, R. G., Stusnick, E.
Experimental Investigation of Low-Frequency Noise from USAF Hush Houses, Volume II: Active Noise Reduction.
Wyle Laboratories Inc., report no. WR 95-29, 1995.
26. Gibson, R. G., Stusnick, E.
Experimental investigation of low-frequency noise from USAF hush houses, Volume I: Noise source characterization.
Wyle Laboratories Inc., report no. WR 95-28, 1995.

27. Gibson, R. G., Stusnick, E., Smith, J. P., Burdisso, R. A., Fuller, C. R.
An investigation of active noise reduction of jet engine runup noise.
Wyle Laboratories, Inc. and Virginia Polytechnic Institute and State University, report no. WR 94-26, 1994.
28. Gjestland, T.
Assessment of helicopter noise annoyance: A comparison between noise from helicopters and from jet aircraft.
Journal of Sound and Vibration 171(4), pp. 453-458, 1994.
29. Gjestland, T. et al.
Community response to noise from short-term military aircraft exercise.
Journal of Sound and Vibration 182(2), pp. 221-228, 1995.
30. Goldstein J.
Community noise impact from military helicopter operations.
The Journal of the Acoustical Society of America 54, pp. 342, 1973.
31. Gomes, L. M. et al.
Effects of occupational exposure to low frequency noise on cognition.
Aviation Space and Environmental Medicine. 70(3 Pt 2), pp. A115-8, 1999.
32. Grande, N. R. et al.
Morphological changes in rat lung parenchyma exposed to low frequency noise. Aviation Space Environmental Medicine. 70(3 Pt 2), pp. A70-7, 1999. Avi-
33. Griefahn, B. et al.
Noise emitted from road, rail, and air traffic and their effects on sleep.
Journal of Sound and Vibration 295 (1-2), pp. 129-140, 2005.
34. Leventhall, H.G.
Low frequency noise and annoyance.
Noise Health, 6, pp. 59-72 [6], 2004.
35. Harris Miller Miller & Hanson
Logan low-frequency noise study.
HMMH, report no. 293810.04, prepared for Massport, MA, 1996.
36. Harris Miller Miller & Hanson
Study of low frequency aircraft takeoff noise at Baltimore-Washington International Airport.
HMMH, report no. 294730.03/293100.09, 1998.
37. Haubrich, J. et al.
Leq + X: Re-assessment of exposure-response relationships for aircraft noise annoyance and disturbances to improve explained variance.
The 23rd International Congress on Acoustics, pp. 1523-30, 2019.
38. Hobbs, C., Karantonis, K., Sharp, B.
Active reduction of airport noise.
The 29th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering, 2000.
39. Hobbs, C., Trantow, J.
Active noise reduction of aircraft takeoff and maintenance run-up operations.
ACRP Problem Statement, 2017.
40. Hodgdon, K. K., Atchley, A. A., Bernhard, R. J.
Low frequency noise study.
Partnership for AiR Transportation Noise and Emissions Reduction, 2007.

41. Hodgson, M., Guo, J., Germain, P
Active local control of propeller-aircraft run-up noise.
The Journal of the Acoustical Society of America 114, pp. 3201, 2003.
42. Hoffmeyer, D.
Low frequency noise from large wind turbines measurements of sound insulation of facades.
Technical Note, EFP-06 Project (March), pp. 23, 2007.
43. Hoffmeyer, D., Jakobsen, J.
Sound insulation of dwellings at low frequencies.
Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control 29(1), pp. 15-23, 2010.
44. Iannace, G. et al.
Sound insulation improvement of a double window for airborne narrow band noise at very low frequency.
Inter-Noise, 1995.
45. International Civil Aviation Organisation
Environmental protection, Volume 1, Aircraft noise.
International Civil Aviation Organisation, Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation, Volume 1.
46. Ising, H., Rebentisch, E., Poustka, F., Curi, I.
Annoyance and health risk caused by military low-altitude flight noise.
International Archives of Occupational and Environmental Health 62(5), pp. 357-363, 1990.
47. Jensen, A., Lund, S. P., Lücke, T.
Health effects and noise exposure among flight-line maintainers.
The 9th International Congress on Noise as a Public Health Problem (ICBEN), 2008.
48. Keränen, J., Oliva, D., Hongisto, V.
Prediction model for the risk of annoyance from external low frequency noise.
Inter_Noise, 2010.
49. Jean, P.
Sound transmission through opened windows.
Applied Acoustics 70, pp. 41-49, 2009.
50. Joint Strike Fighter (JSF) Program
F-35 noise executive summary.
http://www.jsf.mil/news/docs/20141031_F-35_Noise_Executive_Summary.pdf
51. Salvador Santiago, J., Pons, J.
Normalized noise spectra of aircraft take-off and landing operations.
137th Meeting of the Acoustical Society of America, 1999.
52. Jopson, I., Jones, C., Porter, N., White, S.
Night-time ground noise.
R & D REPORT 9850, 2000. www.caa.co.uk
53. Joint Strike Fighter (JSF) Program
F-35 noise measurement executive summary.
http://www.jsf.mil/news/docs/20141031_F-35_Noise_Executive_Summary.pdf (October): 1-2
2014.
54. Kaczmarska, A. et al..
A study of annoyance caused by low-frequency noise during mental work.
International journal of occupational safety and ergonomics 13, pp. 117-125, 2007.

55. van Kempen, E. et al.
Noise exposure and children's blood pressure and heart rate: The RANCH project.
Occupational and environmental medicine 63, pp. 632-39, 2006.
56. Keränen, J., Hakala, J., Hongisto, V.
The sound insulation of façades at frequencies 5-5.000 Hz.
Building and Environment 156, pp. 12-20, 2019.
57. Keränen, J., Hakala, J., Hongisto, V.
Façade sound insulation of residential houses within 5-5.000 Hz.
Euronoise, pp. 1549-53, 2018.
58. Kluzenaar, Y. D., Matsui, T.
Recent progress in the field of non-auditory health effects of noise - Trends and research Needs.
ICBEN 2017.
59. Koch, C.
Hearing beyond the Limit: Measurement, perception and impact of infrasound and ultrasonic noise.
ICBEN 2017.
60. Kropp, W., Bérillon, J.
A theoretical model to investigate the acoustic performance of building facades in the low and middle frequency range.
Acoustica 84, pp. 681-688, 1998.
61. Lawton, R. N., Fujiwara, D.
Living with aircraft noise: Airport proximity, aviation noise and subjective wellbeing in England.
Transportation Research Part D: Transport and Environment 42, pp. 104-18. 2016.
62. Lekaviciute, J., Kephelopoulos, S., Stansfeld, S., Clark, C.
Final report ENNAH - European Network on Noise and Health.
EU Project no. 226442 FP-7-ENV-2008-1, 178, 2013.
63. Leventhall, G.
A review of published research on low frequency noise and vibration.
Contract ref. EPG 1/2/50, Department for Environment, Food and Rural Affairs, London, UK, 2003.
64. Leventhall, G.
What is infrasound?
Progress in Biophysics and Molecular Biology, 93, pp. 130-137, 2007.
65. Løvholt, F. et al.
Analysis of low frequency sound and induced vibration in a Norwegian wooden building.
Noise Control Engineering Journal 59(4), pp. 383-396, 2011.
66. Løvholt, F. et al.
Low frequency sound generated vibration in buildings due to military training and air traffic.
Inter-Noise 2010.
67. Løvholt, F. et al.
Low frequency sound induced vibration in buildings.
BNAM 2010.
68. Low Frequency Expert Panel.
Findings of the low-frequency noise expert panel of the Richfield-MAC noise mitigation agreement of 17th December, 1998.
Metropolitan Airports Commission, Minneapolis-St. Paul International Airport, 2000.

69. Miljøstyrelsen
Udvidet datagrundlag for danske boligers lydisolation mod lavfrekvent støj.
Miljørapport nr. 1866, 2016.
70. Møller, H., Lydolf, M.
En spørgeskemaundersøgelse af klager over infralyd og lavfrekvent støj.
Endelig rapport, 2002.
71. Moorhouse, A., Waddington, D., Adams, M.
Procedure for the Assessment of Low Frequency Noise Complaints.
Contract no. NANR45, 2005.
72. Moorhouse, A., Waddington, D., Adams, M.
Proposed criteria for the assessment of low frequency noise disturbance.
University of Salford, 2005.
73. Moorman R.W.
Helicopter noise - The people's perspective: Long Island and Chicago.
Verti-Flite, pp. 28-30, 2015.
74. More, S. R.
Aircraft noise characteristics and metrics.
Theses and Dissertations Available from ProQuest (July): 400. <http://web.mit.edu/aeroastro/partner/reports/proj24/noisethesis.pdf>, 2011.
75. Namba, S. et al.
The measurement of temporal stream of hearing by continuous judgments. In the case of the evaluation of helicopter noise.
Journal of the Acoustical Society of Japan (E), 14(5), pp. 341-352, 1993.
76. NASA
Helicopter acoustics, Part II.
Proceedings AHS/NASA/Army Specialists Meeting on Helicopter Acoustics, Hampton, VA NASA CP-2052 Part II, 1972.
77. Airport Cooperative Research Program
Effects of aircraft noise: Research update on select topics.
Transportation Research Board on the National Academies, 2008.
78. *Noise from USAF hush houses - Volume II: Active Noise Reduction.*
Wyle Laboratories Inc., report no. WR 95-29, ca. 1995.
79. Osipov, A. et al.
Low-frequency airborne sound transmission through single partitions in buildings.
Applied Acoustics 52, pp. 273-288, 1997.
80. Pearsons, K. et al,
Study of levels, annoyance and potential mitigation of backblast noise at San Francisco International Airport.
BBN Technologies, report no. 8257, 2000.
81. Pedersen, C. M.
Ny viden om lavfrekvent lydisolation af boliger i områder med vindmøller.
Miljøstyrelsen, 2017.
82. Pedersen, T. H.
Sammenhæng mellem vindmøllestøj og helbredseffekter.
DELTA, rapport nr. AV 1017/11, 2011.

83. Pedersen, T. H.
Vurdering af genevirkning af indendørs vindmøllestøjspektrere.
DELTA/SenseLab, rapport nr. TC-101073, 2017.
84. Pedersen, T. H. et al.
Lavfrekvent støj fra vindmøller.
Udført for Klima- Og Forurensningsdirektoratet, Norge, 2012.
85. Pietrzyk, A. et al.
Numerical simulation of low frequency air-borne sound transmission in buildings.
Proceedings from Meeting of CIB - W51, Committee Acoustics Building Research Institute, Warsaw, Poland, 1994.
86. Poulsen, T., Mortensen, F. R..
Laboratory evaluation of annoyance of low frequency noise.
Danish Environmental Protection Agency, working report no. 1, 2002.
87. Plovsing, B.
Måling af lydisolations i lavfrekvensområdet. Analyse af betydningen af udendørshøjttalerens placering.
DELTA Akustik og Vibration TC-100847, 2015.
88. Prato, A. et al.
Transmission of impact noise at low frequency: A modal approach for impact sound insulation measurements (50-100 Hz).
ICSV22, 2015.
89. Prato, A., Schiavi, A.
Sound insulation of building elements at low frequency: A modal approach.
The 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015.
90. Reichman, B. et al.
Acoustical environment of an F-35B aircraft during vertical landings.
The 21st AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, pp. 1-15, 2015.
91. Röösl, M. et al.
Short and long term effects of transportation noise exposure (SiRENE): an interdisciplinary approach.
ICBEN 2017.
92. Satterwhite, J. H., Boudinot, F. D.
Jet noise reduction technology development at GE aircraft engines.
ICAS Congress, 2002.
93. Schomer, P.D. et al.
Human response to helicopter noise: A test of A-weighting.
U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory, report no. N-91/13, 1991.
94. Schust, M.
Effects of low frequency noise up to 100 Hz.
Noise & health 6(23), pp. 73-85. 2009.
95. Sharp, B. H., Beeks, T., Veerbeek, H.
Ground noise Polderbaan - Overview of results.
Wyle Laboratories Inc., report no. WR 06-XX, 2006.
96. Spreng, M.
Specific features of military low-altitude flight noise: Criteria for risk of damage and physiological effects.
Schriftenr Ver Wasser Boden Lufthyg 88, pp. 271-87, 1993.

97. Stanger, C.
Low frequency noise
DEFRA Department of the Environment, Northern Ireland Scottish Executive National Assembly for Wales, 2001.
98. Stirling, D. A.
Military aviation noise: A comprehensive literature survey, Draft.
Stirling Consulting, 2017.
99. Stirling, D. A.
Military aviation noise: A comprehensive literature survey.
Draft Stirling Consulting Reference Publication No. 2, 2017.
100. Sueki, M., Noba, M., Nakagomi, M., Kubota, S., Okamura, A., Kosaka, T., Watanabe, T., Yamada, S.
Study on mutual effects of low frequency noise and vibrations.
Journal of Low Frequency Noise and Vibration and Active Noise Control 9(2), pp. 66-75, 1990.
101. Sweco Danmark A/S
731 Flyvestation Skrydstrup - Beregning af flystøjsbelastning.
Forsvarsministeriets Ejendomsstyrelse, rapport nr. P8.001.19, 2019.
102. Sønderjyllands Amt.
Miljøgodkendelse Flyvestation Skrydstrup, 1999.
103. Tokita, Y., Nakamura, S.
Frequency weighting characteristics for evaluation of low frequency sound.
Inter-Noise, pp. 739-742, 1981.
104. Vercammen, M. L. S.
Criteria for low frequency noise.
The 19th International Congress on Acoustics, 2007.
105. Vos, J., Houben, M. M. J., Ploeg, F., Buikema, E.
Annoyance caused by low frequency sounds: Spectral and temporal effects.
Inter-Noise, 2010.
106. Waddington, D., Moorhouse, A., Steele, A., Woodcock, J., Condie, J., Peris, E., Sica, G., Koziel, Z.
Human response to vibration in residential environments.
Final Project Report, Defra (London), 2011.
107. Watanabe, T., Møller, H.
Low frequency hearing thresholds in pressure field and in free field.
Journal of Low Frequency Noise and Vibration and Active Noise Control 9(3), pp. 106-115, 1990.
108. Waye, K. P., Clow, A., Edwards, S., Hucklebridge, F., Rylander, R.
Effects of nighttime low frequency noise on the cortisol response to awakening and subjective sleep quality.
Life Sciences 72(8), pp. 863-875, 2003.
109. Waye, K. P.
Effects of low frequency noise and vibrations: Environmental and occupational perspectives.
Encyclopedia of Environmental Health, pp. 240-253, 2011.
110. Waye, K. P., Rylander, R.
The prevalence of annoyance and effects after long-term exposure to low-frequency noise.
Journal of Sound and Vibration 240(3), pp. 483-497, 2001.

111. Miljø- og Fødevareministeriet
Vejledning om vindmøller
VEJ nr. 9214 af 16/05/2012.
112. Whittle, L. S., Collins, S. J., Robinson, D. W.
The audibility of low frequency sounds.
Journal of Sound and Vibration 21(4), pp. 433-448, 1972.
113. Woodcock, J., Sica, G., Peris, E., Waddington, D.
Quantification of the effects of audible rattle and source type on the human response to environmental vibration.
The Journal of the Acoustical Society of America 139, pp. 1225-1234, 2016.
114. Zmarrou, H. et al.
Literatuurstudie "Rattle Noise" van Helikopters.
TNO, report no. R10188, 2013.
115. Zon, G. D. R, Janssen, S.
Een onderzoek naar de rol van "rattle noise" bij hinder door helikoptergeluid.
TNO, report no. NLR-CR-2016-167, 2016.