

Støyspektra fra veitrafikk

Gir glattede standardspektra et riktig bilde?

Tore Killengreen

Master i elektronikk

Oppgaven levert: Mai 2006

Hovedveileder: Arild Brekke, IET

Medveileder(e): Sigmund Olafsen, Brekke & Strand Akustikk as

Problembeskrivelse

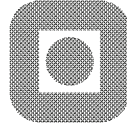
Det er for tiden stor oppmerksomhet omkring veitrafikkstøy, og det pågår en diskusjon i det norske fagmiljøet om hvordan innendørs støynivå skal beregnes. I all hovedsak benyttes i dag Håndbok 47 der beregningene gjøres med entalls karakteristikk basert på glattede gjennomsnittspekter fra ulike situasjoner. Det skal undersøkes om dette kan medføre ekstra usikkerhet, spesielt i frekvensområdet 50-250 Hz.

I utendørsspekter fra veitrafikk vil det nesten alltid være en topp og en bunn i veitrafikkstøyspektret ved lave frekvenser i frekvensområdet 50-250 Hz. Frekvenstoppen kommer ved ulike frekvenser avhengig av lokal geometri som landskapsform, trafikkbilde og lignende. Oppgaven går ut på å finne en teoretisk modell for fastsettelse av hvor detaljene i veitrafikkstøyspekter for ulike situasjoner oppstår, og da hovedsakelig toppen ved lave frekvenser i målte veitrafikkstøyspekter.

Detaljer i veitrafikkstøyspekteret har betydning for beregningen av innendørs støynivå. Det skal undersøkes hvor stor feil som gjøres ved å benytte et glattet standardisert spekter sammenlignet med et reelt veitrafikkstøyspekter ved beregning av innendørs lydnivå.

Oppgaven gitt: 2006-01-16

Hovedveileder: Arild Brekke, IET



MASTEROPPGAVE

Kandidatens navn: Tore Killengreen

Studieprogram: **Elektronikk**

Oppgavens tittel (norsk): **Støyspekter fra veitrafikk -
Gir glattede standardspektra et riktig bilde?**

Oppgavens tittel (engelsk): **Spectra From Traffic Noise -
Does Standardized Spectra Tell The Truth?**

Oppgavens tekst:

Det er for tiden stor oppmerksomhet omkring veitrafikkstøy, og det pågår en diskusjon i det norske fagmiljøet om hvordan innendørs støynivå skal beregnes. I all hovedsak benyttes i dag Byggforsk Håndbok 47 der beregningene gjøres med entallskaraktistikker basert på glattede gjennomsnittspekter fra ulike situasjoner. Det skal undersøkes om dette kan medføre ekstra usikkerhet, spesielt i frekvensområdet 50-250 Hz.

I utendørsspekter fra veitrafikk vil det nesten alltid være en topp og en bunn i veitrafikkstøyspektret ved lave frekvenser i frekvensområdet 50-250 Hz. Frekvenstoppen kommer ved ulike frekvenser avhengig av lokal geometri som landskapsform, lokalt trafikkbilde og lignende. Oppgaven går ut på å finne en teoretisk modell for fastsettelse av hvor detaljene i veitrafikkstøyspekter for ulike situasjoner oppstår, og da hovedsakelig toppen ved lave frekvenser i målte veitrafikkstøyspekter.

Detaljer i veitrafikkstøyspekteret har betydning for beregningen av innendørs støynivå. Det skal gjøres analyse av hvor stor feil som gjøres ved å benytte et glattet standardisert spekter sammenlignet med et reelt veitrafikkstøyspekter ved beregning av innendørs lydnivå.

Oppgaven gitt: 16. januar 2006

Besvarelsen leveres innen: 12. juni 2006

Besvarelsen levert: 30. mai 2006
Utført ved: Brekke & Strand Akustikk AS
Veileder: Siv. ing. Sigmund Olafsen

Trondheim, 30. mai 2006

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Arild Brekke". The signature is written in a cursive, slightly slanted style.

faglærer

I Forord

Arbeidet som presenteres i rapporten er siste del av fordypningen i studiet av signalbehandling og kommunikasjon, spesialisering akustikk. Studiet er utført ved Institutt for Elektronikk og Telekommunikasjon ved Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet, NTNU. Gjennom arbeidet med oppgaven ble det undersøkt hva som er årsaken til toppen i veitrafikkstøyspekter mellom 50-100 Hz, og hvor mye den har å si for entallskaraktistikkberegninger.

Veileder under arbeidet med oppgaven, Sigmund Olafsen, og faglærer Arild Brekke skal ha en stor takk for nyttige innspill og gode råd underveis. Svein Storeheier ved SINTEF skal også ha takk for sitt bidrag til Hypotese 2. Til slutt vil jeg takke BS-Akustikk som har lagt til rette for at jeg har kunnet jobbe ved deres kontorlokaler, samt de ansatte ved bedriften for en hyggelig avslutning på studiet.

II Sammendrag

Etter flere års arbeid med veistøy har det blitt registrert fellestrekk i ulike veitrafikkstøyspekter. Alle veitrafikkstøyspekter har en frekvenstopp ved lave frekvenser som ligger mellom 50-100 Hz. Deretter følger en bunn i frekvensspekteret mellom omtrent 100-500 Hz før det kommer en ny frekvenstopp ved 1 kHz som forårsakes av dekkstøy. Målet med oppgaven er å finne årsaken til frekvenstoppen mellom 50-100 Hz, samt å se på om frekvenstoppen har stor innflytelse på innendørs støynivå beregnet med entalls karakteristikk.

For å finne årsaken til frekvenstoppen ved lave frekvenser er det sett på 2 hypoteser. Den første hypotesen foreslår interferens mellom direkte lyd og første refleksjon fra bakken som årsak til frekvenstoppen. Den andre hypotesen foreslår motorstøy som årsak til frekvenstoppen og at motorens grunntone gir senterfrekvensen til frekvenstoppen. Beregningene benyttet for å teste Hypotese 1 viser at den kan forkastes siden resultatene ikke samsvarer med virkeligheten. Hypotese 2 støttes opp om informasjon om motorer og ligningen som gir grunntonen til motoren.

$$f_0 = \left(\frac{\text{opm}}{2} \cdot x \right) / 60$$

f_0 angir grunntonen, *opm* er turtallet på motoren i omdreininger per minutt og x er antall sylindere. Undersøkelser av 25 målte veitrafikkstøyspekter for hastigheter over 50 km/t viser at alle støyspektrene har en frekvenstopp med senterfrekvens i 63 Hz- eller i 80 Hz-oktavnbandet. Som en direkte følge av ligningen som angir grunntonen til motoren er det gjort undersøkelser både av hastigheter ved målestedene og av hva som er den mest vanlige motoren i Norge i dag. Undersøkelsene viser at det er en dominans av lette kjøretøy med firesylindret bensinmotor som vil ha turtall i området 2000-2500 opm ved vanlig kjøring. Det er en betydelig andel kjøretøy med dieselmotor i Norge. Dieselmotorer har turtallsområde som ligger rundt 1500-2000 opm ved vanlig kjøring. Bidraget fra dieselmotorene fører til at noen veitrafikkstøyspekter har en bredere frekvenstopp. Tunge kjøretøy med dieselmotor har 6 eller 8 sylindere og har også et turtallsområde rundt 1500-2000 opm ved vanlig kjøring. Da vil grunntonen ifølge ligningen ligge fra omtrent 80 Hz og oppover. Dieselmotorer med 4, 6 eller 8 sylindere vil bidra til at frekvenstoppen er bredere enn dersom det bare hadde vært bensinmotorer med 4 sylindere på veien. Markerte frekvenstopper kan oppstå ved at frisisiktslinjen mellom kilde og mottaker er skjermet. Når frisisiktslinjen er skjermet kan det oppstå demping helt ned til 80 Hz og da vil dempingen få frekvenstoppen til å se smalere ut enn den egentlig er.

Toppen ved lave frekvenser og toppen ved 1 kHz har klart definerte kilder og vil ha et høyere lydtryknivå enn generell støy og vil derfor naturlig danne en bunn i spekteret mellom seg.

Det er utført sanntids FFT-analyse av lydfiler tatt opp under måling av veitrafikkstøyspekter. Analysen viser at grunntonen til en motor som øker turtallet er

opphav til en frekvenstopp som flytter seg oppover i frekvens med økende turtall. Dette anses som et direkte bevis på Hypotese 2.

Det er utført 2 feltmålinger for å undersøke om det er mulig å forutsi hvordan veitrafikkstøyspekteret vil se ut for et gitt målested. Feltemålingene viser at ved hjelp av ligningen som angir grunntonen, informasjon om målestedet som hastighet og veitype og empiri kan det med rimelig nøyaktighet forutsies hvordan veitrafikkstøyspekteret vil se ut for et gitt målested.

Det er utført entallskarakteristikkberegninger med reelle veitrafikkstøyspekter og glattede standardspekter fra Byggforsk Håndbok 47 [Homb et al., 1999] for å se om standardspektrene gir et godt nok bilde av virkeligheten. Det er ikke benyttet reduksjonstall for konstruksjoner i beregningene, men i stedet er det brukt 5 reelle nivådifferansespekter og et midlet nivådifferansespekter for å beregne entallskarakteristikkene. Beregningene viser at det er neglisjerbare avvik mellom reelle veitrafikkstøyspekter og standardspektrene når entallskarakteristikken beregnes med et midlet nivådifferansespekter. Når entallskarakteristikken beregnes med reelle nivådifferansespekter kan det oppstå avvik opptil 5 dBA når reelle veitrafikkstøyspekter og standardspekter sammenlignes. Dette viser at det er viktig å være kritisk til beregninger med glattede standardspekter. Ved å samle inn mer data om veitrafikkstøy under 50 km/t og over 90 km/t vil ligningen for grunntonen og empiri kunne brukes med større nøyaktighet for å forutsi formen på veitrafikkstøyspekteret.

III Innholdsfortegnelse

1	INNLEDNING	1
2	TEORI	2
2.1	Veitrafikkstøy	2
2.2	Dagens beregningsmetode	4
2.3	Teori bak hypotesene	6
2.4	Generell teori	7
2.4.1	A-veing	7
2.4.2	Logaritmiske beregninger	8
2.4.3	Effekt av støydempende tiltak	8
3	METODE	9
3.1	Måleinstrumenter og programvare	9
3.1.1	Måleinstrumenter og utstyr benyttet i oppgaven	9
3.1.2	Programvare	9
3.2	Generelt om veitrafikkstøy	9
3.3	Hypotesene	10
3.3.1	Hypotese 1	10
3.3.2	Hypotese 2	11
3.4	Feltmålinger	13
3.4.1	Feltmåling 1	13
3.4.2	Feltmåling 2	14
3.5	Entallskarakteristikk med reelle veitrafikkstøyspekter og glattede standardspekter	16
3.5.1	Reelle veitrafikkstøyspekter	16
3.5.2	Reelle nivåddifferansespekter	21
3.5.3	Midlet nivåddifferansespekter	23
3.5.4	Sammenligning med reelle nivåddifferansespekter	23
3.5.5	Sammenligning med midlet nivåddifferansespekter	25
3.6	Bunnen i frekvensspekteret	25
4	RESULTATER	26
4.1	Hypotesene	26
4.1.1	Hypotese 1	26
4.1.2	Hypotese 2	27
4.2	Feltmålinger	35
4.2.1	Feltmåling 1	35
4.2.2	Feltmåling 2	36

4.3	Entallskarakteristikk med reelle veitrafikkstøyspekter og glattede standardspekter	37
4.3.1	Sammenligning med reelle nivå-differansespekter	37
4.3.2	Sammenligning med midlet nivå-differansespekter	40
4.4	Feilkilder	42
5	VIDERE ARBEID	43
6	KONKLUSJON	44
7	REFERANSER	46
8	VEDLEGG	48

IV Figurliste

FIGUR 2-1. VEITRAFIKKSTØYSPEKTER FRA E18 ÅS. MÅLINGENE ER GJORT I EN AVSTAND AV 40 M FRA SENTERLINJEN TIL VEIEN. FARTSGRENSEN ER 60 KM/T [STAIRWAY, V1.4].	3
FIGUR 2-2. GLATTEDE STANDARDSPEKTER FRA HÅNDBOK 47 [HOMB ET AL., 1999].	5
FIGUR 2-3. A-VEIINGS KURVE [KROKSTAD, 1999].	7
FIGUR 3-1. SCENARIO FOR TESTING AV HYPOTESE 1.	11
FIGUR 3-2. MÅLESTED I PRESIDENTGATA 5 [GULESIDER, 2006].	13
FIGUR 3-3. OPPSETT AV MIKROFON I PRESIDENTGATA 5. BILDET TIL VENSTRE ER TATT I NORDØSTLIG RETNING.	14
FIGUR 3-4. MÅLESTED VED RIKSVEI 35 [GULESIDER, 2006].	15
FIGUR 3-5. OPPSETT AV MIKROFON VED RIKSVEI 35. BILDET TIL VENSTRE ER TATT I VESTLIG RETNING.	15
FIGUR 3-6. MÅLESTED I STORGATA 110, HORTEN [GULESIDER, 2006].	17
FIGUR 3-7. LOGARITMISK MIDDEL AV MÅLESERIENE FRA STORGATA 110, HORTEN.	17
FIGUR 3-8. MÅLESTED VED E18, ÅS [GULESIDER, 2006].	18
FIGUR 3-9. LOGARITMISK MIDDEL AV MÅLESERIENE FRA E18 ÅS.	18
FIGUR 3-10. MÅLESTED I MARKALLEEN 60A, BÆRUM [GULESIDER, 2006].	19
FIGUR 3-11. LOGARITMISK MIDDEL AV MÅLESERIENE FRA MARKALLEEN 60A, BÆRUM.	19
FIGUR 3-12. MÅLESTED VED E6 DJUPDAL [GULESIDER, 2006].	20
FIGUR 3-13. LOGARITMISK MIDDEL AV MÅLESERIENE FRA E6 DJUPDALEN.	20
FIGUR 3-14. NIVÅDIFFERANSESPEKTER 1,2 OG 3.	22
FIGUR 3-15. NIVÅDIFFERANSESPEKTER 4 OG 5.	22
FIGUR 3-16. MIDLET NIVÅDIFFERANSE.	23
FIGUR 4-1. MÅLESTED HØNSVEIEN 54, ASKER [GULESIDER, 2006].	29
FIGUR 4-2. VEITRAFIKKSTØYSPEKTER FRA E18 GJENNOM ASKER. MÅLINGENE ER GJORT I EN AVSTAND AV 54 M FRA SENTERLINJEN TIL VEIEN. FARTSGRENSEN ER 90 KM/T [STAIRWAY, V1.4].	30
FIGUR 4-3. TVERRSNITT AV MÅLEPUNKT HØNSVEIEN 54.	31
FIGUR 4-4. MÅLESTED LERKEVEIEN 15, ASKER [GULESIDER, 2006].	32
FIGUR 4-5. SAMMENLIGNING AV MÅLEPUNKTENE I LERKEVEIEN 15.	33
FIGUR 4-6. TVERRSNITT AV MÅLEPUNKTER I LERKEVEIEN 15.	33
FIGUR 4-7. BRUKERGRENSESNITT I WAVEPAD. MENYVALGET FOR SANNTIDS FFT VISES [NCH, 2006].	34
FIGUR 4-8. MÅLING I PRESIDENTGATA 5. MÅLINGEN ER GJORT I EN AVSTAND AV 4 M FRA SENTERLINJEN TIL VEIEN. FARTSGRENSEN ER 30 KM/T.	36
FIGUR 4-9. MÅLING VED RIKSVEI 35. MÅLINGEN ER GJORT I EN AVSTAND AV 15 M FRA SENTERLINJEN TIL VEIEN. FARTSGRENSEN ER 100 KM/T.	37
FIGUR 4-10. DIFFERANSE MELLOM A-VEID REELT VEITRAFIKKSTØYSPEKTER OG NORMALISERT STANDARDSPEKTER C3.	41

V Tabelliste

TABELL 2-1. OVERSIKT OVER GRENSEVERDIER FOR UTENDØRS OG INNENDØRS LYDNIVÅ FOR NYBYGG ETTER NS 8175 KLASSE C. VERDIENE I PARENTES ER KUN ANBEFALINGER [HOMB ET AL., 1999].	4
TABELL 2-2. PRAKTISK EFFEKT AV ENDRING I DBA-NIVÅ [HOMB ET AL., 1999].	8
TABELL 3-1. REELLE VEITRAFIKKSTØYSPEKTER SAMMENLIGNET MED STANDARDSPEKTER.	21
TABELL 4-1. OVERSIKT OVER GRUNNTONEN TIL EN MOTOR MED ET GITT ANTALL SYLINDERE.	27
TABELL 4-2. ENTALLSKARAKTERISTIKK OG AVVIK FOR PRESIDENTGATA 5. ALLE VERDIER I DBA.	38
TABELL 4-3. ENTALLSKARAKTERISTIKK OG AVVIK FOR STORGATA 110. ALLE VERDIER I DBA.	38
TABELL 4-4. ENTALLSKARAKTERISTIKK OG AVVIK FOR E18 GJENNOM ÅS. ALLE VERDIER I DBA.	38
TABELL 4-5. ENTALLSKARAKTERISTIKK OG AVVIK FOR MARKALLEEN 60A. ALLE VERDIER I DBA.	39
TABELL 4-6. ENTALLSKARAKTERISTIKK OG AVVIK FOR E6 DJUPDAL. ALLE VERDIER I DBA.	39
TABELL 4-7. ENTALLSKARAKTERISTIKK OG AVVIK FOR RIKSVEI 35. ALLE VERDIER I DBA.	39
TABELL 4-8. ENTALLSKARAKTERISTIKK OG AVVIK FOR ET MIDLET NIVÅDIFFERANSESPEKTER. ALLE VERDIER I DBA.	40

1 Innledning

Det er for tiden stor oppmerksomhet omkring veitrafikkstøy, og det pågår en diskusjon i det norske fagmiljøet om hvordan innendørs støynivå skal beregnes. I all hovedsak benyttes i dag Håndbok 47 [Homb et al., 1999] der beregningene gjøres med entallskaraktistikker basert på glattede gjennomsnittspekter fra ulike situasjoner. Det skal undersøkes om dette kan medføre ekstra usikkerhet, spesielt i frekvensområdet 50-250 Hz.

I utendørsspekter fra veitrafikk vil det nesten alltid være en topp og en bunn i veitrafikkstøyspektret ved lave frekvenser i frekvensområdet 50-250 Hz. Frekvenstoppen kommer ved ulike frekvenser avhengig av lokal geometri som landskapsform, trafikkbilde og lignende. Oppgaven går ut på å finne en teoretisk modell for fastsettelse av hvor detaljene i veitrafikkstøyspekter for ulike situasjoner oppstår, og da hovedsakelig toppen ved lave frekvenser i målte veitrafikkstøyspekter.

Detaljer i veitrafikkstøyspekteret har betydning for beregningen av innendørs støynivå. Det skal undersøkes hvor stor feil som gjøres ved å benytte et glattet standardisert spekter sammenlignet med et reelt veitrafikkstøyspekter ved beregning av innendørs lydnivå.

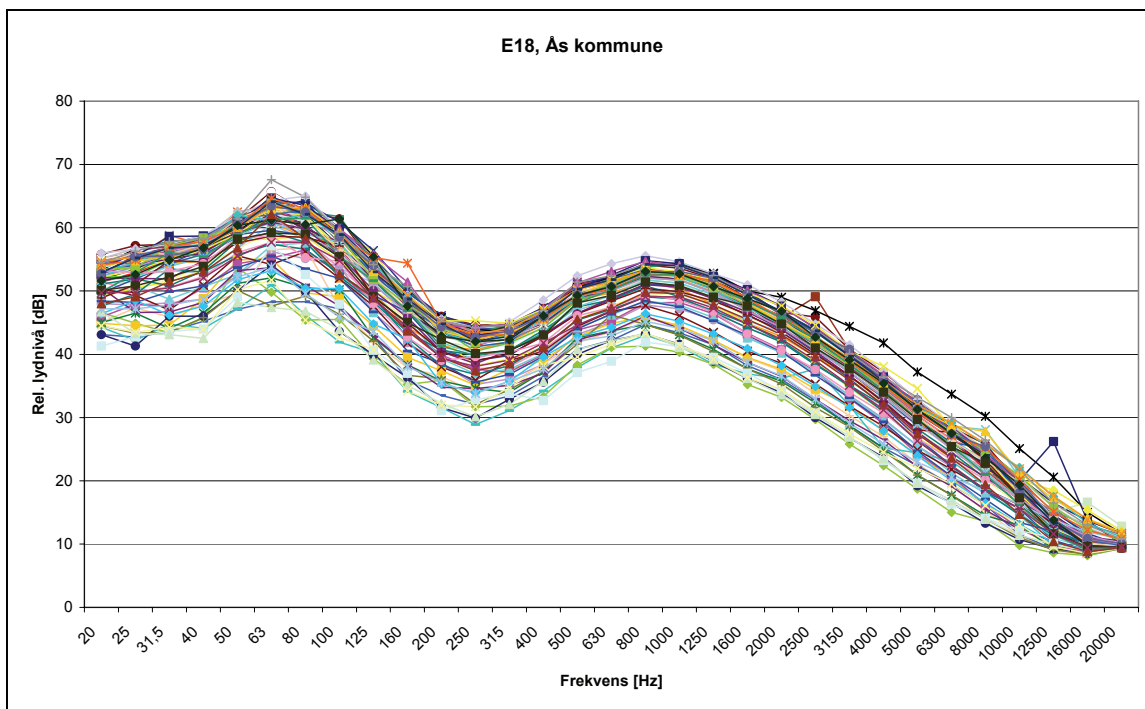
2 Teori

For å forstå motivasjonen bak oppgaven er det nyttig å se på teori om veitrafikkstøyspekter. Det blir foretatt en kort presentasjon av den teorien som behøves for å tolke og forstå resultatene, en innføring i relevant stoff fra Håndbok 47 og en kort gjennomgang av krav til lydnivå. Andre tema som skal ses på er teori bak hypotesene fremstilt i kapittel 3, A-veiing, logaritmiske beregninger og praktisk effekt av støydemping.

2.1 Veitrafikkstøy

BS-Akustikk har en database kalt Stairway med omtrent 2100 veitrafikk-spekter målt på forskjellige steder hovedsakelig på østlandsområdet. Veitrafikkstøyspektrene presentert i oppgaven er enten fra målinger gjort i forbindelse med oppgaven eller spekter gjengitt fra Stairway. Veitrafikkstøyspekteret i Figur 2-1 er målt ved E18 gjennom Ås og Figur 3-8 viser målestedet i kart. Spekteret har en tydelig en topp ved 63 Hz og ved 1 kHz. Veitrafikkstøy er konsentrert i frekvensområdet fra omtrent 30-40 Hz og opp til i overkant av 1 kHz. Over 1 kHz avtar lydtrykksnivået lineært med opptil så mye som 10 dB per oktav i de fleste veitrafikkstøyspekter, Figur 2-1. Frekvenstoppen som ligger i frekvensområdet 50-100 Hz er den det blir fokusert på i rapporten. Frekvenstoppen ved 1 kHz forårsakes av dekkstøy og inneholder omtrent 70 % av lydenergien i et A-veid veitrafikkstøyspekter [Sandberg, 2001]. Veitrafikkstøyspekteret i Figur 2-1 blir ytterligere diskutert samt benyttet i beregninger i kapittel 3.

For å se detaljene i veitrafikkstøyspekteret må analyse gjøres i $\frac{1}{3}$ oktavbånd. Senterfrekvensen til $\frac{1}{3}$ oktavbånd angis av ISO 140-standarden og har senterfrekvens i $\frac{1}{3}$ oktavbåndene mellom 20 Hz - 20 kHz som vist i Figur 2-1. Dersom analyse av veitrafikkstøyspekteret gjøres i oktavbånd vil ikke detaljene i veitrafikkstøyspekteret komme tydelig frem, i verste fall vil ikke frekvenstoppen vises overhodet.



Figur 2-1. Veitrafikkstøyspekter fra E18 Ås. Målingene er gjort i en avstand av 40 m fra senterlinjen til veien. Fartsgrensen er 60 km/t [Stairway, v1.4].

Veistøy kan virke sjenerende på omgivelsene og dersom veien er sterkt trafikkert vil det kunne oppleves som plagsomt å oppholde seg i området rundt veien. For å kunne skjerme omgivelsene fra veistøy på en kostnadseffektiv og enkel måte, er det viktig å kunne forutsi hvordan veitrafikkstøyspekteret vil se ut og hvor høyt ekvivalent dBA-nivå er. For å få til dette må kildene være kjent. Det er både tidkrevende og kostbart å utføre målinger for å få oversikt over støy i et bestemt område. Derfor er det enklere å se på hvilke støykilder som finnes i det aktuelle området og ut ifra kildene gjøre en teoretisk analyse av hvordan veitrafikkstøyspekteret kommer til å se ut og hvilket ekvivalentnivå som kan forventes.

Et enkelt og mye brukt tiltak for å skjerme omgivelser fra veistøy er støyskjermer. Skjermene er plassert langs veibanen og er effektive for å stoppe frekvenser ned til omtrent 80 Hz, vist i avsnitt 4.1.2. Terrenget rundt målestedet kan også fungere som en støyskerm dersom målepunktet for eksempel ligger bak en høyde. Lave frekvenser vil ikke hindres av skjermene på grunn av diffraksjon som gjør at lyden bøyer seg rundt og over skjermen. Under en viss frekvens vil ikke en gitt støyskerm ha innvirkning på lydbølgene siden bølgelengden er mye større enn dimensjonen til støyskjermen, og over en viss frekvens vil støyskjermen tydelig dempe alle lydbølger som ikke har frisisiktslinje mellom kilde og mottaker. Ved presentasjon av resultatene i kapittel 4, blir også nødvendig teori i forhold til støyskjermer presentert.

Det er viktig å skille mellom lydnivå utenfor en bygning og inne i bygningen. Teknisk forskrift til plan- og bygningsloven fra 1997 angir funksjonskrav for lydnivåer i forbindelse med utendørs lydkilder. Forskriften tallfester ingen grenseverdier, men anses som oppfylt dersom grenseverdiene i Norsk Standard NS 8175 følges [Homb et al.,

1999]. Tabell 2-1 er gjengitt fra Håndbok 47, og viser grenseverdiene for ekvivalent innendørs og utendørs lydtrykksnivå for nybygg [Homb et al., 1999].

Tabell 2-1. Oversikt over grenseverdier for utendørs og innendørs lydnivå for nybygg etter NS 8175 klasse C. Verdiene i parentes er kun anbefalinger [Homb et al., 1999].

Bygningskategori	Innendørs lydnivå [dBA]		Utendørs lydnivå* [dBA]
	$L_{eq, 24t}$ (døgnmiddel)	L_{maks} (natt: 22-06)	$L_{eq, 24t}$ (døgnmiddel)
Boliger	30	45	(55)
Skoler, undervisning	30	-	(55)
Barnehager, fritidshjem	30	-	(55)
Sykehus, pleieranstalter	30	45	(50)
Overnattingssteder	35	-	-

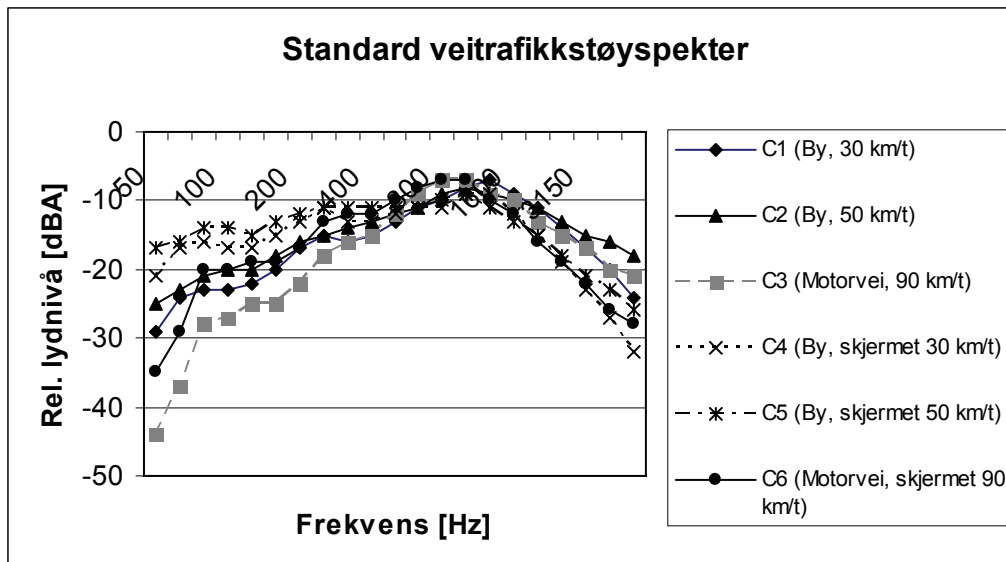
* Utenfor vindu og på minst én uteplass

De fleste nivådifferansespekter har en dipp i frekvensspekteret under 500 Hz. Det vil si at for et frekvensområde, som avhenger av fasadetyper, er luftlydisolasjonen redusert. Dersom dippen i nivådifferansespekteret sammenfaller med et frekvensområde som har høyt lydtrykksnivå, vil det kunne oppleves som å ha et kjøretøy i stua. I avsnitt 3.5.2, Figur 3-15, er det vist et nivådifferansespekter som har en tydelig dipp i frekvensspekteret.

2.2 Dagens beregningsmetode

For å sikre at støy og lydmålinger blir utført på en korrekt måte slik at satte grenseverdier overholdes og forskrifter følges finnes det standarder. ISO 140-standardene beskriver retningslinjene som skal brukes for laboratorium og bygningsakustiske målinger. *NS 8174 Måling av lydnivå fra veitrafikk* er et eksempel på en norsk standard som gir retningslinjer for måling av veitrafikkstøy. Beregninger i Håndbok 47 er basert på bruk av $R_w + C_{tr}$ etter *NS-EN ISO 717-1 Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of building elements*. $R_w + C_{tr}$ er definert som veid lydreduksjonstall korrigert for standard veitrafikkstøyspekter, der R_w er veid lydreduksjonstall og C_{tr} er standard veitrafikkstøyspekter. Standard veitrafikkstøyspekter er gitt ved kurven C2 (by, 50 km/t) i Figur 2-2 [Homb et al., 1999].

De glattede standard veitrafikkstøyspektrene fra Håndbok 47 er vist i Figur 2-2. Veitrafikkstøyspektre for hastighetene 30, 50 og 90 km/t er gitt med og uten støyskjerming. Det er viktig å merke seg at det ikke er mulig å gjøre en direkte sammenligning av de glattede standardspektrene og de målte veitrafikkstøyspektrene fra Stairway. De glattede standardspektrene er A-veide og normalisert til 0 dBA. I avsnitt 3.5 blir det diskutert hvordan glattede standardspekter og reelle veitrafikkstøyspekter kan sammenlignes.



Figur 2-2. Glattede standardspekter fra Håndbok 47 [Homb et al., 1999].

Beregning av innendørs støy som beskrevet i Håndbok 47 gir ett tall som angir demping i dBA mellom utendørs og innendørs støy, såkalt entallskarakteristikk. Entallskarakteristikken blir beregnet ved å ta for seg de forskjellige transmisjonsveiene lyden har inn i en bygning, herunder nevnes yttervegger, tak, ventiler og vinduer. Håndbok 47 inneholder en oversikt over transmisjonsveiene med forskjellig konstruksjon, samt lydreduksjonstallet for konstruksjonene. I oversikten ses det hvilke konstruksjoner som samsvarer med de konstruksjonene som skal brukes i bygget og da finnes også reduksjonstallet for den aktuelle konstruksjonen. Når reduksjonstallet for alle transmisjonsveiene er funnet adderes de logaritmisk for å angi total demping for alle transmisjonsveiene, entallskarakteristikken. Entallskarakteristikken er en frekvensuavhengig størrelse og vil derfor ikke gi informasjon om eventuelle fremtredende frekvenser. Det blir forklart mer om entallskarakteristikken og metoden for beregning senere i rapporten, kapittel 3 og 4.

For boliger som er spesielt støyutsatt er det kommet en tilleggsforskrift; *Forskrift om grenseverdier for lokal luftforurensing og støy* [Miljøverndepartementet, 1997]. I forskriften beskrives grenseverdier for innendørs døgnekvivalent lydnivå på 42 dBA for å utføre tiltak, og 35 dBA for kartlegging [Miljøverndepartementet, 1997]. Dersom målinger avslører innendørs døgnekvivalent lydnivå på 42 dBA og over er det eieren av støykilden som skal påkoste utredninger [Miljøverndepartementet, 1997].

2.3 Teori bak hypotesene

Hypotese 1 foreslår at årsaken til frekvenstoppen ved lave frekvenser er interferens mellom direkte lyd og første refleksjon fra underlaget. For å undersøke Hypotese 1, avsnitt 3.3, er det brukt Pytagoras' læresetning som vist i ligning 2.1:

$$x = \sqrt{y^2 + z^2} \quad (2.1)$$

x = veilengde til direkte/reflektert signal
 y = vertikal avstand mellom støykilde og mottaker
 z = horisontal avstand mellom støykilde og mottaker

I tillegg er det brukt sammenhengen mellom bølgehastighet c , frekvens f , og bølgelengde λ som vist i ligning 2.2:

$$c = f\lambda \quad (2.2)$$

Hypotese 2 forslår at frekvenstoppen ved lave frekvenser forårsakes av antenning av drivstoffet i en motor. Antall antenner per sekund gir grunntonen til motoren og grunntonen bestemmer senterfrekvensen til frekvenstoppen. Når drivstoffet i en motor antennes vil det skje eksplosjonsartet. I bensinmotorer antennes drivstoffet med en gnist fra en tennplugg og i dieselmotorer antennes drivstoffet av høy temperatur og trykk. Selv om det er forskjell på antenningsmekanismene har begge motortypene til felles at veivakselen dreier 2 ganger om sin egen akse mellom hver gang drivstoffet i en sylinder antennes. Eksplosjonen som følger av antenningen gir grunntonen til motoren.

For å finne grunntonen til en motor kan det ved hjelp av informasjonen over settes opp en ligning, ligning 2.3, som gir grunntonen til en motor:

$$f_0 = \left(\frac{opm}{2} \cdot x \right) / 60 \quad (2.3)$$

f_0 er grunntonen, opm er turtallet på motoren i omdreininger per minutt og x er antall sylindere. Hver sylinder får en antenning per 2 omdreininger og da må opm divideres på 2, deretter multipliseres med antall sylindere, x . Uttrykket inne i parenteser gir antenner per minutt og derfor må det divideres på antall sekunder per minutt, 60, for å finne antall antenner per sekund som igjen gir grunntonens frekvens i Hz.

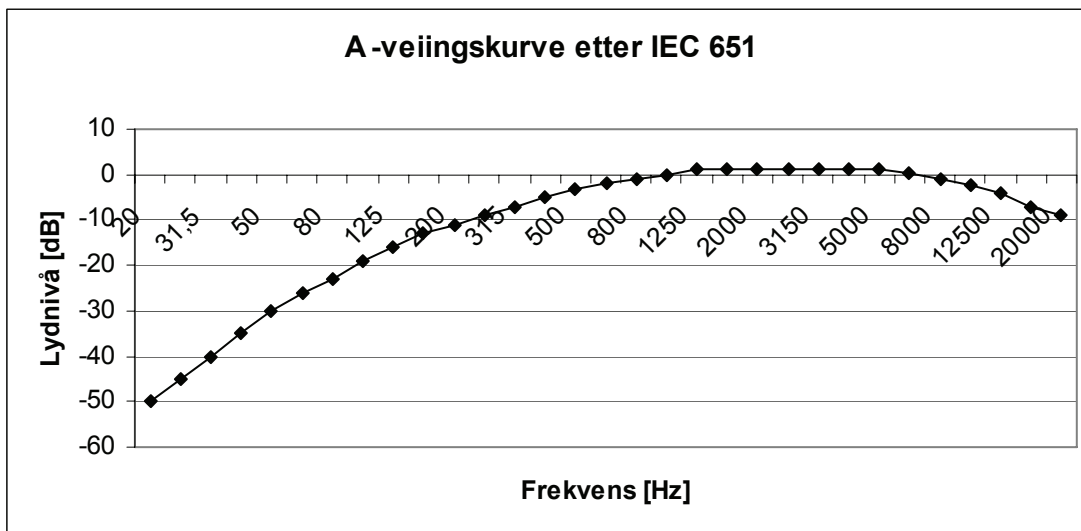
Grunntoner funnet ved hjelp av ligning 2.3 er basert på motorer med 4 sylindere dersom annet ikke er spesifisert.

2.4 Generell teori

Under arbeidet med oppgaven har det blitt utført beregninger på tallmateriale bak veitrafikkstøyspekter. Siden tallmaterialet er omfattende blir ikke beregningene gjengitt. Beregningsmetodene blir forklart og presentert på en lettfattelig måte og samtidig illustreres resultatene med plottede spekter og diskuteres. I dette avsnittet vil teorien bak beregningene gjennomgås. Til slutt blir det vist en oversikt over effekt av støydempende tiltak.

2.4.1 A-veiing

På 1930 tallet gjorde H. Fletcher og W. A. Munson undersøkelser av hørselen [Wikipedia, 2006]. Testpersoner skulle sammenligne en 1 kHz rentone med en testlyd av en annen frekvens og vurdere når testlyden hadde samme lydtrykksnivå som rentonen på 1 kHz [Wikipedia, 2006]. Fra testene fant de ut at hørselen er mest følsom for frekvenser rundt 4 kHz. Arbeidet deres er representert ved Fletcher-Munson kurvene, og viser hørselens følsomhet for 20 Hz - 16 kHz [Krokstad, 1999, Wikipedia, 2006]. D. W. Robinson og R. S. Dadson videreførte i 1956 arbeidet, og kurvene som er et resultat av deres arbeid kalles likelydskurver [Wikipedia, 2006]. Uten å dvele for mye ved likelydskurvene kan det videre nevnes at det med utgangspunkt i likelydskurvene er utviklet 3 filter, A-, B- og C-veiingsfilter, for å etterligne hørselen ved forskjellige lydtrykksnivå. Filteret som er brukt i oppgaven er A-veiingsfilter siden forskrifter og anbefalte grenseverdier innenfor temaene oppgaven berører er knyttet til A-veide verdier. Frekvensspekter filtrert gjennom et A-veiingsfilter, Figur 2-3, kalles A-veide og har benevnelse dBA. A-veiingsfilter benyttes ved lave lydnivå, B-veiingsfilter ved middels lydnivå og C-veiingsfilter ved høyt lydnivå [Krokstad, 1999].



Figur 2-3. A-veiings kurve [Krokstad, 1999].

2.4.2 Logaritmiske beregninger

dB begrepet er sentralt i akustikk og det er derfor viktig å kunne gjøre beregninger med dB-verdier. Formlene for logaritmisk addisjon og gjennomsnitt blir presentert og gjennomgått.

Logaritmisk addisjon

Dersom en har dB-verdiene i hvert oktavbånd for et frekvensspekter tilgjengelig kan det samlede lydtrykksnivået finnes ved logaritmisk addisjon, vist i ligning 2.4:

$$L_{sum} = 10 \cdot \log\left(10^{\frac{Verdi_1}{10}} + 10^{\frac{Verdi_2}{10}} + \dots + 10^{\frac{Verdi_N}{10}}\right) dB \quad (2.4)$$

L_{sum} er det totale lydtrykket og Verdi_1, Verdi_2 etc. angir dB-verdiene for oktavbåndene. Ved hjelp av ligning 2.4 kan N antall dB-verdier adderes for å finne det totale lydtrykket i dB. Logaritmisk addisjon brukes blant annet for å finne ekvivalent dBA-nivå. Dette vil beskrives ytterligere i kapittel 3.

Logaritmisk midling

Under beregninger har flere dB-verdier blitt midlet. Logaritmisk midling gjøres ved hjelp av ligning 2.5:

$$L_{middel} = 10 \cdot \log\left(\frac{10^{\frac{Verdi_1}{10}} + 10^{\frac{Verdi_2}{10}} + \dots + 10^{\frac{Verdi_N}{10}}}{N}\right) dB \quad (2.5)$$

L_{middel} er den logaritmiske midlingen av N verdier. Logaritmisk midling vil brukes for å midle flere måleserier og beskrives nærmere i kapittel 3.

2.4.3 Effekt av støydempende tiltak

For å illustrere hvilken praktisk effekt endringer i dBA-nivå har, er Tabell 2-2 gjengitt fra Håndbok 47.

Tabell 2-2. Praktisk effekt av endring i dBA-nivå [Homb et al., 1999].

Endring [dBA]	Praktisk effekt
ca 1	Forbedringen er knapt merkbar
2-3	Forbedringen er merkbar
4-5	Forbedringen er godt merkbar
5-6	Forbedringen er vesentlig
8-10	Forbedringen oppfattes som halvering av støyen

3 Metode

I dette kapittelet blir arbeid som ligger bak rapporten gjennomgått samt at måleinstrumenter og programvare brukt under arbeidet blir presentert. Videre beskrives det hvordan problemstillingen er løst og hvordan fremgangsmåten ved beregninger er.

3.1 *Måleinstrumenter og programvare*

3.1.1 **Måleinstrumenter og utstyr benyttet i oppgaven**

Under arbeidet med oppgaven er det utført målinger på 2 forskjellige steder som beskrives nærmere i avsnitt 3.4. Måleinstrumentet som er benyttet under målingene er Norsonic 121, N121, oktavnåndsanalysator med serienummer 31297. N121 kan utføre målinger parallelt i $\frac{1}{3}$ oktavnånds fra 6,3 Hz - 5 kHz, samt gjøre lydopptak av målingene. I tillegg til N121 er det brukt mikrofon fra Norsonic med typebetegnelse 1225 og serienummer 59968. Følsomheten til mikrofonen er 50 mV/Pa [Norsonic, 2006]. Måleinstrument og mikrofon kobles sammen med LEMO-kabler.

3.1.2 **Programvare**

Under arbeidet med oppgaven er det brukt forskjellig programvare. Microsoft Excel og Microsoft Access fra Microsoft Office 2003 og WavePad v 2.10 er benyttet.

Stairway databasen er utviklet i Access og med unntak av feltnålingene er alle veitrafikkstøyspekter, nivådifferansespekter og informasjon om målestedene hentet fra Stairway. Excel er brukt for å utføre beregninger på veitrafikkstøyspekter og nivådifferansespekter. WavePad er benyttet for å studere sanntids Fouriertransformasjon, FFT, av lydfiler tilhørende veitrafikkstøyspekter fra Stairway. Excel og Access anses som kjent og vil derfor ikke gis noen nærmere beskrivelse. WavePad vil ikke gis noen detaljert beskrivelse, men i avsnitt 4.1.2 blir den brukte funksjonen illustrert.

3.2 *Generelt om veitrafikkstøy*

Etter flere års arbeid med veistøy har det blitt registrert fellestrekk i veitrafikkstøyspekter målt på forskjellige steder og med forskjellig hastighet på kjøretøyene. Alle veitrafikkstøyspektrene har en topp i frekvensspekteret mellom 50-100 Hz og en topp forårsaket av dekkstøy ved 1 kHz. De fleste spekter vil ha en tydelig bunn mellom 100-500 Hz, men bunnen kan også være mindre markert. Veitrafikkstøyspektrene i Stairway er målt langs flere veityper som bygater, landevei og motorvei for hastigheter hovedsaklig mellom 50-90 km/t. Frekvenstoppen mellom 50-100 Hz finnes i alle veitrafikkstøyspekter og det vil derfor være naturlig å søke årsaken til frekvenstoppen. I tillegg til å finne årsaken til frekvenstoppen er det interessant å se på hvor stort avviket er dersom entallskarakteristikkeregninger utføres med reelle veitrafikkstøyspekter sammenlignet med glattede standardspekter fra Håndbok 47. Dette blir beskrevet senere i kapittelet og resultatet av sammenligningen diskuteres i kapittel 4. Det er ikke sett på hvordan ekvivalent dBA-nivå kan finnes for en gitt situasjon siden det allerede finnes metoder for ekvivalentnivåberegninger [Kinsler et al., 2000]. Arbeidet med problemstillingen har avslørt at frekvenstoppen ved 50-100 Hz forårsakes av motorstøy

og at senterfrekvensen bestemmes av grunntonen til motoren. Arbeidet er derfor konsentrert om frekvenstoppen og ikke bunnen i spekteret.

For å finne årsaken til frekvenstoppen er det sett på forskjellige teorier. Teoriene som er undersøkt er satt opp i to hypoteser. Det er naturlig å anta at årsaken til frekvenstoppen er interferens, og interferens ligger til grunn for Hypotese 1 i avsnitt 3.3. Hypotese 2 foreslår at motorstøy er årsaken til frekvenstoppen ved lave frekvenser, avsnitt 3.3. I avsnitt 3.3 vil det også beskrives hva som er gjort av undersøkelser for å kunne godta Hypotese 2.

Tallmaterialet bak veitrafikkstøyspektrene og nivådifferansespektrene presentert i rapporten blir ikke gjengitt på grunn av opphavsrettigheter. Spektrene som blir presentert vil være nyttige for å illustrere eksempler og resultater som blir diskutert i rapporten. Studerte veitrafikkstøyspekter er hentet fra Stairway, og veitrafikkstøyspekter med færre enn 10 måleserier ble valgt bort. Årsaken til at det i hovedsak ikke ses på veitrafikkstøyspekter med færre enn 10 måleserier er at frekvenstoppen ikke nødvendigvis kommer tydelig frem ved korte måletider. En måleserie representeres med en kurve og kan være timesekvivalenter, $L_{eq, 1t}$, eller ekvivalentnivå for kortere eller lengre tid. For å få et bredere sammenligningsgrunnlag i avsnitt 3.5 er det allikevel tatt med 3 veitrafikkstøyspekter som har færre enn 10 måleserier. Med flere måleserier vil og frekvensspekteret gi et bedre bilde av hvordan det gjennomsnittlige trafikkbildet ser ut på målestedet. To av veitrafikkstøyspektrene med færre enn 10 måleserier er feltmålingene beskrevet i avsnitt 3.4, og ett veitrafikkstøyspekter målt i Horten kommune, se avsnitt 3.5.

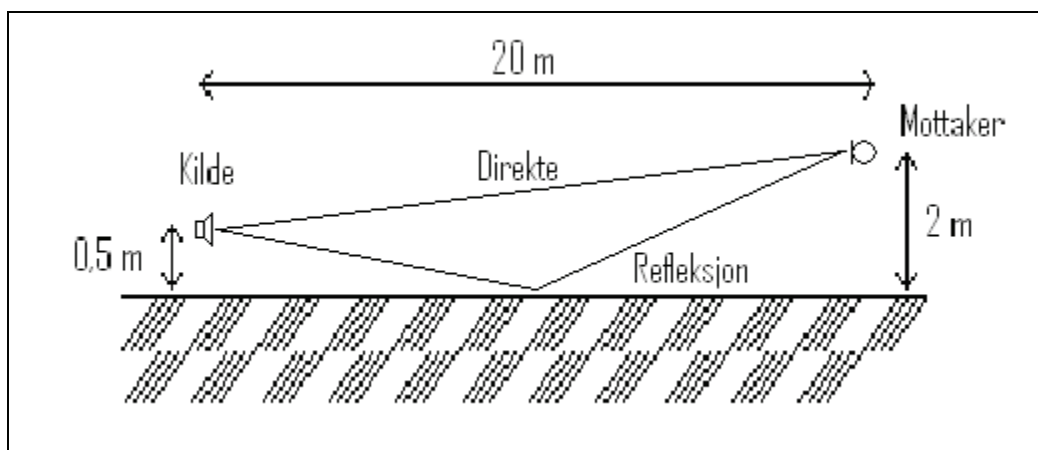
Det interessante frekvensområdet for støyberegninger er 50 Hz - 5 kHz. I avsnitt 2.2 ble det kort beskrevet hvordan entalls karakteristikkberegninger gjøres i Håndbok 47. Det veide lydreduksjonstallet, R_w , gis ut fra konstruksjonen som beregningene gjøres for. Dette korrigeres med et omgjøringsstall bestemt av trafikksituasjonen på målestedet, se Figur 2-2 [Homb et al., 1999]. Omgjøringsstallet C_{tr} gjelder for frekvensområdet 100-3150 Hz. I den senere tid har flere måledata kommet til og et nytt omgjøringsstall for et utvidet frekvensområde, 50 Hz - 5 kHz, [Homb et al., 1999] er beregnet. Det vil derfor være naturlig å løse problemstillingen for det utvidede frekvensområdet 50 Hz - 5 kHz.

3.3 Hypotesene

3.3.1 Hypotese 1

Som tidligere nevnt er det naturlig å anta at årsaken til frekvenstoppen er interferens, og interferens ligger til grunn for den første hypotesen.

Hypotese 1: Når lyden forplantes fra støykilden til mottaker vil det oppstå interferens mellom direkte støy og første refleksjon fra underlaget. Senterfrekvensen til toppen i veitrafikkstøyspekteret svarer til den frekvensen som har bølgelengde i luft lik differansen i veilengde til direkte og reflektert lyd.



Figur 3-1. Scenario for testing av Hypotese 1.

For å teste hypotese 1 er det brukt et enkelt scenario, se Figur 3-1. Størrelsesforholdet mellom avstandene i figuren er ikke korrekt da den kun er ment å gi en skisse av scenarioet brukt for å teste Hypotese 1. Mellom vei og mottaker er det flatt terreng. Støykilden er plassert 0,5 m over senterlinjen på veien, og mottaker er plassert 20 m unna og 2 m over terrenget. Linjene indikerer hvordan direkte og reflekterte lyd forplantes mellom kilde og mottaker. I kapittel 4 blir det vist et regneeksempel som tester og beviser at Hypotese 1 kan forkastes.

3.3.2 Hypotese 2

Hypotese 2 bygger på at turtallet til motoren er årsaken til frekvenstoppen.

Hypotese 2: Turtallet til kjøretøyet bestemmer antall antenner av drivstoffet per sekund. Eksplosjonen som oppstår ved antenning av drivstoffet i sylindrene er opphav til motorstøy med en grunntone bestemt av antall antenner per sekund. Grunntonens frekvens er senterfrekvensen til frekvenstoppen.

Undersøkelser av skiltet fartsgrense og gjennomsnittlig faktisk hastighet til kjøretøyene under målingene i Stairway, viser at hastigheten kjøretøyene beveger seg i følger skiltet fartsgrense uten store avvik. Altså kan det med utgangspunkt i skiltet fartsgrense med stor sannsynlighet forutsies at kjøretøyene gjennomsnittlig beveger seg i en hastighet som er lik skiltet hastighet. Å kunne forutsi hastigheten og dermed turtallet til kjøretøyene er en forutsetning for å kunne bruke ligning 2.3 til å forutsi senterfrekvensen til toppen i målte veitrafikkstøyspekter.

En nærmere undersøkelse av veitrafikkstøyspektrene i Stairway med 10 eller flere måleserier, avslører at det er mulig å angi mer nøyaktig hvor toppen kommer. Senterfrekvensen til toppen i alle 25 undersøkte veitrafikkstøyspekter er enten i 63 Hz eller i 80 Hz $\frac{1}{3}$ oktavbåndet for hastigheter over 50 km/t uavhengig av målested. Noen veitrafikkstøyspekter har en svært bred stopp mens andre igjen har en mer markert frekvenstopp. Informasjonen som kan hentes ut ifra at frekvenstoppen har senterfrekvens innenfor et frekvensområde på kun 20 Hz er at den gjennomsnittlige sjåfør

hovedsakelig opererer i turtallsområdet 2000-2500 opm uavhengig av hastighet ved vanlig kjøring. Trafikkbildet i Norge og Europa domineres av personbiler og varebiler, såkalte lette kjøretøy. Det store flertall av lette kjøretøy i Europa har 4 sylindere [Salminen AS, 2006]. Under måling av veitrafikkstøyspekter i Stairway er det utført trafikkteiling der tunge og lette kjøretøy telles hver for seg. Undersøkelsen viser at andelen tunge kjøretøy gjennomsnittlig ligger på 10 %.

For lette kjøretøy med firesylindret bensinmotor stemmer anslått turtallsområde bra. Tunge kjøretøy som lastebiler og traktorer med dieselmotorer har 6 eller 8 sylindere og vil generelt operere i et lavere turtallsområde, 1500-2000 opm ved vanlig kjøring, og i lette kjøretøy har dieselmotorer ofte 4 sylindere. Ut ifra ligning 2.3 vil grunntonen til et tungt kjøretøy avvike litt fra grunntonen til lette kjøretøy på grunn av antall sylindere, se Tabell 4-1. Som nevnt er det lette kjøretøy som dominerer trafikkbildet, og veitrafikkstøy vil dermed også være dominert av støy fra lette kjøretøy. Det skal også nevnes at andelen lette kjøretøy med dieselmotor øker og allerede er betydelig. I avsnitt 4.1.2 blir betydningen av dieselmotorer i tunge og lette kjøretøy utdypet og diskutert videre.

Det er ingen eksakt vitenskap å bestemme hvilket turtall den gjennomsnittlige sjåfør har ved en gitt hastighet, og det eneste som kan gjøres er å lage en tilnærming som viser gjennomsnittet. Det er mulig å utstyre kjøretøyet med andre dekkdimensjoner enn hva som er standard fra fabrikken, og ofte er det mulig å justere diameter på felgen med $\pm 1''$ noe som forandrer den totale diameter på hjulet og også turtallet for en gitt hastighet. Videre vil det være forskjeller mellom bilmerker med tanke på girutveksling, men her vil variasjonene være små. Dagens bilmodeller har også mange likheter, dette understrekes av at store selskaper ofte eier flere bilmerker. Et eksempel er Ford Motor Company som blant annet eier Ford, Volvo og Mazda [Ford, 2006]. Bilmerker som har samme eier vil automatisk dele komponenter siden det sparer utviklingskostnader. Selv om det finnes forskjeller mellom bilfabrikantene kan det ut ifra frekvensspektrene konstateres at støyspekteret til dagens biler har lik form ved lik kjøring. Variasjoner som følge av dekkdimensjoner, girutveksling og individuell kjøring vil falle inn under feilmarginen som må legges inn i arbeid med veitrafikkstøy.

Undersøkelsene av motortyper og kjørevaner er gjort som en direkte følge av ligning 2.3. Dersom Hypotese 2 skal godtas er det viktig å undersøke og fastslå at det er en sammenheng mellom motortyper, turtall, kjørevaner og toppen ved lave frekvenser i veitrafikkstøyspekter.

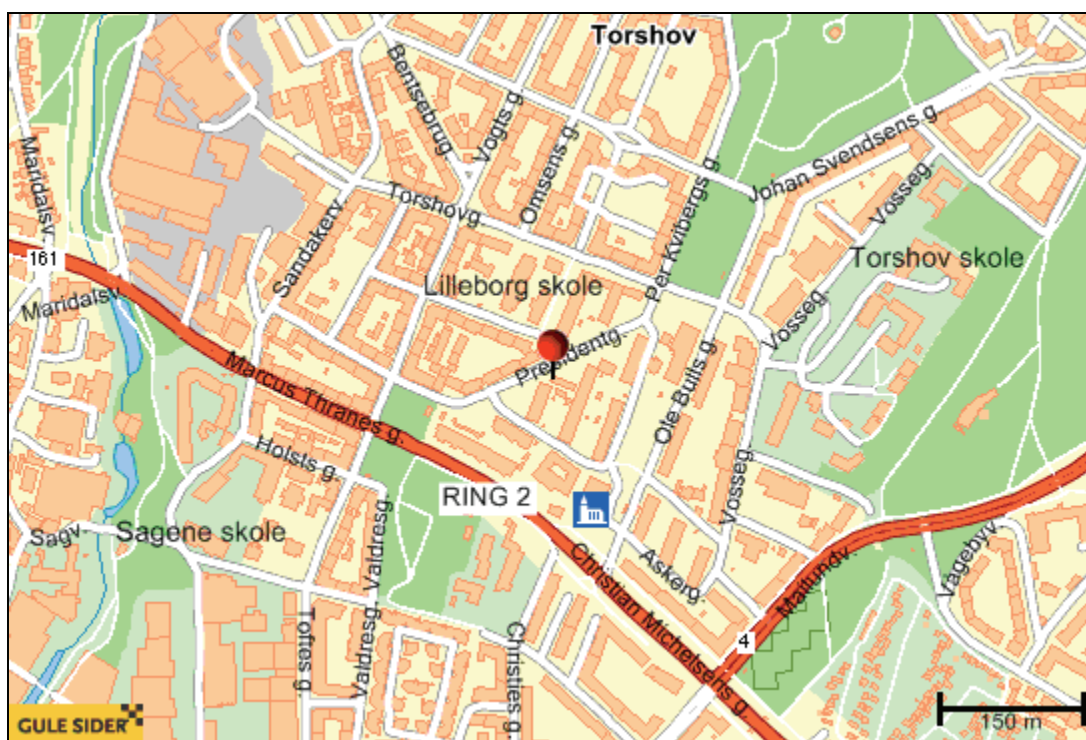
I tillegg til å studere veitrafikkstøyspekter i forhold til forskjellige motortyper og kjørevaner er det utført sanntids FFT av lydfiler fra Stairway. For å utføre sanntids transformasjonen er programmet WavePad benyttet. Hensikten med å se på sanntids FFT av lydfiler er å kunne se om det er likhetstrekk mellom veitrafikkstøyspekter representert ved flere timers måling og støyspekteret fra enkeltkjøretøy. I avsnitt 4.1.2 blir det utdypet hvordan dette er utført og det blir diskutert hvilken kunnskap som er kommet ut av å studere sanntids FFT av lydfiler.

3.4 Feltmålinger

Stairway inneholder få veitrafikkstøyspekter for hastigheter under 50 km/t og over 90 km/t. Det ble derfor besluttet å gjøre feltmålinger for hastigheter under 50 km/t og over 90 km/t for å se om det var mulig å forutsi veitrafikkstøyspekteret på bakgrunn av ligning 2.3.

3.4.1 Feltmåling 1

Det er utført to feltmålinger, hvor den første målingen ble utført 22. mai 2006 i Presidentgata 5 i Oslo fra klokken 16:00-17:00, $L_{eq, 1t}$ måleserie. Det ble også gjort lydopptak under hele måleperioden.



Figur 3-2. Målested i Presidentgata 5 [Gulesider, 2006].

Figur 3-2 viser hvor Presidentgata 5 ligger i Oslo og Figur 3-3 viser plassering av målemikrofon som var 2 m over bakken og omtrent 4 m fra senterlinjen til veien. På bildet til høyre kan det være vanskelig å se mikrofonen, mikrofonstativet vises til venstre for Golfen som står parkert. Antall lette kjøretøy som passerte under måleperioden var 114 og ingen tunge kjøretøy passerte under måleperioden.

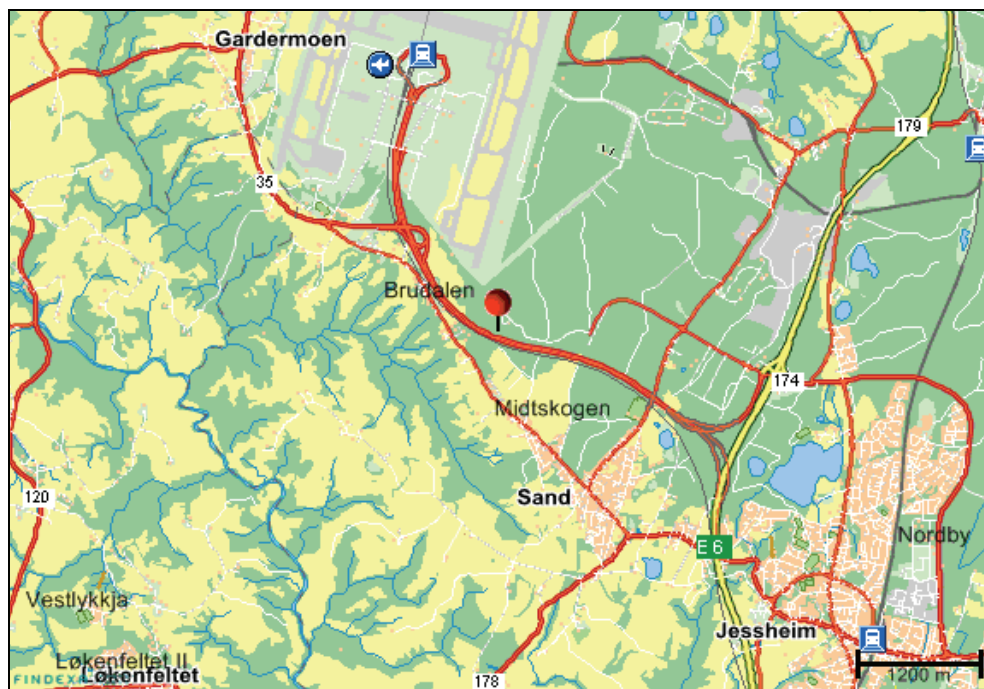


Figur 3-3. Oppsett av mikrofon i Presidentgata 5. Bildet til venstre er tatt i nordøstlig retning.

For å forutsi hvordan et målt veitrafikkstøyspekter blir seende ut, må det foreligge informasjon om målestedet og ligning 2.3 må brukes. Skiltet fartsgrense i Presidentgata 5 er 30 km/t og veibanen ved målestedet er smal og har et fartshinder. På grunnlag av dette er det forventet hastigheter i underkant av 30 km/t. Turtallet på kjøretøyene vil da være i området 1500-2000 opm avhengig av om andre eller tredje gir brukes. Med ligning 2.3 beregnes senterfrekvens til frekvenstoppen i 50 Hz eller i 63 Hz $\frac{1}{3}$ oktavnbandet. Det forventes også noe dekkstøy og følgelig en frekvenstopp ved 1 kHz. I avsnitt 4.2.1 blir resultatene fra målingen presentert og diskutert.

3.4.2 Feltnmåling 2

Den andre målingen ble utført ved Riksvei 35. Målestedet er en avkjøring før Gardermoen Lufthavn der informasjonsskiltet til Gardermoen Lufthavn er plassert. Målingen ble utført 5. april 2006 fra klokken 16:30-17:30, $L_{eq, 1t}$ måleserie. Det ble også gjort lydopptak under hele måleperioden. Figur 3-4 viser målestedet i kart.



Figur 3-4. Målested ved Riksvei 35 [Gulesider, 2006].

Figur 3-5 viser oppsettet av mikrofonen hvor høyden over bakken er 1 m, avstand til senterlinjen til veien er omtrent 15 m. Antall lette kjøretøy som passerte under måleperioden var 797 og antall tunge kjøretøy var 50. Trafikktelling ble kun utført for nordgående kjøreretning, altså kjøretøy på tur mot Gardermoen Lufthavn.



Figur 3-5. Oppsett av mikrofon ved Riksvei 35. Bildet til venstre er tatt i vestlig retning.

For å forutsi hvordan veitrafikkstøyspekteret blir sende ut må det resoneres som for målingen i Presidentgata 5. Skiltet fartsgrense er 100 km/t på 4 felts motorvei med atskilte kjørebener. Forventet hastighet er lik skiltet fartsgrense og turtallet på kjøretøyene vil da være rundt 2500-3000 opm. Med ligning 2.3 beregnes senterfrekvensen til frekvenstoppen i $83 \text{ Hz } \frac{1}{3}$ oktavnbandet. Med empiri kan det forutsies at frekvenstoppen vil bre seg over i $100 \text{ Hz } \frac{1}{3}$ oktavnbandet. Det forventes også en høy frekvenstopp ved 1 kHz siden hastigheten er høy og det naturlig fører til mye dekkstøy. I avsnitt 4.2.2 blir resultatene presentert og diskutert.

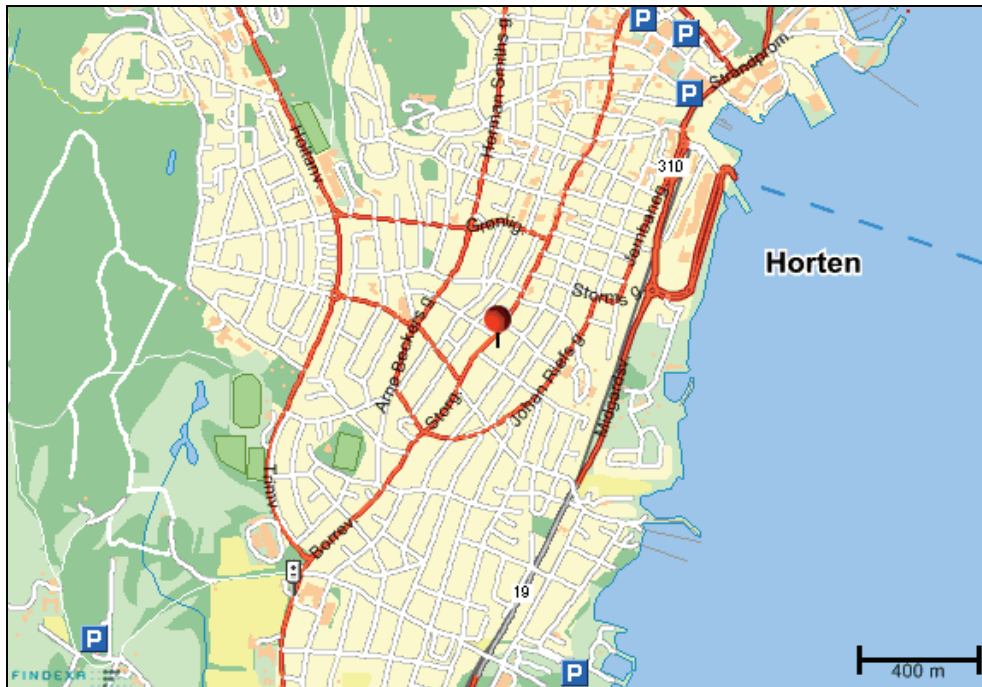
3.5 **Entallskaracteristikk med reelle veitrafikkstøyspekter og glattede standardspekter**

Entallskaracteristikken søker å dekke flest mulig reelle veitrafikkstøyspekter og konstruksjoner samtidig som metoden er såpass enkel å bruke at det sparer tid og penger i forhold til faktisk å utføre målinger i hvert tilfelle. For å få til dette brukes glattede standard veitrafikkstøyspekter, Figur 2-2, for utendørsstøy fra veitrafikk og et lydreduksjonstall som angir demping for konstruksjonene i bygningen, avsnitt 2.2. Lydreduksjonstallene brukt i Håndbok 47 er korrigert for etterklang og må ikke forveksles med differanse mellom utendørs og innendørs lydnivå som er brukt i dette arbeidet. Ved å bruke glattede standardspekter kan det i enkelte tilfeller oppstå avvik mellom beregnede støynivåer og reelle støynivåer innendørs slik at reelt støynivå i verste fall overskrider grenseverdien for et gitt tilfelle. For å undersøke hvor stort avviket er mellom reelle veitrafikkstøyspekter og glattede standardspekter på en grundig måte vil entallskaracteristikken beregnes med reelle veitrafikkstøyspekter og glattede standardspekter. Dempingen mellom innendørs- og utendørsstøy angis av 5 reelle nivådifferansespekter og ett midlet nivådifferansespekter.

3.5.1 **Reelle veitrafikkstøyspekter**

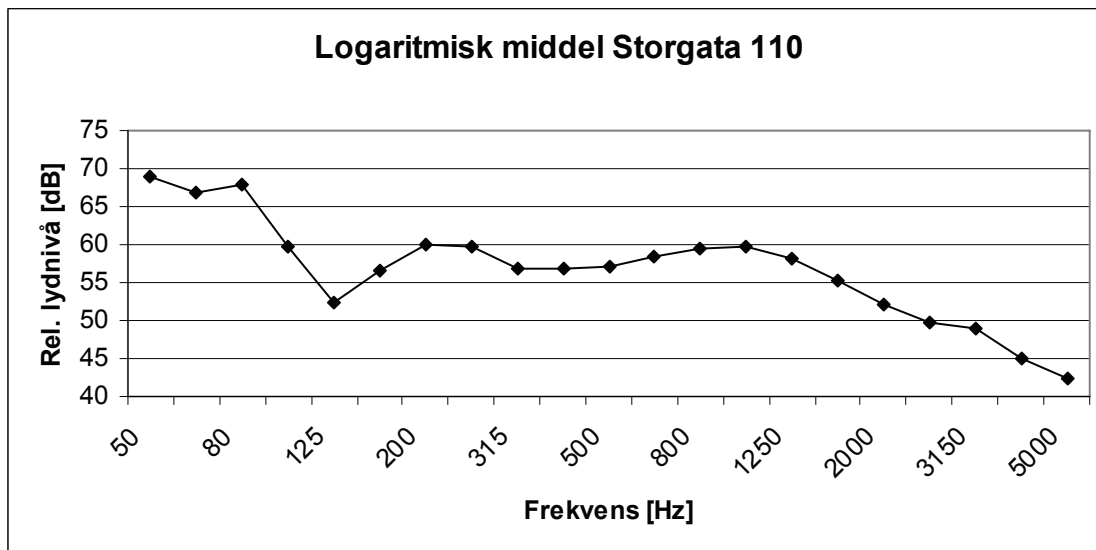
Det er brukt seks forskjellige reelle veitrafikkstøyspekter for hastighetene 30, 50, 60, 80, 90 og 100 km/t for å beregne avviket mellom glattede standardspekter og reelle veitrafikkstøyspekter. Veitrafikkstøyspekter for hastighetene 30 og 100 km/t er veitrafikkstøyspekter fra feltmålingene beskrevet i forrige avsnitt. Se avsnitt 4.2 for frekvensspekter fra feltmålingene. De øvrige veitrafikkstøyspektrene er fra Stairway. Før reelle og glattede standard veitrafikkstøyspekter kan sammenlignes må det beregnes et gjennomsnitt i hvert oktavbånd for de reelle veitrafikkstøyspektrene. Grunnen til dette er at beregningene gjøres kun for en frekvenskurve og ikke et frekvensspekter bestående av flere måleserier. Samtidig viser gjennomsnittet av alle måleseriene det gjennomsnittlige trafikkbildet på målestedet. Beregningen er utført med logaritmisk midling og presentert i Figur 3-7, Figur 3-9, Figur 3-11 og Figur 3-13. Tallmaterialet bak veitrafikkstøyspekteret fra E18 gjennom Ås, Figur 3-9, er omfattende, og beregningen er derfor gjort i to omganger. Informasjon om målested og plott av logaritmisk midling i hvert oktavbånd for de fire reelle veitrafikkstøyspektrene fra Stairway følger.

Figur 3-6 viser målestedet Storgata 110 i kart.



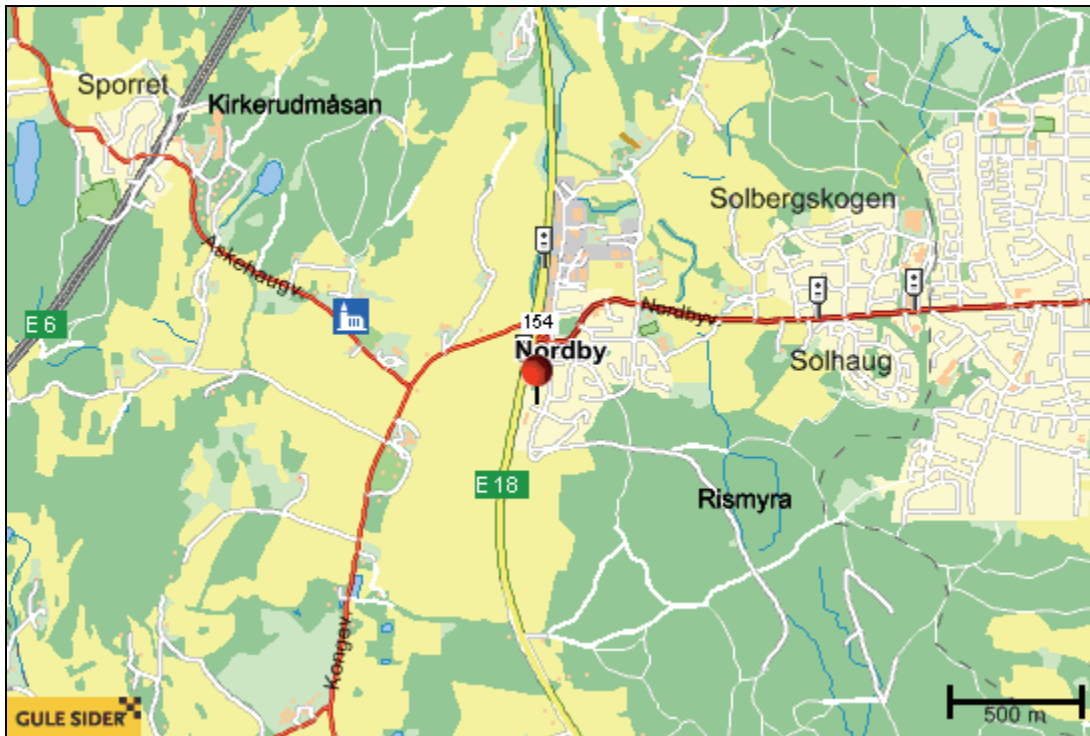
Figur 3-6. Målested i Storgata 110, Horten [Gulesider, 2006].

Skiltet hastighet ved målestedet er 50 km/t, målingen er utført i en avstand av 8 m fra senterlinjen til veien og det er fartshinder i veibanen. Gjennomsnittlig faktisk hastighet under måleperioden er ikke målt. 887 lette kjøretøy og 69 tunge kjøretøy passerte målepunktet under måleperioden på 1,5 time, $L_{eq, 1,5t}$. Ekvivalent lydtrykksnivå for hele måleperioden var 66,7 dBA.



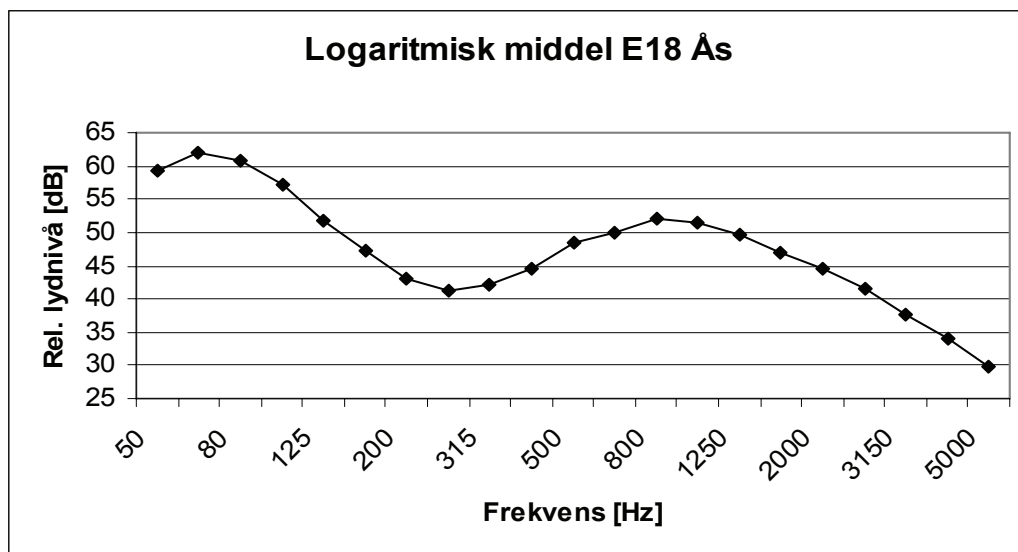
Figur 3-7. Logaritmisk middel av måleseriene fra Storgata 110, Horten.

Figur 3-8 viser målestedet ved E18 Ås i kart.



Figur 3-8. Målested ved E18, Ås [Gulesider, 2006].

Skiltet hastighet ved målestedet er 60 km/t og målingen er utført i en avstand av 40 m fra senterlinjen til veien. Dette krysset eksisterer ikke lenger. Gjennomsnittlig faktisk hastighet under måleperioden er ikke målt. 29 485 lette kjøretøy og 3 378 tunge kjøretøy passerte målepunktet under måleperioden på 85 timer, $L_{eq\ 85t}$. Ekvivalent lydtrykksnivå for hele måleperioden var 58,2 dBA.



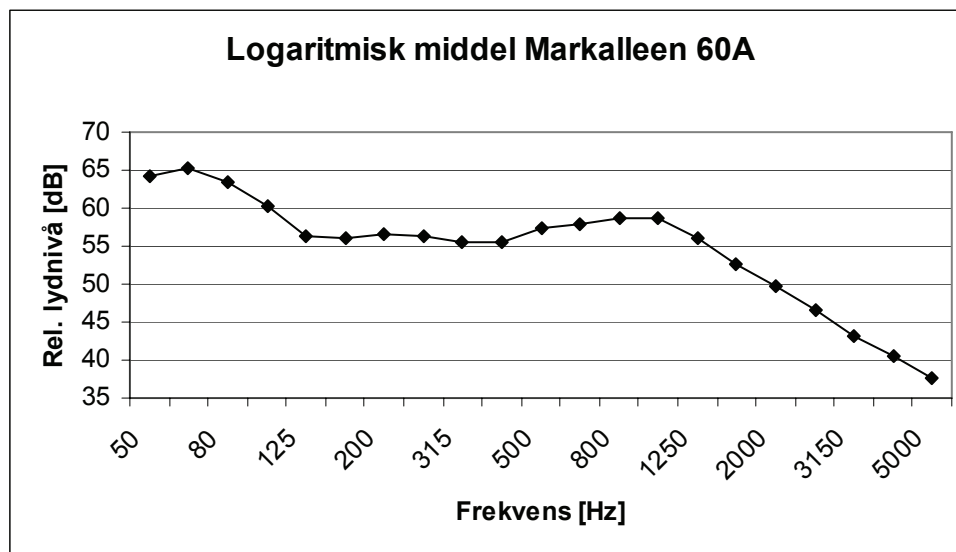
Figur 3-9. Logaritmisk middel av måleseriene fra E18 Ås.

Figur 3-10 viser målestedet Markalleen 60A i kart.



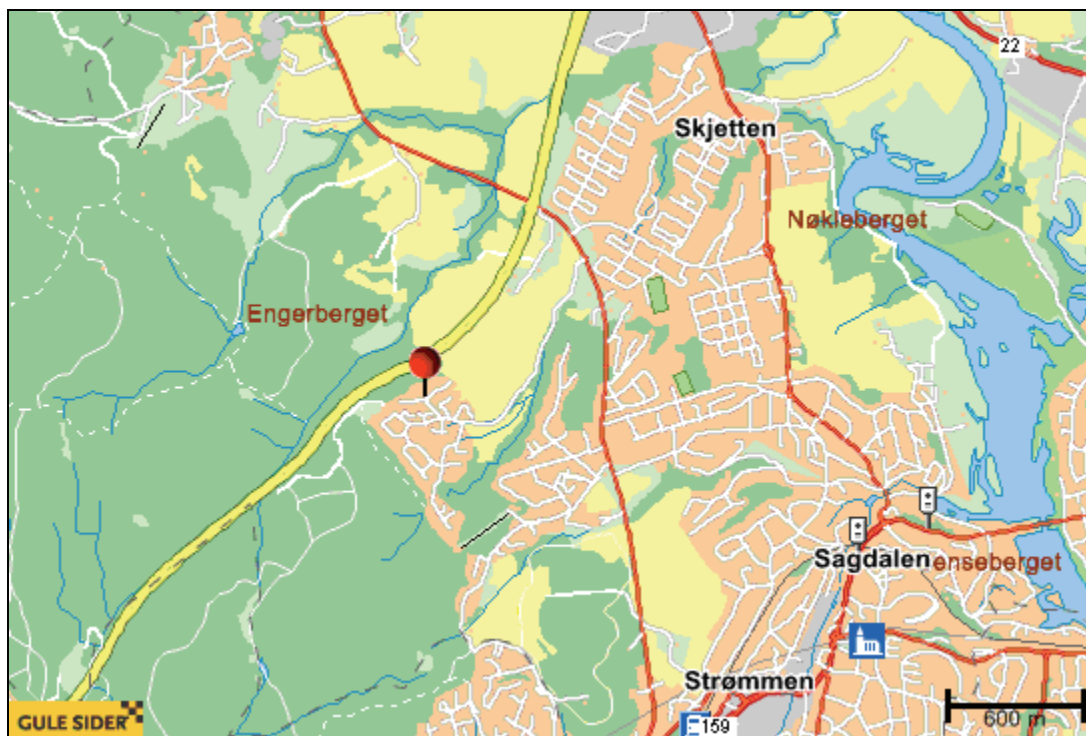
Figur 3-10. Målested i Markalleen 60A, Bærum [Gulesider, 2006].

Skiltet hastighet ved målestedet er 80 km/t og målingen er utført i en avstand av 30 m fra senterlinjen til E18. Gjennomsnittlig faktisk hastighet under måleperioden var 83,5 km/t. 71 055 lette kjøretøy og 5 298 tunge kjøretøy passerte målepunktet under måleperioden på 20 timer, $L_{eq, 20t}$. Ekvivalent lydtrykksnivå for hele måleperioden var 65,2 dBA.



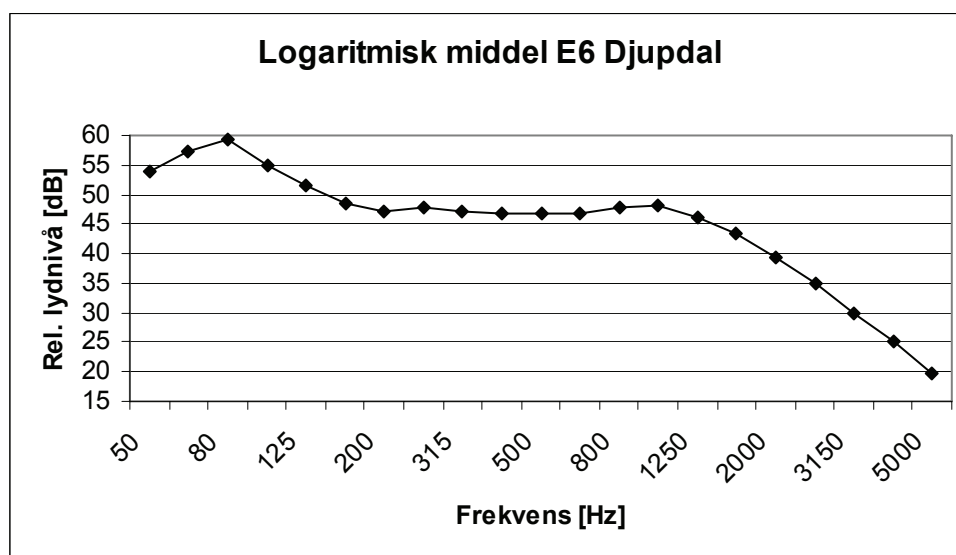
Figur 3-11. Logaritmisk middel av måleseriene fra Markalleen 60A, Bærum.

Figur 3-12 viser målestedet E6 gjennom Djupdal i kart.



Figur 3-12. Målested ved E6 Djupdal [Gulesider, 2006].

Skiltet hastighet ved målestedet var 90 km/t og målingen er utført i en avstand av 130 m fra senterlinjen til veien. I dag er veien bygget ut med ett kjørefelt i hver kjøretning, og fartsgrensen er økt til 100 km/t. Gjennomsnittlig faktisk hastighet under måleperioden var 100 km/t. 43 682 lette kjøretøy og 4 356 tunge kjøretøy passerte målepunktet under måleperioden på 13 timer, $L_{eq\ 13t}$. Ekvivalent lydtrykksnivå for hele måleperioden var 55,1 dBA.



Figur 3-13. Logaritmisk middel av måleseriene fra E6 Djupdalen.

For veitrafikkstøyspekteret i Figur 3-13 ses det at luftabsorpsjon gjør seg gjeldene ved at frekvenstoppen ved 1 kHz er dempet. Dette er følge av at det er 130 m mellom kilde og mottaker.

Tabell 3-1 gir en oversikt over hvilket reelt veitrafikkstøyspekter som er sammenlignet med hvilket glattet standardspekter.

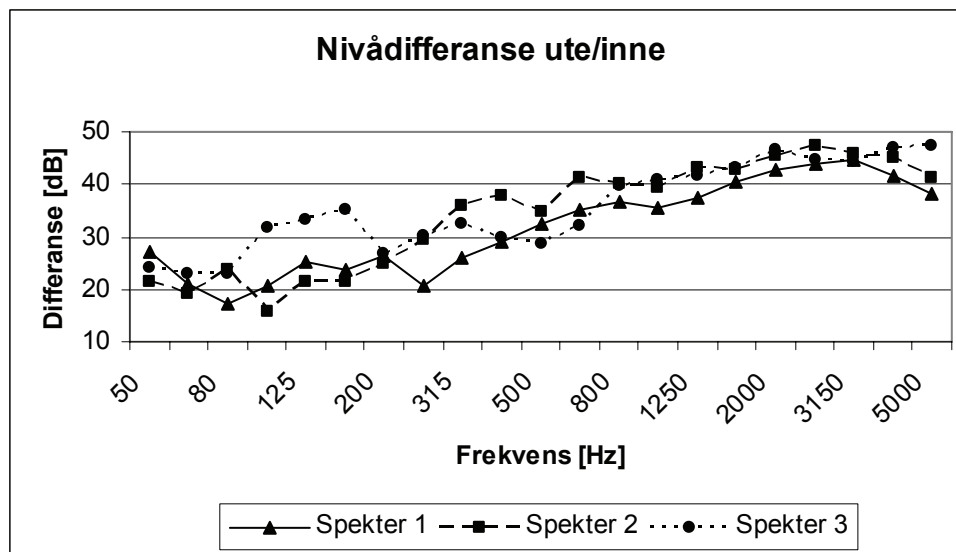
Tabell 3-1. Reelle veitrafikkstøyspekter sammenlignet med standardspekter.

Målested	Standardspekter
Presidentgata 5	C1
Storgata 110	C2
E18 Ås	C2
Markalleen 60A	C3
E6 Djupdal	C3
Riksvei 35	C3

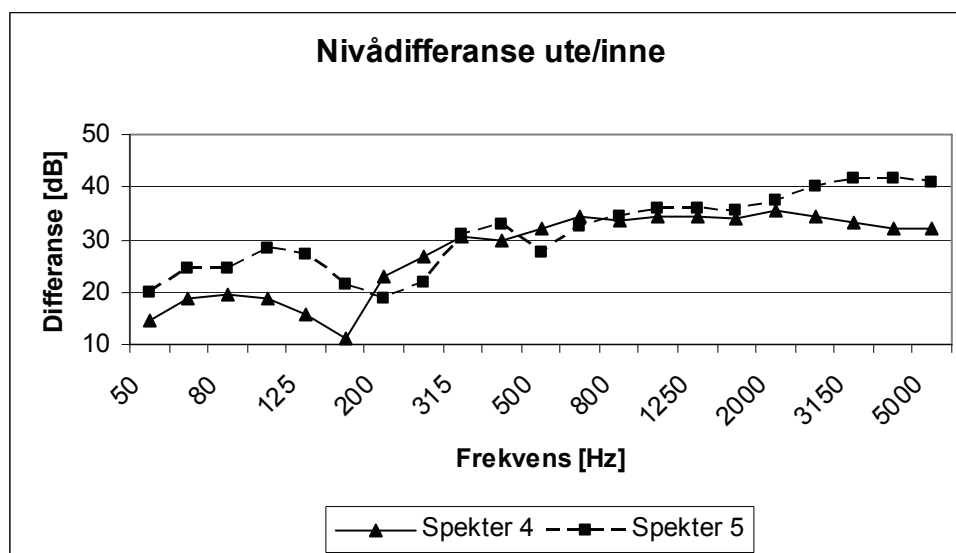
3.5.2 Reelle nivå differansespekter

Bygninger i Norge har fasader som hovedsaklig består av tre og betong. Det er valgt fem forskjellige fasadetyper som dekker tre- og betongfasader med forskjellige kombinasjoner av vindus- og ventilasjonskonstruksjoner.

Figur 3-14 og Figur 3-15 viser de fem forskjellige reelle nivå differansespektrene som er brukt for å sammenligne reelle veitrafikkstøyspekter og glattede standardspekter. De vises i to forskjellige figurer for enklere å kunne skille og se formen på de forskjellige nivå differansespektrene. Det er enkelt å se ut fra Figur 3-14 og Figur 3-15 at ingen av fasadene har over 30 dB demping for frekvenser under 100 Hz, og at det kun er Fasade 3, spekter 3, som har demping over 30 dB i frekvensområdet 100-200 Hz. Videre ses det at alle fasadene har tilnærmet samme demping for frekvenser over 500 Hz, men det frekvensområdet som er mest interessant og samtidig vanskeligst å dempe er frekvensområdet under 500 Hz. For Fasade 4, spekter 4 i Figur 3-15 vises dippen i nivå differansespekteret som ble diskuterte i avsnitt 2.1.



Figur 3-14. Nivå differansespekter 1,2 og 3.



Figur 3-15. Nivå differansespekter 4 og 5.

Fasadene som nivå differansespektrene er målt på er konstruert på følgende måte:

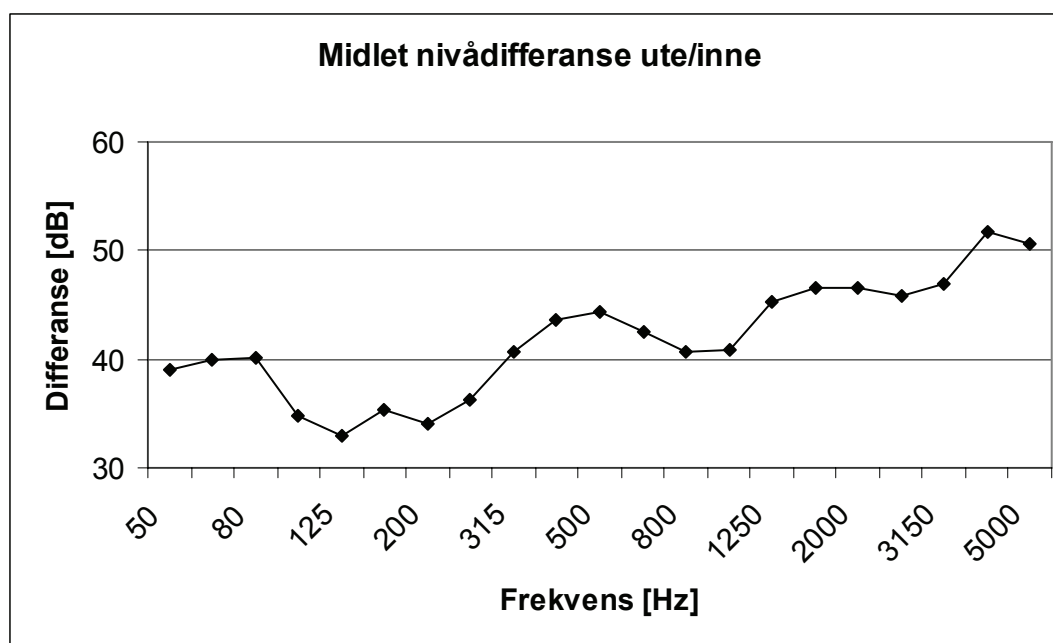
- Fasade 1: Enkel trevegg med mineralull som isolasjon, koblede vinduer, ingen ventilasjon
- Fasade 2: Betongvegg, tolags isolerglass, mineralull som isolasjon, ingen ventilasjon
- Fasade 3: Tømmervegger, ingen isolasjon, tolags isolerglass med ventilasjon i vindusrammen
- Fasade 4: Betongelementer, tolags isolerglass
- Fasade 5: Tradisjonelt gammelt trehus, koblede vinduer, ingen isolasjon

Det foreligger ikke like mye informasjon for alle fasadene.

Alle nivåforskjellene er hentet fra Stairway hvor Fasade 1 tilsvarer spekter 1 i Figur 3-14, Fasade 2 tilsvarer spekter 2 etc. Fasade 2 er målt ved Ahus og resten av nivåforskjellene er målt på bolighus. Fasade nummer 5 antas og å ha tømmervegger, og dersom nivåforskjellenspekteret til Fasade 3 og Fasade 5 sammenlignes ses det at tømmervegger har bedre demping for frekvenser opp til 200 Hz enn for eksempel betong og enkle trevegger.

3.5.3 Midlet nivåforskjellenspekter

Beregningene for å sammenligne avviket mellom reelle veitrafikkstøyspekter og glattede standardpekter er utført i et Excel regneark. Dette regnearket er utviklet ved BS Akustikk, og det midlede nivåforskjellenspekteret i Figur 3-16 er hentet fra regnearket. For å få et midlet nivåforskjellenspekter er det utført differensmålinger mellom lydnivå ute og lydnivå inne på et antall fasader. dB-verdien i hvert 1/3 oktavnivå for differensmålingene er så logaritmisk midlet.



Figur 3-16. Midlet nivåforskjellenspekter.

En sammenligning med nivåforskjellenspektrene i Figur 3-14 og Figur 3-15 viser at det midlede nivåforskjellenspekteret avviker noe fra de reelle nivåforskjellenspektrene. Det ses også at det midlede nivåforskjellenspekteret har høyere differanse for hele frekvensområdet og det vises i avsnitt 4.3 at dette gir bedre differanse med entalls-karakteristikk-beregninger.

3.5.4 Sammenligning med reelle nivåforskjellenspekter

Som nevnt i forrige avsnitt er beregningen utført i et Excel regneark utviklet ved BS Akustikk. Rapporten som ligger til grunn for algoritmen brukt i regnearket er vedlagt [Vedlegg A].

Reelle veitrafikkstøyspekter

For å beregne entalls karakteristikk for de reelle veitrafikkstøyspektrene trengs dB-verdiene for hvert $\frac{1}{3}$ oktavnband fra 50 Hz - 5 kHz, samt ekvivalent dBA-nivå for det reelle veitrafikkstøyspekteret. dB-verdien for hvert oktavnband er funnet ved logaritmisk midling av måleseriene beregnet i avsnitt 3.5.1. Der er også ekvivalent dBA nivå for måleperioden oppgitt. Videre trengs det reelle nivådifferansespekteret for $\frac{1}{3}$ oktavnbandene 50 Hz - 5 kHz for å kunne beregne innendørs lydnivå.

Ved å kalle det reelle veitrafikkstøyspekteret $L_{\text{veitrafikkstøy}}$ og nivådifferansen D , kan det settes opp en enkel ligning for å finne innendørs støynivå, $L_{\text{innendørs}}$, ligning 3.1 [Vedlegg A]:

$$L_{\text{innendørs}} = L_{\text{veitrafikkstøy}} - D \quad (3.1)$$

Beregningen gjøres for hvert $\frac{1}{3}$ oktavnband fra 50 Hz - 5 kHz.

Frekvensspekteret $L_{\text{innendørs}}$ A-veies og deretter blir alle $\frac{1}{3}$ oktavnbandene fra 50 Hz - 5 kHz logaritmisk summert. dBA nivået beregnet så langt viser ekvivalent lydtrykknivå innendørs. Entalls karakteristikk finnes så ved å trekke dBA-nivået for ekvivalent lydtrykk inne fra dBA-nivået for ekvivalent lydtrykk ute. Entalls karakteristikk forteller altså hvor mye demping i dBA nivådifferansespekteret gir fra utendørs lydtrykk til innendørs lydtrykk. Metoden beskrevet her beregner entalls karakteristikk med reelle veitrafikkstøyspekter og reelle nivådifferansespekter gitt henholdsvis i avsnitt 3.5.1 og 3.5.2. Resultatet av sammenligningen vises og diskuteres i avsnitt 4.3.1.

Glattede veitrafikkstøyspekter

De glattede veitrafikkstøyspektrene oppgitt i Håndbok 47, se Figur 2-2, er normalisert til 0 dBA. For å kunne sammenligne et glattet veitrafikkstøyspekter med et reelt veitrafikkstøyspekter må spektrene ha samme ekvivalente dBA nivå, og da må det glattede standardspektrene normaliseres til samme ekvivalente dBA nivå som det reelle veitrafikkstøyspekteret gir. Dette er nødvendig for å kunne beregne hvor stort avviket mellom et reelt veitrafikkstøyspekter og et glattet standardspekter egentlig er. Dette er enklest å forklare med et eksempel. Anta at det glattede standardspekteret C2 skal normaliseres til 55 dBA. Med utgangspunkt i ekvivalent dBA-nivå blir normaliseringen for 50 Hz $\frac{1}{3}$ oktavnbandet:

$$-25 + 55 = 30 \text{ dBA}$$

og for 63 Hz oktavnbandet:

$$-23 + 55 = 32 \text{ dBA}$$

Når det glattede standardspekteret er normalisert til ekvivalent dBA-nivå lik det reelle veitrafikkstøyspekteret som det skal sammenlignes med er det mulig å finne innendørs

støynivå. Det glattede standardspekteret er allerede A-veid og dermed kan innendørs lydnivå beregnes ved å bruke ligning 3.1. Deretter summeres det A-veide innendørs lydnivået logaritmisk til et dBA nivå som angir ekvivalent lydtrykk inne. Entallskararakteristikken finnes så ved å trekke dBA nivået for ekvivalent lydtrykk inne fra dBA nivået for ekvivalent lydtrykk ute. Entallskararakteristikken viser også her demping i dBA fra utendørs lydtrykk til innendørs lydtrykk, men med et glattet standardspekter og et reelt nivåddifferansespekter. Resultatet av sammenligningen blir vist og diskutert i avsnitt 4.3.1.

3.5.5 Sammenligning med midlet nivåddifferansespekter

Det samme regnearket er brukt for å sammenligne glattede standardspekter og reelle veitrafikkstøyspekter med et midlet nivåddifferansespekter. Fremgangsmåten for å gjøre sammenligningen er akkurat den samme som beskrevet i forrige avsnitt, men i stedet for reelle nivåddifferansespekter er det brukt et midlet nivåddifferansespekter gitt i Figur 3-16. Resultatet av sammenligningen blir vist og diskutert i avsnitt 4.3.2.

3.6 *Bunnen i frekvensspekteret*

Veitrafikkstøyspekterets generelle form kan beskrives med en frekvenstopp i frekvensområdet 50-100 Hz, en bunn i frekvensområdet fra omtrent 100-500 Hz og en ny frekvenstopp ved 1 kHz. Over 1 kHz avtar veitrafikkstøyspekteret med opptil 10 dB per oktav når frekvensen øker mot 20 kHz. Senterfrekvensen til frekvenstoppen i 50 Hz - 100 Hz $\frac{1}{3}$ oktavbåndene bestemmes av grunntonen til motoren og frekvenstoppen ved 1 kHz forårsakes av dekkstøy. Motorstøy og dekkstøy forårsakes av definerte kilder, og det vil naturlig være en bunn i støyspekteret mellom frekvenstoppene siden kildene har høyere lydtrykksnivå enn generell støy.

Det er ikke sett på markdemping, altså at lydbølger dempes som en følge av interferens med bakken. Markdemping vil være mer gjeldende dersom det er mykt terreng mellom kilde og mottaker, som eksempelvis snø og jordbruksarealer med gress. Tilsvarende vil markdemping være mindre gjeldende dersom terrenget består av harde overflater som asfalt og betong. Mykt terreng vil absorbere mer av lydenergien og dempe lydbølger mer enn harde overflater. Dersom lydbølgene forplantes nært bakken vil dette fenomenet åpenbart være mer aktuelt enn dersom lydbølgene forplantes høyt over bakken. Bunnen i veitrafikkstøyspekteret kan bli mer markert som en følge av markdemping.

4 Resultater

I dette kapitlet blir resultatene av arbeidet og beregningene fra forrige kapittel presentert og diskutert.

4.1 Hypotesene

Her blir det sett på hvorfor Hypotese 1 forkastes mens Hypotese 2 godtas.

4.1.1 Hypotese 1

For å teste Hypotese 1 tas det utgangspunkt i eksempelet nevnt i avsnitt 3.3, Figur 3-1. Mellom vei og mottaker er det flatt terreng. Støykilden er plassert 0,5 m over senterlinjen på veien, og mottaker er plassert 20 m unna i 2 m høyde over veibanen.

For å finne veilengden til den direkte støyen brukes Pytagoras' læresetning som vist i ligning 2.1.

$$x_{\text{direkte}} = \sqrt{1,5^2 + 20^2} = \underline{20,06m}$$

Veilengden til refleksjonen er beregnet slik at lyden følger refleksjonslinjene i Figur 3-1. Det må derfor beregnes 2 veilengder fra kilden til mottaker. Først vil lyden treffe bakken etter 10 m, $x_{\text{refleksjon}_1}$, og deretter går lyden fra bakken opp til mottaker, $x_{\text{refleksjon}_2}$. Dermed vil veilengden til refleksjonen være som følger:

$$x_{\text{refleksjon}_1} = \sqrt{0,5^2 + 10^2} = \underline{10,01m}$$

$$x_{\text{refleksjon}_2} = \sqrt{2^2 + 10^2} = \underline{10,20m}$$

$$x_{\text{refleksjon}_{\text{total}}} = 10, + 10,2m = \underline{20,21m}$$

Differanse i veilengde er; $x_{\text{refleksjon}} - x_{\text{direkte}} = 0,15$ m. Lydhastigheten i luft, c , settes lik 340 m/s. Med den gitte lydhastigheten i luft og differansen i veilengde vil f etter ligning 2.2 være lik:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{340}{0,15} = 2270\text{Hz}$$

2270 Hz er langt over frekvensområdet veitrafikkstøy er konsentrert i. Forsøk med andre verdier for avstand mellom støykilde og mottaker samt høyde på mottaker gir heller ikke verdier som samsvarer med virkeligheten. Dersom interferens skulle gitt utslag i frekvensspekteret i frekvensområdet 50-100 Hz, måtte differansen i veilengde mellom direkte og reflektert lydbølge vært i størrelsesorden 3,4-6,8 m. Undersøkelser av målestedene viser at terrenget rundt målestedet i majoriteten av målingene er såpass flatt at verken lette eller tunge kjøretøy vil kunne avgi lydbølger som har en differanse i veilengde mellom reflektert og direkte lyd på 3,4 m og over.

Det kunne vært interessant og sett på om det oppstår konstruktiv eller destruktiv interferens i målepunktet dersom det tas utgangspunkt i et reelt målt veitrafikkstøyspekter. Siden alt arbeidet med problemstillingen viser at interferens ikke er årsaken til frekvenstoppen ved lave frekvenser har dette ingen hensikt.

På grunnlag av beregningen for å teste Hypotese 1, samt alle bevisene for Hypotese 2, er det vist over enhver rimelig tvil at Hypotese 1 kan forkastes.

4.1.2 Hypotese 2

I avsnitt 3.3.2 er det forklart hvilke undersøkelser som ligger bak at Hypotese 2 godtas. En del av resultatene til undersøkelsene er også beskrevet i avsnitt 3.3.2. De viktigste resultatene blir her oppsummert og det blir diskutert videre hvorfor Hypotese 2 kan godtas.

Tabell 4-1 viser en oversikt over grunntonen til en motor for et gitt turtall med forskjellig antall sylindere. Tallene i Tabell 4-1 er funnet ved hjelp av ligning 2.3.

Tabell 4-1. Oversikt over grunntonen til en motor med et gitt antall sylindere.

Turtall [opm]	Grunntone motor [Hz]		
	4 sylindere	6 sylindere	8 sylindere
1000	33,3	50	66,7
1500	50	75	100
2000	66,7	100	133,3
2500	83,3	125	166,7
3000	100	150	200
3500	116,7	175	233,3

Tunge kjøretøy med 6 og 8 sylindere vil ofte ha fysisk større motor og motorkomponenter enn lette kjøretøy med motor som har 4 sylindere. Det er som regel snakk om store dieselmotorer beregnet på å gi et stort dreiemoment for å kunne dra tung last heller enn å oppnå store hastigheter. Siden komponentene i en slik motor er fysisk større, fører det til økt treghet i bevegelige deler og dermed begrenses maksimalt turtall motoren kan oppnå. Slike motorer finnes i lastebiler og traktorer, og som nevnt i avsnitt 3.3.2 vil turtallsområdet være 1500-2000 opm ved vanlig kjøring. Dette lave turtallsområde kommer av de fysiske begrensningene en kraftigere motor har, som for eksempel hvor fort veivakselen kan rotere uten å ødelegge motoren.

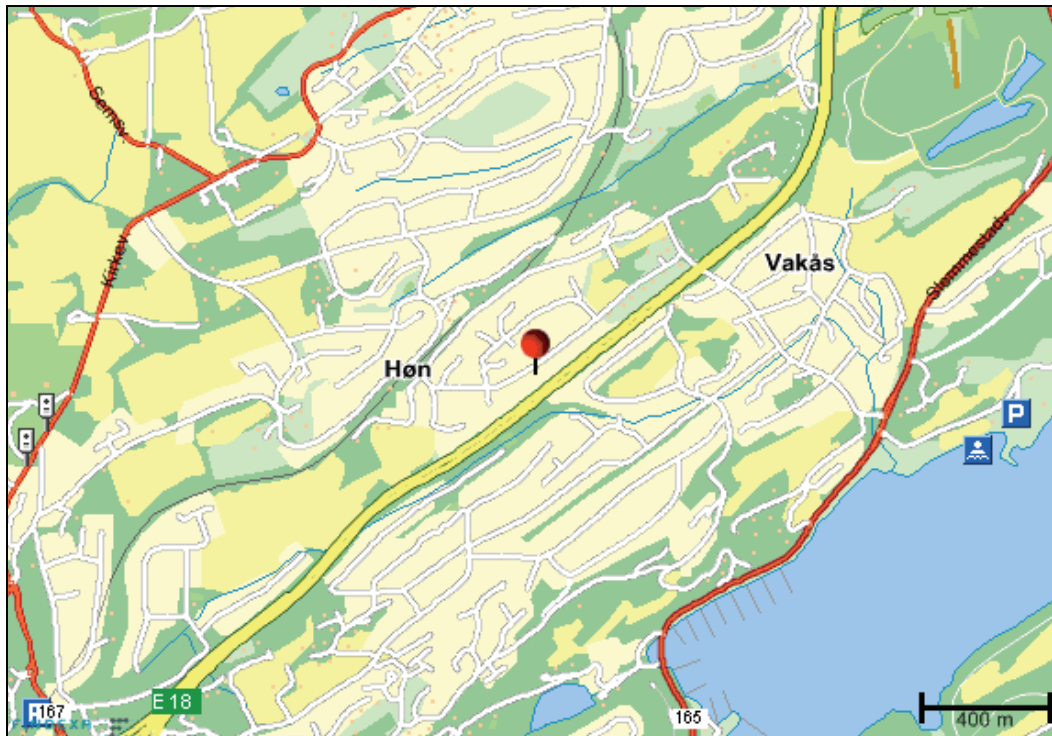
De fysiske begrensningene som følger med en kraftig motor vil tvinge de tunge kjøretøyene til å operere i et lavere turtallsområde, 1500-2000 opm, og dermed er grunntonen til slike kraftige motorer rundt 100 Hz ved vanlig kjøring. Når grunntonen får lavere frekvens av lavere turtall vil den også være nærmere senterfrekvensen til frekvenstoppen i veitrafikkstøyspektrene på 63 Hz og 80 Hz. Lette kjøretøy med dieselmotor har, som nevnt i avsnitt 3.3.2, også turtallsområde fra 1500-2000 opm ved vanlig kjøring. Det er også mer vanlig for lette dieseldrevne kjøretøy å ha 4 sylindere siden de ikke behøver det ekstra momentet flere sylindere gir. Forskjellene i grunntone til dieselmotorer bidrar til at frekvenstoppen i noen veitrafikkstøyspekter er bred og har liten

variasjon i lydtrykksnivå i $\frac{1}{3}$ oktavbåndene fra 63-100 Hz. Det er ikke gjort undersøkelser av hvor stor andel av kjøretøyene i Norge som har dieselmotor, men antallet er økende og derfor viktig å ta hensyn til dersom det skal gjøres teoretiske utredninger på veitrafikkstøyspekter. Det må det gjøres undersøkelser av støyspekteret fra dieselmotorer med 6 og 8 sylindere før det kan presenteres konkrete resultater.

Det er studert flere veitrafikkstøyspekter målt der skiltet fartsgrense er 80 km/t og gjennomsnittlig faktisk hastighet ligger på 80 km/t. Mange av veitrafikkstøyspektrene har frekvenstopp med senterfrekvens i 63 Hz-oktavbåndet. Undersøkelse av frekvenstoppen viser at det er svært lite i dB som skiller 63 Hz og 80 Hz $\frac{1}{3}$ oktavbåndet, størrelsesorden 1-3 dB. Dette kan skyldes at turtallet vil være nærmere 2000 opm enn 2500 opm for majoriteten av bilene selv om målt gjennomsnittlig hastighet er 80 km/t. Av Figur 2-1 ses det at frekvenstoppen har senterfrekvens i 63 Hz-oktavbåndet, dette passer bra med skiltet hastighet ved målestedet, 60 km/t, og forventet turtall på omtrent 2000 opm. På de midlede veitrafikkstøyspektrene i avsnitt 3.5.1 ses det at senterfrekvensen til frekvenstoppen er mindre markert for målingen utført i Storgata 110 i Horten enn for de andre støyspektrene. For målingen i Storgata 110 er det som diskutert i avsnitt 3.5.1 fartshinder i veibanen og det kan derfor forventes ujevnt turtall på grunn av nedbremsing og akselerasjon. Følgelig blir frekvenstoppen bredere og ikke så markert. Det er sett i undersøkte spekter at en høy hastighet ikke automatisk gir frekvenstoppen senterfrekvens i 80 Hz $\frac{1}{3}$ oktavbåndet, men frekvenstoppen kan ha senterfrekvens i 63 Hz-oktavbåndet selv for hastigheter over 80 km/t. Det ses også at for de reelle veitrafikkstøyspektrene presentert i avsnitt 3.5.1 er det kun spekteret for E6 gjennom Djupdal, 90 km/t, som har senterfrekvens til frekvenstoppen i 80 Hz $\frac{1}{3}$ oktavbåndet.

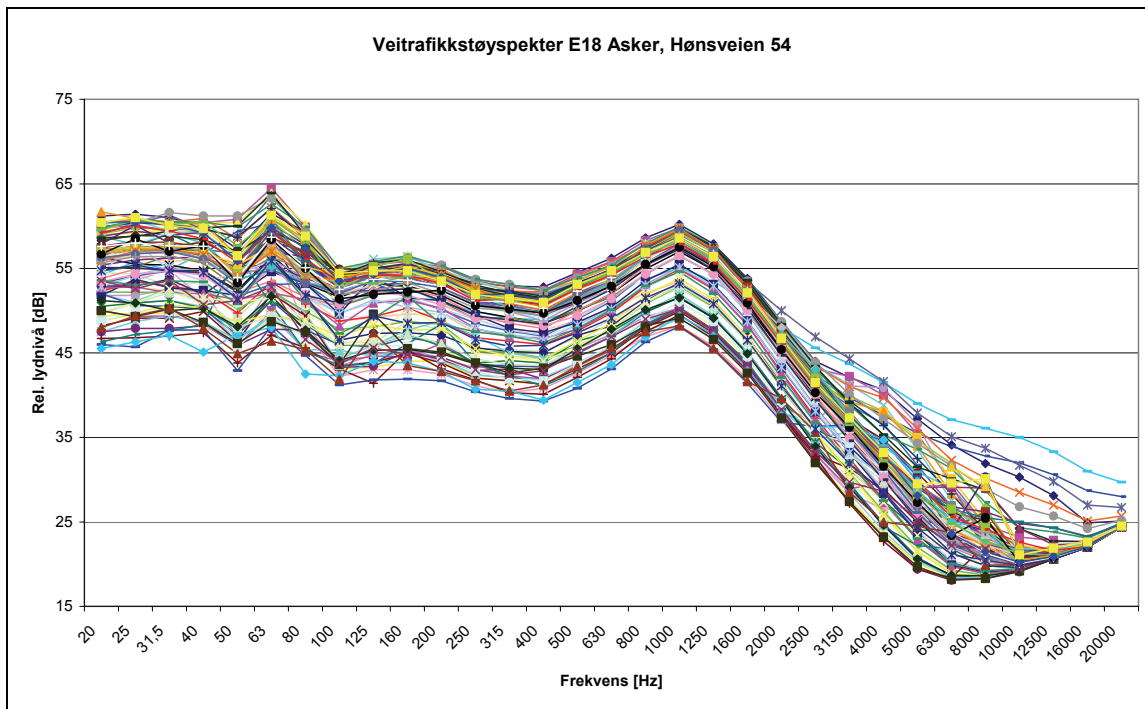
Støyskjermer

Figur 4-2 viser et veitrafikkstøyspekter målt ved E18 gjennom Asker kommune. Skiltet fartsgrense er 90 km/t og senterfrekvensen til frekvenstoppen er i 63 Hz-oktavbåndet. Figur 4-1 viser målestedet i kart. Når det ses på det som er av informasjon om målingen bak Figur 4-2 kan det trekkes frem at den gjennomsnittlige hastigheten kjøretøyene beveger seg med lå på omtrent 100 km/t, altså 10 km/t over skiltet fartsgrense. Andelen tunge kjøretøy var i underkant av 5 %.



Figur 4-1. Målested Hønsveien 54, Asker [Gulesider, 2006].

Frekvenstoppen er tydelig markert og ikke som forventet for en 90-sone. Figur 4-2 viser bare et av flere eksempler på veitrafikkstøyspekter der senterfrekvensen til frekvenstoppen ikke stemmer overens med skiltet fartsgrense, faktisk hastighet og antatt turtall. Det er sett at senterfrekvensen til frekvenstoppen alltid faller i 63 Hz eller i 80 Hz $\frac{1}{3}$ oktavbåndet for hastigheter fra 50 km/t og oppover, men det er vanskeligere enn først antatt å plassere den i riktig oktavbånd. Målingen fra Presidentgata 5 blir presentert i avsnitt 4.2.1, og da vil det ses at senterfrekvensen til frekvenstoppen også kan komme i 50 Hz $\frac{1}{3}$ oktavbåndet. Som diskutert betyr ikke høy hastighet nødvendigvis det samme som at frekvenstoppen konsentreres mer i 80 Hz og 100 Hz $\frac{1}{3}$ oktavbåndene. Det er tydelig at flere faktorer enn bare turtall avgjør formen på frekvenstoppen. Støyskjermene langs veibanen kan, om rett dimensjonert, skjerme effektivt helt ned til 100 Hz $\frac{1}{3}$ oktavbåndet.



Figur 4-2. Veitrafikkstøyspekter fra E18 gjennom Asker. Målingene er gjort i en avstand av 54 m fra senterlinjen til veien. Fartsgrensen er 90 km/t [Stairway, v1.4].

For å oppsummere vil senterfrekvensen til frekvenstoppen i noen veitrafikkstøyspekter ligge ett oktavbånd lavere enn det som antas når det ses på hastighetene ved målestedet og det gjøres en antagelse basert på turtall. Det er enkelt å godta at dersom gjennomsnittlig faktisk hastighet er 80 km/t vil majoriteten av biler ha et turtall nærmere 2000 opm enn 2500 opm. Dette forklarer derimot ikke hvorfor veitrafikkstøyspekteret i Figur 4-2 har en frekvenstopp med senterfrekvens som ligger i 63 Hz-oktavbåndet og at frekvenstoppen er markert. Det er naturlig å undersøke hvor stor effekt støyskjermen som dannes av høyden målestedet ligger på egentlig har. Først er det nødvendig å se på ligningene som beregner demping for støyskjerner.

For å beregne dempingen en støyskjerm gir, brukes ligning 4.1 og 4.2 [Kragh et al., 1982]:

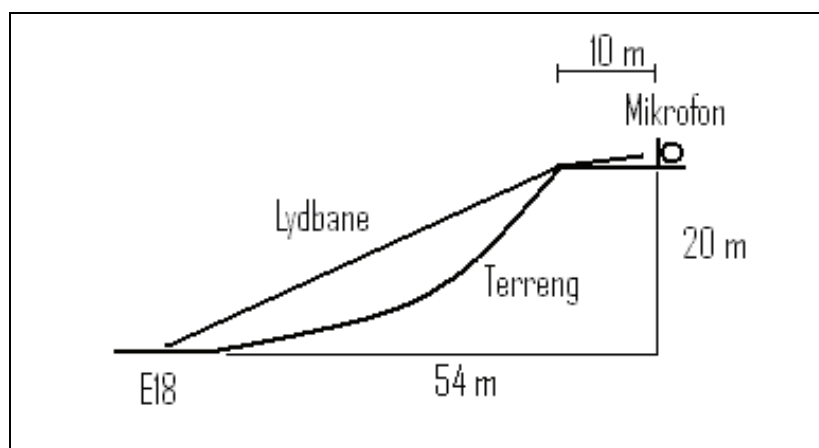
$$\Delta L_S = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{20N_V + 3} \right] \tag{4.1}$$

$$N_V = 0,0047 \cdot \delta_V \cdot f_C \tag{4.2}$$

ΔL_S er dempingen i dB for $1/1$ oktavbånd gitt av senterfrekvensen f_C . N_V er en hjelpestørrelse som beskriver omveien δ_V i det loddrette plan. δ_V er differansen mellom frisikts lydbane og diffraksjonslydbanen angitt i meter. Beregningsmetoden gitt i litteraturen [Kragh et al., 1982] kan ikke anvendes direkte på grunn av manglende og unøyaktig informasjon om avstander og skjermens høyde. Siden δ_V angir gangveisforskjell i meter kan det brukes Pytagoras' læresetning for å beregne avstander. Da det ikke foreligger informasjon om støyskjermens dimensjoner blir det kun tatt

utgangspunkt i høyden som målepunktet ligger på. Metoden består av et ligningssett til som gir en korreksjon for å hindre at det beregnes for stor demping for lave skjerm. Ligningssettet er utelatt da korreksjonen i dette tilfellet settes lik 1 siden informasjonen som behøves for å beregne korreksjonen mangler. Ligning 4.1 består av to ledd til som angir lydforplantning rundt støyskjermen, men ligningene utelates da skjermen har stor utstrekning i begge retninger ved målestedet. Beregninger med ΔL_S er alltid mindre enn eller lik 0 dB og dersom beregningen gir mindre enn -20 dB settes dempingen lik -20 dB uansett resultat av beregningen [Kragh et al., 1982]. Metoden vil ikke gis noen nærmere forklaring siden den ikke fører frem til resultater som kan brukes, og det anbefales å konsultere *Environmental Noise From Industrial Plants* [Kragh et al., 1982] for lignende beregninger.

Ved hjelp av ligningene 4.1 og 4.2 kan skjerm dempingen i tilfellet gitt av Figur 4-3 beregnes.

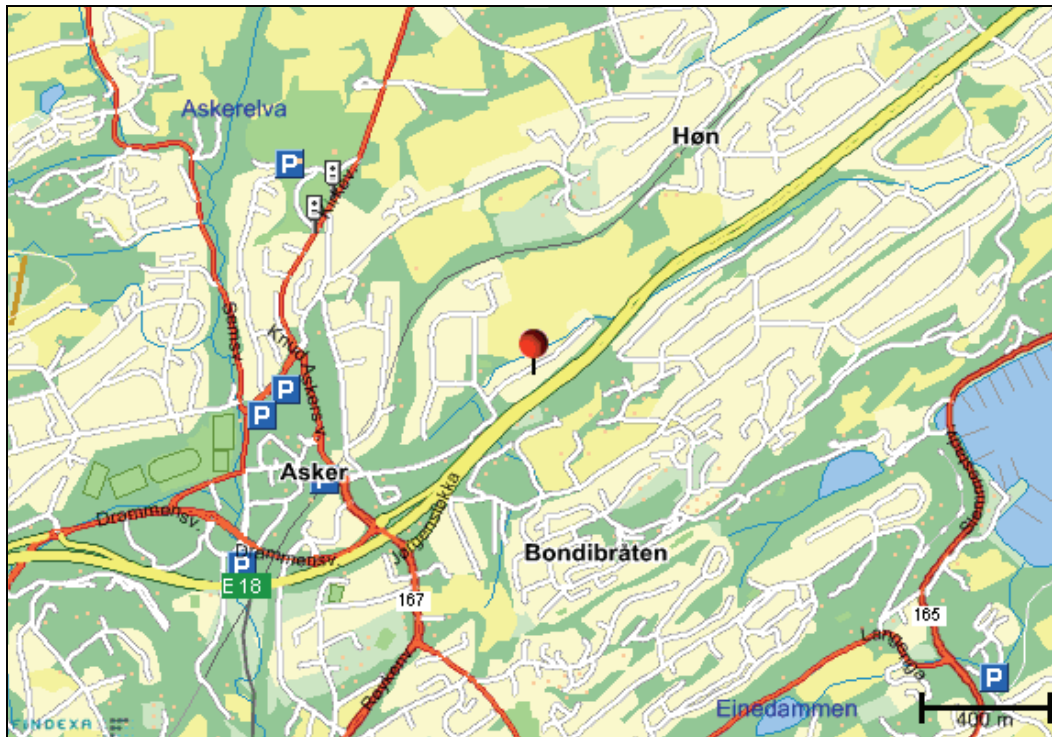


Figur 4-3. Tverrsnitt av målepunkt Hønsveien 54.

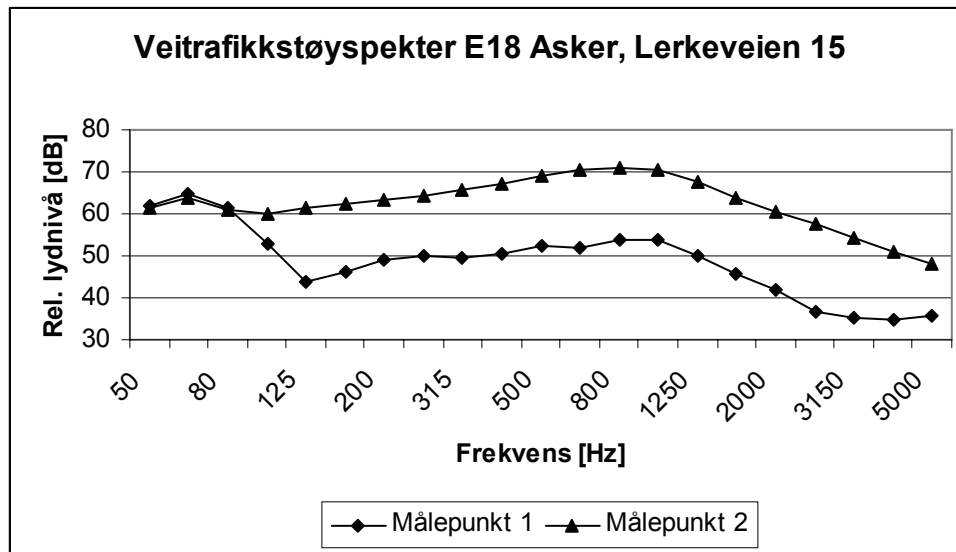
Størrelsesforholdet mellom avstandene i Figur 4-3 er ikke korrekt da figuren kun er ment å gi en skisse av målestedet Hønsveien 54. Som beskrevet gir δ_V omveien i forhold til frisiktslinje, og Pytagoras' læresetning er benyttet for beregningen. Demping ble beregnet for 63 Hz- og 125 Hz-oktavgåtene og deretter sammenlignet med Figur 4-2. Det ses fra figuren at det er omtrent 10 dB demping fra 63 Hz- til 125 Hz-oktavgåtet. Beregningen utført med ligning 4.1 og 4.2 gir en differanse på omtrent 1 dB mellom oktavgåtene. Årsaken til dette er at avstandene i Figur 4-3 ikke er nøyaktige nok. Beregninger som viser reell demping av en støyskjerm avhenger av nøyaktige avstander mellom veibane og støyskjerm. Dimensjonene på støyskjermen må og være kjent samt at demping må beregnes for hvert enkelt kjørefelt. Nøyaktige avstander kan måles ved hjelp av landmålingskikkert, noe som er omfattende og tidkrevende arbeid. Nødvendig utstyr var heller ikke tilgjengelig. Siden beregninger med støyskjerm ikke samsvarer med virkeligheten på grunn av unøyaktigheter i avstandsmålingene blir det presentert en annen måling som beviser at støyskjermen tydelig kan dempe frekvenser fra 80 Hz og oppover.

Det er tilgjengelig seks lange måleserier gjort ved E18 gjennom Asker i Stairway. Fartsgrensen er 90 km/t, og en sammenligning av spektrene viser at fire av de seks

veitrafikkstøyspektrene har en frekvenstopp som er markert. For tre av de fire veitrafikkstøyspektrene med markert topp har frekvenstoppen senterfrekvens i 63 Hz-oktavbåndet. For målingen i Hønsveien 54 er det bare målt i ett målepunkt, og målepunktet ligger skjernet fra veien. Figur 4-4 viser Lerkeveien 15 omtrent 1,2 km sørvest for Hønsveien 54. Det er ingen avkjøringsmuligheter før bilene har passert begge målepunktene. Målingene er gjennomført med 3 års mellomrom, men det antas at det gjennomsnittlige trafikkbildet ikke har forandret seg nevneverdig mellom måletidspunktene.

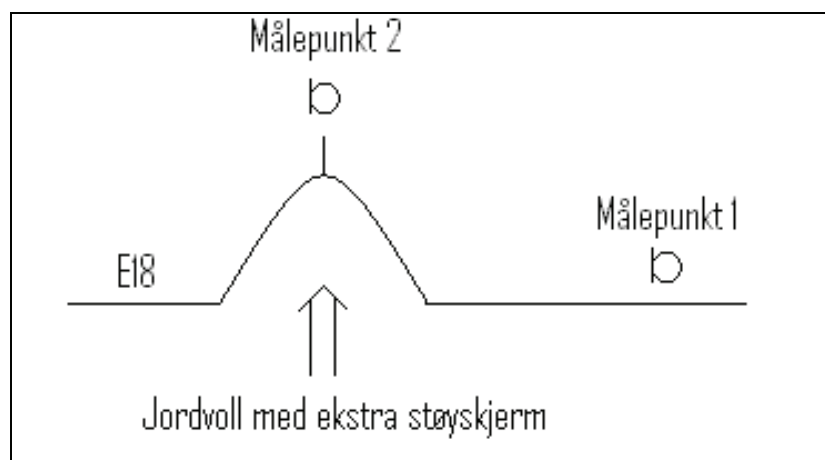


Figur 4-4. Målested Lerkeveien 15, Asker [Gulesider, 2006].



Figur 4-5. Sammenligning av målepunktene i Lerkeveien 15.

Veitrafikkstøyspekteret Målepunkt 1 i Figur 4-5 er et logaritmisk middel av 14 måleserier beregnet på samme måte som beskrevet i avsnitt 3.5.1. Se også ligning 2.5. Figur 4-6 viser målepunktens plassering og Målepunkt 1 ligger skjermet bak jordvollen. Jordvollen og støyskjermens totale høyde er omtrent 5 m. Målepunkt 1 ligger 45 m fra E18 og Målepunkt 2 ligger 32 m fra E18. For korte avstander som dette vil ikke luftabsorpsjon dempe som vist i Figur 4-5. Under avstander på 100 m har luftabsorpsjon lite innvirkning på forplantning av lydbølger og det er vanlig å justere lydnivået ned med 0,5 dB per 100 m [Olafsen, 1994]. I Figur 4-5 vises det tydelig at frekvenser over 80 Hz vil dempes betydelig i Målepunkt 1, mens Målepunkt 2 som har fri sikt til veibanen ikke vil ha samme demping. For frekvenser over 125 Hz vil støyskjermen dempe alle frekvenser med omtrent 15 dB, og dempingen for 100 Hz er omtent 7 dB. Diffraksjon over støyskjermen vil skje gradvis og det ses at for frekvenser under 80 Hz har ikke støyskjermen noen innvirkning på lydforplantningen.



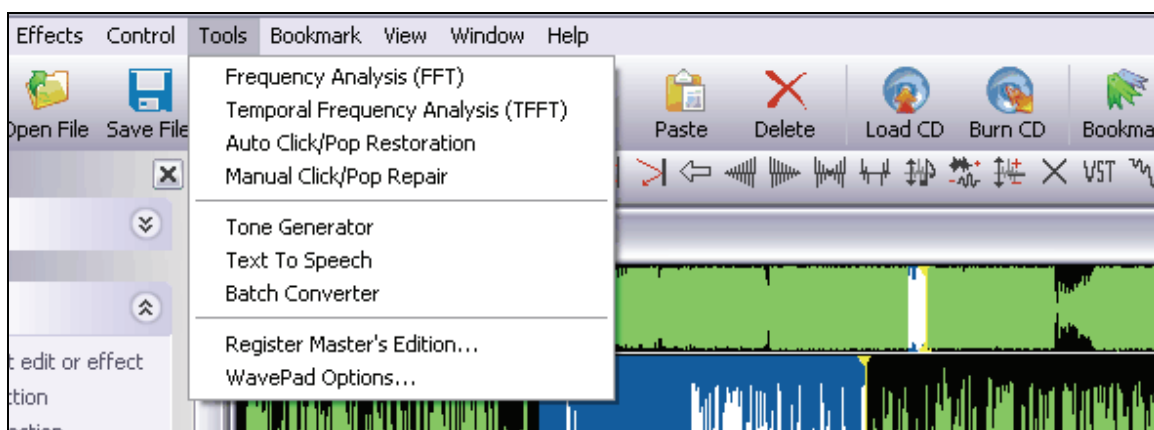
Figur 4-6. Tverrsnitt av målepunkter i Lerkeveien 15.

Som nevnt er det unøyaktigheter i avstandene på målestedene, men veitrafikkstøyspektrene i Figur 4-5 viser tydelig at støyskjermen kan dempe frekvenser ned til 125 Hz med så mye som 15 dB. Frekvensene som støyskjermen demper vil avhenge av dimensjonene på støyskjermen og lokal geometri på målestedet. Det antas at høyden målepunktet i Hønsveien 54 er plassert på, skjerner for frekvenser ned til og litt i underkant av 80 Hz. Dette er grunnen til at frekvenstoppen med senterfrekvens i 63 Hz-oktavnbandet i veitrafikkstøyspekteret, Figur 4-2, er markert.

Støyskjerner med tilsvarende demping som for E18 gjennom Asker finnes langs E6 nord for Oslo og langs andre sterkt trafikkerte veier. Selv om senterfrekvensen beregnes korrekt med ligning 2.3 kan frekvenstoppen dempes så mye at senterfrekvensen til frekvenstoppen ved målepunktet oppstår i et $\frac{1}{3}$ oktavnband lavere. Det er viktig å legge merke til at støyskjermene ikke fjerner frekvenstoppen, men kan dempe deler av den.

Sanntids FFT

Som nevnt i avsnitt 3.3.2 er det sett på sanntids FFT av lydfiler til målte veitrafikkstøyspekter i Stairway. Dette er gjort med programmet WavePad, og i programvinduet vises lydfilen parallelt i tidsplanet og i frekvensplanet. Figur 4-7 viser en del av brukergrensesnittet i WavePad og programmenyen som brukes for å se på sanntids FFT av lydfiler parallelt med at de spilles av. Lydfilene som er studert er tatt opp under målinger med forholdsvis få passeringer slik at det er mulig å skille ut enkeltkjøretøy. Det vises tydelig at når en bil passerer målepunktet øker lydtrykksnivået i frekvensområdet 50-100 Hz og rundt 1 kHz, altså som forventet. Det kan være litt vanskelig å se dette tydelig dersom det analyseres få enkeltpasseringer siden det kan være bakgrunnsstøy som forvrenger støyen fra kjøretøyet som passerer. FFT-analysen av lydfilene viser det som er diskutert om Hypotese 2, altså at senterfrekvensen til frekvenstoppen mellom 50-100 Hz bestemmes av grunntonen til motoren som følger av antenningen av drivstoff i sylindrene.



Figur 4-7. Brukergrensesnitt i WavePad. Menyvalget for sanntids FFT vises [NCH, 2006].

Under studiene av lydopptak ble det funnet et tydelig lydopptak av et lett kjøretøy som akselererer. Ved å spille av lydfilen og se på sanntids FFT når bilen akselerer ses det at frekvenstoppen ligger på omtrent 60 Hz før akselerasjonen starter. Når bilen akselererer

øker turtallet og dermed grunntonen. Når turtallet til kjøretøyet øker ses det tydelig at senterfrekvensen til frekvenstoppen flytter seg fra 60 Hz opp over 100 Hz og faller ned til omtrent 60 Hz når akselerasjonen opphører som følge av girskifte. Dette anses som et direkte bevis på Hypotese 2.

Grunnen til at Hypotese 1 forkastes er at differansen i veilengde mellom direkte og reflektert støy ikke kan oppnå størrelser på 3,4 m og over når det er flatt terreng rundt veibanen og motoren ikke befinner seg mer enn 0,5 m over veibanen. Hypotese 2 er godtatt av flere grunner. Dersom det ses på faktisk hastighet til kjøretøyene under måleperioden kan det gjøres et enkelt overslag over hvilket turtall kjøretøyene har og på den måten finne senterfrekvensen til frekvenstoppen med omtrent 20 Hz avvik. Ved hjelp av sanntids FFT analyse er det sett at en motor som øker turtallet forårsaker en frekvenstopp som flytter seg oppover i frekvens med økende turtall. Et veitrafikkstøyspekter målt på en sterkt trafikkert vei uten støyskjermer har også en bredere frekvenstopp. Dette kommer av at kjøretøyene har et turtall som varierer med motortype. Turtallet kan variere med så mye som 1000 opm, se Tabell 4-1. Det nevnes også at støyskjermer kan dempe deler av frekvenstoppen, og at dempingen kan gi en senterfrekvens i et $\frac{1}{3}$ oktavnband lavere.

4.2 Feltnmålinger

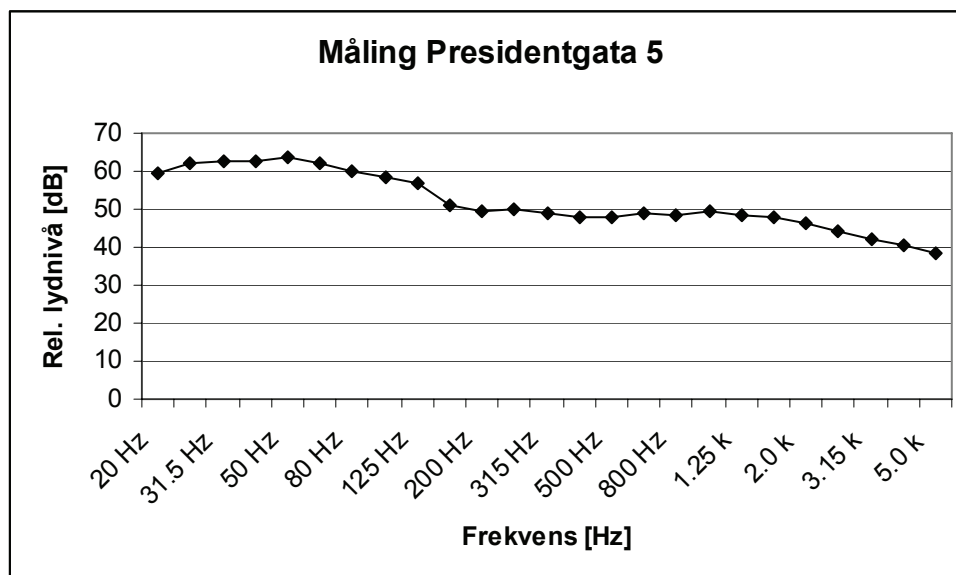
Resultatet av feltnmålingene blir presentert, og det gjennomgås hvor bra antagelsene om frekvenstoppen basert på Hypotese 2 stemmer med virkeligheten.

4.2.1 Feltnmåling 1

Under feltnmåling 1 ble det beregnet gjennomsnittshastighet for kjøretøyene som passerte målepunktet. Dette ble gjort ved å måle opp en viss avstand i veibanen og bruke stoppeklokke for å finne hastigheten. Det var ikke mulig å fastsette en hastighet som beskriver alle passeringene siden hastigheten varierte mellom 20-30 km/t. Som det ses av frekvensspekteret i Figur 4-8 er støyen konsentrert fra 40-63 Hz, og frekvenstoppen ved 1 kHz er fraværende i veitrafikkstøyspekteret. For å kunne se at det er en frekvenstopp i 50 Hz $\frac{1}{3}$ oktavnbandet er det tatt med frekvenser ned til 20 Hz. Det var forventet en frekvenstopp med senterfrekvens i 50 Hz $\frac{1}{3}$ oktavnbandet eller i 63 Hz-oktavnbandet, og Figur 4-8 viser at senterfrekvensen er i 50 Hz $\frac{1}{3}$ oktavnbandet. Veibanen er smal og har fartshinder, og det vil derfor være naturlig at det kommer bidrag under 50 Hz og over 63 Hz. Bredere frekvenstopp kommer da på grunn av kjøring i varierende gir og noe akselerasjon etter at fartshinderet er passert, eventuelt etter at 2 kjøretøy har passert hverandre.

Det var forventet en frekvenstopp ved 1 kHz fra dekkstøy men som Figur 4-8 viser er ikke frekvenstoppen ved 1 kHz fremtredende. Dette kommer av at kjøretøyene holdt lave hastigheter. Når det ses på plasseringen av mikrofonen er det mulig at dekkstøyen har blitt noe dempet av bilene parkert i forkant av mikrofonen. Dersom dekkstøy fra Presidentgata 5 sammenlignes med dekkstøyen i veitrafikkstøyspekteret fra Storgata 110 i Horten, Figur 3-7, har dekkstøy fra Presidentgata 5 omtrent 10 dB lavere nivå. De parkerte bilene har altså dempet frekvenstoppen ved 1 kHz noe, men det antas at dette

ikke fører til at beregningene i avsnitt 4.3 avviker så mye at resultatet forandres nevneverdig. Ekvivalent dBA nivå var 57,9 dBA for måleperioden.

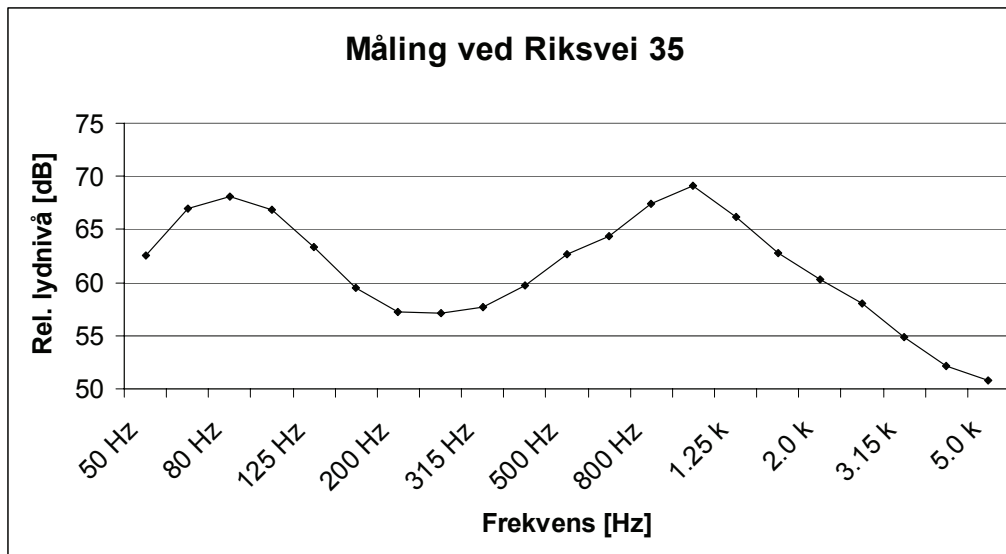


Figur 4-8. Måling i Presidentgata 5. Målingen er gjort i en avstand av 4 m fra senterlinjen til veien. Fartsgrensen er 30 km/t.

4.2.2 Feltmåling 2

Det ble ikke målt gjennomsnittlig hastighet under målingen ved Riksvei 35. Som det ses av frekvensspekteret i Figur 4-9 er det en bred frekvenstopp som dekker $\frac{1}{3}$ oktavnåbandene 63-100 Hz. Det eneste som ikke stemmer med forventningene er at frekvenstoppen brer seg ned i 63 Hz-oktavnåbandet. Bidraget i 63 Hz-oktavnåbandet kommer av dieselmotorer som har et lavere turtall ved vanlig kjøring, men kan og få et bidrag fra andre bensindrevne kjøretøy som holder en lavere hastighet.

Det er betydelig dekkstøy i dette veitrafikkstøyspekteret som det ses av toppen ved 1 kHz. Dersom målingen fra Riksvei 35 sammenlignes med målingen i Presidentgaten er det naturlig at høyere hastigheter genererer mer dekkstøy. Kjøreretningene på Riksvei 35 er atskilt med en jordvoll. Under måletiden ble det lagt merke til at dekkstøy fra veibanene på motsatt side av jordvollen var tydelig dempet, og det antas at det er jordvollen som er årsaken til dempingen av dekkstøy. Det er ikke gjort målinger som kan støtte opp under dette. Ekvivalent dBA nivå var 74,3 dBA for måleperioden.



Figur 4-9. Måling ved Riksvei 35. Målingen er gjort i en avstand av 15 m fra senterlinjen til veien. Fartsgrensen er 100 km/t.

Med bakgrunn i ligning 2.3, informasjon om hastigheten og veitype ved målestedet er det mulig å forutsi med en rimelig grad av nøyaktighet hvordan veitrafikkstøyspekteret vil se ut før målingen gjennomføres. Dersom det i tillegg foreligger empiriske data kan de brukes for å oppnå en riktigere antagelse om hvordan det målte veitrafikkstøyspekteret vil se ut ved en gjennomført måling. I forhold til data i Stairway kan det være nyttig å samle inn mer data for hastigheter under 50 km/t og over 90 km/t for å ha et bredere grunnlag av empiriske data.

4.3 **Entallskarakteristikk med reelle veitrafikkstøyspekter og glattede standardspekter**

Alle verdier i tabellene under avsnitt 4.3 er angitt i dBA. Diff reelt angir differanse mellom utendørs og innendørs ekvivalent lydnivå beregnet med reelt veitrafikkstøyspekter. Diff std angir det samme beregnet med standardspekteret fra Håndbok 47 angitt i parentes. Avviket er beregnet ved å trekke Diff std fra Diff reelt.

4.3.1 **Sammenligning med reelle nivådifferansespekter**

For alle målestedene er det angitt i parentes hvilket standardspekter det reelle veitrafikkstøyspekteret er sammenlignet med.

Tabell 4-2 viser beregningene utført med veitrafikkstøyspekteret målt i Presidentgata 5. Det ses at for målingen utført i by med 30 km/t vil det være små avvik mellom et reelt veitrafikkstøyspekter og standardspekteret C1. Samtidig som avvikene er små ses det også at for 4 av 5 fasader gir beregningene med standardspekteret C1 bedre nivådifferanse enn det reelle veitrafikkstøyspekteret. Selv om standardspekteret C1 angir bedre nivådifferanse så er forskjellene så små, utenom for Fasade 2, at beregningene med et reelt veitrafikkstøyspekter vil gi tilnærmet samme demping. Det vil ses at Fasade 2, betongvegg med mineralull og ingen ventilasjon, gir store avvik for flere beregninger.

Tabell 4-2. Entallskarakteristikk og avvik for Presidentgata 5. Alle verdier i dBA.

Presidentgata 5 Oslo kommune (C1)	Fasade	Diff reelt	Diff std	Avvik
	1	30,3	30,9	-0,6
	2	31,9	34,1	-2,2
	3	34,3	34,6	-0,3
	4	26,5	27,6	-1,1
	5	30,6	30,1	0,5

Tabell 4-3 viser beregningen for Storgata 110 i Horten. Det ses at for målingen i by med 50 km/t vil beregningene med et reelt veitrafikkstøyspekter gi bedre nivådifferanse enn standardspekteret C2. Dersom standardspekteret brukes i beregningen vil nivådifferansen undervurderes.

Tabell 4-3. Entallskarakteristikk og avvik for Storgata 110. Alle verdier i dBA.

Storgata 110 (C2)	Fasade	Diff reelt	Diff std	Avvik
	1	31,2	29,9	1,3
	2	35	32,3	2,7
	3	34,5	33,7	0,8
	4	29,5	25,9	3,6
	5	30,5	29,3	1,2

Tabell 4-4 viser beregningen for E18 gjennom Ås. For målinger utført på landevei med 60 km/t vil beregningene med standardspekteret C2 overvurdere nivådifferansen til å være bedre enn i det reelle tilfellet. Avvikene er små for 4 av 5 fasader. For Fasade 2 er den reelle nivådifferansen 3,7 dBA dårligere enn beregninger med standardspekteret C2. Tabell 2-2 viser at 3,7 dBA dårligere nivådifferanse er merkbart.

Tabell 4-4. Entallskarakteristikk og avvik for E18 gjennom Ås. Alle verdier i dBA.

E18 gjennom Ås (C2)	Fasade	Diff reelt	Diff std	Avvik
	1	32,1	32,8	-0,7
	2	33,2	36,9	-3,7
	3	35,1	35,2	-0,1
	4	29,1	30,5	-1,4
	5	32,6	31,8	0,8

Tabell 4-5 viser beregningen for Markalleen 60A. For målingen i Markalleen 60A er hastigheten 80 km/t forbi målepunktet. Det ses at for beregningene med standardspekteret C3 overvurderes nivådifferansene for alle fasadene, og for Fasade 2 er avviket størst på tilsvarende måte som det var størst for målingen ved E18 gjennom Ås. Avviket mellom reelt veitrafikkstøyspekter og glattet standardspekter er, utenom for Fasade 2, neglisjerbart.

Tabell 4-5. Entallskarakteristikk og avvik for Markalleen 60A. Alle verdier i dBA.

Markalleen 60A (C3)	Fasade	Diff reelt	Diff std	Avvik
	1	31,8	32,8	-1
	2	35	36,9	-1,9
	3	34,4	35,2	-0,8
	4	31	31,8	-0,8
	5	31	31,8	-0,8

Tabell 4-6 viser beregningen for E6 gjennom Djupdal. Som for målingen i Markalleen 60A ses det at også her vil beregningene med standardspekteret C3 overvurdere nivådifferansen i forhold til det reelle tilfellet. Spesielt ille er det at standardspekteret beregner en demping som er 4,7 dBA bedre enn beregningen med et reelt veitrafikkstøyspekter for Fasade 2. Standardspekteret beregner i beste tilfelle her en nivådifferanse som er 1,6 dBA dårligere enn for det reelle veitrafikkstøyspekteret, og gjennomsnittlig nesten 3 dBA dårligere enn hva som er det reelle tilfellet. Altså ses det at reell nivådifferanse er merkbart dårligere enn beregningene med standardspekter C3 antyder.

Tabell 4-6. Entallskarakteristikk og avvik for E6 Djupdal. Alle verdier i dBA.

E6 gjennom Djupdal (C3)	Fasade	Diff reelt	Diff std	Avvik
	1	29,7	32,8	-3,1
	2	32,2	36,9	-4,7
	3	33,6	35,2	-1,6
	4	26,9	30,5	-3,6
	5	30,2	31,8	-1,6

Tabell 4-7 viser beregningen gjort for Riksvei 35. Tabellen viser at standardspekteret vil undervurdere dempingen i forhold til det reelle veitrafikkstøyspekteret. Til slutt er det viktig å legge merke til at beregninger med standardspekteret C3 antyder bedre nivådifferanse sammenlignet med reelle spekter målt i hastighetene 80 km/t og 90 km/t, men dårligere nivådifferanse sammenlignet med 100 km/t. Dette vil utdypes etter at entallskarakteristikken beregnet med midlet nivådifferanse er presentert.

Tabell 4-7. Entallskarakteristikk og avvik for Riksvei 35. Alle verdier i dBA.

Riksvei 35 mot Gardermoen (C3)	Fasade	Diff reelt	Diff std	Avvik
	1	34,6	32,8	1,8
	2	37,7	36,9	0,8
	3	37,4	35,2	2,2
	4	31,9	30,5	1,4
	5	33,9	31,8	2,1

4.3.2 Sammenligning med midlet nivå differansespekter

Det midlede nivå differansespekteret er vist i Figur 3-16.

Tabell 4-8 viser neglisjerbare avvik når entallskarakteristikken beregnes med et midlet nivå differansespekter for reelle veitrafikkstøyspekter og glattede standardspekter. Ved å midle nivå differansespektrene vil svakhetene i fasadene jevnes ut, og det gjenspeiles i at avvikene er små. Ved å bruke et midlet nivå differansespekter ses det også at dempingen mellom utendørs og innendørs støy er høyere enn med reelle nivå differansespekter. Dette kommer av at målingene bak den midlede nivå differansen har høyere demping enn de reelle nivå differansespektrene som er brukt.

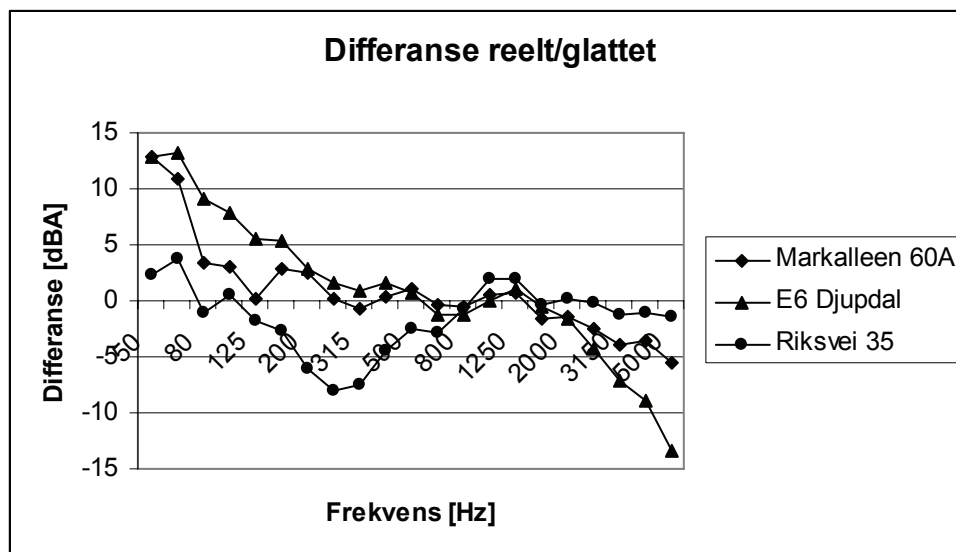
Tabell 4-8. Entallskarakteristikk og avvik for et midlet nivå differansespekter. Alle verdier i dBA.

Reelt veitrafikkstøyspekter	Std spekter	Diff reelt	Diff std	Avvik
Presidentgata 5	C1	41,5	41,7	-0,2
Storgata 110	C2	41,8	41,1	0,7
E18 Ås	C2	42,1	41,1	1
Markalleen 60A	C3	41,7	41,9	-0,2
E6 gjennom Djupdal	C3	41,2	41,9	-0,7
Riksvei 35 mot Gardermoen	C3	42,3	41,9	0,4

Det har blitt vist at det kan være store forskjeller i entallskarakteristikken beregnet med reelle nivå differansespekter og et midlet nivå differansespekter. For den midlede nivå differansen er det neglisjerbare avvik mellom reelle veitrafikkstøyspekter og glattede standardspekter. For de reelle nivå differansespektrene registreres det at det kan forekomme avvik i underkant av 5 dBA mellom reelle veitrafikkstøyspekter og glattede standardspekter. Entallskarakteristikkberegningene er ikke utført for et stort nok utvalg av veitrafikkstøyspekter og nivå differansespekter til at det kan konkluderes med noe ut ifra resultatene. Resultatene viser derimot klart at det er viktig å være kritisk til entallskarakteristikkberegninger utført med glattede standardspekter og midlede nivå differansespekter.

De 3 siste beregningene med reelle nivå differanser viser at med det glattede standardspekteret C3 overvurderes nivå differansen for 80 km/t i Markalleen 60A og for 90 km/t ved E6 gjennom Djupdal, mens nivå differansen undervurderes for 100 km/t, Riksvei 35. Det er naturlig å forvente at nivå differansen overvurderes for 100 km/t også når beregningene gjøres med standardspekteret C3. For å finne årsaken er det sett på selve veitrafikkstøyspekteret for de 3 målingene. Først er standardspekteret C3 normalisert til samme dBA ekvivalentnivå som hver av de 3 målingene, 65,2 dBA for Markalleen 60A, 55,1 dBA for E6 Djupdal og 74,2 dBA for Riksvei 35, se også avnitt 3.5. De glattede standardspektrene i Håndbok 47 er A-veide, og derfor må de reelle veitrafikkstøyspektrene også A-veies. Deretter er det normaliserte spekteret C3 trukket fra tilsvarende A-veid reelt veitrafikkstøyspekter. Differansen mellom de reelle veitrafikkstøyspektrene og det glattede standardspekteret C3 er vist i Figur 4-10. Det er lett å se av figuren at differansen mellom veitrafikkstøyspekteret målt ved Riksvei 35 og det normaliserte spekteret C3 har mindre avvik for hele frekvensområdet sett under ett enn det de 2 andre spektrene har. Som det ses av Figur 4-10 vil veitrafikkstøyspekteret fra

Markalleen 60A og E6 gjennom Djupdal ha høyere lydtrykksnivå for frekvenser under 200 Hz. Siden det reelle veitrafikkstøyspekteret har høyere lydtrykksnivå for frekvenser under 200 Hz vil $\frac{1}{3}$ oktavbåndene under 200 Hz ha høyere innendørs lydnivå for det reelle veitrafikkstøyspekteret enn for det normaliserte standardspekteret C3. I avnitt 3.5 ble det diskutert at nivådifferansene demper dårligere for frekvenser under 200 Hz enn for frekvenser over 200 Hz. Dermed vil bidraget fra lave frekvenser gi dårligere ekvivalent innendørs støynivå, og dermed overvurderes nivådifferansene når det brukes et glattet standardspekter. Det motsatte skjer for veitrafikkstøyspekteret fra Riksvei 35 hvor nivådifferansen undervurderes.



Figur 4-10. Differanse mellom A-veid reelt veitrafikkstøyspekter og normalisert standardspekter C3.

Dersom det brukes glattede standard veitrafikkstøyspekter fra Håndbok 47 og et midlet nivådifferansespekter kan det oppstå avvik i størrelsesorden omtrent 5 dBA fra reelle tilfeller. Det er også vist at frekvenstoppen ved lave frekvenser ikke øker innendørs ekvivalent støynivå dramatisk slik som en kan få inntrykk av ved å se på et veitrafikkstøyspekter som ikke er A-veid. Dette kommer av at A-veing undertrykker lave frekvenser og dermed vil beregninger med entalls karakteristikk påvirkes mindre av frekvenstoppen.

Før det kan treffes noen konklusjon om glattede standard veitrafikkstøyspekter gir et godt nok bilde av den reelle støysituasjonen må det gjøres flere slike sammenligninger. Det må samles inn mer data om reelle veitrafikkstøyspekter, og da spesielt for hastighetene under 50 km/t og over 90 km/t. For nivådifferansene er det slått fast at midling utjevner svakhetene i fasadene. Det kan være en ide å bruke mer enn bare et midlet nivådifferansespekter for å prøve å gi et mer riktig bilde av dempingen til fasaden. Det kan eksempelvis være ett nivådifferansespekter for bygg som har betongfasader og ett nivådifferansespekter for bygg med trefasader.

Dersom det skal lages støykart over for eksempel et nytt boligområde er de glattede standardspektrene nyttige for å kunne gi en indikasjon på hvilket støynivå som kan

forventes. For enkelthus derimot vil standardspektrene kunne gi avvik fra virkeligheten i størrelsesorden 5 dBA og som nevnt er det viktig å være kritisk til beregningene med standardspektrene.

4.4 **Feilkilder**

For å kunne forutsi hvordan formen til veitrafikkstøyspekteret for et gitt sted vil se ut, må det foreligge en del informasjon om målestedet. Hastigheten på målestedet må være kjent og da helst faktisk gjennomsnittlig hastighet siden den kan avvike fra skiltet hastighet. Ved hjelp av hastigheten på målestedet er det mulig å bruke ligning 2.3 og empiri for å forutsi om frekvenstoppen har senterfrekvens i 63 Hz eller i 80 Hz $\frac{1}{3}$ oktavbåndet samt om frekvenstoppen er bred eller markert. Ligning 2.3 og turtallet gir en god indikasjon på hvilket $\frac{1}{3}$ oktavbånd frekvenstoppen har senterfrekvens i, men dersom terrenget rundt målestedet skjermer frisisiktslinjen til veibanen er det også viktig å undersøke hvor mye skjerming hinderet eventuelt gir.

Det har vist seg at turtallet varierer mer enn først antatt. Dette gir opphav til en usikkerhet som kan føre til at turtallet blir feil anslått og at senterfrekvensen til frekvenstoppen anslås i feil oktavbånd. Det er mer kritisk å anslå senterfrekvensen feil i et for høyt frekvensbånd siden nivådifferansespektrene har minkende demping for minkende frekvens.

Det viste seg under beregninger på støyskjermer i avsnitt 4.1.2 at det er essensielt med nøyaktige avstander for å gjøre teoretiske beregninger av dempingen til en gitt støyskjerm. Når de nøyaktige avstandene er funnet må det også gjøres beregninger for hvert kjørefelt, for eksempel må det utføres fire beregninger for en 4-felts vei før beregningene kan vurderes som en helhet. På grunn av kravet til nøyaktige avstander kan det derfor være like enkelt å utføre støymålinger som viser den reelle situasjonen som å utføre nøyaktige og tidkrevende avstandsmålinger.

For entallskaraktistikkberegninger som gir innendørs lydnivå er det vist at det kan oppstå avvik i størrelsesorden 5 dBA. Det kan det lønne seg å bruke en nivådifferanse for betongfasader og en annen for trefasader ved teoretiske utredninger. Ved å bruke et midlet nivådifferansespekter vil alle svakheter i fasaden bli utjevnet og dermed er det vanskelig å få et riktig bile av en reell nivådifferanse.

5 Videre arbeid

For å kunne bestemme senterfrekvensen til frekvenstoppen med større nøyaktighet er det nødvendig å gjøre nærmere undersøkelser av bilparken i Norge. Andelen tunge kjøretøy er omtrent 10 % i trafikkbildet i Norge og ved å finne andelen lette kjøretøy med dieselmotor er det mulig å si noe konkret om hvor mye bredere en frekvenstopp faktisk kan bli på grunn av dieselmotorer. Det kan og være interessant å gjøre undersøkelser av støyspekteret til tunge kjøretøy.

I avsnitt 4.2.2 er det nevnt at dekkstøy fra motsatt side av jordvollen som skiller kjøreretningene på Riksvei 35 virker dempet. Det kan være interessant å dokumentere jordvollens faktiske innvirkning på utbredelse av dekkstøy siden det er et enkelt støydempende tiltak.

Gjennom feltmålingene er det sett på hvordan det ved hjelp av ligning 2.3 og empiri kan forutsies med rimelig nøyaktighet hvordan formen til veitrafikkstøyspekteret for et gitt målested vil se ut og derfor er det en interessant tanke å bruke selve frekvensspekteret i større grad. I stedet for bare å se på ekvivalentverdier slik som med entalls karakteristikken kan det med utgangspunkt i selve frekvensspekteret forutsies hvilke frekvenser som vil ha et høyt lydtrykksnivå. Dette kan være til hjelp når det skal bestemmes fasadetype for et nybygg.

6 Konklusjon

Hensikten med oppgaven var å finne årsaken til frekvenstoppen mellom 50-100 Hz, samt å se på betydningen av frekvenstoppen ved entallskarakteristikkberegninger. Det ble formulert 2 hypoteser. Den første foreslår interferens mellom direkte lyd og første refleksjon fra bakken som årsak. Den andre foreslår motorstøy som årsak til frekvenstoppen hvor motorens grunntone angir senterfrekvensen til frekvenstoppen. Hypotese 1 krever differanser i veilengde mellom direkte lyd og første refleksjon på 3,4 m og over for å kunne gi interferens i det aktuelle frekvensområdet. Det oppstår ikke slike differanser i veilengde når det er flatt terreng rundt målestedene. Derfor kan Hypotese 1 forkastes. Undersøkelser av veitrafikkstøyspekter, faktisk gjennomsnittlig hastighet og motortyper viser at Hypotese 2 kan godtas, altså at antenning av drivstoffet motoren er årsak til frekvenstoppen ved lave frekvenser.

Undersøkelser viser at alle veitrafikkstøyspekter har en frekvenstopp med senterfrekvens i 63 Hz eller i 80 Hz $\frac{1}{3}$ oktavbåndet for hastigheter over 50 km/t. Noen veitrafikkstøyspekter har en markert topp, mens andre har en frekvenstopp med tilnærmet samme lydtrykk i $\frac{1}{3}$ oktavbåndene fra 63-100 Hz. Markerte topper kan komme av at støyskjermer eller lokalt terreng skjærer frisisiktslinjen. Skjermes frisisiktslinjen kan en del av frekvenstoppen dempes slik at den fremstår som smalere enn den egentlig er. Kjøretøy med dieselmotorer har et lavere turtall ved vanlig kjøring enn kjøretøy med bensinmotorer og samtidig har tunge kjøretøy med dieselmotor ofte flere sylindere. Fra ligning 2.3 ses det at varierende antall sylindere og turtall bidrar til at frekvenstoppen brer seg ut over flere $\frac{1}{3}$ oktavbånd.

Bunnen i veitrafikkstøyspekter oppstår som en følge av at motorstøy og dekkstøy har høyere lydtrykk enn generell støy slik at det naturlig dannes en bunn mellom frekvenstoppene. Markdemping, hvor lydbølger som forplantes over bakken vil dempes som en følge av interferens med bakken kan også bidra til å tydeliggjøre bunnen.

Sanntids FFT-analyse av lydfiler tatt opp under veitrafikkstøymålinger viser tydelig en frekvenstopp som flytter seg opp i frekvens når kjøretøyet akselerer og øker motorens grunntone. Dette anses som et direkte bevis på Hypotese 2.

Feltmålingene viser at det med rimelig grad av nøyaktighet er mulig å forutsi hvordan veitrafikkstøyspekteret blir seende ut for et gitt målested forutsatt at det foreligger en viss informasjonsmengde om målestedet. Informasjon som er nødvendig er skiltet hastighet ved målestedet og informasjon om veitype der veitrafikkstøyspekteret skal måles. For målingen utført i en 30-sone stemmer anslått senterfrekvens til frekvenstoppen bra. Det viser seg at frekvenstoppen ved 1 kHz forårsaket av dekkstøy var noe mer dempet enn forventet. For målingen i 100-sone viser frekvenstoppen at kjøretøy med dieselmotorer bidrar til en bredere frekvenstopp, og da hovedsakelig et bidrag i 63 Hz-oktavbåndet. Bortsett fra bidraget i 63 Hz-oktavbåndet er veitrafikkstøyspekteret målt i en 100-sone som forventet. Senterfrekvens til toppen i støyspektrene er anslått med ligning 2.3 og antagelsen om at trafikkbildet domineres av bensinmotorer med 4 sylindere.

Entallskarakteristikken beregnet med reelle veitrafikkstøyspekter og glattede standardspekter fra Håndbok 47 viser neglisjerbare avvik når entallskarakteristikken beregnes med et midlet nivå differansespekter. Ved å bruke reelle nivå differansespekter ses det at avvikene kan komme opp i størrelsesorden 5 dBA mellom reelle veitrafikkstøyspekter og glattede standardspekter. Dette viser at standardspektrene er gode for å gi en indikasjon på støynivå, men det er viktig å være kritisk til beregningene. Med empiri økes sjansene for å kunne gjøre en riktig teoretisk utredning av støynivå.

7 Referanser

Litteraturreferanser:

Forskrift om grenseverdier for lokal luftforurensing og støy, Miljøverndepartementet, 1997

Homb, Anders, Hveem, Sigurd, *Isolering mot utendørs støy-Håndbok 47*, PDC Tangen A.S, Norge, 1999

Kinsler, Lawrence E., Frey, Austin R., Coppens, Alan B., Sanders, James V., *Fundamentals of Acoustics*, 4. utgave, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2000

Kragh, J., Anderson, B., *Environmental Noise From Industrial Plants*, Lydteknisk Institut, rapport nr. 32, Danmark, 1982

Krokstad, Asbjørn, *Akustikk for Ingeniører*, Tapir trykk, revidert 1999

Olafsen, Sigmund, *Proceedings, Nordic Acoustical Meeting 1994*, Danish Technological Institute, Danmark, 1994

Sandberg, Ulf, *Proceedings Volume 1, Inter-noise 2001*, Nederlands Akoestisch Genootschap (NAG), Nederland, 2001

Personlig kommunikasjon:

Salminen AS Harstad ^v/Knut Ove Myreng

Sigmund Olafsen

Stairway

Internettreferanser:

<http://www.ford.com>

Sist besøkt: 26.5.2006 kl 12:30

Hjemmesiden til Ford Motor Company. Oversikt over firmaet og eierforhold.

<http://www.gulesider.no>

Sist besøkt: 26.5.2006 kl 12:30

Søketjeneste for blant annet kart.

<http://www.nch.com.au/wavepad/masters.html>

Sist besøkt: 26.5.2006 kl 12:30

Hjemmesiden til NCH som utvikler WavePad

<http://www.norsonic.com>

Sist besøkt: 26.5.2006 kl 12:30

Hjemmesiden til Norsonic som er utvikler av måleinstrumentene benyttet under oppgaven.

http://en.wikipedia.org/wiki/Fletcher%E2%80%93Munson_curves

Sist besøkt: 29.5.2006 kl 13:40

Informasjon om utviklingen av likelydskurvene. Det originale arbeidet er presentert i *Loudness, its definition, measurement and calculation*, J.Acoust. Soc Am.5, 82-108, 1933.

8 **Vedlegg**

Vedlegg A – Sound Insulation Against Traffic Noise In Wooden Houses

SOUND INSULATION AGAINST TRAFFIC NOISE IN WOODEN HOUSES

Sigmund Olafsen
Hjellnes COWI AS

Abstract: A new Norwegian regulation requires that all dwellings should have an indoor 24-hour equivalent A-weighted level from outdoor sources of less than 42 dB by the end of 2004. It's the responsibility of the owner of the noise source to ensure that the requirement is fulfilled. The most important source by far is road traffic noise.

In order to calculate indoor noise from road traffic, the outdoor noise level and the transmission loss in the façade must be determined. The outdoor noise level in dBA can be easily calculated in most of these cases. But the insulation of the façade (including walls, ventilation openings and windows) can only be determined if the traffic noise spectrum and the transmission loss spectrum are known with sufficient accuracy.

The paper will present a simple measurement method to determine the level difference in third octave bands through the wall.

Many Norwegian residential buildings are old wooden houses. It's often difficult to determine the sound insulation properties of these houses without measurements. The paper will also show results from sound insulation measurements in several wooden houses.

Keywords: sound insulation, road traffic noise, indoor noise

1. INTRODUCTION

There's a quite new Norwegian regulation [1] stating that nobody should be exposed to an A-weighted, 24-hour equivalent level of 42 dBA or more by the end of 2004. This has led to a need for a reliable method to determine indoor noise levels. The standard Norwegian method for calculating indoor noise levels [2] was updated in 2000. This method is a dBA method, giving the R_w value for each construction element listed together with correction factors for different noise types. There are several weak points to this method, the most important ones being:

- Only 6 road traffic noise spectra and 6 railway noise spectra are included in the method.
- The data given is mainly laboratory values.
- The sound insulation spectra are not given.

So the method becomes unsuitable if:

- The real outdoor noise spectrum is different from the spectra available in the method
- There is no detailed knowledge of the construction, often the case for many old Norwegian wooden houses
- The construction is changed by age or modifications

In many cases, this means that a very conservative approach has to be used if an evaluation of indoor noise is to be based on calculations only. Sound insulation measures shall be carried out unless it's completely certain that the indoor $L_{\text{aeq},24\text{h}}$ is less than 42 dBA. These measures may be

in the form of new windows, extra insulation in the walls or new ventilation systems.



Is the noise level inside too high? It's expensive to give the wrong answer for this stately old mansion along highway 3 in Østerdalen, Norway.

2. MEASUREMENT METHOD

A measurement method should of course be as simple and cheap as possible while maintaining sufficient accuracy [3,4]. Direct measurement of indoor traffic noise is usually not possible due to severe problems with background noise. Thus it'll be necessary to measure indoor traffic noise by an indirect method. Experience also shows that standard outdoor spectra [2] should not be used, as there

are often local peculiarities in the spectrum, particularly in the frequency range 100-500 Hz, where peaks and dips are often detected.

There are two important factors that need to be measured:

- Outdoor traffic noise spectrum in 1/3-octave bands
- Transmission loss through the construction in 1/3-octave bands

Measurement of outdoor traffic noise spectrum is done by directly measuring during at least three periods of 30 minutes each. Traffic must be counted during these measurements. This usually gives a sufficiently good spectrum to use for indoor noise level determination. In cases where automatic traffic counts have been available, the spectrum has been logged overnight or longer.

Measurement of transmission loss is done by using a powerful loudspeaker. The measurements presented here have been made using a Norsonic 230 noise generator, Norsonic 260 power amplifier and Norsonic 250 hemispherical loudspeaker. Measurements of outdoor levels have been made with the microphone placed inside the +3 dB reflection zone outside the partition to be measured. Indoor levels have been measured with the microphone in a number of points inside the room.

The microphone and the loudspeaker have been moved during the measurements to acquire a reasonable average of the sound transmission. The loudspeaker has been moved in such a way as to give an average as close as possible to the true excitation by road traffic noise. The microphone has been moved in order to achieve a good enough determination of the outdoor and indoor level. The practical details must be determined on site in any given case.

In absolutely all cases, there are at least three combinations of microphone and loudspeaker placement, and normally 5-10 combinations have been used to obtain a suitable average.

Only level differences in third octave bands have been measured. It is not necessary to distinguish between sound transmission through wall, ventilation openings and windows. There is no need to determine room attenuation either. The purpose of the measurement is to determine whether or not the indoor noise level exceeds 42 dBA in the most exposed room inside the house.

The indoor level has usually been calculated before any decision to measure has been made. Selection of room(s) to be measured is done on site. Preferred rooms are as follows:

- The room should have a critical calculated indoor noise level
- The room should be exposed to traffic noise in directions where it'll be possible to place the loudspeaker in the same directions
- The room should have a reasonable shape and size
- The sound insulation for the room should be useable in calibrating the calculations for the rest of the house

Reverberation times of the rooms have not been measured. The reverberation times of typical rooms in ordinary residences are on the order of 0,3 to 0,5 seconds. This type of measurements are made in furnished rooms which have been inhabited for a long time by the same people, thus the rooms are well damped. Reverberation time is not a critical parameter.



Ready to start measurement on a house along the E-6 through Ringebu, Norway. The insulation was shown to be sufficient, indoor equivalent level in the most exposed room was 39 dBA.

3. PROCESSING OF MEASUREMENT DATA

For each partition, the raw data from the measurements consist of three spectra:

- Outdoor level from the loudspeaker, $L_{out, loudspeaker}$
- Indoor level from the loudspeaker, $L_{in, loudspeaker}$
- Outdoor traffic noise spectrum, $L_{out, traffic}$

The level difference spectrum is then calculated as follows:

$$D = L_{out, loudspeaker} - L_{in, loudspeaker} \text{ (in each band)}$$

The indoor noise spectrum is:

$$L_{in, traffic} = L_{out, traffic} - D \text{ (in each band)}$$

The measurement has been made in order to find the actual difference in dBA between outdoor and indoor traffic noise level. So we find the indoor level in dBA from the indoor spectrum. It is essential that the difference is calculated using a local spectrum, using an unsuitable spectrum may easily give an indoor level that is 5 or even 10 dB off the true value.

The difference between indoor and outdoor levels in dBA has been calculated using three or four different outdoor spectra, and the worst case has been used to evaluate indoor levels.

4. RESULTS OF MEASUREMENTS

Results are given as level difference spectra. The difference in dBA will be strongly dependent on the noise source in each case. The results presented below are linear averages from each group, making the insulation curves look quite smooth. In most cases the individual curve has several peaks and dips. Often the dips can be used to troubleshoot the construction. Sometimes a trough at mid-frequencies can be used to prove a leakage through a ventilation slit, or a dip at a single band can be identified as the critical frequency of the glass thickness used in the window.

4.1 Overview

In this paper results from 70 individual measurements of sound insulation in wooden houses are included as follows:

Description	Number of cases
Structure	
Lighweight wooden	55
Heavy wooden	15
Windows	
Single glazing	4
Double glazing	39
Two single glasses	25
Ventilation	
None	43
Simple opening in wall	16
Slit in window	11
Insulation	
Mineral wool	24
Sawdust	7
Unknown or none	39

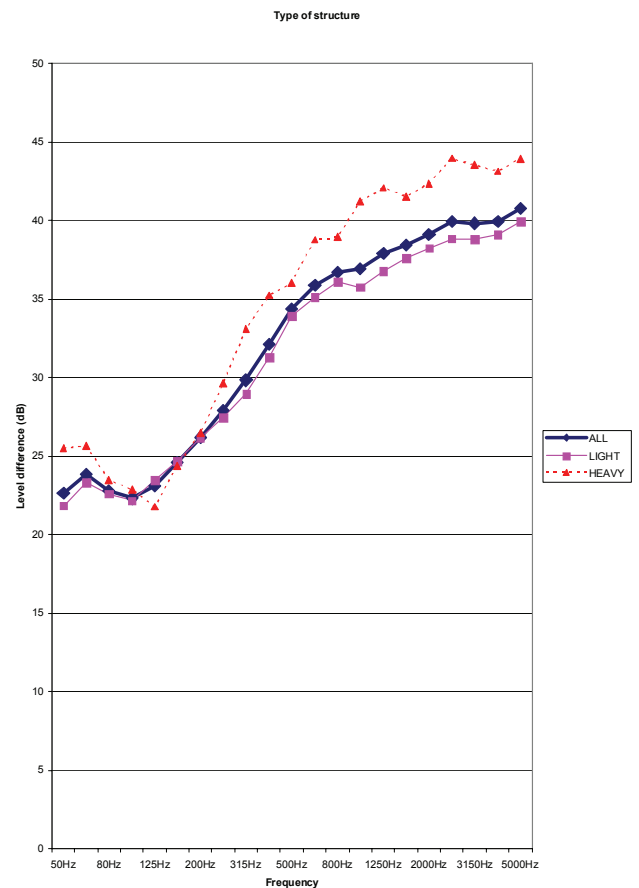
Results are given as 1/3-octave spectra in the frequency range 50 Hz - 5000 Hz. The difference in dBA between outdoor and indoor level will be strongly dependent on the source spectrum.

Houses with concrete or brick structures are not included in this material, as we have insufficient data on them. Neither are houses with sheet metal or asbestos cement facings included, as these are quite rare in Norway.

Thus only houses with wooden structure and wooden paneling are included in this material. The different categories for construction, windows, ventilation and insulation are not independent of each other. However, even with the simplification presented here, there are 54 different combinations of types of wall, window, ventilation and insulation. 23 of these combinations are found in our material. Thus there may be interaction between different factors, and the number of houses evaluated is clearly insufficient to analyze such interaction.

4.2 Heavy versus light structures

Houses with a heavy wooden structure normally have a better sound insulation than houses with a light wooden structure, other things being equal. Heavy structures are defined as a massive wooden structure with a thickness of at least 100 mm. This kind of building was often set up as a new main house erected in the 1890's on a rich farm. The lightweight structures sometimes have very poor insulation even though the building looks like it's in good upkeep. Sometimes the whole structure consists of a sparse frame with panel on each side. The houses with heavy walls often have windows with two single glasses in separate frames, and they rarely have windows with ventilation slits.

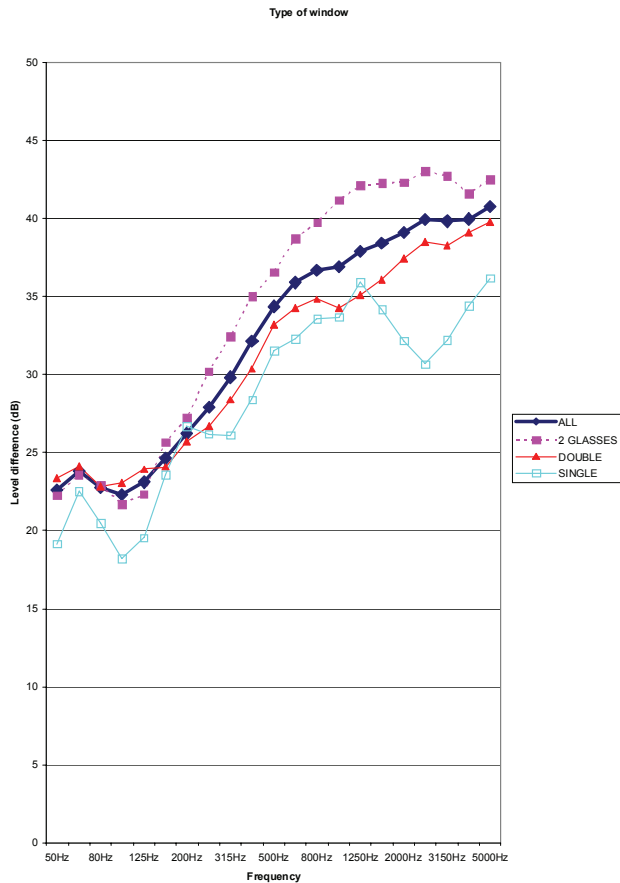


4.3 Different types of window

There are two main types of windows in general use in Norway, an older system with two independent glasses in separate frames, and a more modern system with double glazing in a single frame. Occasionally single glazing is seen, but this is rare. A system with two separate glass frames would be expected to perform better than a system with double glazing, and this seems to agree with our results.

Other systems like triple glazing or special noise windows are rarely used in the old wooden houses where most of the measurements have been made, so there isn't enough data on them.

Many Norwegians have removed the windows with two separate glasses as this old system is not very practical. But it certainly looks like the new windows give poorer sound insulation, which agrees with theory and laboratory measurements.

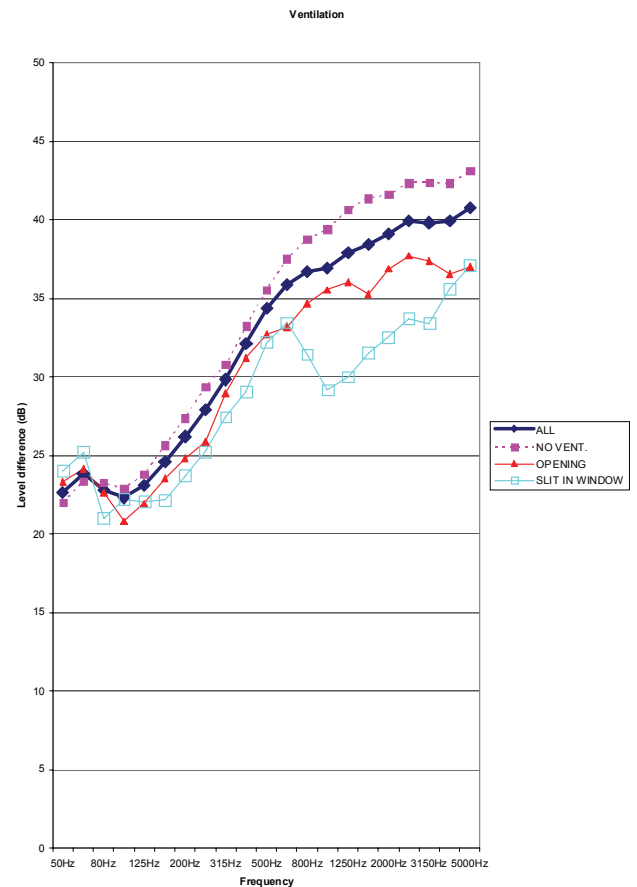


The marked dip for single glass windows at 2500 Hz clearly indicate the critical frequency of the glass, even an average of 4 measurements does not smooth it out.

4.4 Ventilation system

The sound insulation results from houses with the most widespread types of ventilation system are shown on the graphs next page. It's quite reasonable that sound insulation is best when there's no ventilation. It's also quite reasonable that the system with a long narrow slit in the window performs poorly with regards to sound insulation. The performance of the open systems is much better than expected.

It would seem that in many cases there isn't a straight hole through the wall between the grids that can be seen on both sides of the wall. In many cases the results look more like what you'd expect from a silenced duct of similar length.



The graph clearly shows that even on average there's a clear dip in the spectrum for systems with a ventilation slit in the window.

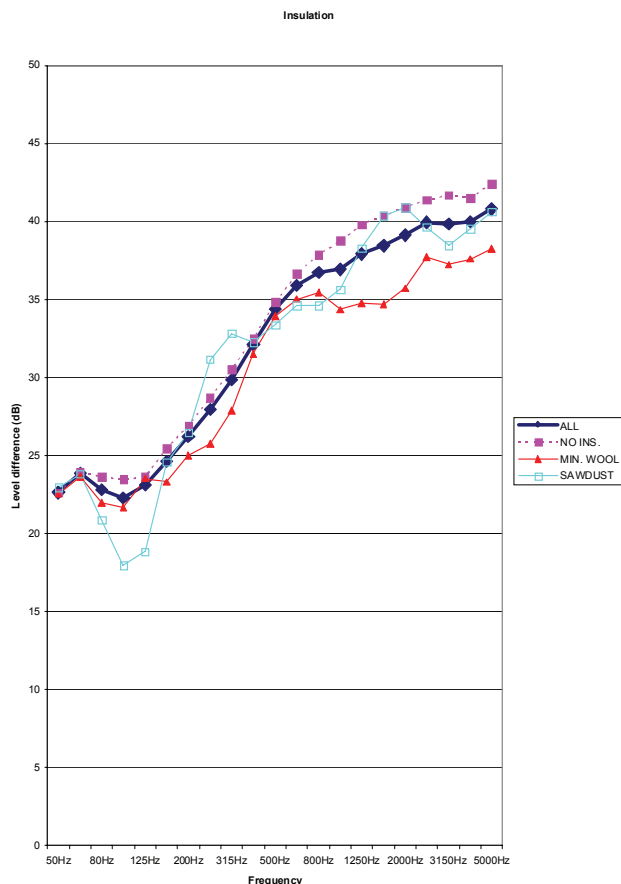
This graph also shows that a building with no ventilation has better sound insulation, as should be expected.

4.5 Insulation

The results for different type of structure, different type of window and different ventilation systems agree with common sense. But the results for different types of insulation clearly do not.

Old Norwegian wooden houses have many different types of insulation, clay, sawdust and even newspapers have

been tried, in many cases it's simply disappeared through the years. In the 1950's mineral wool came into general use. During the 1960's and 1970's, the old system with two separate windows was replaced by modern double glazing. In many cases the new windows have a poorer sound insulation than the ones they replaced. Another factor is that more recent wooden houses have a lighter frame than the old ones used to have. And finally newer houses often have better ventilation than old houses.



The chart seems to indicate that no insulation in the wall is better than mineral wool. Obviously this is not likely to be the case.

It seems unlikely that the mineral wool insulation is the cause of the poor performance of these houses. It seems much more likely that this is caused by the other factors mentioned above, poorer sound insulation in windows, ventilation and in the wooden structure.

5. PRACTICAL DETERMINATION OF INDOOR TRAFFIC NOISE LEVELS

Experience has shown that it's very hard to predict the actual difference between outdoor and indoor traffic noise levels, especially in old wooden houses. Measurements have shown differences as high as 41 dB and as low as 24 dB. It is not possible to make any accurate calculation of indoor levels using current knowledge. In some cases the calculations give 10 dB overestimation of indoor levels.

In our experience, one main problem is that the outdoor spectrum looks very different from what you'd expect. The only spectrum that's usually good enough, is the one for town or city traffic. Probably this is because the whole ground surface between the road and the house is hard, so that ground effects do not shift the spectrum. The lack of proper outdoor spectra in the book is not necessarily a problem, as it can normally be measured directly on site. It'll usually also be possible to measure the actual level difference between outside and inside.

A consistent and predictable approach could be as follows:

1. Calculate indoor levels using existing methods and conservative estimates for the insulation of walls, windows and ventilation openings [2].
2. If calculated indoor level in the most exposed room is 41 dBA or higher, measure the sound insulation in critical room(s) for this house.
3. If the measurement gives an indoor level which is 0-3 dB lower than calculated, use the previously calculated values.
4. If the measurement gives an indoor level which is lower than calculated by more than 3 dB, try to adjust the estimates for insulation of walls, windows and ventilation openings till the result fits the measurement.

This approach may be simplified in town or city situations with traffic speeds of 50 km/h or less and with the houses close to the road, as in these cases the calculations usually give acceptable results in the first place.

It must be stressed that it's necessary to use a very safe and conservative approach in the original calculations, as it's not acceptable to run the risk of underestimating indoor traffic noise.

It should be noted that the cost of the measurement is a fraction of the cost of unnecessary noise reduction measures. As long as we have only the currently available calculation methods, measurements should certainly be made in many cases. Another important factor is credibility; most people living close to a road have much more faith in actual noise measurements than in theoretical calculations.

6. FURTHER INVESTIGATIONS

It's not yet possible to give any clear, consistent guidelines based on our results so far. Each house has its own sound insulation spectrum, and we have so far been unable to identify a formula to give better predictions of indoor levels.

Many more measurements will be made during the coming year. We hope to be able to combine the level difference spectra with our large database of outdoor traffic noise spectra. This might give a better method for calculating indoor noise spectra. It's quite conceivable that a purely empirical approach based on field data for outdoor spectra and field measured sound insulation can give better accuracy for indoor calculations than any prediction method based on laboratory investigations on building components.

ACKNOWLEDGEMENTS

My sincere thanks go to the Norwegian Public Road Administration, offices in the counties:

- Akershus
- Buskerud
- Vestfold
- Hedmark
- Oppland
- Møre og Romsdal

These offices have commissioned the measurements and all have given permission to present the results in this paper.

My special thanks go to Harald Ødegård of the Public Roads Administration of Oppland county. This gentleman has been the main driving force behind a gradually increasing use of measurements for evaluation of sound insulation in old wooden houses (and provided a wealth of information about the construction of traditional Norwegian wooden houses and local history and geography of the Norwegian inland districts).

REFERENCES

1. Norwegian regulation regarding limit values for local air pollution and noise, 1997
2. Handbook 47, "Insulation Against External Noise: Calculation Method and Data", Published by the Norwegian Building Research Institute 1999 ISBN 82-536-0660-5
3. S.Olafsen, "Immission measurement of road traffic noise – a practical approach", Transport Noise and Vibration, Tallinn, 1998
4. S.Olafsen, "Accuracy of practical road traffic noise measurements", InterNoise 2001, den Haag



Large, solid massive wooden house along the E-136 in Lesja, Norway. It's impossible to tell the sound insulation just by inspection, measurements are essential to make the right decision. The figure 6236 is a tag number. Results are not available at the time of printing.