

NYTT DOBBELTSPOR OSLO - SKI

DETALJPLAN



NYTT DOBBELTSPOR OSLO - SKI

FOLLOBANEN, TUNNELSTREKNING

UNDERBYGNING

Notat

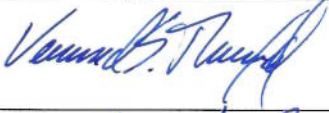

TBM kontra D&B – lyd og vibrasjoner

00B	1. utgave	22.03.2012	coh	sc	sha <i>NG</i>	
Rev.	Revisjonen gjelder	Dato	Utarb. av	Kontr. av	Godkj. av	
Follobanen, Tunnelstrekning Underbygning TBM kontra D&B lyd og vibrasjoner		Ant. sider	Fase:	Detaljplan		
		24	Lokasjon:	Tunnelstrekning		
			Oppdr. nr.	10274		
		Produsent				
		Prod. dok. nr.				
		Erstatning for				
Erstattet av						
Prosjekt: Nytt dobbeltspor Oslo - Ski Parsell: Tunnelstrekning		Dokument nr. UFB-30-A-32529			Rev. 00B	
 Jernbaneverket		Dokument nr.			Rev.	

Signaturside for bruk av underkonsulenter

Som verifikasjon av at egenkontroll og sidemannskontroll er utført skal denne side i tillegg til forsiden signeres og oversendes skannet til follobanen@aa.j.no.

Med underskriften under bekreftes det at egenkontroll og sidemannskontroll er utført og at kontrolldokumentasjon er arkivert.

	Navn	Signatur
Utarbeidet av: Egenkontroll utført	Clas Ola Høsøien	
Sidemannskontroll:	Vemund S. Thorød for Stein Christiansen	
Godkjent av Disiplinleder:	Gisle K. Grepstad for Elisabeth Grabakken	

1	OM NOTATET	4
2	GRENSEVERDIER	4
2.1	INNLEDENDE BETRAKTNINGER	4
2.2	STØY FRA BYGG- OG ANLEGGSVIRKSOMHET.....	5
2.3	VIBRASJONER FRA SPRENGNINGER	5
3	STRUKTURLYDNIVÅER	6
3.1	GRUNNLAG.....	6
3.1.1	<i>Resultater fra målinger</i>	6
3.1.2	<i>Teori for lydutbredelse i grunnen</i>	6
3.2	MÅLTE NIVÅER FRA TBM	7
3.2.1	<i>Total avstandsdemping</i>	7
3.2.2	<i>Frekvensfordeling</i>	8
3.3	MÅLTE NIVÅER FRA BORING	10
3.3.1	<i>Total avstandsdemping</i>	10
3.3.2	<i>Frekvensfordeling</i>	10
3.4	SAMMENSTILLING AVSTANDSDEMPING TBM OG BORING.....	12
4	OPPSUMMERING	13
5	ENGLISH VERSION	14
6	NOISE REQUIREMENTS	14
6.1	INITIAL CONSIDERATIONS	14
6.2	NOISE FROM CONSTRUCTION WORKS	15
6.3	VIBRATIONS FROM BLASTING	15
7	STRUCTURE BORNE NOISE	16
7.1	BASIS.....	16
7.1.1	<i>Results from measurements</i>	16
7.1.2	<i>Theory on sound propagation in the ground</i>	16
7.2	MEASURED SOUND LEVELS FROM TBM	17
7.2.1	<i>Total attenuation</i>	17
7.2.2	<i>Frequency distribution</i>	18
7.3	MEASURED SOUND LEVELS FROM DRILLING	20
7.3.1	<i>Total attenuation</i>	20
7.3.2	<i>Frequency distribution</i>	20
7.4	COMPARISON OF ATTENUATION.....	22
8	SUMMARY	23
9	REFERANSER	24

1 OM NOTATET

Dette notatet omhandler aktuelle grenseverdier for støy i bygninger fra driving av tunnel i forbindelse med utbygging av Follobanen. Det er gjort en vurdering av om sprengninger skal inngå som en del av støy fra bygg- og anleggsvirksomhet. Måledata fra andre tunnelprosjekter er brukt for sammenligning av lydnivåer fra TBM og konvensjonell driving. Det er etablert sammenheng mellom A-veid lydtryknivå og avstand mellom kilde og mottaker som grunnlag for vurdering av støybelastning ved tunneldriving for de to drivemetodene.

På grunn av stort sprik i rapporterte lydtryknivåer i ulike prosjekter anbefales det at det utarbeides et måleprogram for dette prosjektet for å verifisere, og eventuelt modifisere, beregningsmetoden.

HOLD

Dette notatet vil bli revidert på bakgrunn av nye data for TBM driving.

2 GRENSEVERDIER

2.1 Innledende betraktninger

TBM og boring innebærer begge kontinuerlig eksitasjon, mens sprengning enten kan holdes utenfor og vurderes kun etter NS 8141 [1], det vil si vurdert opp mot å unngå skade på byggverk, eller sprengning kan inngå som en del av det totale støybildet sammen med den mer kontinuerlige eksitasjonen.

I veiledning til T-1442 [2] fra Klima- og forurensningsdirektoratet (KLIF), TA-2115 [3], er sprengning nevnt som en form for bygge- og anleggsstøy, blant annet under punkt 4.5.1 ”Sterkt støyende arbeider”. Sprengning har en klar impuls karakter, og det kan derfor være aktuelt med skjerping av kravet med 5 dB for denne typen eksitasjon, ref. T-1442, punkt 4.2.4, hvor det står at ”Skjerpingen bør gjøres gjeldende for driftssituasjoner der impulslyd og/eller rentoner er et karakteristisk trekk ved driften”. Det er ikke angitt noen kriterier for vurdering av impulslyd.

For støykilder som industri, havner og terminaler er det angitt at skjerping av kravet gjelder når impulslyd opptrer med i gjennomsnitt mer enn 10 hendelser pr time.

Karakteristisk trekk ved konvensjonell driving vil være periodevis kontinuerlig støy fra boring (og eventuelt pigging). Sprengning vil foregå såpass sjeldent at skjerping av krav på grunn av impulslyd som opptrer et visst antall ganger pr time ikke anses som aktuelt, ref. betraktning for kilder som industri, havner og terminaler.

Multiconsult er av den oppfatning at sprengningsaktiviteter er vesensforskjellig fra TBM, og andre aktiviteter ved konvensjonell drift, både med hensyn på hyppighet og type eksitasjon, og at lydnivå fra salver derfor i utgangspunktet ikke skal inngå i vurderingen av støy fra bygge- og anleggsaktiviteter.

Det påpekes at sprengninger kan være plagsomt for berørte beboere, spesielt fordi sprengninger opptrer sjeldent og plutselig. Støy fra sprengninger vil kunne skape uro/redsel.

Det er derfor viktig å lage gode rutiner for varsling om når sprengninger skal gjennomføres. Vanlig praksis er at det ikke sprenges på natt, i tidsrommet 23:00 - 07:00.

2.2 Støy fra bygg- og anleggsvirksomhet

Aktuelle grenseverdier for støy fra bygge- og anleggsvirksomhet er gitt i T-1442, kapittel 4.2.2, og er oppsummert i tabell 1 nedenfor.

Tabell 1: Anbefalte innendørs støygrenser for bygg- og anleggsvirksomhet. Alle grenser gjelder ekvivalent lydnivå (middelverdi for rommet) i dB, i rom for støyfølsom bruk.

Bygningstype	Støykrav dagtid ($L_{pAeq12h}$ 07-19)	Støykrav kveld (L_{pAeq4h} 19-23) eller søn- /helligdag ($L_{pAeq16h}$ 07-23)	Støykrav natt (L_{pAeq8h} 23-07)
Boliger, fritidsboliger, overnattingsbedrifter, sykehus og pleieinstitusjoner	40	35	30
Arbeidsplass med krav om lavt støynivå	45 i brukstid		

Grenseverdiene i tabell 1 gjelder generelt og skal ikke korrigeres for langvarige arbeider, i motsetning til grenseverdier for utendørs støynivå fra samme type virksomhet. I tillegg er det angitt at dersom støygrensene i tabellen i spesielle tilfeller ikke kan overholdes, gjelder regelen om varsling, jfr. T-1442 kapittel 4.4. Avvik bør bare tillates for kortvarig drift inntil 2 uker, og støygrensene bør ikke heves med mer enn 5 dB.

2.3 Vibrasjoner fra sprengninger

Det beregnes grenseverdier etter NS 8141.

3 STRUKTURLYDNIVÅER

3.1 Grunnlag

3.1.1 Resultater fra målinger

Det er innhentet resultater fra lydmålinger fra strukturstøy ved TBM-driving fra ulike prosjekter i Europa [5, 6]. Målingene er gjennomført i ulike avstander og med ulike grunnforhold.

3.1.2 Teori for lydutbredelse i grunnen

Ut fra modell for strukturlydutbredelse i form av vibrasjoner fra skinnegående trafikk i tunnel presentert av Ungar og Bender [4], kan dissipasjon beregnes med følgende ligning:

$$A_d = 10 \cdot \log e^{-2\pi \cdot f \cdot x \eta / c} \quad \text{Ligning (1)}$$

hvor x er avstand i meter, η er tapsfaktor, c er bølgehastighet for P-bølger (longitudinalbølger), se tabell 2 nedenfor, og f er frekvens.

Tabell 2: Egenskaper for ulike grunnforhold for beregning av dissipasjon.

Type grunn	P-bølgehastighet	Tapsfaktor	Densitet
Berg/fjell	3500 m/s	0,01	2,65 kg/m ³
Sand, silt, grus, løss	600 m/s	0,1	1,6 kg/m ³
Leire, leirholdig jord	1500 m/s	0,1-0,2	1,7 kg/m ³

Geometrisk avstandsdemping beregnes ut fra:

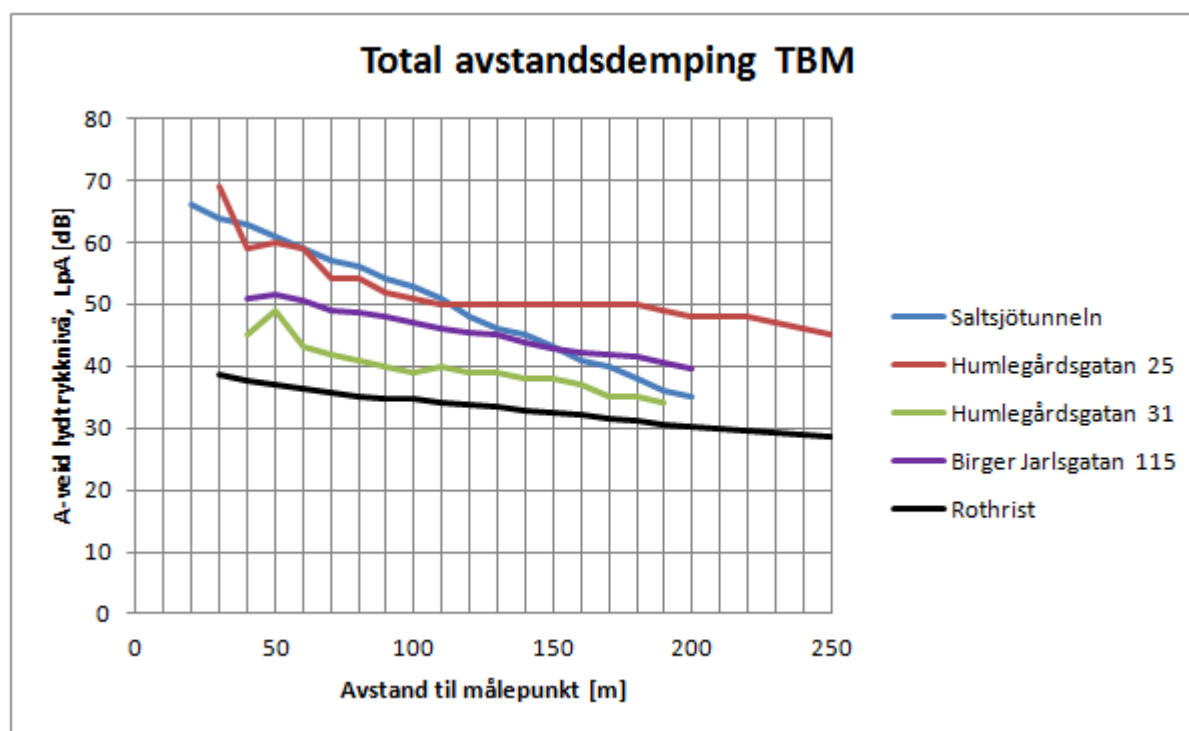
$$A_s = 10 \cdot \log \left(\frac{r_0 + x}{r_0} \right) \quad \text{Ligning (2)}$$

hvor r_0 er tunnelradius, og x er avstand fra tunnelvegg, begge i meter. Utgangspunktet er at skinnegående trafikk også i tunneler betraktes som linjekilde.

3.2 Målte nivåer fra TBM

3.2.1 Total avstandsdemping

Total avstandsdemping inkluderer geometrisk avstandsdemping og dissipasjon. Figur 1 nedenfor gjengir A-veid lydtryknivå fra TBM-driving slik de er oppgitt i svenske [5] (henholdsvis Saltsjötunneln, Humlegårdsgatan 25 og 31, og Birger Jarlsgatan 115), og sveitsiske [6] (Rothrist) måledata.



Figur 1: Målt total avstandsdemping i prosjekter med TBM-driving.

Figur 1 viser ganske stor spredning mellom de ulike målingene. Noe av dette kan skyldes ulike grunnforhold, se tabell 3 nedenfor.

A-veid lydtryknivå ved avstand 35 m i Sydney (se ref [7]) er ca. 41 dB, noe som er 2 dB over verdier referert for Rothrist. I samme referanse er det også oppgitt A-veid lydtryknivå 50-55 dB på avstand 20 m i Dublin. Dette er anslagsvis 10-15 dB over Rothrist.

Generelt kan dette tyde på at lydnivåene som er oppgitt for Rothrist er noe gunstige, både sammenlignet med tilsvarende grunnforhold, og spesielt sammenlignet med grunnforhold som ligner mer på det som er aktuelt for Follobanen (hovedsaklig tonalittisk til granittisk gneis).

Tabell 3: Grunnforhold og diameter på TBM i prosjekter nevnt ovenfor.

Prosjekt	Grunnforhold	TBM-diameter
Saltsjötunneln	Granitt/gneis	3,5 m
Humlegårdsgatan/Birger Jarlsgatan	Granitt/gneis	3,5 m
Sidney	Sandstein	7,2 m
Dublin	Skifer/kalkstein	11,7 m
Rothrist	Kalkstein	-

Lydnivåer i Humlegårdsgatan 25 er vesentlig høyere enn i Humlegårdsgatan 31. Dette forklares i [5] med at førstnevnte er sprengt ned i fjell og har flere etasjer under bakkenivå slik at konstruksjonen er kraftigere koblet til grunnen enn tilfellet er med Humlegårdsgatan 31. Sistnevnte er fundamentert med kjeller på fjell. Det samme gjelder Birger Jarlsgatan 115. Disse to målingene synes derfor å være mest aktuelle som utgangspunkt for vurdering av lydnivå i bolig ved driving av tunnel for Føllobanen.

Samtlige måleserier i figur 1 viser imidlertid at grenseverdier for lydnivå på kveld og natt overskrides ved store avstander mellom kilde og mottaker. I beste fall (data fra Rothrist) kan TBM kjøres på natt når avstand til nærmeste mottaker er større enn ca. 200 m, og på kveldstid når avstand er større enn ca. 100 m. I verste fall kan grenseverdier for lydnivå på dagtid overskrides selv på avstander opp mot 200 m (Birger Jarlsgatan 115).

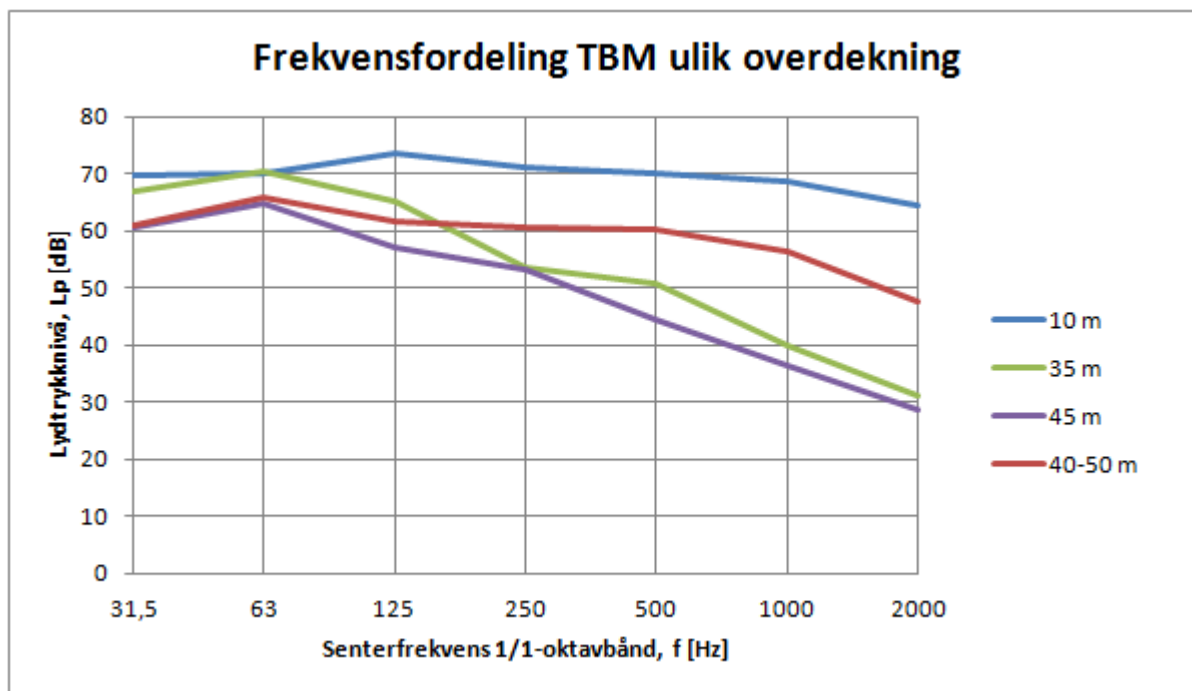
Som et grunnlag for vurdering av lydnivå i ulike avstander er det gjort logaritmisk regresjon av måledataene. De svenske resultatene, bortsett fra Saltsjötunneln, gir en reduksjon i lydnivå på 5-6 dB pr avstandsdobling, mens måledata for Rothrist gir en reduksjon i lydnivå rett i overkant av 3 dB pr avstandsdobling.

Det er valgt logaritmisk regresjon på bakgrunn av formelverk i ref [4], som gjelder lydnivå fra skinnegående trafikk i tunnel.

Måledata fra Saltsjötunneln avviker vesentlig fra de andre kurvene, og har en total avstandsdemping på ca. 1,7 dB pr 10 m økning av avstanden.

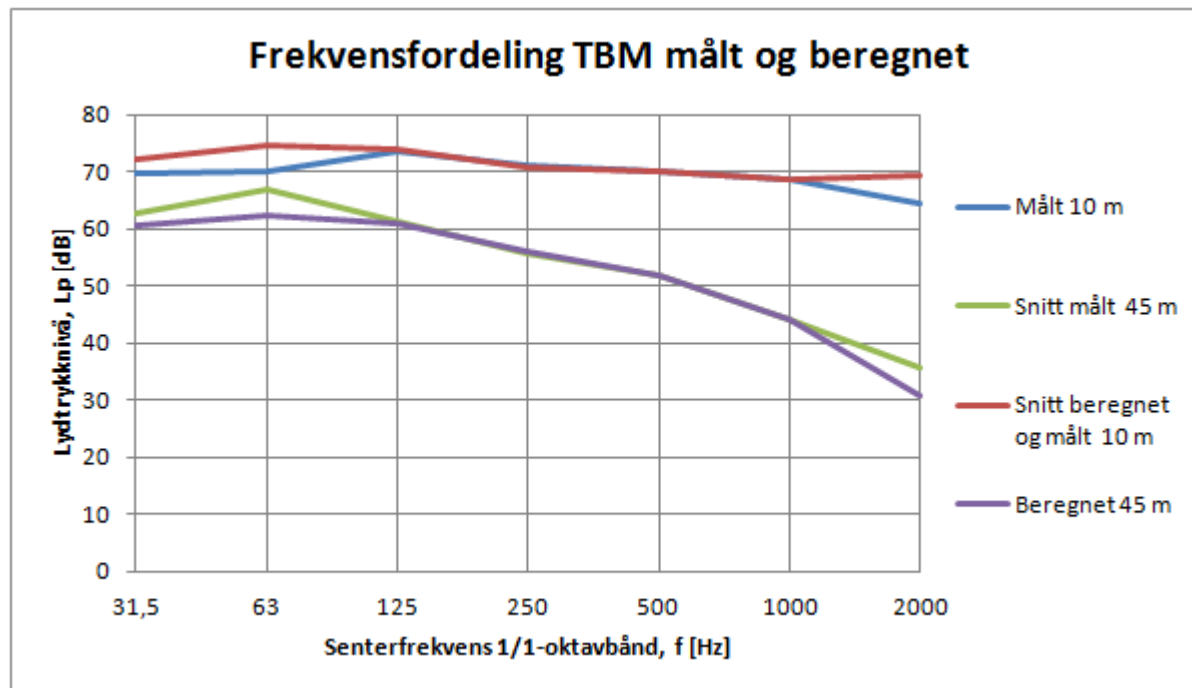
3.2.2 Frekvensfordeling

Figur 2 nedenfor viser typisk frekvensfordeling fra TBM for ulike overdekninger (se ref [5]).



Figur 2: Målt frekvensfordeling for ulike overdekninger ved TBM-driving.

Kurvene i figur 2 er ikke helt konsistente i forhold til avstand, så det er beregnet gjennomsnittlig utgangsverdi for 10 m avstand ved hjelp av avstandsdemping og dissipasjon (se Ligning (1)). Resultatet fra disse omregningene er vist i figur 3, hvor opprinnelig målte verdier på 10 m avstand, gjennomsnittlig målte verdier på 45 m avstand, beregnet gjennomsnitt på 10 m avstand, og beregnet verdi på 45 m avstand, er gjengitt.



Figur 3: Sammenligning av målte verdier mot beregnete verdier for ulike avstander ved TBM-driving.

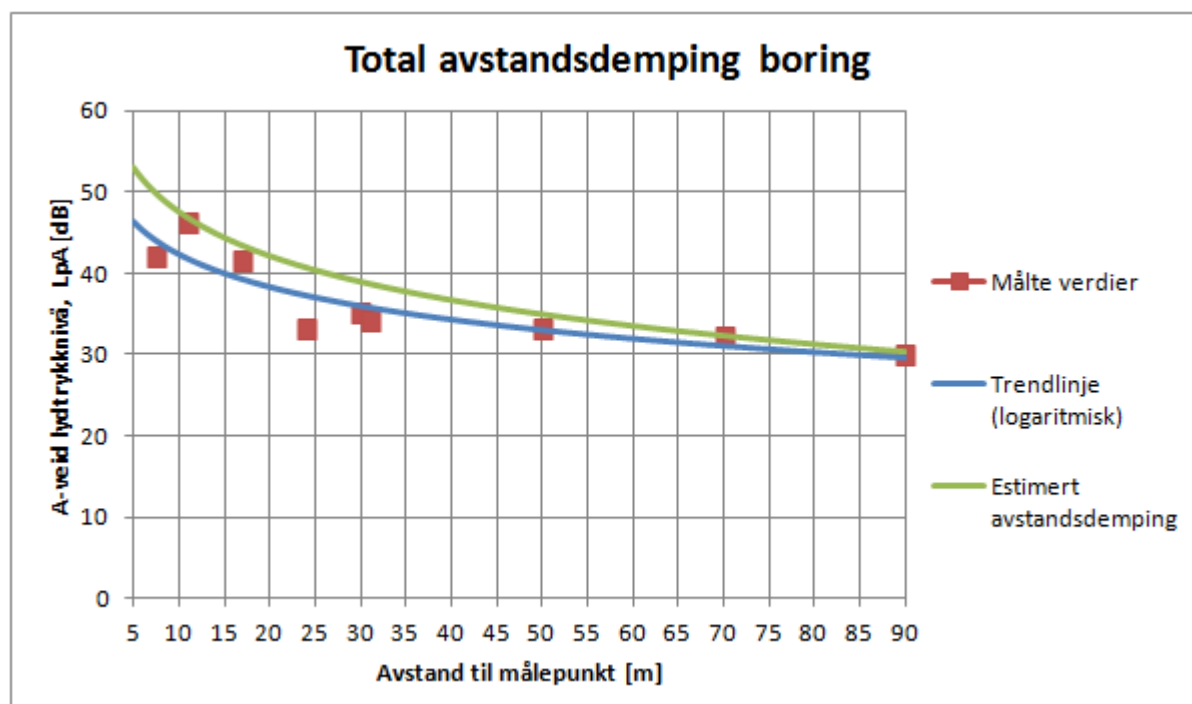
Verdier i figur 3 for ”Snitt beregnet og målt 10 m” er brukt videre i dette notatet for sammenligning med lydtrykknivåer fra boring.

3.3 Målte nivåer fra boring

3.3.1 Total avstandsdemping

Generelt virker det som at lydtryknivåer fra boring ligger ca. 10 dB under lydtryknivåer fra TBM [5]. Dette stemmer overens med vurderinger gjort i Lysaker-Sandvika tunnelprosjektet [7].

Verdier målt i ulike avstander for boring [7] er gjengitt i figur 4. For avstandene 30, 50, 70 og 90 m er det supplert med måledata fra Finland [8]. Figuren viser også logaritmisk trendlinje samt et justert estimat i forhold til at de norske [7] målingene er gjort ved boring i noe mykere fjell (grunnforhold i de finske målingene er antatt å være granitt).



Figur 4: Målt og estimert total avstandsdemping ved boring.

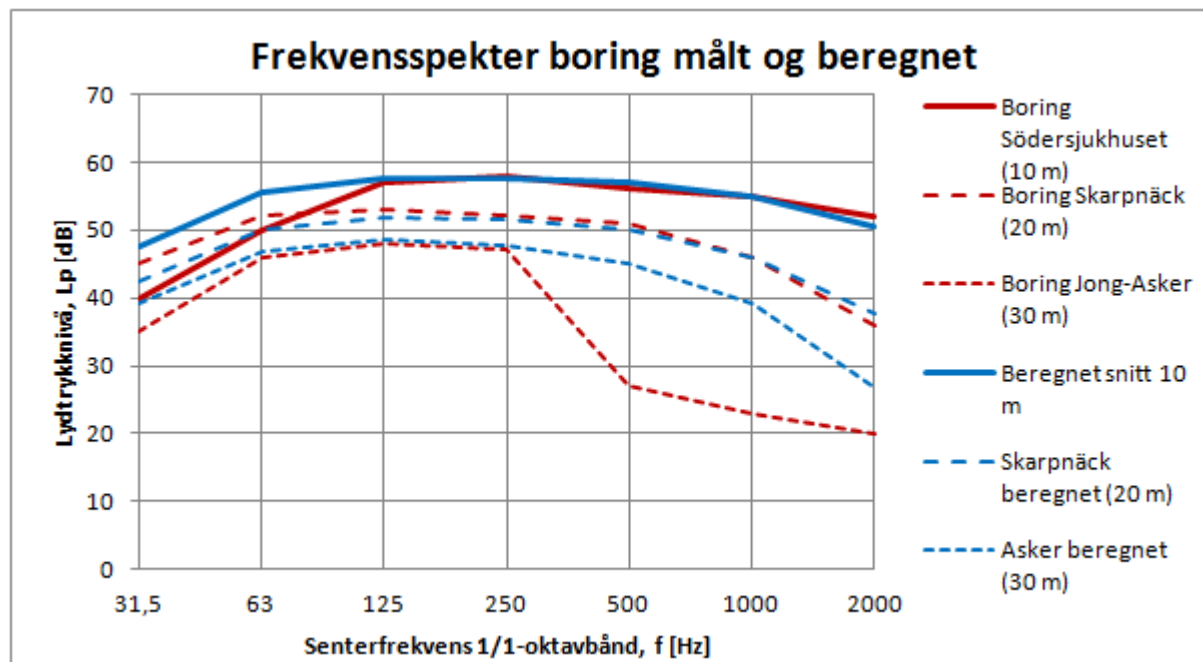
Regresjonsanalyse av dataene gir en total avstandsdemping i samme størrelsesorden som for TBM, det vil si mellom 5 og 6 dB demping pr avstandsdobling.

3.3.2 Frekvensfordeling

Det er målt lydtryknivå i oktavgbånd fra boring både i Norge [7] og i Sverige [5], som vist i figur 5 nedenfor.

Beregning av gjennomsnittlige verdier på 10 m avstand er utført på samme måte som for TBM, det vil si ut fra målte verdier på 10 m avstand og målte verdier ved større avstander regnet tilbake til 10 m avstand med avstandsdemping og dissipasjon. Verdier for "Boring Jong-Asker (30 m)" fra og med 500 Hz er ikke brukt i beregning av snitt. Årsaken til at disse verdiene avviker fra andre målte frekvensspekter kan skyldes oppsprekking/lagdeling av fjellet.

Verdier i de to laveste oktavbåndene er justert noe opp for bedre overensstemmelse mellom målte og beregnede verdier.



Figur 5: Målte og beregnete verdier for boring ved ulike avstander.

Sammenligning av figur 5 og figur 3 viser at TBM har noe mer energi i de to laveste oktavbåndene. Figurene viser også at TBM ligger minimum 14-15 dB høyere enn boring i samtlige oktavbånd.

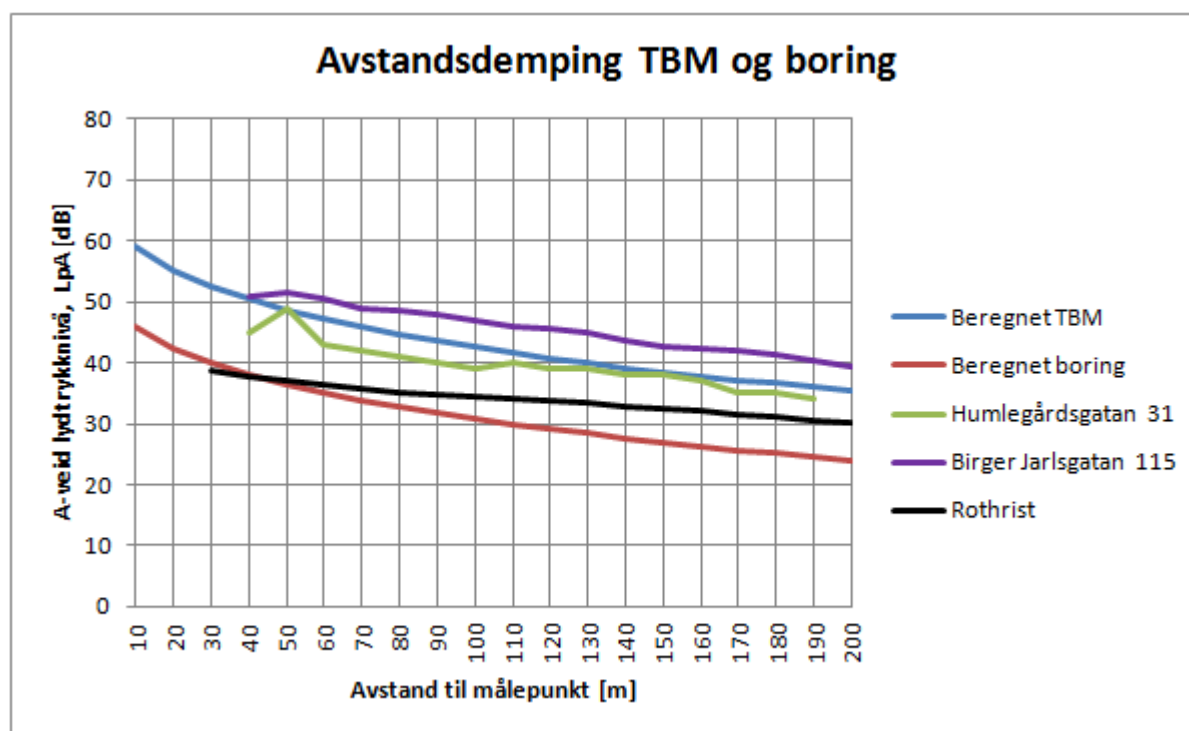
3.4 Sammenstilling avstandsdemping TBM og boring

Ved å ta utgangspunkt i frekvensspekter ved 10 m avstand for TBM og boring er det beregnet lydtrykknivå for hvert enkelt 1/1-oktavnå for avstander 10-200 m. Disse er videre regnet om til samlet A-veid lydtrykknivå for de ulike avstandene ved hjelp av ligning (1) med parametre for berg/fjell, og geometrisk avstandsdemping som tilsvarer 3 dB pr avstandsdobling. Inkludert dissipasjon etter Ligning (1) gir dette en total avstandsdemping med omtrent samme verdier som regresjonsanalysen i kapittel 3.2.1 og 3.3.1.

Beregning av lydtrykknivå fra boring gir godt samsvar med estimert total avstandsdemping basert på målte verdier (se figur 4 og figur 6) med denne framgangsmåten.

Målingene i Sverige [5] viser ca. 10 dB forskjell i A-veid lydtrykknivå mellom TBM og sonderingsboring etter passering av målepunktet. Før passering av målepunkt ligger A-veid lydtrykknivå fra boring lavere enn 10 dB. Beregning av A-veid lydtrykknivå ved 10 m avstand fra spekterverdiene gir en forskjell mellom TBM og boring på ca. 15 dB.

Figur 6 nedenfor viser kurver hvor utgangs nivå ved 10 m avstand for TBM ligger 13 dB høyere enn for boring, og vurderes å gi representative verdier for A-veid lydtrykknivå fra TBM i harde bergarter som granitt og gneis.



Figur 6: Beregnet lydtrykknivå fra boring og TBM, samt målte lydtrykknivåer fra TBM, for ulike avstander.

4 OPPSUMMERING

Ved å ta utgangspunkt i målte A-veide lydtryknivåer ved ulike avstander, samt målt frekvensfordeling ved korte avstander, er det etablert estimater på resulterende A-veide lydtryknivåer fra boring og TBM.

Målinger og beregninger viser at A-veid lydtryknivå fra TBM ligger opp mot 15 dB høyere enn tilsvarende fra boring ved kontinuerlig drift.

På grunn av stort sprik i lydtryknivåer målt i de ulike prosjektene som ligger til grunn for vurderingene i dette notatet anbefales det at det utarbeides et måleprogram for prosjektet, slik at estimatene kan verifiseres eller eventuelt modifiseres.

I forhold til gjeldende krav til innendørs lydnivå fra bygge- og anleggsvirksomhet vil det være behov for restriksjoner på aktiviteter med TBM og konvensjonell driving.

TBM gir høyest lydnivå, og kontinuerlig aktivitet kan ikke forekomme på natt der overdekningen/avstand til bebyggelse er 200 m eller mindre.

Boring gir for høye lydnivåer til at aktivitet kan forekomme på natt der overdekning/avstand til bebyggelse er 90 m eller mindre dersom dette er en kontinuerlig aktivitet.

5 ENGLISH VERSION

This memo sets relevant limit values for noise in buildings from tunnel excavation related to the construction of Follobanen. It includes an assessment of whether blasting should be regarded as part of the excavation noise or not. Measurement data from other tunnel projects are used for comparison of sound levels from TBM and drilling. Relationships between A-weighted sound pressure levels and distance between source and receiver are established as a basis for assessing noise immission for the two excavation methods.

Because of the large differences in reported sound pressure levels in the various projects it is recommended to prepare a monitoring program for this project to verify, and if necessary modify, the established relationships between noise levels and distance.

HOLD

This memo will be revised due to new data from TBM excavation.

6 NOISE REQUIREMENTS

6.1 Initial considerations

TBM and drilling both involves continuous excitation. Blasting can either be excluded and evaluated according to NS 8141 [1], i.e. assessment to avoid damage on buildings, or blasting can be included as a part of the overall noise immission together with the more continuous types of excitation.

In the guidelines for T-1442 [2] from The Climate and Pollution Agency (KLIF) in Norway, TA-2115 [3], blasting is mentioned under regulations regarding noise from construction works. Blasting is a "high-energy impulsive sound" noise source. For impulsive noise the requirements are 5 dB stricter according to T-1442, section 4.2.4: "The stricter requirements should apply to situations where typical activities are characterized by impulsive noise or noise with pure tones". However, T-1442 does not refer criteria for assessing impulsive noise or pure tones.

It is further stated in T-1442 that the 5 dB stricter requirements for impulsive noise from noise sources as for example industry, ports and terminals is applied when the activities generates impulsive noise more than 10 times per hour on average.

Drilling is characterized by periods with continuous noise. Blasting will occur quite less than 10 times per hour, so the stricter requirements should not apply for this activity.

Multiconsult is of the opinion that blasting is essentially different from TBM and drilling, both in terms of frequency and type of excitation, and that noise from blasting therefore is not to be included in the assessment of noise from tunnel excavation.

Blasting can be annoying, particularly because of the rare and sudden occurrences, and can result in anxiety or fear in affected residents. It is therefore important to establish a procedure

to notify the public about time schedules for blasting activities. Common practice is to allow blasting in the day and evening, i.e. between 07:00 and 23:00.

6.2 Noise from construction works

Current requirements regarding construction noise is given in T-1442, section 4.2.2, as summarized in table 1 below.

Table 1: Recommendations on indoor noise limits from construction works. All limits are given as time and space equivalent sound pressure levels in dB.

Building type	Noise daytime ($L_{pAeq12h}$ 07-19)	Noise evening (L_{pAeq4h} 19-23) or sundays/public holidays ($L_{pAeq16h}$ 07-23)	Noise nighttime (L_{pAeq8h} 23-07)
Dwellings, holiday houses, night stops, hospitals and nursing homes	40	35	30
Workplaces that require low noise levels.	45 during working hours		

Noise limits in table 1 are general and shall not be adjusted for long-term work, as opposed to the limits for outdoor noise levels from construction works. In special cases, if the noise limits in table 1 cannot be met, the rule of notification is applied, cf. T-1442, section 4.4. Deviations should only be allowed for short term operation up to two weeks, and noise limits should not be raised by more than 5 dB.

6.3 Vibrations from blasting

Limit values are to be calculated according to NS 8141.

7 STRUCTURE BORNE NOISE

7.1 Basis

7.1.1 Results from measurements

Sound pressure levels from TBM excavation in projects in Europe [5, 6] are obtained for evaluation of in situ situations. The measurements were carried out with different distances between source and receiver, and with different soil conditions.

7.1.2 Theory on sound propagation in the ground

Ungar and Bender [4] has presented a model for structure borne sound propagation based on vibrations generated by subway trains, where dissipation can be calculated by the following equation:

$$A_d = 10 \cdot \log e^{-2\pi \cdot f \cdot x \cdot \eta / c} \quad \text{Equation (1)}$$

where x is distance in meters, η is loss factor, c is wave velocity for P-waves (longitudinal waves), see table 2 below, and f is frequency.

Table 2: Properties of different soil types for calculating dissipation.

Soil class	P-wave velocityt	Loss factor	Density
Rock	3500 m/s	0.01	2.65 kg/m ³
Sand, silt, gravel, loess	600 m/s	0.1	1.6 kg/m ³
Clay, leirholdig jord	1500 m/s	0.1-0.2	1.7 kg/m ³

Geometrical attenuation is calculated by:

$$A_s = 10 \cdot \log \left(\frac{r_0 + x}{r_0} \right) \quad \text{Equation (2)}$$

where r_0 is tunnel radius, and x is the distance from the outer wall surface, both in meters. The basis for Equation (2) is a line-shaped source.

7.2 Measured sound levels from TBM

7.2.1 Total attenuation

Total attenuation is comprised of geometrical attenuation and dissipation. Figure 1 below shows the A-weighted sound pressure levels from TBM excavation as they are reported in Swedish [5] (Saltsjö tunneln, Humlegårdsgatan 25 og 31, og Birger Jarlsgatan 115 respectively), and Swiss [6] (Rothrist) measurements.

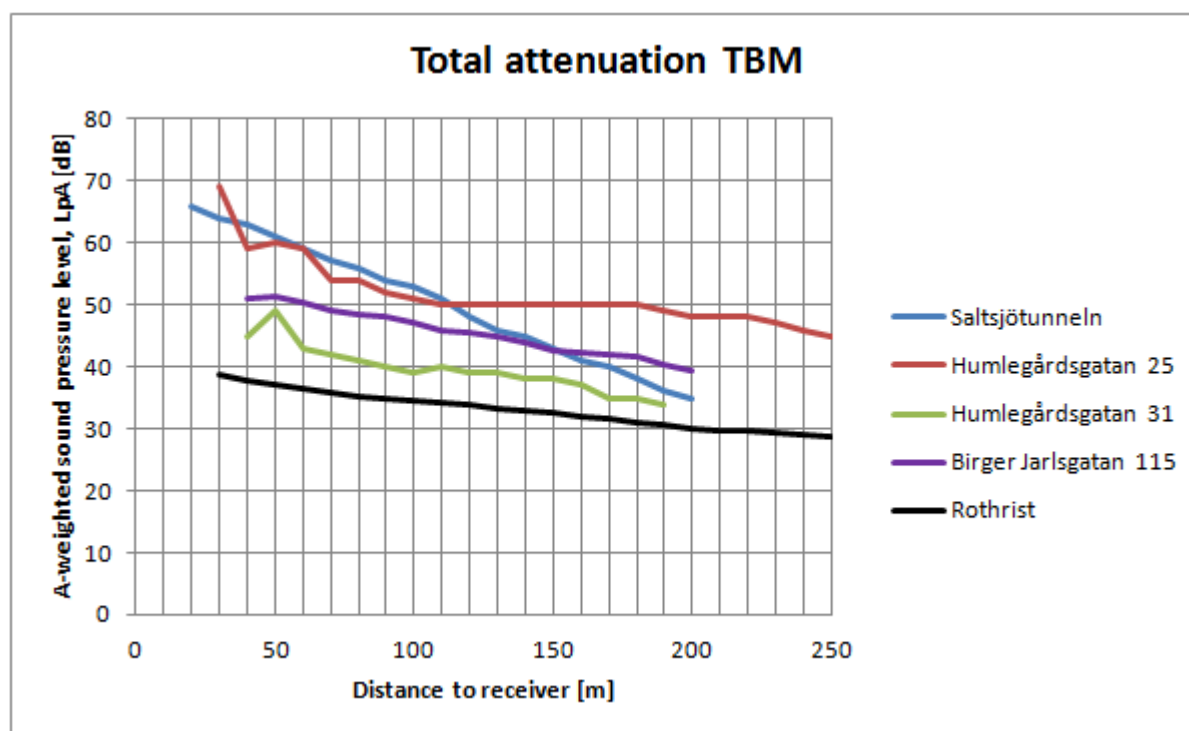


Figure 1: Measured total attenuation in projects with TBM excavation.

As shown in Figure 1, the spread in sound pressure levels is quite large. A partial explanation can be the different types of soil, see Table 3 below.

A-weighted sound pressure level on 35 m distance in Sydney [7] is approximately 41 dB, which is 2 dB higher than values reported in Rothrist. A-weighted sound pressure level on 20 m distance in Dublin [7] is 50-55 dB, which is 10-15 dB higher than results from Rothrist.

This could imply that the values in the Rothrist project are somewhat optimistic compared to results from projects with analogous soil types, and especially compared to soil types that are similar to what is expected in the tunnel for Follobanen (mainly tonalitic to granitic gneiss).

Table 3: Soil types and TBM diameter.

Project	Soil type	TBM diameter
Saltsjö tunneln	Granite/gneiss	3.5 m
Humlegårdsgatan/Birger Jarlsgatan	Granite/gneiss	3.5 m
Sidney	Sandstone	7.2 m
Dublin	Shale/limestone	11.7 m
Rothrist	Limestone	-

Sound pressure levels in Humlegårdsgatan 25 are significantly higher than in Humlegårdsgatan 31. This is explained in [5] by the fact that the former has several underground floors firmly connected to the surrounding rock. The latter is founded with the basement on rock, which also is the case for Birger Jarlsgatan 115, thus the results from these two measurements seems to be the most appropriate as a basis for assessing the sound pressure levels in dwellings during TBM excavation for Follobanen.

Each of the measurement series in Figure 1 show that the limit values for sound pressure levels in evening and night time are exceeded even by large distances between source and receiver. At best (data from Rothrist) TBM can be run during the night when the distance to the nearest receiver is larger than approximately 200 m, and during the evening when the distance is larger than approximately 100 m. At worst the limit values for sound pressure levels in the daytime are exceeded even at distances up to 200 m (Birger Jarlsgatan 115).

As a basis for assessing sound pressure levels at different distances the measurement data is analyzed by logarithmic regression. Logarithmic regression is chosen based on the formulas in [4], which applies to rail traffic in tunnels. The Swedish results, except Saltsjö tunneln, yields 5-6 dB attenuation per distance doubling, while results from Rothrist yields 3 dB attenuation per distance doubling.

Measurement results from Saltsjö tunneln deviates significantly from the other results, with a total attenuation of approximately 1.7 dB per 10 m increase in distance.

7.2.2 Frequency distribution

Figure 2 below shows typical frequency distribution from TBM excavation for different overburdens (see ref [5]).

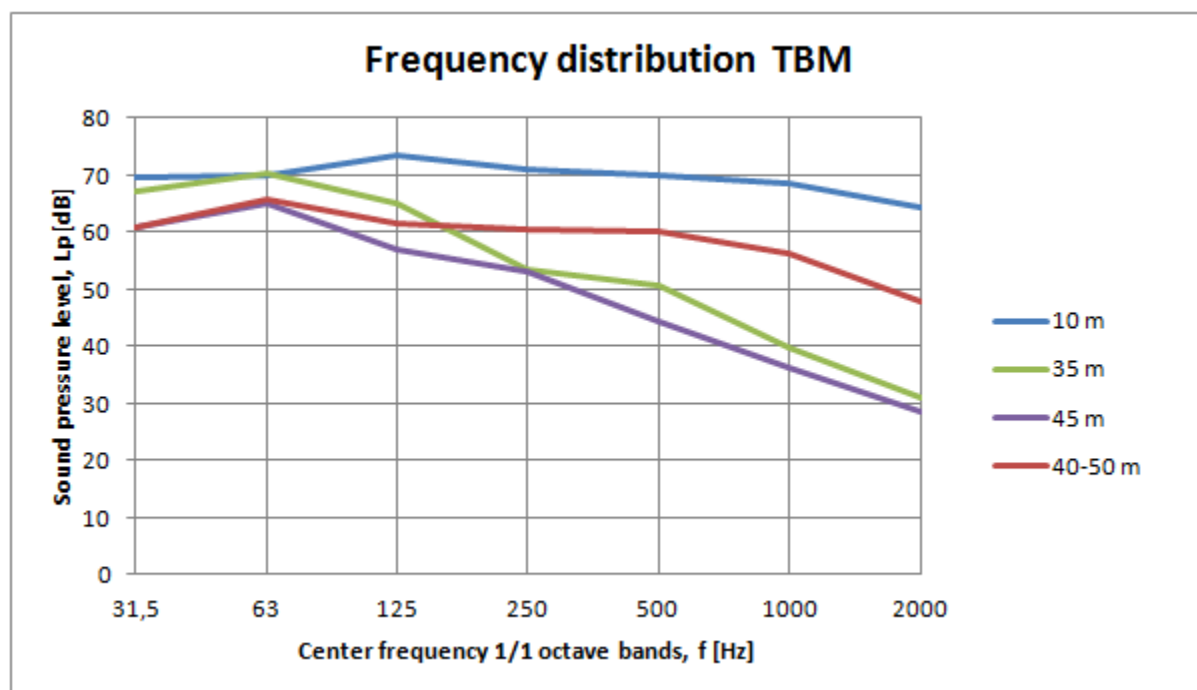


Figure 2: Measured frequency distribution from TBM excavation for different overburdens.

The graphs in Figure 2 are not consistent related to distance, so average basis values at 10 m distance for every octave band has been calculated by geometrical attenuation and dissipation (Equation 1). The results from these calculations are shown in Figure 3: The original measurement results at 10 m distance, averaged measured results at 45 m distance, calculated average at 10 m distance and calculated values at 45 m distance.

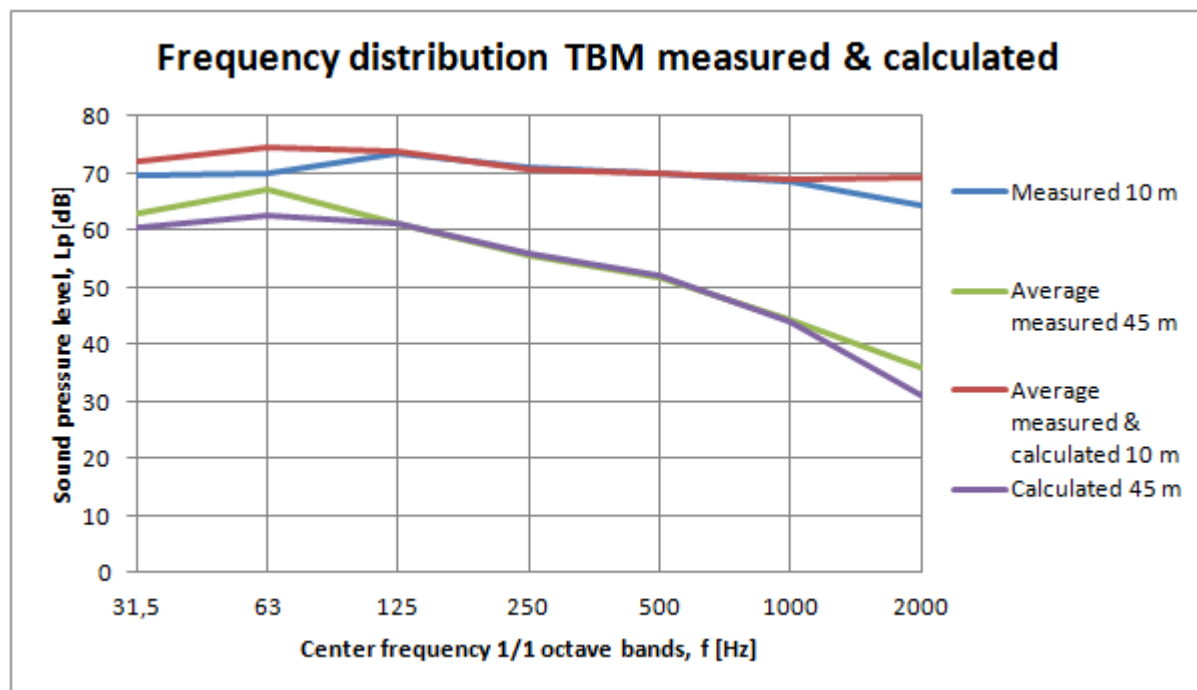


Figure 3: Comparison of measured and calculated values from TBM excavation for two different distances.

Values in Figure 3 for "Average measured & calculated 10 m" are used further in this memo for comparing TBM and drilling.

7.3 Measured sound levels from drilling

7.3.1 Total attenuation

It seems that sound pressure levels from drilling are approximately 10 dB lower than TBM [5] at similar distances. This corresponds well with the evaluations in the Lysaker-Sanvika tunnel project [7].

Measurements of sound pressure levels from drilling at different distances [7] are shown in Figure 4. Values at distances 30, 50, 70 og 90 m are supplemented by results from Finland [8]. A logarithmic trend line is also included, as well as an adjusted estimate as the Norwegian measurements are done in less dense rock (the ground conditions in the Finnish measurements are assumed to be granite).

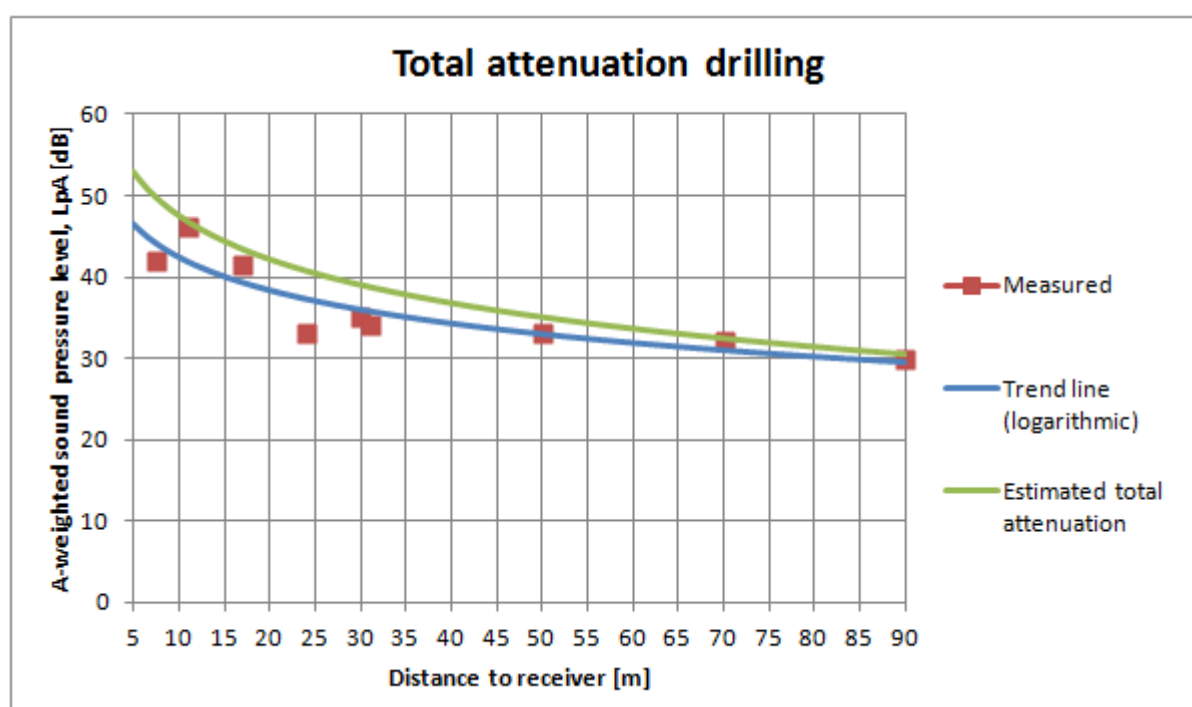


Figure 4: Measured and estimated total attenuation for drilling.

Regression analysis of the data yields a total attenuation of the same magnitude as TBM excavation, i.e. between 5 and 6 dB per distance doubling.

7.3.2 Frequency distribution

Measured sound pressure levels in octave bands from drilling in Norway [7] and in Sweden [5] are shown in Figure 5 below.

Calculated average values at 10 m distance is done in the same way as for TBM, i.e. based on measured values at 10 m distance and measured values at larger distances which are calculated back to 10 m values by geometrical attenuation and dissipation. Values for “Drilling Jong-Asker (30 m)” from 500 Hz are not used in the calculated average. These

values probably differ from the other frequency distributions due to cracks and/or stratification.

Values in the two lower octave bands are adjusted for better agreement between measured and calculated values.

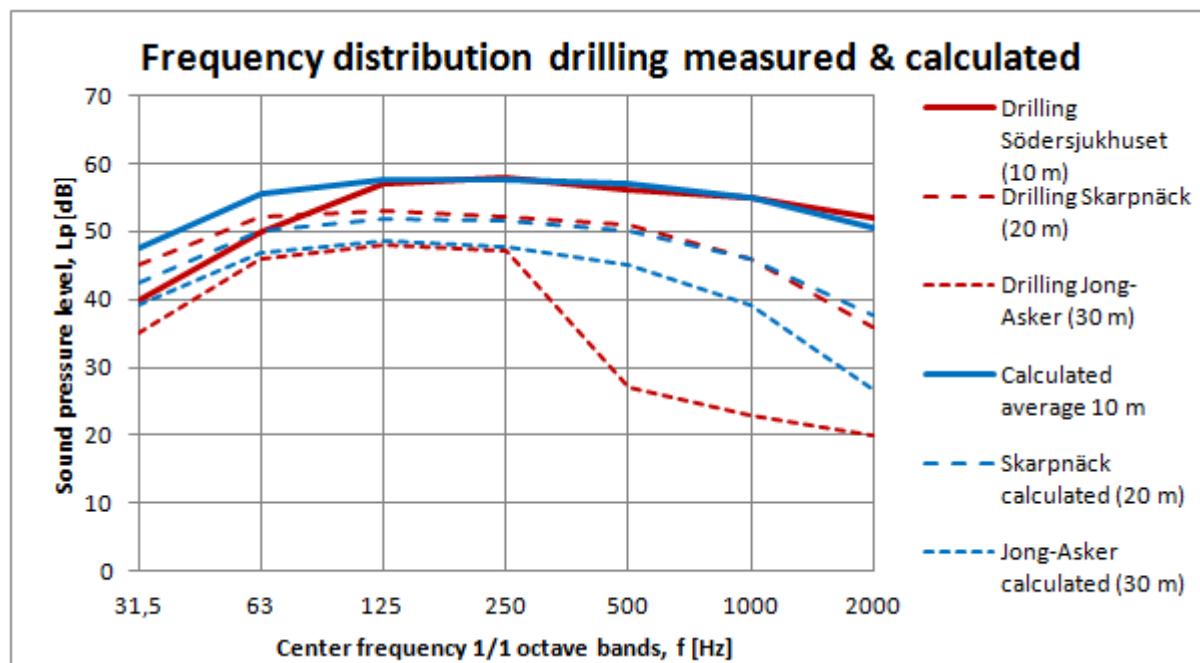


Figure 5: Measured and calculated values from drilling at different distances.

Comparing Figure 5 and Figure 3 shows that TBM excavation has more energy in the two lowest frequency bands. The figures also show that sound pressure level from TBM excavation is about 14-15 dB higher than sound pressure level from drilling in all octave bands.

7.4 Comparison of attenuation

From the frequency distribution at 10 m distance for TBM and drilling the sound pressure level for each octave band at distances 10-200 m is calculated. The results are A-weighted and summed up for different distances. Dissipation is calculated according to Equation (1) with parameters for rock as given in Table 2. The geometrical attenuation is set to 3 dB per distance doubling. The total attenuation including geometrical attenuation and dissipation gives approximately the same values as in sections 7.2.1 and 7.3.1.

Calculation of the sound pressure level from drilling with this method corresponds well with the estimated total attenuation based on measured values (see Figure 4 and Figure 6).

Measurements from Sweden [5] show about 10 dB difference in A-weighted sound pressure levels between TBM and drilling when the receiver point is passed. Before passing the receiver point the difference is larger. A-weighted sound pressure levels at 10 m distance calculated from the frequency distribution yields approximately a 15 dB difference between TBM excavation and drilling.

Figure 6 below shows calculated results based on sound pressure levels at 10 m distance with 13 dB difference between TBM and drilling, which is considered to provide representative values for A-weighted sound pressure levels from TBM excavation in hard rock such as granite and gneiss.

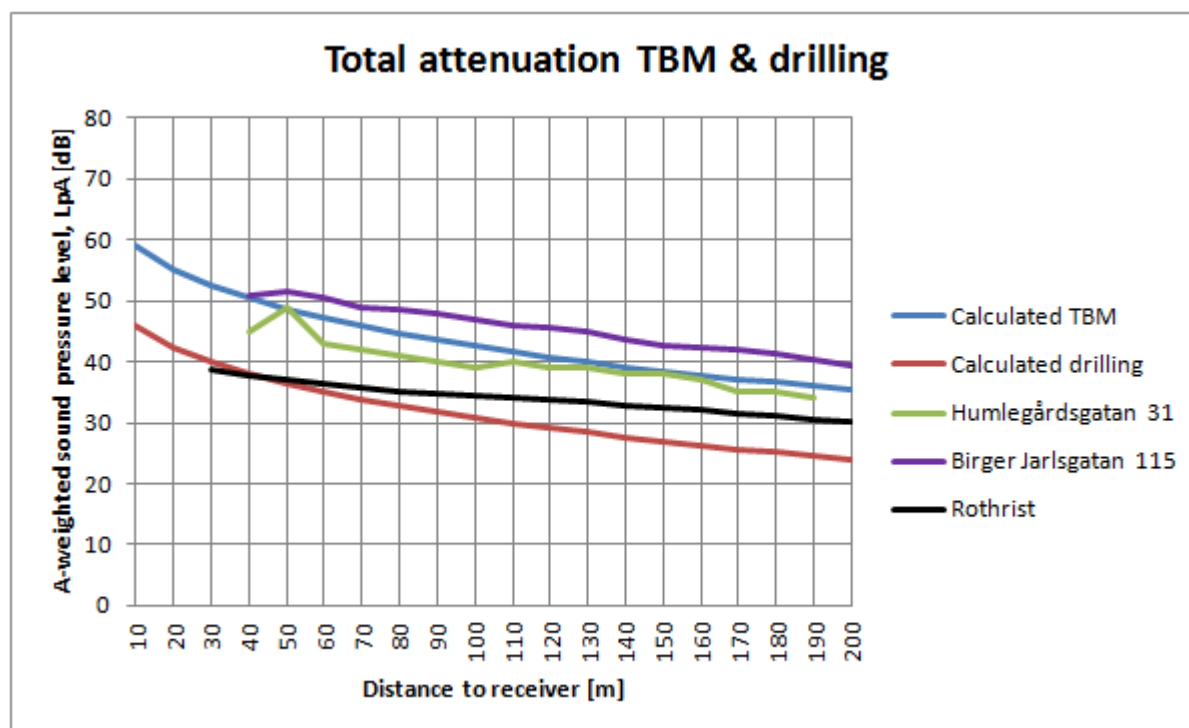


Figure 6: Calculated A-weighted sound pressure levels from drilling and TBM excavation, and measured sound pressure levels from TBM excavation, at different distances.

8 SUMMARY

Based on the measured A-weighted sound pressure levels at various distances, and the measured frequency distribution at short distances, estimates on resulting A-weighted sound pressure levels from drilling and TBM excavation is established.

Measurements and calculations show that the A-weighted sound pressure level from TBM excavation is up to 15 dB higher than from drilling.

Because of the large sound pressure level differences in the measurements that form the basis for the estimates in this report, it is recommended that a monitoring program for the project is developed to verify, and possibly modify, the estimates.

According to the estimates it seems be necessary to restrict the activity, both for TBM excavation and drilling, to satisfy requirements for indoor sound levels from construction works.

TBM excavation generates the highest sound pressure levels, and continuous activity should not be allowed where the overburden/distance to buildings is 200 m or less.

Drilling generates too high sound pressure levels for continuous night time activity where the overburden/distance to buildings is 90 m or less.

9 REFERANSER

- [1] Standard Norge, NS 8141 ”Vibrasjoner og støt - Måling av svingehastighet og beregning av veiledende grenseverdier for å unngå skade på byggverk”, 2. utg. 2001-06-25.
- [2] Miljøverndepartementet, T-1442 ”Retningslinje for behandling av støy i arealplanlegging”, 26.01.2011.
- [3] TA-2115 ”Veileder til Miljøverndepartementets retningslinje for behandling av støy i arealplanlegging”, KLIF, 2005.
- [4] Ungar, E.E. og Bender, E.K. (1975). Vibrations produced in building by passage of subway trains; parameter estimation for preliminary design. In: Proceeding of the 4th International Conferences on Noise Control Engineering (INTER-NOISE 75), Sendai, Japan, August 27-29 1975. 85-92.
- [5] Rapport ”Jämförelse av strukturbundet buller från olika tunnelbörningsmetoder”, i SBUF projekt 9035, fra Nitro Consult - Skanska, datert 18.11.1992.
- [6] Dokument UFB-30-A-32606, rev 00A ”Emissions from tunnel excavation - drill and blast, TBM and mechanical excavations” i prosjekt Nytt dobbeltspor Oslo-Ski, Tunnel section, datert 20.05.2011.
- [7] Notat ”Tunnel Lysaker-Sandvika. Strukturstøy fra TBM og konvensjonell tunnel drift” fra Brekke & Strand Akustikk, datert 03.04.2006.
- [8] Resultater fra to målepunkter ved boring i tunnel i Helsinki, WSP Finland, 22.10.2010 til 05.11.2010.