

## Målinger av lydtrykket nær M109, 155 mm felthaubits

Morten Huseby, Knut Ove Hauge<sup>1</sup>, Erling Andreassen<sup>1</sup>, Nils Ivar Nilsen<sup>1</sup>

Forsvarets forskningsinstitutt

13. juni 2007

---

<sup>1</sup>Forsvarsbygg, avdeling Rådgivning

FFI-rapport 2007/01450

1034

ISBN 978-82-464-1190-3

## **Emneord**

skytefelt

støy

haubits

måling

trykk

## **Godkjent av**

Jan Ivar Botnan

Avdelingssjef

## Sammendrag

Denne rapporten er del av et pågående arbeid for å forbedre Forsvarsbygg sin evne til å evaluere støynivået rundt skytefelt. Her dokumenterer vi målinger som ble gjort nær Hjerkin 21. september 2006. Der ble det målt tidsserier for trykket nær 155 mm felthaubits, M109. Målinger ble gjort på 20 m, 250 m og 7 km. Denne rapporten er en i en serie med hensikt å skaffe data for forskjellige typer våpen under forskjellige forhold. Ved FFI utvikler vi for tiden metoder for å beregne lydtrykket nær munningen på et våpen. Målingene som er dokumentert her vil senere kunne benyttes til å teste gyldigheten av beregningsmetodene mot målte verdier. De analyserte dataene kan også benyttes som utgangspunkt for å beregne emissjonsdata til bruk i Forsvarsbygg sitt støyanalyseprogram MILSTØY II.

## English summary

This report is part of an ongoing effort to improve the ability of the Norwegian Defence Estates Agency to assess noise pollution from firing ranges. Here we provide documentation of measurements done near Hjerkins 21. September 2006, to capture time series of the pressure near 155 mm field howitzer, M109. Measurements were done at 20 m, 250 m and 7 km. This report is one in a series, to provide data for different types of weapons under different conditions. At the FFI we are currently developing methods to theoretically predict the sound pressure near the muzzle of a weapon. The measurements reported here can later be used to check the validity of the theoretical methods against measured values. The analyzed results of the measurements reported here can also be used as a starting point to calculate emission data for MILSTØY II, the noise analysis program used by Norwegian Defence Estates Agency

# INNHold

<b>1</b>	<b>Bakgrunn</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Innledning</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Våpen og ammunisjon</b>	<b>9</b>
3.1	M109	9
3.2	Ammunisjon	9
3.3	Kalibrering med TNT	10
3.4	Trykk i løpet	10
<b>4</b>	<b>Måleoppsett</b>	<b>13</b>
4.1	Standplass	13
4.2	Sensorplassering	13
4.3	Vær	14
<b>5</b>	<b>Datainnsamling</b>	<b>14</b>
5.1	Sensorer	14
5.1.1	PCB sensor på 20 m	16
5.1.2	Brüel & Kjær mikrofoner på 130–375 m	16
5.2	Forsterkere	17
5.3	Strømforsyning til kondisjoneringsforsterkerne	18
5.4	Kabler	18
5.5	AD-konvertering	20
5.6	Postprosessering av data	20
<b>6</b>	<b>Måleresultater</b>	<b>21</b>
6.1	1/3-oktav SEL-spekter	21
<b>7</b>	<b>Oppsummering</b>	<b>21</b>
<b>A</b>	<b>Tidsserier trykk fra M109, 250 m fra munningen, 7 retninger</b>	<b>23</b>

<b>B</b>	<b>Tidsserier trykk fra M109, tre avstander fra munningen, 50 graders vinkel</b>	<b>24</b>
<b>C</b>	<b>Tidsserier trykk fra M109, 20 m fra munningen, tre retninger</b>	<b>25</b>
<b>D</b>	<b>1/3-oktav SEL-spekter, M109, 250 m fra munningen</b>	<b>26</b>
<b>E</b>	<b>Variasjon fra skudd til skudd</b>	<b>31</b>
<b>F</b>	<b>TNT</b>	<b>32</b>
<b>G</b>	<b>Bilder av detaljer på M109</b>	<b>33</b>
<b>H</b>	<b>Bilder av terreng og sensorplasseringer</b>	<b>36</b>

# 1 Bakgrunn

Denne rapporten er en del av et pågående arbeid ved Forsvarets forskningsinstitutt (FFI) for å forbedre Forsvarsbygg (FB) sin evne til å estimere støynivået rundt Forsvarets skytefelt [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Dette er viktig for å kunne holde et så begrenset som mulig støynivå hos naboene i nærheten av skytefelt. Det er også viktig i forhold til å maksimere Forsvarets muligheter for trening innenfor de rammer for støy som er gitt i konsesjonene for skytefeltene. FFI sitt arbeid er en del av et samarbeidsprosjekt med FB som oppdragsgiver, der prosjektgruppen består av FFI, SINTEF IKT og NGI (Norges Geotekniske Institutt).

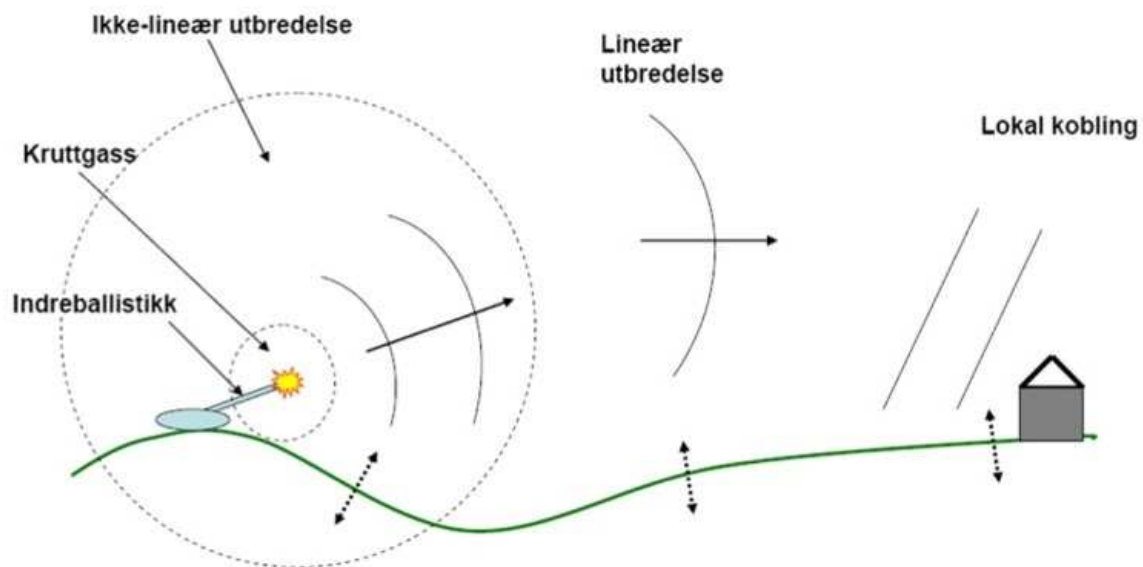
For å estimere støynivået benytter FB seg av programmet MILSTØY II. Som inngangsdata benytter MILSTØY II en kildedatabase for lydtrykket forholdsvis nær det valgte våpenet, omtrent 250 m for artilleri. Det er ønskelig å utvide og forbedre denne databasen. Denne rapporten beskriver målinger som ble gjort på Hjerkin 21. september 2006. Formålet med målingene var i første rekke å fremskaffe gode målinger av lydnivået nær Forsvarets felthaubits, M109, på en slik måte at målingene senere kan benyttes, direkte eller indirekte, som grunnlag for å utvide MILSTØY II sin database av våpen.

Som en del av arbeidet med kildedata har FFI satt i gang forskning på å benytte beregningsprogrammer [3, 7] til å generere kildedata til MILSTØY II. Trykkforløpet skal beregnes fra inne i løpet og ut til starten av det lineære området der MILSTØY II tar sine inngangsdata (Figur 1.1). Her benyttes først IBHVG2 (Interior Ballistics of High Velocity Guns) [8] til å beregne trykk- og hastighetsfeltet inne i løpet før prosjektilet kommer ut av munningen. Deretter benyttes fluidkoden Autodyn [9] til å beregne trykkfeltet videre utover til lydbølgen forplanter seg bort fra den ekspanderende kruttgassen, innenfor 20 m fra munningen for en haubits. Det arbeides videre på FFI med å regne seg gjennom den ikke-lineære sonen frem til starten av den lineære sonen.

For å verifisere resultatene etter beregningene med IBHVG og Autodyn arbeides det parallelt med å fremskaffe egnede måledata nær våpenet. Resultatene i denne rapporten vil senere, sammen med andre målinger (f.eks. [1, 2, 4]), kunne benyttes til å verifisere beregningene som er gjort ved FFI. For lette våpen er et eksempel på en slik sammenligning er gitt i [3].

I denne rapporten dokumenterer vi målinger både i starten og slutten av den ikke-lineære sonen (Figur 1.1). Hensikten med målingene er todelt:

1. Det ble gjort målinger 250 m fra munningen på våpenet. Dette kan gå inn i MILSTØY II sin kildedatabase, etter en bearbeiding av måledata.
2. Målingene som er gjort kan benyttes til å verifisere det pågående modelleringsarbeidet ved FFI. I tillegg til målingene på 250 m er det utført målinger på 20 m. Vi har da data som kan benyttes til å verifisere beregningene som er utført i denne sonen.



Figur 1.1: Oversiktsbilde over de forskjellige sonene for lydpropagasjon rundt et våpen.

## 2 Innledning

Hovedhensikten med denne rapporten er å dokumentere målingene som ble gjort på en slik måte at de senere er et godt utgangspunkt for videre analyse. Målingene ble gjennomført som et samarbeide mellom FFI og avdeling Rådgivning ved Forsvarsbygg (Nilsen og Andreassen fra Miljø og Hauge fra FoU). Rapporten er skrevet av FFI. Det var Forsvarsbygg som var oppdragseier, og som bar kostnadene ved utstyr som ble kjøpt inn. I forbindelse med målingene kjøpte blant annet Forsvarsbygg inn mikrofoner, kondisjoneringsforsterkere og loggeutstyr for rundt 400 000 kr.

Det er sjelden praktisk mulig å være tilstede på skyting med 155 mm haubits i Norge. Denne gang var anledningen en ekstraordinær testskyting av cargoammunisjon som ble foretatt for å sjekke om disse gir et akseptabelt lavt antall blindgjengere. Det ble skutt fra standplass på Turrhaugen litt nord for Dombås og opp på skytefeltet på Hjerkin. Dette krevde et ganske omfattende apparat, med omkring 50 mann fra Forsvaret i aktivitet. Vi fikk lov til å være til stede og måle, forutsatt at vi ikke gikk i veien for skytingen. Dette satte visse føringer på utstyret som ble benyttet, da dette måtte settes ut og startes på morgenen, og stå uten tilsyn hele dagen. Testskytingen ble ledet av orlogskaptein Jens-Tore Moen Alfei, som er sjef ved FLO T&V (test og verifikasjon). Han var også vår kontakt i forbindelse med koordinering mot Forsvarets øvrige personell.

I Kapittel 3 beskrives våpnene som benyttes i målingene. Måleoppsettet beskrives i Kapittel 4. Sensorer og datainnsamlingssystem omtales i Kapittel 5. En kortfattet oversikt over måleresultater gis i Kapittel 6. For hurtig oppslag under arbeidet med beregningsprogrammer er typiske tidsserier for trykket plottet i Appendiks A–C. I Appendiks D er det tabulert SEL-verdier for rådata. Ved å korrigere for bakkevirkningen kan disse tabellene benyttes som inngangsdata til MILSTØY II. Dette



vil bli gjort i en egen rapport senere. Vi har sett litt på repeterbarheten til målingene i Appendiks E. I Appendiks F har vi beregnet støynivået fra detonasjon av 1 kg TNT. Dette er gjort for å ha en referanse til en støykilde med et kjent støynivå. Appendiks G inneholder en del bilder som beskriver geometrien til våpenet, med tanke på beregninger i fremtiden. Til slutt er det i Appendiks H en del bilder fra bakkeforholdene ved sensorene.

### 3 Våpen og ammunisjon

Det ble skutt med felthaubits av typen M109A3GN. Det var to skyts tilgjengelig, men det var skytset kalt Didrik (oppkalt etter FFI's Didrik Cappelen) som ble brukt hele den perioden vi gjorde målinger (Figur G.1).

#### 3.1 M109

M109 er en 155 mm felthaubits som er plassert på et lettere pansret beltegående kjøretøy (Figur 3.1). Munningen på våpenet kan sees på Figurene i Appendiks G.



Figur 3.1: M109. Terrenget i retning mot sensor 3 og 4. Nede til venstre ser vi sensor 11.

#### 3.2 Ammunisjon

Drivladningen var 5 moduler DM72. Det er 2.44 kg krutt i hver modul [10, 11]. Kruttet var temperert til 21 grader i en egen termohenger. Det ble skutt med to typer cargogranater (Figur 3.2) og en type sprenggranat. DM642 er en cargogranat med betegnelse "155 H, DM642, bomblets, hla-spr,

comp A5, lot 03-RH-90, katalog nr. 1320-12-310-9568”. OEF3 BB er en sprenggranat med betegnelse “155 H, OE F3, spreng-TNT, lot 01-LUL-95, katalog nr. 1320-14-476-1215”. DM662 er en cargogranat med betegnelse “155 H, DM662, AT-FRAG-B, comp A5, lot RHU98H7501, katalog nr. 1320-12-342-5822”. Den 21/9 ble det skutt med DM662 og OEF3 BB. I tillegg ble det skutt noen granater med betegnelse RH662, som er en DM662 der bombletsene er interte. Prosedyren var at det først ble skutt med sprenggranat, så med cargogranat med interte bomblets, så serier på 8 skudd med cargogranater (Tabell 3.1).



Figur 3.2: Cargogranater

### 3.3 Kalibrering med TNT

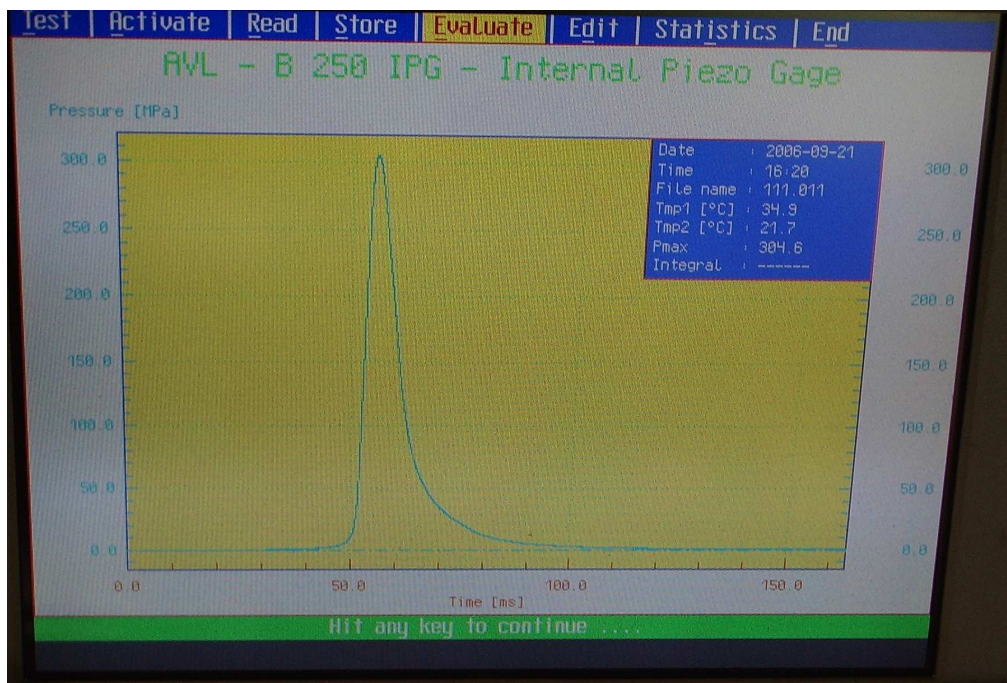
Som en referanse ble det satt av 1 kg TNT på morgenen og på kvelden på måledagene. Torsdag 21/9 ble det satt av TNT kl. 09:38 (shot nr. 3) og kl. 16:23 (shot nr. 4). Det var ikke mulig å flytte skytset. Ladningene ble satt av rundt 50 meter fra våpenet, omtrent i skyteretningen (Figur 3.3). Nøyaktig posisjon på detonasjonspunktet er gitt i Tabell 4.1, og kan også sees på Figur 4.2. Beregnet lydnivå ved sensorene er gitt i Appendiks F.

### 3.4 Trykk i løpet

Med jevne mellomrom måles trykket i kammeret under skyting. Dette gjøres med et trykkegg. Resultatet av en slik måling kan sees i Figur 3.4. Vi ser at vi har et makstrykk på 300 MPa. Trykket ligger over 50 MPa i omtrent 15 ms. I Tabell 3.1 ser vi det målte makstrykket for de skuddene der dette ble målt.



Figur 3.3: Posisjon for detonasjon av TNT er på den 1.5 m høye trepinnen omtrent midt i bildet. Til venstre i bildet ser vi sensor 10. Linjen med sensorene 8, 1, 9 går noe til venstre for trærne som kommer ut fra venstre, omtrent midt i bildet.



Figur 3.4: Kammertrykk ved avfyring av DM662. Tallene på aksene er i ms og MPa.

skudd	shot nr.	tid	granat	brannrør type	flygetid s	el	az	rekyl mm	$V_0$ m/s	trykkegg MPa	$L_{CE}$ dB
140-1	-	-	OEF3 BB	DM 211	35.9	262	912	815			-
140-2	-	10:27	OEF3 BB	DM 211	36.5	267	911	814			90.3
141-1	1	10:47	RH662	DM163	41.6	318	929	816	790.2		94.3
141-2	2	10:53	RH663	DM163	41.6	318	929	525	791.8		98.2
142-1	6	11:25	DM662	M762	40.4	328	929	818	791.9	298.6	90.1
142-2	7	11:32	DM662	M762	40.2	328	929	816	791.3		91.4
142-3	8	11:49	DM662	M762	39.9	324	927	816	790.3		91.0
142-4	9	11:54	DM662	M762	39.9	324	927	817	793.3		88.3
142-5	10	12:00	DM662	M762	39.9	324	927	815	789.6		92.6
142-6	11	12:06	DM662	M762	39.9	324	927	815	792.5	300.5	94.6
142-7	12	12:17	DM662	M762	40.1	326	927	817	790.9		87.8
142-8	13	12:22	DM662	M762	40.1	326	927	817	797.0		88.5
143-1	14	12:47	DM662	M762	40.1	326	926	817	793.0		96.1
143-2	15	12:54	DM662	M762	40.1	326	926	817	793.7		89.2
143-3	16	13:01	DM662	M762	39.9	324	926	816	791.7		97.6
144-1	3	13:51	RH662	DM163	41.3	315	929	818	792.2		91.6
144-2	4	13:57	RH662	DM163	41.3	315	929	819	791.1		93.2
143-4	-	14:12	DM662	M762	40.4	327	928	818	794.4	301.3	88.5
143-5	17	14:19	DM662	M762	40.4	327	928	817	791.5		99.5
143-6	18	14:24	DM662	M762	40.4	327	928	733	789.2		92.5
143-7	19	14:35	DM662	M762	40.4	327	928	659	792.4		91.2
143-8	20	14:44	DM662	M762	40.1	327	928	670	793.2		87.7
133-1	21	15:02	DM662	M762	40.1	327	928	598	792.1		88.5
144-3	5	16:10	RH662	DM 163	41.7	319	926	301	791.4		89.1
133-2	22	16:19	DM662	M762	40.1	327	928	302	794.9	304.6	95.7
133-3	23	16:24	DM662	M762	40.1	327	928	295	794.6		88.9
133-4	24	16:31	DM662	M762	40.1	327	928	302	791.6		92.6
133-5	-	16:37	DM662	M762	40.1	327	928	292	792.3		94.0
133-6	-	16:42	DM662	M762	40.1	327	928	670	790.4		87.8
133-7	-	16:47	DM662	M762	40.1	327	928	594	792.4	297.7	87.0
133-8	25	17:02	DM662	M762	40.1	327	928	679	788.1		91.4

Tabell 3.1: Oversikt over skuddene som ble avfyrt torsdag 21/9-2007. Skuddene uten gode målinger har ikke "shot nr." (intern referanse til skuddet). Siste kolonne gir støynivået (i C-veid SEL) på Fokstugu, omtrent 7 km fra standplass.

posisjon	kanon		UTM-koordinater		
	az	el	nord	øst	høyde
rotasjonspunkt	-	-	6887232.814	507800.818	965.037
detonasjonspunkt TNT	-	-	6887247.237	507839.053	961.538
munning DM642	926	548	6887236.464	507805.816	966.923
munning DM662	937	332	6887236.956	507806.109	965.926
munning OEF3 BB	905	290	6887237.119	507806.009	965.708

Tabell 4.1: UTM-koordinater for munningen. Skyteretningen (az og el) er gitt i streker, der det går 6400 streker på 360 grader. For DM662 er munningen omtrent 3.5 m over bakken.

## 4 Måleoppsett

Vi målte primært lydtrykket i 7 retninger ut fra skyteretningen. Måleposisjonene kan sees på luftfotoet i Figur 4.2. Vi har unngått å plassere sensorer på omtrent 65 grader for å unngå at prosjektilsmellet ankom sensoren samtidig som munningsmellet (for våpen med prosjektilhastighet rundt 800 m/s). Sensorene er plassert i en halvsirkel på den ene siden av skytset.

Det ble også gjort målinger på 130 m og 375 m, og i tre retninger på 20 m.

### 4.1 Standplass

Standplass er på Turrhaugen noen mil syd for Hjerkin (Figur 4.2). Her er det bygd opp en standplass i hardstampet sand og grus (Figur H.9). I Tabell 4.1 er det gitt koordinater for våpenet på standplass. Da det ble skutt med DM662 var munningen omtrent 3.5 m over bakken på standplass. Standplass er bygd omtrent 2.6 m opp i forhold til terrenget foran skytset.

### 4.2 Sensorplassering

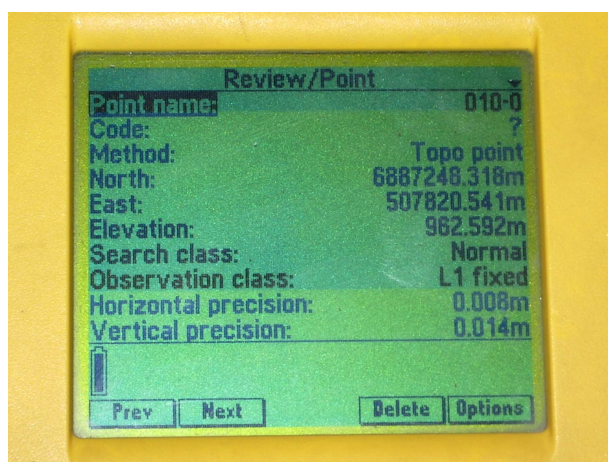
Det ble gjort opptak med i alt 12 sensorer. På 20 m målte vi i 3 retninger med trykksensorer. Disse sensorene stod i omtrent 2.7 m høyde over bakken.

På 250 m målte vi i 7 retninger med mikrofoner. Vi hadde også en mikrofon på 130 m og en på 372 m rett fram. Sensor 8, 1 og 9 står dermed på en rekke i omtrent 50 graders vinkel på skyteretningen. Sensorene 1–9 står i 2 m høyde over bakken. Alle sensorplasseringene kan sees i Figur 4.2.

I tillegg til sensorene på standplass var FB sin mobile målehenger plassert ved gården på Fokstugu. Denne gården ligger like ved E6, 7 km i østlig retning fra standplass. Her ble det registrert  $L_{CS}$  (C-veid sound pressure level med 1 s tidskonstant). Siden trykkpulsene fra en M109 har en varighet

på mindre enn 100 ms (på 250 m) er det grunn til å anta at denne verdien vil være lik  $L_{CE}$  (C-veid sound exposure level).

Vi målte opp posisjonene til skytset og sensorene med en differensiell GPS (Figur 4.1). Denne har en nøyaktighet på bedre enn 1 cm horisontalt og bedre enn 2 cm vertikalt. Begrensningen var med andre ord hvor nøyaktig det var mulig å markere sensorposisjonen. Vi anslår at det kan være rundt 25 cm usikkerhet her. Plasseringen til de 12 sensorene er beskrevet i Tabell 4.2. Her står også nøyaktig avstand mellom munningen og sensorene, vinkelen mellom skyteretningen og sensorene og den horisontale vinkelen mellom skyteretningen og sensorene.



Figur 4.1: Skjerm bilde differensiell GPS for sensorposisjon 10.

### 4.3 Vær

Det ble i løpet av dagen sluppet 2 værballonger (Figur 4.3). Data fra de to ballongene som ble sluppet 21/9 kan sees i Tabellene 4.3 og 4.4.

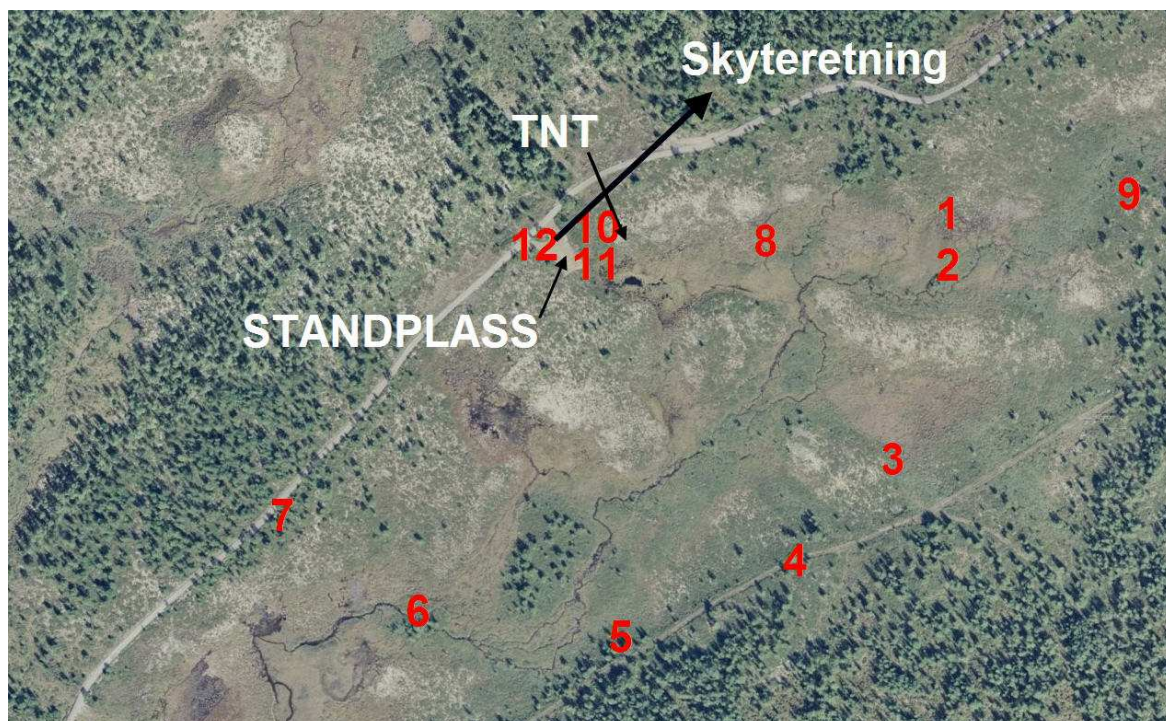
## 5 Datainnsamling

### 5.1 Sensorer

I målingene er det brukt tre typer sensorer. Nær våpenet (20 m fra munningen) brukte vi trykksensorer fra PCB. Mellom 130 m og 375 m fra munningen brukte vi mikrofoner fra Brüel & Kjær.

sensor nummer	UTM-koordinater			avstand m	vinkel grader	hor. vinkel grader	avstand TNT m
	nord	øst	høyde				
1	6887260.545	508059.479	960.273	254.53	49.64	32.59	220.83
2	6887227.297	508056.163	959.864	250.31	54.19	40.12	218.03
3	6887102.348	508021.738	959.500	254.28	75.27	69.89	233.18
4	6887031.168	507954.726	960.310	253.90	92.41	92.08	245.09
5	6886980.789	507842.183	954.749	258.94	114.69	119.90	266.55
6	6886996.965	507707.967	948.969	259.84	136.05	150.15	282.80
7	6887061.317	507614.779	953.544	260.02	144.21	175.36	291.43
8	6887245.111	507935.601	959.905	129.89	51.75	34.31	96.59
9	6887274.003	508176.856	966.192	372.59	48.34	32.21	338.89
10	6887248.318	507820.541	962.592	18.67	48.56	0.30	18.57
11	6887229.709	507823.825	962.520	19.44	73.97	60.16	23.24
12	6887236.976	507785.767	965.122	20.36	130.01	142.03	54.38
Fokstugu	6887242	514802	-	6996	51.74	37.87	6963

Tabell 4.2: UTM-koordinater for sensorene (UTM32). Avstand fra munningen til sensor og vinkel mellom sensor og skyteretningen er beregnet ut i fra at det skytes med DM662. Siste kolonne er avstanden fra sensor til der det ble satt av TNT. For Fokstugu har vi anslått at gården ligger 960 m over havet.



Figur 4.2: Luftfoto av standplass og plassering av sensorene (sensornummer).



Figur 4.3: Værballong klar til å sendes opp.

#### 5.1.1 PCB sensor på 20 m

Nær våpenet (20 m) hadde vi 3 trykksensorer av typen PCB 137A23. Vi hadde en sensor på 49 grader, en på 74 grader og en på 130 grader. I Tabell 5.1 er det oppgitt data for de 3 sensorene vi har brukt i målingene på 20 m.



Figur 5.1: Sensor 11 (til venstre) og 12 (til høyre).

#### 5.1.2 Brüel & Kjær mikrofoner på 130–375 m

På 250 m, 2 m over bakken, brukte vi kondensatormikrofoner av typen 4938 (1/4") fra Brüel & Kjær (Figur 5.2). Forsvarsbygg kjøpte inn 7 stk. nye mikrofoner med tilhørende 7 kondisjoner-



min høyde	max høyde	vindretning	vindhastighet	temperatur	trykk
m	m	grader	m/s	deg C	kPa
0	0	340	1.0	9.9	89.6
0	200	287	2.1	9.8	88.5
200	500	257	5.7	8.2	85.9
500	1000	232	13.9	6.5	81.8
1000	1500	245	24.2	5.7	76.9
1500	2000	254	29.3	5.4	72.4
2000	2500	252	29.8	3.8	68.1
2500	3000	250	29.3	0.8	64.0
3000	3500	253	30.4	-2.6	60.1
3500	4000	250	28.8	-6.0	56.4
4000	4500	248	29.8	-9.3	52.9
4500	5000	247	28.3	-12.6	49.5

Tabell 4.3: Meteorologisk profil i nærheten av standplass. Slipp 1 omtrent kl. 08:12. Vindretningen er med klokka fra geografisk nord, dvs. at 0 grader betyr vind fra nord.

ingsforsterkere før denne målekampanjen. I Tabell 5.1 er det oppgitt data for mikrofonene som er benyttet. Mikrofonene har et dynamisk område på 42–172 dB og et frekvensområde på 4 Hz – 70 kHz.

På 130 og 373 m brukte vi mikrofoner av typen 4135 (1/4") fra Brüel & Kjær. Mikrofonene har et dynamisk område opp til 164 dB og et frekvensområde på 4 Hz – 100 kHz.

Mikrofonene ble sammen med hele målekjeden testet med en kalibrator av typen Brüel & Kjær 4231. Korreksjonsfaktorene som ble funnet er brukt til å justere nivået, slik at alle verdier i denne rapporten er justert i samsvar med kalibratoren. Kalibreringsverdiene som ble brukt for hver enkelt kanal kan sees i Tabell 5.1.

## 5.2 Forsterkere

Brüel & Kjær mikrofonene ble koblet til et mellomstykke UA0035 (fra 1/4" til 1/2"), deretter forforsterkere av type Brüel & Kjær 2669 (Figur 5.2). Disse ble så koblet til kondisjoneringsforsterkere av typen Brüel & Kjær NEXUS 2690. Båndpassfilteret på disse ble stilt til å slippe igjennom signaler fra 0.1 Hz til 100 kHz. Kondisjoneringsforsterkerne til sensorene 1–9 stod ute i terrenget ved sensorene. Output fra kondisjoneringsforsterkerne var satt til 3.16 V/kPa.

Sensorene 10–12 ble koblet til hver sin PCB 480E09 signalomformer som stod ute ved sensorene. Disse ble stilt på 10 i gain.

min høyde	max høyde	vindretning	vindhastighet	temperatur	trykk
m	m	grader	m/s	deg C	kPa
0	0	263	1.0	11.2	89.4
0	200	169	4.1	10.6	88.3
200	500	166	6.2	9.0	85.7
500	1000	223	12.3	7.9	81.6
1000	1500	240	22.6	6.5	76.8
1500	2000	250	29.8	5.4	72.3
2000	2500	251	30.4	2.8	67.9
2500	3000	249	30.4	-0.0	63.8
3000	3500	250	31.9	-2.8	60.0
3500	4000	251	31.4	-6.3	56.3
4000	4500	253	31.9	-9.5	52.7

Tabell 4.4: Meteorologisk profil i nærheten av standplass. Slipp 2 omtrent kl. 09:48. Vindretningen er med klokka fra geografisk nord, dvs. at 0 grader betyr vind fra nord.

### 5.3 Strømforsyning til kondisjoneringsforsterkerne

I og med at sensorene stod langt ute i terrenget var strømforsyning et problem. Kondisjoneringsforsterkerne til Forsvarsbygg har en kanal og nye batterier, og hadde en batteritid på rett i underkant av en lang dag. Sensor 8 og 9 brukte FFI sine to 4-kanals forsterkere som bruker mer strøm. Vi endte til slutt opp med å bruke 2 strømagregater og skjøteledning til å drive sensorene 1, 2, 8 og 9.

Sett i ettertid kan det se ut som at den mest praktiske og robuste løsningen hadde vært å dra ut 300 m tynn ledning til alle sensorene, for å unngå behovet for hyppig tilsyn. Løsningen som ble brukt var upraktisk både fordi en runde innbærer 1.5 km gåing i ulendt terreng, men også fordi man ofte vil være forhindret fra å gå foran våpenet.

### 5.4 Kabler

Til sensorene 1–8 gikk det 350 m koaksialkabler. Vi la inn disse som 292 m i prekondisjoneringsforsterkeren, ut i fra kapasitansen i kablen. Dette kommer av at våre kabler hadde 60 pF/m. I prekondisjoneringsforsterkeren antas det 50 pF/m. Vi korrigerer derfor for å angi riktig total kapasitans, som beskrevet i bruksanvisningen til kondisjoneringsforsterkeren. Kablen til kanal 9 var 500 m lang. Den ble lagt inn som 417 m. Kablene til sensorene 10-12 var rundt 100 m lange.



Figur 5.2: Mikrofon av typen Brüel & Kjær 4938 (1/4"), med mellomstykke UA0035 (fra 1/4" til 1/2") og forforsterker type 2669.

sens. nr.	sensor			følsomhet
	serienummer	preamp	cal. (dB)	
1	SN2538098	SN1866227	+1.9	1.481 mV/Pa
2	SN2527222	SN1865606	+1.0	1.592 mV/Pa
3	SN2538096	SN1865603	+1.0	1.503 mV/Pa
4	SN2538097	SN1866226	+0.9	1.442 mV/Pa
5	SN2538095	SN1865607	+1.2	1.508 mV/Pa
6	SN2538099	SN1865608	+2.0	1.541 mV/Pa
7	SN2527223	SN1834564	+1.4	1.443 mV/Pa
8	SN800601	SN2084739	+0.5	3.67 mV/Pa
9	SN890610	SN2084742	+0.3	3.55 mV/Pa
10	SN4428	-	-	101.1 mV/PSI
11	SN4429	-	-	95.95 mV/PSI
12	SN4430	-	-	95.71 mV/PSI

Tabell 5.1: Tekniske data for sensorer.

## 5.5 AD-konvertering

Vi fikk plassert loggeutstyret i FLO T&V sin mobile målebrakke sammen med standplassledelsen (Figur 5.3). Fra måleposisjonene gikk koaksialkablene til 12 kanaler på Forsvarsbygg sitt PXI-kabinett levert av United Electronic Industries (Figur 5.3). I dette kabinettet stod det 2 stykker kort av typen National Instruments PXI-6123. Disse kortene er 8-kanals, 16 bits, analog til digital (AD) omvandlere (simultan sampling) med omvandlingsrate på 500 000 S/s/ch.

Vi stilte omvandlingsområdet til -10 til 10V, og samlet inn data fra 13 kanaler. Glimtsensoren var koblet til kanal 0. Vi brukte et egetsrevet program i LabView 8.0/NI-DAQmx 2.0. Programmet leser og skriver fortløpende data til harddisk. Blokker på 5000 samples/channel ble skrevet til fil om gangen med en samplingsrate på 250 000 Hz. Dataene ble lagret som 16-bits integer, big-endian.



*Figur 5.3: Venstre: PXI-chassiet oppe til venstre. Høyre: Måleoppsett innerst i brakka sammen med standplassledelsen.*

## 5.6 Postprosessering av data

For hver måling ble det skrevet en fil som inneholdt data fra alle de 12 kanalene. Disse datafilene er forholdsvis store. For å spare tid når man jobber med dataene ble det valgt å lagre dataene med en fil for hver kanal. Disse filene ble samtidig lagret som 16 bit little-endian (ieee-le). Det går da noe raskere å lese data inn i maskinen for analyse. Det er også laget en fil som angir tidspunktet munningsmellet ankommer sensoren.

## 6 Måleresultater

Måleresultatene presenteres i denne rapporten enten som tidsserier av trykket eller som 1/3-oktav SEL-spekter. For en forklaring på begrepet SEL (Sound Exposure Level) henvises det til [2]. Tidsseriene til trykket for skudd 143\_2 er plottet i Appendiks A–C.

### 6.1 1/3-oktav SEL-spekter

I Tabell D.1 er det listet opp SEL for M109 for forskjellige retninger og sensorer. Her har vi har klippet bort prosjekttilsmellet. Dette er SEL fra rådata på (omtrent) 250 m, uten bakkekorreksjon eller interpolasjon. Dersom man er i stand til å korrigere for bakkeeffekten er det mulig å benytte disse tabellene til å beregne frittfelts kildedata som kan brukes i f.eks. MILSTØY. Dette er imidlertid ikke gjort i denne rapporten. SEL-verdiene er fremkommet ved å midle energien over 15 skudd. Spekteret er beregnet fra 0.8 Hz til 20 kHz. Fremgangsmåten er beskrevet i [2].

Når vi finner SEL gjør vi en integrasjon der tiden går mot uendelig. Imidlertid er det ikke nødvendig å integrere der signalet er tilnærmet lik null. For å unngå støy i halen til signalet har vi tatt SEL fra -3 til 997 ms (relativt til munningssmellet). Signalet går mot null etter rundt 80 ms. Vi har også sammenlignet med SEL-verdier funnet ved -3 til 247 ms integrasjonsområde. Dette ga svært like resultater. For frekvenser under 8 Hz får vi mindre variasjon mellom skuddene når vi integrerer over et sekund.

Av de 25 skuddene vi har er det bare 15 som har blitt brukt når vi finner SEL, nemlig shot nr.: 9–19 og 21–24. Da har vi tatt bort skuddene der vi ikke hadde lang nok måleperiode (1, 3, 6, 8, 20, 25) og skudd 7 der vi hadde en svak drift i signalet. Vi har også tatt bort skuddene med RH662 (1, 2, 3, 4, 5). SEL er dermed beregnet for DM662. Imidlertid ser det (som forventet) ut til at vi får identiske verdier for RH662.

1/3-oktav SEL-spekter for de 7 sensorene er plottet i Appendiks D. Dette er en grafisk fremstilling av Tabell D.1. I spektrene er det en topp på rundt 16 Hz. Vi ser også at vi ved 4 Hz har en verdi på rundt 10 dB mindre enn ved 16 Hz. Her er det imidlertid viktig å huske at dette er uveide verdier, som ikke tar hensyn til at øret har mindre følsomhet for lave frekvenser.

## 7 Oppsummering

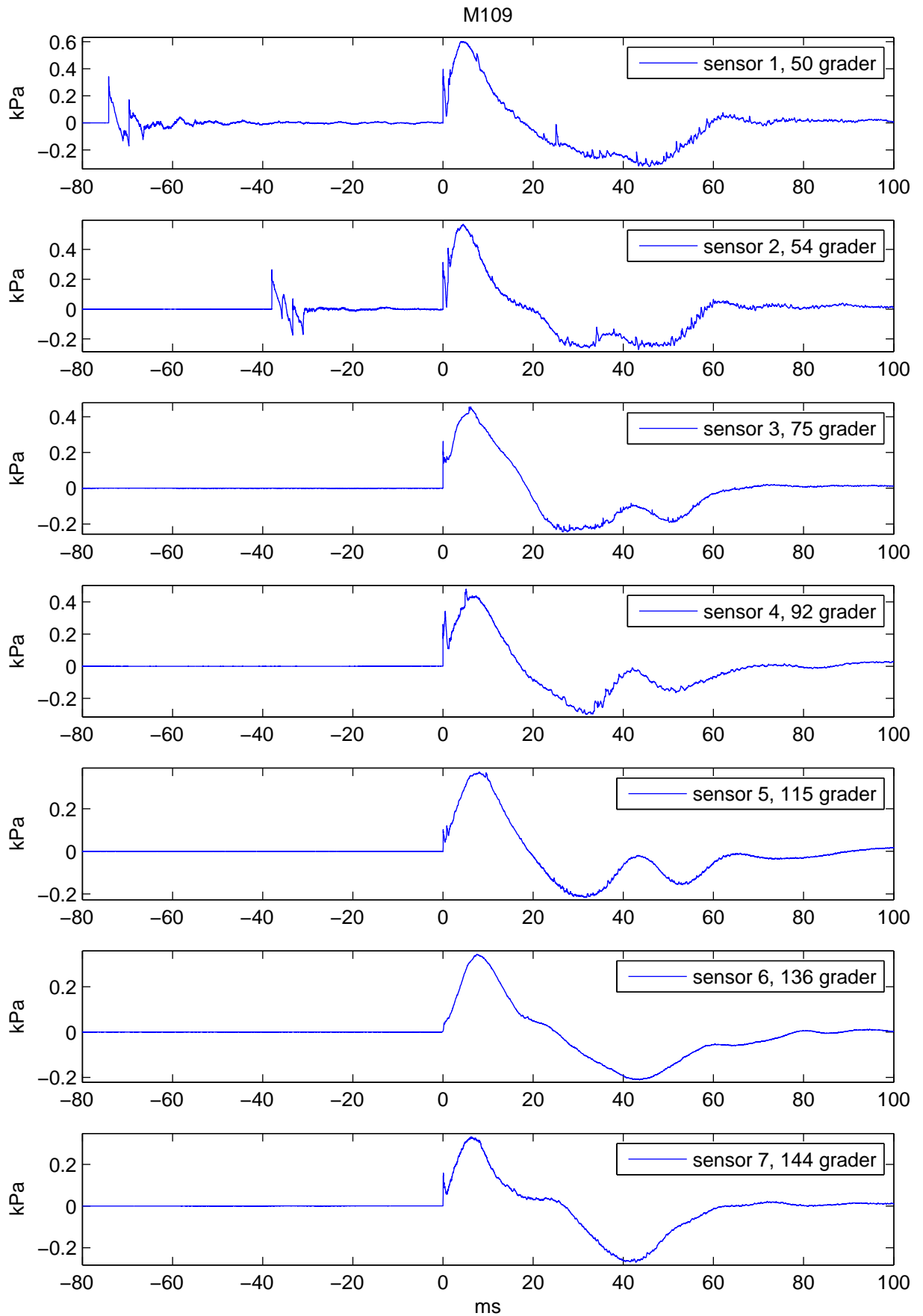
Det er fremskaffet tidsserier for trykket 20 m fra en M109. Det er også fremskaffet gode data for lydnivået 250 m fra munningen. I tillegg er det beregnet tabeller for 1/3-oktav SEL-spekter (uten bakkekorreksjon) som beskriver støynivået 250 m fra våpenet. Etter analyse for å fjerne bakkeeffekten kan disse tabellene brukes til å beregne emisjonsdata som kan brukes som kildedatabase for

lineære støyutbredelsesprogramer, som for eksempel MILSTØY II, for å beregne støyutbredelsen rundt skytefelt. For disse skuddene er det også gjort målinger av støyen 7 km unna.

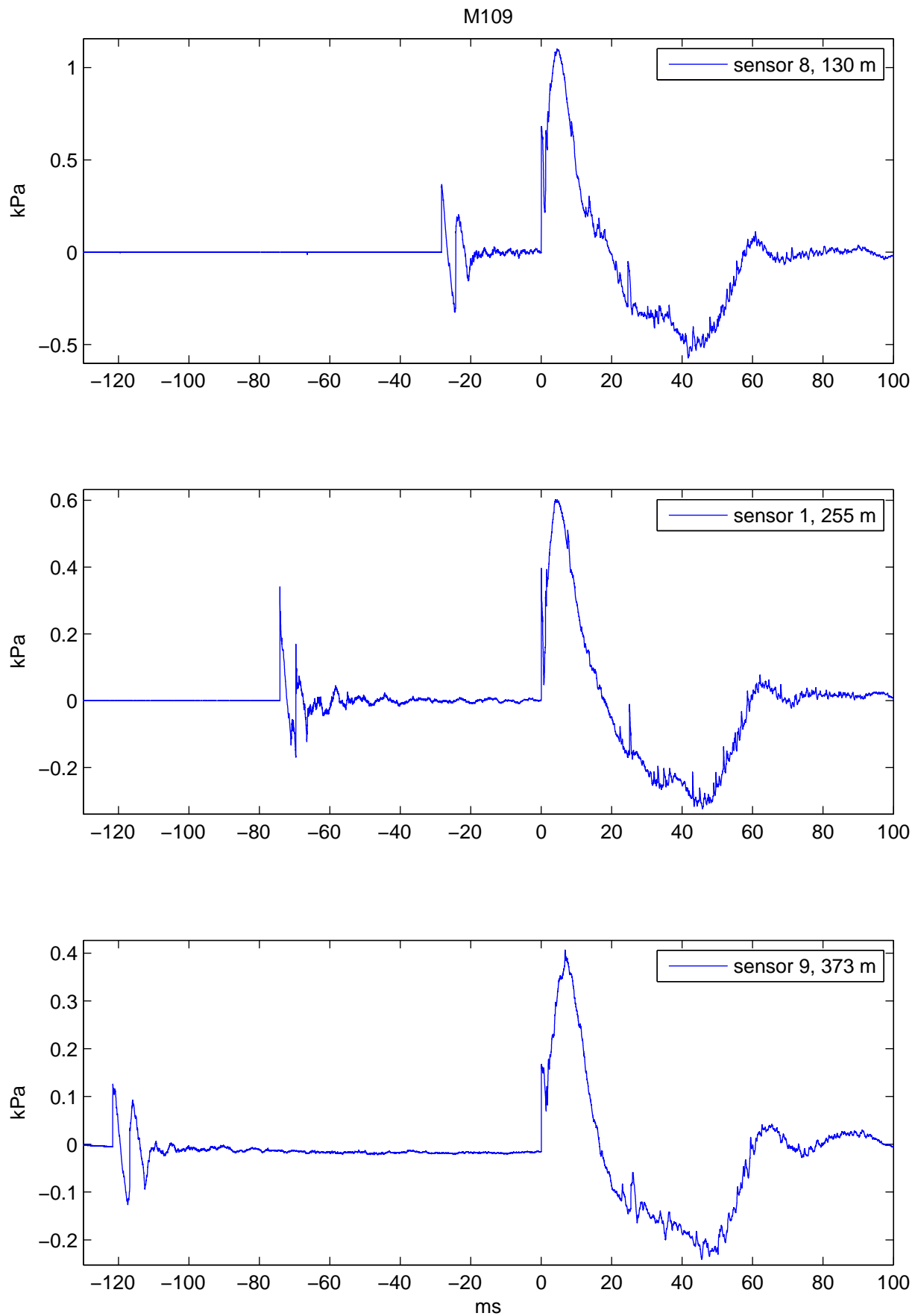
## Litteratur

- [1] M. Huseby, I. Dyrdal, H. Fykse, and B. Hugsted. Målinger av lydtrykket i nærfeltet til en rifle. Technical Report FFI/RAPPORT-2005/03998, Norwegian Defence Research Establishment, December 2005.
- [2] M. Huseby, B. Hugsted, I. Dyrdal, H. Fykse, and A. Jordet. Målinger av lydtrykket nær lette våpen, Terningmoen, revidert utgave. Technical Report FFI/RAPPORT-2006/00260, Norwegian Defence Research Establishment, 2006.
- [3] M. Huseby, R. Rahimi, J. A. Teland, and C. E. Wasberg. En sammenligning av beregnet og målt lydtrykk nær lette våpen. Technical Report FFI/RAPPORT-2006/00261, Norwegian Defence Research Establishment, 2006.
- [4] M. Huseby, B. Hugsted, and A. C. Wiencke. Målinger av lydtrykket nær CV90, AGL og 12.7, Rena. Technical Report FFI-rapport 2006/01657, Norwegian Defence Research Establishment, 2007.
- [5] M. Huseby and H. P. Langtangen. A finite element model for propagation of noise from weapons over realistic terrain. In *Proceedings Internoise 2006*, pages 1–8, paper 513, Honolulu, Hawaii, USA, 3–6 December, 2006.
- [6] B. L. Andersson, A. Cederholm, M. Huseby, I. Karasalo, and U. Tengzelius. Validation of a ray-tracer for long range noise-prediction using noise measurements from Finnskogen available in the nortrial database. In R. Korneliussen, editor, *Proceedings 30th Scandinavian Symposium on Physical Acoustics*, Ustaoset, Norway, 28–31 Jan, 2007. ISBN to come.
- [7] J. A. Teland, R. Rahimi, and M. Huseby. Numerical simulation of sound emission from weapons. *Noise Control Eng. J.*, accepted for publication, 2007.
- [8] K D Fickie R D Anderson. IBHVG2 a user's guide. Ballistic Research Laboratory, Aberdeen, USA.
- [9] Autodyn theory manual. Century Dynamics Ltd.
- [10] G. O. Nevstad. DM 72 155 mm modulære ladninger, indre balistiske beregninger. Technical Report FFI/NOTAT-98/04165, Norwegian Defence Research Establishment, 1998.
- [11] R. Rahimi, M. Huseby, and H Fykse. Ammunisjons og våpendata for bruk til beregning av støy fra skytefelt. Technical Report FFI-notat 2006/01658 (konfidensielt), Norwegian Defence Research Establishment, 2007.

## A Tidsserier trykk fra M109, 250 m fra munningen, 7 retninger

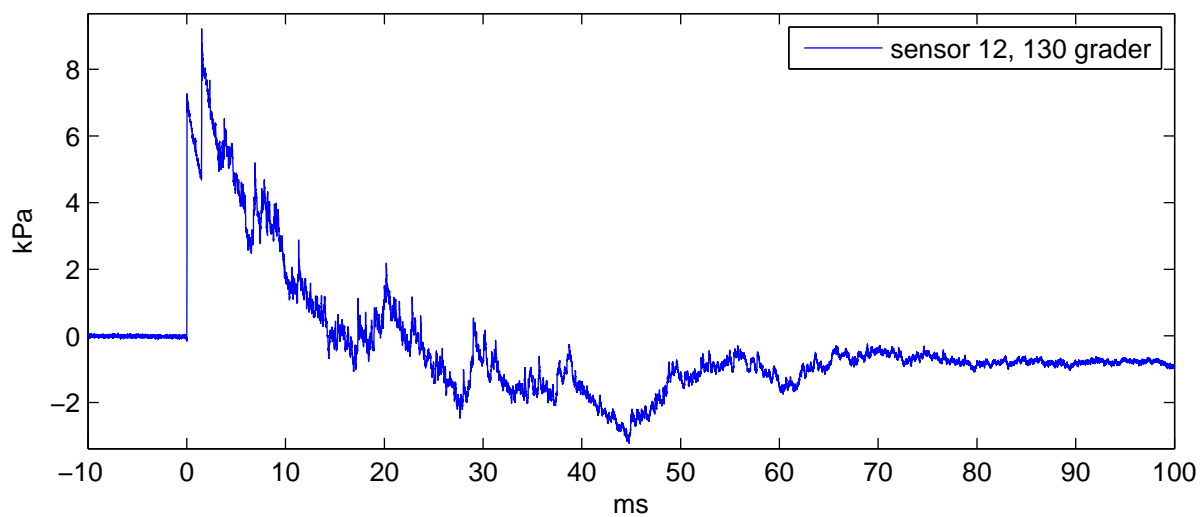
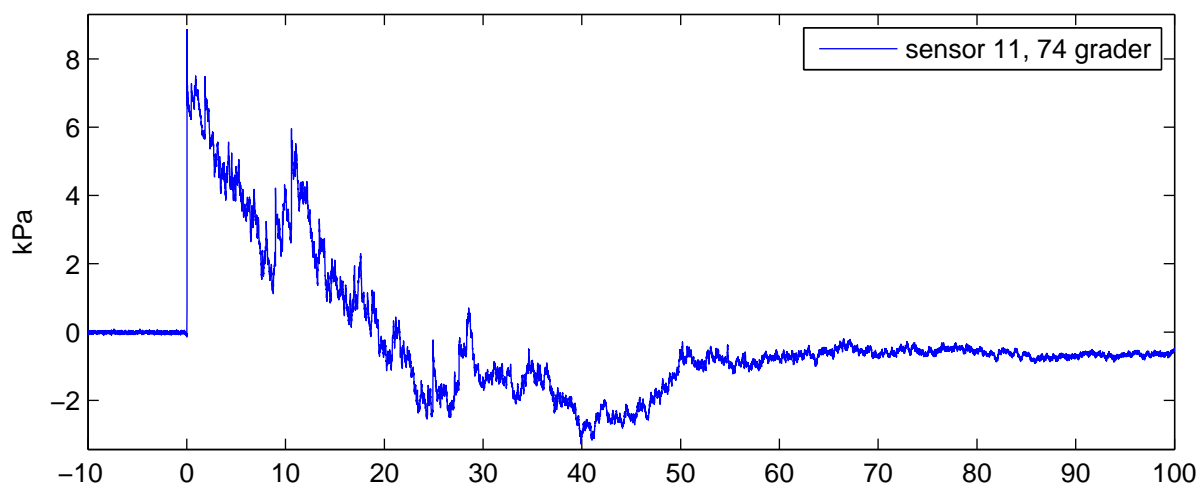
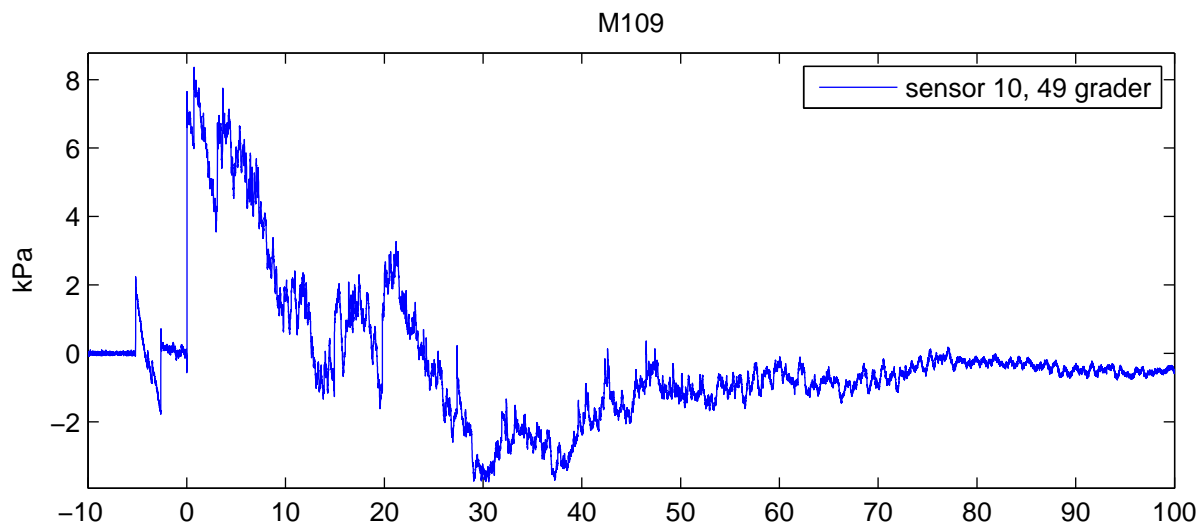


## B Tidsserier trykk fra M109, tre avstander fra munningen, 50 graders vinkel





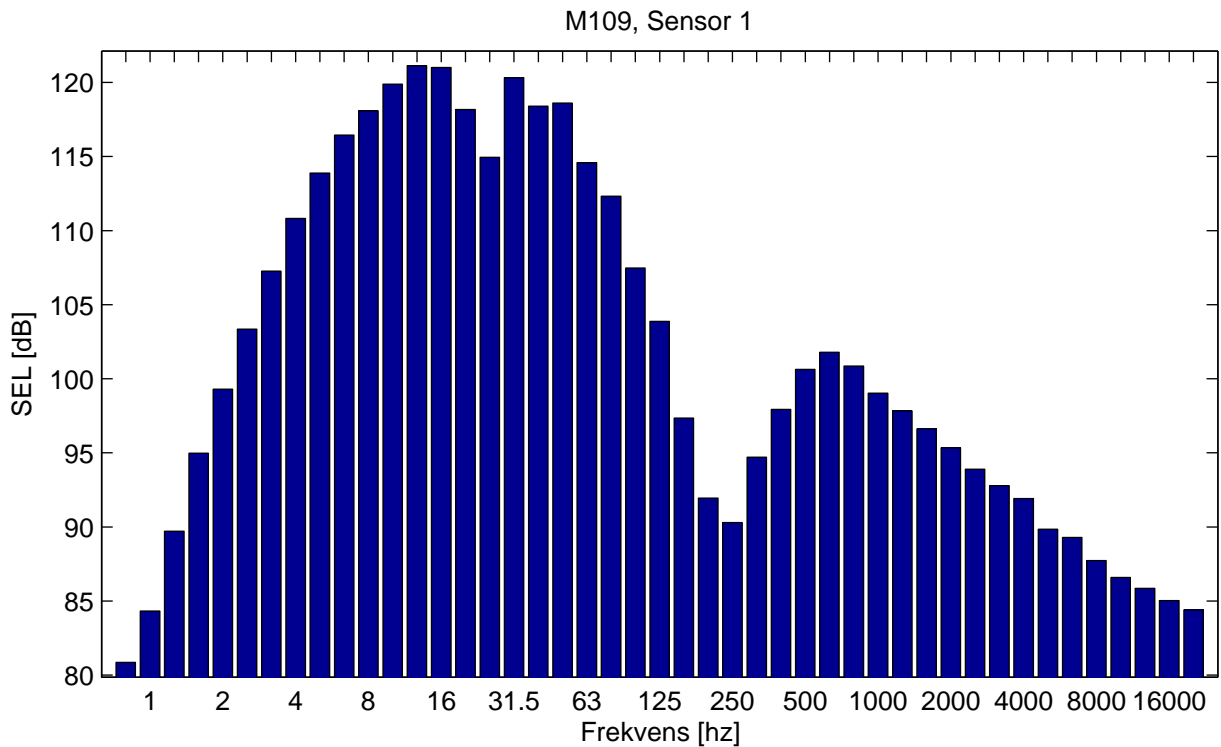
### C Tidsserier trykk fra M109, 20 m fra munningen, tre retninger



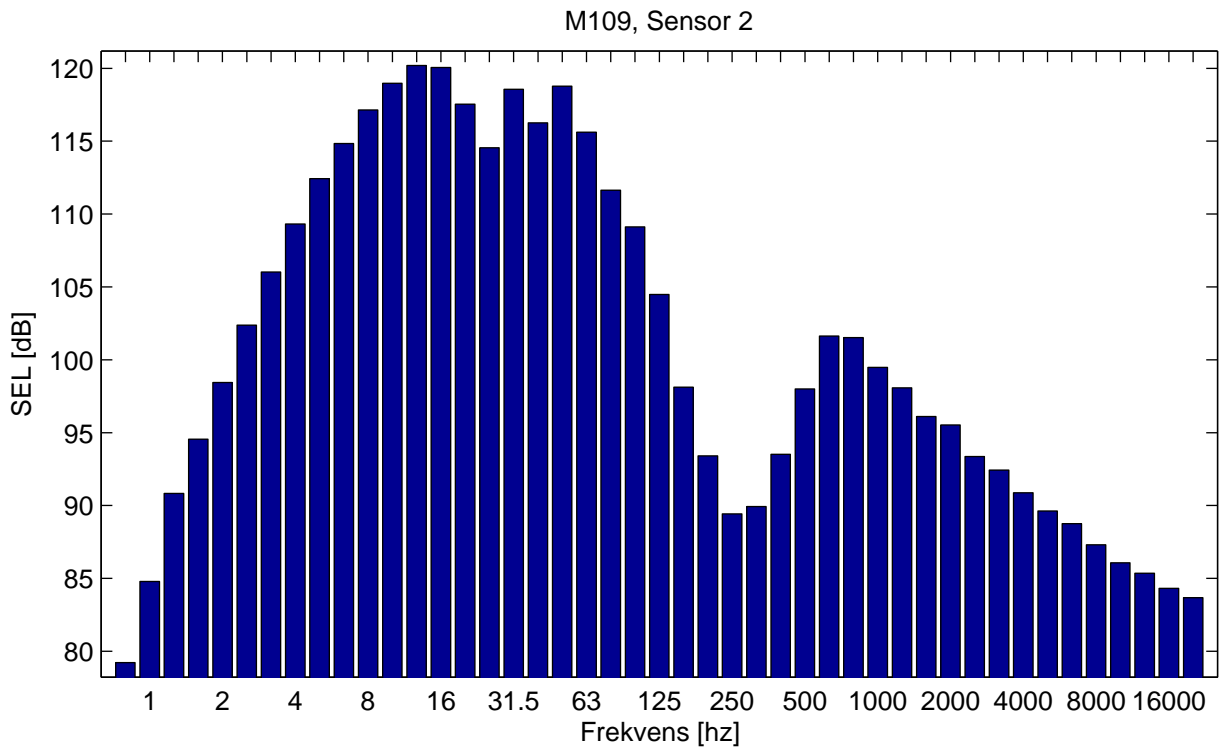
## D 1/3-oktav SEL-spekter, M109, 250 m fra munningen

SEL-verdiene er fremkommet ved å midle energien over de 15 skuddene. Fremgangsmåten er beskrevet i [2]. Dette er SEL fra rådata på (omtrent) 250 m, uten bakkekorreksjon eller interpolasjon. Plottene av 1/3-oktav SEL-spekter er en grafisk fremstilling av Tabell D.1.

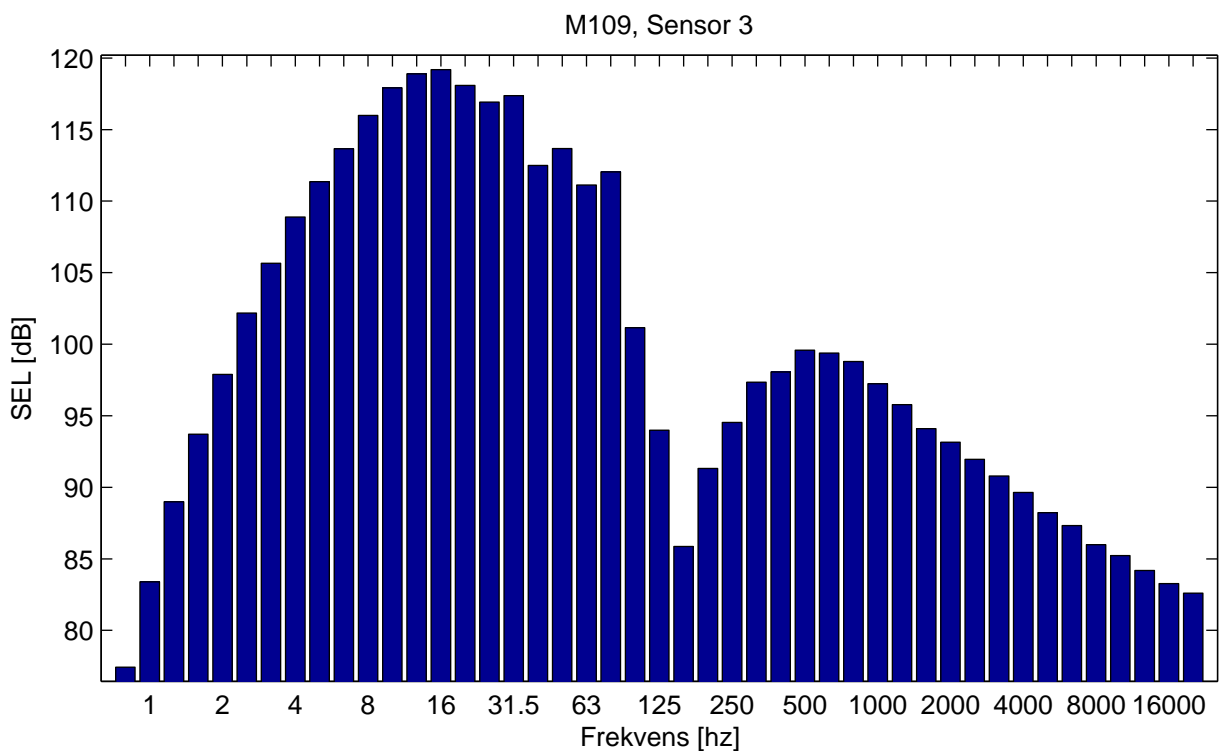
Vi har tatt SEL fra -3 til 997 ms (relativt til munningssmellet).



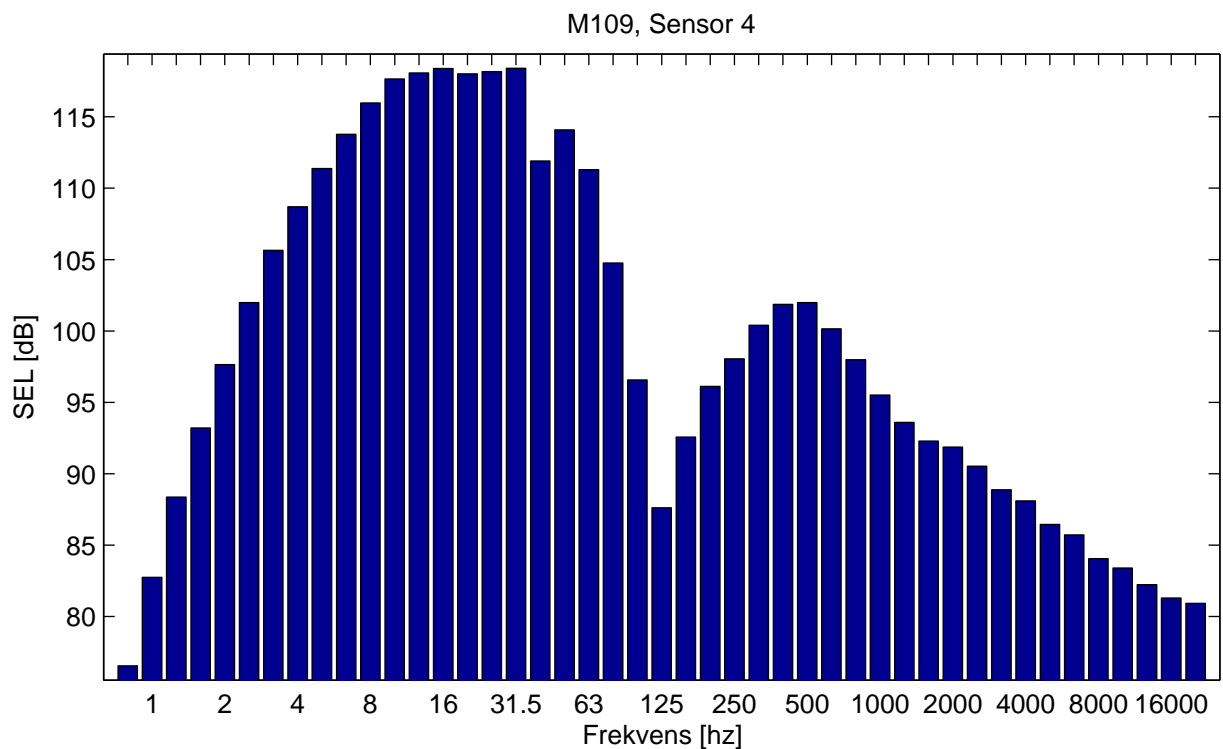
Figur D.1: Sound Exposure Level ved sensor 1, 50 grader fra skyteretningen.



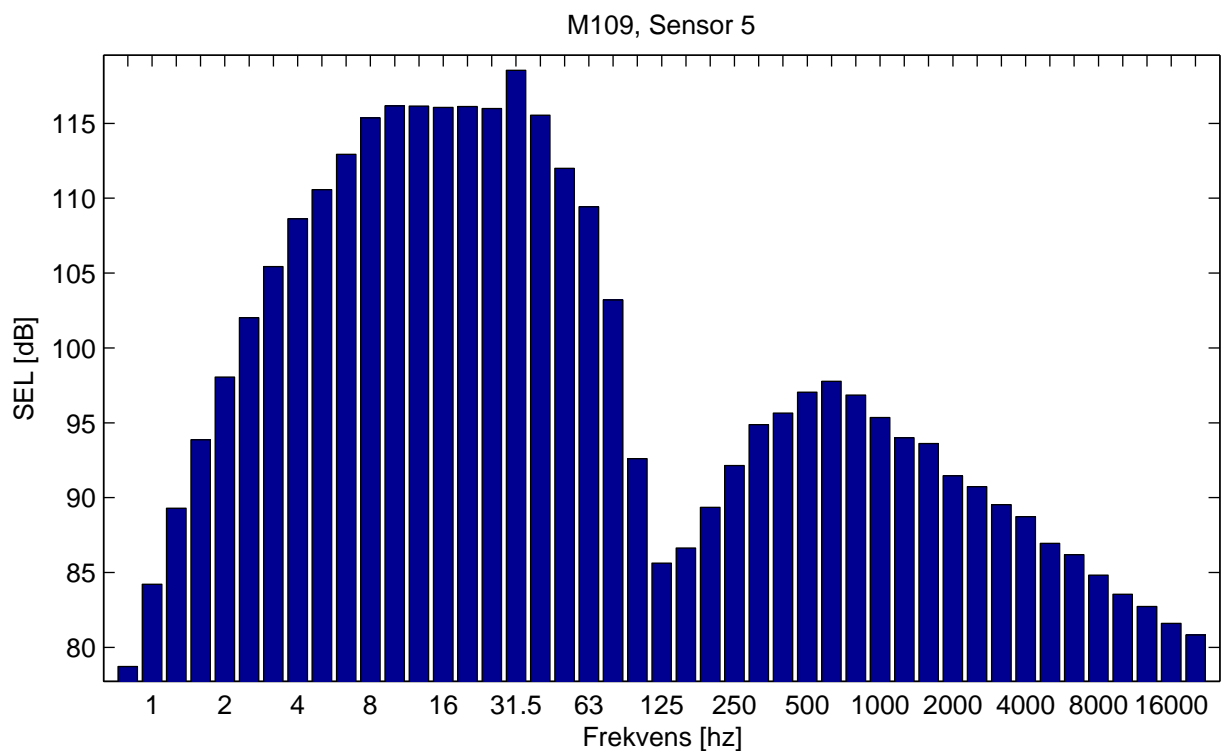
Figur D.2: Sound Exposure Level ved sensor 2, 54 grader fra skyteretningen.



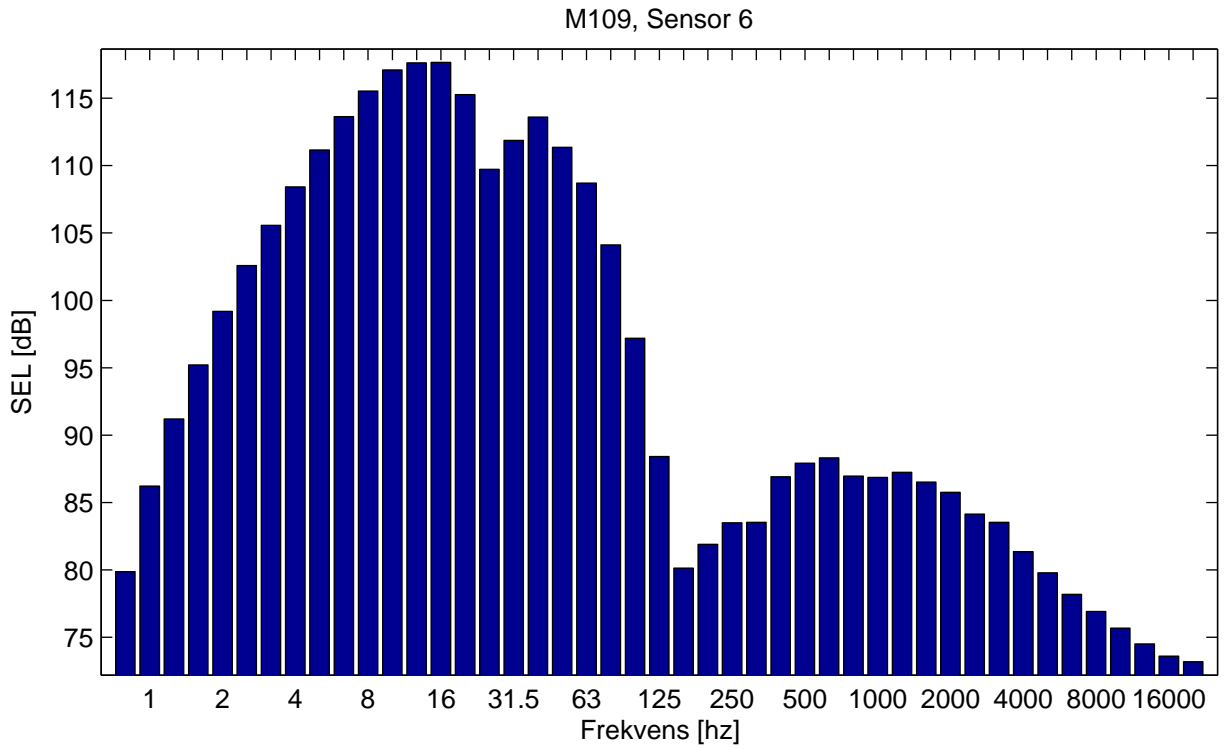
Figur D.3: Sound Exposure Level ved sensor 3, 75 grader fra skyteretningen.



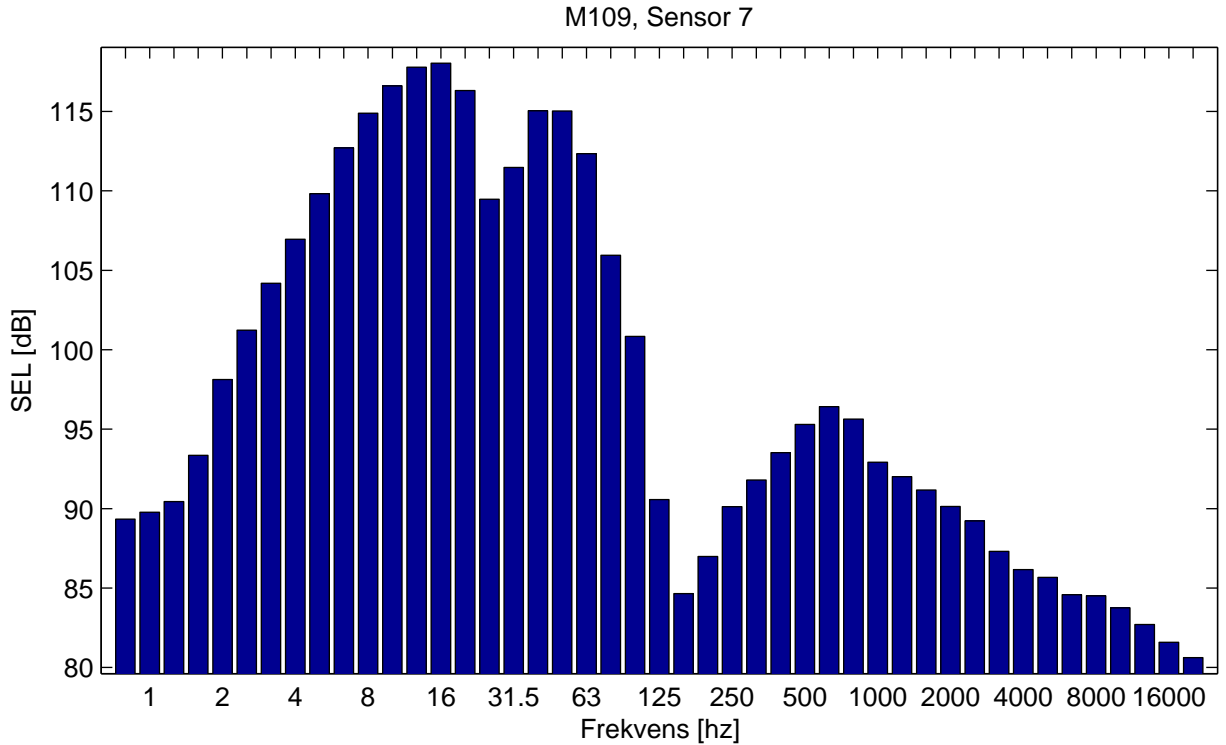
Figur D.4: Sound Exposure Level ved sensor 4, 92 grader fra skyteretningen.



Figur D.5: Sound Exposure Level ved sensor 5, 115 grader fra skyteretningen.



Figur D.6: Sound Exposure Level ved sensor 6, 136 grader fra skyteretningen.



Figur D.7: Sound Exposure Level ved sensor 7, 144 grader fra skyteretningen.

freq	sensor 1 50 grader	sensor 2 54 grader	sensor 3 75 grader	sensor 4 92 grader	sensor 5 115 grader	sensor 6 136 grader	sensor 7 144 grader
sum	129.6	128.7	127.5	127.4	126.2	125.5	125.9
0.8	80.9	79.2	77.4	76.5	78.7	79.9	89.3
1	84.3	84.8	83.4	82.7	84.2	86.2	89.8
1.25	89.7	90.8	89.0	88.4	89.3	91.2	90.4
1.6	95.0	94.5	93.7	93.2	93.9	95.2	93.3
2	99.3	98.4	97.9	97.6	98.0	99.2	98.1
2.5	103.4	102.4	102.2	102.0	102.0	102.6	101.2
3.15	107.3	106.0	105.6	105.6	105.4	105.6	104.2
4	110.8	109.3	108.9	108.7	108.6	108.4	107.0
5	113.9	112.4	111.4	111.4	110.6	111.2	109.8
6.3	116.4	114.8	113.7	113.8	112.9	113.6	112.7
8	118.1	117.1	116.0	116.0	115.4	115.5	114.9
10	119.9	119.0	117.9	117.7	116.2	117.1	116.6
12.5	121.1	120.2	118.9	118.1	116.2	117.6	117.8
16	121.0	120.1	119.2	118.4	116.1	117.7	118.0
20	118.2	117.5	118.1	118.0	116.1	115.3	116.3
25	115.0	114.5	116.9	118.2	116.0	109.7	109.5
31.5	120.3	118.6	117.4	118.4	118.5	111.9	111.5
40	118.4	116.3	112.5	111.9	115.5	113.6	115.0
50	118.6	118.8	113.7	114.1	112.0	111.4	115.0
63	114.6	115.6	111.1	111.3	109.4	108.7	112.3
80	112.3	111.6	112.0	104.8	103.2	104.1	105.9
100	107.5	109.1	101.1	96.6	92.6	97.2	100.8
125	103.9	104.5	94.0	87.6	85.6	88.4	90.6
160	97.3	98.1	85.9	92.6	86.6	80.1	84.7
200	91.9	93.4	91.3	96.1	89.3	81.9	87.0
250	90.3	89.4	94.5	98.0	92.1	83.5	90.1
315	94.7	89.9	97.3	100.4	94.9	83.5	91.8
400	97.9	93.5	98.1	101.9	95.6	86.9	93.5
500	100.6	98.0	99.6	102.0	97.0	87.9	95.3
630	101.8	101.6	99.4	100.1	97.8	88.3	96.4
800	100.9	101.5	98.8	98.0	96.8	87.0	95.6
1000	99.0	99.5	97.2	95.5	95.4	86.9	92.9
1250	97.8	98.1	95.8	93.6	94.0	87.2	92.0
1600	96.6	96.1	94.1	92.3	93.6	86.5	91.2
2000	95.3	95.5	93.1	91.9	91.5	85.8	90.1
2500	93.9	93.4	92.0	90.5	90.7	84.1	89.2
3150	92.8	92.4	90.8	88.9	89.5	83.5	87.3
4000	91.9	90.9	89.6	88.1	88.7	81.4	86.2
5000	89.8	89.6	88.2	86.5	86.9	79.8	85.7
6300	89.3	88.8	87.3	85.7	86.2	78.2	84.6
8000	87.7	87.3	86.0	84.0	84.8	76.9	84.5
10000	86.6	86.1	85.2	83.4	83.6	75.7	83.8
12500	85.8	85.3	84.2	82.2	82.7	74.5	82.7
16000	85.0	84.3	83.3	81.3	81.6	73.6	81.6
20000	84.4	83.7	82.6	80.9	80.8	73.2	80.6

Tabell D.1: M109: 1/3-oktav SEL-spekter, 250 m, uten bakkekorreksjon.

## E Variasjon fra skudd til skudd

Verdiene som fremkommer for SEL i tabellene i Appendiks D er energimidlede verdier over 15 skudd. I dette appendikset viser vi variasjonen mellom de 15 skuddene og denne midlede verdien.

I tabell E.1 ser vi at for de fleste skudd er differansen til det beregnede energimiddelet mindre enn 1 dB.

shot	sensor 1	sensor 2	sensor 3	sensor 4	sensor 5	sensor 6	sensor 7
	50 grader	54 grader	75 grader	92 grader	115 grader	136 grader	144 grader
9	-0.1	-0.7	-1.2	-0.9	-0.6	0.3	0.8
10	-0.0	-0.2	-0.3	-0.1	-0.0	1.1	0.6
11	-0.3	-0.1	0.4	0.6	1.3	0.9	1.1
12	-0.5	-0.6	-0.4	-0.1	0.0	0.1	0.7
13	0.0	-0.0	0.2	0.5	0.4	0.5	0.3
14	-0.5	-0.6	-0.7	-0.9	-0.0	-0.3	0.7
15	0.6	0.5	0.7	0.7	0.5	0.7	0.4
16	0.3	0.1	0.2	0.0	0.0	0.2	-0.5
17	-0.2	0.1	-0.0	-0.2	-0.8	-1.2	-0.9
18	-0.3	-0.4	-0.7	-0.7	-1.1	-0.5	-1.2
19	0.2	0.4	0.7	0.2	0.3	-1.1	-0.9
21	-0.1	-0.2	-0.8	-0.8	-1.0	-0.4	-1.1
22	0.6	0.7	0.1	0.2	-0.5	-0.8	-0.3
23	-0.2	-0.1	0.6	0.4	0.1	0.1	-0.1
24	0.3	0.8	0.7	0.7	0.6	-0.3	-0.4
middel	129.6	128.7	127.5	127.4	126.2	125.5	125.9

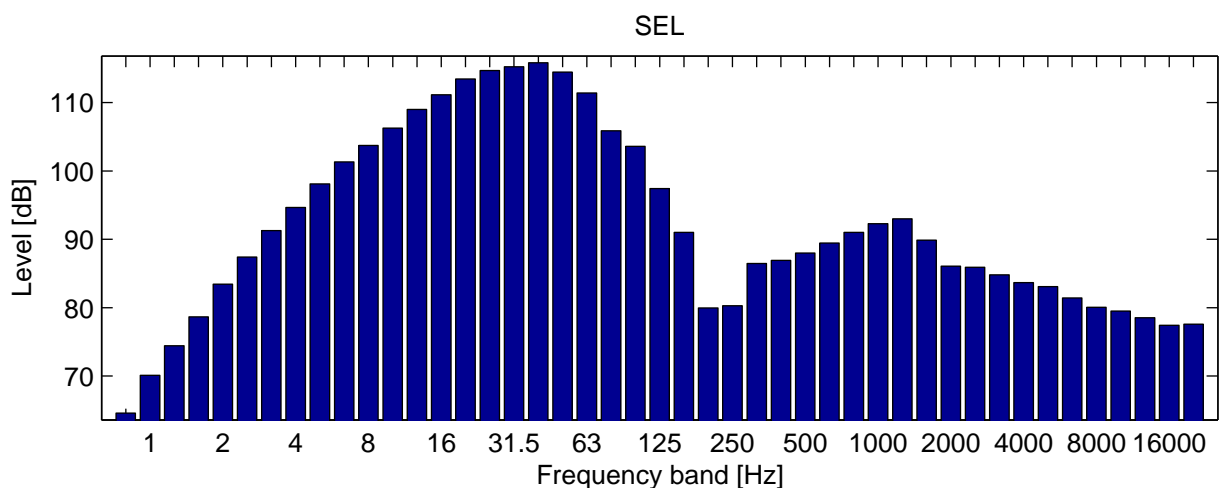
Tabell E.1: Avviket i total SEL (dB) for alle skudd og sensorer for M109.

## F TNT

Torsdag 21/9 ble det satt av 1 kg TNT kl. 09:38 (shot nr. 3) og kl. 16:23 (shot nr. 4). Plassering av TNT og sensorer kan sees på Figur 4.2. Sprengstoffet var plassert 1.5 m over bakken (Figur 3.3) og sensorene stod 2 m over bakken. I Tabell F.1 ser vi beregnet SEL og  $L_{CE}$  (C-veid SEL) for de to detonasjonene ved alle mikrofonene. SEL er beregnet fra -3 til 997 ms fra smellet ankommer sensoren. Et eksempel på et SEL-spekter er gitt i Figur F.1.

sensor nummer	shot nr. 3		shot nr. 4		avstand TNT m
	$L_{CE}$	SEL	$L_{CE}$	SEL	
1	120.4	123.4	119.9	123.1	220.83
2	119.7	122.7	119.0	122.1	218.03
3	119.5	122.7	118.5	121.9	233.18
4	118.2	121.5	119.1	122.3	245.09
5	115.2	118.9	117.3	120.7	266.55
6	113.3	117.4	116.2	119.8	282.80
7	112.1	115.8	115.7	119.3	291.43
8	126.2	129.1	125.9	128.8	96.59
9	116.9	120.3	115.9	119.4	338.89

Tabell F.1:  $L_{CE}$  (C-veid SEL) og SEL for de to detonasjonene av 1 kg TNT som ble gjort torsdag 21/9-2006.



Figur F.1: SEL for 1 kg TNT ved sensor 1, shot nr. 3.



## G Bilder av detaljer på M109

Vi har tatt med en del bilder av M109. Dette er gjort med tanke på at det kan bli aktuelt å modellere trykkbølgen nær våpenet. Geometrien til løp, munningsbrems og vogn vil da være viktig.



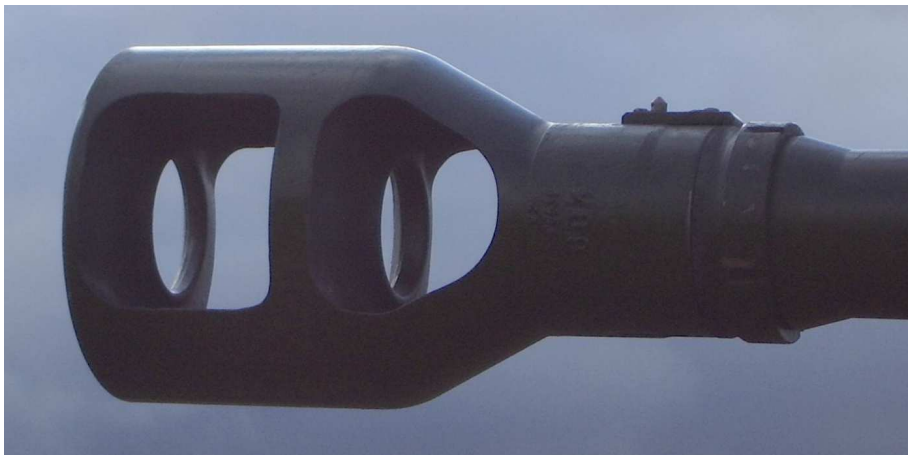
*Figur G.1: Munningen på M109*



*Figur G.2: Munningen på M109*



*Figur G.3: M109*



*Figur G.4: Munningsbremse*



*Figur G.5: Munningsbremse*



*Figur G.6: Munningsbremse*

## H Bilder av terreng og sensorplasseringer

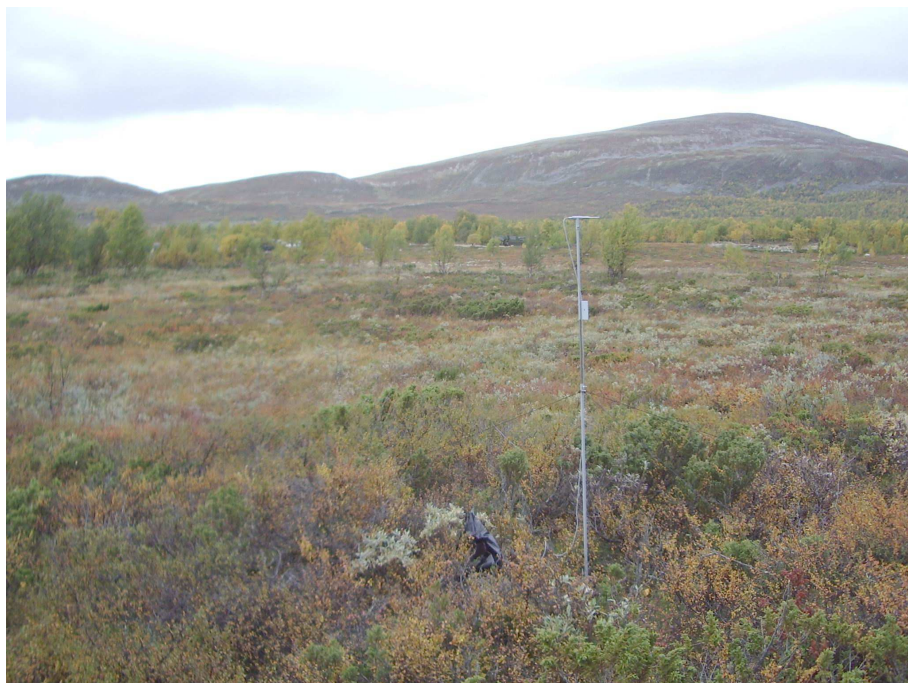
Vi har tatt med en del bilder av terrenget generelt, og ikke minst av terrenget ved de forskjellige sensorene. Dette er gjort for at det skal være lettere å danne seg et inntrykk av bakken i måleområdet.



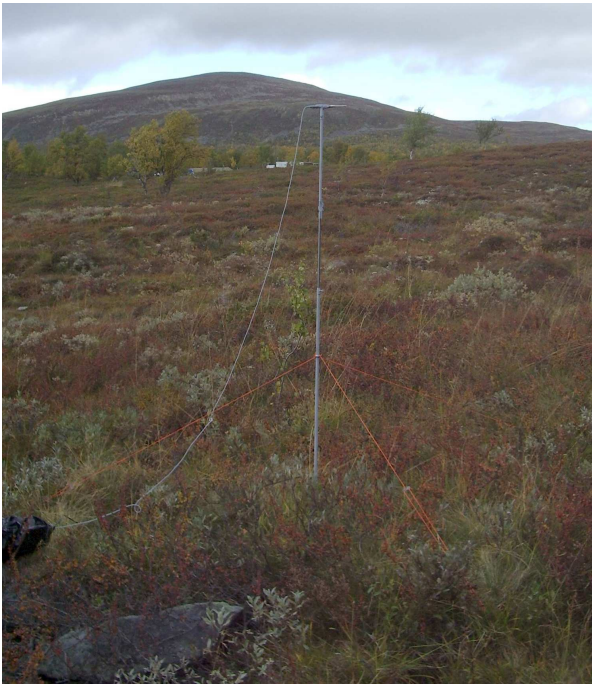
*Figur H.1: Sensor 3.*



*Figur H.2: Sensor 4.*



*Figur H.3: Sensor 5.*



*Figur H.4: Sensor 6.*



*Figur H.5: Sensor 7.*



*Figur H.6: Terrenget før sensor 8, 1 og 2.*



*Figur H.7: Sensor 9.*



*Figur H.8: Fra målebrakka (omtrent 50 m bak kanonen) mot sensor 7.*



*Figur H.9: Bakken på standplass.*





*Figur H.10: Terreng bak skytset.*