

BEGRENSET

FFIE - Sikkerhetsinstruksjon

Intern rapport E-264

Referanse: 113/Jobb 285

Dato: Januar 1977

AVGRADERT

Dato: 11.11.09 Sign.: S2-

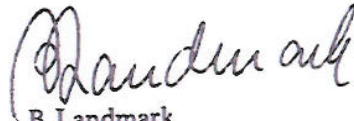
LUFTVAKTPOSTHJELPEMIDLER

av

R Skaug

Godkjent

Kjeller 3 februar 1977



B Landmark
Forskningsjef

FORSVARETS FORSKNINGSINSTITUTT
Norwegian Defence Research Establishment
Postboks 25 - 2007 Kjeller
Norge

BEGRENSET

i h. t. Sikkerhetsinstruksjon

BEGRENSET

FFIE i h. t. Sikkerhetsinstruksen

Intern rapport E-264

Referanse: 113/Jobb 285

Dato: Januar 1977

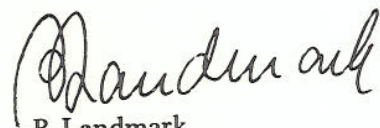
LUFTVAKTPOSTHJELPEMIDLER

av

R Skaug

Godkjent

Kjeller 3 februar 1977



B Landmark
Forskningsjef

FORSVARETS FORSKNINGSINSTITUTT
Norwegian Defence Research Establishment
Postboks 25 – 2007 Kjeller
Norge

BEGRENSET

i h. t. Sikkerhetsinstruksen

INNHOLDSFORTEGNELSE

	Side
1	INNLEDNING 5
2	AKUSTISKE SENSORER 5
2.1	Innledning 5
2.2	Karakterisering av lyd-kilden 7
2.3	Lydutbredelse 7
2.4	Bakgrunnstøy 10
2.5	Mikrofonelementer 10
2.6	Aktuelle frekvensområder 10
2.7	Resultater av måleteknisk art 10
2.7.1	Måling av vindstøy 11
2.7.2	Spektrale nivåvariasjoner som funksjon av kildeavstand 12
2.7.3	Tid/nivå-diagrammer 12
2.8	Retningsvirkende sensor med lang rekkevidde 14
2.9	Sammendrag og vurdering av målinger 16
2.10	Muligheter og begrensninger for et akustisk varslings-system 16
2.10.1	Rekkevidde 17
2.10.2	Høydeangivelse 18
2.10.3	Retningsangivelse 18
2.11	Krav til – og type informasjon 19
2.12	Beskrivelse av en akustisk deteksjonskjede 20
2.13	Konklusjon for akustiske sensorer 22
3	INFRARØDE SENSORER 22
3.1	Innledning 22
3.2	Karakterisering av termisk stråling fra fly 23
3.3	Atmosfæretransmisjon 23
3.4	Bakgrunnstøy 25
3.5	Valg av frekvensområde 25
3.6	Resultater av måleteknisk art 26
3.7	Muligheter og begrensninger for et IR-varslings-system 27
3.8	Konklusjon 27
4	UTPLASSERING OG SAMBAND FOR LUFTVAKTPOST-SENSORER 28
4.1	Innledning 28
4.2	Samband for akustiske sensorer 28
4.2.1	Kontroll av senderen 28
4.2.2	Valg av frekvensområde, modulasjon, sendereffekt 29
4.3	Utplassering av luftvaktpostsensorer 31
4.4	Samband registreringsenhet – kontrollsenter 33

	Side
Appendiks	
1 Statistiske data for akustisk bakgrunnstøy	34
2 Systemgeometri for akustisk deteksjon	37
3 Oppbygging av måleutstyr for akustisk deteksjon	40
Litteratur	48

LUFTVAKTPOSTHJELPEMIDLER

SUMMARY

This study investigates the feasibility of detecting low flying aircraft by means of different technical aids suitable for ground observers. The work is concentrated on evaluating two sensors which were found particularly promising. These are acoustical sensors and infrared ground-to-air sensing equipment. They both allow passive detection. The work is mainly a theoretical study. A few field trials with jet aircraft have been carried out using a prototype system for the acoustic sensors and using an infrared imaging system developed primarily for other purposes.

(Technical equipment for ground observers)

1 INNLEDNING

Denne rapporten behandler i grove trekk 2 typer passive sensorsystemer for deteksjon av fly i lav høyde. Det ene baseres på akustisk deteksjon, med spesielle mikrofonenheter fordelt i terrenget, mens det andre detekterer flyene på deres varmeutstråling. Sensortypene er under jobb TOR ved Forsvarets forskningsinstitutt vurdert innpasset i et multisensorsystem for bruk i kontroll- og varslingsystemet i Troms/Finnmark. Før konkret deployering og antall sensorer kan fastlegges, må de teoretiske studier som er utført suppleres med praktiske prøver.

Sensorene er tenkt plassert i en fremskutt posisjon hvor mer konvensjonelle medlemmer av K&V-systemet vil ha vanskeligheter med å operere. Ved å benytte lett mobile sensorer i et stort antall som hurtig kan omplasseres/erstattes, vil dette bidra til å gi et seigt varslingsystem. Systemet skal primært gi lavdekning i området og er først og fremst ment å tjene varslingsfunksjonen. Dybdedekningen er tenkt ivaretatt av andre sensortyper. Det er derfor satt beskjedne krav til nøyaktighet og informasjonsmengde i forhold til krav i et kontrollsystem. Imidlertid har man tilstrebet en sensorpakke som gir allværs operasjonsskapabilitet, og som skal være lett å operere.

I kapittel 2 og 3 har man innledningsvis forsøkt å gi et enhetlig tverrsnitt av de undersøkelser og studier som har gått foran FFIs forslag til sensorvalg. Operasjonelle forhold og samband er spesielt behandlet i kapittel 4.

2 AKUSTISKE SENSORER

2.1 Innledning

Dette kapittel vil omfatte en oversikt over en teoretisk studie så vel som måletekniske resultater med sikte på å undersøke mulighetene for akustisk deteksjon av fly. For mer detaljerte teoretiske betraktninger og beskrivelser av måleprogram og måleprosedyrer henvises det til (1) og (2), Måling og analyse av flystøy. Avhengig av de operasjonelle anvendelser kunne følgende situasjoner være aktuelle:

- Deteksjon av lavtflygende jettfly med hastighet under lydshastigheten, helikopter og propellfly. Dette kunne utføres med relativt enkle detektorer som kunne lages rimelig i større antall.

- Deteksjon og identifikasjon av fly i større høyder, eventuelt kombinert med avstandsmåling. Dette ville kreve en mer komplisert signalbehandling som enten kunne utføres i selve detektorene eller sentralt for flere detektorer på grunnlag av de data som ble overført.
- Deteksjon av overlydssmell (sonic boom) ved passerende jetfly.

For å kunne vurdere mulighetene for akustisk deteksjon av fly, har det vært nødvendig å foreta en undersøkelse av følgende forhold:

- Jetflystøyens nivå og struktur. Det var av spesiell interesse å fastslå mulige karakteristiske signalkomponenter, spektrale linjer o.l. som kunne brukes til deteksjon og identifikasjon.
- Lydutfbredelse under forskjellige forhold og den usikkerhetsmargin det måtte være nødvendig å ta hensyn til.
- Bakgrunnstøy under forskjellige forhold, vind, nedbør etc.
- Mikrofonelementer som kunne brukes under forskjellige klimatiske forhold. Det ville her også være naturlig å se på mulighetene for å oppnå bestemte retningskarakteristikker.
- Signalbehandlingsmetoder for deteksjon, avstand og retningsbestemmelse. Den riktige balanse mellom kompleksitet og ytelse er sterkt avhengig av den operasjonelle bruk av systemet.

Rapporteringen for de akustiske detektorene må skje via radio, og det er også nødvendig å ta hensyn til rekkevidde og kanalkapasitet ved vurdering av signalbehandlingsmetodene.

De problemer som er skissert ovenfor, omfatter et stort område som først og fremst måtte dekkes ved litteraturstudium. Det ble ikke funnet noe arbeid med støy fra jetfly hvor hensikten var deteksjon, og det var nødvendig å bruke resultater fra arbeider som hovedsakelig var rettet mot undersøkelse av lyd som en forstyrrende støykilde. Dette gjorde ofte at de data som var gitt ikke kunne brukes fordi "worst case" har motsatt betydning ved deteksjon og støybekjempelse.

Som et viktig supplement ble en serie med målinger av lyd fra passerende jetfly (hovedsakelig av typen F-5) utført, og opptakene ble analysert på forskjellige vis. Dette ga en mulighet for sammenlikning mellom teoretiske verdier og det som registreres under reelle forhold. Det ga også en serie opptak som ble avspilt for forskjellige deteksjonsenheter under utvikling av prototypustyr.

Dette kapittel gjennomgår summarisk de forskjellige teoretiske og målte mekanismer og fenomener som innvirker på deteksjonsprosessen og konkluderer med at de enorme akustiske effekter som utvikles ved jetfly, og de karakteristiske akustiske egenskaper til helikopter kan brukes til deteksjon over rimelige avstander. De største usikkerhetene knytter seg til den statistiske fordeling av naturlig støy ved ekstreme værforhold og til i hvor stor grad detektorer kan konstrueres slik at det foregår en adaptasjon til nivåene for denne bakgrunnstøyen. Av den grunn er det vanskelig å gi eksakte kvantitative ytelser for akustiske deteksjonssystemer.

2.2 Karakterisering av lydkilden

De viktigste lydkomponentene for et jetfly i flukt kan klassifiseres slik:

- Jetstøy, som genereres på grunn av turbulens inne i og rett utenfor motoren.
- Vifte og kompressorstøy, som genereres i jetmotoren og har et karakteristisk linjespektrum.
- Støy fra flykroppen, som vesentlig er en friksjonslyd.
- Overlydssmell, som genereres av en kontinuerlig sjokkbølge.

Jetstøyen ble funnet å være den mest dominerende komponenten for fly som beveger seg under lyd hastigheten. Støyutstrålingen for helikopter i det midlere frekvensområdet er vesentlig mindre enn for jetjagere (ca 20 dB). Videre kunne det observeres at de høyere frekvenser var svært redusert. Dette støybildet likner derfor mye på det som en kunne registrere fra et jetfly i stor avstand. Fra de målte spektralfordelingene var forskjellen i dette frekvensområdet ikke så stor at en uten videre automatisk kunne skille jetfly fra helikopter. Imidlertid vil man ved å benytte lavere frekvenser kunne detektere rotorstøyen, som gir et karakteristisk linjespektrum. Man har heller ingen vanskeligheter med å skille de to typene ved manuell avlytting av lydbildet.

Jetfly genererer en enorm akustisk effekt. Et relativt omfattende litteraturstudium indikerer at den mest fullstendige metode for prediktering av lydintensitetsnivået som funksjon av tid og frekvens er gitt av Kobrynski (4). For å kunne beregne lydtrykket på bakken, må systemets geometri samt luftens lydabsorpsjon tas i betraktning, se appendiks 2 for nærmere beskrivelse. Det kan imidlertid legges merke til at lydintensiteten (effekten) er proporsjonal med utstrømningshastigheten for jetstrålen dividert med lyd hastigheten – alt i åttende potens. Disse parametrene må derfor bestemmes svært nøyte hvis absolutt nivå skal kunne beregnes. Imidlertid stemmer målte og beregnede lydintensitetsforløp godt overens. Nøyaktigheten av de anvendte parametre vil ha innflytelse, men det fremgikk i hvert fall at den matematiske modellen kunne tilpasses en gitt flytype med den nøyaktighet som kreves i en systemanalyse.

2.3 Lydtubredelse

Det lydtrykk som kan registreres på bakken når et fly passerer, er avhengig av lyd-dempningen i luft samt av skjermingsfenomener og l som skyldes terrengformasjoner og vegetasjon i nærheten av målepunktet. Luftabsorpsjonen er sterkt avhengig av temperatur, relativ fuktighet og lydets frekvens, men den kan predikteres ganske godt for en gitt vær-situasjon. Bakkeeffektene er vanskeligere å forutsi, spesielt for lyd med lav innfallsvinkel.

Lydintensiteten (I) for en plan bølge kan uttrykkes som en funksjon av avstanden (r) på følgende form

$$I = I_0 \cdot 10^{-\alpha_r/1000}$$

hvor I_0 – intensiteten ved referansepunktet hvor $r = 0$.

α – dempningen pr lengdeenhet og har dimensjonen dB/100 m.

Svekkingen av en plan bølge skyldes to additive fenomener (4)

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_m$$

hvor α_c – den klassiske dempningen på grunn av transportfenomener
 α_m – den molekylære absorpsjon

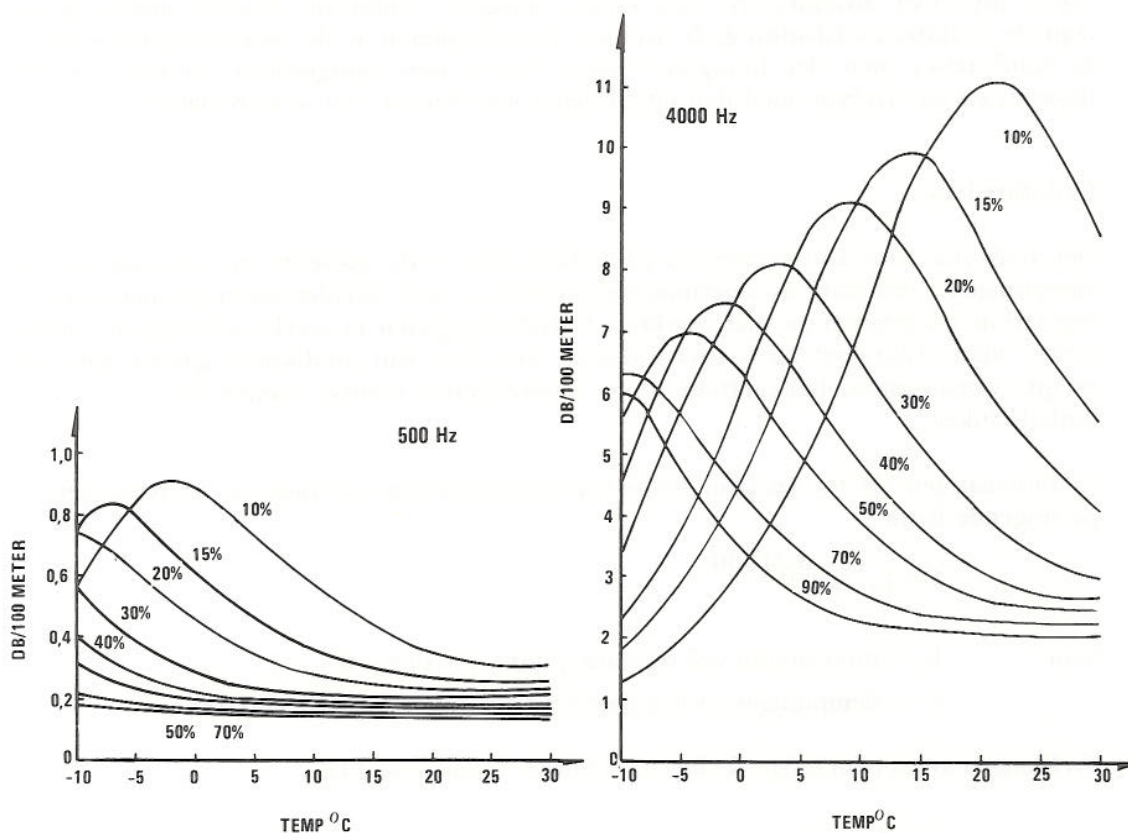
Normalt vil den molekylære absorpsjon dominere over den klassiske. Den molekylære absorpsjon kan uttrykkes på følgende form

$$\mu = \frac{2 \mu_{\text{maks}}}{f/k + k/f}$$

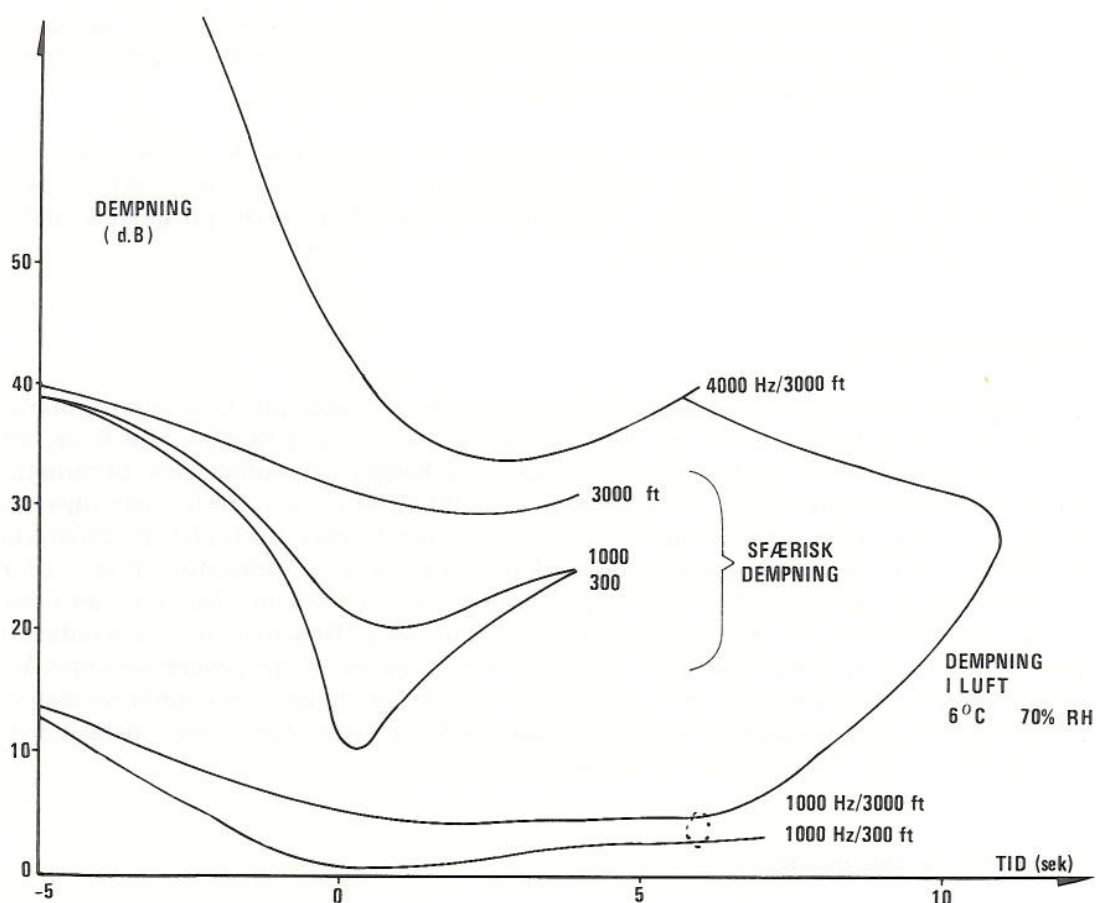
hvor μ – dempningen pr bølgelengde
 f – frekvensen
 k er gitt av relasjonsfrekvensen for oksygenmolekylene som avhenger av fuktighetstrykket
 μ_{maks} – maksimumsdempningen når frekvensen f varierer
 Denne størrelsen er bare avhengig av de termiske egenskaper til mediet og derfor uavhengig av temperaturen.

Typiske kurver for dempningen α som en funksjon av temperatur og med relativ fuktighet som parameter er vist i figur 2.1.

Dessuten vil det for lydutbredelse over så store avstander som det her kan bli snakk om, inntreffe tilleggsdempninger (eller forsterkninger) på grunn av fokuseringseffekter eller avbøynings-effekter. Innflytelsen av luftabsorpsjonen kan illustreres ved å beregne dempningsforløpet som funksjon av tid for den lyd som skal detekteres i en fast



Figur 2.1 Luftabsorpsjon ved 500 Hz og 4000 Hz



Figur 2.2 Sfærisk dempning samt typiske verdier for luftabsorpsjon

posisjon når et fly passerer i forskjellige høyder, se figur 2.2. Mens den sfæriske dempningen er bestemt av avstand, vil luftabsorpsjonen også være avhengig av frekvens, temperatur og fuktighet. Det viste seg at svekkingen på grunn av $1/r$ -loven er dominerende for lave frekvenser, opp til 1000 Hz ved 6°C og 70% relativ fuktighet. Ved 4000 Hz derimot har de to bidragene omtrent samme verdi når flyet er rett over i en høyde av 3000 ft, men tapene p g a luftabsorpsjonen ved denne frekvensen øker drastisk med avstanden.

Dette betyr at den overføringsfunksjonen som består mellom fly og bakke blir mer og mer smalbandet etter som avstanden øker. Dessuten vil selvsagt også absoluttverdien av dempningen gå opp.

Når målet kommer nær horisonten, vil terrengformasjonen og vegetasjon ha en økende innflytelse på dempningen. Det oppstår en tilleggsdempning, positiv eller negativ, som kan kalles "bakkeeffekt dempning". En av årsakene til dempningen er at lyden kan nå sensoren langs flere veier. En annen årsak til dempningen ved bakken er absorpsjon i vegetasjonene. En tilleggsdempning på 10–20 dB må det regnes med i et relativt åpent terreng når innfallsvinkelen er liten.

Vind vil også ha innflytelse på lyd dempningen, spesielt i retning mot vinden. Dempningsverdier opp til 30 dB har vært målt ved vindhastigheter på 8 m/s.

2.4 Bakgrunnstøy

Ytelsen til det akustiske sensorsystemet er for en stor del bestemt av den akustiske støy på observasjonsstedet. Denne støy er hovedsakelig generert av vind og nedbør, og styrken vil være sterkt avhengig av terrengformasjon og vegetasjon.

Appendiks 1 gjengir noen data for bakgrunnstøy fra en amerikansk rapport. Når det gjelder støy på grunn av vind på selve mikrofonene, finnes det i litteraturen en god del data. Måling av bakgrunnstøy er inngått som en del av dette prosjektets måleprogram og er referert i avsnitt 2.7.1.

2.5 Mikrofonelementer

Ved laboratoriemessige støymålinger brukes nesten utelukkende kondensatormikrofoner. Men for deteksjon av fly hvor så mange støy- og feilkilder eksisterer, vil dynamiske mikrofoner med en noe mer frekvensavhengig følsomhet være tilfredsstillende. Dynamiske mikrofoner er lavohmige (ca 200 ohm) og kan derfor lett tilpasses vanlig forsterkerutstyr. Mikrofonen kan ha rundstrålende eller kardiodekarakteristikk. For å oppnå en noe mere utpreget retningskarakteristikk, kan "mikrofonarrayer" eller paraboliske speil benyttes. Paraboliske speil har en direktivitet som i første tilnærming er lik direktiviteten for et stempel av samme dimensjon. Dessuten øker følsomheten med frekvens. I et parabolisk speil hvor dybden er fra en til to ganger brennpunktavstanden, vil forsterkningen være 20 dB for en bølgelengde lik brennpunktavstanden. Man har tenkt seg situasjoner hvor paraboliske speil kan være akseptabelt operasjonelt, og en måleserie med slike er derfor utført, se avsnitt 2.8.

2.6 Aktuelle frekvensområder

Fra de målinger og analyser av flystøy som er utført under dette prosjektet, vil støyspekteret som et jetfly utsender, karakteriseres ved at det er forholdsvis bredt og flatt ved korte kildeavstander. Videre kommer et økende høyfrekvenstap i tillegg til den generelle nivåsvakning ved økende avstand. Smalbåndsanalyse som er foretatt, har ikke påvist spektrale trekk som er spesifikke for slike fly. Opptak av helikopter og små jetfly viser noenlunde samme støyspektrum i midlere frekvensområde. Man må derfor ved utskilling av ulike flytyper basere seg på å benytte også et lavere frekvensområde hvor rotorstøyen fra helikopter gir et karakteristisk linjespektrum. Propellfly produserer spektrale linjer og overharmoniske svingninger til propellen. En ren subjektiv analyse av lydbildet gir også god mulighet for identifikasjon av flytype.

Det synes imidlertid som om snøscooter, beltebiler o.l. vil bli vanskelig å utelukke ved ren automatisk deteksjon. Dette peker direkte i retning av en manuell avlytting av lydbildet for å fjerne falske alarmer. Vindstøyen, som har lavfrekvente egenskaper, fører til begrensninger nedover i frekvensområdet idet man ønsker å bibeholde et akseptabelt S/N-forhold.

Man valgte derfor å måle mellomfrekvensområdet ved å benytte oktavbåndene med senterfrekvens 500, 1000 og 2000 Hz.

2.7 Resultater av måleteknisk art

Det følgende er en beskrivelse av resultater fra feltmålinger der lydtrykksnivået registreres som en funksjon av flyhøyde og avstand fra målepunktet. Det er også foretatt målinger på direkte mikrofonsystemer der paraboliske reflektorer er benyttet. Støy-

registreringene er foretatt vesentlig på jetjagere av typen F-5, men også F-104 og Seaking helikoptere er målt.

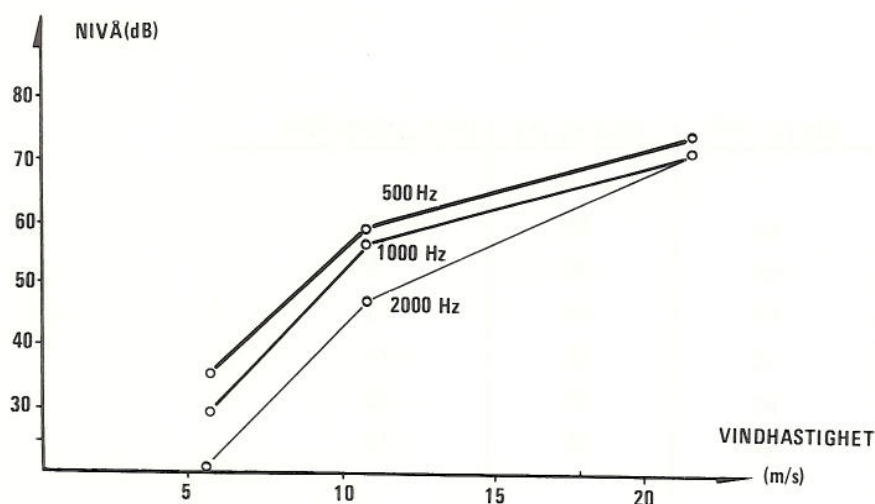
Et akustisk deteksjonssystem vil som tidligere beskrevet ikke begrenses av den visuelle sikt, men til gjengjeld influeres den av den bakgrunnstøyen som er til stede, enten denne skyldes vindstøy eller man-made støy. For et omnidireksjonalt sensorsystem vil derfor rekkevidden være begrenset, selv om nivået fra passerende fly er stort. Måleserien innbefatter derfor data om støynivå som en funksjon av vindstyrke. Med ønsket varslingsikkerhet kan en derav finne rekkevidden for sikker deteksjon ved ulike vindstyrker.

2.7.1 Måling av vindstøy

For å få en oversikt over rekkevidden, samt for å sikre seg mot feildeteksjon, vil det være nødvendig å måle nivået og spekteret til bakgrunnstøyen. Denne vil i alt vesentlig bestå av vindstøy (2, s 5). Man fant det ønskelig å måle støynivået i det oktavbånd som lå nærmest opp til det som nyttesignalet måles i. En kurve over bakgrunnstøyen i de tre aktuelle frekvensbånd er vist i figur 2.3.

Ved måling av passerende fly observerte man en betydelig spredning i nivå, selv om de ulike overflygninger skjedde i samme avstand fra målepunkter (2, s 6). Man antok at en av grunnene var innvirkning av vind. Vindgradienten som funksjon av høyde kan variere etter topografi, vindretning, temperaturforhold o.l. Dersom en forenklet antar en lineær hastighetsprofil, vil en få en lydbane som vil føre til vesentlig større støynivå på lesiden enn på vindsiden. Den intuitive følelsen at lyden "blåser med vinden" er noenlunde riktig, og gjør seg selvsagt mer gjeldende ved økende vindstyrke.

Under utprøving av sensorer med parabolisk reflektor kunne man konstatere at innføringen av en reflektor endret bakgrunnstøyens karakter. Det er liten hensikt i å skaffe seg økt forsterkning av nyttesignalet dersom en ikke samtidig holder bakgrunnstøyen nede. Her kom reflektorens størrelse samt montering inn i bildet (2, s 178). Dersom reflektoren ble rettet oppover, var vindstøyen uavhengig av vindretning, men avhengig av vindstyrken og hvor langt ned i reflektoren mikrofonen var plassert. Dersom reflektoren tiltes, var vindretningen av betydning. Innvirkning av vindindusert støy ved bruk av parabolisk speil er imidlertid ikke fullstendig undersøkt ved alle



Figur 2.3 Bakgrunnstøy

aktuelle vindstyrker, slik at en ikke har full oversikt over de forhold som kan inn-
treffe. Målingene indikerte en forsterkning på over 12 dB og viste seg å bidra til å
bedre S/N-forholdet ved de målte vindstyrker.

2.7.2 Spektrale nivåvariasjoner som funksjon av kildeavstand

Lydenergien som registreres på bakken, har en fordeling i tid og frekvens som først og
fremst er avhengig av flyets hastighet og høyde. Dessuten vil motorens parametre samt
vær og terrengforhold ha avgjørende betydning. En kvalitativ analyse av energifor-
delingen ble utført med en sonograf hvor et utsnitt av et signal spiltes av gjennom et
filter (1, s 23). Denne analysen gav også informasjon om spekterets struktur, hvorvidt
spekteret er kontinuerlig, og om innholdet av eventuelle spektrale komponenter.

Registreringene ble foretatt på Ørland flystasjon. Målingene ble foretatt for jetjagere
av typen F-5, F-104 og for Seaking helikopter (2, s 73). For F-5 ble det benyttet
typiske hastigheter på Mach 0,7, men målinger ble også foretatt opp i vel Mach 0,9.
Ved Mach 0,9 økte støynivået utbetydelig, tatt i betraktning den spredning som må
påregnes. For flyvninger med full etterbrenner var det imidlertid en målbar økning.
Målingene viste en markant diskantsvekkelse som funksjon av kildeavstand (1, s 23).
Dersom en sammenlikner nivåene i oktavbåndene med senterfrekvens 500 Hz og
2000 Hz, kan en få en tabelarisk oversikt som vist i figur 2.4.

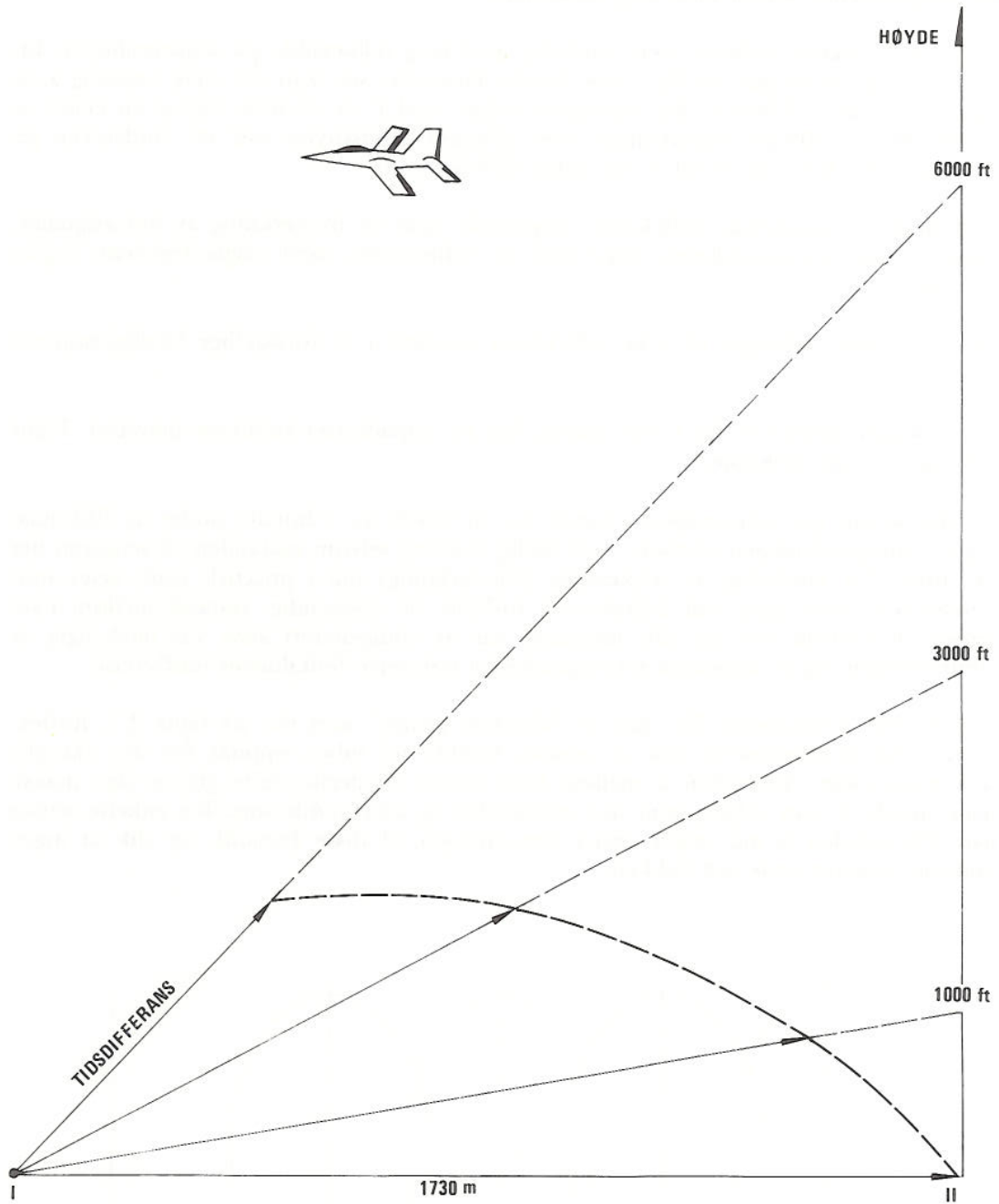
Ved store kildeavstander var signalstyrken så lav at en fikk problemer med bakgrunn-
støyen. Det er derfor sannsynlig at differansen øker mer med avstanden enn det
tabellen viser, dette gjelder spesielt for de største avstander.

2.7.3 Tid/nivå-diagrammer

Primærhensikten var å studere de relative tidsdifferanser for det støybildet som mot-
tas på tre ulike målesteder (2, s 73). Man håpet med det å kunne foreta retnings-
bestemmelse. Med kjent basislengde (2000 m = avstand mellom sensorer plassert i
triangulær formasjon) og lydhastighet på 340 m/s kunne man finne den relative tids-
differanse mellom de forskjellige detektorene når flyhastigheten var kjent. Det ble
antatt at maksimalt signal inntraff når flyet var nærmest det aktuelle målepunktet.
Det bød imidlertid på praktiske problemer å få dette registrert idet lydbildet ble mer
flatt og udefinert etter som avstanden økte. Som vist på figur 2.5 vil tidsdifferansen
også reduseres med flyhøyden.

AVSTAND (m)	500 Hz (dB)	2000 Hz (dB)	DIFFERENS (dB)
100	99	98	1
300	90	90	0
1000	87	82	-5
2000	73	52	-21
3000	68	48	-20
6000	61	45	-16

Figur 2.4 Diskantsvekkelse som funksjon av kildeavstand



Figur 2.5 Tidsdifferensens variasjon med flyhøyde

Ved beregningene ble det tatt hensyn til så vel flyhøyde som horisontal avstand. For enkelte flyhøyder og ruter var det stor sammenklaff mellom beregnede og målte verdier. Det var imidlertid spesielt kritisk hvor godt en klarte å bestemme støybildets maksimumspunkt. Dersom en logikk skal kunne gi retningsinformasjonen, er det viktig at tidsdifferansen er så stor som mulig og entydig. Under forsøkene syntes det noe lettere å bestemme tidsdifferansen mellom de tre målepunktene ved en viss nivåterskel f eks 70 dB i stedet for å gå ut fra maksimalpunktet (2, s 124).

2.8 Retningsvirkende sensor med lang rekkevidde

Det kan i enkelte tilfeller være ønskelig med lang rekkevidde på sensorenheten. En tenker da på deteksjon av fly i stor høyde. Operativt sett kan det være ønskelig å nå høyder på over 12 000 ft. Fra målingene utført med F-5 vil dette tilsi at en måler ca 60 dB SPL i 500 Hz oktavbåndet som tilsvarer vindstøyen ved en vindstyrke på 11 m/s. Dette betyr at en vil få for dårlig S/N-forhold.

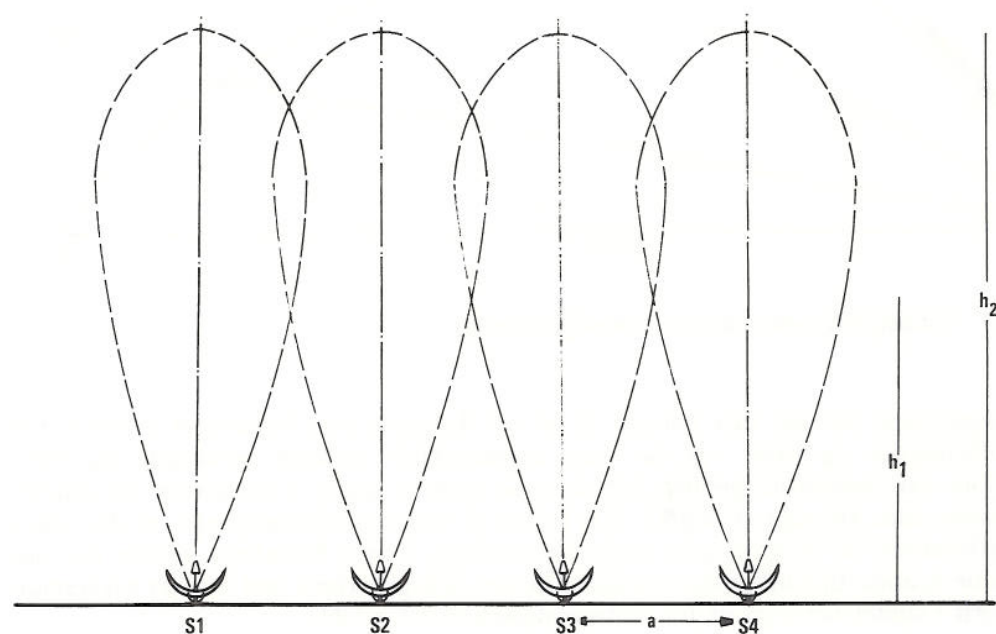
Ved bruk av paraboliske reflektorer oppnådde man en forsterkning av nyttesignalet, samt en viss retningsvirkning. Størrelsen av reflektoren, samt valgte frekvens, avgjør hvor mye.

Det ble utført målinger på slike reflektorer montert i to forskjellige konfigurasjoner (2, s 176).

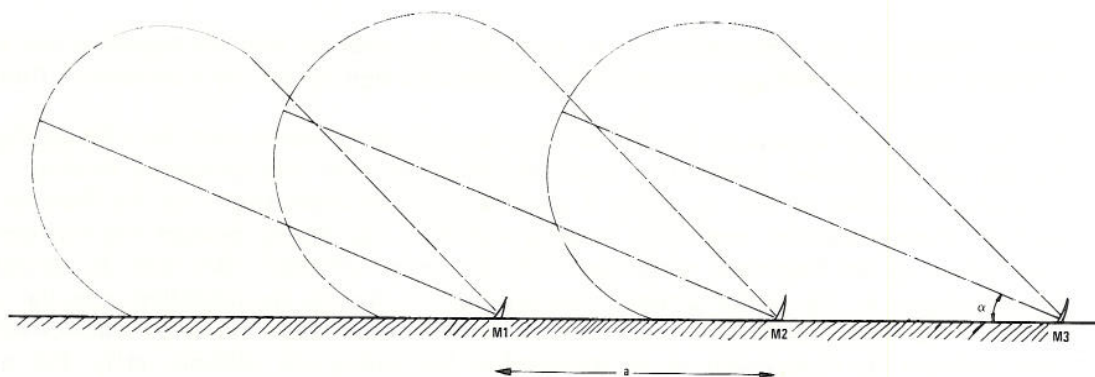
For å kunne detektere fly i stor høyde, ble en oppadrettet reflektor benyttet. Figur 2.6 viser en slik montasje.

En slik sensor gav informasjon i høyde h_1 til høyde h_2 . I høyder under h_1 fikk man p g a retningsvirkningen områder med dårlig dekning selvom avstanden til sensoren her var liten. En vurdering av rekkevidde (forsterkning) må i praktisk bruk veies mot lobebredde, som igjen må betraktes i forhold til nødvendig avstand mellom hver sensor. Fordelene ved en slik montasje var at vindgenerert støy var uavhengig av vindretningen, og at sensorens retningsvirkning reduserte feilkildenes innflytelse.

Ved å tilte reflektorene får man et "akustisk gjerde" som vist på figur 2.7. Reflektorene må dimensjoneres slik at ønsket bredde på loben oppnås for det aktuelle frekvensområde. Avstanden a mellom hver sensor vil derfor være gitt av den maksimale høyde h som velges, samt den rekkevidde og lobebredde som den enkelte sensor har. Tiltvinkelen α må velges under hensyntagen til disse forhold, og slik at ingen dødsone opptrer nede ved bakken.



Figur 2.6 Akustisk sensorgjerde med paraboliske reflektorer



Figur 2.7 "Akustisk gjerde" med tiltede sensorer

REFLEKTORDIAMETER: 100 cm
MÅLT MED OG UTEN REFLEKTOR

HØYDE	250 Hz		500 Hz		1000 Hz		2000 Hz	
	MED	UTEN	MED	UTEN	MED	UTEN	MED	UTEN
1000 (ft)	20 dB	23 dB	40 dB	36 dB	34 dB	32 dB	29 dB	34 dB
5000 ft	12 "	12 "	19 "	17 "	25 "	21 "	19 "	17 "
10 000 ft	12 "	13 "	20 "	18 "	23 "	10 "		
15 000 ft								

REFLEKTORDIAMETER: 170 cm
MÅLT MED OG UTEN REFLEKTOR

HØYDE	250 Hz		500 Hz		1000 Hz		2000 Hz	
	MED	UTEN	MED	UTEN	MED	UTEN	MED	UTEN
1000 (ft)	39 dB	32 dB	43 dB	34 dB	53 dB	37 dB	55 dB	36 dB
5000 ft	33 "	23 "	45 "	26 "	58 "	30 "	40 "	20 "
10 000 ft	20 "	15 "	28 "	15 "	27 "	15 "		
15 000 ft			24 "	6 "	10 "			

Figur 2.8 S/N-forhold

Forsterkningen og lobebredden ble beregnet på teoretisk måte for de brukte reflek-
torer. Etterkontroll ved måling ble så foretatt ved bruk av jetfly som akustisk kilde,
og viste noenlunde overenstemmelse for det gitte frekvensområdet (2, s 191).

En tabellarisk oversikt over S/N-forholdet målt med og uten reflektor er vist i figur
2.8.

2.9 Sammendrag og vurdering av målinger

Dette avsnitt gir en sammenfatning av teori og de resultater som ble oppnådd ved de tidligere beskrevne målinger og analyser av akustiske signaler fra fly i horisontal flukt.

En stor serie med opptak av flystøy er blitt foretatt på Ørlandet med fly i forskjellige høyder og hastigheter. Forskjellige analyser bekreftet både støyspekterets struktur og tidsforløp og viste at det er mulig å prediktere intensitetsforløpet ut fra fluktparametere. Overlydssmellet inntreffer naturlig nok bare når flyene beveger seg hurtigere enn lyden, og det begrenser straks anvendbarheten av metoden. Det som da gjenstår for deteksjon av fly under generelle betingelser, er støyen fra jetstrålen som har et kontinuerlig spektrum. Andre lydgenererende mekanismer som vifter og kompressorer samt friksjon fra flykroppen, er av underordnet betydning ved militære jettfly. Her må det muligens gjøres en unntakelse for plystrelyder på grunn av utvendig utrustning, våpenfester o.l., men denne komponenten er sterkt avhengig av hastighet, og den er dårlig reproduserbar.

Jetstøyen har et meget høyt lydnivå, 120 dB og mer i en avstand av 30 m fra flyet. Den har nær gaussisk amplitudfordeling og et kontinuerlig støyspektrum som har nær konstant effekt pr oktavbånd over frekvensområdet 500 til 10 000 Hz. Lydnivået er sterkt avhengig av utstrømningshastigheten, og utstrålingsdiagrammet er hovedsakelig bestemt av strålens dimensjoner.

Overføringsmediet introduserer en dempning som er sterkt avhengig av frekvens, temperatur og luftfuktighet. Dette gir en viss mulighet for avstandsbestemmelse forutsatt at værforholdene på stedet er kjent. Dessuten vil vind, terreng og vegetasjon innføre lyddempning som kan være vanskelig å prediktere, og som vanskeliggjør avstandsbedømmelse selv om en viss forbedring kan oppnås ved at et bestemt observasjonspunkt er "kalibrert". Værforholdene vil også ha en betydelig innflytelse på støyforholdene.

De målinger og forsøk som er utført med detektorene i 3-pkt konfigurasjon indikerer mulighetene for med begrenset nøyaktighet å anslå høyde og retning for overflygende enkeltfly (2, s 23). Flere fly i formasjon kan gi mer usikker bestemmelse. Nivået vil i dette tilfelle øke noe slik at detektoren indikerer lavere flyhøyde enn den korrekte. Feilen vil øke jo flere fly som deltar. En kombinert måling av *nivå* og *varighet* vil muligens gi en antydning om antallet, men usikkerheten vil bli stor.

Ved bruk av paraboliske reflektorer økte forsterkningen med frekvensen, noe som tilsier valg av høy frekvens. Støyen generert av vind minker med økende frekvens slik at S/N-forholdet bedres. Imidlertid er det kjent at dempningen av nyttesignalet øker med frekvensen. Totalt sett måtte man derfor velge et midlere frekvensområde, 500–1000 Hz.

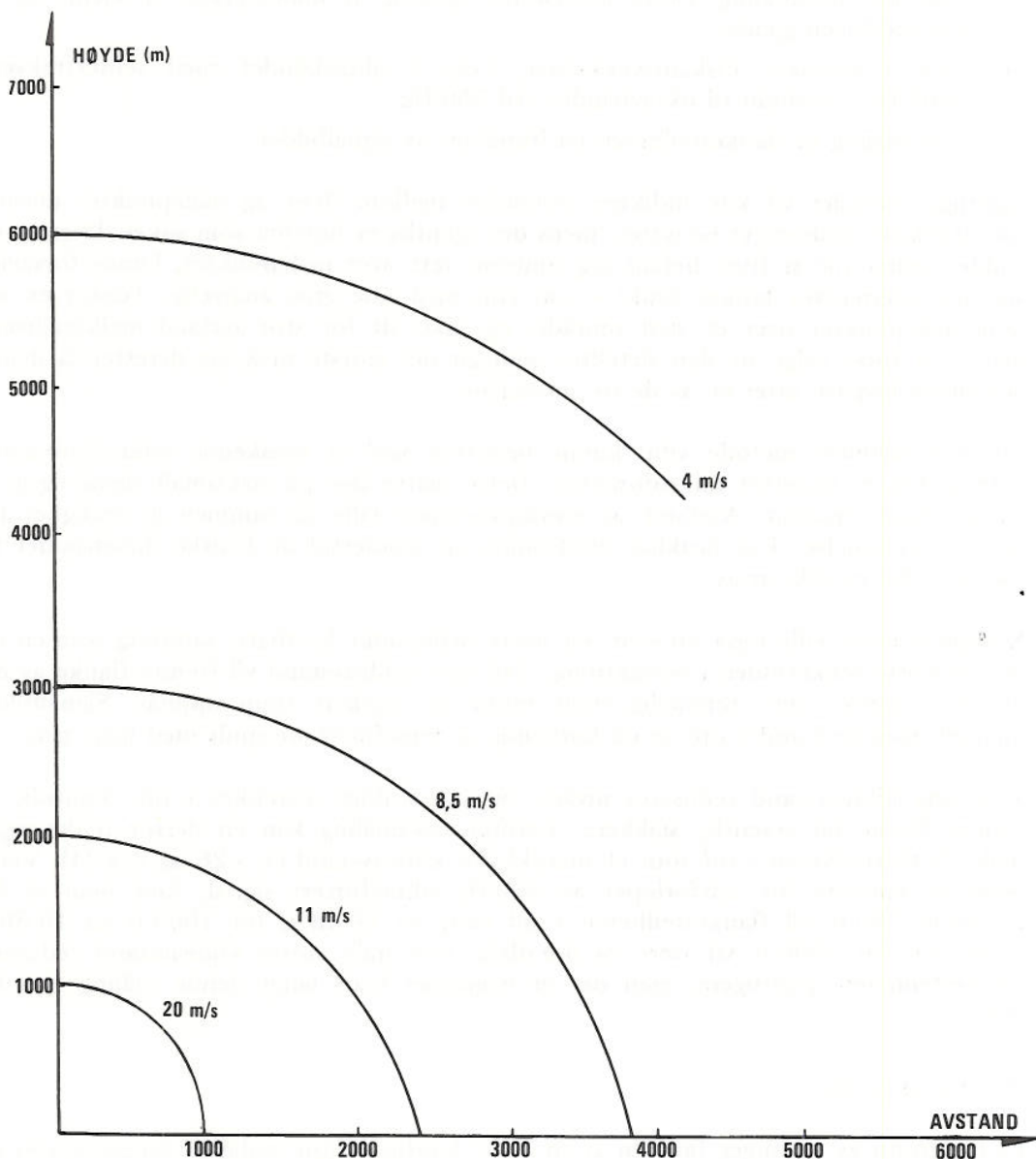
2.10 Muligheter og begrensninger for et akustisk varslingsystem

De målinger og studier som er utført innen prosjektet, indikerer klare muligheter for detektering av fly med en rimelig grad av sikkerhet. Primært gjelder dette jettfly, men kan også omfatte helikopter og propellfly. For å kunne identifisere helikopter fra jettfly kan man basere seg på en lavere frekvens som avslører helikopter-rotorens spektrale støy. Propellfly vil også gi et karakteristisk støyspektrum p g a rotoren. En manuell registrering av lydbildet gir gode muligheter for identifikasjon.

2.10.1 Rekkevidde

På grunn av støykildens karakter vil en ha begrensninger i rekkevidden, og denne vil i stor grad influeres av de rådende værforhold. Tidligere i rapporten er det nevnt hvordan vindsus kan være avgjørende for den brukbare rekkevidde. Ved gitt kildestyrke og med bestemte krav til S/N-forholdet for sikker deteksjon, kan derfor rekkevidden estimeres som en funksjon av vindstyrken (2, s 19). Dette forutsetter at de aktuelle spektrale nivåer for vindstøyen er kjent. I figur 2.9 er estimert rekkevidde som funksjon av vindstyrke vist.

Andre atmosfæriske forhold kan naturligvis også spille en vesentlig rolle ved store kildeavstander. Ved den valgte deteksjonsmetode er en avhengig av et brukbart S/N-forhold idet en velger å undersøke et oktavnband i det midlere/lavere frekvensområdet. De målinger som er utført viser stor spredning, og dette gjør at en ikke har fullgod oversikt over kildestyrken. Estimering av rekkevidden blir derfor unøyaktig.



Figur 2.9 Estimeret rekkevidde som funksjon av vindstyrke

Operativt er dette en lite ønskelig situasjon idet en da bare kan påregne sikker deteksjon ut til korteste rekkevidde, mens den reelle rekkevidde under gunstige værforhold vil være betydelig større.

Ved å betrakte datablad for typiske utendørs mikrofonsett, finne støynivået i 500 Hz oktavbåndet til å være ca 60 dB SPL ved en vindstyrke på 11 m/s (2, s 17). Vindhastigheter på 11 m/s vil fra meteorologiske data settes som øvre grenseverdi i det aktuelle området. Ut fra de målinger som er gjort og med et krav til S/N-forholdet på 6 dB, vil man komme fram til en minimumsrekkevidde på ca 2500 m horisontalt og ca 2000 m vertikalt. Dette er selvsagt et noe grovt anslag, og vindretningen vil f eks bevirke usymmetrisk dekningsområde.

2.10.2 Høydeangivelse

En kan tenke seg dette utført på alternative måter:

- a) Ved ren nivåmåling. Dette forutsetter egentlig at kildestyrken er kjent, og at avstandsloven gjelder.
- b) Ved å betrakte diskantsvekkelsen, f eks i oktavbåndet med senterfrekvens 2000 Hz, i forhold til oktavbåndet ved 500 Hz.
- c) Ved måling av flankesteilheten på fremkant av signalbildet.

Samtlige metoder vil kun indikere *avstanden* mellom flyet og målepunktet dersom ikke-direktivt måleutstyr benyttes, mens det egentlig er *høyden* som søkes. Dersom en hadde visshet for at flyet befant seg omtrent rett over målepunktet, kunne forsåvidt alle tre alternativer tenkes brukt – om enn med noe grov angivelse. Tenker en seg flere målepunkter over et visst område, og ikke alt for stor avstand mellom hvert, måtte en først velge ut den detektor som gir det største nivå, og deretter la denne bestemme høyden etter en av de tre metodene.

En mer raffinert metode ville kunne benyttes med et avsökende mikrofonsystem, eksempelvis et fasestyrt mikrofonarray. Dette måtte låse på maksimalt signal og gi ut elevasjonsinformasjon. Avstand og elevasjonsvinkel ville til sammen gi mulighet for høydebestemmelse. For brukbar oppløsning vil imidlertid de fysiske dimensjoner bli for store for et slikt array.

Kompleksiteten ville også bli stor, og hvert målepunkt kostbart, samtidig som en må ta den korte rekkevidden i betraktning. Ved kort kildeavstand vil fremre flanke av det mottatte signal være temmelig steilt inntil en markert topp oppnås. Signalbildet kjennetegnes med andre ord av en kortvarig og veldefinert støypuls med høyt nivå.

Ved lang kildeavstand reduseres nivået, og signalbildet uttrekkes i tid. Samtidig vil fremre flanke bli vesentlig slakkere. Foruten nivåmåling kan en derfor tenke seg å måle *flankesteilheten i tid* som et uttrykk for kildeavstand (1, s 26 og 2, s 24). Ved å betrakte kurvene for tidsforløpet av 500 Hz oktavfiltrert signal, fant man at for flyhøyde 300 ft vil flankesteilheten i tid være ca 16 dB/s, for 1000 ft ca 10 dB/s, mens den for 3000 ft vil være ca 5,5 dB/s. For enda større kildeavstand reduseres flankesteilheten ytterligere, men det er begrenset hvor langt denne måling kan benyttes.

2.10.3 Retningsangivelse

På bakgrunn av målinger fant en at en 3-pkt konfigurasjon muligens kunne nyttes for å finne høyde og retning til et passerende jetfly. Man utførte derfor målinger med tre synkroniserte målestasjoner (2, s 26–172). Basislengden i triangelet valgtes lik 2000 m.

Denne avstanden var gunstig for å oppnå store nivå- og gangtidsforskjeller i de ulike målepunktene, d v s stor oppløsning.

Det ble på et tidlig tidspunkt klart at relativt store variasjoner kom inn i bildet. Dette førte igjen til at en ikke kunne stille for store forventninger til nøyaktigheten i systemet.

På grunn av stor flyhastighet ble registreringen foretatt en viss tid etter at flyet hadde passert emisjonspunktet. Det betød at man foretok registreringen av et virtuelt fly bak det reelle, men dette forhold har imidlertid i denne sammenheng liten betydning. Med detektorene plassert slik i en viss avstand fra hverandre, vil et forbipasserende fly føre til at lydbildet registreres forskjellig i tid, og det er denne egenskap man ville dra nytte av ved 3-pkt målingene når retningen skulle finnes. For retningsbestemmelse er det gunstig at avstanden mellom hver sensor er stor – jo større gangtidsforskjell registreres. Begrensningen vil ligge i ønsket om at samtlige sensorer får et fullverdig signal å detektere, d v s et tilstrekkelig S/N-forhold, når et fly passerer i yttergrensen av systemets rekkevidde. Det er med andre ord den sensor som ligger lengst borte fra målet som bestemmer systemets rekkevidde.

Ved måling av innbyrdes tidsdifferanser i de tre detektorene kan man for moderate flyhøyder – opp til 2000–3000 ft – få indikert retning dersom den triangulære basislinje er i størrelsesorden 2000 m. Dette betyr at et 3-pkt system kun er brukbart for lavflyvning – vel å merke må også overflygningen skje innen trianglet. Dekningsområdet er således meget begrenset.

Ut fra dette fant man at det var liten forskjell i retningsnøyaktighet for denne sensor-konfigurasjon og en konfigurasjon hvor sensorene var plassert i en dobbel kjede separert i størrelsesorden noen kilometer (se appendiks 3). Den sistnevnte konfigurasjonen vil imidlertid være langt enklere operativt sett og gi et større dekningsområde for samme antall sensorer.

2.11 Krav til – og type informasjon

Selv om forsøkene har vist at det prinsipielt er mulig med noen grad av sikkerhet automatisk å registrere høyde, retning, antall og avstand ved samarbeid mellom flere detektorer, må man likevel konkludere med at kravet til enkelhet og fleksibilitet vil begrense nøyaktigheten til en del av denne informasjonen. Det synes mer fordelaktig med en forholdsvis grov indikasjon som likevel kan være av meget stor verdi som tidlig varsel dersom påliteligheten er god. Grov informasjon om avstand til kilden synes hensiktsmessig å gi ved en enkel nivåmåler med et fåtall terskler. Høydeinformasjon med tilstrekkelig nøyaktighet synes det ikke mulig å oppnå med en realistisk grad av systemkompleksitet. En antallsbestemmelse er mulig med en meget grov oppdeling og et krav om manuell avlytting av lydbildet. Det samme krav til manuell avlytting gjelder også for typeidentifisering av jettfly, helikopter eller propellfly, dersom bare et midlere frekvensområde benyttes.

I det hele tatt viste målingene at man kunne oppnå flere ganger bedre nøyaktighet og pålitelighet ved å avlytte lydbildet enn ved automatisk registrering. Dette var også en effektiv måte å filtrere ut falske alarmer og gi entydig informasjon på. Ved å avlytte lydbildene fra de forskjellige sensorer kunne man med litt trening oppnå en god oversikt over det lokale situasjonsbildet. Retningsinformasjonen fikk man best ved å plassere sensorene i to parallelle kjeder og så registrere posisjonene til sensorene som varslet overflygning. Nøyaktigheten her vil være avhengig av innbyrdes avstand mellom detektorene og avstand mellom kjedene. Også denne informasjonen ble bedre ved å benytte manuell avlytting. Man kan derfor konkludere med at forsøkene viste at man

var best tjent med et system hvor sensorene kan overføre lydbildet til en registreringspost som er manuelt betjent. En operatør vil så på øret tolke de innkomne signaler.

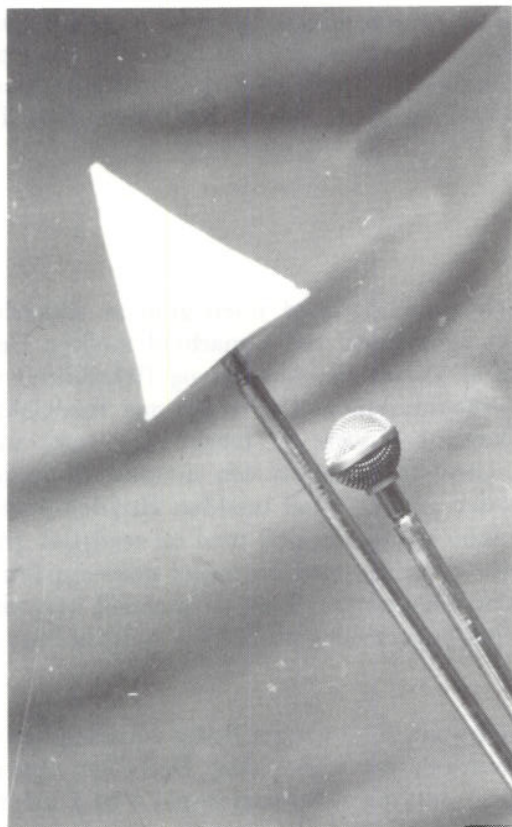
En prototyp til en akustisk deteksjonskjede med manuell overvåking er blitt bygget og utprøvd og er beskrevet i appendiks 3.

2.12 Beskrivelse av en akustisk deteksjonskjede

Den tekniske oppbyggingen av detektorer og registreringsenhet er beskrevet i appendiks 3, imidlertid vil måleutstyrets bruk bli beskrevet i dette avsnittet.

Dersom en tenker seg detektorene plassert i en dobbel kjede med en innbyrdes avstand på noen kilometer, vil hver registreringspost kunne overvåke et område som er begrenset av antall detektorer. Et passende antall detektorer vil ut fra sambandsmessige og pålitelighetsmessige vurderinger være ca 10–15. Prototypen til en slik detektor er vist i figur 2.10.

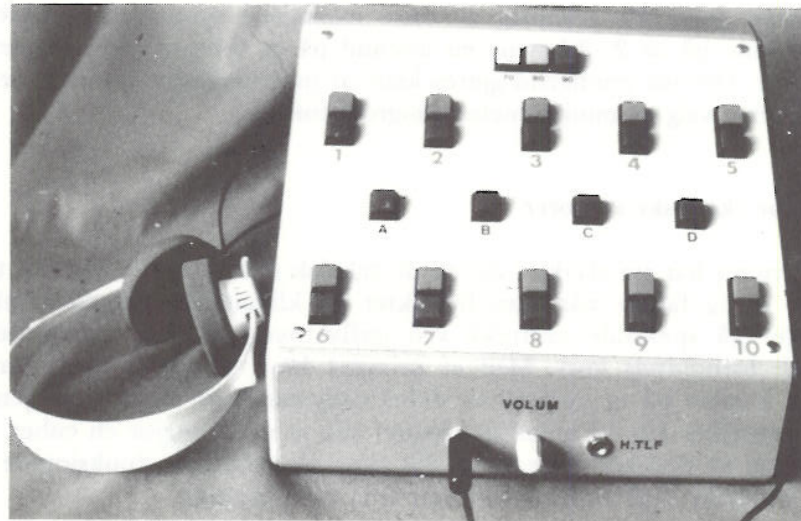
Operatøren ved registreringsposten tar inn samtlige signaler analogt, men må velge manuelt hvilken detektor han skal lytte på. Et velgerpanel der innkoplingstaster er plassert som tilhørende detektorer, vil for hver linje gi et lyssignal når nivået overstiger en terskelverdi. Dette indikerer at noe foregår og operatøren vil da kople seg inn på linjen og vurdere lydbildet, se figur 2.11.



Figur 2.10a Mikroelement med og uten "wærhatt"



Figur 2.10b Akustisk detektor plassert i terrenget

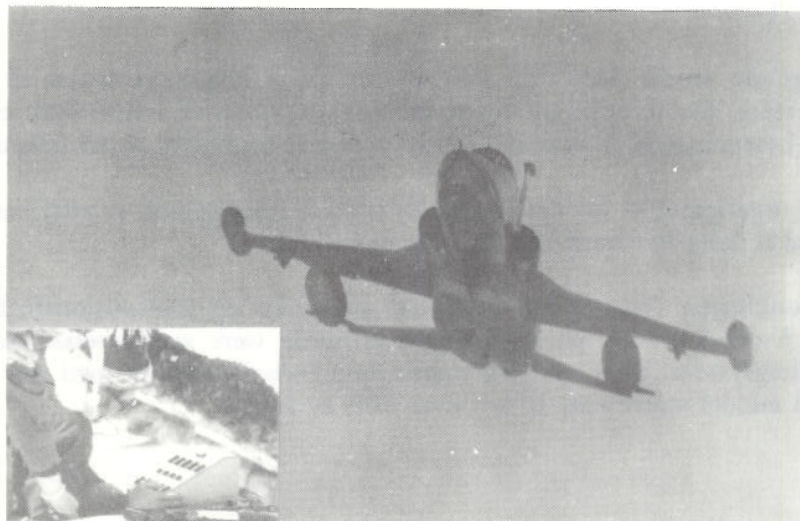


Figur 2.11 Velgerpanel for akustiske sensorer

Lyssignalene fra de to kjedene vil også benyttes til å indikere flyretningen til kilden. Videre vil en enkel nivåindikator vise lydnivået til den detektor som er innkoplet.

Selv om prototypestyret for det meste har benyttet signaloverføring fra detektorene til registreringspost via kabel, vil det for praktisk bruk være påkrevd med trådløs signaloverføring. I tillegg til overføring av analogsignalet vil hver detektor da måtte sende identifikasjon. Normalt vil senderen være i en "stand by" posisjon og kun aktiviseres når et tilstrekkelig signal er til stede. Automatisk initierte periodiske meldinger som indikerer at den enkelte detektor er operativ, bør sendes. Operatørpanelet vil normalt bare varsle operatøren når slike testsignaler uteblir.

Med det utstyret som er skissert ovenfor, ble det foretatt en serie av mest mulig realistiske feltprøver. Overflygninger ble foretatt med jetjagere av typen F-5 etter et organisert ruteopplegg i høyder fra 600 ft til 6000 ft, se figur 2.12. Ved å benytte både visuelle og auditive signaler var det mulig å retningsbestemme flyets rute og



Figur 2.12 Feltprøver med jetjagere av typen F-5

posisjon ganske godt. På grunnlag av disse målingene syntes en innbyrdes avstand mellom sensorene på ca 2–3 km og en avstand på ca 6 km mellom kjedene, å gi de beste resultater. Det må imidlertid gjøres klart at utprøvingene bare er foretatt for et sterkt begrenset utvalg av mulige meteorologiske forhold.

2.13 Konklusjon for akustiske sensorer

Akustiske sensorer har sin styrke i det at de teknisk sett er enkle. Man vil tro at dette er en meget viktig faktor når man betrakter de klimatiske forhold de skal operere under. Mangel på spektrale særtrekk ved jettflystøyen bevirker imidlertid at rekkevidden vil bli forholdsvis kort. Med et primært krav til sikker deteksjon synes det derfor riktig å satse på et system av detektorkjeder hvor manuelt betjente registreringsposter overvåker 10–15 enkelt-detektorer slik at dette utgjør en enhet. Det prototypustyret som er tilvirket viser at en slik akustisk enhet kan funksjonere tilfredsstillende, men indikerer også de begrensninger som må påregnes.

3 INFRARØDE SENSORER

For mer detaljerte teoretiske betraktninger og beskrivelser av måleprogram henvises det til (3), "Deteksjon av fly ved termisk avbildningsteknikk". Dette kapittel er ment som en kort oversikt over de oppnådde resultater og er delvis et konsentrat av (3).

3.1 Innledning

Termisk avbildning og deteksjon har i de senere år blitt meget aktuell for passiv observasjon og overvåking. Kjennetegnende for termisk avbildning er:

- Det er en passiv teknikk som baserer seg på scenens/objektets egenstråling og derfor er uavhengig av naturlig eller kunstig belysning.
- Sikten, og dermed deteksjons/avbildningsavstanden, er bedre ved infrarøde bølglengder enn ved synlig lys, men det representerer likevel ikke en allværsteknikk så som radar
- Billedoppløsningen kan gjøres helt sammenlignbar med avbildningssystemer for synlig lys (TV)

Den foreliggende studie har hatt som målsetting å belyse yteevnen til et termisk deteksjonssystem for å oppdage og lokalisere fly. Det er i hovedsak en teoretisk studie, men beregningene er søkt understøttet ved et begrenset antall feltmålinger.

Et vesentlig utgangspunkt for det forslag til teknisk løsning som er gitt, har vært at et slik system skal være lett bærbart: lav vekt og volum.

En riktig konklusjon fra studien er at ved gode sikt- og transmisjonsforhold vil det være mulig å detektere fly på avstander som burde være av interesse i sammenheng med et varslingsystem. Slike sikt- og transmisjonsforhold opptrer med høy sannsynlighet; sikt er i middel større enn 10 km over 80% av året.

3.2 Karakterisering av termisk stråling fra fly

En vil i hovedsak ha tre kilder for termisk stråling fra et fly:

a) *Termisk stråling fra flykroppen*

Denne skyldes aerodynamisk oppvarming av flykroppen og varmeutvikling i komponenter inne i flyet.

b) *Termisk stråling fra motorene*

Utblåsningsrørene på en jetmotor emitterer som et sort legeme med en temperatur på 400–600°C.

c) *Spektral stråling fra de varme eksosgassene*

Gassene vil emittere sterkt innenfor bølglengdeområder som er bestemt av eksosgassene.

Litteratur som behandler måling av stråling fra fly har ikke vært tilgjengelig under dette prosjekt. Det ble derfor utført noen målinger mot et fly av typen F-5A.

Utstyret som ble benyttet er konstruert for andre formål og egner seg ikke særlig godt til kvantitative målinger. Måleresultatene blir derfor relativt usikre. En bedre beskrivelse av strålingen fra fly må derfor baseres på nøyaktigere og mer omfattende målinger. Disse er imidlertid kompliserte og tidkrevende å gjennomføre idet slike målinger må utføres fra et annet fly som følger flyet man skal måle. Videre må målingene utføres med høy spektral oppløsning og foretas for:

- et antall aspektvinkler, minst 10
- ulike flyhøyder, minst 3
- forskjellige hastigheter
- flere flytyper, idet de ulike jetmotortyper har forskjellige strålingsdiagrammer

3.3 Atmosfæretransmisjon

Strålingen fra et fly må forplante seg gjennom atmosfæren fram til detektoren. Et fly kan betraktes som en punktkilde med spektral strålingsstyrke I_λ gitt i W/str μm . Den spektrale irradians i avstand R fra kilden er da

$$E_{\Delta\lambda}(R) = \tau(\lambda, R) \frac{1}{R^2} I_\lambda \quad \text{W/m}^2 \mu\text{m} \quad (3.1)$$

$\tau(\lambda, R)$ er transmisjonen i atmosfæren ved bølglengden λ og over avstanden R. Irradiansen innenfor bølglengdeintervallet $\Delta\lambda$ finnes ved å integrere ligning (3.1)

$$E_{\Delta\lambda}(R) = \frac{1}{R^2} \int_{\Delta\lambda} \tau(\lambda, R) I_\lambda d\lambda \quad \text{W/m}^2 \quad (3.2)$$

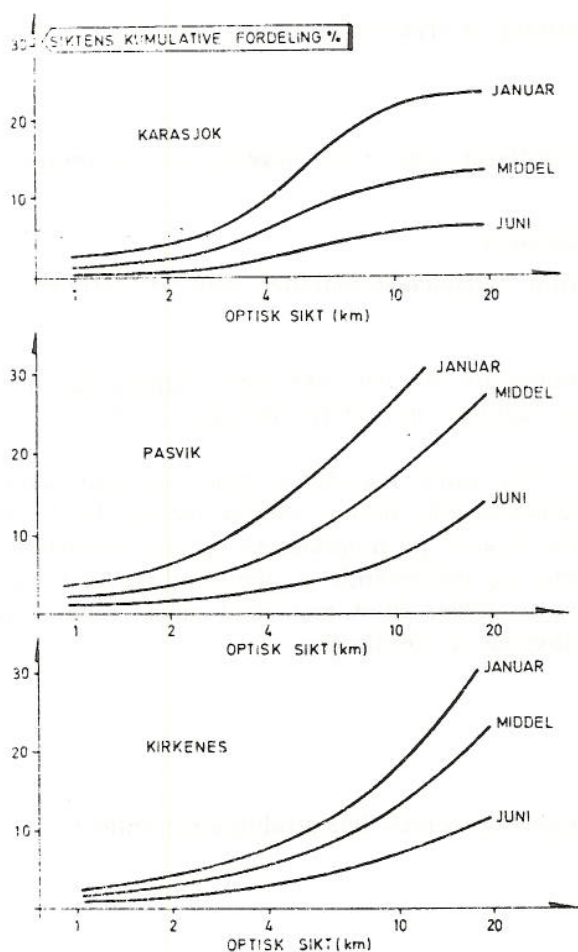
Transmittansen $\tau(\lambda, R)$ kan uttrykkes som

$$\tau(\lambda, R) = e^{-\sigma(\lambda) \cdot R} \quad (3.3)$$

der $\sigma(\lambda)$ er dempningskoeffisienten. Denne kan skrives som summen av to ledd

$$\sigma(\lambda) = \alpha(\lambda) + \gamma(\lambda) \quad (3.4)$$

der α er absorpsjonskoeffisienten og γ er spredningskoeffisienten. α gir uttrykk for hvor sterkt strålingen absorberes av gassene i atmosfæren, mens γ er et uttrykk for demping p g a spredning av strålingen fra molekyler og aerosoler i atmosfæren.



Figur 3.1 Kumulativ siktfordeling for noen stasjoner i Nord-Norge

	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DES
ALTA	2,5	2,5	2,7	3,6	5,1	7,0	8,9	8,4	6,5	4,7	3,6	2,9
PASVIK	2,0	2,0	2,3	3,5	4,9	7,3	9,5	8,8	6,5	4,6	3,3	2,6
KARASJOK	1,7	1,7	2,1	3,2	4,6	6,4	8,6	8,1	6,1	4,0	2,8	2,1

Tabell 3.1 Midlere vanndampinnholdet i atmosfæren for et normalår i gram H_2O pr m^3 luft

Konsentrasjonene av de fleste gassene i atmosfæren er relativt konstante. Årsaken til variasjoner i transmisjonen over en gitt avstand er variasjoner i konsentrasjon av vanndamp og aerosoler. Vanndampinnholdet er avhengig av lufttemperaturen og den relative fuktigheten.

Tabell 3.1 viser midlere vanndampinnhold i atmosfæren for en del steder i Finnmark.

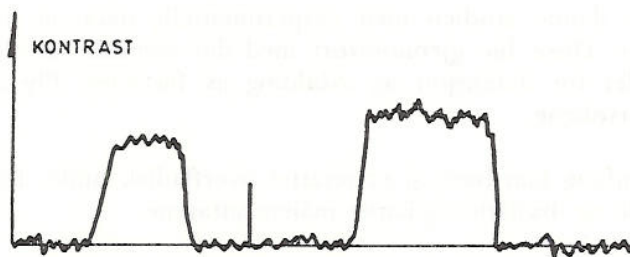
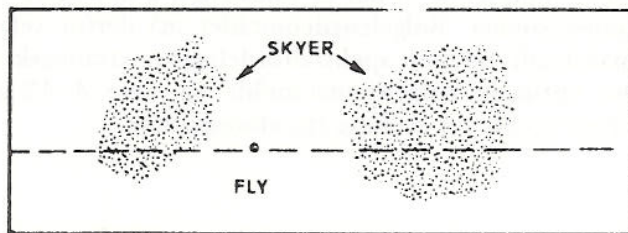
Et termisk deteksjonssystem vil være begrenset av at transmisjonen av termisk stråling gjennom skyer for alle praktiske formål kan settes lik 0. Det er derfor ikke mulig å detektere fly som er skjermet av skyer.

Dessuten vil forekomster av dis nedsette deteksjonsavstanden. Betydningen av dette kan vurderes ved hjelp av figur 3.1 som viser kumulativ siktfordeling for noen observasjonssteder i Nord-Norge. Som en ser vil optisk sikt være større enn 4 km, og dermed deteksjonsavstand større enn 16 km i middel 92–95% av tiden for de tre stedene.

3.4 Bakgrunnstøy

Den effektive stråling fra målet er lik forskjellen mellom strålingen fra målet og strålingen fra bakgrunnen. For et deteksjonssystem som skal detektere fly, vil bakgrunnsstrålingen bestå av termisk stråling fra atmosfæren og skyer og spredt sollys.

En kan tenke seg det totale observerte luftrom delt opp i oppløsningsceller som undersøkes ett for ett, og problemet blir å detektere forskjellen i mottatt stråling fra en celle som inneholder målet, og en som ikke inneholder målet. Strålingen fra en



Figur 3.2 Øverst: En delvis skyet himmel med et fly
Nederst: Skjematisk fremstilling av kontrasten mellom skyene eller målet og klar himmel når den er målt langs den stiplede linjen på den øverste tegningen

celle som ikke inneholder målet er lik summen av strålingen fra atmosfæren, spredt sollys og strålingen fra sky- eller himmelbakgrunn. Dersom oppløsningscellen også inneholder målet, vil strålingen fra sky- eller himmellegg. Det er dette tillegget som skal detekteres.

Den spektrale radiansen fra en skyfri himmel avhenger av temperaturfordelingen i atmosfæren, konsentrasjoner av gasser og vanddamp, og elevasjonsvinkel.

Det er også viktig å kjenne til hvilke kontraster en har i bakgrunnen og hvilken romlig fordeling disse har. Et skjematisk bilde av en delvis skyet himmel med et fly er vist i figur 3.2.

Ved å benytte den kjennskap en har til den romlige fordelingen av bakgrunnsvariasjonene og signalet fra målet, kan denne støyen reduseres ved f eks:

- Filtrering basert på at kontrastvariasjonene i bakgrunnen vil variere langsommere enn signalet fra flyet.
- Romlig filtrering basert på at målet utgjør et punktmål mens variasjonene i bakgrunnen vil dekke flere bildelementer.
- Utnyttelse av den karakteristiske spektralfordelingen for stråling fra fly ved å detektere stråling fra varm CO_2 i eksosen. Det er ikke kjent om eksosgassen vil gi bidrag til strålingen rett forover.

Dette er forhold som må studeres nærmere i et eventuelt utviklingsprosjekt.

3.5 Valg av frekvensområde

Optimalt bølgelengdeområde må bestemmes ut fra den kjennskap en har til spektralfordelingen for stråling fra fly og for strålingsgradienter i bakgrunnen. Videre må en også ta hensyn til atmosfærens transmisjon og støy som skyldes statistiske fluktuasjoner i fotonfluksen fra bakgrunnen. Valget av bølgelengdeområde kompliseres ytter-

ligere ved at spektralfordelingen for stråling fra fly er avhengig av aspektvinkelen. Ser en et fly bakfra eller fra siden, vil stråling fra jetmotor og eksosgass dominere. Kontrasten vil da være maksimal i nærheten av $4 \mu\text{m}$. Ser en et fly rett forfra, vil flykroppen skjerme for stråling fra utblåsningsrørene. Flykroppen vil også delvis skjerme for strålingen fra eksosgassene. Det har imidlertid ikke vært tilgjengelig informasjon under denne studien som gir grunnlag for å estimere hvor effektiv denne skjermingen er.

Dersom strålingen fra eksosgassene blir effektivt skjermet, er det stråling som skyldes aerodynamisk oppvarming som dominerer når flyet ses rett forfra. Spektralfordelingen har da et maksimum nær $9 \mu\text{m}$. Det er innlysende at det er vanskeligst å detektere fly som kommer inn rett mot deteksjonssystemet. Bølgelengdeområdet må derfor velges slik at signal-støyforholdet blir maksimalt for den spektralfordeling av strålingskontrast fly-bakgrunn en da har. Det optimale bølgelengdeområde vil være $8-12 \mu\text{m}$ dersom en antar at flykroppen skjermer totalt for stråling fra eksosgassene.

3.6 Resultater av måleteknisk art

For å understøtte beregningene i denne studien med eksperimentelle data, er det utført et begrenset antall målinger. Disse ble gjennomført med det termiske avbildningssystemet som FFI har utviklet for deteksjon og avbildning av fartøyer. Fly av typen F-5A ble benyttet under forsøkene.

Feltmålinger av et så begrenset omfang kan bare gi et relativt overfladisk bilde. Bl a vil parametre som flytype, flyhøyde og -hastighet påvirke måleresultatene.

De viktigste parametre for det termiske avbildningssystem som ble benyttet under forsøkene:

Totalt synsfelt	$1^\circ \times 4,6^\circ$
Instantant synsfelt	$0,5 \times 0,5 \text{ mrad}$
Bølgelengdeområde	$8-12 \mu\text{m}$
Billedfrekvens ved opptak	15 bilder pr sekund
Ekvivalent støytemperatur (NET)	$\approx 0,04^\circ\text{C}$

Disse parametrene er svært forskjellige fra de som vil være aktuelle for et flydeteksjonssystem. Et slikt system vil ha et stort synsfelt, $10-20^\circ$ elevasjon og $40-60^\circ$ i asimut. Det instantane synsfeltet vil antakelig være større og billedfrekvensen lavere. Forskjellen i billedfrekvens og instantant synsfelt har liten direkte betydning, men det lille totale synsfeltet førte til at flyet under forsøkene måtte følges for at det hele tiden skulle være i synsfeltet.

Deteksjonssystemet var plassert på FFI, og flyet fulgte en linje FFI-Gardermoen med elevasjonsvinkel 6° . Billedinformasjonen ble tatt opp på en båndopptaker slik at den kunne spilles av senere.

Sammenlignes målingene av den termiske strålingen fra flyet med de teoretiske beregningene, vil man komme fram til at overensstemmelsen er relativt god, og betraktninger om stråling fra flyet er gjort på bakgrunn av rimelig gode antakelser.

3.7 Muligheter og begrensninger for et IR-varslingsystem

Et deteksjonssystem som baserer seg på termisk stråling kan aldri bli et allværssystem. I tåke vil transmisjonen gjennom atmosfæren være nesten like dårlig i det infrarøde bølgelengdeområdet som i det synlige bølgelengdeområdet, en er også begrenset av at transmisjonen gjennom skyer i praksis er lik null. Transmisjonen i dis (visuell sikt > 1 km) vil være bedre i IR-området enn i det synlige området.

Selv om deteksjonsavstanden er avhengig av værforholdene, viser meteorologiske observasjoner at værforholdene i Nord-Norge er gunstige m h t optisk sikt og derfor også m h t transmisjonsforholdene ved infrarøde bølgelengder.

Hver IR-sensor er tenkt å operere som en bakke-til-luft sektorovervåker for lavdeteksjon av fly. Når sensoren har etablert positiv identifikasjon av et mål med tilstrekkelig nøyaktig vinkelinformasjon (i asimut) til å kunne angi retningen til målet, er funksjonen komplett. Dekningen i elevasjon er bestemt av laveste og høyeste sjikt målet skal detekteres i. Tentativt settes laveste mål høyde til 500 ft og høyeste til ca 10 000 ft. Dette gir et synsfelt på ca 10° i elevasjon ved dekningsavstander på 20 km. Søkefeltet i asimut er tentativt satt til 50° . På grunnlag av de spesifikke systemparametrene vist i tabell 3.2 er deteksjonsavstandene som funksjon av optisk sikt beregnet og vist i (3).

TOTALT SYNSFELT	10 x 50°
INSTANTANT SYNSFELT	1,75 x 1,75 mrad
BILLEDID	0,5 s
APERTURDIAMETER	8,0 cm
F-NUMMER	1,4
TRANSMISJON I DET OPTISKE SYSTEM	75%
ANTALL DETEKTORER	100
BØLGELENGDEOMRÅDE	8-12 μm
VEKT	< 20 kg

Tabell 3.2 Karakteristiske parametre for deteksjonssystemet

3.8 Konklusjon

De beregninger og målinger som er utført under denne studien, viser at det er mulig å utvikle deteksjonssystemer, basert på deteksjon av termisk stråling fra fly, som er i stand til å detektere fly fra store avstander.

For å kunne velge optimale systemparametre og optimal signalbehandling, er det nødvendig med en bedre beskrivelse av stråling fra fly og av kontrastvariasjoner i bakgrunnen enn det har vært mulig å komme fram til i løpet av denne studien. Denne beskrivelsen kan bare foretas på grunnlag av feltmålinger.

Et termisk flydeteksjonssystem synes derfor å kunne representere et viktig passivt observasjons- og overvåkingsinstrument.

4 UTPLASSERING OG SAMBAND FOR LUFTVAKTPOSTSENSORER

4.1 Innledning

Det er i de foregående kapitler beskrevet to typer sensorer som er aktuelt utstyr for luftvaktposter. Det vil være et noe forskjellig sambandsbehov for de to. De akustiske sensorene vil kreve et kommunikasjonssystem fra sensor til registreringspost og et samband fra registreringspost fram til kontrollseneter. De infrarøde sensorene trenger imidlertid ikke et samband mellom sensor og registreringspost, da disse fysisk vil være plassert sammen. Dette kapittel vil skissere de nødvendige kommunikasjonssystemene og den geografiske utplassering av sensorene tilpasset deres informasjonstype og ytelse.

4.2 Samband for akustiske sensorer

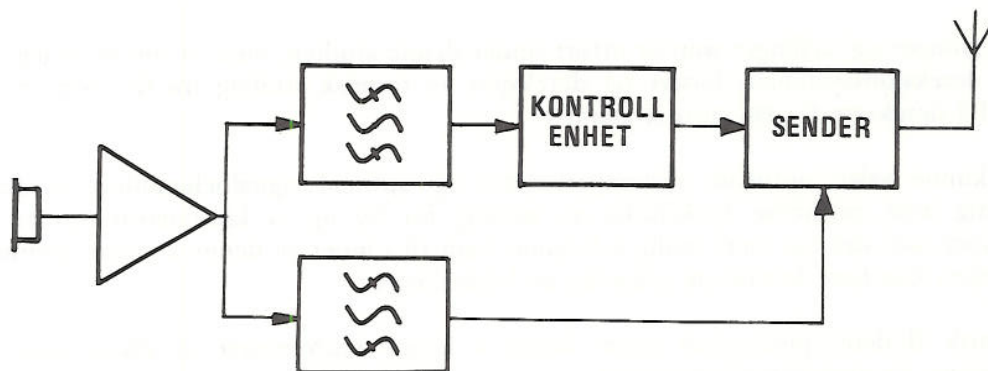
Når et stort antall akustiske sensorer plasseres i et område, er radio den mest praktiske løsning for å overføre informasjonen fra sensorene til en registreringsenhet. Siden antallet sensorer blir forholdsvis stort, blir det lett problemer med interferens og frekvenstildeling. Innenfor et område som dekkes av en registreringsenhet, vil det gå lange perioder uten aktivitet. Når først noe skjer vil sannsynligvis flere sensorer registrere aktivitet. Dette fører til at senderne bare bør aktiviseres når det er nødvendig, og at kontrollenheten må kunne registrere informasjon fra flere sensorer samtidig. Fordi senderen kan være passiv i lange perioder, er det ønskelig at operatøren ved registreringsenheten kan få en funksjonstest med jevne mellomrom. Denne bør utløses automatisk og kan også brukes til å kontrollere kalibreringen av hele systemet.

4.2.1 Kontroll av senderen

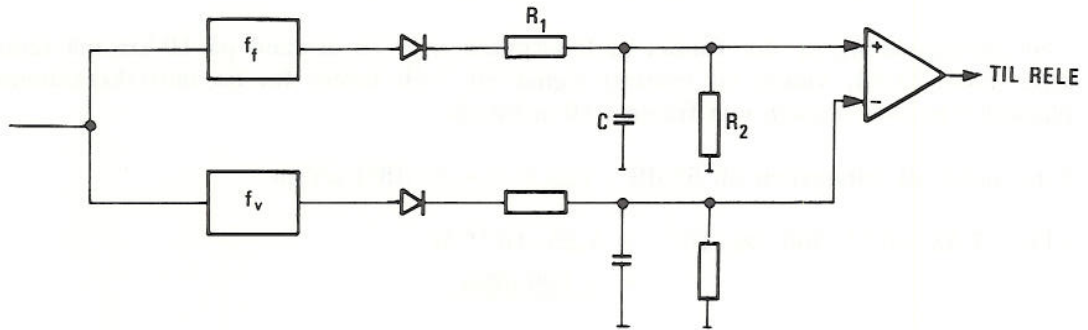
Figur 4.1 viser hvordan en akustisk sensor kan være bygd opp. De akustiske signalene fra mikrofonforsterkeren brukes som inngangssignaler til en kontrollenhet som slår senderen på når det er informasjon å overføre. En enkel måte å skaffe et egnet kontrollsignal på, er å likerette og glatte utgangssignalet fra mikrofonforsterkeren. Når det glattede signal overskrider en satt terskel, slås senderen på.

Det er ønskelig at sensoren gjøres så følsom som mulig uten at antallet falske alarmer blir for høyt. Falske alarmer kan skyldes vindstøy, nedbør eller dyr o s v.

For varsling av fly kan en ut fra kjennskap til flystøy optimalisere kontrollenheten. Ved å velge den del av frekvensspekteret der det er størst forskjell mellom flystøy og



Figur 4.1 Oppbygging av akustisk sensor



Figur 4.2 Akustisk sensor med variabel terskel

vindstøy, kan antall falske alarmer minke. Andre metoder som kan være aktuelle, er å måle vindstøyen og la denne variere terskelen for påslag av senderen. Flystøyen må selvsagt ikke kunne påvirke denne terskelen. Selv om det viser seg ønskelig med flere av disse metodene, vil kontrollenheten bli svært enkel.

I figur 4.2 er vist hvordan et system med variabel terskel kan realiseres. I en frekvensluke tilpasset vindstøyens spektrum likerettes signalet og glattes med meget stor tidskonstant. Signalet i en annen frekvensluke tilpasset flystøyen behandles på samme måte, og en komparator måler hvilken av disse to signalene som er sterkest. Senderen slås på når flystøyen overstiger vindstøyen. Ved å variere R_1 og R_2 kan tiden for inn- og utkøpling varieres.

4.2.2 Valg av frekvensområde, modulasjon, sendereffekt

Frekvens

Kravet til sensorens vekt, størrelse og kamuflasjemulighet gjør at antennene bør ha små fysiske dimensjoner. I VHF- og UHF-båndene vil en piskantenne tilfredsstillende kravene til størrelse. Generelt vil også interferensproblemene bli mindre i dette frekvensområdet enn for lavere frekvenser.

Modulasjon

Avgjørende for valget av modulasjonstype blir kravet til dynamikk på overføringskanalen. Det bør være et lineært område på minst 40 dB regnet fra støynivået. Frekvensmodulasjon vil derfor være best egnet. Et FM-system med 25 kHz mellomfrekvensbåndbredde og spiss deviasjon på 6 kHz vil gi 20 dB forbedring av signal/støy-forholdet.

Sendereffekt

En beregning av nødvendig sendereffekt vil alltid være belastet med feil, og må derfor bare betraktes som veiledende. De lokale forhold vil også kunne variere sterkt.

Beregningen benytter feltstyrkekurver utgitt av CCIR (Report 370). Ifølge denne vil feltstyrken 10 km fra senderen være 65 dB referert til $1 \mu\text{V/m}$ når utstrålt effekt er 1 kW og senderens antennehøyde er 37 m og mottakerens er 10 m. Senderens antennehøyde er gitt som høyde over midlere terrenghøyde. Dette gjelder for småkupert terreng og frekvenser mellom 30 og 250 MHz. De aktuelle antennehøydene vil

bli vesentlig lavere, og feltstyrken må derfor korrigeres. For flatt terreng vil antatt senderantennehøyde bli ca 1,5 m og mottakerhøyde 3 m.

Ved ekstrapolering er det funnet at feltstyrken over en avstand på 10 km må reduseres med 25 dB, videre vil mottatt signal bli 7 dB lavere fra en mottakerantenne plassert 3 m over bakken enn fra en i 10 m høyde.

Etter dette vil feltstyrken bli $65 \text{ dB} - (25 + 7) = 33 \text{ dB}/1 \mu\text{V/m}$

$$\begin{aligned} kTB &= 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 30 \cdot 10^3 = 1,25 \cdot 10^{-16} \text{ W} \\ &= \underline{\underline{-129 \text{ dBm}}} \end{aligned}$$

Ekvivalent støynivå inngang av mottaker, $NF = 3 \text{ dB}$

$$= \underline{\underline{-126 \text{ dBm}}}$$

Tilgjengelig effekt fra piskantenne:

$$p_a = \frac{(e \cdot \frac{2 \cdot \lambda}{\pi})^2}{4 r}$$

der e – feltstyrken
 λ – bølgelengden
 r – strålingsmotstand

Antar $f = 150 \text{ MHz}$, $e = 1 \mu\text{V}$.

$$\begin{aligned} p_a &= \frac{(10^{-6} \cdot \frac{2 \cdot 2}{\pi})^2}{4 \cdot 36} = 1,2 \cdot 10^{-14} \text{ W} \\ &\approx \underline{\underline{-110 \text{ dBm}}} \end{aligned}$$

For $S/N = 40 \text{ dB}$ ut fra diskriminator kreves $S/N \text{ inn} = 20 \text{ dB}$ (20 dB FM forbedring).

Nødvendig signalnivå: $-126 \text{ dB} - 20 \text{ dB} = -106 \text{ dB}$.

1 kW p e p gir $-110 \text{ dB} + 33 \text{ dB} = -77 \text{ dB}$

Margin: $-106 \text{ dB} - 77 \text{ dB} = 29 \text{ dB}$.

1 W utstrålt effekt vil derfor gi ca 10 km rekkevidde.

Sender

Senderen vil sannsynligvis kunne bygges opp av et standard effektforsterkertrinn og med en VCXO som kombinert frekvenskilde og modulator.

For å redusere interferensproblemene og spare batterier, bør uteffekten kunne justeres ned for de sensorene som ligger nærmere kontrollenheten enn 10 km.

Mottakersystem

Mottakeren i registreringsenheten bør kunne ta imot data fra alle tilhørende sensorer parallelt. Antallet mottakere blir da lik antallet sensorer som skal overvåkes, men et felles RF-trinn vil kunne benyttes.

For at registreringsutstyret ikke skal slå ut på mottakerens støy når sending ikke pågår, må mottakerne ha et egnet squelchsystem.

Denne vurderingen av sambandet mellom sensor og registreringsenhet er delvis basert på erfaringer og målinger med denne type utstyr. Beregningen gjelder for småkupert terreng, og er konservativ. Dersom senderen plasseres på en høyde, vil dette sannsynligvis gi langt større rekkevidde. Dette går også tydelig fram av beregningen idet en regner 25 dB reduksjon av feltstyrken dersom senderantennhøyden senkes fra 37 til 1,5 m.

Dersom en luftvaktpostkjede etter det foreslåtte konsept skal realiseres, må det gjøres en rekke målinger på de aktuelle utplasseringsstedene, både for å finne ut hvor og hvordan sensorene bør plasseres i terrenget for å oppnå størst deteksjonssannsynlighet, og for å få undersøkt sambandsforholdene på de aktuelle strekningene.

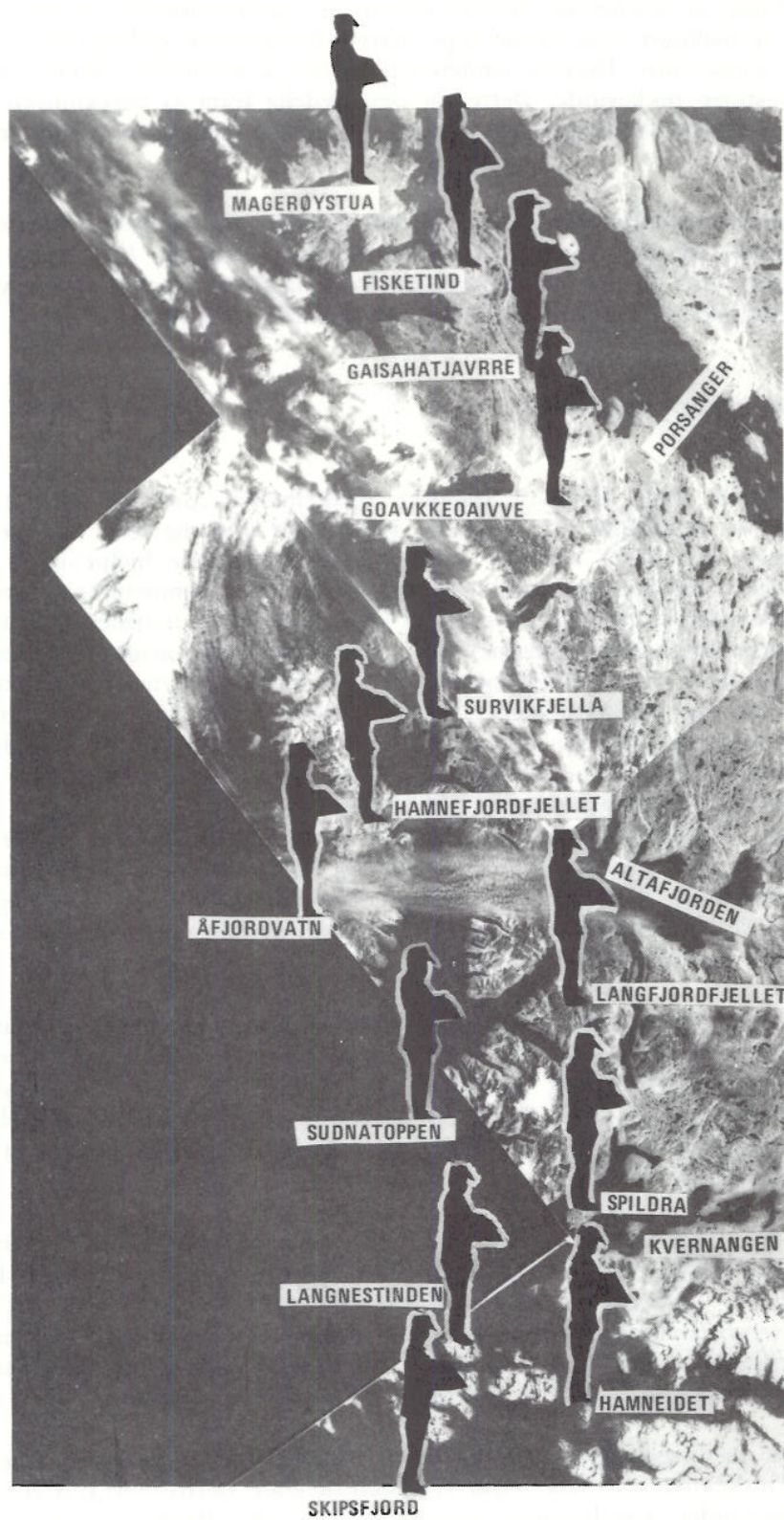
4.3 Utplassering av luftvaktpostsensorer

Målet har vært å finne fram til tekniske hjelpemidler som vil øke deteksjons-sannsynligheten av lavtgående fly, samtidig som det er ønskelig med noe mer detaljerte opplysninger om målet enn det som er mulig uten disse hjelpemidler. Det er imidlertid viktig at informasjonen fra luftvaktpostene, som sammenliknet med informasjon fra f eks radarsystemer vil være meget grov, ikke blir motstridende til informasjon fra de andre sensorene i området. I så tilfelle kan tidligvarsel fra sensorene ha negativ virkning. Dette er en viktig faktor som det må tas hensyn til under forslag til utplassering av de nye luftvaktpostene. Dersom postene plasseres i områder med stor flyaktivitet og hvor det vil være flere trafikkretninger i samme tidsrom, vil informasjonen fra postene fort bli lite entydige p g a liten ytelse m h t nøyaktighet, og gi et forvirrende bilde av luftsituasjonen. En slik situasjon tenkes å kunne oppstå inne på Finnmarksvidda. Simuleringer har her også vist at de foreslåtte mobile radarene har meget stor seighet, slik at denne ikke blir vesentlig øket ved bruk av luftvaktposter av denne type. Imidlertid vil det under forsøk med luftvaktpostsensorene vise seg om de vil kunne gis gode mål-identifikasjonsegenskaper, og i så fall kunne benyttes sammen med andre aktive sensorer for dette formål.

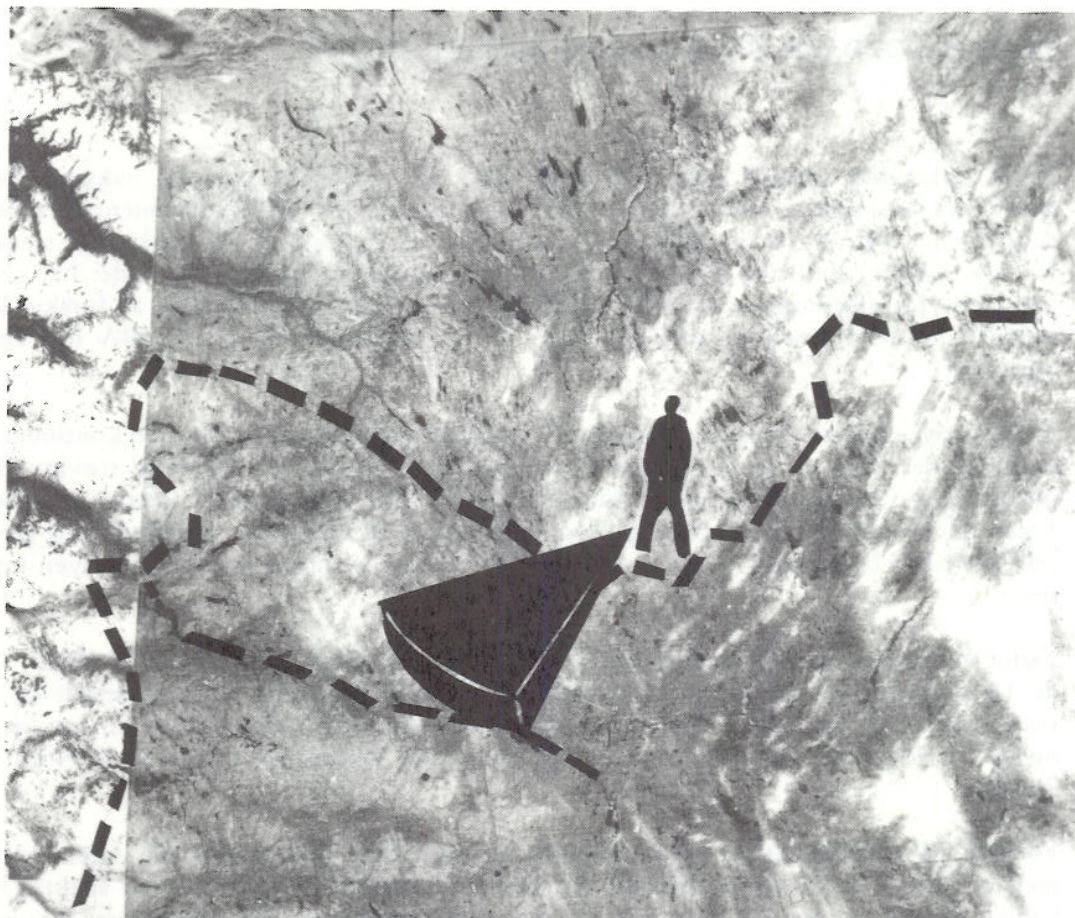
Det blir derfor foreslått at luftvaktpostene i første omgang plasseres i områder med behov for tidligvarsel, men hvor det er meget vanskelig å plassere og operere med konvensjonelt varslingsutstyr, og hvor i tillegg luftbildet vil være mer entydig. De foreslåtte utplasseringer er vist i figur 4.3. Luftvaktpostene vil ved en slik plassering danne fire varslingskjeder og på en effektiv måte dekke lavflygningsruter hvor mobile radarer vanskelig kan operere.

Plasseringene er ytterst langs kysten, og værforholdene fører til at det anses lite aktuelt å benytte infrarødt utstyr i dette området. Varslingskjedene vil derfor bestå av akustiske sensorer. Dersom det antas en liknende operasjon som den beskrevet i kapittel 2, vil sensordeployeringen kreve tre registreringsenheter for hver varslingskjede for tre av varslingskjedene, mens den fjerde varslingskjeden krever fire registreringsenheter. Dette blir til sammen 13 registreringsenheter som må bemannes.

I tillegg til disse varslingskjedene langs kysten foreslås bruken av infrarødt søkeutstyr i området ved Finskekilen som vist i figur 4.4. Med de gode værforhold i dette området og deteksjonsavstander som beregnet i kapittel 3, vil en luftvaktpost med infrarødt utstyr ha gode muligheter til effektivt å overvåke kilen.



Figur 4.3 Mulig utplassering av akustiske sensorer



Figur 4.4 Utplassering av infrarød sensor

4.4 Samband registreringsenhet – kontrollsenter

Dette sambandet skal overføre meldinger i fast format mellom de bemannede registreringsenheter og kontrollsenteret. De to sydligste varslingskjedene kan enklest tilkoples det statiske linksystemet v h a SHF frisiktssamband. Teoretiske beregninger og utprøvinger har vist at de nødvendige rekkevidder kan oppnås. De to nordligste varslingskjedene må imidlertid basere seg på frisiktssamband fram til nærmeste mobile radar eller alternativt samme type HF-samband som de mobile radarene benytter (6).

Luftvaktposten ved Finskekilen kan operere koordinert med de mobile radarene i området og benytte deres samband.

APPENDIKS 1

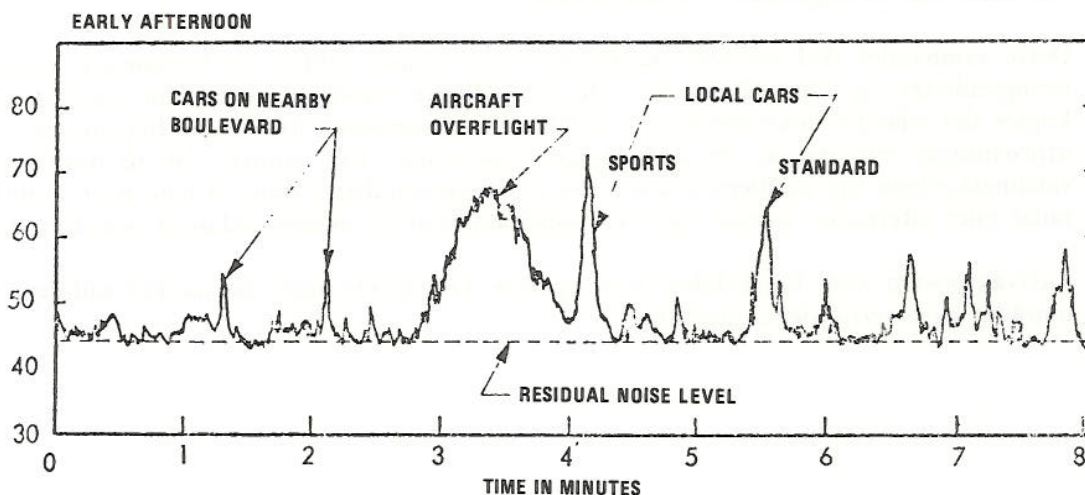
STATISTISKE DATA FOR AKUSTISK BAKGRUNNSTØY

Dette appendiks gjengir noen statistiske data for utendørs akustisk bakgrunnstøy hentet fra en rapport utarbeidet av Wyle Laboratories for US Environmental Protection Agency (5). En rekke målinger av støynivåer er foretatt på 18 forskjellige steder, fra Los Angeles sentrum til Grand Canyon, og mange forskjellige støykilder har vært registrert, fra gresshopper til jettfly. Merkelig nok er ikke støy på grunn av forskjellige værforhold nevnt med et ord, på tross av at basisnivå ned til 16 dBA har vært registrert.

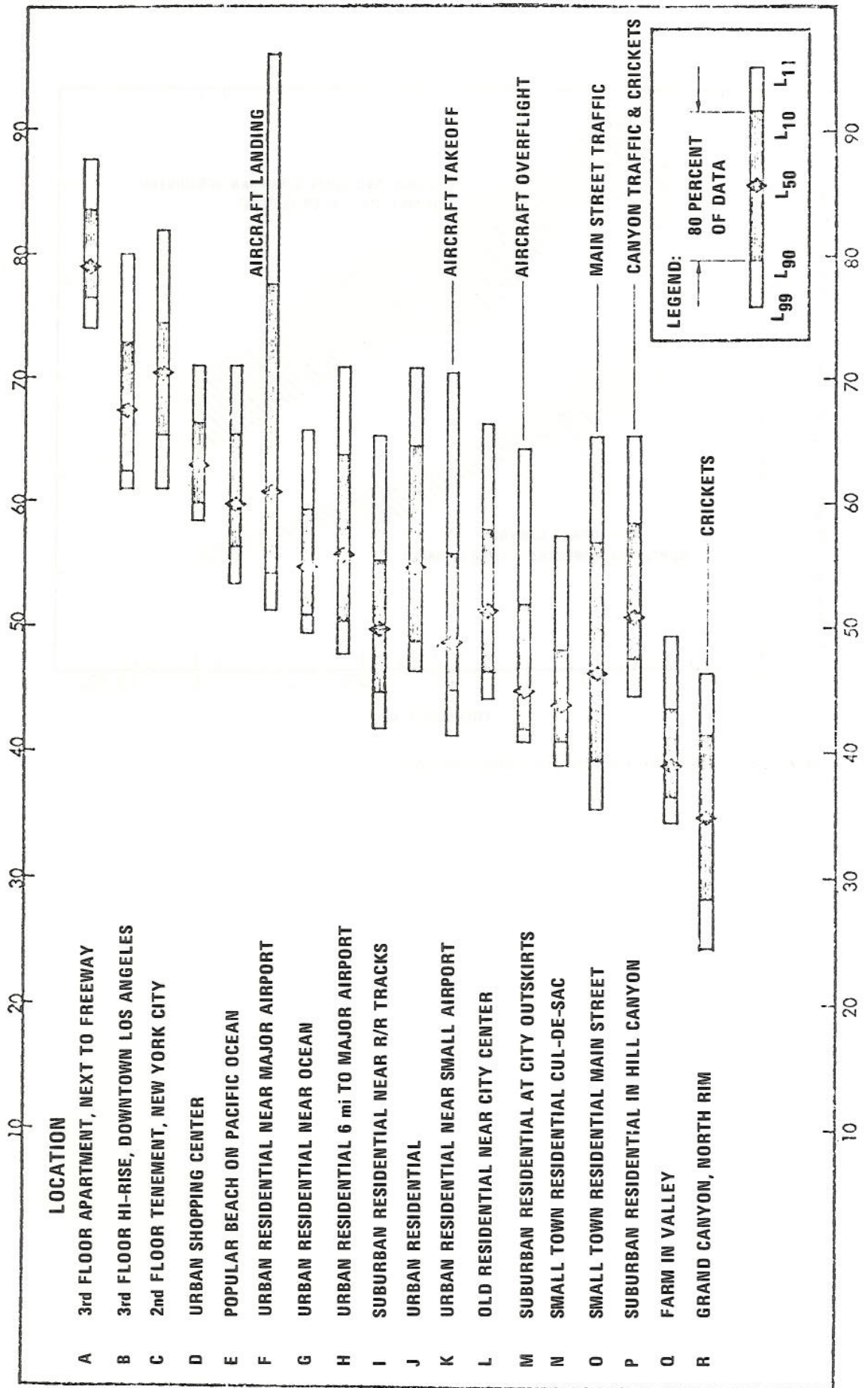
I rapporten opereres med et "basisnivå" (residual noise) som er til stede kontinuerlig og hvor det ikke er mulig å identifisere bestemte støykilder. Spesielle støykomponenter som overlages basisstøyen kan klassifiseres som "tilleggsstøy" (intrusive noise). Figur A1.1 viser et typisk eksempel på tidsforløpet av det totale støynivået, og generelt har både basisnivået og den statistiske fordeling av nivået for tilleggsstøyen interesse.

Figur A1.2 viser fordeling av støynivå uttrykt i dBA med referanse 10^{-12} W/m² for de 18 stedene som målingene i den siterte rapporten omfatter. Det er spesielt de to siste stedene Q og R som har interesse for vårt formål. I Grand Canyon var basisnivået 16 dBA ved nattetider, og et lite propellfly kunne øke nivået med 54 dB til 70 dBA.

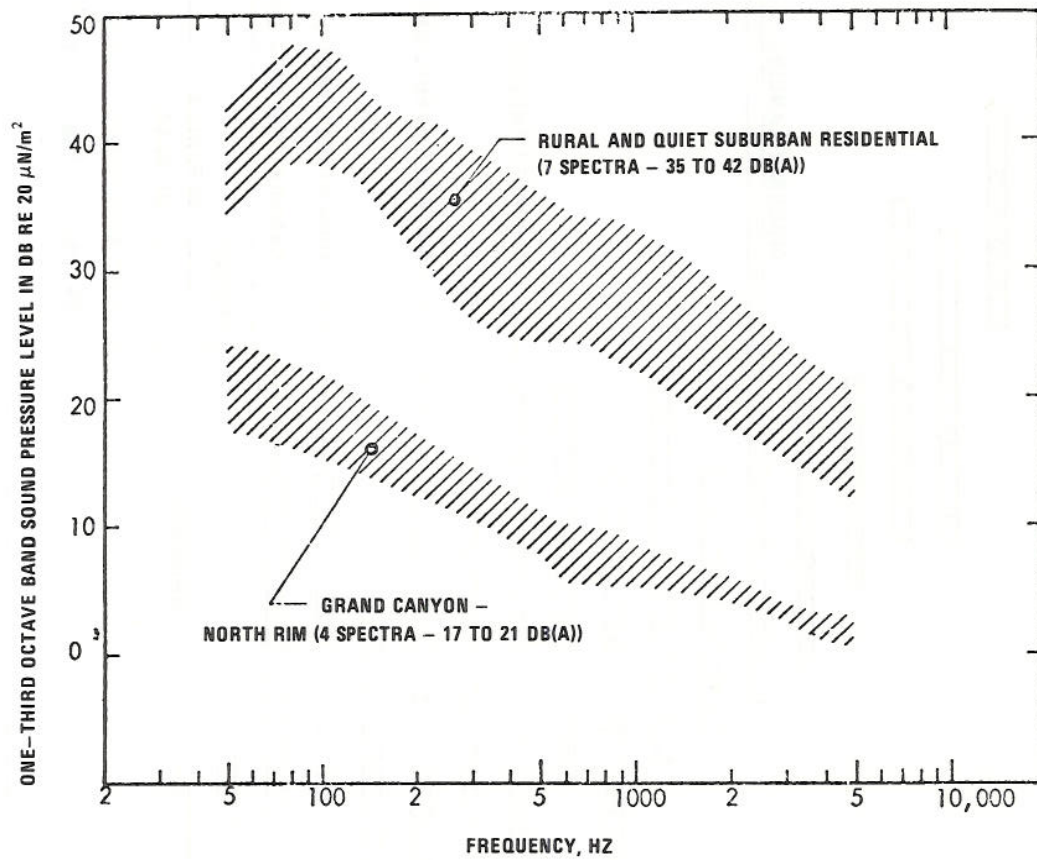
Formen på effektspektret for basisstøyen er stort sett den samme for alle stedene med et fall på ca 10 dB pr dekade ved økende frekvens. Figur A1.3 viser spektra for Grand Canyon og for en rolig forstad. For tilleggsstøyen er det vanskeligere å si noe generelt om spektrets form, fuglesang har en stor del av sin effekt i området 2 – 5 kHz, men den frekvensavhengige luftabsorpsjonen har en tendens til å redusere spektret ved høyere frekvenser for alle lydtkilder som er langt unna.



Figur A1.1 Støynivå som funksjon av tiden



Figur A1.2 A-veiet utendørs støynivå i dB ved $20 \mu\text{N}/\text{m}^2$



Figur A1.3 Typiske spektra for bakgrunnstøy

APPENDIKS 2

SYSTEMGEOMETRI FOR AKUSTISK DETEKSJON

Det har vært arbeidet mye med å utvikle analytiske metoder for prediktering av støy fra jetfly som flyr i en gitt bane. Mange av metodene er utviklet for å estimere det høyeste lydnivå som kunne ventes; disse er ikke direkte anvendbare for et deteksjonssystem som beskrevet i denne rapport. Dessuten uttrykkes ofte støyens ubehag uttrykt i PNDB (Perceived Noise level) som innebærer en spesiell ulinear spektral veiing av det totale lydtrykket. Et relativt omfattende litteraturstudium indikerer at den mest omfattende metode for prediktering av lydintensitetsnivået som funksjon av tid og frekvens er gitt av Kobrynski (4). Lydtrykknivåene er normalisert til 30 m avstand, og for å kunne beregne lydtrykket på bakken må systemets geometri samt luftens lydabsorpsjon tas i betraktning.

Figur A2.1 viser de vinklene som inngår i beregningene idet lyden sendes ut fra lydkilden. Det må også ved beregningene tas hensyn til at de frekvenskomponenter som mottas ble sendt ut fra flyet med en annen frekvens gitt av Dopplerforskyvningen.

Følgende uttrykk gir lydintensiteter i et bånd med senterfrekvens f_a og bredde Δf_i (4)

$$N_{\theta i} = N_{\theta} - 10 \lg \frac{(1 + \frac{V_e}{V_j})}{(1 + M_v \cos \theta)} + 10 \lg \Delta f_i + K_i \quad (\text{A2.1})$$

K_i er det generaliserte spektret som er gitt på figur A2.2 for forskjellige verdier av utstrålingsvinkelen θ som definert på figur A2.1 og med Strouhals tall S_n som argument

$$S_n = \frac{(1 + M_v \cos \theta) D}{(1 + \frac{V_e}{V_j}) V_j} f_a \quad (\text{A2.2})$$

V_e – flyets hastighet

V_j – utstrømningshastighet for jetstrålen

D – jetstrålens diameter

M_v – V_e/C_a hvor

C_a – lydhastigheten

f_a – det mottatte signals senterfrekvens

N_{θ} er gitt av

$$N_{\theta} = 10 \lg \frac{\rho_j^2 S \cdot M_c^2 (1 - \frac{M_v}{2 M_c}) (1 + \cos^4 \theta)^{\delta(\nu - 5/2)}}{\left\{ [1 - M_c (1 - \frac{M_v}{2 M_c}) \cos \theta_1]^2 + \alpha_s^2 M_c^2 (1 + \frac{M_v}{2 M_c})^2 \right\}^n} + C_2 \quad (\text{A2.3})$$

$$M_c = \frac{1}{2} \frac{V_j}{C_a}$$

$$\alpha_s^2 = 0,45/M_c^2 + 0,75$$

ρ_j – tettheten for den ekspanderte gass

S – arealet av utstrømningsdysen

De empiriske parametrene θ_1 , δ , α og C_2 er diskutert i (4). Aktuelle verdier for det foreliggende problem er

$$\theta_1 = \theta \quad \text{når} \quad (24 M_c + 18) < \theta < \pi$$

$$\theta_1 = 2(24 M_c + 18) - \theta \quad \text{for} \quad \theta < (24 M_c + 18)$$

$$\delta = 5/2 \quad \text{når} \quad V_e = 0$$

eller når $M_c < 0,9$

eller når $M_c > 0,9$ og $\theta < \pi/2$

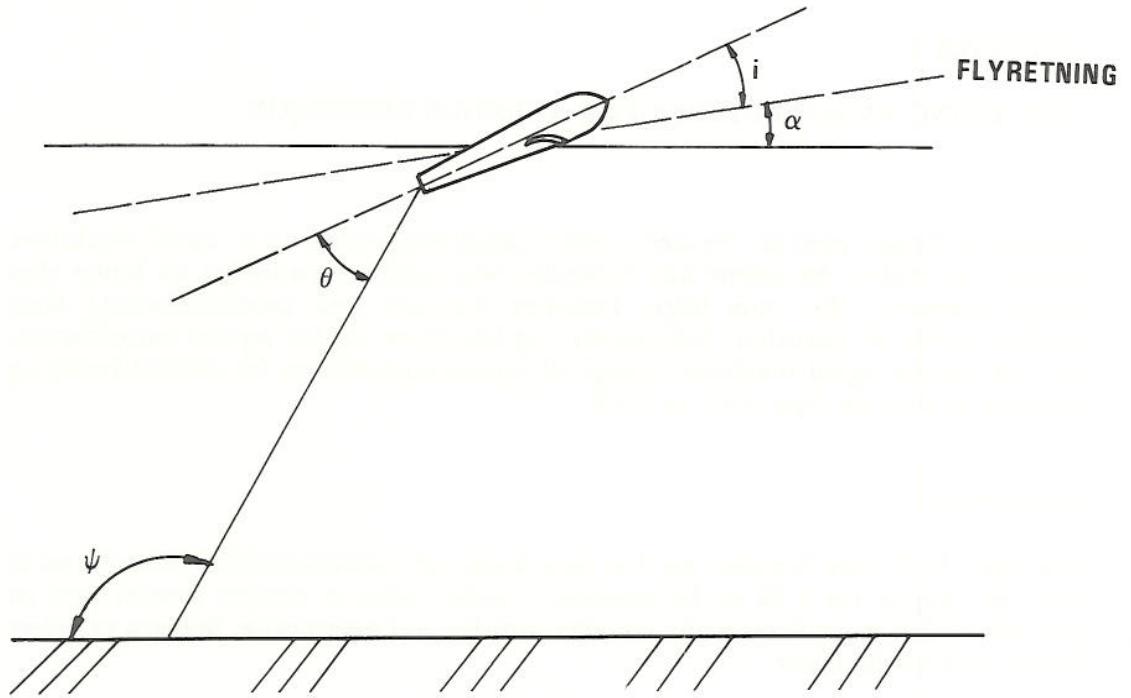
$$= 2 - 1/\pi \arctg(10 M_v - 4) \quad \text{når} \quad M_c > 0,9 \text{ og } \theta = \pi/2$$

$$= 3/2 - 2/\pi \arctg(10 M_v - 4) \quad \text{når} \quad M_c > 0,9 \text{ og } \theta > \pi/2$$

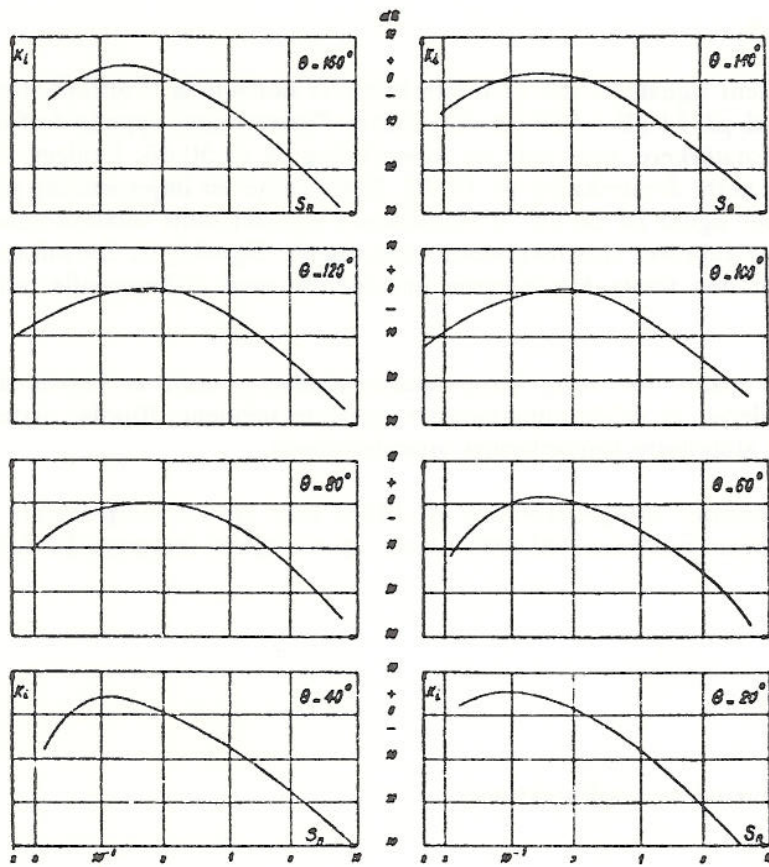
$C_2 = 144$ dB når avstanden er 30 m.

Det er naturlig å betrakte (A2.3) som et produkt av to faktorer. Den ene faktor, som er uavhengig av θ , tilsvarer den effektivt isotropisk utstrålt effekt (EIRP) mens de faktorer som inneholder θ uttrykker utstrålingsdiagrammets form. Det er derfor mulig å beregne både absoluttverdi og tidsforløp for lydtrykket forutsatt at de nødvendige parametre er tilgjengelige. Uttrykket har blitt eksperimentelt verifisert for en rekke flytyper.

Det må bemerkes at lydintensiteten (effekt) er proporsjonal med M_c i åttende potens, og at denne parameter må derfor bestemmes meget nøyte hvis absolutt nivå skal beregnes.



Figur A2.1 Geometrisk konfigurasjon



Figur A2.2 Generalisert spektrum

APPENDIKS 3

OPPBYGGING AV MÅLEUTSTYR FOR AKUSTISK DETEKSJON

Utstyret er bygget med en manuelt operert registreringsenhet og et antall detektorer plassert i to rekker. Sensorene kan forbindes med registreringsenheten via kabler eller trådløs telemetri. (Det som følger beskriver systemet med kabeloverføring.) Hver detektor består av mikrofon, forforsterker og linjedriver, og har separat batteriforsyning. Det enkelte signal overføres analogt til registreringsenheten for nivåindikering og avlytting, se forøvrig figur A3.1 og A3.2.

Detektorenhet

Som figur A3.3 viser benyttes en 2 m lang stang som mikrofonholder. Mikrofonen er festet på toppen for å få en fri posisjon. I andre enden er stangen forsynt med en spiss slik at den kan stikkes ned i snø eller jord for god befestigelse. Stangen er videre forsynt med bardunfester.

Forsterkerenheten er plassert i en boks som er festet i nedre del av stangen.

Forforsterker og linjedriver

Det refereres til figur A3.4.

Mikrofonen gir et beskjedent signalnivå slik at forsterkning er nødvendig. Følsomheten er ca 0,1 mV for et signal på 74 dB i 500 Hz oktavbånd. Forsterkning oppnås derfor med to kaskadekoblede forsterkere, hver med en forsterkning på ca 30 dB. I tillegg til dette gir linjedriveren en netto forsterkning på 15 dB. Dette betyr en linjespenning på ca 100 mV for et akustisk signal på 60 dB. Dynamikken i signalet samt forsterkerens matespenning vil her være faktorer som begrenser utstyringen. Signalet ut fra mikrofonen er ballansert slik at den første forsterkeren må operere med differensielle innganger.

Da forsterkerne kan bli utsatt for store temperatursvingninger, samt at kravet til frekvensresponsen er moderat, er AC-kopling benyttet mellom trinnene. Bipolar matespenning bidrar også til å stabilisere forsterkernes arbeidsforhold.

Som forforsterkere er benyttet integrertkretsen MC1458, som gir en dobbeltkrets i samme pakke. Til linjedriver benyttes LM-380. Dette er en 2,5 W integrert LF-forsterker.

Registreringsenhet

Denne kan deles i tre:

- a) Velgerenhet – tastatur og innkoplingskretser
- b) Nivåindikeringskretser
- c) Analog-signal-kretser

Pkt a og b vil bli beskrevet separat, mens pkt c består bare av en inngangsforsterker og en utgangsforsterker med volumkontroll før signalet tilføres hodetelefonene. For

begge kretsene benyttes LF-forsterkeren LM-380. Inngangskretsen har 35 dB forsterkning, og en inngangsjustering for eventuelt å kompensere for linjetap og eventuell variasjon i sensorens følsomhet. Denne kretsen er derfor tilpasset den enkelte sensor. Utgangsfosterkeren har enhetsforsterkning, og er felles for alle sensorer. En volumkontroll på inngangen gjør det mulig å regulere nivået på hodetelefonene uten at dette går ut over nivåmålingen.

Nivåindikering

Det er ønskelig å få informasjon inn til sentralenheten når lydnivået på den enkelte sensor overskrider et visst nivå. Dette gjøres ved at samtlige sensorer til enhver tid står tilkoplede sine respektive nivåkretser. Nivået over denne verdi kan bare måles for den sensor som er innkoplede til lyttekurs. For å redusere registrering av uønsket lyd, vindsus o l er innkoplede et BP-filter med oktavbånd rundt 500 Hz.

Etter en likeretter og glattekrets måles nivået i en komparatorokrets. Både BP-filteret og komparatoren benytter integrertkretsen MC-1458. Komparatoren driver kopleingsrele av type Clare pico-reed som gir spenning til indikatorlampe. For innkoplede kurs parallellkoples triggerkretser som er innstilt på henholdsvis 70 dB og 80 dB.

Innkopleingskrets

Det referes til figur A3.6.

For å kunne innkople de enkelte sensorene, er det nødvendig med en enkel logikk. Denne er utformet slik at bare én linje er tilkoplede ad gangen for avlytting. Nivåindikeringen for samtlige sensorer står hele tiden inne. Når en bestemt sensor velges, vil trykket på vedkommende knapp aktivisere kretser som kopler inn LF-signalet, samt gir lysindikasjon på trykket knapp. I tillegg vil nivået på vedkommende sensor måles på den utvidete nivåkontroll.

Innkopleingskretsen, d v s releet, er drevet av en integrert krets av type MC-1458, som igjen er styrt av en flip-flop kopleing. Denne aktiviseres av trykket knapp som gir reset-puls til *samtlig*e innkopleingskretser, men set-puls bare til den ønskede. Ved å trykke en knapp vil samtlige sensorer koples ut noen millisekund, og ønsket sensor vil deretter innkoples.

I flip-flop kopleingen er benyttet en integrert krets av type Mc 14011CP, som er en Quad NAND.

Forbindelseslinjer

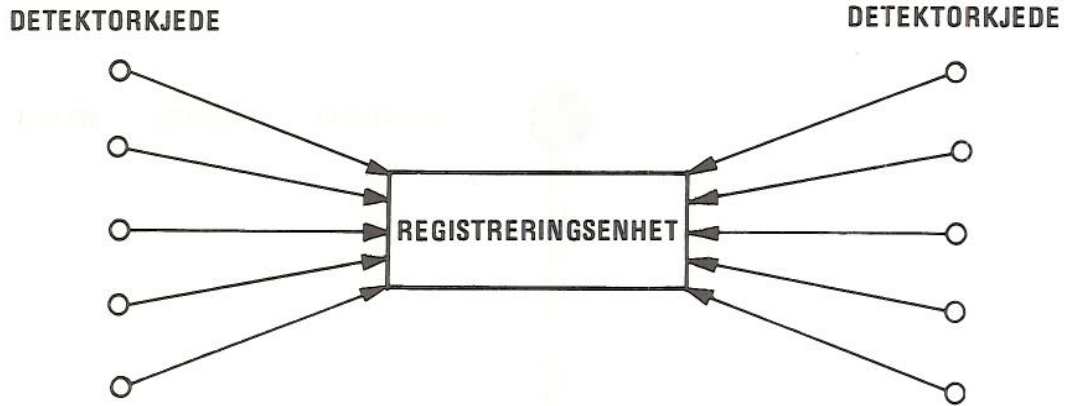
Som tidligere nevnt er det systemet som her er beskrevet basert på fysiske linjer mellom sentralenheten og de enkelte sensorene. I utprøvingen har dette vært militære telefonlinjer. Målinger har vist at disse har en motstand på ca 26 Ω /km, og dempning ca 1 dB/km for det aktuelle frekvensområdet. Dette er data som for dette formål er helt tilfredsstillende.

Kalibreringsenhet

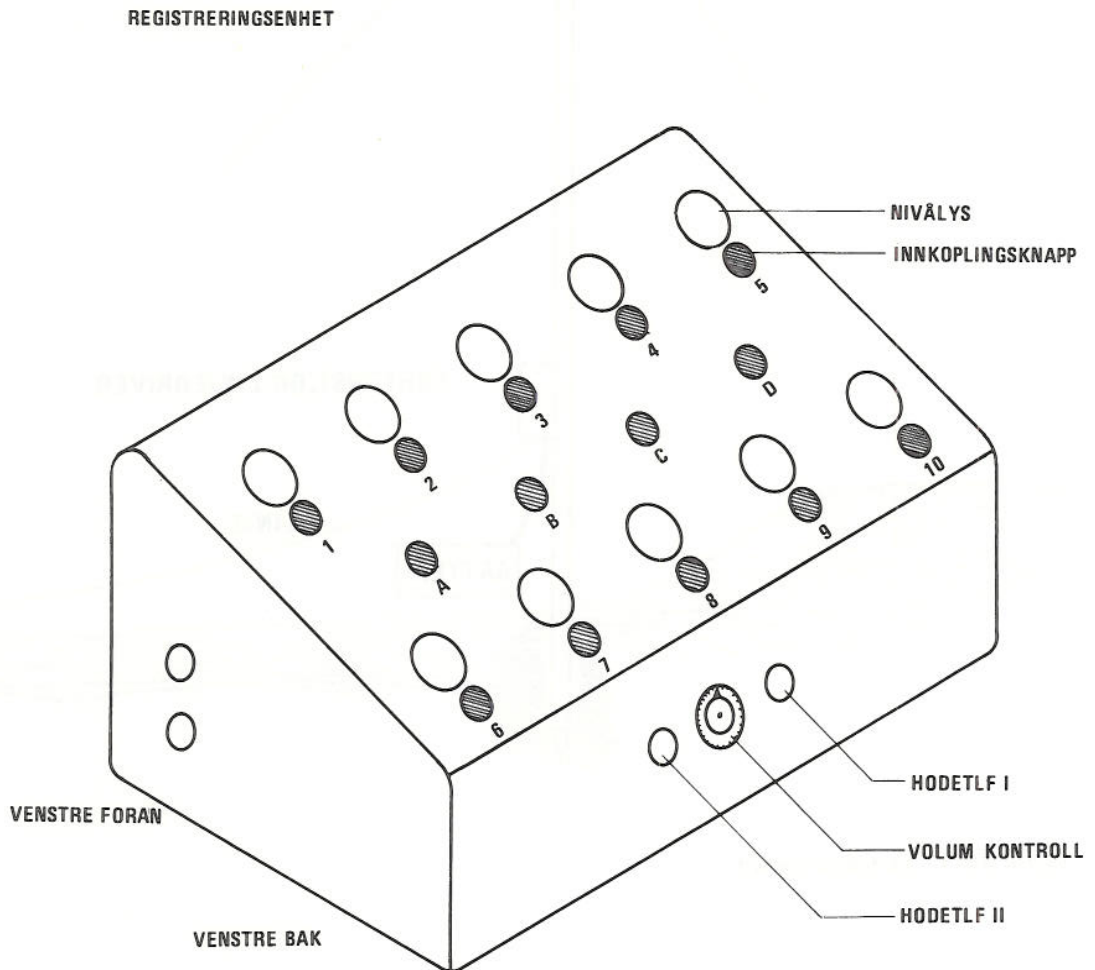
Det refereres til figur A3.8.

Det vil være aktuelt å ha tilgang til et akustisk signal for funksjonstest og nivåkalibrering. En bærbar batteridrevet lydkilde er derfor utviklet. I prinsipp er dette en multivibrator med frekvens ca 500 Hz som leverer signal til en LF-forsterker som driver en høyttaler. For å sikre seg at nivået holdes konstant forefinnes en elektrisk nivåmåler. Denne likeretter det signal som tilføres høyttaleren, og denne spenningen måles med et enkelt voltmeter. Utgangsnivået kan varieres, men har spesiell kalibrering for å kunne gi 60 dB SPL i 2 m avstand. Dette tilsvarer terskelverdien for de indikatorene som står i sentralenheten.

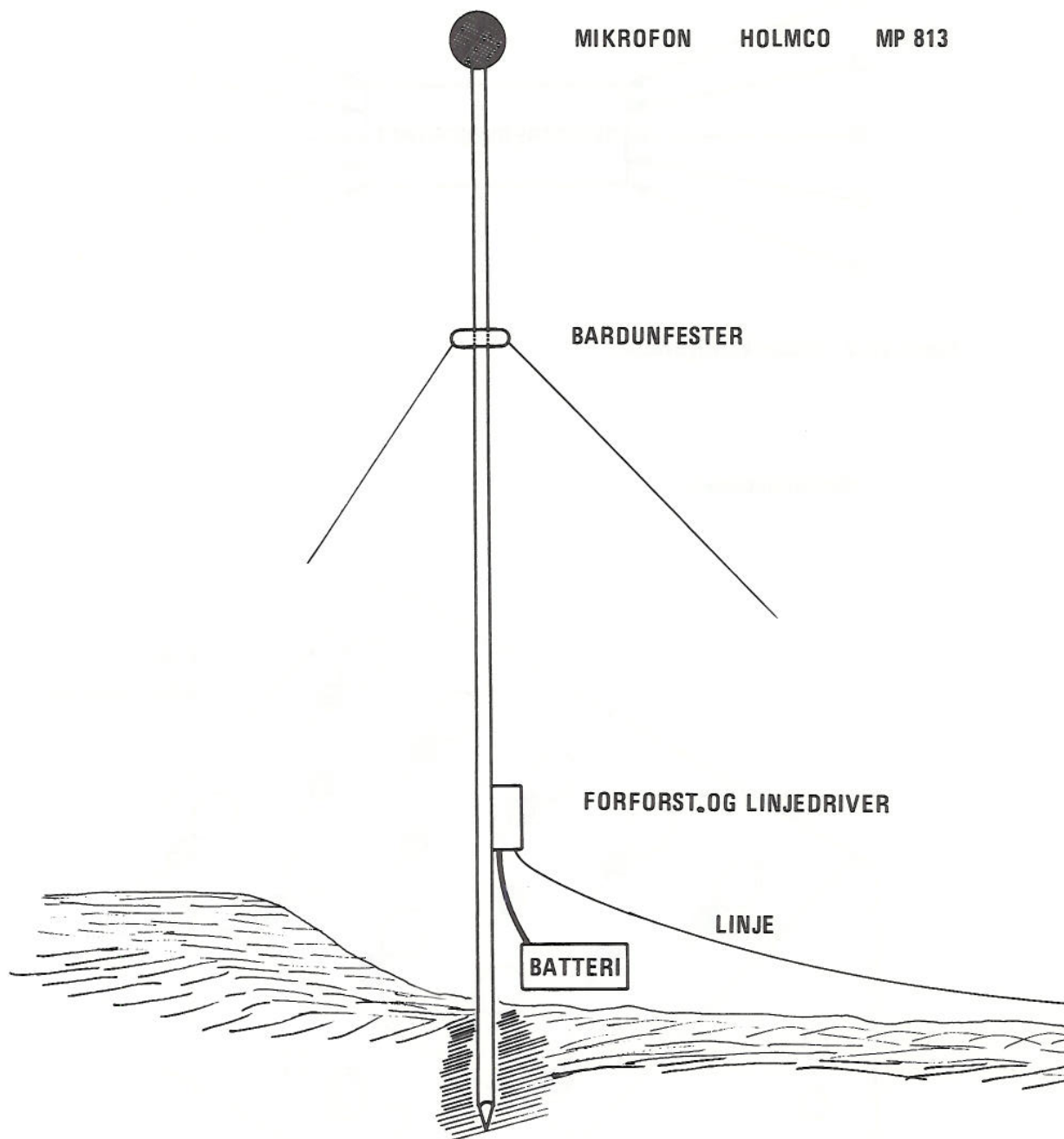
Kalibreringsenheten drives av to 4,5 V flatbatterier, og er bygget inn i en metallboks med dimensjoner ca 15×10×5 cm. Kretsoppbyggingen er vist på figur A3.8.



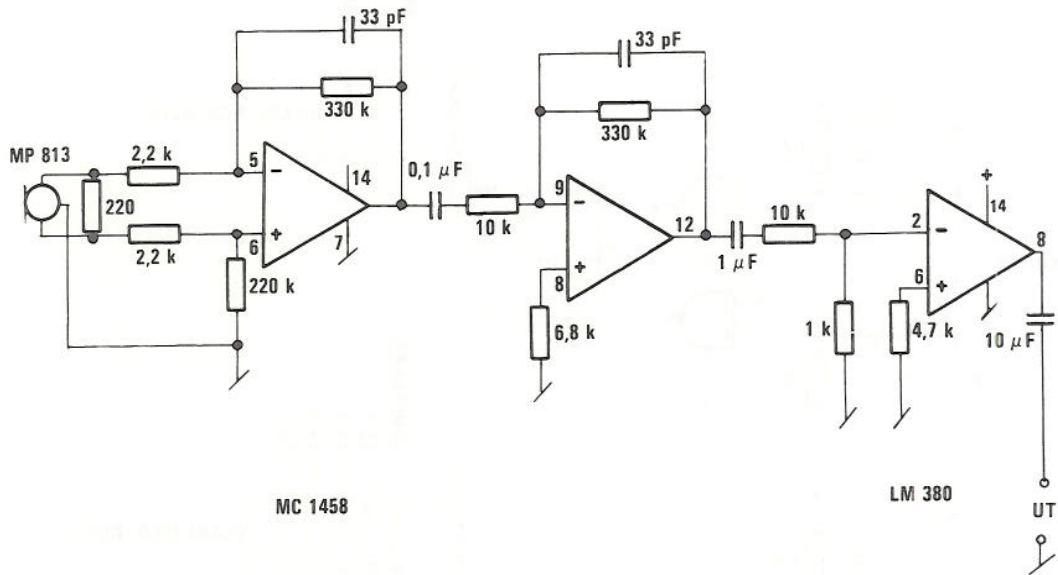
Figur A3.1 Sensorkonfigurasjon



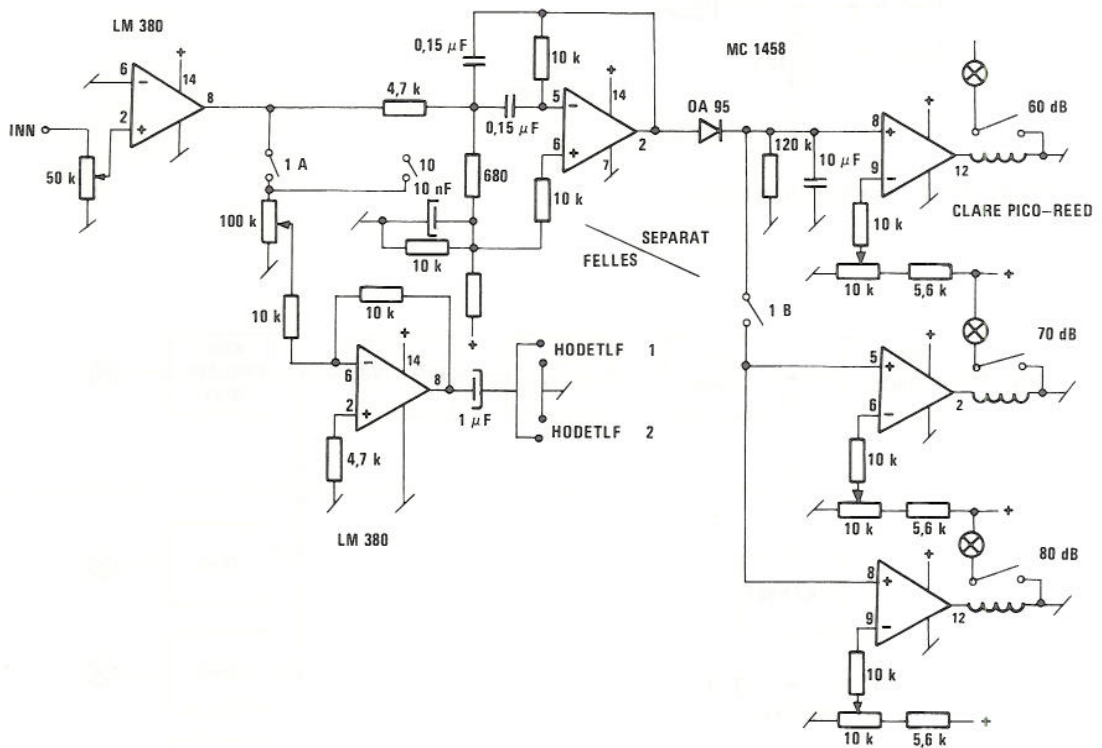
Figur A3.2 Registreringsenhet



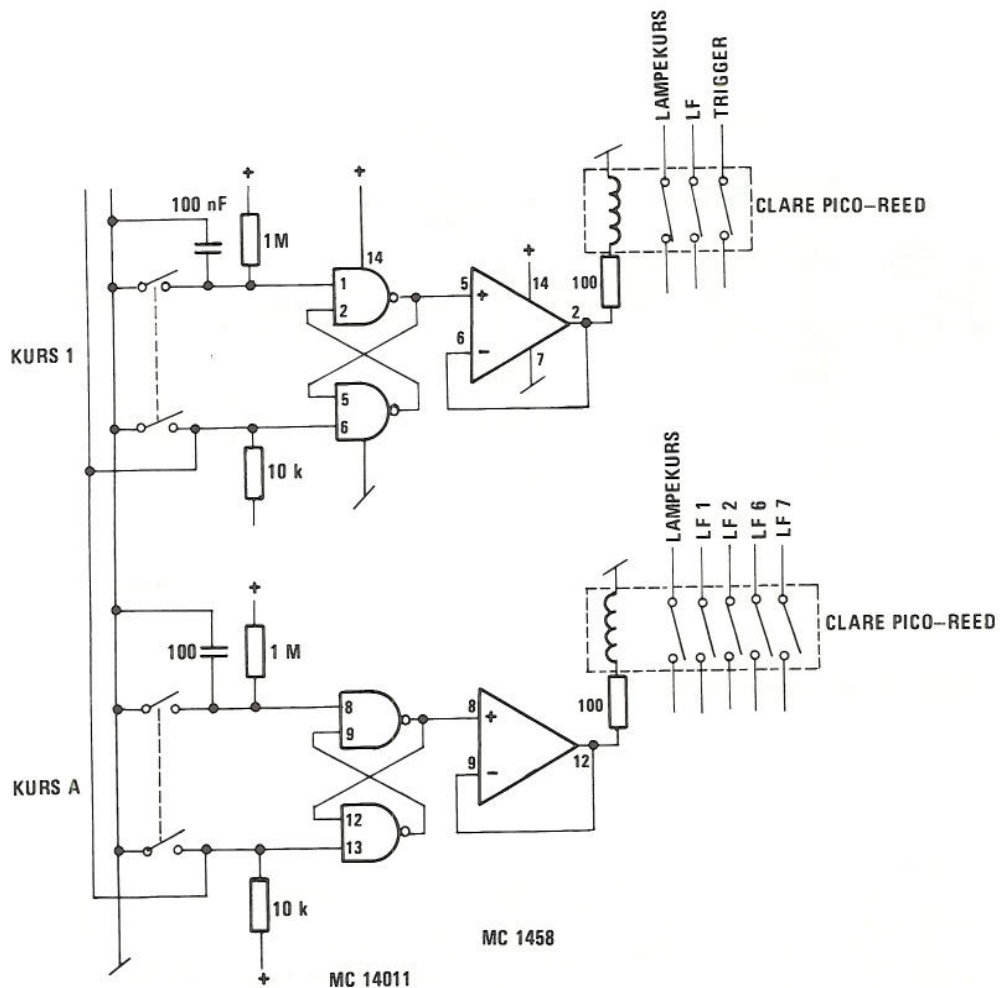
Figur A3.3 Detektorenhet



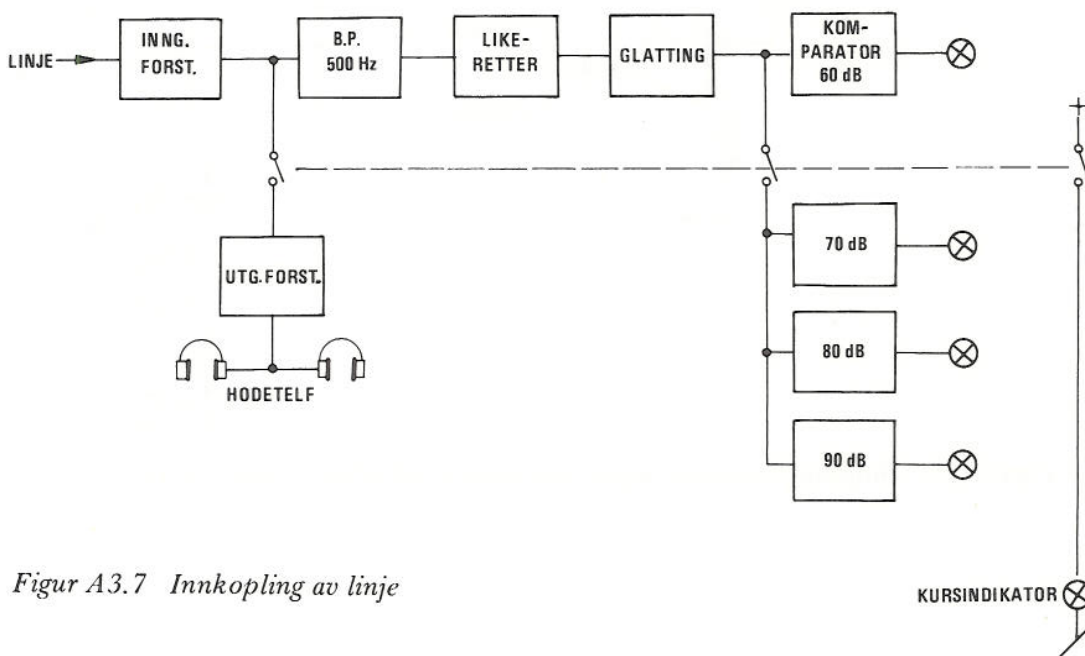
Figur A3.4 Forforsterker og driver



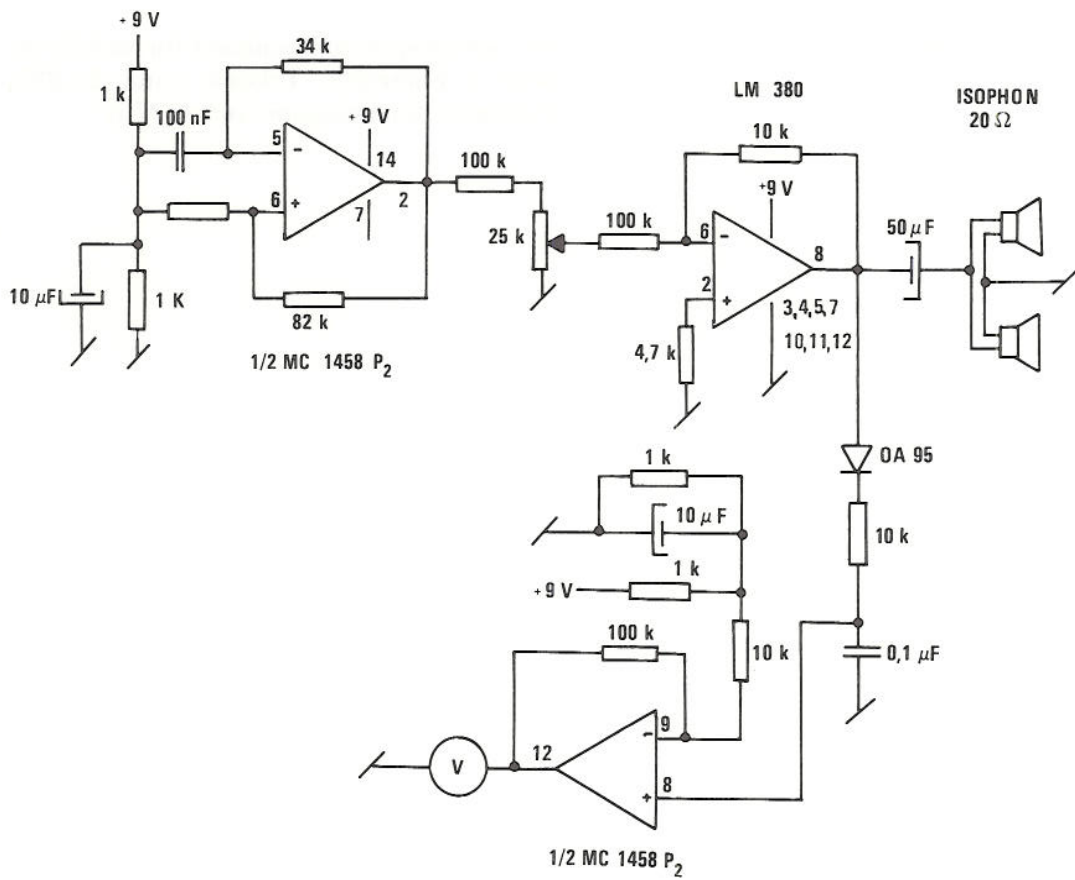
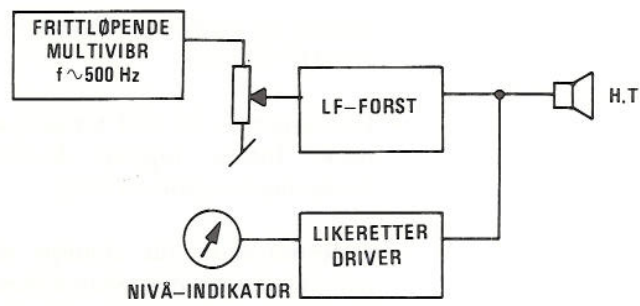
Figur A3.5 Inngangsførsterker, utgangsførsterker, BP-filter og triggerkretser



Figur A3.6 Innkoplingskrets



Figur A3.7 Innkopling av linje



Figur A3.8 Kalibrert lyd giver

Litteratur

- (1) Stette, G -- Måling og analyse av flystøy, STF44 F74125 (1974)
- (2) Resell, O E -- Måling og analyse av flystøy – Del 2, STF44 F75187 (1975)
- (3) Narum, P -- Deteksjon av fly ved termisk avbildningsteknikk, Intern rapport E-263, Forsvarets forskningsinstitutt (1976)
- (4) Kobrynski, M -- Determination du champs sonore produit par l'évolution des avion a reaction, AGARD Conference Proceeding 42, London (1969)
- (5) -- Community noise, NTID 300.3, US Environmental Protection Agency, Washington, DC 20460 (1971)
- (6) Skaug, R -- HF-sprekkspektrumsamband for mobile enheter i Finnmark, Teknisk notat E-837, Forsvarets forskningsinstitutt (1976)