

**AVGRADERT**  
Dato: 11.11.09 Sign.: *SE*

KOMMUNISIST  
BEGRENSET instruksjon

FFIE  
Intern rapport E-263  
Referanse: Jobb 310/114  
Dato: November 1976

HÆRENS FORSYNINGSKOMMANDO  
000450 17. JUL 90  
Sak nr. Beh. av *VI*

**DETEKSJON AV FLY VED TERMISK AVBILDNINGSTEKNIKK**

av

P Narum

Godkjent  
Kjeller 17 november 1976

*B Landmark*

B Landmark  
Forskningsjef

**FORSVARETS FORSKNING SINSTITUTT**  
Norwegian Defence Research Establishment  
Postboks 25 - 2007 Kjeller  
Norge

KOMMUNISIST  
BEGRENSET instruksjon

KONFIDENSIELT  
i.h. BEGRENSET  
i.h. Sikkerhetsinstruksen

FFIE

Intern rapport E-263

Referanse: Jobb 310/114

Dato: November 1976

HÆRENS FORSYNINGSKOMMANDO	
000450	17. JUL 90
Sak nr.	Beh. av VI

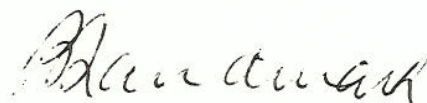
## DETEKSJON AV FLY VED TERMISK AVBILDNINGSTEKNIKK

av

P Narum

Godkjent

Kjeller 17 november 1976



B Landmark

Forskningsjef

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

KONFIDENSIELT  
BEGRENSET  
i.h. Sikkerhetsinstruksen



INNHOLDSFORTEGNELSE

		Side
1	INNLEDNING	3
2	TERMISK STRÅLING FRA FLY	4
2.1	Termisk stråling fra flykroppen	4
2.2	Termisk stråling fra jetmotorer	5
2.3	Spektralstråling fra eksosgass	6
2.4	Målinger av termisk stråling fra fly	9
2.5	Regnemaskinmodeller for beregning av termisk stråling fra fly	10
3	STRÅLING FRA BAKGRUNNEN	12
4	VÆRFORHOLD	14
5	ATMOSFÆRETRANSMISJON	15
6	FORSØK MED TERMISK AVBILDNINGSSYSTEM FOR DETEKSJON AV FLY	17
7	PARAMETERANALYSE OG FØLSOMHETSBEREGNINGER FOR ET TERMISK DETEKSJONSSYSTEM	21
8	FORSLAG TIL VALG AV SYSTEMPARAMETRE FOR ET KONKRET DETEKSJONSSYSTEM	25
9	STUDIER AV TERMISK DETEKSJON AV FLY I ANDRE LAND	28
10	SAMMENDRAG OG KONKLUSJON	29
	Litteratur	29



1913

1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6
7	7
8	8
9	9
10	10
11	11
12	12
13	13
14	14
15	15
16	16
17	17
18	18
19	19
20	20
21	21
22	22
23	23
24	24
25	25
26	26
27	27
28	28
29	29
30	30
31	31
32	32
33	33
34	34
35	35
36	36
37	37
38	38
39	39
40	40
41	41
42	42
43	43
44	44
45	45
46	46
47	47
48	48
49	49
50	50





## DETEKSJON AV FLY VED TERMISK AVBILDNINGSTEKNIKK

## SUMMARY

This study is an investigation of the feasibility of detecting approaching jet aircraft at long ranges from a ground station by means of infrared techniques.

It is primarily a theoretical study. A few field trials of aircraft detection have been made using a thermal imaging system developed for other purposes.

Based on available data on target radiation and atmospheric transmission, the performance of a small, portable system is calculated for various meteorological conditions.

*(Detection of aircraft by thermal imaging techniques)*

## 1 INNLEDNING

Termisk avbildning og deteksjon har i de senere år blitt meget aktuell for passiv observasjon og overvåking. Tekniske fremskritt innen infrarød teknologi har ført til at en rekke Nato-land er i ferd med å introdusere slike systemer for å løse spesifikke oppgaver innenfor luftforsvar, hær og marine. 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 i kapittel 8, 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.

## 2 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 bølgelengdeområder som er bestemt av eksosgassene.

## 2.1 Termisk stråling fra flykroppen

Temperaturforskjellen mellom flykroppen og luften omkring skyldes aerodynamisk oppvarming og varmeutvikling i de forskjellige komponentene inne i flyet. De fleste fly er malt med kamuflasjemaling som har emisjonskoeffisient,  $\epsilon$ , svært nær 1 i det infrarøde bølgelengdeområdet.

Det er svært vanskelig å beregne eksakt hvilken temperaturøkning den aerodynamiske oppvarmingen fører til. Det kan vises at den såkalte stagnasjonstemperaturen  $T_s$ , som er temperaturen i et tynt luftsjikt på overflaten av flyet, er gitt av (1)

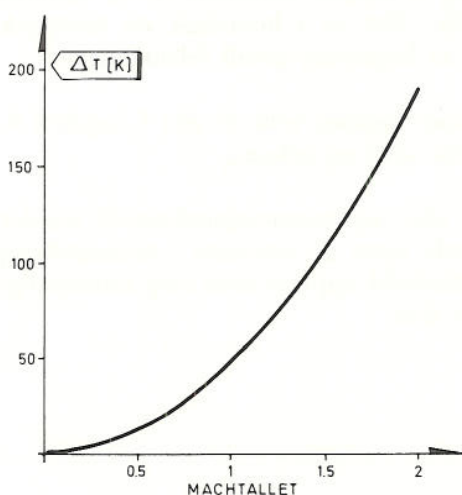
$$T_s = T_a(1 + 0,2 RM^2)$$

der

$T_a$  – temperaturen i atmosfæren

$M$  – Mach-tallet

$R$  – den såkalte recovery faktoren som settes lik 0,82 for laminære strømninger kan den være opptil 0,88.

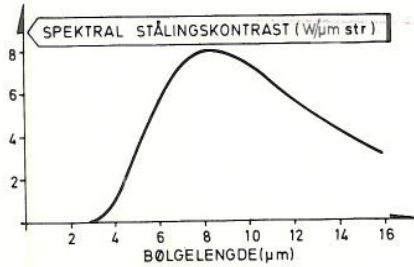


Figur 2.1 Temperaturøkningen  $\Delta T$  som funksjon av Mach-tallet for laminær strømning

I figur 2.1 er  $\Delta T = T_s - T_a$  tegnet som funksjon av  $M$  for  $T_a = 15^\circ\text{C}$  og laminær strømning.

Energiutvekslingen mellom dette luftsjiktet og flykroppen er en komplisert prosess. Om flykroppens overflate vil nå temperaturen  $T_s$  og med hvilken tidskonstant dette vil skje, er avhengig av mange forhold. Målinger viser imidlertid at temperaturen på flykroppen ligger svært nær  $T_s$  ved supersoniske hastigheter (2). Svenske målinger angir at uttrykket for stagnasjonstemperaturen også holder i området Mach 0,8–0,95 da med recovery faktor lik 0,9.





Figur 2.2 Spektral strålingskontrast mellom fly og bakgrunn når kontrasten skyldes den aerodynamiske oppvarmingen av flyskroget  
 Projisert areal = 2 m<sup>2</sup> og hastighet M 0,75.

I tillegg til den aerodynamiske oppvarmingen kommer nå temperaturøkningen på grunn av varmeutvikling i komponenter inne i flyet. Hvor stor denne er har det ikke vært mulig å få noe klart uttrykk for i løpet av denne studien.

Selv om beregninger av strålingen må bli usikre, kan det allikevel være av interesse å foreta noen beregninger for å fastslå innenfor hvilke grenser strålingen vil ligge. Fra figur 2.1 ser en at M = 0,75 gir ΔT = 25K. Figur 2.2 viser spektralfordelingen for kontrasten som denne oppvarmingen gir opphav til når det projiserte areal av flyet sett forfra er 2 m<sup>2</sup>. Ved beregningen er det antatt at bakgrunnen er et skydekke med samme temperatur som luften omkring flyet.

Bølgelengdeavhengigheten som er beregnet, er svært nær den en ville måle, men kvantitativt er det usikkerheter. Den beregnede kontrasten kan være noe for lav fordi det ikke er tatt hensyn til varmeutvikling i komponenter inne i flyet, i tillegg er også antatt en ugunstig bakgrunn. Ofte vil en ha en gunstigere bakgrunn, f.eks klar himmel, eller skyer med lavere temperatur enn luften omkring flyet. Den eneste sikre måten å finne strålingsstyrken på er å foreta direkte målinger på et fly.

## 2.2 Termisk stråling fra jetmotorer

Den termiske stråling fra jetmotorenes utblåsningsrør er relativt enkel å beregne da strålingen fra disse er som strålingen fra et sort legeme med samme temperatur som forbrenningsgassene. Dette vil i de fleste tilfeller si en temperatur på 400–600°C. Dersom det samlede areal av utblåsningsrørene er a, vil derfor strålingen ifølge Planck's lov være

$$I_{\lambda} = 2c^2 h \lambda^{-5} (e^{hc/\lambda kT} - 1)^{-1} \cdot a \quad (2.1)$$

- der
- C – lyshastigheten
  - h – Planck's konstant
  - k – Boltzmann's konstant
  - λ – bølgelengden
  - T – temperaturen

Innsatt tallverdier for konstantene gir dette

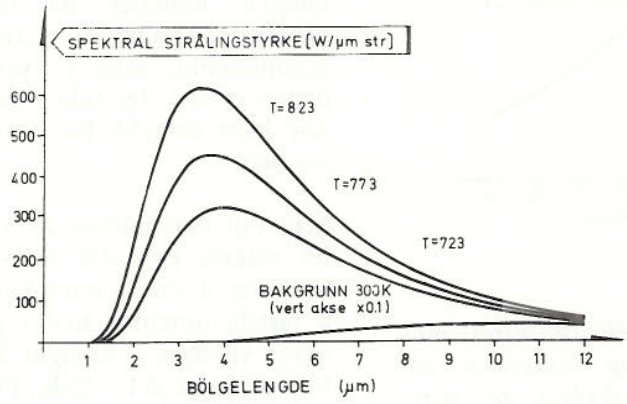
$$I_{\lambda} = a \cdot 1,191 \cdot 10^8 \lambda^{-5} (e^{14388/\lambda T} - 1)^{-1} \text{ W}/\mu\text{m str} \quad (2.2)$$

- der
- λ – bølgelengde i μm
  - T – temperatur i Kelvin
  - a – utblåsningsrørenes areal i m<sup>2</sup>

Utblåsningsrørenes areal vil i de fleste tilfeller være 0,3–1 m<sup>2</sup>



KONFIDENSIELT - BEGRENSET  
i h.t. Sikkerhetsinstruksjonen



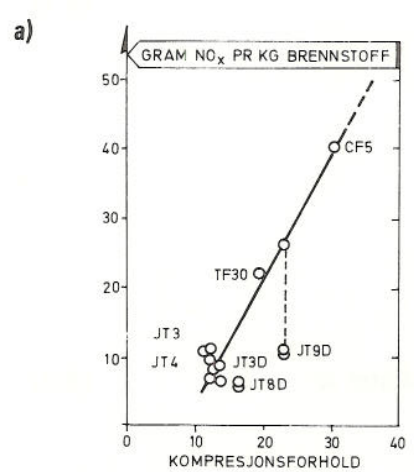
**Figur 2.3** Strålingen fra en jetmotors utblåsningsrør ved forskjellige temperaturer og strålingen fra en bakgrunn med temperatur 300 K  
Det er her ikke tatt hensyn til absorpsjon i avgassene. Utblåsningsrørets areal er satt til 0,4 m<sup>2</sup>.

I figur 2.3 er  $I_\lambda$  tegnet for noen verdier av T med  $a = 0,4 \text{ m}^2$ . Som en ser har strålingskontrasten maksimum nær 4  $\mu\text{m}$ . En må imidlertid være oppmerksom på at denne strålingskilden ses gjennom avgassene og gir derfor bare direkte bidrag til totalstrålingen i de bølglengdeområder hvor avgassene ikke absorberer.

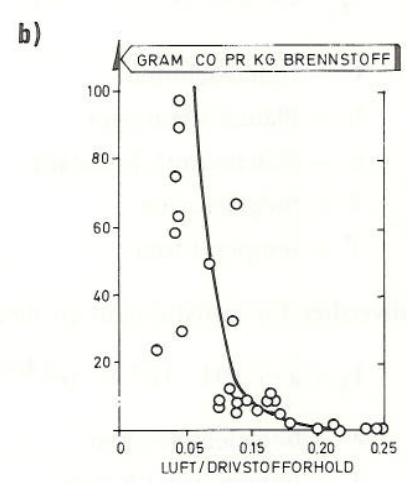
**2.3 Spektralstråling fra eksosgass**

Den varme eksosen inneholder en rekke gasser som stråler i det infrarøde bølglengdeområdet. Spektralstrålingen skyldes overganger mellom energinivåer for gasmolekylene. Innenfor bølglengdeområdet 2–20  $\mu\text{m}$  er det rotasjons-vibrasjons-overgangene som gir opphav til strålingen.

Det vil føre for langt å gå nærmere inn på dette her. Ved beregninger av strålingen fra gasser er det benyttet et regnemaskinprogram utviklet ved FFI (3). Dette programmet



**Figur 2.4a** NO<sub>2</sub>-innholdet i eksosen for forskjellig jetmotorer



**Figur 2.4b** CO-innholdet i eksosen som funksjon av forholdet luft-drivstoff

KONFIDENSIELT - BEGRENSET  
i h.t. Sikkerhetsinstruksjonen

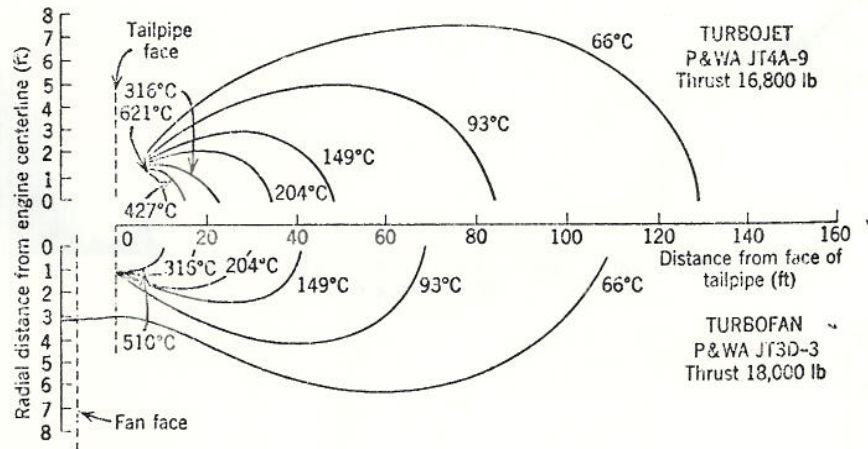
er basert på en datatape med opplysninger om spektrallinjene i området 1–30 000  $\mu\text{m}$  for alle gasser i atmosfæren, og eksosgasser som  $\text{CO}_2$ , CO,  $\text{N}_2\text{O}$  og  $\text{H}_2\text{O}$ .

Hovedbestanddelene i eksosgassen er  $\text{H}_2\text{O}$  og  $\text{CO}_2$ . I tillegg vil den også inneholde varierende mengder av CO og  $\text{NO}_2$ , se figur 2.4.

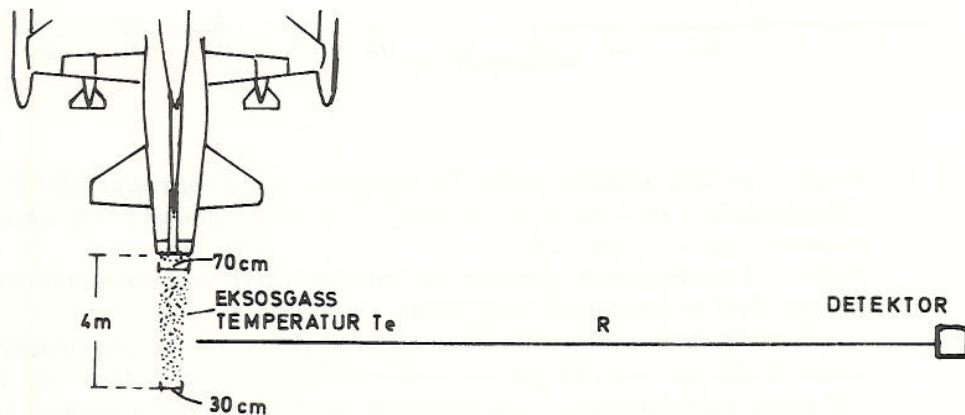
Som en ser er  $\text{NO}_2$ -innholdet sterkt avhengig av hvilken motortype som benyttes, mens CO-innholdet avhenger av blandingsforholdet luft–drivstoff.

Typiske temperaturprofiler for eksosgass er vist i figur 2.5.

Den spektrale radiansen fra et gassvolum er en funksjon av gassens sammensetning, trykk og temperatur. I prinsippet er det mulig å beregne den spektrale radiansen fra en gassblanding med den temperaturfordeling som er vist i figur 2.5, men det vil ta svært mye regnetid. Ved beregningene er det derfor benyttet den enkle modellen som er vist i figur 2.6.

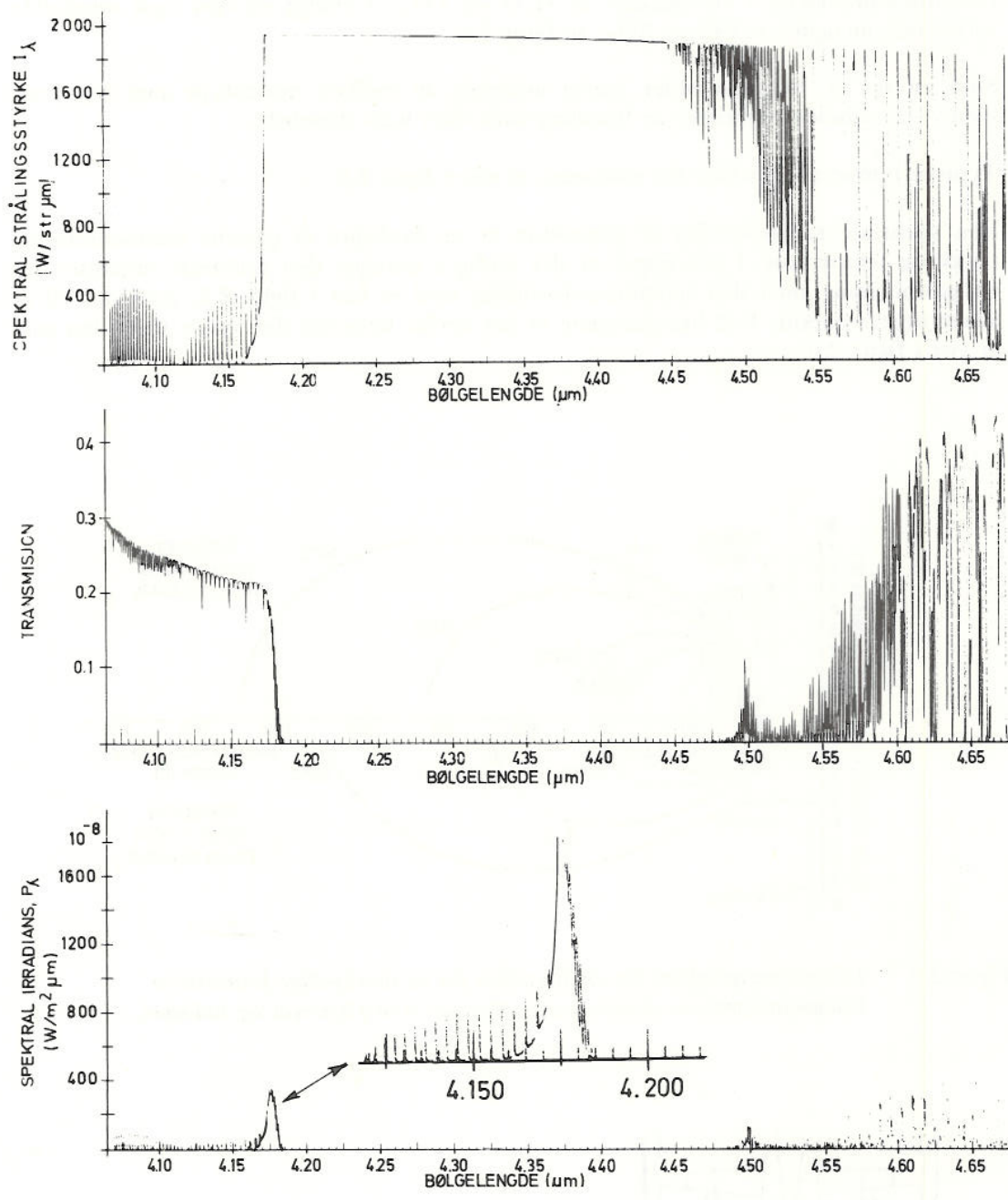


Figur 2.5 Temperaturprofiler for eksosgassen fra to forskjellige jetmotorer  
Temperaturprofilene vil være sterkt avhengige av bl a flyhøyde og -hastighet.



Figur 2.6 Modellen som er benyttet ved beregning av stråling fra eksosgassene





Figur 2.7 Øverst: Spektral strålingsstyrke fra eksosgass med temperatur  $500^\circ\text{C}$ , blandingsforholdet mellom  $\text{H}_2\text{O}$  og  $\text{CO}_2$  1 : 1, CO-innholdet 2%, eksosgassvolumet som vist i figur 2.6.  
Midten: Transmisjonen gjennom 10 km atmosfære med vanddampinnhold  $0,7 \text{ cm H}_2\text{O}$  pr km, optisk sikt 10 km.  
Nederst: Spektral irradians ved detektoren. Det er bare i bølgelengdeintervallet  $4,165 \mu\text{m} - 4,185 \mu\text{m}$  det er en vesentlig irradians. Dette skyldes at ved andre bølgelengder er transmisjonen i atmosfæren lav der emisjonen fra kilden er sterk.

Kravet til energibevarelse sammen med Kirshoffs lov fører til at sammenhengen mellom transmisjonen  $\tau(\lambda)$  gjennom en gass og emisjonskoeffisienten  $\epsilon(\lambda)$  er gitt ved

$$1 - \tau(\lambda) = \epsilon(\lambda) \quad (2.3)$$

Den utstrålte effekten fra eksosgassen med temperatur  $T_e$  i figur 5.2 blir derfor

$$I_\lambda = (1 - \tau_e(\lambda)) W_\lambda(T_e) \quad \text{W/m}^2 \text{ str } \mu\text{m} \quad (2.4)$$

der  $\tau_e(\lambda)$  – transmisjonen gjennom eksosgassen

$W_\lambda(T_e)$  – den spektrale radiansen fra et sort legeme ifølge Planck's lov

Strålingen  $L_\lambda$  transmitteres gjennom atmosfæren fram til detektoren i avstanden R. Spektral irradians ved detektoren er da

$$P_\lambda = \frac{L_\lambda T_a(\lambda, R)}{R^2} = \frac{W_\lambda(T_e)}{R^2} (1 - \tau_e(\lambda)) \tau_a(\lambda, R) \cdot a \quad \text{W/m}^2 \mu\text{m} \quad (2.5)$$

her er  $a$  – det projiserte arealet av kilden sett fra detektoren

$\tau_a(\lambda, R)$  – transmisjonen gjennom atmosfæren

Øverst i figur 2.7 er vist den spektrale strålingsstyrken fra eksosen beregnet ut fra modellen i figur 2.6, med et blandingsforhold mellom  $\text{CO}_2$  og  $\text{H}_2\text{O}$  på 1 : 1 og med 2%  $\text{CO}$ .  $\text{NO}_2$  er ikke tatt med p g a begrensninger i programmet som benyttes ved beregningene. I samme figur er også vist transmisjonen i atmosfæren,  $\tau_a(\lambda, R)$  når R er 10 km, optisk sikt 10 km og vanddampinnholdet er 0,7 cm pr km. Den spektrale irradiansen er fremstilt nederst på figuren. Som en ser er det bare i et lite bølglengdeområde omkring  $4,175 \mu\text{m}$  det er en vesentlig irradians. Ved å utføre beregningene for samme forhold, men nå uten  $\text{H}_2\text{O}$  og  $\text{CO}$  i eksosen, d v s ren  $\text{CO}_2$ , vil en se at det ikke blir noen forandring av mottatt effekt i det området som er av interesse. Dette betyr at det er  $\text{CO}_2$  som er kilden til strålingen som mottas, og at den spektrale irradiansen rundt  $4,175 \mu\text{m}$  er relativt uavhengig av  $\text{CO}_2$ -konsentrasjonen i eksosen.

Årsaken til at så lite transmitteres er at det også finnes  $\text{CO}_2$ -gass i atmosfæren. I det brede emisjonsbåndet mellom  $4,15$  og  $4,55 \mu\text{m}$  er  $1 - \tau_e = 1$ , d v s  $\tau_e = 0$ . Den høye spektrale irradiansen rundt  $4,17 \mu\text{m}$  skyldes at absorpsjonsbåndet p g a  $\text{CO}_2$  i den kalde (ca  $14^\circ\text{C}$ ) atmosfæren er litt smalere,  $4,2 - 4,5 \mu\text{m}$ , enn det tilsvarende emisjonsbåndet for den varme  $\text{CO}_2$ -gassen i eksosen.

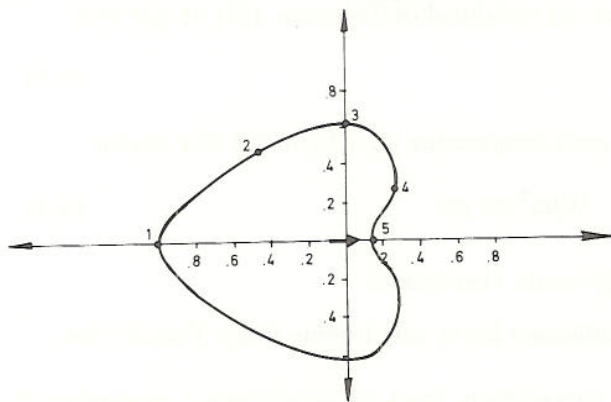
Etter transmisjon gjennom 10 km atmosfære står en igjen med ca  $5 \text{ W/str}$  innenfor et bølglengdeintervall på  $0,02 \mu\text{m}$  sentrert om  $= 4,175 \mu\text{m}$ , det svarer til en spektral radians innenfor intervallet på  $250 \text{ W}/\mu\text{m str}$ .

Den totale strålingen fra eksosen er derfor relativt liten i forhold til strålingen fra andre deler av flyet. Den spektrale strålingsstyrken er derimot svært stor. Dette kan en utnytte ved å plassere et smalbandet filter foran detektoren.

#### 2.4 Målinger av termisk stråling fra fly

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, se kapittel 6.





Figur 2.8 Polardiagram for strålingskontrasten i bølglengdeområdet 8–12  $\mu\text{m}$  for et fly av typen F-5A med en hastighet på 650 km/h. Pilen viser flyretningen.

Utstyret som ble benyttet er konstruert for andre formål og eger seg ikke særlig godt til kvantitative målinger. Måleresultatene blir derfor relativt usikre. En måleserie på 15 målinger av strålingen fra flyet rett bakover ga alle verdier mellom 190 og 300 W/str i bølglengdeområdet 8–12  $\mu\text{m}$  når flyets hastighet var 650 km/h.

Figur 2.8 viser retningsavhengigheten for strålingen fra flyet i bølglengdeområdet 8–12  $\mu\text{m}$ .

Dette diagrammet gjelder bare for stråling innenfor bølglengdeområdet 8–12  $\mu\text{m}$ , strålingen fra eksosgassene er derfor ikke med. Ut fra dette diagrammet og størrelsen på strålingen rett bakover kan strålingen rett forover beregnes til å være mellom 30 og 50 W/str innenfor bølglengdeområdet 8–12  $\mu\text{m}$ .

Som det også vil fremgå av kapittel 6 er disse målingene 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

## 2.5 Regnemaskinmodeller for beregning av termisk stråling fra fly

Forskningsinstitutter i flere land har forsøkt å utvikle regnemaskinmodeller for stråling fra fly. Disse modellene er i hovedsak basert på teoretiske beregninger som er kalibrert eller verifisert ved et mindre antall målinger. Noen Nato-land samarbeider om utvikling av en slik modell, men arbeidet er ikke kommet så langt at modellen er praktisk brukbar. Sverige, ved Forsvarets Materialverk, har laget en modell. Denne er utviklet ved Volvo-flygmotor.

Modellen er noe primitiv hva angår beskrivelse av strålingens spektrale variasjon, men synes ellers å være relativt detaljert m h t effektivt projisert areal for ulike aspektvinkler for et antall svenske og vestlige fly, flere russiske fly er også med i modellen. Motorene og motordelenes temperatur er i detalj innholdt i modellen. Derimot er det vanskelig å vurdere hvor god modellen er m h t stråling fra eksosgassene. For det første er grunnlaget for antakelsene om gassblanding, sotinnhold og formen på isotermene i avgassene ikke kjent. Det er ikke foretatt annet enn bakkemålinger av strålingen fra jetmotorer for å verifisere modellen.

**KONFIDENSIELT**

i h. t. Sikkerhetsinstruksen

Utskriften av strålingsdata for ulike flytyper er i den svenske modellen presentert som strålingsspektra i området  $1,8 \mu\text{m}$  til  $20 \mu\text{m}$  ved 5 asimut aspektvinkler og for to flyhøyder,  $h = 100 \text{ m}$  og  $h = 2000\text{--}5000 \text{ m}$ . Flyets hastighet er holdt konstant  $M = 0,9$ .

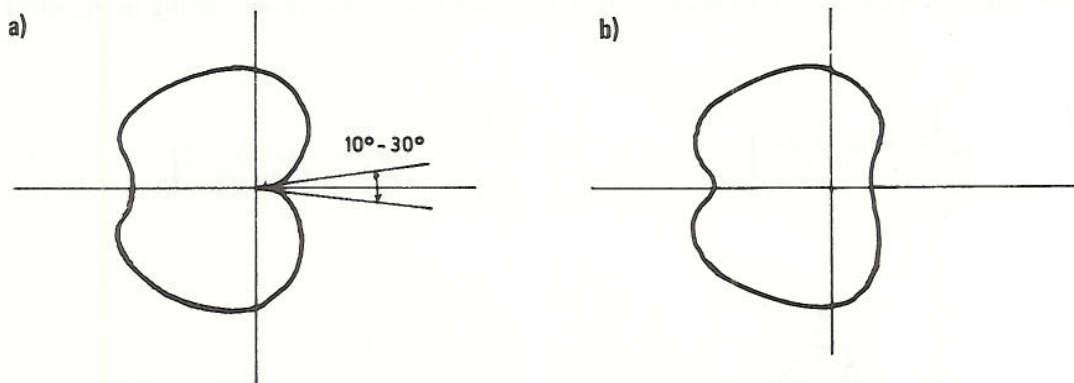
I tillegg til spektraldata gir modellen også polar diagrammer av strålingen. Disse representerer imidlertid bare den integrerte stråling i bølglengdeområdene  $3\text{--}5 \mu\text{m}$  og  $8\text{--}12 \mu\text{m}$ , altså ikke det man primært er interessert i: polardiagrammer for de sterke emisjonsbånd fra avgassene.

Det foreligger nå planer for måling av svenske jetfly. Disse målingene ventes påbegynt 1977 og skal utføres fra en Caravelle og med et Fourier-spektrometer. En må vente at det tar noe tid før disse måledata er bearbeidet, og regnemaskinmodellen er blitt korrigert med bakgrunn i disse målingene.

Idet de svenske rapportene er hemmelige, ble de bare tilgjengelige for gjennomsyn under et kort besøk ved FMV. Ved sammenlikning synes våre beregninger av skrogtemperatur og stråling fra motoren å være i overensstemmelse med de svenske beregningene. Det projiserte skrogareal lå ved ulike aspektvinkler i området  $3\text{--}5 \text{ m}^2$ . Polardiagrammer kunne tolkes slik at stråling fra motor og jet-plum ikke bidro til strålingen innenfor en kon i flyretningen med topp vinkel fra  $10^\circ$  til  $30^\circ$ , avhengig av flytype. Typiske polardiagrammer fra rapportene er gjengitt i figur 2.9.

Modellen er tilgjengelig for norske brukere ved å oppgi flytype, motordetaljer etc. En kjøring med utskrift av spektraldata og enkle polardiagrammer vil for én flytype koste i størrelsesorden 25 000 Skr.

I denne eksperimentelle forundersøkelse ville sannsynligvis verdien av en slik utskrift ikke bidrar i noen betydelig grad til å belyse problemene eller endre hovedkonklusjonene.



Figur 2.9 Typiske polardiagrammer for strålingen fra fly etter regnemaskinmodell fra Forsvarets Materialverk

a) Stråling fra eksosgassen

b) Termisk stråling i bølglengdeområder  $8\text{--}12 \mu\text{m}$

**KONFIDENSIELT**

i h. t. Sikkerhetsinstruksen



## STRÅLING FRA BAKGRUNNEN

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 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 dette komme i tillegg. Det er dette tillegget som skal detekteres.

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

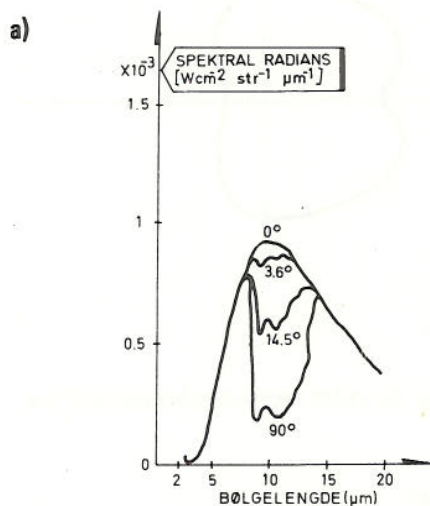
I figur 3.1 er vist resultatet fra målinger av den spektrale radiansen ved forskjellige elevasjonsvinkler og ved forskjellige atmosfæriske forhold. Som en ser er radiansen liten der absorpsjonen i atmosfæren er liten. Dersom lufttemperaturen ikke hadde variert med høyden, ville den spektrale radiansen være gitt ved

$$L_{\lambda} = (1 - \tau(\lambda)) W_{\lambda}(T) \quad (3.1)$$

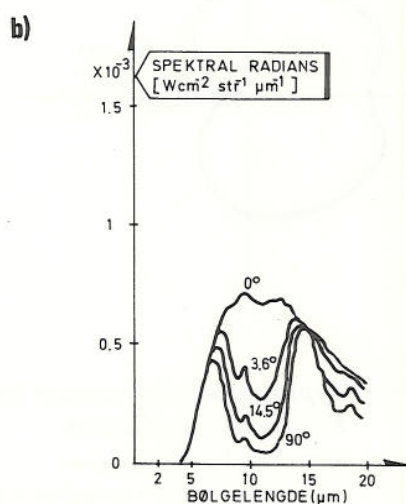
$W_{\lambda}(T)$  er spektral radians fra en sort stråler med temperatur  $T$  og  $\tau(\lambda)$  er total transmisjon fra jordoverflaten til et punkt utenfor atmosfæren, figur 3.2.

En ser her at for  $\theta = 0$  ser en det kalde verdensrommet gjennom mer atmosfære enn når  $\theta = 90^{\circ}$ . Dette er årsaken til at den spektrale radiansen fra himmelen får den avhengigheten av elevasjonsvinkelen som er vist i figur 3.1.

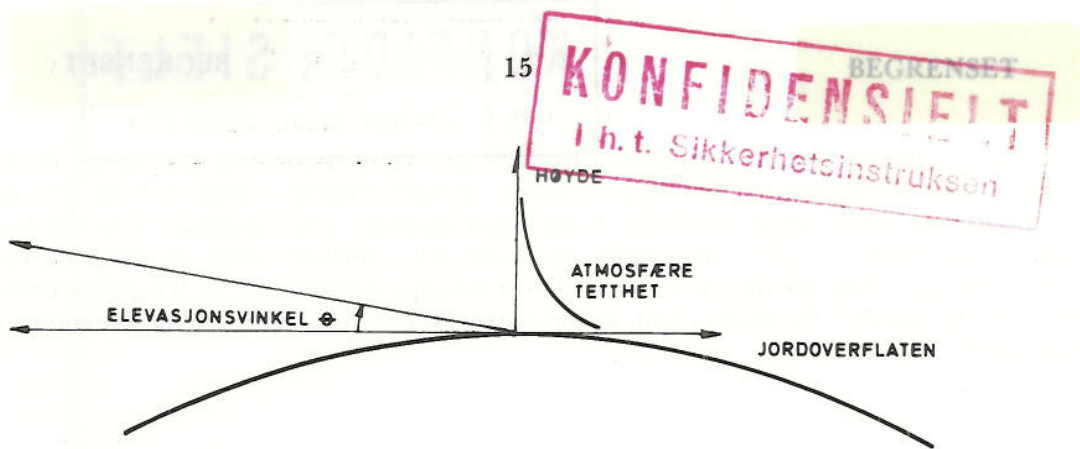
Strålingen fra undersiden av en sky vil være svært nær strålingen fra en sort stråler med samme temperatur som skyen. Figur 3.3 viser resultatet fra en måling av spektret



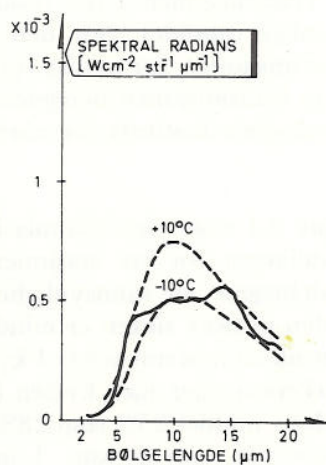
Figur 3.1a Spektrale radians fra en klar natthimmel ved tørt innlandsklima, med elevasjonsvinkelen som parameter (1)



Figur 3.1b Spektrale radians fra en klar natthimmel ved sjøen, med elevasjonsvinkelen som parameter (1)



Figur 3.2 Transmisjonsvei fra jordoverflaten til et punkt utenfor atmosfæren ved varierende elevasjonsvinkel  $\theta$

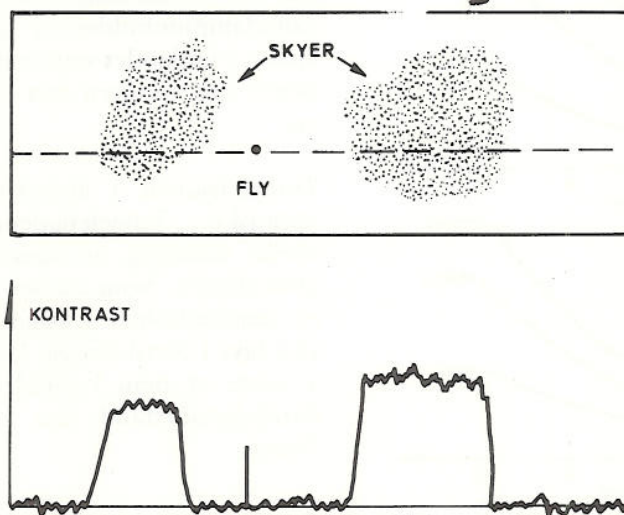


Figur 3.3 Stråling fra undersiden av en sky

fra en sky. Temperaturen i den lavere atmosfære er  $10^{\circ}\text{C}$  og temperaturen på undersiden av skyen er  $-10^{\circ}\text{C}$ . Som en ser dominerer egenstrålingen fra atmosfæren i de områder der den transmitter dårlig. I de områder der transmisjonen er god, dominerer strålingen fra undersiden av skyen.

Spektra som er vist i figur 3.1 og 3.3 må kun betraktes som typiske måleresultater, variasjonene fra sted til sted og mellom de ulike årstider og tid på døgnet vil være store.

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 3.4.



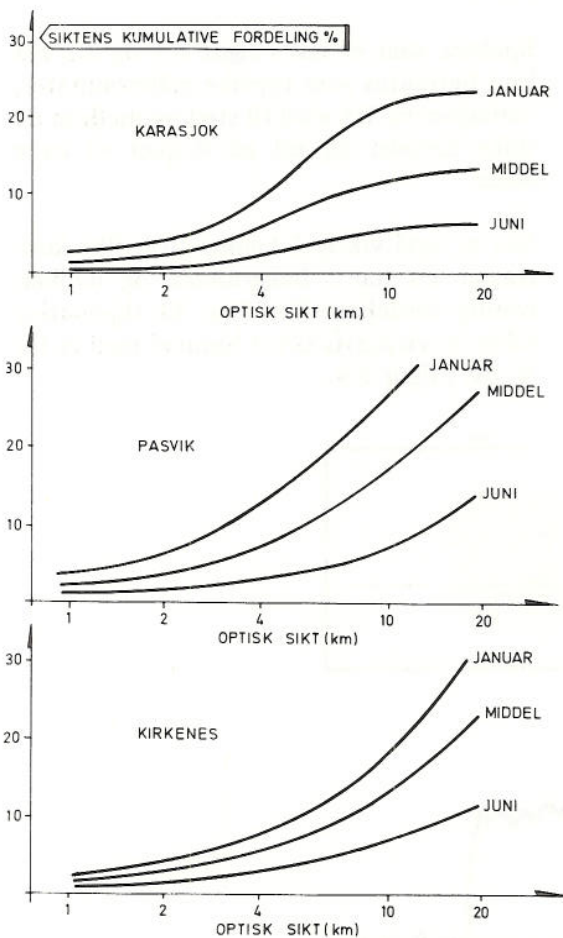
Figur 3.4 Øverst: En delvis skyet himmel med et fly  
Nederst: Skjematisk fremstilling av kontrasten mellom skyene eller målet og klar himmel når den er målt langs den stiplede linjen på den øverste tegningen



Nederst på figuren er vist kontrasten mellom den klare himmelen, skyene og flyet. (Sammenlign dette med bildene fra forsøket, spesielt bildene i figur 6.1 der en ser flyet mot en delvis skyet himmel). Kontrastvariasjonene i bakgrunnen, som må betraktes som støy, vil ofte være større enn kontrasten mellom målet og bakgrunnen. Ved å benytte den kjennskap en har til den romlige fordelingen av bakgrunnsvariasjonene og signalet fra målet, kan denne støyen reduseres. Dette vil bli behandlet i kapittel 8.

4 VÆRFORHOLD

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. Når den visuelle sikten, definert som den avstanden over hvilken transmisjonen for synlig lys er 2%, den relative fuktigheten og temperaturen er kjent, kan transmisjonen beregnes. Det er derfor innhentet slike værdata fra det norske Meteorologiske Institutt for noen observasjonsstasjoner i Nord-Norge.



Figur 4.1 viser den kumulative siktfordelingen for tre stasjoner. Disse fordelingene gir sannsynligheten for at den optiske sikten er mindre enn, eller lik en bestemt verdi. I kystklima (Kirkenes) eller nær kysten (Pasvik) er det i middel 25% resp 28% av året lavere sikt enn 20 km. I innlandsklima er sikten bedre, bare 13 resp 11% av året er det lavere sikt enn 20 km resp 10 km.

Tabell 4.1 viser vanddampinnholdet i atmosfæren i de forskjellige månedene for et normalår. Som en ser er vanddampinnholdet i atmosfæren lavere i innlandet enn ved kysten, og lavere om vinteren enn om sommeren.

Transmisjonen i atmosfæren i det termiske bølgelengdeområdet er sterkt avhengig av vanninnholdet i atmosfæren. Som en ser i tabell 4.1 er vanninnholdet i atmosfæren relativt lavt i Nord-Norge. Det er derfor å vente at man i middel får større deteksjonsavstand her enn i Sør-Norge.

Figur 4.1 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 4.1 Midlere vanddampinnholdet i atmosfæren for et normalår i gram  $H_2O$  pr  $m^3$  luft

## 5 ATMOSFÆRETRANSMISJON

Strålingen fra et fly må forplante seg gjennom atmosfæren fram til detektoren. Et fly kan betraktes som en punktkilde med spektral strålingsstyrke  $I_\lambda$  gitt i  $w/str \mu m$ . Den spektrale irradians i avstand  $R$  fra kilden er da

$$E_\lambda(R) = \tau(\lambda, R) \frac{1}{R^2} I_\lambda \quad W/m^2 \mu m \quad (5.1)$$

$\tau(\lambda, R)$  er transmisjonen i atmosfæren ved bølglengden  $\lambda$  og over avstanden  $R$ . Irradiansen innenfor bølglengdeintervallet  $\Delta\lambda$  finnes ved å integrere (5.1)

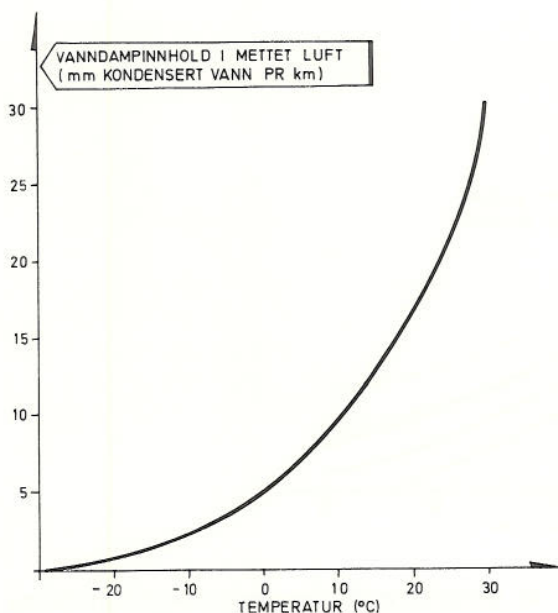
$$E_{\Delta\lambda}(R) = \frac{1}{R^2} \int_{\Delta\lambda} \tau(\lambda, R) I_\lambda d\lambda \quad W/m^2 \quad (5.2)$$

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

$$\tau(\lambda, R) = e^{-\sigma(\lambda) \cdot R} \quad (5.3)$$

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

$$\sigma(\lambda) = \alpha(\lambda) + \gamma(\lambda) \quad (5.4)$$

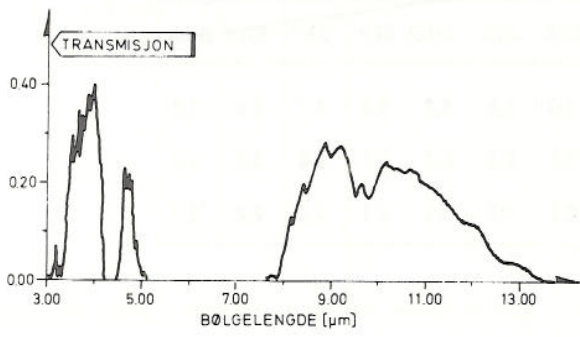


Figur 5.1 Vanddampinnholdet i mettet luft

der  $\alpha$  er absorpsjonskoeffisienten og  $\gamma$  er spredningskoeffisienten.  $\alpha$  gir uttrykk for hvor sterkt strålingen absorberes av gassene i atmosfæren, mens  $\gamma$  er et uttrykk for dempning p g a spredning av strålingen fra molekylere og aerosoler i atmosfæren.

Konsentrasjonene av de fleste gassene i atmosfæren er relativt konstante. Årsaken til variasjoner i transmisjonen over en gitt avstand er variasjoner i konsentrasjon av vanddamp og aerosoler. Vanddampinnholdet er avhengig av lufttemperaturen og den relative fuktigheten. Figur 5.1 viser massen av vanddamp i mettet luft som funksjon av temperaturen.





Figur 5.2 Transmisjonen i 10 km atmosfære med 10 km optisk sikt og 9 mm H<sub>2</sub>O pr km

Vanndampinnholdet er ofte gitt i enheten mm kondensert vann pr km, mm H<sub>2</sub>O pr km. Et gram vanndamp pr m<sup>3</sup> svarer da til 1 mm H<sub>2</sub>O pr km. Som en ser av figur 5.1 øker H<sub>2</sub>O-innholdet med økende temperatur ved konstant relativ fuktighet. Da absorpsjonen er bestemt av den absolute vannmengden, betyr dette at transmisjonen over en gitt avstand vil synke når temperaturen øker dersom den relative fuktigheten er konstant.

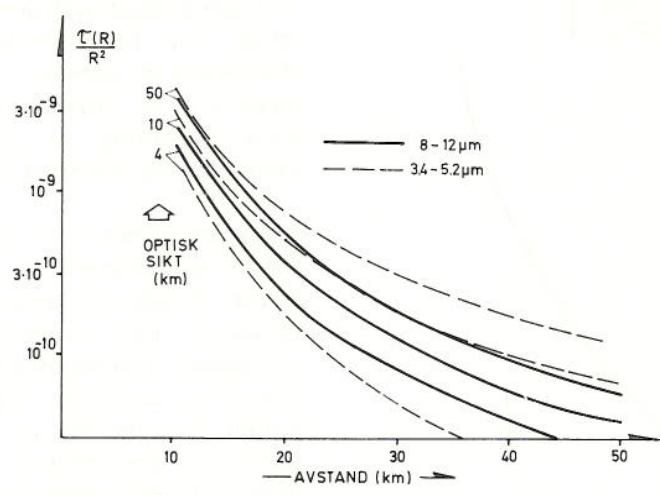
For å beregne spredningen fra aerosoler, tar en utgangspunkt i observasjoner av optisk sikt, definert som den avstanden der transmisjonen for synlig lys er 2%. Med utgangspunkt i slike siktdata kan spredningen estimeres ved andre bølgelengder.

Det vil ikke bli gått nærmere inn på teorien for transmisjonsberegninger her. Beregningsmetodene er beskrevet i (3) og (4). I figur 5.2 er vist et transmisjonsspektrum for bølgelengdeområdet 3–14 μm gjennom 10 km atmosfære med optisk sikt 10 km og 9 mm H<sub>2</sub>O pr km.

Dersom en i ligning (5.2) erstatter I<sub>λ</sub> med sin midlere verdi innenfor bølgelengdeintervallet Δλ, blir irradiansen E<sub>Δλ</sub>(R) tilnærmet gitt av

$$E_{\Delta\lambda}(R) = I_{\lambda m} \frac{1}{R^2} \int_{\Delta\lambda} \tau(\lambda, R) d\lambda = I_{\lambda m} \Delta\lambda \frac{\tau(R)}{R^2} \quad (5.5)$$

der τ(R) er den midlere transmittans i intervallet Δλ. Dette betyr at det er leddet τ(R)/R<sup>2</sup> som gir signalets avhengighet av avstanden til målet. I figur 5.3 er dette forholdet tegnet opp for forskjellige verdier av den optiske sikten og for bølgelengdeområdene 3.4 – 5.2 μm og 8–12 μm. Lufttemperaturen er 14°C og relativ fuktighet er 75%. Dette gir 9 mm H<sub>2</sub>O pr km.



Figur 5.3 τ(R)/R<sup>2</sup> (m<sup>-2</sup>) som funksjon av avstanden R for bølgelengdeområdene 3,4 – 5,2 μm og 8–12 μm med den optiske sikten som parameter, vanndampinnhold 9 mm/km

Dette diagrammet kan brukes bl a til å finne hvordan kravene til deteksjonssystemets ytelse avhenger av de kravene en stiller til deteksjonsavstand og bruk ved nedsatt optisk sikt. En kan for eksempel tenke seg at en har et deteksjonssystem som under bestemte forutsetninger kan detektere et fly på en avstand av 20 km når den optiske sikten er 10 km. Deteksjonsavstanden når den optiske sikten er 4 km er da den avstanden der  $\tau(R)/R^2$  ved 4 km optisk sikt er den samme som  $\tau(R)/R^2$  ved 20 km avstand og optisk sikt 10 km.

## 6 FORSØK MED TERMISK AVBILDNINGSSYSTEM FOR DETEKSJON AV FLY

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.

Tabell 6.1 viser de atmosfæriske forholdene ved forsøkene. Som en ser var forholdene nesten ideelle ved forsøket 18 mars, mens det ved de to andre forsøkene var dårligere forhold med høyt vanninnhold i luften, ved forsøket 14 juni var det i tillegg mye dis.

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

Totalt synsfelt	1° x 4,6°
Instantant synsfelt	0,5 x 0,5 m rad
Bølgelengdeområde	8–12 μm
Billedfrekvens ved opptak	15 bilder pr sekund
Ekvivalent støytemperatur (NET)	≈ 0,04°C

FORSØK	DATO	LUFT-TEMP °C	REL FUK-TIGHET, %	VANN-INNHOLD	VISUELL SIKT	
1	18 MAR	2,4	52	0,3 cm H <sub>2</sub> O PR KM	> 40 km	LITE SKYET
2	14 JUN	23	65	1,3 cm H <sub>2</sub> O PR KM	10 km	DELVIS SKYET
3	31 AUG	16	63	0,85 cm H <sub>2</sub> O PR KM	30 km	DELVIS SKYET

Tabell 6.1 Atmosfæriske forhold ved forsøkene

Disse parametrene er svært forskjellige fra de som vil være aktuelle for et flydeteksjonssystem. Et slik system vil ha et stort synsfelt, 10–20° elevasjon og 40–60° i asimet. Det instantane synsfeltet vil antakelig være større og billedfrekvensen lavere. Forskjellen i billedfrekvens og instantant synsfelt har liten direkte betydning, men det



20  
**KONFIDENSIELT**

BEGRENSSET

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  $6^\circ$ . Billedinformasjonen ble tatt opp på en båndopptaker slik at den kunne spilles av senere.

En oversikt over de opptak som ble gjort under forsøkene, med en kort beskrivelse av hvert enkelt måle-run er gitt i tabell 6.2.

FORSØK	RUN	
1	A	FLYET BLE FULGT UT TIL EN AVSTAND PÅ CA 55 km.
	B	FLYET BLE FULGT UT TIL 28 km, DER DET SVINGTE OG FORSVANT I EN SKY FØR DET KOM INN PÅ KURS MOT FFI. DET KOM INN I SYNSFELTET IGJEN VED EN AVSTAND PÅ 12 km. SIGNALET VAR DA SÅ STERKT AT VI VILLE HA SETT FLYET PÅ STØRRE AVSTAND DERSOM DET HADDE VÆRT I SYNSFELTET.
2	A	FLYET BLE FULGT UT TIL 28 km DER DET FORSVANT I EN SKY EN TID ETTER AT DET HADDE BEGYNT Å SVINGE.
	B,C,D	FLYET FORSVANT I SKYER I AVSTANDER PÅ 15–25 km.
3	A	FLYET BLE FULGT UT TIL 30 km DER DET SVINGTE OG KOM INN MOT FFI IGJEN. DET BLE SETT HELE TIDEN.
	B	SOM RUN 3A
	C	DET BLE FULGT UT TIL EN AVSTAND PÅ CA 50 km, DER DET SVINGTE. SIGNALET BLE DA SÅ SVAKT AT VI IKKE KUNNE SE DET IGJEN FØR AVSTANDEN VAR CA 30 km.

Tabell 6.2 Oversikt over de forsøk som ble utført

Måleresultatene kan presenteres på ulike måter, det mest illustrative er å fotografere billedskjermen og samtidig fremstille på et oscilloskop den linjen i bildet som inneholder målet. På billedskjermen fremstår da skyene som store hvite områder og målet som en hvit flekk. Informasjonen på billedskjermen forringes noe i foto- og reproduksjonsprosessen.

Et representativt utvalg av måleresultatene vil nå bli diskutert.

Figur 6.1 viser måleresultater fra forsøk 2. Fotografiene av billedskjermen og video-signalet viser her hvordan signal/støyforholdet avtar med økende avstand.

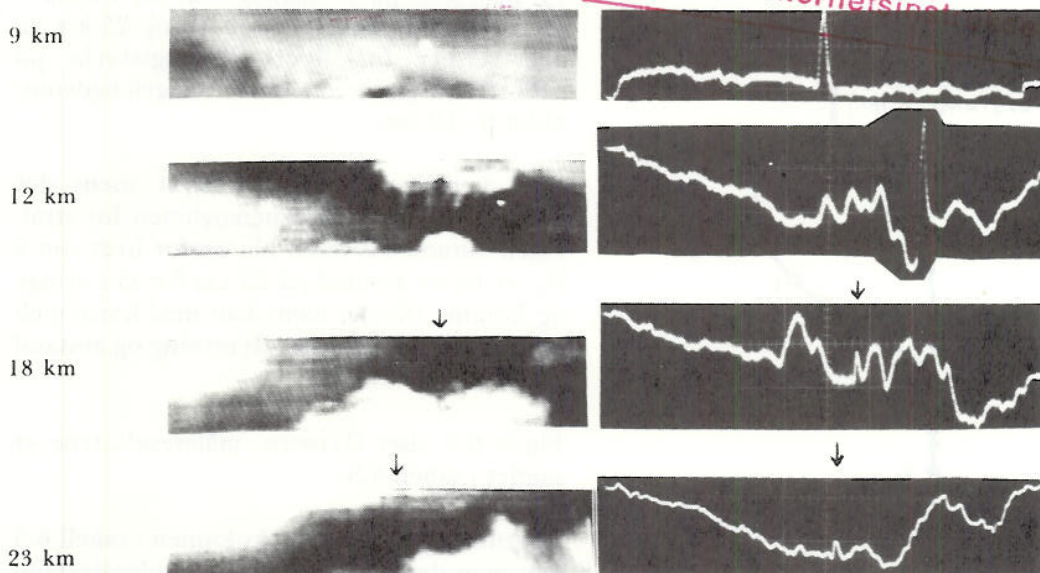
Betydningen av de atmosfæriske forhold ser en ved å sammenligne figur 6.2 som viser flyet ved avstanden 23 km under svært gunstige atmosfæriske forhold (forsøk 1, optisk sikt  $> 40$  km og  $0,3$  cm  $H_2O$  pr km), med bildene tatt i samme avstand ved dårligere forhold (forsøk 2, optisk sikt  $\approx 10$  km og  $1,3$  cm  $H_2O$  pr km), figur 6.1. Som en ser er det en svært stor forskjell i signal/støyforholdet for de to tilfellene.

Avbildningssystemet var ikke kalibrert ved forsøk 1, det er derfor ikke mulig å foreta en kvantitativ måling av forskjellen i signalstyrke.

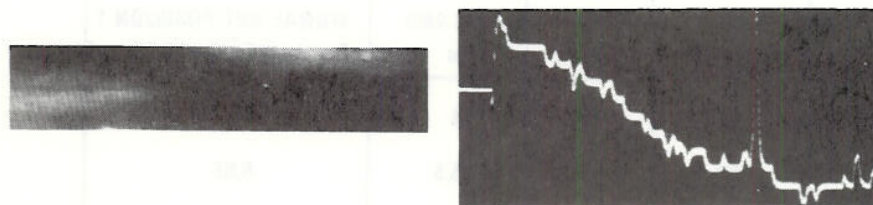
**KONFIDENSIELT**

i h. t. sikkerhetsinstruksjonen

KONFIDENSIELT  
i h. t. Sikkerhetsinstr.



Figur 6.1 Måleresultater fra forsøk 2 (10 km optisk sikt, 1,3 cm H<sub>2</sub>O pr km)  
Flyet er sett bakfra.



Figur 6.2 Flyet sett bakfra i avstand 23 km ved forsøk 1 (optisk sikt > 40 km, 0,3 cm H<sub>2</sub>O pr km)

Utstyret egner seg ikke særlig godt til kvantitative målinger da det er konstruert for andre formål. Det er imidlertid mulig å måle irradiansen som skyldes strålingen fra flyet med en nøyaktighet på ca ±20%. Når irradiansen E er kjent, kan flyets strålingsstyrke beregnes fra formelen

$$I = R^2 \frac{1}{\tau(R)} \cdot E \quad \text{W/str}$$

der

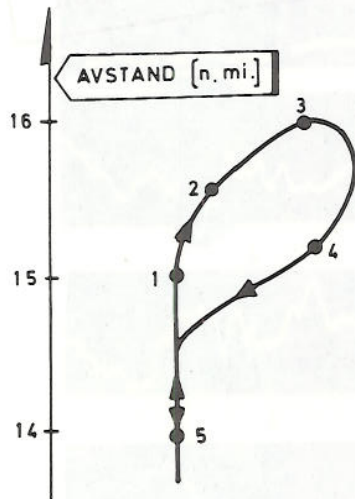
R – avstand til flyet

$\tau(R)$  – den midlere transmisjon i bølgelengdeområdet 8–12  $\mu\text{m}$  for atmosfæren

$\tau(R)$  må beregnes med utgangspunkt i observasjoner av de meteorologiske forhold. Avstanden R bestemmes ved at flygeren med bestemte mellomrom gir beskjed om flyets posisjon.

KONFIDENSIELT  
i h. t. Sikkerhetsinstr.





Figur 6.3 Flyrute ved måling av strålingens retningsavhengighet

En måleserie på 15 målinger under forsøk 2 og 3 ved avstander mellom 15 og 25 km ga alle verdier for flyets strålingsstyrke på 190–300 W/str innenfor bølgelengdeområdet 8–12  $\mu\text{m}$ .

Ved å måle signalet fra flyet mens det svinger, kan retningsavhengigheten for strålingen finnes. Flyveren ble derfor bedt om å fly ut til en avstand på 25 km for så å svinge og komme tilbake mens han med korte mellomrom ga beskjed om flyretning og avstand (forsøk 3 run a).

Figur 6.3 viser flyruten, måleresultatene er samlet i tabell 6.3.

På grunnlag av den siste kolonnen i tabell 6.3 kan man danne seg et bilde av polardiagrammet for strålingen fra flyet, dette ble vist i figur 2.8.

POSISJON	SIGNAL AMPLITUDE	ASPEKT-VINKEL	AVSTAND nm	SIGNAL REL POSISJON 1 (korrigert for forskjell i avst.)
1	1	180°	15	1
2	0,60	ca 135°	15,5	0,65
3	0,53	90°	16	0,62
4	0,38	ca 45°	15	0,38
5	0,18	0°	14	0,15

Tabell 6.3 Måledata som gir retningsavhengigheten for strålingen fra flyet

Strålingen rett forover vil etter dette være mellom 30 og 50 W/str i bølgelengdeområdet 8–12  $\mu\text{m}$ .

Det går klart fram av figur 6.1 at videosignalet egner seg for avansert signalbehandling og filtrering ved å utnytte a priori informasjon om målet og skybakgrunnen:

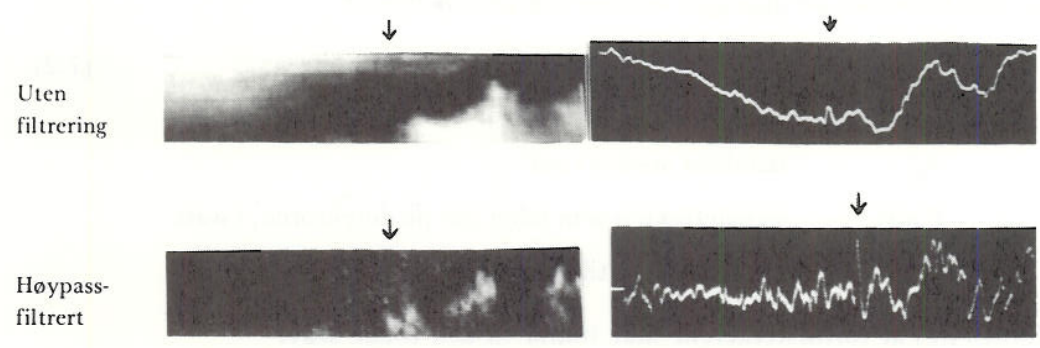
- Bildet av skybakgrunnen vil være svært stasjonært
- Målet opptrer bare i et eller høyst to bildelementer, mens en sky vil dekke flere bildelementer

Deteksjonssystemet som ble benyttet ved målingene, har et svært lite synsfelt. Flyet måtte derfor følges, og det går ikke fram av resultatene at bakgrunnen er relativt stasjonær.



KONFIDENSIELT  
i h. t. Sikkerhetsinstruksen

For å illustrere hva en kan oppnå ved å utnytte at målet er en punktkilde, mens skyene har større utstrekning, ble videosignalet derivert, høypassfiltrert, figur 6.4. Selv med denne primitive form for filtrering oppnås bedre kontrast og langt større dynamisk område.

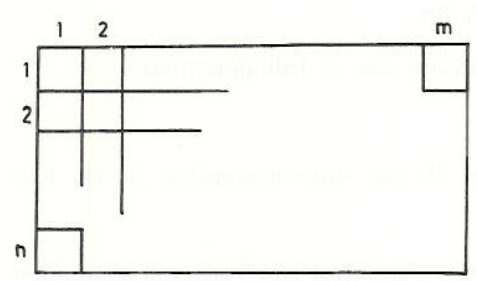


Figur 6.4 Virkningen av høypassfiltrering av videosignalet

Sammenliknes målingene av den termiske strålingen fra flyet med de teoretiske beregningene i kapittel 2, vil man komme fram til at overensstemmelsen er relativt god. Dersom det bare er den aerodynamiske oppvarmingen som er kilde til strålingen rett forover og en setter det projiserte areal av flykroppen til  $3 \text{ m}^2$ , får en etter teorien en spektral strålingsstyrke på  $25 \text{ W/str}$  i  $8\text{--}12 \mu\text{m}$ . Målingene ga verdier innenfor området  $30\text{--}50 \text{ W/str}$ . Strålingen fra utblåsningsrørene skal etter teorien være ca  $300 \text{ W/str}$  i  $8\text{--}12 \mu\text{m}$ . Dette stemmer også med måleresultatene,  $190\text{--}300 \text{ W/str}$ . Dette viser at de teoretiske betraktningene i avsnittet om stråling fra flyet er gjort på bakgrunn av rimelig gode antakelser.

## 7 PARAMETERANALYSE OG FØLSOMHETSBEREGNINGER FOR ET TERMISK DETEKSJONSSYSTEM

Vi skal i dette kapittel ta for oss de parametre som er med på å bestemme et deteksjonssystems yteevne, og beskrive hvordan disse forholder seg til deteksjonsfølsomheten.



Figur 7.1 Oppdeling av billedplanet i  $m \times n$  bildelementer

For å foreta en beregning av følsomheten er det ikke nødvendig å spesifisere nærmere verken avspøkning mekanisme eller optikk. Optikken avbilder scenen i et billedplan, som tenkes delt opp i  $m \times n$  bildelementer, se figur 7.1.

Ved hjelp av  $N$  detektorer avspøkes hele dette billedplanet i løpet av tiden  $T_f$ , billedtiden. Det er ikke nødvendig å spesifisere nærmere hvordan denne avspøkningen skjer, men vi antar at hver detektor avspøker like mange bildelementer i løpet av tiden  $T_f$ . Antall bildelementer som hver enkelt detektor av-

KONFIDENSIELT

KONFIDENSIELT  
i h. t. Sikkerhetsinstruksen

søker pr tidsenhet blir da

$$M = \frac{m \cdot n}{n} \cdot \frac{1}{T_f} \quad (\text{billedelementer/sekund}) \quad (7.1)$$

Signalet fra hver enkelt detektor forsterkes av en forforsterker med båndbredde  $\Delta f$ . Signal-støyforholdet på utgangen av disse forforsterkerne er

$$\frac{S}{N} = (\Lambda_d \Delta f)^{-1/2} \int P_d(\lambda) D^*(\lambda) d\lambda \quad (7.2)$$

$\Lambda_d$  – detektor arealet i  $\text{cm}^2$

$P_d(\lambda)$  – signaleffekten som faller inn på detektoren, i watt

$D^*(\lambda)$  – detektiviteten til detektoren gitt i  $\text{cm} \sqrt{\text{Hz/W}}$

Det forutsettes at forforsterkerene ikke bidrar til den totale støy.

Detektorarealet bestemmes ut fra relasjonen

$$A_d = f^2 \alpha \beta \quad (7.3)$$

- der
- $\alpha$  – det vertikale instantane synsfeltet
  - $\beta$  – det horisontale instantane synsfeltet
  - $f$  – fokallengden til det optiske system

Det totale synsfeltet er

$$A \times B = (\alpha \cdot n) (\beta \cdot m) \quad (7.4)$$

Båndbredden  $\Delta f$  velges ifølge samplingsteoremet lik 0,5 ganger antall billedelementer som en detektor avsøker pr sekund.

$$\Delta f = \frac{M}{2} = \frac{1}{2} \frac{m \cdot n}{T_f} \quad (7.5)$$

Ved å sette uttrykkene for detektorareal (7.3), det totale synsfelt (7.4) og båndbredde (7.5) inn i ligningen for signal-støyforholdet (7.2) får vi

$$\frac{S}{N} = \sqrt{\frac{2 T_f N}{A B}} \frac{1}{f} \int P_d(\lambda) D^*(\lambda) d\lambda \quad (7.6)$$

I den videre analyse kan man skille mellom to tilfeller:

- a) Målet dekker et areal i billedplanet som er mindre enn et billedelement
- b) Målet dekker mer enn et billedelement

Det er tilfelle a som er aktuelt ved deteksjon av fly på store avstander. Et fly kan derfor alltid oppfattes som en punktstrålingskilde.

Når  $I_\lambda$  er den spektrale strålingsstyrken fra et fly, er spektral irradians ved avstanden R gitt ved

$$E_\lambda = \frac{I_\lambda}{R^2} \tau_a(\lambda, R) \quad [\text{W/m}^2 \mu\text{m}] \quad (7.7)$$

der  $\tau_a(\lambda, R)$  er transmisjonen i atmosfæren over avstanden R



Effekten som faller inn på detektoren er da

$$P_d(\lambda) = \frac{I_\lambda}{R^2} \tau(\lambda, R) A_0 \quad (7.8)$$

$A_0$  er her arealet av inngangsaperturen til deteksjonssystemets optikk og  $\tau(\lambda, R)$  er den totale transmisjonen i atmosfæren, det optiske system og et eventuelt filter foran detektoren

$$\tau(\lambda, R) = \tau_a(\lambda, R) \tau_0(\lambda) \tau_f(\lambda) \quad (7.9)$$

Uttrykket for signaleffekten på detektoren (7.8) innsatt i ligningen for signal-støyforholdet (7.6) gir

$$S/N = \sqrt{\frac{2T_f N}{A \cdot B}} \frac{A_0}{R^2} \frac{1}{f} \int \tau(\lambda, R) I_\lambda D^*(\lambda) d\lambda \quad (7.10)$$

Ved videre å innføre inngangsaperturens diameter  $D$ ,  $A_0 = D^2 \cdot \pi/4$  og F-nummer for optikken  $F\# = f/D$ , får vi

$$S/N = \sqrt{\frac{2T_f N}{A \cdot B}} \cdot \frac{\pi D}{4F\#} \frac{1}{R^2} \int \tau(\lambda, R) I_\lambda D^*(\lambda) d\lambda \quad (7.11)$$

Ved å anta at integrasjonen i ligning (7.11) foretas over et bestemt bølgelengdeintervall, og ved å anta at en tilnærmet kan erstatte de forskjellige størrelsene i integralet med deres midlere verdi i intervallet, finner en ved å ordne

$$S/N = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \left( \frac{1}{\sqrt{AB}} \right) \left( \frac{\tau_0 D}{F\#} \right) \left( \frac{\tau_a(R)}{R^2} \right) (\sqrt{N} D^*) \sqrt{T_f} I \quad (7.12)$$

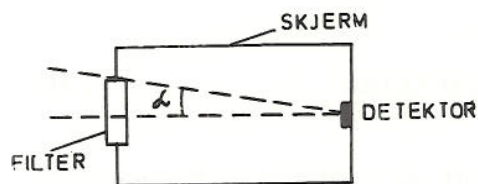
Uttrykket for  $S/N$  er her delt opp i forskjellige faktorer, der hver faktor representerer en del av systemet.

- $\frac{1}{\sqrt{AB}}$  – Det totale synsfelt er  $A \times B$ . En økning av det totale synsfelt reduserer signal-støyforholdet med  $1/\sqrt{AB}$ .
- $\frac{\tau_0 D}{F\#}$  – Dette leddet gir sammenhengen mellom signal-støyforholdet og parametrene til det optiske systemet. Signal-støyforholdet er proporsjonalt med aperturdiameteren  $D$ , transmisjonen  $\tau_0$  i optikken og omvendt proporsjonalt med F-nummeret.
- $D^* \sqrt{N}$  – Signal-støyforholdet er proporsjonalt med kvadratroten av antall detektorelementer og proporsjonalt med detektiviteten.
- $\sqrt{T_f}$  –  $T_f$  er billedtiden, en reduksjon av antall bilder pr sekund øker signal-støyforholdet med kvadratroten av billedtiden.
- $I$  – Signal-støyforholdet er proporsjonalt med målets strålingsstyrke.
- $\tau_a(R)/R^2$  – Signal-støyforholdet er proporsjonalt med atmosfærens transmisjon  $\tau_a(R)$  og med  $1/R^2$ , der  $R$  er avstanden til målet.

For de fleste moderne detektorer vil  $D^*$  være svært nær sin teoretisk maksimale grense. For en detektor montert som vist i figur 7.2 blir  $D^*$  da gitt ved

$$D^*(\lambda) = \begin{cases} \frac{\lambda}{hc} \sqrt{2\eta} [\sin^2 \alpha \int_0^{\lambda_c} Q_{b\lambda} \tau_f(\lambda) d\lambda]^{-1/2} & \text{for } \lambda \leq \lambda_c \\ 0 & \text{for } \lambda > \lambda_c \end{cases} \quad (7.13)$$

- $h$  – Plancks konstant
- $c$  – Lyshastigheten
- $\lambda$  – Bølglengden
- $\eta$  – Detektorens kvantevirkningsgrad
- $Q_{b\lambda}$  – Bakgrunnens spektrale fotoneksitans
- $\tau_f(\lambda)$  – Filterets transmisjon
- $\lambda_c$  – Detektorens øvre bølglengdegrens



Figur 7.2 Detektor med kjølt skjerm og filter

Det er statistiske fluktusjoner i den innfallende fotonfluksen som er den begrensende støykilde. Denne støyen vil derfor alltid være til stede.

Som en ser av ligning (7.13) vil  $D^*(\lambda)$  være avhengig av detektorens øvre bølglengdegrens  $\lambda_c$  og filterets transmisjon  $\tau_f(\lambda)$ . Disse størrelsene vil imidlertid også ha innflytelse på hvor stor del av signalstrålingen som når detektoren.  $\tau_f(\lambda)$  og  $\lambda_c$  må derfor velges slik at signal-støyforholdet gitt av (7.11) blir maksimalt når en setter inn for

flyets spektrale strålingsstyrke  $I_\lambda$  og atmosfæretransmisjonen  $\tau_a(\lambda, R)$ .

Det totale synsfelt  $A \times B$  er en primær systemparameter og velges derfor ut fra kravene til dekningsområde for deteksjonssystemet.

Da signal-støyforholdet er proporsjonalt med kvadratroten av billedtiden, bør denne velges så stor som mulig under hensyntaken til flyets vinkelhastighet. Den må ikke velges så stor at flyet beveger seg for mye i scenen mellom hver gang den avses. Av ligning (7.12) ser en også at en bør benytte så mange detektorelementer som mulig, men denne parameteren vil ha en sterk innflytelse på systemets pris.

Aperturdiameteren til det optiske system,  $D$ , bør være så stor som mulig. Denne størrelsen har imidlertid en sterk innflytelse på den resulterende pris og vekt av systemet. F-nummeret kan man i praksis vanskelig få mindre enn 1, da dette vil gå ut over transmisjonen i optikken. Dette er en følge av at antall optiske elementer øker ved lave  $F\#$  ved det synsfelt som her er aktuelt.

Det er ved denne analyse av signal-støyforholdet bare tatt hensyn til støy som skyldes statistiske fluktusjoner i innfallende fotonfluks. Dette representerer den teoretisk laveste støygrense for et slik system. Den begrensende støykilde vil ofte være strålingsgradienter i bakgrunnen og mulige variasjoner i atmosfærens transmisjon innenfor det totale synsfelt. For et system som skal detektere fly, vil strålingsgradienter i bakgrunnen skyldes kontrast mellom skyer og klar himmel, og kontrast mellom solbelyste og ikke-solbelyste deler av skyene. Denne støyen kan i motsetning til støyen som skyldes statistiske fluktusjoner i den innfallende fotonfluks, reduseres ved riktig filtreringsteknikk. Med den halvledertechnologi som er tilgjengelig, vil avansert filterteknikk være mulig å realisere selv i bærbar systemer.

Støybidraget fra strålingsgradienter i bakgrunnen vil være sterkt væravhengig og er derfor vanskelig å behandle teoretisk på samme måte som den fundamentale fotonstøyen.



**KONFIDENSIELT**  
i h. t. Sikkerhetsinstruksen

## 8 FORSLAG TIL VALG AV SYSTEMPARAMETRE FOR ET KONKRET DETEK-SJONSSYSTEM

I foregående kapittel er innflytelsen av de forskjellige parametre på deteksjons-systemets yteevne beregnet og diskutert. Av avgjørende betydning for konkrete para-metervalg er imidlertid de systemspesifikasjoner som gjelder for maksimal vekt, volum og pris. Disse vil igjen være avhengige av de krav en stiller til dekningsområde (totalt synsfelt) og deteksjonsavstand. Det ligger utenfor rammen av denne studien å dis-kutere hvilke krav en må sette til dekningsområde og deteksjonsavstand ved forskjel-lige anvendelser.

Som utgangspunkt for beregningene vil det bli antatt at spesifikasjonene er

Totalt synsfelt ca  $10 \times 50^\circ$

Deteksjonsavstand 20 km ved 10 km optisk sikt og 0,9 cm H<sub>2</sub>O pr km

Videre vil det bli krevd signal—støyforhold lik 5 for sikker deteksjon og at scenen skal avsøkes 2 ganger pr sekund.

Optimalt bølgelengdeområde må bestemmes ut fra den kjennskap en har til spektral-fordelingen for stråling fra fly og for strålingsgradienter i bakgrunnen. Videre må en også ta hensyn til atmosfærens transmisjon og støy som skyldes statistiske fluktu-asjoner i fotonfluksen fra bakgrunnen (ligning (7.11)). Valget av bølgelengdeområde kompliseres ytterligere ved at spektralfordelingen for stråling fra fly er avhengig av aspektvinkelen. Ser en et fly bakfra eller fra siden, vil stråling fra jetmotor og eksos-gass dominere. Kontrasten vil da være maksimal i nærheten av  $4 \mu\text{m}$ , se kapittel 2 avsnitt 2 og 3. Ser en et fly rett forfra, vil flykroppen skjerme for stråling fra utblås-ningsrørene. 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. De svenske beregningene som er refererte i avsnitt 2.4, gir som resultat at eksosgassene ikke gir bidrag til strålingen rett forover, beregningene er imidlertid utført med en lite realistisk modell, resul-tatene kan derfor ikke tillegges for stor vekt. Dersom strålingen fra eksosgassene blir effektivt skjermet, er det stråling som skyldes aerodynamisk oppvarming som dominerer når flyet ses rett forfra, spektralfordelingen blir da som vist i figur 2.2 med 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.

Valg av aperturdiameter og F-nummer for det optiske system er et spørsmål om pris, vekt, volum og robusthet av deteksjonssystemet. For et bærbart system vil apertur-diameteren i praksis være oppad begrenset til 15–20 cm. F-nummeret kan vanskelig reduseres under 1.

Valg av antall detektorer er i hovedsak et spørsmål om pris og tilgjengelighet. Prisen for detektorene vil utgjøre en vesentlig del av systemets kostnader. Det vanlige er å benytte rekkedetektorer med inntil 200 detektorelementer.

For å kunne benytte måleresultatene fra feltforsøkene, vil det bli antatt at målet er en F-5A med hastighet Mach 0,55. Polardiagrammet for strålingskontrasten er vist i figur 2.8, og strålingen rett forover er ca 30 w/str innenfor bølgelengdeområdet  $8-12 \mu\text{m}$ .

**KONFIDENSIELT**  
BEGRENSET  
i h. t. Sikkerhetsinstruksen



Ved å sette inn for de forskjellige parametre i ligningen for signal-støyforholdet, ligning (7.11), finner en nå at antall detektorer  $N$ , diameteren til inngangsaperturen  $D$ , transmisjonen i det optiske system  $\tau_0$  og F-nummeret må oppfylle ligningen

$$\frac{\tau \cdot D}{F_{\#}} \cdot \sqrt{N} = 42 \text{ (cm)} \quad (8.1)$$

Detektiviteten er da beregnet etter ligning (7.13) og atmosfæretransmisjonen for de gitte forhold er beregnet etter (4). Denne ligning kan oppfylles med valg av parametre som ligger godt innenfor de grenser som er satt opp tidligere.

Et rimelig valg vil være:

Aperturdiameter	$D = 8 \text{ cm}$
Transmisjon i det optiske system	$\tau_0 = 75\%$
F-nummer	$F_{\#} = 1,4$
Antall detektorer	$N = 100$

Med den enkleste form for avspøkning av synsfeltet, parallell avspøkning, og med kvadratiske detektorer vil det instantane synsfelt  $\alpha \times \beta$  være lik totalt vertikalt synsfelt dividert på antall detektorer, i dette tilfellet blir det  $(10/100)^\circ = 1,75 \text{ mrad}$ .

På grunnlag av tidligere erfaringer med termiske deteksjons- og avbildningssystemer kan en skissere konturene på et deteksjonssystem med de parametre som er beregnet. Hovedelementene som inngår i systemet er:

- detektor med kjøling
- optikk
- elektronikk

Den detektortype som velges må kjøles til en lav temperatur. Et lukket kjølesystem vil veie ca 2,5 kg og ha et effektforbruk på ca 100 W.

Komponentene som inngår i det optiske system vil kunne monteres innfor et rør med diameter 12x20 cm.

Nødvendig elektronikk i deteksjonssystemet er avhengig av hvor avansert signalbehandling som må tas i bruk. Med den teknologi som i dag er tilgjengelig, bør den kunne realiseres innenfor et volum på ca 2 dm<sup>3</sup> med effektforbruk 30 W. I tillegg kommer den instrumentering som velges for presentasjon av data, billedrør, sifferindikator e l.

Samlet vekt for deteksjonssystemet vil ligge innenfor en ramme av 10–20 kg.

Karakteristiske parametre for deteksjonssystemet er samlet i tabell 8.1.

Deteksjonsavstand som funksjon av aspektvinkel og optisk sikt kan finnes med utgangspunkt i figur 2.8, som viser polardiagrammet for stråling fra fly, og figur 5.2, som viser forholdet  $\tau(R)/R^2$  som funksjon av avstanden  $R$  med optisk sikt som parameter. Resultatet av denne beregningen er vist i figur 8.1.

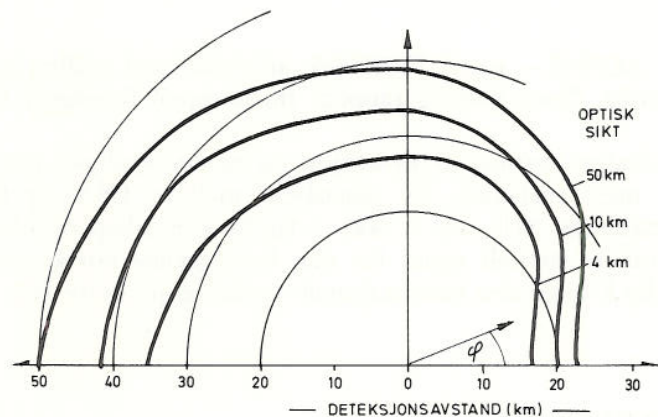
Et termisk deteksjonssystem vil være begrenset av at transmisjonen av termisk stråling gjennom skyer for alle praktiske formål kan settes lik 0. Det er derfor ikke mulig å detektere fly som er skjernet av skyer. Som en ser av figur 8.1 vil også forekomst av dis nedsette deteksjonsavstanden. Betydningen av dette kan vurderes ved hjelp av figur



**KONFIDENSIELT**  
i h. t. Sikkerhetsinstruksen

TOTALT SYNSFELT	10 x 50°
INSTANTANT SYNSFELT	1,75 x 1,75 mrad
BILLEDTID	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 8.1 Karakteristiske parametre for deteksjonssystemet



Figur 8.1 Deteksjonsavstand mot et fly av typen F-5A med hastighet Mach 0,55 som funksjon av aspektvinkelen  $\phi$  ( $\phi = 0$  når flyet ses rett forfra)

Deteksjonsavstanden er her definert som den avstanden der signal-støyforholdet er 5. Lufttemperatur er 15°C og relativ fuktighet er 70% (dette svarer til 0,9 cm H<sub>2</sub>O pr km).

4.1 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.

Ved denne beregningen av signal-støyforholdet er det bare tatt hensyn til støy som skyldes statistiske variasjoner i innfallende fotonfluks. I tillegg til dette kommer støy som skyldes kontrastvariasjoner i bakgrunnen. Dette støybidraget vil være sterkt vær-avhengig. En skyfri himmel som bakgrunn vil bidra med lite støy, mens en delvis skyet himmel vil gi opphav til store kontrastvariasjoner og dermed støybidrag som langt overskrider fotonstøyen. En nøyaktig beskrivelse av dette støybidraget må foretas på grunnlag av et større antall feltmålinger. Resultat av slike målinger har ikke vært tilgjengelige under denne studien. Betydningen av dette støybidraget kan reduseres ved å benytte den a priori kjennskap en har til signalet fra målet og kontrastvariasjonene i bakgrunnen, f eks:

- Filtrering basert på at kontrastvariasjonene i bakgrunnen vil variere langsommere enn signalet fra flyet.

**KONFIDENSIELT**  
i h. t. Sikkerhetsinstruksen

I h. t. Sikkerhetsinstruksen

- b) Romlig filtrering basert på at målet utgjør et punktmål mens variasjonene i bakgrunnen vil dekke flere bildelementer.
- c) Utnyttelse av den karakteristiske spektralfordelingen for stråling fra fly ved å detektere stråling fra varm CO<sub>2</sub> i eksosen, se figur 2.8. Det er ikke kjent om eksosgassen vil gi bidrag til strålingen rett forover.

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

## 9 STUDIER AV TERMISK DETEKSJON AV FLY I ANDRE LAND

Flere Nato-land har i kortere eller lengre tid beskjeftiget seg med studier av termisk flydeteksjon. På den ene side dreier disse arbeidene seg om måling og utvikling av modeller for strålingskarakteristika for forskjellige flytyper. På den annen side omfatter arbeidene feltforsøk og deteksjonsmålinger, primært av angripende terrengfølgende fly. Måleutrustningen som er benyttet, er ikke kommersielt tilgjengelig eller i produksjon.

En spesiell Nato-gruppe, AC/243 – panel IV/RSG6, arbeider med måling og beskrivelse av strålingskarakteristika. Noen endelig rapport fra gruppen foreligger ikke ennå.

Canada har i lengre tid studert termisk flydeteksjon og er sannsynligvis det land som har angrepet problemet mest realistisk. Et samarbeid mellom USA og Canada er antakelig i ferd med å etableres. Selv om vi ikke i dag har kjennskap til arbeider eller apparatur i andre land som er spesielt egnet for den foreliggende norske problemstilling, er det likevel vesentlig å følge den internasjonale utvikling på dette felt.

## 10 SAMMENDRAG OG 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.

I kapittel 8 er parametrene for et spesifikk deteksjonssystem beregnet. Systemparametrene er vist i tabell 8.1, og deteksjonsavstanden er vist i figur 8.1. Karakteristisk for dette systemet er:

– Deteksjonsavstand for jagerfly observert rett forfra:

23 km ved	50 km optisk sikt
20 " " "	10 " " "
16 " " "	4 " " "

– Retningen til flyet kan bestemmes med en nøyaktighet på ca 1,75 mrad

– det er bærbart, vekt mindre enn 20 kg

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.





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.

Et termisk flydeteksjonssystem synes derfor å kunne representere et viktig passivt observasjons- og overvåkingsinstrument. Så vidt man har kunnet bringe på det rene, eksisterer det ikke lett bærbar apparatur, verken kommersielt tilgjengelig eller under utvikling, som er spesielt egnet for deteksjon av fly.

#### Litteratur

- (1) – *Handbook of Military Infrared Technology*, Office of Naval Research, Department of the Navy, Washington DC (1965)
- (2) Hudson Jr, R D – *Infrared System Engineering*, Wiley-Interscience (1969)
- (3) Bingen, E – Bruksanvisning for program ATSIR, Teknisk notat E-738, Forsvarets forskningsinstitutt (1975)
- (4) Selby, J E A  
R A McClatchey – Atmospheric Transmittance from 0,25 to 28,5  $\mu\text{m}$ , Computer Code LOWTRAN 3 (1975)



**KONFIDENTIELT**  
i h. t. Sikkerhetsinstruksen