



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



**Rapport**

**R30:1988**

# **Termografering från helikopter**

**Tillämpningar inom  
samhällsplanering och miljövard**

**Jan O Mattsson m fl**

*R  
Jull*

INSTITUTET FÖR BYGGDOKUMENTATION	
Accnr	
Plac	<i>Se</i>

**Byggforskningsrådet**

R30:1988

**TERMOGRAFERING FRÅN HELIKOPTER**  
Tillämpningar inom samhällsplanering och miljövård

B.-O. Gustafsson

S. Lindqvist

J. O. Mattsson

S. Nyblom

P. Persson

K. Pilgård

P. Schlyter

V. Vanek

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 860353-8 från Statens råd för byggnadsforskning till Naturgeografiska institutionen, Lunds universitet, Lund.

## REFERAT

Antagandet att helikopterburen infrarödtermografi i vissa tillämpningar är fördelaktigare än konventionell flygtermografi, t. ex. vad gäller geometrisk upplösning och därmed möjligheterna till detaljstudier, var en viktig utgångspunkt för det formulerade projektet. Detta omfattade främst prov med tre infrarödregistreringssystem under fältmässiga (operativa) förhållanden och i någon mån bedömning av möjligheterna till efterföljande digital bildbehandling av registrerade data.

Utvärderingen gällde systemen: AGEMA THERMOVISION 782 LWB, INFRAMETRICS MODEL 600 IR IMAGING RADIOMETER, FLIR SYSTEMS MODEL 2000G och 2000F INFRARED IMAGING SYSTEM. De olika systemen provades i skilda applikationer med anknytning till främst samhällsplanering och miljöskydd. Dessa applikationer utgjorde karftledningsinspektion, försök att lokalisera yt- och grundvattenutflöden samt äldre, nedlagda soptippar, detektering av oljepåslag i strandzoner samt i och på havsis, registrering av mikro- och lokalklimatiska temperaturmönster i mark och vegetation av intresse vid bl. a. frostlänthetsstudier i frukt- och bärordlingsdistrikt samt studier av termiska mönster i stads- och vägmiljö.

Helikopterbaserad infrarödtermografi visade sig i flera avseenden vara en speciellt fördelaktig kombination av instrument och instrumentbärare; inte minst beroende på helikopterns extremt goda manöverförmåga, relativt stora okänslighet för turbulens, goda siktförhållanden samt breda fart- och höjdregister m. fl. i sammanhanget utnyttjbara egenskaper.

Bildmaterialet är enligt 1 och 2 §§ i lagen 1975:371 godkänt för försäljning, spridning och utförelse 88.01.25 av ÖB/Säkerhetsavdelningen.

I Byggnadsforskningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

Denna skrift är tryckt på miljövänligt, oblekt papper.

R30:1988

ISBN 91-540-4876-1

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

TERMOGRAFERING FRÅN HELIKOPTER –  
Tillämpningar inom  
sambhällsplanering och miljövård

INNEHÅLL

FÖRORD	
SAMMANFATTNING och SUMMARY	
1 INLEDNING	6
1.1 Problem, bakgrund och avgränsning	6
1.2 Projektets syfte	6
1.3 Projektets omfattning	7
2 INSTRUMENT OCH METODIK SAMT GENOMFÖRDA TERMOGRAFERINGAR	7
2.1 Termograferingsutrustning	7
2.2 Plattform	9
2.3 Signal- och bildbehandlingsutrustning	9
2.4 Genomförda termograferingar	10
3 KRAFTDISTRIBUTION	11
3.1 Kraftledningsinspektion	11
4 MILJÖSKYDD OCH HYDROLOGI	14
4.1 Lokalisering av yt- och grundvattenutflöden – tillämpningar inom hydrologi, hydrogeologi och limnologi	14
4.2 Lokalisering av äldre, nedlagda soptippar	25
4.3 Oljeskadeinventering	27
5 KLIMATOLOGI	32
5.1 Studier av regionala temperaturskillander i ett fruktodlingsdistrikt	32
5.2 Infrarödtermografering över ett bärödlingsområde	38
5.3 Studier av läeffekter och vindstrieringar m.m.	44
5.4 Infrarödtermografering över stadsområden	48
5.5 Tillämpad vägklimatologi	55
6 FLYGTERMOGRAFERING FRÅN HELIKOPTER – PROBLEM OCH MÖJLIGHETER	58
6.1 Termograferingsutrustning	58
6.2 Signal- och bildbehandlingsutrustning	60
6.3 Plattform	61
6.4 Flygning och flygsäkerhet	62
7 SLUTSATSER	63
REFERENSER	66



## FÖRORD

Helikopterburen infrarödtermografi är en fjärranalysteknik som i civila sammanhang i vårt land huvudsakligen använts vid inspektion av kraftledning. Under de senaste åren har emellertid tekniken också provats inom andra områden, varför en mera allmän granskning av dess möjligheter och begränsningar i olika tillämpningar har ansetts önskvärd. Denna rapport redovisar några erfarenheter av helikopterburen infrarödtermografi inom samhällsplanering och miljöskydd.

Termograferingarna har utförts av AVENA-gruppen, Nacka, med Staffan Nyblom som pilot och Jonathan Howard som instrumentoperatör. Peter Schlyter fungerade som navigatör vid flygningarna i Skåne och Halland.

I rapporten svarar, i avsnittens ordning, Jan O. Mattsson för avsnitten 1, 5.3 – 5.4. Staffan Nyblom för 2, 3, 4.3, 6.1 – 6.4, Björn-Olof Gustafsson och Vladimir Vanek för huvuddelen av 4.1, Peter Schlyter för 4.2, Peter Persson för 5.1, Kerstin Pilgård för 5.2 samt Sven Lindqvist för 5.5. Staffan Nyblom svarar för Göta älv-studien i 4.1. Jan O. Mattsson och Peter Schlyter har tillsammans skrivit avsnitt 7 samt redigerat rapporten.

Författarna riktar ett tack till Jonathan Howard, som framgångsrikt och skickligt skötte instrumenten under flygningarna, samt till Birgitta Fogelström och Eva Särbring, vilka förtjänstfullt renskrev rapporten.

## SAMMANFATTNING

Antagandet att helikopterburen infrarödtermografi i vissa tillämpningar är fördelaktigare än konventionell flygtermografi, t. ex. vad gäller geometrisk upplösning och därmed möjligheterna till detaljstudier, var en viktig utgångspunkt för det formulerade projektet. Detta omfattade främst prov med tre infrarödregistreringssystem under fältmässiga (operativa) förhållanden och i någon mån bedömning av möjligheterna till efterföljande digital bildbehandling av registrerade data.

Utvärderingen gällde systemen: AGEMA THERMOVISION 782 LWB, INFRAMETRICS MODEL 600 IR IMAGING RADIOMETER, FLIR SYSTEMS MODEL 2000G och 2000F INFRARED IMAGING SYSTEM. De olika systemen provades i skilda applikationer med anknytning till främst samhällsplanering och miljöskydd. Dessa applikationer utgjorde karftledningsinspektion, försök att lokalisera yt- och grundvattenutflöden samt äldre, nedlagda soptippar, detektering av oljepåslag i strandzoner samt i och på havsis, registrering av mikro- och lokalklimatiska temperaturmönster i mark och vegetation av intresse vid bl. a. frostlänthetsstudier i frukt- och bärödlingsdistrikt samt studier av termiska mönster i stads- och vägmiljö.

Helikopterbaserad infrarödtermografi visade sig i flera avseenden vara en speciellt fördelaktig kombination av instrument och instrumentbärare; inte minst beroende på helikopterns extremt goda manöverförmåga, relativt stora okänslighet för turbulens, goda siktförhållanden samt breda fart- och höjdregister m. fl. i sammanhanget utnyttjbara egenskaper.



# AERIAL THERMOGRAPHY FROM HELICOPTERS

## SUMMARY

Thermal imaging from helicopter has in this project been evaluated primarily with regard to the systems' capabilities in field conditions. The possibilities of subsequent digital image processing have, in accordance with the original intentions of the project, also been investigated, albeit less thoroughly. Three separate systems have been evaluated. They have been tried out in different applications, mainly related to community planning and environmental control. The experience of infra-red thermal imaging derived from this and from associated projects can generally be summed up as follows:

Inspection of high-tension power lines was carried out with Inframetrics 600, which showed itself well suited for the purpose. The instrument gives a good picture with good contrast and clear details when the temperature range and levels are correctly adjusted. Subsequent image processing in a computer is a satisfactory way of analysis the thermal information which has been acquired. A helicopter is the most suitable platform, since inspection must be carried out at close range to the power lines. Flight safety requires that such inspections be done in the daytime.

Localising springs and effluents in surface and subsurface water was successfully done with FLIR equipment in a helicopter. Thermal imaging from a helicopter was shown to be a practicable method for registering and charting effluent in lakes and rivers. The question arises, when registering effluent from industries and workshops, as to what extent their emission ceases at the end of the working day. Although the conditions for thermography are usually best at night, thermographic registration of effluent in the daytime should also be tried.

Localising abandoned rubbish dumps was the goal of some of these helicopter missions with infra-red thermal imaging. Thermography does not unfortunately seem to be a usable technique for identification and demarcation of older dumps, but appears to be usable for monitoring water seepage from dumps to neighbouring lakes and rivers, (see above).

Detecting oil leaks seems to be possible from helicopters with the help of thermal imaging, as long as the oil is on the surface of the coastline. This method was not, however, usable for locating oil patches under ice.

Interesting micro- and local climate patterns on the ground surface and in vegetation could successfully be registered with helicopter-borne thermography. Among other applications, frost tendencies in fruit- and berry-growing districts were investigated. In this connection, the possibilities of low altitude flying, with direct monitoring and, where necessary correction of the thermal registration, were found to be very valuable. The best results were achieved with the FLIR instrument; its good thermal and geometric resolution, together with its ability to rotate and tilt, made it possible to execute detailed thermal analyses within defined spatial and time intervals. This system suffers, however, from not having a dedicated image analysis system.

Infra-red thermal images over urban areas from a helicopter were used to study both details of the thermal structure of urban landscapes and profiles through urban "surface heat islands". The FLIR equipment proved particularly satisfactory here.

The thermal situation on road surfaces, interesting information for road maintenance and road safety, could be registered from a helicopter with the FLIR system. The effects of the design and material of the roadway, as well as shadow

effects, were among the conditions studied. When these preliminary studies have been evaluated, more comprehensive investigations with thermography from helicopters are planned.

For community-planning and environmental control applications, equipment for thermography from helicopters should be able to present thermal information as clearly as possible for the interpreter. For such applications, good picture quality, even at the expense of measurement capabilities, is thus an important requirement. Of the three systems used in this project, the FLIR system clearly gave the best picture. If this technique is to be used in emergency situations, for example in case of oil leaks or industrial pollution, the equipment must be quickly available in the appropriate region.

The thermal information was recorded with video tape recorders of VHS and U-Matic High Band Type. The former is lighter and more compact, but unfortunately misses some of the thermal information which is captured on U-Matic High Band. Another problem was that some portable tape recorders only have a capacity of 20-30 minutes' recording time. New video recording systems with improved performance will, however, soon be on the market.

Image processing systems are available, specially adapted for some of the equipment used in the project. The current lack of generally-applicable image processing systems in Sweden is, however, a serious hindrance for the use of thermography.

Helicopters have many advantages as platforms for thermography, for example, extremely good manoevrability, comparative immunity to turbulence, good visibility, a wide choice of flying speeds and altitudes as well as their ability to land almost anywhere. Among their disadvantages are vibrations from the rotor system and sensitiveness at low speeds to sidewinds.

The mounting of the camera and the choice of camera position must be considered very carefully to ensure satisfactory vibration insulation. Directly under the helicopter's rotor mast, at the centre of gravity, was found to be an advantageous position.

Airmanship and flight safety require of course considerable attention in helicopter thermography. As with all flying, good maps are of great importance. When thermography has to be done at night, these maps also have to be easy to read in poor light. Forward Looking Infra-Red (FLIR) is very helpful for precision navigation at night; another useful help is flashing beacons put out on the target area. Moonlight radically improves the possibilities of accurately navigating and manoevring. It is therefore recommended, that thermographic missions be scheduled for the ten day period around the full moon. Moreover, the helicopter pilot should reconnoitre in daylight appropriate places for emergency landings within and around the target area.

In conclusion, the combination of helicopters and infra-red thermal imaging tested in this project, particularly with the FLIR instrument, constitutes a potentially effective complement to the already-established aircraft-borne infra-red line scanner technique. The helicopter's great flexibility as a means of transport and as a working platform makes possible in some cases applications which would not have been technically possible with a fixed-wing aircraft. There are obvious advantages when the infra-red operator and the navigator can in real time see what is being recorded, especially since the navigator can well be a climatologist or similar research worker. To make the most of such a system, however, it is necessary to have access to an appropriate image processing system.

Finally, it should be borne in mind that the studies presented here have emphasised practical trials of different infra-red systems and image processing systems

under practical operative conditions, with less emphasis on thoroughly investigating the limits of usefulness of such systems for different research applications. Thus there is every reason to continue to investigate, more in the form of pure research, the combination of helicopter and infra-red thermal imaging as tools for remote sensing.

## 1 INLEDNING

### 1.1 Problem, bakgrund och avgränsning

Fjärranalys från flygplan och satellit har potentiella möjligheter till yttäckande registrering av olika mark- och vegetationsparametrar. En sådan fjärranalysteknik är infrarödtermografi, ofta förkortad IR-termografi eller termografi, som kortfattat kan definieras som teknik varmed primärt temperatur- och/eller emissionsförhållanden hos materia kan bestämmas genom uppmätning av den strålning inom det s.k. termiska området som emitteras av materian. Det senare området brukar förläggas till 2,5-15  $\mu\text{m}$ . All materia utsänder elektromagnetisk strålning, s.k. egenstrålning. Dennas intensitet är avhängig våglängden och den emitterande materians ytemperatur och emissionsförmåga. Med kännedom om den senare förmågan och om sensorns egenskaper, vissa miljöförhållanden etc. är det därför möjligt att radiometriskt bestämma ytemperaturen eller, om den senare är känd, emissionsförmågan hos den strålände materietan. Detta görs med olika slag av radiometrar. S.k. svepradiometrar är ofta flygplans- eller satellitburna, medan värmekameror vanligen är markbaserade. Flygburen infrarödtermografi är särskilt lämpad för yttäckande bestämning av temperaturskillnader hos mark och vegetation och till temperaturen kopplade variabler eller förhållanden.

IR-termografins teori behandlas utförligt i en rad av handböcker och rapporter, av vilka några refereras till nedan.

Redan år 1967 inleddes i Lund, såsom ett samarbete mellan Naturgeografiska institutionen och Försvarets forskningsanstalt, försök med flygburen infrarödtermografi inom olika geområden, bl.a. topo- och urbanklimatologin (Lindqvist, 1967, Mattsson, 1967, Svensson, 1967). Året därpå inleddes vid Lunda-institutionen markbaserade studier med IR-teknik (AGA Thermovision). Senare har tekniken utnyttjats inom en rad olika områden, t.ex. frostlänthets- och markvattenkartering, vägstudier, vegetationsundersökningar samt arkeologiska och energitekniska studier (se bl.a. Axelsson & Lundén, 1985, Björkbäck & al., 1970, Ericsson & Hård, 1981, Lindqvist, 1987, Ljungberg, 1986, Lundén, 1977, 1984, 1985, Mattsson & Börjesson, 1978, Mattsson et. al., 1983 och Åkerman, 1972).

Termografering har hittills väsentligen utförts från flygplan eller med markbaserad utrustning. Att använda tekniken från helikopter kan dock i vissa sammanhang tänkas medföra väsentliga fördelar. Denna plattform är stabil även vid låga farter och kan, bl.a. därför, framföras på höjder som kraftigt underskrider vad som är den normala flyghöjden vid termografering, vilket ökar markupplösningen och skärpan i termogrammen.

Härtill kommer att operatören av mätutrustningen kan arbeta vid lugnare och tekniskt mindre besvärliga förhållanden. Vidare kan omregistreringar eller alternativa registreringar göras direkt i anslutning till mättillfället. Utnyttjande av helikopterburna avancerade infrarödregistreringssystem skulle därför kunna förbättra flygtermografin inom vissa applikationer.

### 1.2 Projektets syfte

Syftet med projektet är att prova och utvärdera några av senaste generationens termograferingssystem anpassade för helikopterburna termografering. Utvärderingen avser dels att undersöka registreringssystemens kapacitet under fältmässiga (operativa) förhållanden, dels att undersöka de möjligheter till efter-

följande digital bildbehandling av registrerade data som aktuella analysystem i vissa fall erbjuder. Försöken med flygtermografering berör såväl tidigare prövade som hittills oprövade tillämpningar med anknytning till samhällsplanering och miljövard/skydd.

### 1.3 Projektets omfattning

Projektet har alltså omfattat olika tillämpningsområden. Samhällsanknutna tillämpningar har varit kontroll och temperaturmätning av kraftledningar, frostlänthetsstudier i fruktodlings- och bärdistrikt, vägklimatologiska studier samt lokalisering av grundvattenförekomster m.m. Miljövardsinriktade tillämpningar har gällt försök till lokalisering av utsläpp i sjöar och vattendrag, äldre övergivna soptippar samt detektering av spillolja. Mera allmänna miljöstudier, slutligen, har omfattat mikro- och lokalklimatiska företeelser såsom läeffekter och vindstrieringar i landskapet och termiska mönster i bebyggda områden.

## 2 INSTRUMENT OCH METODIK SAMT GENOMFÖRDA TERMOGRAFERINGAR

### 2.1 Termograferingsutrustning

Infraröd strålning kan registreras i en värmekamera eller IR-scanner med hjälp av en detektor som alstrar en elektrisk ström när den utsätts för sådan strålning. Denna ström, som är beroende av strålningens intensitet och våglängd, kan sedan behandlas på olika sätt för att som slutresultat åstadkomma en bild av det som det registrerande instrumentet ser. I värmekameran sker detta med hjälp av roterande prismor eller vibrerande speglar som avsöker bildrymden i både höjd- och sidled. Detektorn känner på så sätt av hela bildytan efter ett bestämt mönster och resultatet efter signalbehandling blir en bild som kan presenteras på en bildskärm. I denna bild, värmebilden, kan sedan den termiska information som värmekameran registrerar studeras och analyseras.

Ett IR-systems prestanda bestäms av bl.a. följande parametrar:

- Den termiska upplösningen som är ett mått på hur små temperaturskillnader systemet kan registrera.
- Den geometriska upplösningen som är ett mått på hur små föremål systemet kan urskilja och korrekt temperaturbestämma. Små är ett begrepp relaterat till storleken på hela värmebilden.
- Avsökningshastigheten som är ett mått på hur snabbt den termiska bilden kan uppdateras av systemet.

Ett bra IR-system har hög termisk upplösning, vanligen kring  $0,1^{\circ}\text{C}$ , god geometrisk upplösning samt stor avsökningshastighet,  $>25\text{ Hz}$ .

Tre olika IR-system har använts vid försöken; AGEMA THERMOVISION 782 LWB, INFRAMETRICS MODEL 600 IR IMAGING RADIOMETER samt FLIR SYSTEMS MODEL 2000G och 2000F INFRARED IMAGING SYSTEM. Två av systemen kan betecknas som mätinstrument, nämligen AGEMA 782 och INFRAMETRICS 600. FLIR-systemet är ett bildsystem utan mätenskaper.

Utrustningen installerades i en helikopter av typ Hughes 500, varvid olika



Figur 2:1. Installation i helikopter Hughes 500C av styrenhet och monitor för kraftledningsinspektion.

upphängningssystem för scannern utprovades. FLIR 2000G och F, som är avsedda för flygbruk, monterades med en fästplatta i lastkrokens infästningspunkter, i vilken sedan den styrbara scannern hängdes upp. Scannern var därigenom vridbar  $\pm 120^\circ$  i sidled och från  $+30^\circ$  till  $-180^\circ$  i höjdlid.

INFRAMETRICS 600 monterades i de första försöken med värmekameran i ett styrbart fäste under flygkroppen. Vid de senare försöken var AGEMA 782 respektive INFRAMETRICS 600 upphängda i ett vibrationsdämpande fäste i helikopterns kamerahål med objektivet vågrätt men försett med en  $45^\circ$  spegel i strålgången. Den optiska axeln blev genom detta fast monterad i förhållande till flygkroppen och nära nog lodrät mot markytan vid normalt flygläge. Avsökningen i 782-scannern hade också ändrats så att bilden trots spegeln blev rättvänd i monitorn och därmed också på bandet. Bilden i 600-systemet blev genom spegelarrangemanget upp och ner och felvänd. Endast en värmekamera åt gången var monterad i helikoptern.

Vid termograferingsflygningarna för ledningsinspektion var värmekamerans manöverbox liksom monitor och bandspelare monterade i en rack framför systemoperatören i höger framsits. Vid övriga termograferingar placerades display- och styrenheterna för de olika systemen i baksits tillsammans med systemoperatör. För navigering och bildkontroll monterades även en videomonitor i framsits framför navigatör och pilot. Fig. 2:1.

Den spektrala känsligheten för alla systemen är  $8-12 \mu\text{m}$ , d.v.s. i den långvågiga delen av det infraröda spektrat. För systemen anges också den termiska upplösningen till  $0,1^\circ\text{C}$  och den geometriska upplösningen till  $< 2 \text{ mrad}$  vertikalt och horisontellt vid  $20^\circ$  vinkelöppning.

AGEMA 782 och INFRAMETRICS 600 kyls med flytande kväve medan FLIR-systemet har en intern kryostatkyllning med luft.



Figur 2:2. Helikopter Hughes 500C.



Figur 2:3. FLIR-systemet upphängt i helikopterns lastkroksinfästning.

FLIR och INFRAMETRICS ger en standard CCIR-videosignal ut som kan anslutas till en videomonitor och/eller bandas på en videobandspelare. Videosignalen från AGEMA 782 är en composit videosignal med 25 Hz vertikal avsökningshastighet med 280 linjer per bild.

Signalen från 782-systemet bandades dels på en av Agema konverterad VHS-bandspelare kallad "systembandspelare", dels på en standard VHS PAL-bandspelare via Agemas Discon-system som omvandlar videosignalen på 25 Hz till en 50 Hz standard video CCIR-signal. Den främre monitorn försörjdes också med denna standardsignal. Vid försöken registrerades bild och ljud på bandspelare av typ VHS och U-Matic High Band.

## 2.2 Plattform

Som plattform och bärare av de olika värmekamerasystemen användes en helikopter av typ Hughes 500C, med 4-5 sittplatser inklusive pilot. Hughes 500 är turbindriven med en 4-bladig rotor där turbinvarvet ligger kring 5-6000 varv och rotorvarvet kring 600 varv per minut. Med extratank, utrustning och 3 man ombord kan helikoptern flygas i nära fyra timmar.

Helikoptern har ett 28-voltssystem och den 12-voltsutrustning som användes vid försöket försörjdes via spänningsdelare med filtrerad och stabiliserad likspänning. Ljudet från helikopterns intercomsystem tappades till de olika bandspelarna och allt som noterades och diskuterades under inventeringens gång finns därför inspelat på respektive band. Fig. 2:2 och 2:3.

## 2.3 Signal- och bildbehandlingsutrustning

Vid analysarbetet efter flygningarna har följande utrustning använts:

- Persondator, IBM-kompatibel AT med matematikprocessor 80287
- Färgbildskrivare Sharp IO-70
- Högupplösande videomonitor Sony QM11371
- Videoredigeringsutrustning VHS Panasonic 8500 m.fl.
- Videoprinter Mitsubishi P60B

Vidare har tre system för bildbehandling i dator omfattande hårdvara och programvara utprovats. De system som använts är dels ett från Thermoteknix avsett för INFRAMETRICS 600, dels två system från Data Translation respektive Matrox. Bildbehandlingen har huvudsakligen utförts på Thermoteknix system eftersom programvaran för bildbehandling till de två övriga inte var komplett vid tiden för försöken.

Analysarbetet har främst skett med hjälp av bandspelare och videoprinter. Bandupptagningarna från de olika flygningarna har studerats och för aktuella och intressanta områden har papperskopior av videobilden tagits fram med videoprintern. En videoprinter är i princip en analog-digitalomvandlare med möjlighet att genomföra en s.k. frame grab (frysning av en bild) från det analoga videobandet. Den valda och digitaliserade bilden lagras i ett minne samt kopieras på värmekänsligt papper.

System för bearbetning av videobilder i dator består dels av hårdvara omfattande ett kretskort för omvandling av den analoga videosignalen till digitalt format, dels av programvara för behandling av den digitala bilden. På kretskortet finns dessutom minne för lagring av en eller flera digitaliserade bilder samt gränssnitt mot videobandspelare och monitor. Programvaran kan omfatta rutiner för filtrering, förstärkning och zoomning av bilden liksom funktioner för mätning, statistik och analys. Vidare finns ofta möjligheter att åstadkomma överlägg i bilden med text och grafiska figurer.

## 2.4 Genomförda termograferingar

Flygtermografering från helikopter för det aktuella projektet har genomförts vid följande tillfällen:

Den 22-23 maj 1986 mellan kl 23.55 och 02.05 över Kivik och Brösarp samt Kungsmarken vid Lund. Vädret var klart med 6 knops vind från SW. Temperatur och daggpunkt var kl 01.00 på Malmö/Sturup flygplats +7°C respektive +5°C och den relativa fuktigheten 86%.

Den 12-13 november 1986 över Kungsmarken vid Lund, Malmö, trakten mellan Ängelholm och Helsingborg, E6 över Hallandsåsen samt Laholmsbukten. Termograferingen skedde i klart väder mellan kl. 23.00 och 02.50. SMHIs mätstation i Lund hade kl. 23.00 2 knops W-vind och marktemperatur +4,6°C samt 95 % relativ fuktighet.

Den 29-30 april 1987 mellan kl 22.35 och 02.20 över Malmö, Landskrona, E6 över Hallandsåsen samt Laholmsbukten. Vid midnatt den 30 hade Malmö/Sturup vind från SE 5 knop, något dis, temperatur +9°C daggpunkt +6°C samt relativ fuktighet 80 %.

Den 25-26 maj 1987 mellan kl 23.55 och 02.10 över Kivik och Brösarp samt stränder vid Ringsjöarna och Vombsjön. Kl 01.00 hade Sturup 4 knops vind från SE, temperatur +8°C, daggpunkt +7°C och relativ fuktighet 94%.

Den 18-19 november 1987 mellan kl 17.30 och 18.30 termograferades Göta älv från Kungsälv till Arendal vid älvmyningen. Göteborg/Landvetters flygplats hade kl 18.00 2 knops vind från NW, sikt över 10 km, temperatur +1°C, daggpunkt ±0°C och relativ fuktighet 94%. Låg dimma hade börjat utbildas i svackor och låglänta partier.

Vidare termograferades kraftledningarna i Norge på Vestlandet under februari 1986 samt oljeskador i Gävlebukten under april 1987. Resultaten från dessa försök refereras också i denna rapport.

Flyghastigheten vid de olika tillfällena låg kring 50 knop med variationer mellan 40 och 60 beroende på vindriktning och stråkriktning. Flyghöjden vid



försöken i Skåne var som regel 2 000 fot, d.v.s. ungefär 600 meter, med några undantag. Kraftledningsinspektionen och oljeskadeinventeringen har flugits marknära.

Besättningen har som regel omfattat 3 man; pilot, navigatör och systemoperatör. Navigeringen genomfördes så att navigatören klargjorde stråkriktningar och orienteringspunkter för piloten som sedan ansvarade för stråkhållning med hjälp av korrekationer givna av navigatören. I vissa lägen gav också systemoperatören lägesanvisningar till piloten. Samtalen i cockpit finns inspelade på bandspelarnas audiokanal. Värmebilden i den främre monitorn användes dels för kontroll av helikopterns läge, dels som siktmedel vid ledningsföljning. Systemoperatörens uppgift var att under flygningen svara för övervakning av termograferingsutrustning och bandspelare.

### 3 KRAFTDISTRIBUTION

#### 3.1 Kraftledningsinspektion

##### *Inledning*

Inspektion av kraftledningar med hjälp av värmekamera är en beprövad metod som använts under det senaste decenniet av kraftbolag runt om i världen. Metoden bygger på att defekta ledningspartier i ett ledningsnät ger upphov till temperaturförhöjningar orsakade av ökad resistans i ledningen eller dess anslutningar. Sådana partier kan vara linskarvar, klämmor, anslutningar till isolatorer, linslackar och liknande. Felen kan vara allvarliga, då t. ex. en defekt linskarv vid ökad belastning på kort tid kan brista, med allvarliga olyckor som följd. Flera sådana linbrott har under senare år inträffat i Sverige.

Metoden har sina begränsningar bl.a. beroende på svårigheten att i helikoptermiljö genomföra realtidsmätningar. De senaste årens snabba utveckling inom datortekniken med avancerade system för bildbehandling på persondator möjliggör emellertid tillförlitliga bearbetningar och analyser i efterhand.

För att undersöka användbarheten av en sådan teknik konstruerades i samarbete med SAAB Helikopter AB under 1985 ett system för termografering av kraftledningar från helikopter. Systemet byggde på ett från cockpit styrbart fäste under helikopterns främre del i vilket en värmekamera monterades. Parallellt med värmekameran placerades också en videokamera på fästet. Signalerna från bägge kamerorna bandades på två separata bandspelare och bilden från värmekameran respektive videokameran kunde valfritt kontrolleras i en monitor i cockpit. De inspelade signalerna bearbetades efter genomförda flygningar i ett datorbaserat bildbehandlingssystem.

Systemet utprovades vid ledningsinspektion i Norge vårvintern 1986 vid inspektion av ca 80 mil kraftledning på Vestlandet. Tolknings- och analysarbetet genomfördes i Stockholm sommaren 1986 med hjälp av datoriserad bildbehandling.

##### *Metodbeskrivning*

Flygtermograferingen genomfördes så att helikoptern flögs längs med kraftledningen strax till vänster om denna i färdriktningen räknat på ett avstånd av mellan 15 och 50 meter beroende på ledningens storlek. Farten varierade mellan 40 och 50 knop motsvarande 75-100 km/tim. Systemoperatören har under flygningen

med hjälp av det styrbara fästet för IR-kameran sett till att den aktuella ledningen hela tiden funnits med i värmebilden. Operatören justerade också under flygningen värmekamerans temperaturintervall så att den termiska informationen från stolpar, ledningar, isolatorer, dämpare, klämmor m.m. alltid låg inom det valda mätbara intervallet. All information från både värmekamera och den parallellkopplade videokameran spelades in på separata band för senare bearbetning. Notering av stolpnummer liksom lägesangivning av transformatorer, ställverk etc. spelades in på videobandspelarens ljudkanal av den medföljande inspektören från respektive kraftbolag. Flygningarna genomfördes under dagar i varierande väder från den 22 februari till den 1 mars 1986.

Efter flygningarna har de inspelade ledningssträckningarna bearbetats i tre olika steg. I det första steget har banden spelats upp ett antal gånger i videoredigeringsutrustningen för att alla övertemperaturer, varmgångar etc. i det insamlade materialet skall kunna registreras. Redigeringsutrustningen medger snabbspolning av banden med bild både fram och back samt kontroll av banden bild för bild. Register över alla temperaturanomalier upprättades med hjälp av den tidskod som automatiskt spelades in vid termograferingarna. Vidare noterades alla stolpnummer och övrig information från ljudinspelningarna på banden och kontrollerades mot kartorna över aktuella ledningssträckningar.

I nästa steg bearbetades banden i det datoriserade bildbehandlingssystemet. Varje i registret antecknad varm punkt undersöktes och mättes genom att värmebilden digitaliserades och databehandlades. Bilden kunde härvid filtreras för borttagande av störande bakgrundsbrus. Den aktuella detaljen med temperaturförhöjning förstörades sedan genom geometrisk zoomning 2 eller 4 x och temperaturintervallet minskades för erhållande av bättre termisk upplösning. Därefter mättes temperaturen på dels den aktuella detaljen, dels den anslutande faslinan och skillnaden noterades. I vissa fall färgkodades värmebilden och ritades ut på färgbildskrivare.

I det tredje steget utnyttjades videoprintern genom att alla bearbetade och mätta bilder från värmebanden ritades ut. Avsikten var att enkelt kunna orientera sig vid genomgång av materialet.

Slutligen sammanställdes materialet och protokoll upprättades över alla mätresultat.

### *Resultat, bearbetning och analys*

Projektet som delvis har haft karaktären av försöksverksamhet redovisas i det följande dels beträffande själva insamlingen av mätdata, dels beträffande bearbetning och tolkning av insamlade mätdata.

Ett stort antal temperaturförhöjningar har noterats utmed de ca 80 mil kraftledning som inspekterades. Systemets termiska upplösning möjliggjorde registrering av mycket små temperaturdifferenser mellan faslina och den varma delen. Med ett valt temperaturomfång av 50°C i scannern låg de flesta temperaturskillnaderna i intervallet 2-8°C, med avvikelser både uppåt och nedåt. Största delen av dessa förhöjningar kan härledas till fenomen som inte är att betrakta som onormala, t.ex. värmeutveckling genom hysteresiseffekt i dämpare och liknande. Andra varma punkter visade sig vara kända systemfel som i sig inte inneburit någon egentlig risk för ledningsavsnittet i fråga. Exempel på detta är lösa bultförband som förbundet dämpare med faslina och som utvecklat en förhöjd värme jämfört med korrekt åtdragna bultförband. Slutligen har vissa varmgångar kunnat konstateras som troligen beror på felaktigheter i systemet. Fig. 3:1.

Vid flygningarna var scannern riktad ca 30° från horisontalplanet för att få

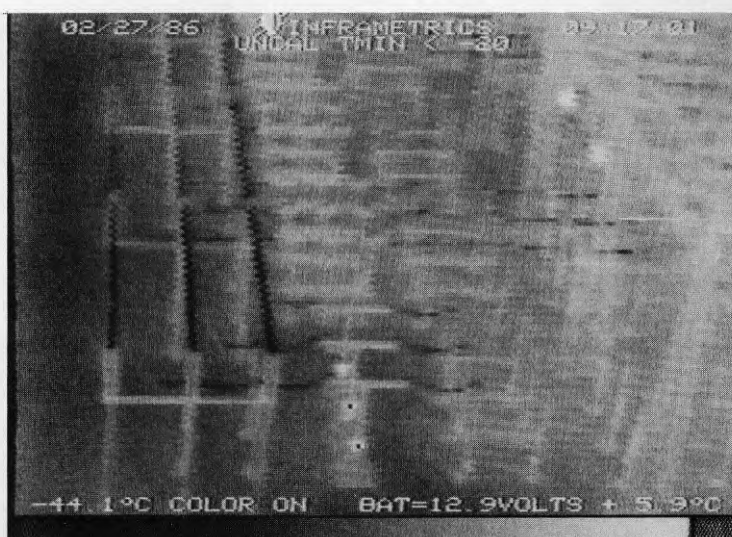


*Figur 3:1. Mast med uppvärmda dämpare på faslinorna. Upptagning med Inframetrics.*

med hela ledningsbredden i bild. Flera ledningsavschnitt gick tidvis över kalfjäll (Hardangervidda), varvid temperaturen på snöytorna skenbart sjönk till  $-47^{\circ}\text{C}$ . Den verkliga yttemperaturen hos marken låg emellertid kring  $-10^{\circ}\text{C}$ . Fenomenet, som försvårade analysen, berodde troligen på att de packade snöytorna i vissa vinklar fungerade som speglar som reflekterade himlen och därigenom fick scannern att registrera himmelsstrålningstemperaturen. Fig. 3:2.

En mindre delsträcka av ett ledningsnät termograferades i solsken i motljus. Solreflexer i faslinor och anslutningar försvårade och ibland omöjliggjorde tolkning av värmebilden. Reflexer från solen i en klämma eller linskarv kan lätt te sig som en varmgång.

Värmekameran Inframetrics 600 ger en bra, kontrastrik bild med fin skärpa vid rätt inställning av temperaturomfång och nivå, men kan efterhand på grund av vibrationerna i helikoptern komma ur fas vad beträffar synkroniseringen av avsökningssystemet, med påföljd att bilden får en s.k. sågtandseffekt som försvårar bearbetning och tolkning. Detta har skett vid ett flertal tillfällen och kan troligen endast åtgärdas med en förbättrad vibrationsdämpning av fästet.



*Figur 3:2. Ställverk med varmgångar. Två av de tre nedre varma punkterna har en temperatur som överstiger  $+5,9^{\circ}\text{C}$ . Upptagning med Inframetrics.*

Svårigheten att i helikoptern bedöma kontrast och gråskala i värmebilden har också resulterat i att vissa ledningsavsnitt fått en alltför kontrastlös bild som försvårat analysarbetet. Här gäller att en erfarenhetsåterföring från tolkare till systemoperatör kan lösa detta problem.

### *Sammanfattning*

Flygningarnas allmänna genomförande har ur termograferingssynpunkt fungerat tillfredsställande med vissa undantag. Flyghastigheten har vid enstaka tillfällen varit för hög med resultat att alltför få bilder per mast eller stolpe varit tillgängliga vid analysarbetet.

Utrustningen har med reservation för vissa installationsbekymmer också visat sig uppfylla ställda förväntningar. Möjligheten att styra värmekameran, framför allt i sidled, har gjort att, med något enstaka undantag, den termograferade ledningen alltid funnits med i värmebilden. Detta är av stor betydelse då man efter en avslutad flygtermografering måste kunna vara säker på att inget ledningsavsnitt lämnats utanför. Att under pågående termografering kontinuerligt kunna ändra temperaturintervall och temperaturnivå och omedelbart få detta presenterat i videobilden som centertemperatur och intervallets maximum- och minimumtemperatur visade sig vara av mycket stort värde.

Videokamerans automatiska bländarfunktion gick på ett tidigt stadium sönder, varför videobilderna från de dominerande snölandskapen på Vestlandet är helt överstyrda. De avsnitt där kameran klarat ljusförhållandena visar dock att man säkert kan ha stor nytta av kompletterande videobilder vid ledningsbesiktningsningar.

Beträffande flygdelen slutligen bör noteras att vädret har en stor betydelse för ett gott termograferingsresultat. Ur teoretisk synpunkt är det bäst att flyga på natten och detta är också vad man gör vid termografering för t.ex. klimatstudier, fjärrvärmebesiktning och miljövårdstillämpningar. Att på natten flyga 30 m från en kraftledning över norska Vestlandet är inte genomförbart, och flygtermografering av kraftledningar måste därför ske under dagen. Några av de här rapporterade flygningarna har skett i vackert väder med solsken, en mindre lämpad vädertyp för detta arbete. Mulna dagar med svag eller ingen vind är troligen att föredra.

Datorbearbetning av det insamlade materialet blev efter ett långt och tålmodsprövande installations- och intrimningsarbete en bra metod att analysera termisk information från kraftledningsinspektion. Fördelarna med att i efterhand noggrant kunna mäta, tolka och kontrollera resultatet av termograferingarna är uppenbara. Misstag som gjorts i helikoptern kan rättas till och information som inte uppfattats under själva termograferingen kan hämtas fram. Noteras skall dock att den termiska information från ett föremål eller en yta som inte inryms inom det valda mätintervallet inte heller kan återhämtas, eftersom den helt enkelt inte finns registrerad på bandet.

## **4 MILJÖSKYDD OCH HYDROLOGI**

### **4.1 Lokalisering av yt- och grundvattenutflöden - tillämpningar inom hydrologi, hydrogeologi och limnologi**

#### *Bakgrund*

Det pågående miljöskyddsarbetet i landets kommuner och län omfattar bl. a. lo-

kalisering, kartläggning och kontroll av utsläpp och läckage till sjöar och vattendrag. Inventering kan ske med traditionella metoder som vattenprovtagning och analys men även ske med fjärranalysteknik från flygplan och, för vissa tillämpningar, även satellit. Fjärranalystekniken är speciellt lämpad för lokalisering och ytavgränsning inför efterföljande provtagning och analys.

Flygburen termografering har under många år prövats i olika miljöer för hydrologiska och hydrogeologiska tillämpningar, men även inom områden som limnologi och oceanografi har metoden använts.

De olika tillämpningarna innefattar studier av naturliga yt- och grundvatten, men också av avloppsvatten, kylvatten, t. ex. från kärnkraftverk, eller liknande antropogena utsläpp. Studierna har gjorts både i sjöar, vattendrag, marina miljöer och på land.

Flygburen termografering har vidare använts vid olika studier av strömningsförhållanden i ytvatten. En illustration till detta ges av fig. 4:1, som visar Stensåns utflöde i Laholmsbukten. Några andra exempel på studerade företeelser är blandningsförlopp i estuarier, utsläpp i olika recipienter, uppvällning av djupare kallt vatten i stora sjöar och hav och strömningsförlopp i anslutning till hamnar och andra komplicerade kustformer. Flera andra tillämpningsområden för termografering inom vattenvård beskrivs bl.a. av Hilton (1984).

En stor mängd idéer rörande potentiella tillämpningar inom främst geo-hydrologi har publicerats, men få av dessa har hitintills prövats i praktiken (Huntley, 1978, m.fl.).

Minsta mätbara temperaturskillnad för dagens termograferingsinstrument är som regel 0.1 - 0.2°C. Upplösningsgraden bestäms dessutom av flyghöjden, vilken kan variera betydligt, från omkring 200 m upp till satellitavstånd.

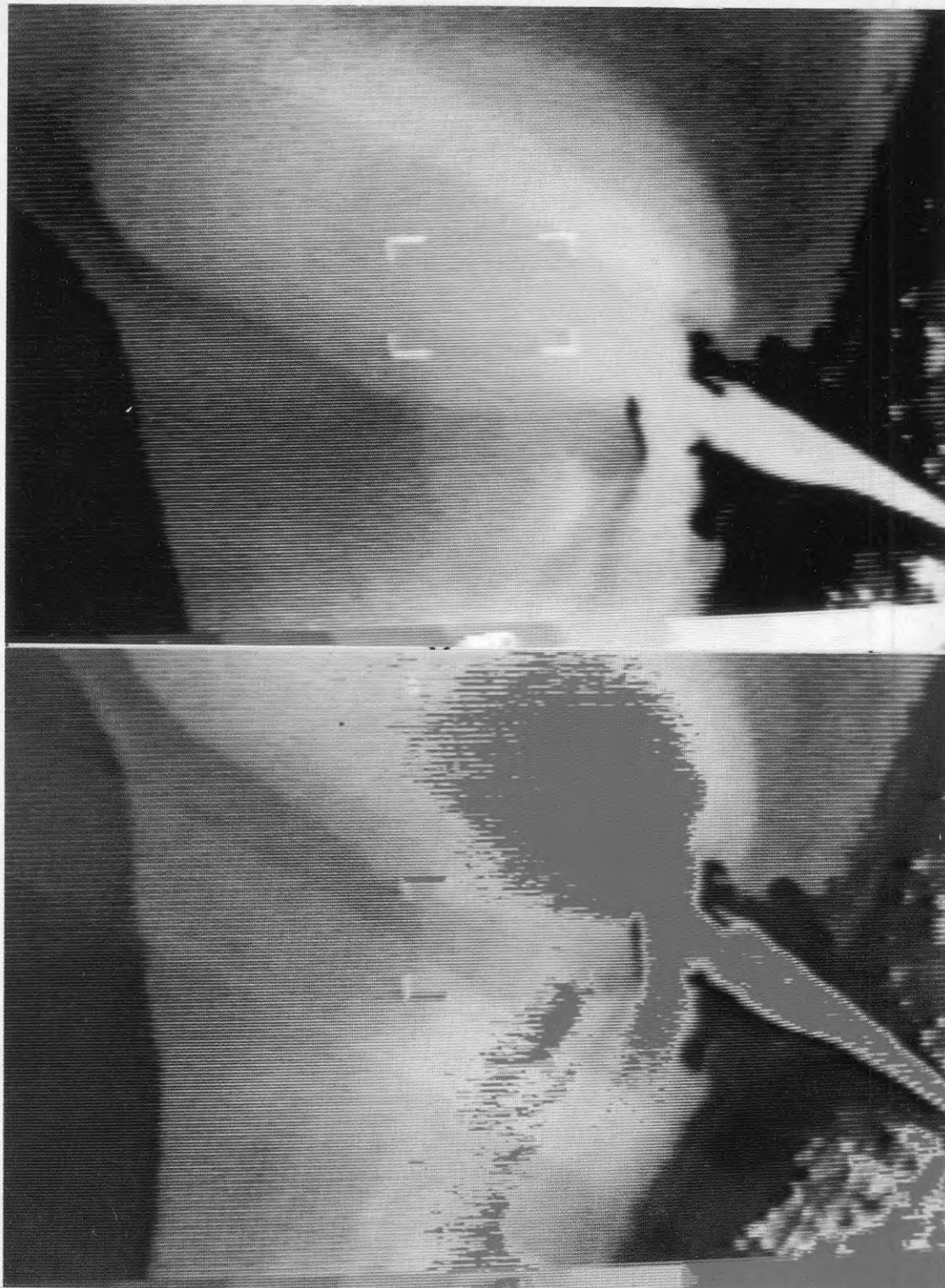
I det följande behandlas avloppsvatten- och grundvattenutsläpp av tre slag med avseende på förekomst, nämligen submarina utsläpp och källor, utsläpp och källor i sjöar och vattendrag samt källområden och grundvatten på land. Diskussionen gäller främst grundvattnet, men även andra tillämpningar inom dessa miljöer, geotekniska m.fl., kommer att beröras.

### *Marin miljö*

På grund av salinitetsskillnaden är det söta grundvattnet nästan alltid lättare än havsvattnet, oberoende av temperaturförhållandena. Submarina källor kan därför som regel observeras på havsytan med flygburen infrarödteknik både sommartid, som lågtemperaturanomalier, och vintertid, som högtemperaturanomalier. Förutsättningen härför är dock självfallet att anomalierna är tillräckligt stora.

Förutom grundvattenflödets storlek och temperaturskillnaden mellan grundvatten och havsytan bestäms anomalins storlek av olika störningar såsom strömningsförhållanden i havet, strandvegetation, vind etc. Det skall påpekas att vid termograferingen mäts endast temperaturen i vattenytan. Fig. 4:2 visar några vanligt förekommande fall av grundvattenutflöde till havet.

Grandino & Tonelli (1983), som med termografering karterade källor längs stora delar av den syditalienska kusten, presenterar en metod för kvantifiering av grundvattenflöden med analys av termogram. Förutom anomalins storlek är ingående parametrar grundvattnets, havsytans och luftens temperatur samt vindhastigheten vid havsytan. Författarna hävdar att även små diffusa källor kunde lokaliseras, särskilt med en analysmetod enligt s.k. level slicing (fig. 4:3). Metoden ansågs för italienska förhållanden möjliggöra studier av den hydrologiska balansen och lokalisering av lämpliga områden för vidare grundvattenpros-



Figur 4:1. Termogram av Stensåns utflöde i Laholmsbukten registrerad nattetid (1987-04-29) med FLIR-system då åvattnet var ca 3°C varmare än havsvattnet. I den nedre bilden har utflödets varmare partier framhävt genom digital bildbehandling (utrustning vid Avdelningen för fasta tillståndets fysik, Fysiska institutionen, Lunds universitet).

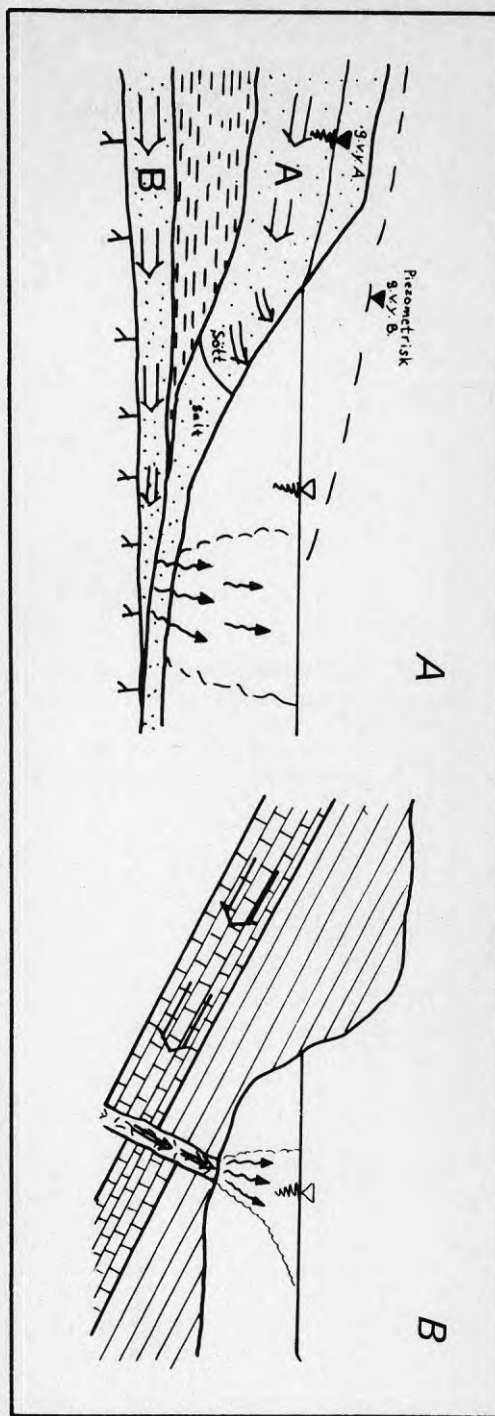
pektering i områden innanför kusten.

Brereton & Downing (1975) och Roxburgh (1985) använde liknande teknik för lokalisering av strandnära och submarina källor i några engelska karstområden. I arbetet av Roxburgh genomfördes termograferingen vid suboptimala förhållanden med små grundvattenflöden i juli och en temperaturdifferens på  $3.9^{\circ}\text{C}$ . Ett flertal, hittills okända källor och strandnära utsläpp kunde här lokaliseras. Vid bearbetning av värmebilder användes i första hand GEMS colour contouring technique.

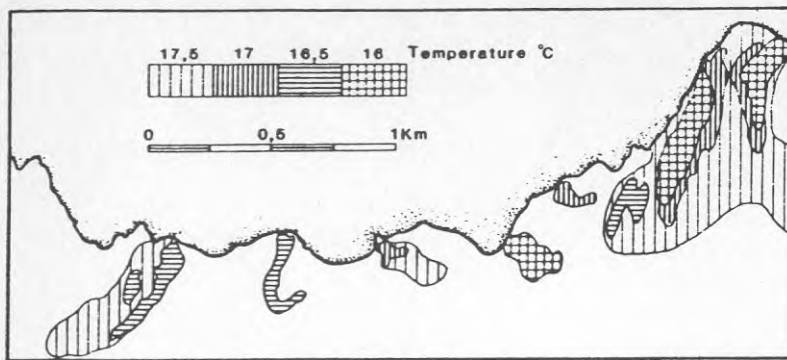
Lokalisering av submarina källor med termografering lämpar sig särskilt bra i områden med hög hydraulisk gradient och kanalisering av grundvattenflödet, t ex i sprickakvifärer eller karstbildningar i kalkberggrund (se B fig. 4:2). Utsläppen blir här mer koncentrerade, punktutsläpp. I många områden, t ex kring Medelhavet, förekommer dessutom stora temperaturskillnader mellan grundvatten och havsytan under en avsevärd del av året, vilket förbättrar möjligheterna att utnyttja termografering.

I Sverige har Svensson (1969) med hjälp av termografering kunnat lokalisera flera submarina källor vid Ölands kust och ett källområde vid Bjärred på Skånes västkust. Lokaliseringarna har dock inte följts upp av några hydrologiska/geologiska undersökningar vilket försvårar tolkningen av deras hydrogeologiska ursprung. I en termografering gjord 1986-11-12 kunde anomalin vid Bjärred åter registreras (fig. 4:4).

Två av författarna till denna rapport (Gustafsson och Vanek) har i anknytning till det pågående SNV-projektet "Närsalttransport via grundvattnet till Laholmsbukten" vid två tillfällen genomfört flygtermografering från helikopter för att undersöka möjligheten att lokalisera grundvattenutströmningsområden i Laholmsbukten. Vid det första tillfället (1986-11-12) utnyttjades värmekameran AGE-MA 782 LWB och vid det andra

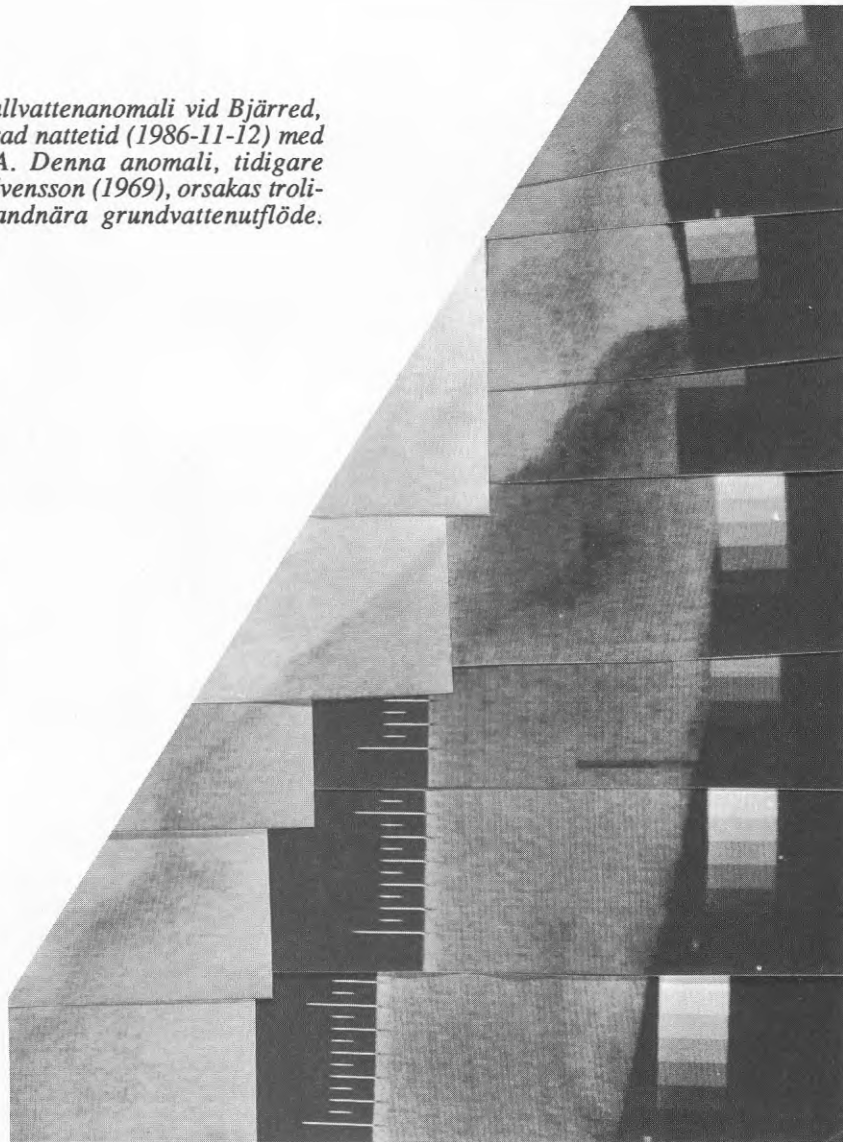


Figur 4.2. Exempel på submarina grundvattenutflöden.  
A = diffust utflöde eller punktutflöde från två skilda akvifärer.  
B = punktutflöde från karst/sprickakvifär, se även fig. 4:3.

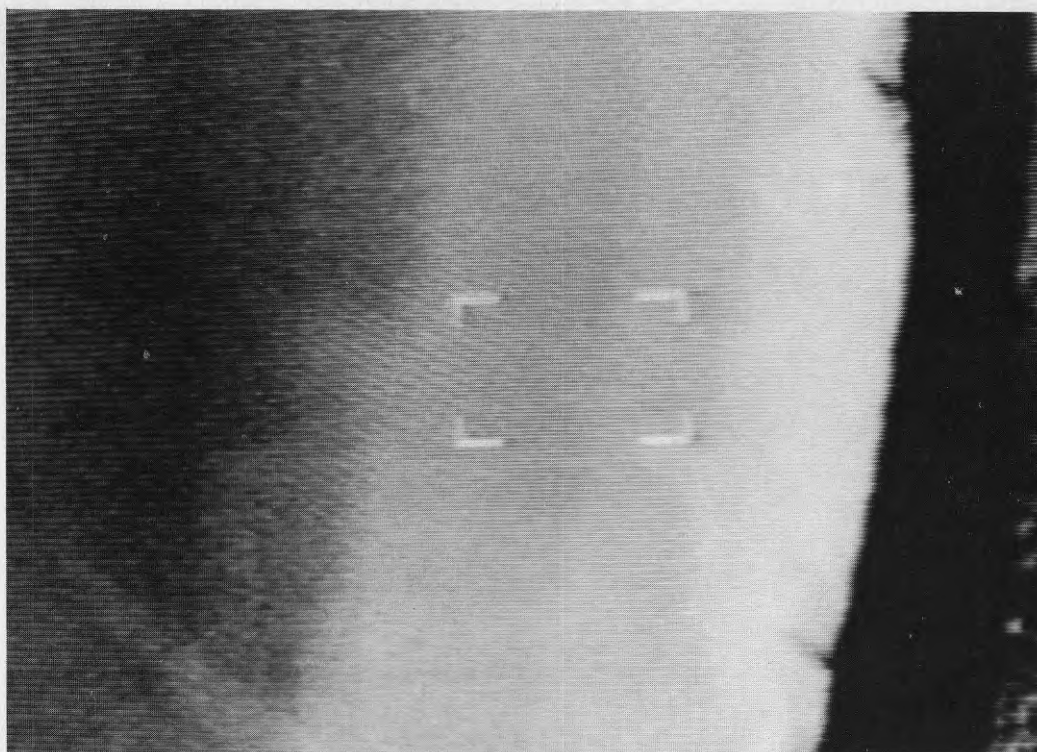


Figur 4:3. Exempel på ett karstområde i södra Italien med submarina grundvattenutflöden. Tolning från värmebilder med hjälp av "level slicing" (Gandino & Tonelli 1983).

Figur 4:4. Kallvattenanomali vid Bjärred, Skåne, registrerad nattetid (1986-11-12) med system AGEMA. Denna anomali, tidigare observerad av Svensson (1969), orsakas troligen av ett strandnära grundvattenutflöde.







*Figur 4:5. Strandnära grundvattenflöden i form av mindre diken. Flöden varierande mellan 0,5 till 2 l/s. Natlig registrering med FLIR-system.*

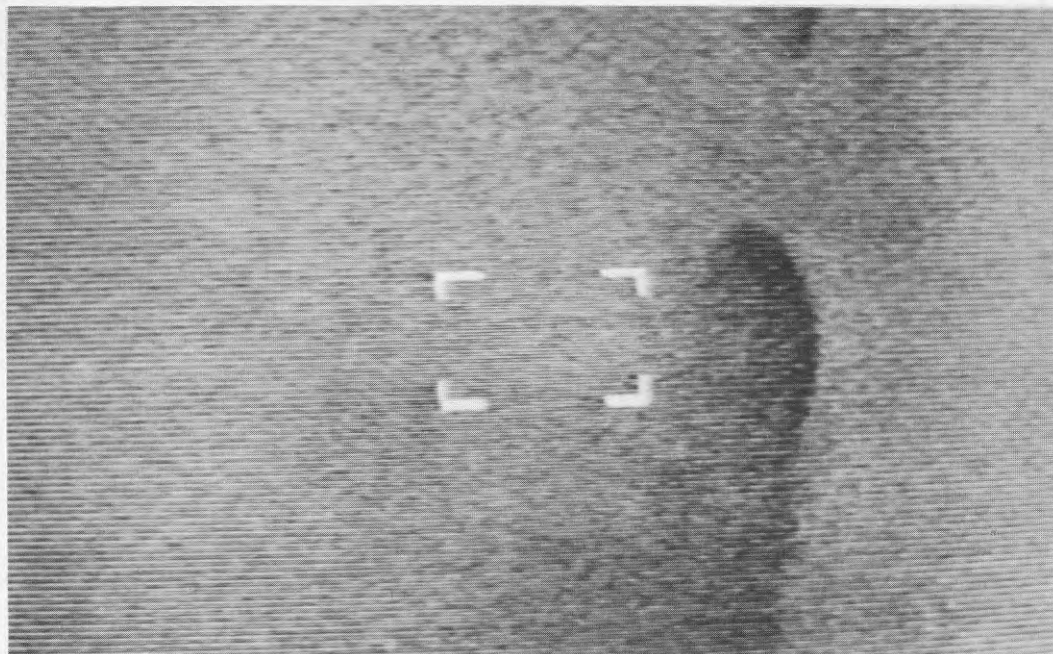
(1987-04-29) FLIR 2000G. Vid båda tillfällena gjordes upptagningarna på flyghöjden 600 m.

Även dessa termograferingar gjordes vid suboptimala förhållanden, då temperaturskillnaden mellan grundvattnet och havsytan vid båda tillfällena var ganska liten, mellan 1° och 2°C. Trots detta kunde ett antal mindre, strandnära grundvattentillflöden registreras (fig. 4:5). Flera av dessa hade redan konstaterats vid tidigare fältundersökningar på platsen.

Av speciellt intresse var vidare ett utflöde från ett avloppsreningsverk som via 2 st rör mynnar omkring 1 km från land på ett djup av ca 7 m. Då storleken på flödet och den ungefärliga temperaturdifferensen är känd, utgör utsläppsområdet en god referenslokal för kontroll av t ex Gandino & Tonelli's (1983) formler för beräkning av flöde o.s.v.

Figur 4:6 visar utsläppet från avloppsreningsverket. Några grundvattenkällor på större djup kunde dock inte lokaliseras. Det skall nämnas att termografering gjordes i ett område som från strandlinjen räknat var endast 200 - 300 m brett.

I ett senare skede kommer vi att bearbeta värmebilderna med hjälp av olika databehandlingsmetoder och verifiera misstänkta grundvattenförekomster i fält med hjälp av salinitetsmätningar i porvatten, seepage meters och andra metoder enligt Vanek (1987). Dessutom krävs en ingående geologisk undersökning för



Figur 4:6. Utsläpp från reningsverket ( $Q = 65$  l/s), ca  $2^{\circ}\text{C}$  kallare än det omgivande havsvattnet. Natlig registrering med FLIR-system.

att fastställa grundvattnets transportvägar.

#### *Undervattenskällor och utsläpp i sjöar och vattendrag*

De flesta sjöar och vattendrag får en del av sitt vatten direkt från det omgivande grundvattnet. I de fall där grundvattenflödena är tillräckligt stora för att påverka temperaturen hos det ytliga vattenskiktet, kan termiska anomalier registreras med flygburen termografering. Till skillnad från submarina källor kan källor i sjöar och vattendrag dock som regel lokaliseras enbart under det kalla halvåret, då det varmare grundvattnet stiger upp till ytan och resulterar i en varmvattenanomali. Endast i de fall där grundvatteninflöden är relativt starka, antingen måttliga tillflöden till små sjöar och vattendrag eller starka tillflöden till större ytvatten, kan en allmän temperatursänkning av hela vattenmassan bli registrerbar även sommartid.

Termiska studier kan ge värdefull information vid undersökningar av olika former av recipienthydraulik, t ex om strömningsmönster för avlopp och liknande. Flygburen termografering av undervattenskällor och utsläpp i sjöar och vattendrag utföres lämpligast under snöfria perioder på senhösten eller strax efter snösmältningen, då grundvattenflödena är starka. Tyvärr kännetecknas dessa perioder ofta av ostadigt väder, vilket kan betydligt försvåra registreringarna. Enligt Brereton (1984) bör termografering i dessa fall helst ske under senare delen av natten eller den tidiga morgonen vid klart, lugnt väder och en lufttemperatur vid eller under  $0^{\circ}\text{C}$ .

Inga grundvattenkällor kunde konstateras i de sjöar som termograferats inom ramen för denna undersökning, d.v.s. Bysjön vid Vombs by samt östra och västra Ringsjöns södra strand.

En senare utsläppsinventering med termografering från helikopter genomfördes i november 1987 över Göta älv från Kungälv till Arendal. Avsikten var att undersöka om några okända utsläpp i älven kunde spåras. Uppdragsgivare var Göteborgs miljö- och hälsoskyddsförvaltning. Idén bakom termografe-

ringen var, att eventuella utsläpp i recipienten skulle ha en temperatur som avvek från recipientens; eftersom temperaturen på utsläppet (spillvatten, kylvatten, processvatten o dyl) oftast är högre än temperaturen på vattendraget som tar emot utsläppet, och eftersom det ibland föreligger en skillnad i salinitet mellan utsläpp och recipient kommer utsläppsvattnet att delvis flyta upp till ytan. Detta varmare ytvatten avtecknar sig tydligt i värmebilden. Förutsättningen är att vattenrörelser och strömförhållanden inte blandar om utsläppsvattnet innan det når ytan.

Termograferingen genomfördes på kvällen den 18 november mellan kl 17.30 och 18.30 från helikopter av typ Hughes 500C. Utrustningen bestod av IR-scanner typ FLIR 2000F och flyghöjden var 600 m. Stråkbredden med det använda objektivet på scannern blev 300 m vilket täckte båda älvstränderna från Kungälv till Göta älv-bron. Från Göta älv-bron och ut mot Arendal fick huvudstråken kompletteras med separata stråk över kajer och dockor för att täcka hela hamnen. Termograferingen bandades för vidare analys och kartläggning.

Från det bandade materialet har sedan alla temperaturanomalier som tolkats som utsläpp registrerats och lokaliserats på kartunderlag. Utsläppen har vidare dokumenterats med videoprintbilder och text i en rapport till kommunen.

Ett flertal utsläpp kunde konstateras i denna senare studie. Analysen av termograferingen pågår men preliminärt omfattar utsläppen följande kategorier. Åar, bäckar och diken som på flera ställen rinner ut i Göta älv har ofta en i förhållande till älven förhöjd temperatur. Kylvattenutsläpp från i hamnen liggande fartyg är väl dokumenterade. Ett par utsläpp mitt i älven kan tolkas som knutna till avlopp med mynningen i älvens mitt. Ett antal utsläpp från industrier och verkstäder med avloppens mynning invid älvstranden är också väl synliga. Slutligen finns ett antal mera diffusa utsläppsmönster vid kajer och stränder där tolkningen är osäker. Fig. 4:7 - 4:11.

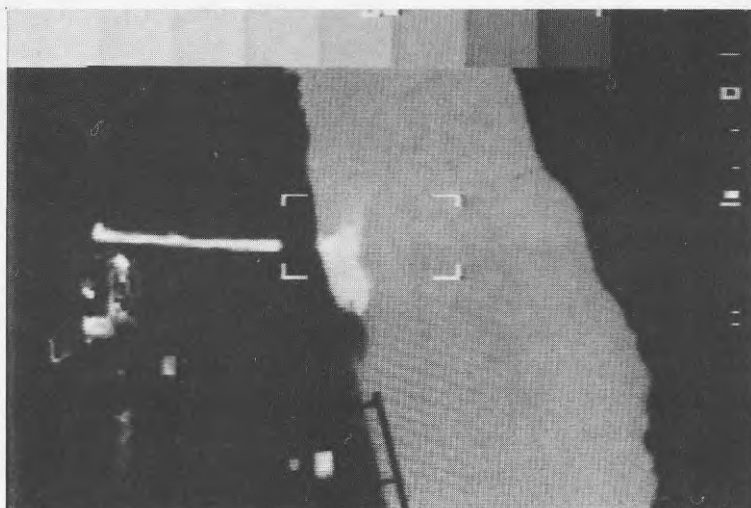
I registreringarna avtecknade sig dessutom ett intressant mönster som tydligt återgav de ytliga strömförhållandena i älven. Denna information kan senare visa sig vara av intresse för bedömningen av de olika utsläppens rörelser och utbredning i älven. Fig. 4:12 - 4:13.

#### *Grundvattenutströmningsområden och lokalisering av grundvatten på land*

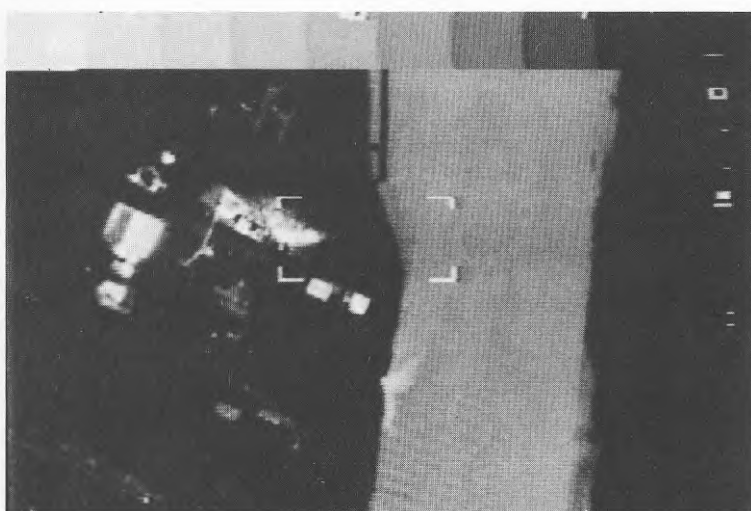
Även här uppnås som regel bästa termograferingsresultat under kalla, snöfria perioder, främst under senvinter - vår (Brereton, 1984). Teoretiskt kan grundvattenförekomster och djup till grundvattenytan lokaliseras även sommartid som lågtemperaturanomalier (Huntley, 1978). I många fall är dock störningar på grund av andra faktorer, t ex olika vegetationstyper och evapotranspirationen, alltför stora, vilket i kombination med sensommarens och den tidiga höstens minimala grundvattenflöden medför stora svårigheter vid bildtolkningen av termogrammen.

För att komma tillrätta med några av de störningar som ger problem vid analys av ytligt grundvatten, föreslår Huntley (1978) att termografering genomförs både på dagen och på natten och att den kombineras med reflexionsmätningar under dagen. Denna metodik skulle även kunna utnyttjas för att urskilja lämpliga områden för t ex ytliga jordvärmeanläggningar. En liknande metodstudie har också utförts i Sverige, där Axelsson (1981) undersökte möjligheterna att utnyttja IR-termografi för kartläggning av markens avdunstning, ytfuktighet och termiska tröghet.

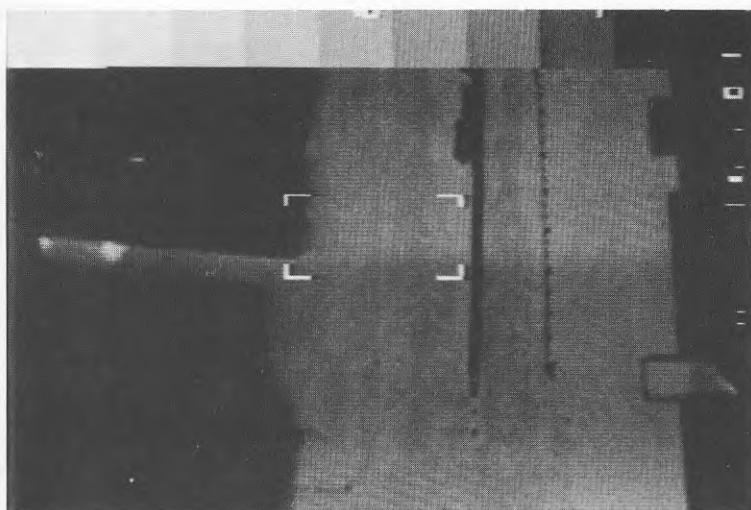
Många utströmningsområden finns i nära anslutning till vattendrag, sjöar eller havsstränder och representerar en kombination av de ovannämnda typerna. Detta kan medföra vissa svårigheter vid termograferingen, eftersom temperatur-



*Figur 4:7. Utsläpp från dike eller å i Göta älv. FLIR-registrering.*



*Figur 4:8. Industriutsläpp i Göta älv. FLIR-registrering.*



*Figur 4:9. Utsläpp i hamnbassäng, Göta älv. FLIR-registrering.*

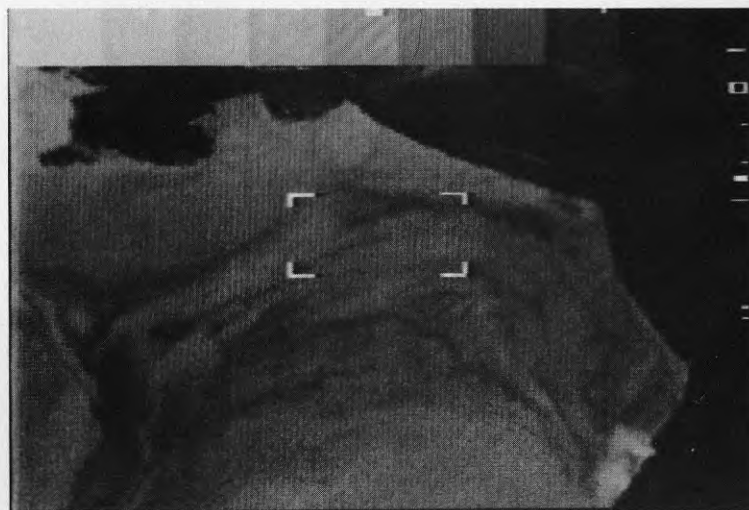
*Figur 4:10. Aloppts- eller spillvatten i inre delen av en hamnbassäng, Göteborgs hamn. FLIR-registrering.*

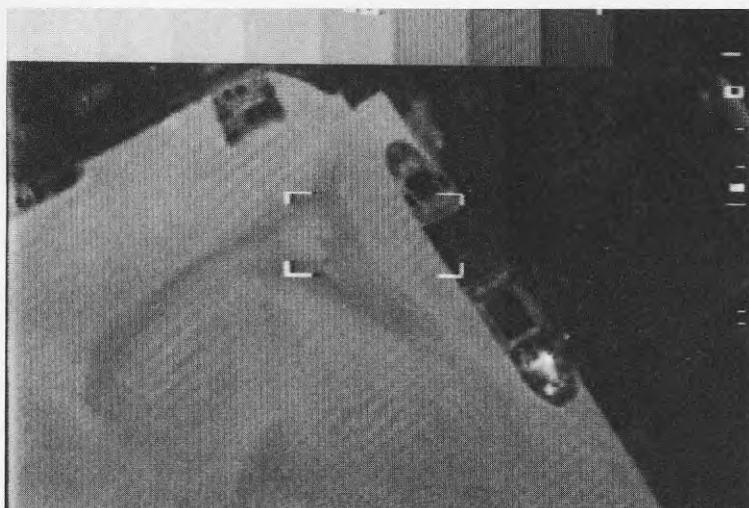


*Figur 4:11. Utsläpp i älvfåran, Göta älv. FLIR-registrering.*



*Figur 4:12. Strömningssmönster och utsläpp i Göta älv. FLIR-registrering.*





*Figur 4:13. Strömningssmönster i hamnbassäng, Göteborgs hamn. FLIR-registrering.*

skillnaden mellan stranden och vattenytan ofta uppgår till flera grader. En optimal temperaturupplösning kan knappast uppnås på både stranden och ytvattnet samtidigt. Samma område bör därför överflygas flera gånger med varierande temperaturinställning hos instrumentet.

En tillämpning vid grundvattenundersökningar är kartering av ytliga grundvattenkällor, där man genom termografering kan skilja på ytvatten och grundvatten. För att få en bild av de regionala grundvattenförhållandena kan de lokaliserade utflödena provtas. Genom t ex vattenanalys kan härvid olika typer av grundvatten och dess transportvägar urskiljas (Brereton, 1984).

I Sverige har "grundvattenanknuten" flygtermografering använts inom arkeologi vid lokalisering av begrävda husgrunder (Lundén, 1985), vid vegetations- och jordartskartering i skogsområden (Lundén, 1981), samt vid undersökningar av myrar med avseende på hydrologi och vegetationstyper (Björkbäck et al., 1970).

### *Slutsatser*

Tillämpningar av termografering inom hydrologi, hydrogeologi och limnologi innefattar både regionala och lokala undersökningar, för underlag till miljövarsåtgärder, samhällplanering och inom angränsande tekniska områden.

Flygburen termografering kan vara en användbar metod för grundvattenstudier, då den medger snabb och jämförelsevis billig kartering av stora områden. Metoden är särskilt lämpad för lokalisering av större källor och andra utsläpp till havs, där den kan användas under stora delar av året. Termografering av sjöar, vattendrag och delvis landområden med ytligt grundvatten bör i första hand utföras under den kalla delen av året, vilket för svenska förhållanden ofta är en försvårande omständighet.

Som plattform för termografering kan både flygplan och helikopter användas. Helikopter som plattform är lämplig för mer detaljerade undersökningar av begränsade områden, jämför bl. a. Göta älv-studien, flygplan däremot är att föredra vid översiktliga undersökningar av större områden.

Eftersom temperaturskillnader i och för sig inte är grundvattenspecifika företeelser, bör termograferingar alltid verifieras och kompletteras med fältkontroll och vattenprovtagning samt med andra hydrologiska, geologiska och limnologiska metoder (Vanek, 1987).

Termografering torde inom olika hydrologiska studier få en ökad användning i framtiden, som en metod för kartläggning av avrinning och grundvattentransport.

Den alltmer ökande prestandan och kvaliteten på kamera- och bildbearbetningsutrustningen och den snabba utvecklingen av avancerade databehandlingsmetoder medför att goda resultat ofta kan uppnås även under vad som tidigare bedömts som suboptimala förhållanden. I de genomförda undersökningarna, under hösten 1986 och våren 1987, har två system använts, FLIR och AGEMA. Det förra systemet utnyttjades även hösten 1987. FLIR är ett något nyare system än AGEMA, med bättre bildkvalitet och översikt vilket underlättar bildbearbetningen. För att rätt kunna tolka termograferingen är kontroll av fältdata av mycket stor betydelse. Det är dock troligt att valet av en lämplig tidpunkt även i framtiden förblir den viktigaste faktorn för ett effektivt utnyttjande av flygtermograferingstekniken.

## 4.2 Lokalisering av äldre, nedlagda soptippar

### *Bakgrund*

Äldre avfallsupplag utgör i många fall svårbedömda risker genom att de kan ge upphov till läckage av giftiga eller hälsovådliga ämnen till grund- och ytvatten. Bristfällig kunskap om förekomsten och läget av övergivna deponier försvårar en riskbedömning. Även i situationer där existensen av en äldre deponi är känd kan dess rumsliga avgränsning vara svår att avgöra.

Termografering kan eventuellt vara en användbar teknik för att närmare avgränsa forna deponiers areella utbredning i situationer där lägena för dessa är dåligt eller ofullständigt kända. Möjligheten till avgränsning är helt beroende av huruvida de tidigare deponierna avviker termiskt från omgivningen. Termiska anomalier kan i detta fall tänkas vara betingade av flera faktorer såsom värmeavgång från anaerob nedbrytning (gäller deponier med organiska material), förändrad jordstruktur eller relativt omgivningen avvikande material och därtill kopplade skillnader i värmeledande och värmehållande förmåga.

Termografering har sedan länge utnyttjats för att studera t ex förekomst och omblandning av vatten med olika temperatur (se avsnitt 4.1), varför tekniken även bör kunna vara användbar för identifiering av eventuella läckage av dagvatten och pressvatten från deponier till näraliggande ytvatten, cirkulationsförhållanden i uppsamlingsdammar etc.

Lämpligaste tidpunkt för registrering bör vara på natten under vår och höst vid utstrålningsväder.

Denna begränsade studie avsåg att (1) under praktiska förhållanden pröva och jämföra användbarheten av två mindre termograferingsutrustningar och (2) bedöma i vad mån flygburen termografering kan ge kompletterande information om äldre avfallsupplag. Den information som skulle kunna vara aktuell är framför allt avgränsning av deponier i situationer där sådan ej låter sig göras i fält och lokalisering av läckage till ytvatten. Vidare avsågs att pröva i vad mån temperaturanomalier på ytan av en deponi gick att korrelera till metanproduktionen i denna (detta försök fick dock utgå, då uppgifterna om metangasproduktion i Spillepingsdeponin inte var av den rumsliga upplösning som ställts i utsikt).

### Metodik

Tre till sitt läge kända, äldre, ej utnyttjade deponier i Helsingborgs kommun utvaldes för termografering. Deponi 1 (Utvälinge 19:1) ligger SW om Utvälinge by bredvid Vegeån där denna löper ut i Skälderviken. Deponin är övertäckt och ligger på sandigt underlag och lakvattnet rinner via en intilliggande lagun ut i ån. Lokal 2 (Utvälinge 7:2) är övertäckt, jordarten utgöres av morän och den nuvarande markanvändningen är jordbruksproduktion. Deponi 3 (Rögle 1:8) utgöres av en större deponi med bristfällig täckning. Deponin ligger i en före detta lertäkt.

Lokalerna 1 och 2 registrerades på video med både Agema 782 LWB- och FLIR 2000G-utrustningen; lokal 3 endast med FLIR 2000G-utrustningen. Termograferingen gjordes nattetid från helikopter. Agema-registreringen skedde natten mellan 11 och 12 november 1986 och registreringen med FLIR natten mellan 29 och 30 april 1987.

### Resultat

Ur handhavandesynpunkt visade sig Agema-utrustningens bildvinkel vara helt otillfredställande för denna typ av praktisk termografering, då den inte medger överblick över annat än mycket små objekt. Vidare är den geometriska upplösningen också för liten. Dessa förhållanden i kombination med den lilla monitoren gör lokaliseringen av det studerade objektet svår nattetid.

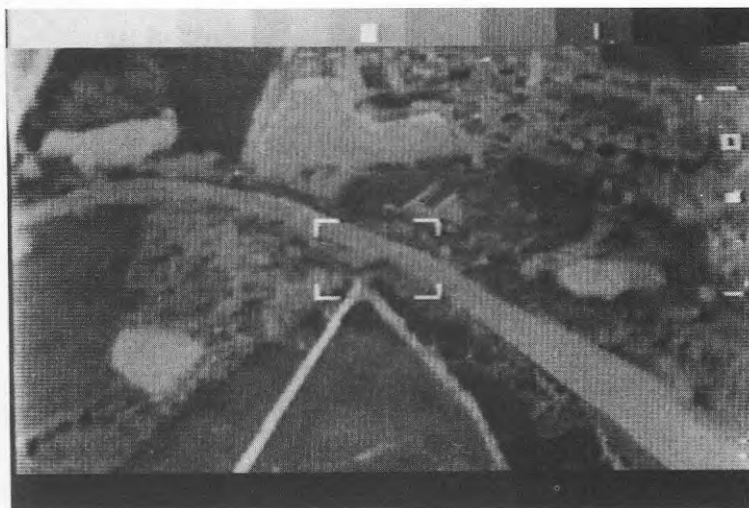
FLIR-systemets bildvinkel, upplösning och monitorstorlek är ur handhavandesynpunkt helt tillfredställande. I kombination med "kamerans" styrbarhet (med joy-stick) kan utrustningen utnyttjas för att navigera in mot objekten.

Läget för deponi 1 kan ej identifieras i Agema-registreringen. Deponin är urskiljbar i FLIR 2000G-registreringen, men det är ytterst tveksamt om denna deponi hade kunnat lokaliseras utan förhandskunskap om dess läge (fig. 4:14).

I figuren 4:14 framträder Vegeån samt fyra ljusa ytor, vilka är dammar. Bredvid den vänstra, långsträckt dammen och övre bildkanten framträder en termiskt "orolig yta", vilken markerar läget för den tidigare deponin. Inga läckage till ån kan identifieras från deponin.

Deponi 2 kan ej identifieras i någon registrering.

I Agema-registreringen av deponi 3 framträder en termiskt mycket hetero-



Figur 4:14. FLIR-registrering av område kring Vegeån, Skåne, med nedlagd deponi (området mellan den vänstra, långsträckt dammen och övre bildkanten)



gen yta. De ljusaste delarna utgörs av öppet vatten, medan resterande "oroliga" delar utgörs av den dåligt täckta deponin. Upplösningen är för dålig för att eventuella läckage eller strömningsmönster i vattenytorna skall kunna spåras.

### *Slutsatser och diskussion*

En av de begränsade erfarenheter som de utförda termograferingarna har gett, är att termograferingstekniken ej synes ha användbarhet för detektering och avgränsning av äldre deponier. Däremot förefaller möjligheterna goda att övervaka vattenläckage från deponier till angränsande ytvatten. Andra möjliga tillämpningar skulle kunna vara kontroll av täckning av i dag utnyttjade deponier och eventuell lokalisering av områden med hög metanproduktion. För att bedöma den praktiska användbarheten av termografering för dessa tillämpningar krävs separata studier.

## **4.3 Oljeskadeinventering**

### *Inledning*

Kort före julhelgen 1986 grundstötte kusttankern *Thuntank 5* i Gävlebukten under angöring till Gävle. Fartyget sprang läck och uppskattningsvis ca 100 ton eldningsolja rann ut i öppen sjö innan lasten läktrats och länsor förhindrat vidare oljespridning.

På uppdrag av länsstyrelsen i Gävleborgs län och Statens Räddningsverk påbörjades i mars 1987 ett försöksprojekt med syfte att med hjälp av IR- och videoteknik försöka finna olja i ismiljö.

Projektet påbörjades strax före påsk och avslutades i slutet av maj. Två inventeringsmetoder användes, dels termografering med IR-scanner, dels filmning med videokamera.

I samband med grundstötningen rådde hårt väder och begynnande isläggning. Av den olja som rann ut försvann en ansenlig mängd som senare antogs vara infrusen i eller under isen. För att kunna hålla en hög beredskap inför saneringsarbetet våren 1987, under och efter islossningen, framkom önskemål om en metod att tämligen noggrant kunna lokalisera den försvunna oljan innan isen gett sig iväg. Diskussioner med sakkunniga inom miljövard och IR-teknik samt erfarenhet från vårisarna i Stockholms skärgård gav upphov till två teorier om möjligheterna att spåra olja i ismiljö med hjälp av värmekamera.

Den första teorin baserar sig på att is har förhållandevis god värmeledningsförmåga och därför kan leda värme genom tjocka skikt. Olja, tång, växtmaterial och vissa bottentyper är goda värmeabsorbenter och kan påverka isens avsmältning både underifrån och uppifrån. Föremål och värmeabsorberande skikt under isen borde alltså under vissa förhållanden kunna ge upphov till temperaturanomalier på isytan.

Den andra teorin är enklare och går ut på att olja som utsatts för uppvärmning genom solinstrålning tydligt avtecknar sig mot bakgrunden som kan vara både snö, is, sten eller sand vid en termisk registrering.

Vid de första försöken med värmekamera framkom att den första teorin stämde ganska bra vad beträffar oljans fysikaliska påverkan på isen. En hel del olja som under vintern varit dold av snö och is blev nämligen under våren synlig för blotta ögat på många ställen. Detta gav anledning att också genomföra försök med videokamera vilket senare blev den mest nyttjade operativa metoden. Målsättningen var här att visuellt med videokameran som hjälpmedel och med

helikoptern som plattform avsöka strandzonen och inventera och dokumentera oljepåslag.

Som väntat blev den andra teorins riktighet bekräftad, och mätningar genomfördes på ett flertal strandtyper. Försöken gav dock vid handen, att de yttre omständigheterna, t. ex termograferingstidpunkt, var helt avgörande för ett bra resultat.

### *Genomförda inventeringar*

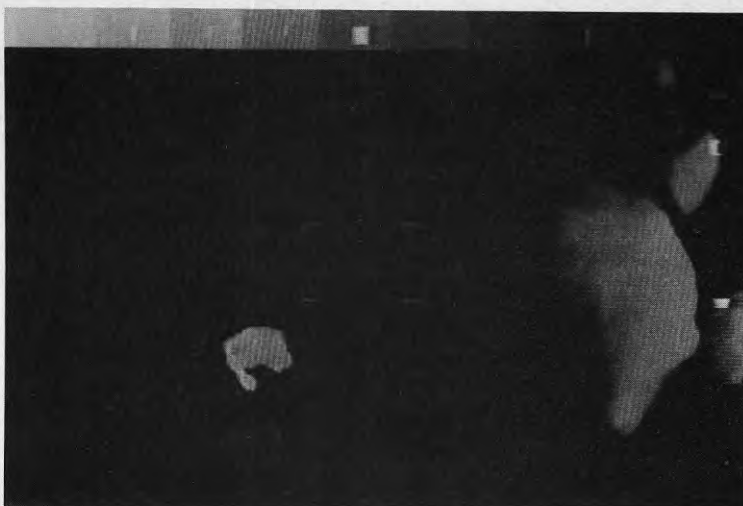
Strax före och efter påsk genomfördes ett antal termograferingar med två olika system. Flygningen gjordes dels över områden med kända oljepåslag, dels över områden ej tidigare inventerade.

Under påskveckan, veckan efter påsk samt vid två tillfällen i början och i slutet av maj genomfördes inventering med hjälp av videofilmning. Härvid täcktes för vidare bearbetning större delen av kusten från Billudden till Rönnskär.

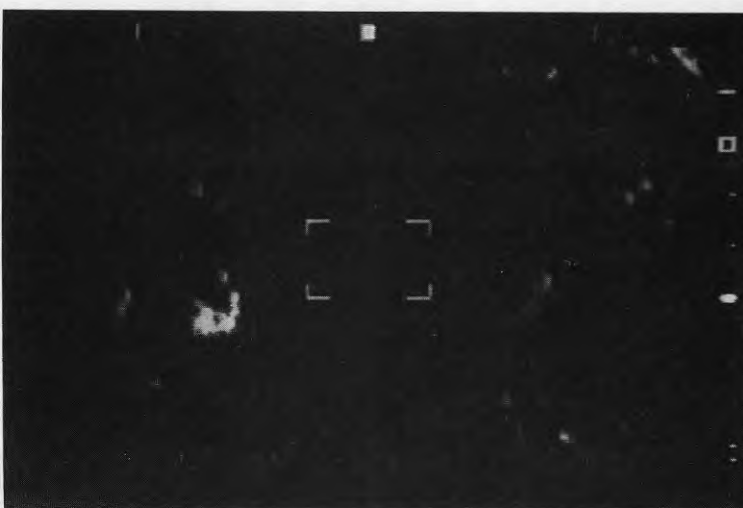


*Figur 4:15 - 4:16.  
Oljepåslag på sten.  
Stenen (övre figuren) har en temperatur understigande +17,6°C. Oljan som tecknar sig som ett moirémönster (nedre figuren), har en temperatur som överstiger +19,6°C.  
Upptagningar med Inframetrics.*

*Figur 4:17. Oljeklump (till vänster) och solbelyst sten (till höger). Notera gråtonsskillnaden mellan de båda objekten. FLIR-registrering.*



*Figur 4:18. Oljepåslag bland strandstenar. FLIR-registrering från 250 fot.*



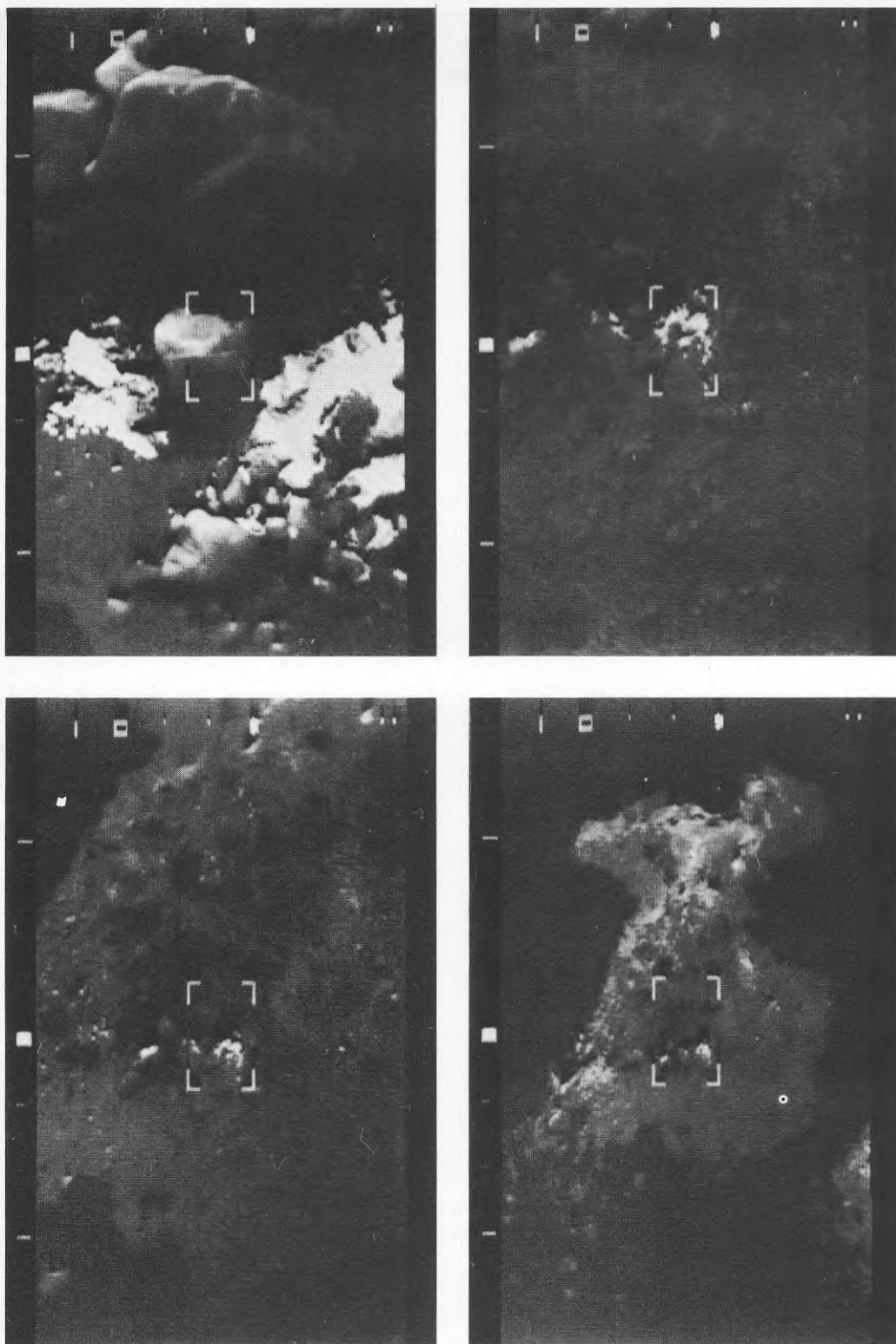
### *Metodbeskrivning*

Värmekamerorna som användes i försöket var dels en Inframetrics 600, dels en FLIR 2000 G. Teknisk beskrivning av kamerorna återfinns i avsnitt 2.1.

För termograferingsförsöken valdes ett område intill Sågarbofjärden innanför Billudden vid Gävlebuktens Upplandskust. I den hårda nordliga vinden som rådde vid grundstötningen i december hade mycket olja drivit iland i trakterna av Billudden.

Försöken genomfördes så att ett antal lätt identifierbara provytor med oljepåslag valdes ut vilka sedan termograferades under olika betingelser. Vidare flögs som jämförelse ett antal kuststräckor med okänt oljepåslag. Alla försöken genomfördes i klart väder under dagar vid olika tidpunkter.

Vid försöken med Inframetrics 600 var huvudsyftet att mäta temperaturskillnaderna mellan olja och omgivning liksom att få en uppfattning om oljans



Figur 4:19 - 4:22. Oljepåslag från hovringshöjd (överst till vänster), från 300 fot (överst till höger), från 600 fot (nederst till vänster) och från 1000 fot (nederst till höger). FLIR-registreringar.

och strandens absoluttemperaturer.

FLIR-systemet användes för att testa olika inställningar och höjder liksom farter och flygteknik etc. för att ge underlag för rekommendationer kring en eventuell framtida operativ metod.

### *Tolkning och redovisning*

Tolkning och analys av materialet från flygtermograferingarna har gjorts i redigeringsutrustning för VHS och bilder för illustration har tagits ut via videoprinter. Vissa svårtolkade bilder, särskilt över isytor, måste bearbetas i ett bildbehandlingssystem för att kunna analyseras med precision och arbetet med denna tolkning och utvärdering av resultaten pågår och kommer att lämnas i annat sammanhang.

Bearbetning av resultaten från videofilmningarna har likaledes skett i videoredigeringsutrustningen där förutom god bildkvalitet även tekniken att kunna stanna och bläddra bland videobandets 25 bilder/sekund underlättar tolkningen avsevärt.

### *Resultatredovisning*

Den olja som flyter i land och fastnar på sten eller gräsytor absorberar under vissa betingelser värme snabbare än underlaget och får därigenom en högre temperatur än omgivande strand. Vid temperaturmätningar med värmekamera måste hänsyn tas till bl.a. materialets strålningsegenskaper som bl.a. uttrycks med hjälp av emissionsfaktor. Inga mätningar av verkliga emissionsfaktorer har gjorts vid försöken, men litteraturuppgifter ger vid handen att denna faktor för sten, sand och grus ligger mellan 0,93 och 0,96, medan torr asfalt har en emissionsfaktor på 0,95-0,96. Lättflytande olja i tunna skikt har en emissionsfaktor mellan 0,72 och 0,82, men den ilandflutna eldningsoljan i Gävlebukten hade genom avdunstning närmast karaktären av tjock asfalt. Den ilandflutna oljan och ytmaterialet i stranden har därför antagits ha haft i stort sett samma emissionsfaktor. Fig. 4:15 - 4:16.

Försöken med Inframetrics-systemet visade, att oljepåslaget på stranden vid Sågarbofjärden hade en temperatur som låg ca 5°C över den temperatur som de soluppvärmda sydsidorna av strandstenarna hade. Mätningarna gjordes mellan kl 15.30 och 16.00 den 14 april. Instrålningen från solen hade under dagen medfört en temperaturhöjning i oljeytor och oljeklumpar som tydligt kunde urskiljas i värmebilden. Termograferingen skedde från hovringshöjd, d.v.s. med scannerobjektivet ca 2 meter från markytan. Fig. 4:17.

Vid mätningar samma dag mellan kl 18.30 och 19.00 var den termiska informationen över samma område helt utslätad och inga spår efter olja kunde upptäckas. Detta har tolkats så att utstrålningen från markytan under den sena eftermiddagen nått så långt att oljan antagit underlagets temperatur och därigenom inte längre blev urskiljbar i värmekameran. Fig. 4:18.

I avsikt att undersöka, på vilka höjder över marken det var praktiskt möjligt att i värmekameran spåra oljepåslag, gjordes ett antal försök med FLIR-systemet. Försöken genomfördes den 23 april i Sågarbofjärden med himlen täckt av en tunn cirruslöja. Ett 30x30 cm stort oljesjok med lätt igenkännbar form valdes som mål. Från hovringshöjd upp till 300 m höjd över marken kunde oljepåslaget tydligt urskiljas från omgivande mark. Ytterligare försök visade, att oljeklumpar med storlek som en handflata kunde upptäckas från 300 m över

markytan. På höjder över 150 m uppstod dock svårigheter att säkert urskilja mindre oljepåslag från annat uppvärmt material som t.ex. stenar, grenar etc. I helikoptern, där värmebilden rör sig ganska snabbt över monitorn, kan ögat inte urskilja de små nyanserna i gråskalan som skiljer uppvärmd olja från andra värmeabsorberande föremål på stranden. Fig. 4:19 - 4:22.

### *Sammanfattning*

Termografering för detektering av olja i strandzonen är enligt de första utvärderingarna av försöken i Gävlebukten en användbar metod. Tekniken är mera väderkänslig än videofilmning och troligen också dyrare beroende på kostnaden för IR-utrustningen.

Termografering för detektering av olja på och i isytor har hittills inte visat sig vara operativt användbar, även om teorin om oljans fysikaliska påverkan på isen under försöken visat sig stämma. Materialet från isytetermograferingarna skall senare ytterligare bearbetas, men en trolig orsak till de små och svårupptäckta temperaturskillnaderna mellan olja och is är att olika fysikaliska fenomen tar ut varandra.

## **5 KLIMATOLOGI**

### **5.1 Studier av regionala temperaturskillnader i ett fruktodlingsdistrikt**

I östra Skåne norr om Simrishamn finns ett av landets mera omfattande fruktodlingsdistrikt. Området kännetecknas av kraftigt bruten topografi. Några av dess mera kända höjder är Brösarps backar och Stenshuvud. Landskapets brutenhet kan vara på gott och ont i fruktodlingssammanhang. Skyddade lägen med god solexponering är vanliga. Men denna typ av topografi innehåller också riskzoner. I sänkor och dalar utbildas ofta kallluftsjöar, och utefter sluttningar kan kallluft uppdämmas mot hindrande objekt. I dessa zoner uppträder därför ofta de svåraste frostskadorna i odlingarna.

Skadliga låga temperaturer kan uppkomma som följd av värmeförluster från mark och vegetation genom strålning. Om temperaturen är lika med eller understiger 0°C, talar man om strålningsfrost. Denna typ av frost är särskilt berömd i fruktodlingssammanhang. Den uppkommer nattetid i samband med passage av långsamma anticykloner med relativt sval, torr luft, ringa molnmängd och svag vind. Den gynnas av vissa terräng- och markförhållanden, vilket ofta gör den utpräglad lokal till utbredningen.

Strålningsfrosten ger årligen stora skador i odlingar inom tempererade områden. Dessa skador uppkommer oftast under våren. Odlingskadorna genom strålningsfrost kan i många fall begränsas eller förhindras. Detta kan göras dels genom att aktivt skydda redan etablerade odlingar med t ex artificiell dimma, vattenbesprutning eller ventilation, dels genom att lokalisera nya odlingar till områden med ringa frostrisk.

I syfte att öka förståelsen för hur topografi och markanvändning påverkar det lokala temperaturklimatet, i synnerhet frostläntheten, inom det aktuella fruktodlingsdistriktet, igångsattes för några år sedan omfattande lufttemperaturmätningar inom detta med utnyttjande av ett avancerat mobilt mätsystem (bilmätfärder). Under färd mäts temperaturen med detta system på 0,2, 1,0, 2,0 och 3,0 m höjd över markytan och luftfuktigheten på 2,0 m höjd över markytan. Mätningarna görs automatiskt vid var tionde meter. Kompletterande kli-

matmätningar i terrängen sker med hjälp av bärbar utrustning. Förfarandet får anses adekvat, eftersom fruktodlingarna mestadels är belägna utefter valda mätvägar.

Flygplansbaserad infrarödtermografi har tidigare visat sig vara en användbar metod att dokumentera termiska skillnader i landskapet av intresse i fruktodlingssammanhang (Mattsson & Börjesson, 1978). Tekniken ger bl.a. information om ytemperaturen hos det exponerade växtmaterialet, i vilket frostskadorna inträffar. Viktiga men ännu ej helt utredda frågor i sammanhanget gäller vilka samband som existerar mellan de registrerade objekttemperaturerna och lufttemperaturerna på olika avstånd från de energiomsättande ytorna. Ett sätt att belysa sådana samband bedöms vara att kombinera helikopterburen infrarödtermografi med lufttemperaturmätningar på olika nivåer över markytan utefter en intressant mätsträcka inom undersökningsområdet. I det följande ges några kommentarer till registreringar av detta slag.

Den valda mätsträckan med anslutande terräng är belägen vid Vitemölla norr om Kivik (fig. 5:1). Området sluttar mot norr och nordöst och har i den senare riktningen en särskilt markerad brant längs stranden. Terrängen är till stora delar ängs- och hagmark men rymmer även fruktodlingar och någon bebyggelse (fig. 5:2).

Tabell 5:1. Infrarödtermografering från helikopter över försöksområdet vid Vitemölla

Instrument	Tidpunkt	Flyghöjd (m)	Väder	Stråkbredd (m)
Inframetrics 600*	860522, 23.45 h	600	0/8 lugnt	100
FLIR 2000G	870527, 01.15 h	1000	0/8, svag vind från NW	450

\*Har bildbehandlingsutrustning

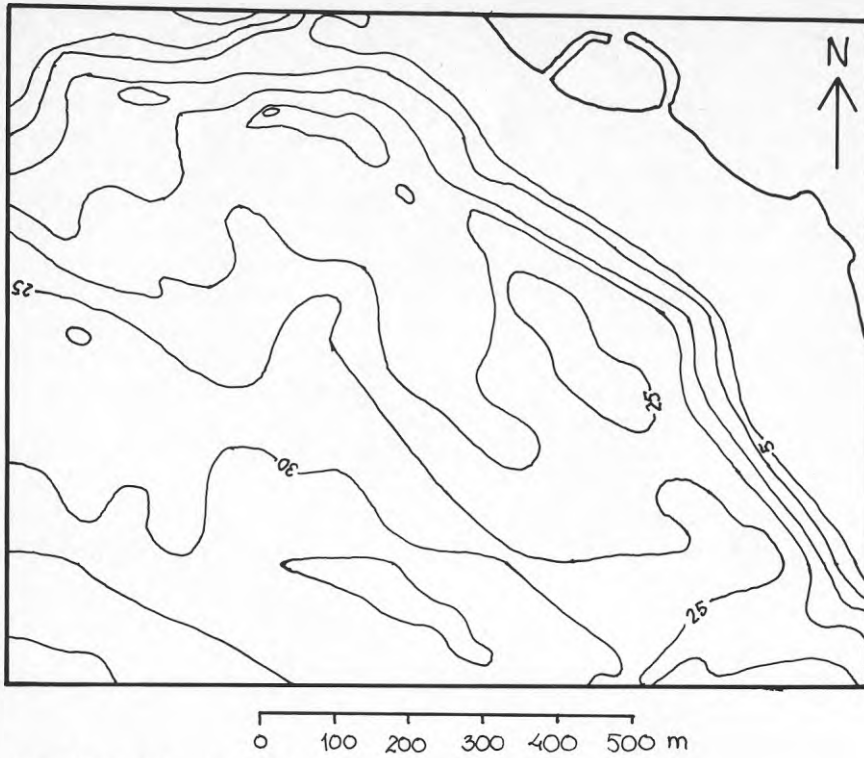
Området termograferades vid två tillfällen med utstrålningsväder (tabell 5:1). Relevant information om utnyttjade instrument och om mätbetingelserna i övrigt ges i tabellen.

Termograferingen med ett av instrumenten, Inframetrics 600, måste av tekniska skäl genomföras via en metallspiegel (kameran kan ej riktas nedåt vid fylld behållare med flytande kväve). Detta resulterade i spegelvända bilder för detta system. För att möjliggöra jämförelser har i avsnittet presenterade värmebilder från både Inframetrics-kameran och den andra utrustningen som provades i området, FLIR 2000G, framställts med ett och samma videoprintsystem.

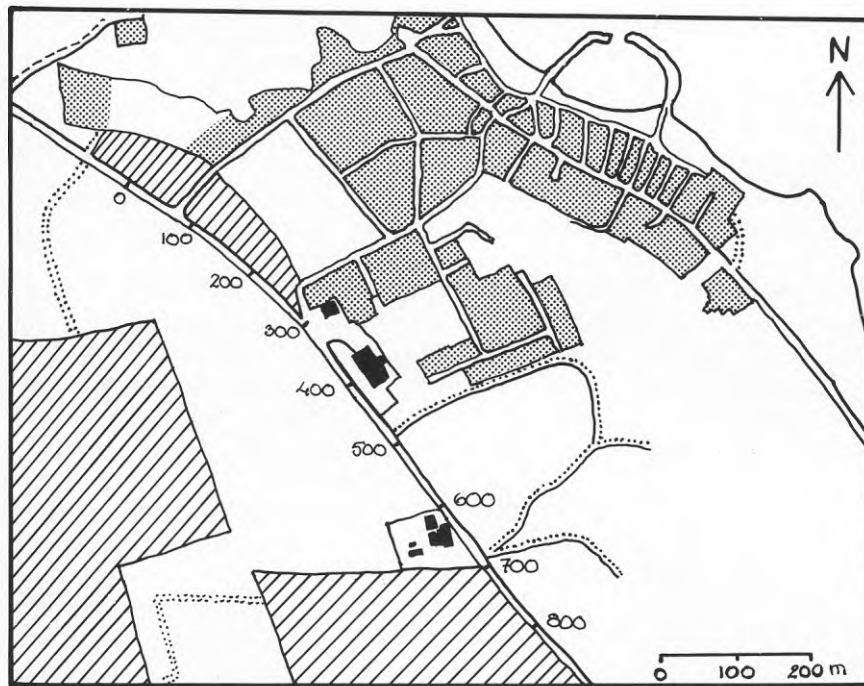
I fig. 5:3 presenteras ett montage av värmebilder registrerade över försöksområdet med Inframetrics-systemet. Fig. 5:4 redovisar lufttemperaturer registrerade samtidigt med termograferingen i olika nivåer utefter vägen genom försöksområdet.

Som framgår av diagrammet förekom stora lokala temperaturvariationer utefter vägen gynnade av de särskilt goda utstrålningsbetingelserna vid mättillfället. Det är härvid av visst intresse att jämföra markens och vegetationens termiska variationer med dem som samtidigt förekom i de mark- och vegetationsnära luftskikten.

Profilen inleds med isoterma lufttemperaturförhållanden, som dock redan efter ett hundratal meter övergick i en markinversion med låga temperaturer. Uppkomsten av denna gynnades av den öppna gräsbebusna terrängen sydväst om vägen. Låga temperaturer präglade dessa fält.



Figur 5:1. Försöksområdets topografi.



FRUKTODLING    GRÄS    BEBYGGELSE

Figur 5:2. Försöksområdet vid Vitmölla. Mätsträckan löper diagonalt över bildens vänstra del.



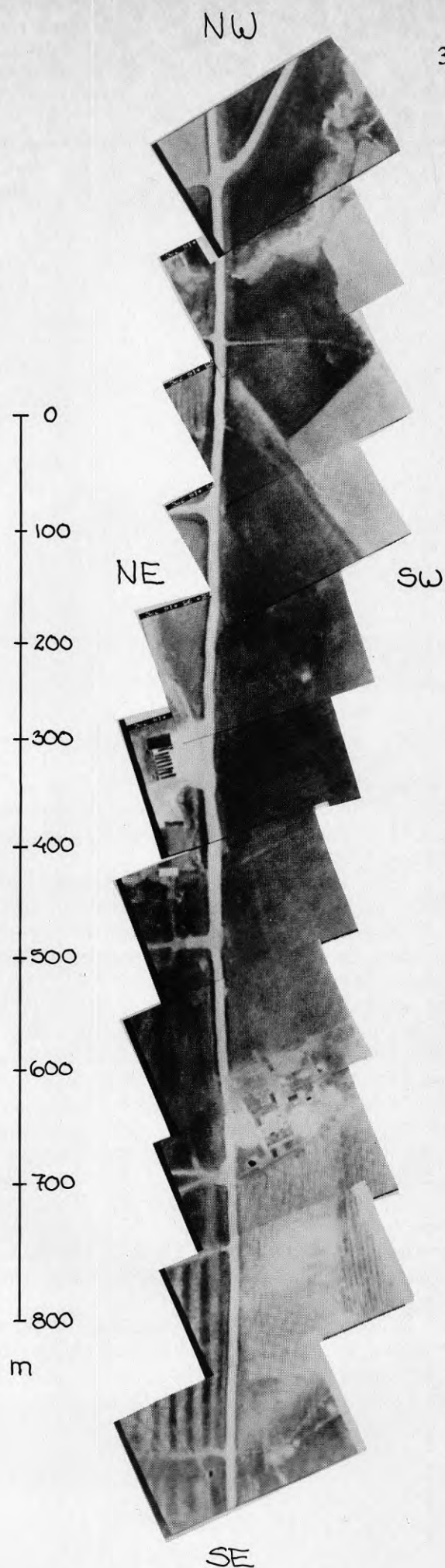
Fram till 300 m-markeringen ligger vägen på en bank ca 2 m över omgivningen. Trots detta synes vägklimatet klart påverkat av omgivande fält m.m., vilket tyder på ett förhållandevis väl utvecklat inversionsskikt över dessa. Vid omkring 300 m-markeringen inträffade en påtaglig temperaturhöjning men med bibehållen markinversion. Som framgår av termogrammen vidgas vägen här i en uppställningsplats (asfaltbelagd) för bussar. Dessa kan för övrigt urskiljas som svarta streck i termogrammet. Vägen är här i nivå med omgivningen. Inom en relativt begränsad sträcka strax före 400 m-markeringen inträffade åter en kraftig temperatur-sänkning, som indikeras i värmebilden av en något mörkare gråton hos vägbanan. Möjligen beror temperatur-sänkningen på att kallluft här flödar över vägen.

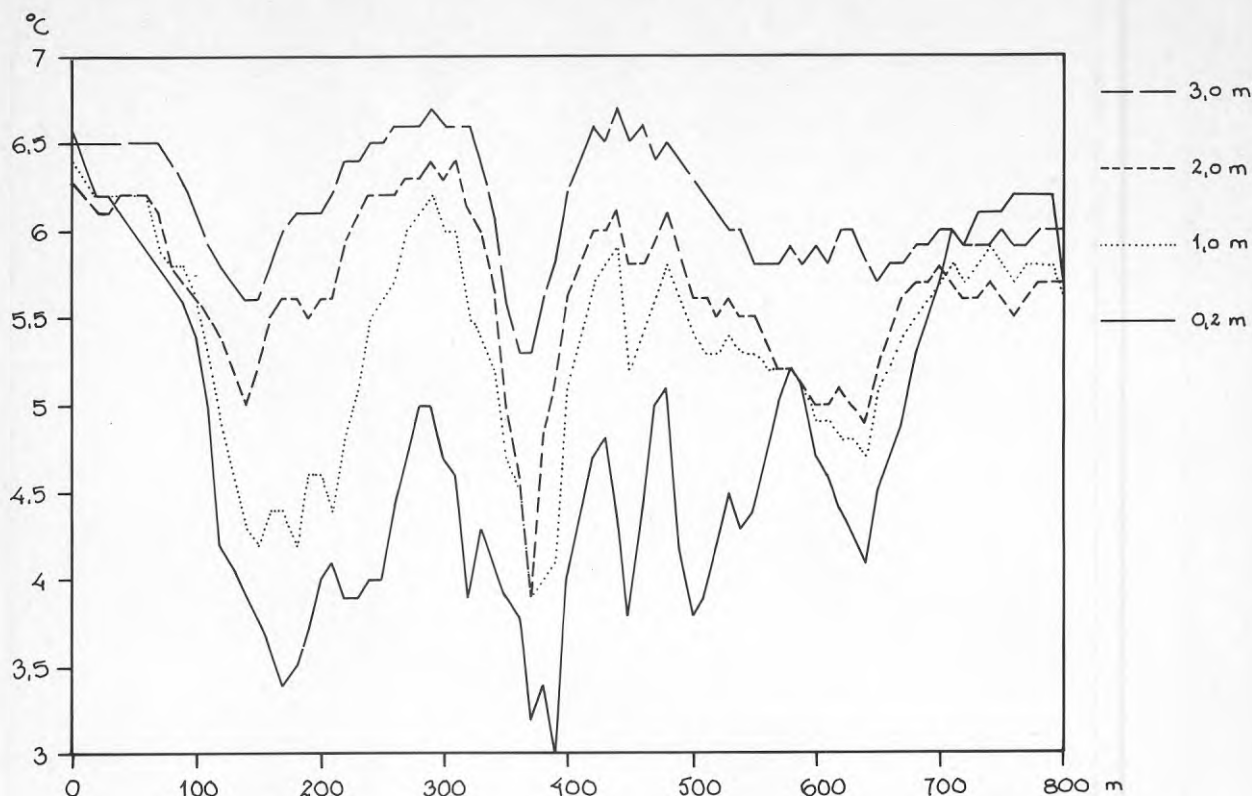
Låga temperaturer präglar också allmänt det sluttande området nordöst om vägen, vilket tidigt på kvällen hamnar i skugga. Man noterar bl a här också i termogrammen de mörktecknade kallluftssamlade dikena utefter vägen.

Strax före 600 m-markeringen, vid gården, dämpas inversionen något av trädkronor som når ut över vägen.

Mätprofilen passerar slutligen en fruktodling, vilken med sina trädrader tydligt framträder i värmebilden. Växtmaterialiet är varmare än mellanliggande mark, och inom odlingen kan också andra termiska mönster spåras. Vidare synes

Figur 5:3. Montage (spegelvänt) av värmebilder registrerade med Inframetrics-systemet över försöksområdet vid Vitemölla. Ljusa ytor i registreringen är varma.





Figur 5:4. Lufttemperaturen på olika nivåer utefter mätsträckan (1986-05-22).

lufttemperaturen över vägen vara påverkad. Isotermi präglar mätsträckan utefter denna. Mitten mot fruktodlingen är en marknadsplats (Kiviks marknad) där en termisk randstruktur avspeglar ståndens kalla gräsytor och mellanliggande gångars varmare mark.

Fig. 5:5 redovisar termograferingen med FLIR-systemet och fig. 5.6 lufttemperaturmätningar för termograferingstillfället.

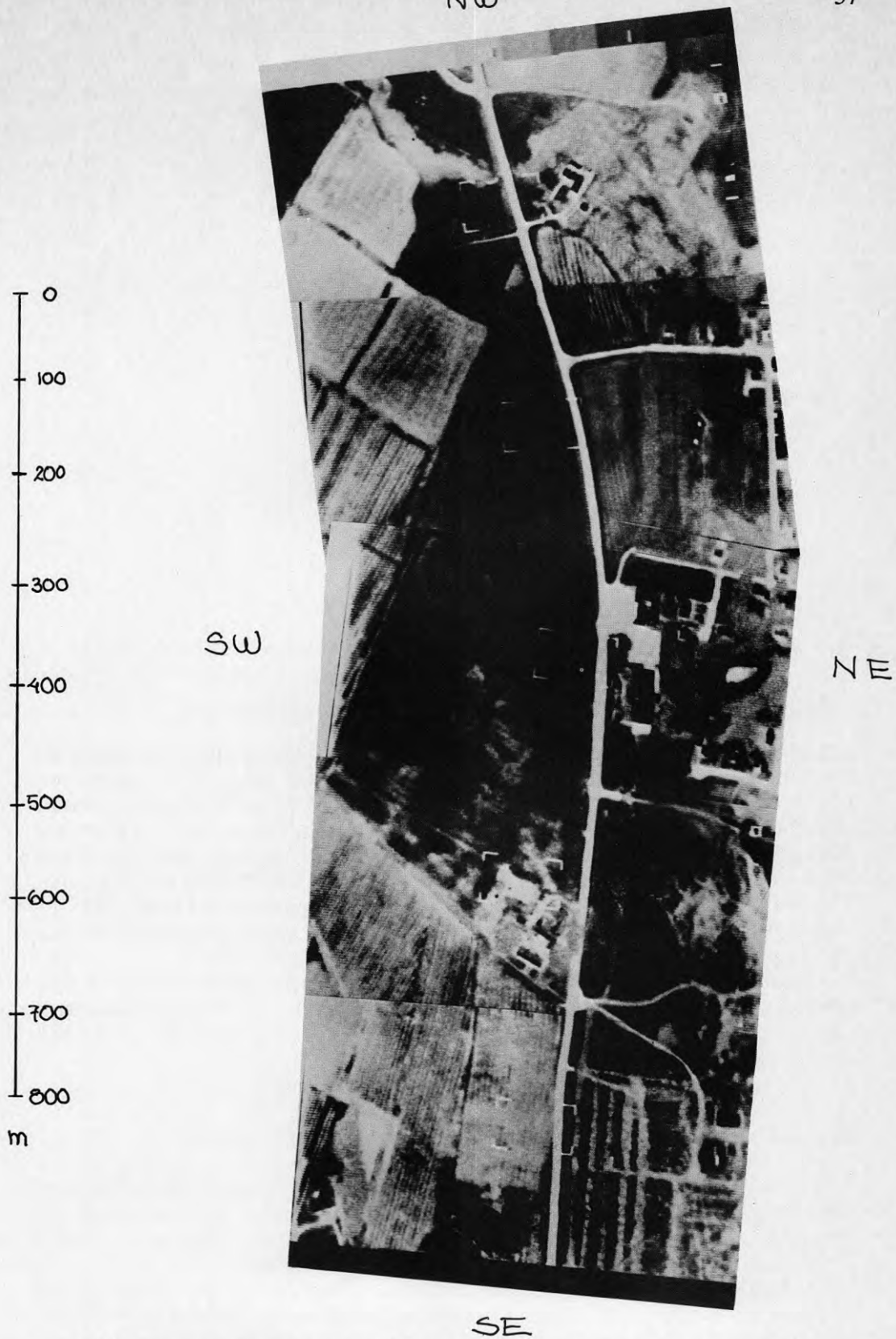
På grund av vind och hög luftfuktighet dämpades vid detta såväl de vertikala som de horisontella temperaturskillnaderna något jämfört med vid det föregående termograferingstillfället. Låga temperaturer och en tydlig markinversion noteras utefter den del av vägen som löper längs och i nivå med de omgivande öppna, kalla fälten. Sannolikt reducerade vinden inversionskiktets mäktighet över fälten, vilket torde ha dämpat de vertikala temperaturskillnaderna över den sträcka som löpte på en förhöjd bank. Lufttemperaturförloppen var sålunda på grund av främst vindförhållandena relativt olika mellan de båda registreringstillfällena. I värmebildmontaget däremot återfinns i stort sett samma termiska mönster som i det föregående montaget, dvs ytorna har bibehållit sina inbördes termiska relationer.

En jämförelse mellan de båda IR-systemen visar att FLIR 2000G ger de klart bästa upptagningarna. Såväl den termiska som den geometriska upplösningen är bättre hos FLIR än hos Inframetrics. Detta medför att FLIR-upptagningar kan utföras från större höjd, varvid bredden hos det termograferade stråket ökas.

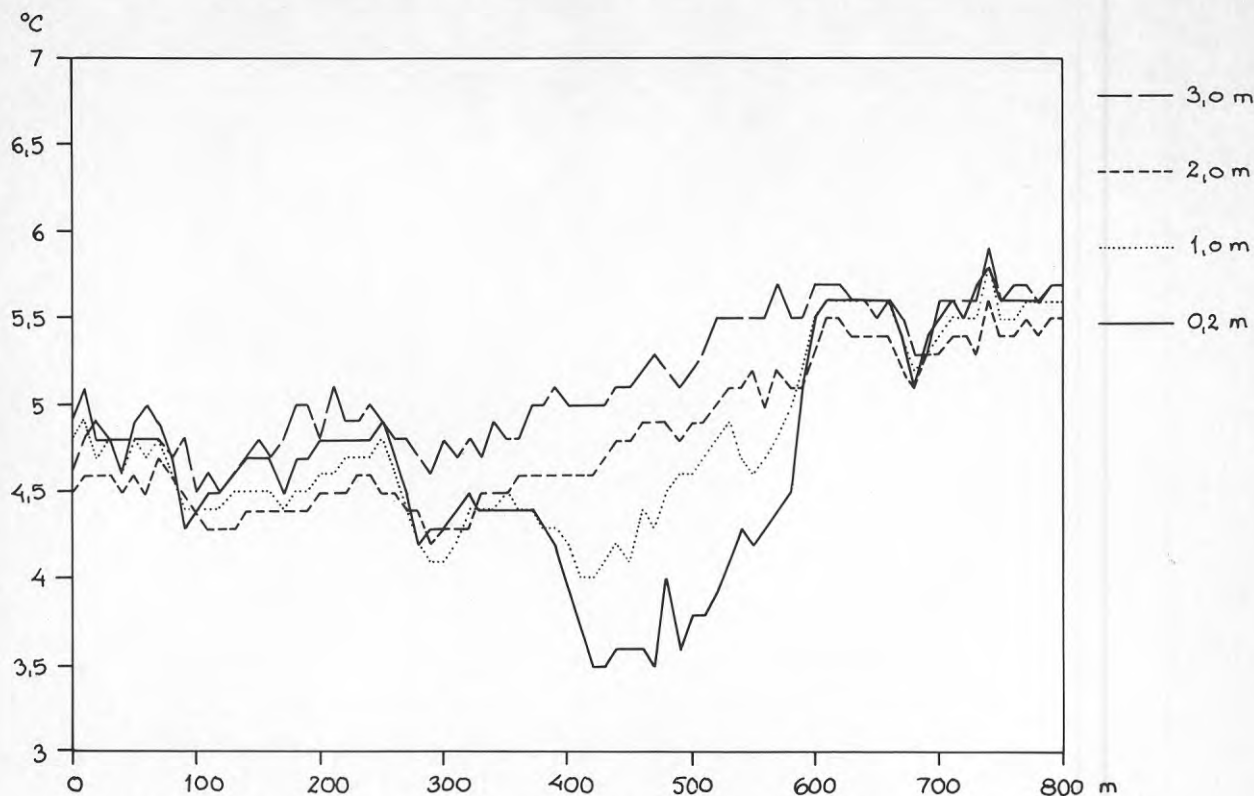
Upptagningarna över Vitemölla - Kiviksområdet har klart visat att helikopterbaserad infrarödtermografi med aktuella system är en användbar teknik för dokumentation av mikro- och lokalklimatiska temperaturmönster i mark och vegetation av intresse vid bl a frostlänthetstudier. Termograferingen kan göras från re-

NW

37



Figur 5.5. Montage (rättvänt) av värmebilder registrerade med FLIR-systemet över försöksområdet vid Vitemölla . Ljusa ytor i registreringen är varma.



Figur 5:6. Lufttemperaturen på olika nivåer utefter mätsträckan (1987-05-27).

lativt låg flyghöjd och direktövervakas och eventuellt korrigeras under pågående flygning. FLIR-systemet har utöver god termisk och geometrisk upplösning också den fördelen att termograferingen kan göras med lutande kamera (snedbilder). Genom att rikta kameran snett framåt utefter det valda stråket kan intressanta företeelser inom detta tidigt observeras. En nackdel med systemet är dock att det, i motsats till Inframetrics 600, ej försetts med bildbehandlingsenhet. Det är emellertid fullt möjligt att t ex digitalisera termogrammen i efterhand inför vidare bildbehandling. Kalibrering av informationen mot referensdata är naturligtvis ett krav vid kvantifierande ansatser.

Mobila mätningar av lufttemperaturen i olika nivåer, utförda samtidigt med termograferingarna, kan ge värdefull information om hur vissa av de registrerade termiska ytmönstren uppkommit. Exempelvis är det möjligt att urskilja kallzoner som uppkommit genom grunda kallluftflöden.

## 5.2 Infrarödtermografering över ett bärodlingsområde

I östra delarna av Skåne finns inte bara omfattande fruktodlingar utan även bärodlingar av ansevärd areal. Områdets brutna topografi erbjuder goda odlingsförutsättningar på solexponerade sluttningar, medan dalgångar och andra låglänta partier kan utgöra riskzoner med kallluftansamling.

Strålningsfrost är särskilt beryktad i bärodlingssammanhang. Vid utstrålningssituationer, dvs vindsvaga och molnfria nätter, utbildas snabbt inversioner över den kalla markytan. Detta gör att lågväxande vegetation ofta utsätts för kritiska lågtemperaturer även då temperaturbetingelserna inom högre luftskikt är förhållandevis moderata. Under blomningstiden, som i södra Sverige infaller i

slutet av maj, är bärodlingarna särskilt känsliga för frost. Även relativt korta temperaturfall under fryspunkten kan då ge bestående skador med kartfall och försämrad skörd som följd.

Sedan 1983 har mikroklimatologiska undersökningar avseende frost och frostskydd utförts i en odling av svarta vinbär i Brösarp i sydöstra Skåne. Syftet med dessa undersökningar har varit att dokumentera kritiska lågtemperaturer inom enskilda bestånd. Intresset har bl.a. fokuserats på problematiken kring temperaturdifferenser mellan vegetation och omgivande luftrum. En viktig del i undersökningarna var även studier av den effekt som bevattning i frostskyddande syfte har på temperaturklimatet.

Flygbaserad infrarödtermografi bedömdes kunna vara ett viktigt hjälpmedel i studier av detta slag. Exempelvis skulle termiska skillnader av mera lokal karaktär, avspeglade kallluftens utbredning, kunna detekteras, vilket kunde tänkas få betydelse vid rådgivning och planering av odlingars lokalisering. Riskområden skulle härvid kunna undvikas. Med infrarödtermografi borde också värdefull information kunna erhållas om växtdelarnas yttemperaturer för vidare studier av dessas samband med temperaturen i det omgivande luftrummet.

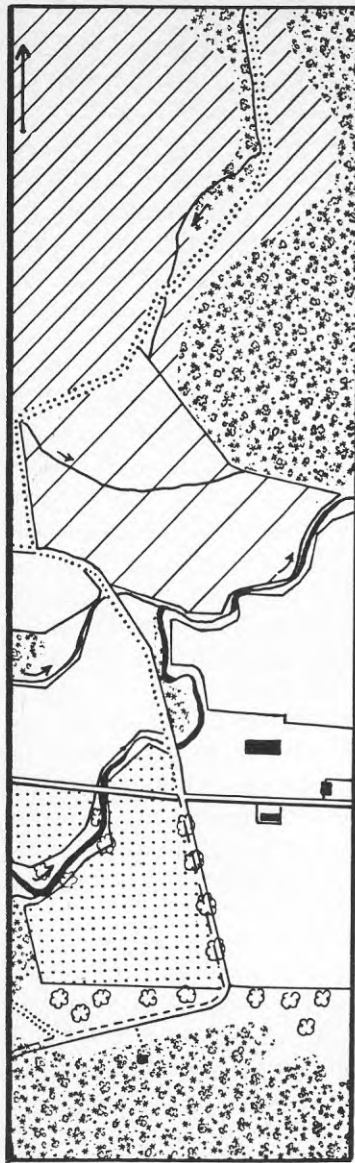
För att närmare undersöka IR-teknikens möjligheter utfördes helikopter-baserad infrarödtermografering av svarta vinbärsodlingen i Brösarp. Termograferingen kombinerades med konventionella temperaturregistreringar i odlingen.

Försöksodlingen är belägen 25 m ö.h. inom ett parti av Verkaåns dalgång strax väster om Brösarps samhälle (fig. 5:7). Den ca 1 km breda dalgången, som löper i öst-västlig riktning, begränsas i norr av Brösarps norra backar med sin unika grässtappsvegetation och i söder av ett barrskogsklätt höjdparti. Nivåskillnaden från dalgångens botten till höjdpartiernas övre delar är 50-75 meter. Inom det förra området, som präglas av öppen jordbruksmark, är nivåskillnaderna ringa. Dalgången är säte för lokal kallluftsansamling, vilket gör försöksodlingen särskilt frostutsatt.

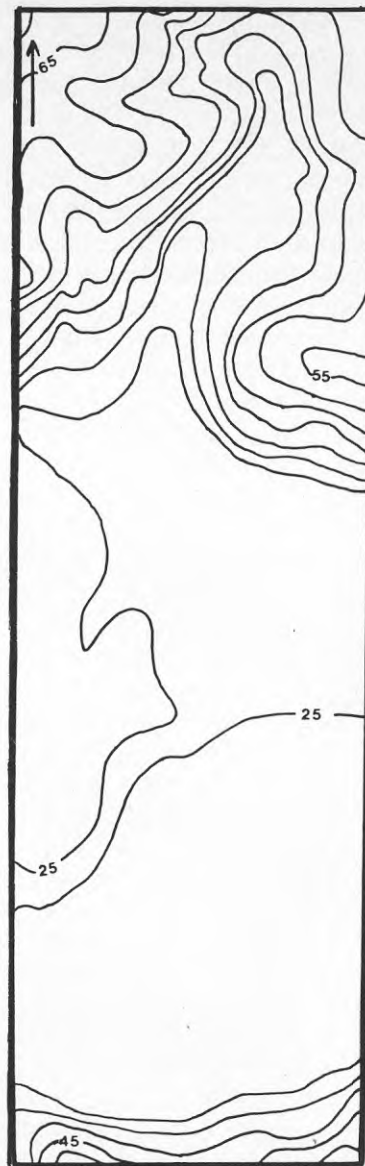
Området termograferades vid två tillfällen med utstrålningsväder, 22 maj 1986 med Inframetrics 600 och 27 maj 1987 med systemet FLIR 2000G. Termograferingen med Inframetrics 600 uppvisade tyvärr vissa bristfälligheter, främst vad gäller den termiska och geometriska upplösningen. Av denna anledning kommer i det följande endast registreringen från den 27 maj 1987 med systemet FLIR 2000G att redovisas. Termograferingen utfördes på två flyghöjder. För att täcka in dalgången i N-S-riktning och detektera det lokala termiska mönstret i densamma, gjordes flygstråk på ca 1000 m (se värmebildsmontaget i fig. 5:9). Dessutom gjordes några registreringar på låg flyghöjd (ca 300 m). Exempel redovisas i värmebildsmontagen i fig. 5:10 och 5:11. Under termograferingstillfället kl. 01.05 - 01.22 den 27 maj 1987 rådde vindstilla och molnfritt väder i undersökningsområdet. Lätta cirrusmoln (2/8) kunde dock noteras i norr.

Figur 5:8 redovisar temperaturregistreringar i odlingen under termograferingstillfället. Registreringarna gjordes med fina termoelement och utgör enminutsmedelvärden. Heldragen linje visar registreringen från ett termoelement fäst vid bladytan på en bärbuskes toppgren. Den streckade linjen anger lufttemperaturen 20 cm över den obevuxna markytan mellan buskraderna. Mätningarna utfördes i/vid en ytterbuske i odlingens södra del. Av diagrammet framgår att buskarnas bladytetemperatur, som pendlar mellan +1.7°C och +2.7°C, ligger ca 1°C högre än temperaturen i det marknära luftskiktet. Temperaturintervallet för detta skikt är +1.0°C till +2.3°C. Kontrollmätningar i gräsvegetationen i omedelbar närhet av ytterbuskarna gav värden på ca +1.3°C, medan omgivande stenmur visade värden på mellan +7°C och +8°C.

I fig. 5:9 presenteras ett montage av värmebilder registrerade över försöksområdet med FLIR 2000G. Registreringen gjordes från ca 1000 m höjd

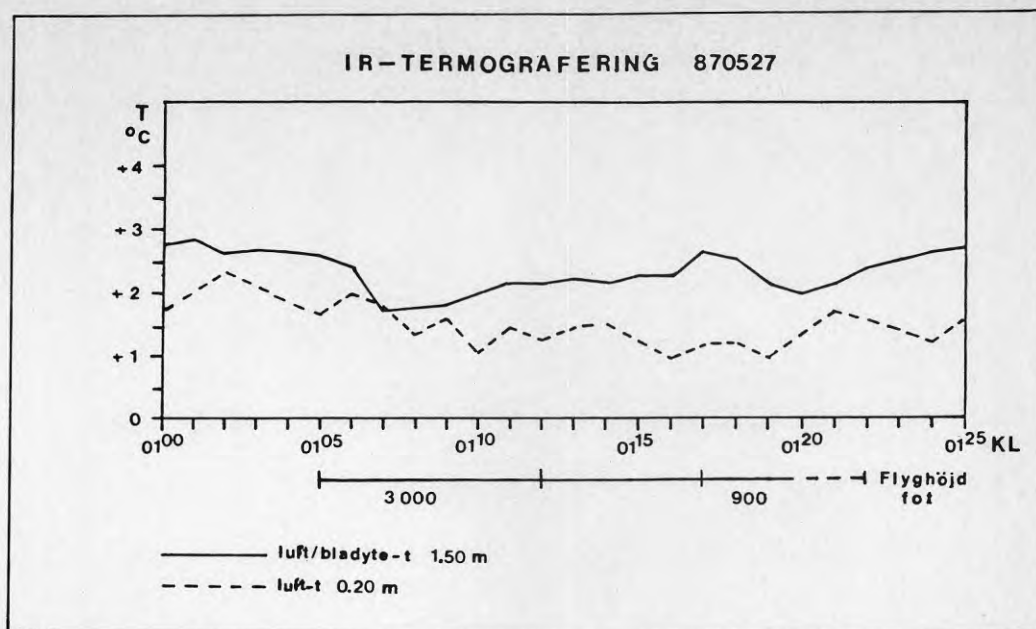


-  BÄRODLING
-  ÅKER
-  BETESMARK
-  HED
-  SKOG
-  ENSTAKA TRÄD



0 100 200 300 M

Figur 5:7. Försöksområdet vid Verkaåns dalgång, Brösarp. Till vänster karta över mark användning, till höger karta över områdets topografi.



Figur 5:8. Temperaturregistreringar i vinbärsodlingen under termograferingstillfället i maj 1987.

och visar ett N-S stråk av Verkaåns dalgång. Försöksodlingen ses i bildens nedre (södra) hälft, jfr fig. 5:7. Genom odlingen flyter Verkaån, vars ringlande förlopp tydligt avtecknar sig i värmebilden. Även vägar och stigar urskiljs lätt som ljusare (varma) strukturer i bilden.

Vid en närmare granskning av registreringen från söder mot norr framträder ett intressant och väl differentierat termiskt mönster i denna. I söder avtecknar sig det skogsklädda höjdområdet som ett välavgränsat ljust parti. Den högstammiga, täta vegetationen når här upp i varmare luftskikt, men torde också uppfattas som relativt varm på grund av strålningsutbytet mellan vissa av växtytorna. Även enskilda träd mellan höjddpartiet och bärodlingen framträder tydligt som ljusa, varma strukturer mot den betydligt mörkare, kalla gräsbevuxna markytan.

Dalgångens låglänta partier innefattande vinbärsodlingen samt åker- och betesmark tecknas i termogrammet som mörka, kalla ytor i varierande gråskala. Variationen beror här huvudsakligen på den skiftande vegetationen. Så kan exempelvis odlingens buskrader särskiljas från mellanliggande mark. Man kan även här notera skillnader i gråton mellan tätare och glesare rader. Åkermark med relativt tät, halvhög gröda uppvisar högre temperaturer än betesmarken norr om bärodlingen. Betesmarkens mörka gråton skulle också kunna förklaras som det termiska "avtrycket" av en kallluftstagnation i dalbotten. Den mörkt svärtade ravinen borde här kunna fungera som ledlinje för ett kallluftflöde från höjdplatåerna i norr. Brösarps norra backar med sin hedvegetation skapar gynnsamma förutsättningar för kallluftproduktion. Området ser dock ganska ljust ut i värmebilden. Den relativt ljusa gråtonen skulle möjligen kunna förklaras som en kombinerad effekt av ställvis högre, tätare vegetation och av att kallluften "försvinner" från produktionsområdet i sin rörelse ner utefter sluttningen.

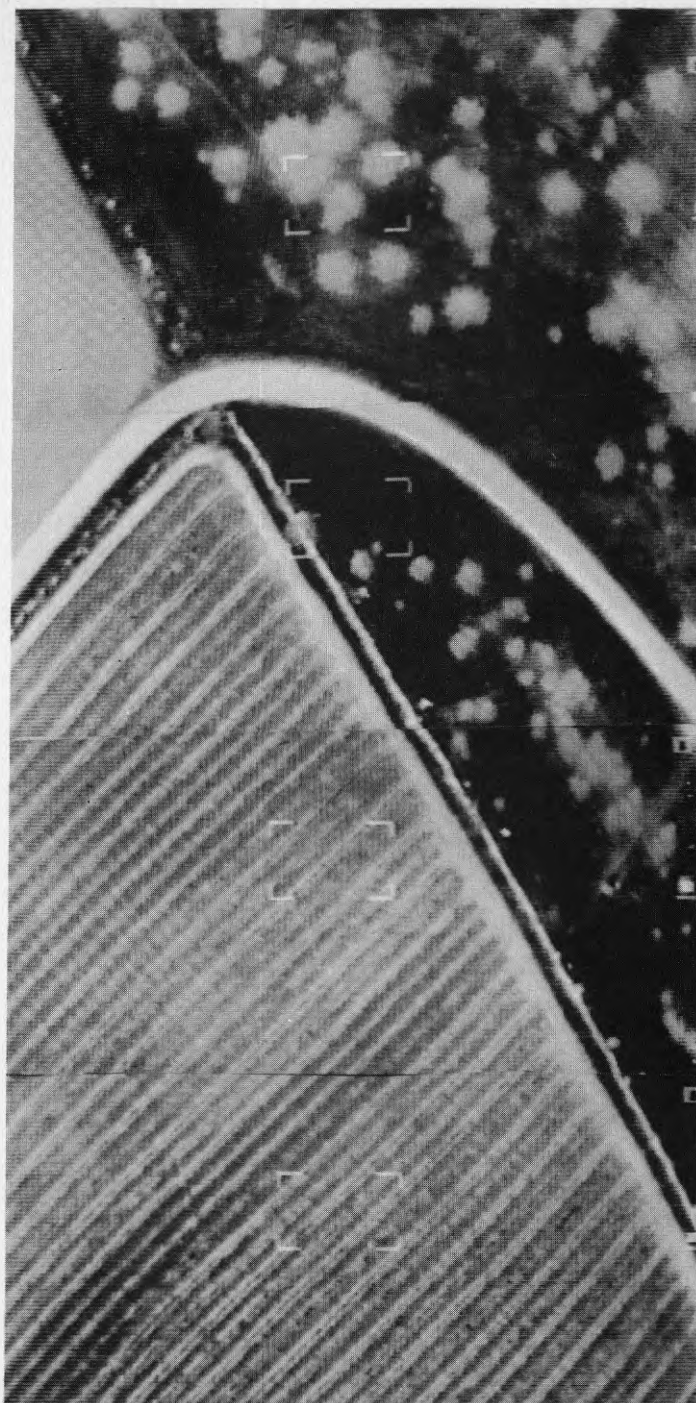
En trolig indikation på kallluftens rörelse nedströms sluttningen ses i värmebildens övre vänstra del. Stigen längs ravinen kantas här på västra sidan av en skogsridå, vilken tydligt avtecknar sig som en ljus struktur i värmebilden. Denna skogsridå borde kunna dämna upp ett eventuellt kallluftflöde från ovanliggande höjdområde. Man kan också i bilden tydligt följa en mörk bård, som kan



*Figur 5:9. Montage av värmebilder registrerade med FLIR-systemet över försöksområdet vid Verkaåns dalgång. Ljusa ytor i registreringen är varma.*



z



Figur 5:10. Montage av värmebilder registrerade med FLIR-systemet över vinbärsodlingens sydöstra delar. Ljusa ytor i registreringen är varma.

vara ett spår av uppdämd kallluft mellan sluttning och skogsridå.

Fig. 5:10 är ett montage av värmebilder registrerade från låg höjd (ca 300 m) och visar de sydöstra delarna av bärodlingen. De ljusa, varmare buskraderna kan lätt identifieras. Man kan här studera skillnader i bladverkets struktur och täthet mellan olika buskrader. Mellanliggande mark uppvisar variationer i gråton, väsentligen en följd av skiftande mängd ogräs. Det mörkare stråket i mitten av odlingen på bilden visar en kombinerad effekt av buskrader med glest bladverk och rikligt gräsbevuxen mellanliggande mark. Odlingen kantas av en markväg vars ljusa gråton väl kontrasterar mot det mörka, kalla gräset (+1.3°C). En stenmur omgärdar odlingen och ses i termogrammet som ett ljus band, särskilt tydligt på sydsidan. Temperaturen på stenmuren uppmättes till +7° – +8°C. För övrigt noteras i bilden den ljusa vägbanan samt den termiska kontrasten mellan enskilda träd och den gräsbevuxna markytan.

Fig. 5:11 slutligen visar en registrering från låg höjd över ett avsnitt av Verkaåns förlopp genom bärodlingen. Många intressanta termiska strukturer kan här studeras. Det ljusa bandet i mitten av åfåran återger dennas relativt varma vatten (+10° – +12°C). Dess ringlande och diffusa förlopp i bilden orsakas av avskärmningseffekter från krontaket hos de trädriddåer som på båda sidor kantar ån. Inom trädfria delar av åfåran ses den gräsbevuxna markytan i mörk gråton. Mellan ån och vinbärsodlingens buskrader slutligen urskiljs på båda sidorna om åfåran ljusa band som indikerar relativt varma markvägar.

Den helikopterbaserade infrarödtermograferingen med systemet FLIR 2000G i maj 1987 visade klart, att denna teknik skulle kunna vara användbar i fortsatta tillämpade klimatstudier av detta slag.

Termografering från relativt hög höjd kan ge betydelsefull information och god översikt av ett områdes termiska ytmönster i lokal skala. Detta kan vara av intresse vid tolkning och bedömning av lokalklimat i samband med nyanläggning av odlingar och val av gröda. Under gynnsamma väderförhållanden kan sålunda vissa riskområden, t.ex. välutvecklade kallluftflöden och kallluftsjöar, identifieras genom sina termiska "avtryck".

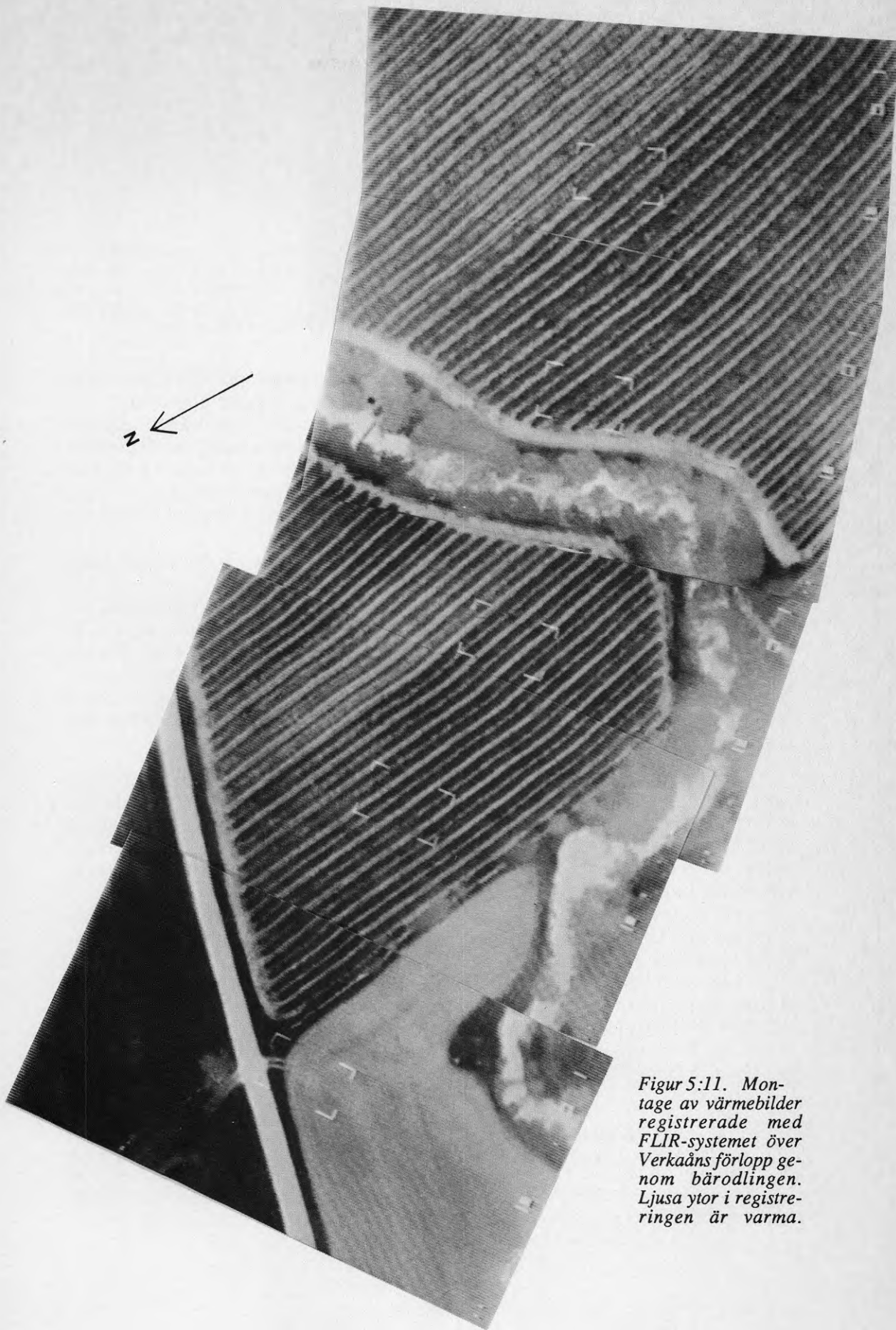
Termografering från låg höjd, i aktuellt fall ca 300 m, kan ge intressant termisk detaljinformation. Är ambitionen att detektera mycket småskaliga termiska mönster i vegetationen, t ex hos enskilda buskar, krävs dock med FLIR-systemets geometriska upplösning om möjligt än lägre flyghöjder eller en övergång till mera högupplösande registreringssystem. Markbaserad infrarödtermografi torde dock i detta senare fall ännu vara att föredra.

### 5.3 Studier av läeffekter och vindstriering m.m.

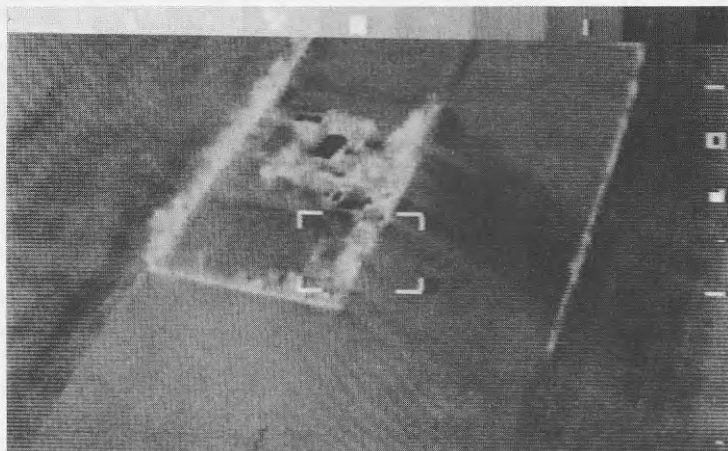
I flygregistrerade termogram förekommer ofta vindalstrade termiska effekter. Vid klart men ej helt lugnt väder på natten motverkas avkylningen av den oskyddade markytan av en kraftig värmetransport mot denna från luften. I lä av olika hinder såsom häckar, buskage och byggnader kompenseras emellertid strålningsavkylningen i mindre omfattning, vilket resulterar i att en relativt kall läeffekt bildas bakom hindret. (Fig. 5:12 ) Där vinden förstärks, t ex vid sidorna av hindret eller i anslutning till luckor i detta, kan å andra sidan uppkomma varma vindeffekter i de nattregistrerade termogrammen.

Också varma läeffekter kan förekomma bakom hinder. Särskilt framträdande kan dessa effekter vara på dagen efter regn, då den fuktiga markytan genom vindförstärkt avdunstning i oskyddade lägen kyls av kraftigare än i lä.

Läeffekter i termogram skulle möjligen kunna utnyttjas för bedömning av olika hinders skyddsverkan inom större landskapsområden. Dessa frågor är för



*Figur 5:11. Montage av värmebilder registrerade med FLIR-systemet över Verkaåns förlopp genom bärodlingen. Ljusa ytor i registreringen är varma.*



*Figur 5:12. Mörk (kall) läeffekt med ljusa (varma) vindstrimmor bakom vegetationsridå. Natlig registrering med FLIR-system.*

närvarande mycket aktuella i det sydsvenska odlingslandskapet, där vindproblemen synes ha ökat under senare år genom landskapets allt större öppenhet.

Också över den oskyddade markytan kan vinden åstadkomma termiska effekter, s.k. vindstriering. Dessa är uttryck för de temporära hastighetsskillnader som normalt förekommer hos vinden (byighet). I nattregistrerade termogram markerar mörka (kalla) stråk vanligen vindelement med lägre hastigheter och ljusa (varma) stråk vindelement med större hastigheter. Vindens struktur kan därför i någon mån studeras med infrarödtermografi.

För närmare beskrivning av läeffekter i termogram och andra vinalstrade effekter hänvisas till bl.a. Mattsson (1967, 1968 och 1969).

En av fördelarna med FLIR-systemet är att det erbjuder möjlighet till växling av termograferingsriktning. Detta kan utnyttjas vid t ex studier av snabba termiska förlopp i de ytor som överflygs. Termiska effekter kan sålunda kvarhållas och detaljstuderas under kortare perioder. Dessutom medger videotekniken att förloppen kan studeras med extremt hög tidsupplösning (fig 5:13 och 5:14). Härtill kommer att helikopter som plattform också medger studier av termiska förlopp över längre tidsperioder för en given lokal.

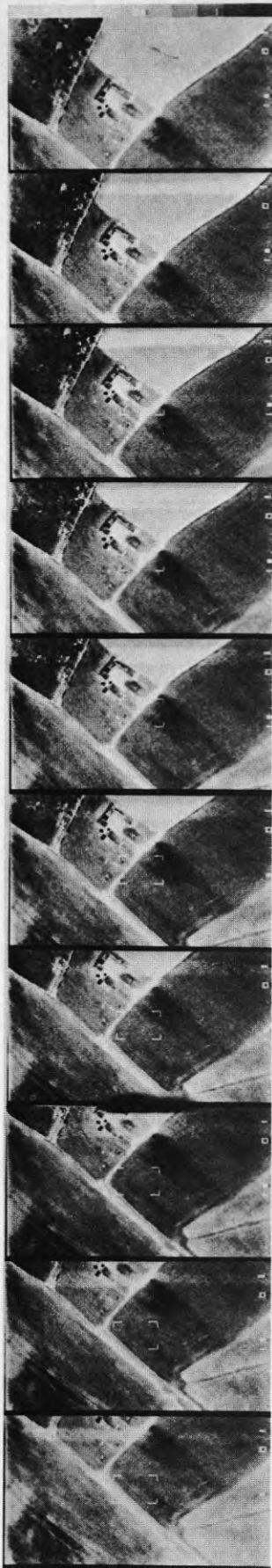
Under termograferingen noterades diverse speciella effekter, av vilka några skall här kortfattat kommenteras. Den termiska strålningen från en vattenyta mot ett registrerande instrument som befinner sig rakt över ytan har till största delen emitterats från denna. Om ytan emellertid termograferas från riktningar som allt mera avviker från lodlinjen, registreras en ökande andel reflekterad värmestrålning – ytan uppträder som en allt blankare spegel.

En vacker illustration till detta gavs under en nattlig anflygning med FLIR-systemet mot Gripsholms slott. Från vissa positioner framträdde en tydlig spegelbild i vattenytan av ett av slottstornen.

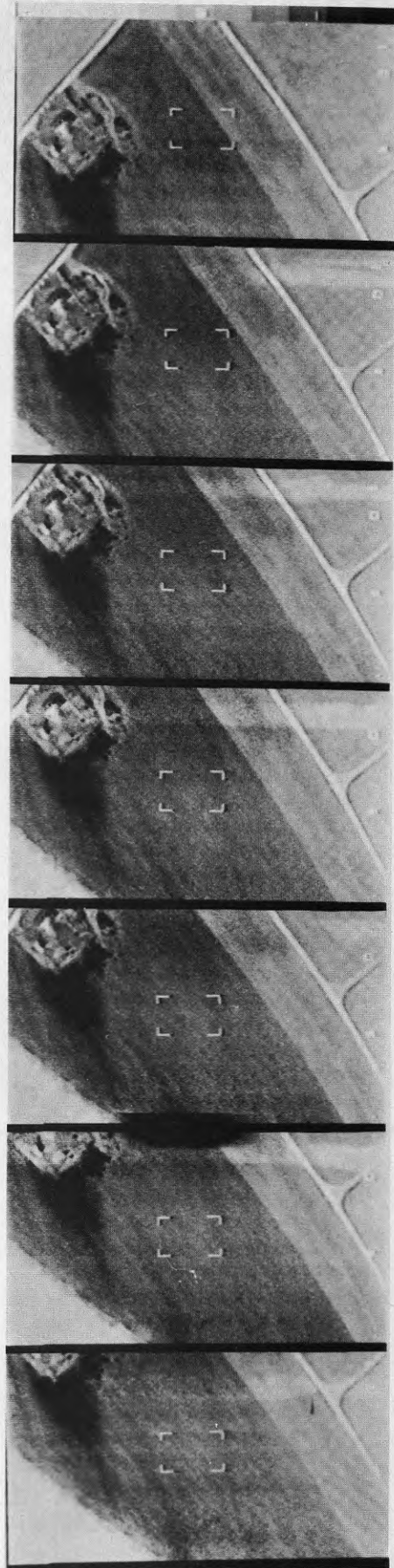
Fig. 5:15 visar, hur spegelbilden under anflygningen alltmera mattas, då termograferingsriktningen fjärras sig från "glansvinkeln". Figuren demonstrerar också FLIR-systemets möjligheter till "forward looking".

Fig. 5:16 slutligen är ett par nattregistrerade termogram med betande hjortar. Överhuvudtaget framträder varmblodiga djur tydligt i de helikopterregistre-

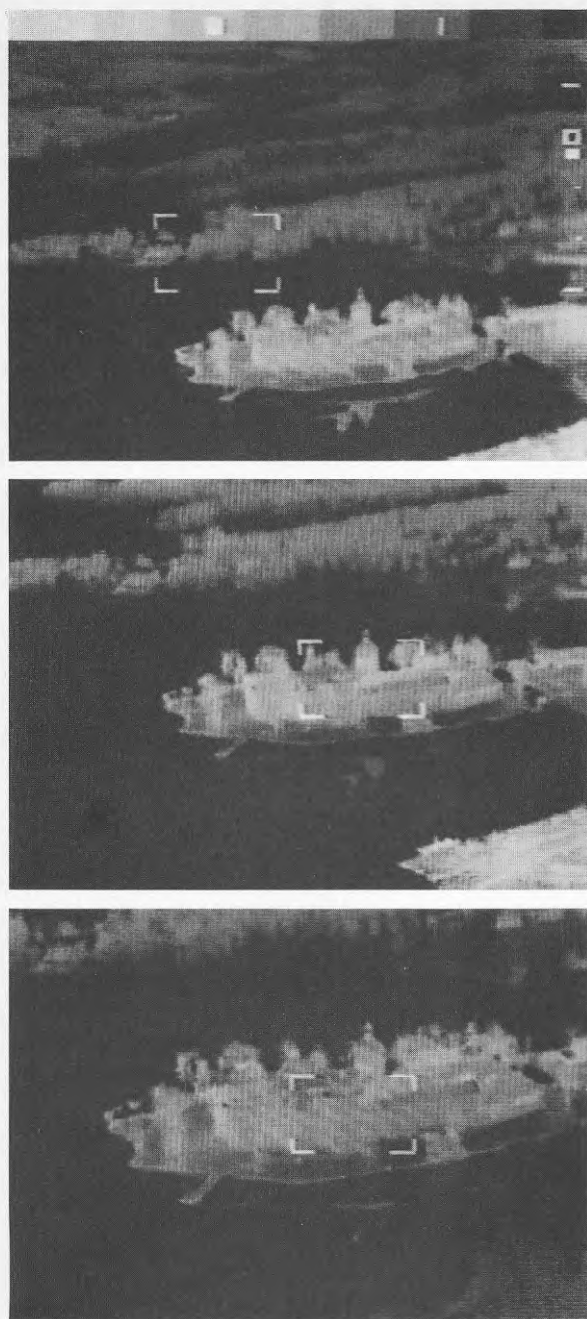
*Figur 5:13 - 5:14. FLIR-tekniken möjliggör studier av snabba termiska förändringar i överflygna ytor. I figurexemplen, nattregistrering (1987-05-26), framträder kalla läeffekter intill gårdar i östra Skåne. Delbilderna registrerades med 0,2 s intervall. För vidare studium av eventuellt förekommande förändringar krävs emellertid ytterligare bildbehandling.*



Figur 5:13.



Figur 5:14.



Figur 5:15. En illustration till vattenytors ökande förmåga att reflektera värmestrålning vid växande infallsvinklar. Natliga FLIR-registreringar av Gripsholms slott.

ta påverkar direkt nettostrålningen, vars energi till största delen härrör från magasinerad värme, och påverkar därigenom också markens temperatur.

I värmebilder av ett stråk genom Malmö, registrerade från en höjd av 700 m med lantmäteriverkets flygplansburna termiska svepradiometer, Daedalus, modell DS 1210 \* (8 - 14  $\mu\text{m}$ ) under vinternätter 1983 och 1984, framgår bl.a. tydligt,

\* Den långvågiga strålningen mäts inom en vinkel av  $0,15^\circ$  (2,5 mrad), motsvarande en geometrisk upplösning av 2,5 m vid 1000 m avstånd. Totala svepvinkeln under flygplanet är  $77^\circ$ . På 1000 m flyghöjd täcks en stråkbredd av ca 1600 m. Temperaturkänsligheten uppges vara  $0,2^\circ\text{C}$ .

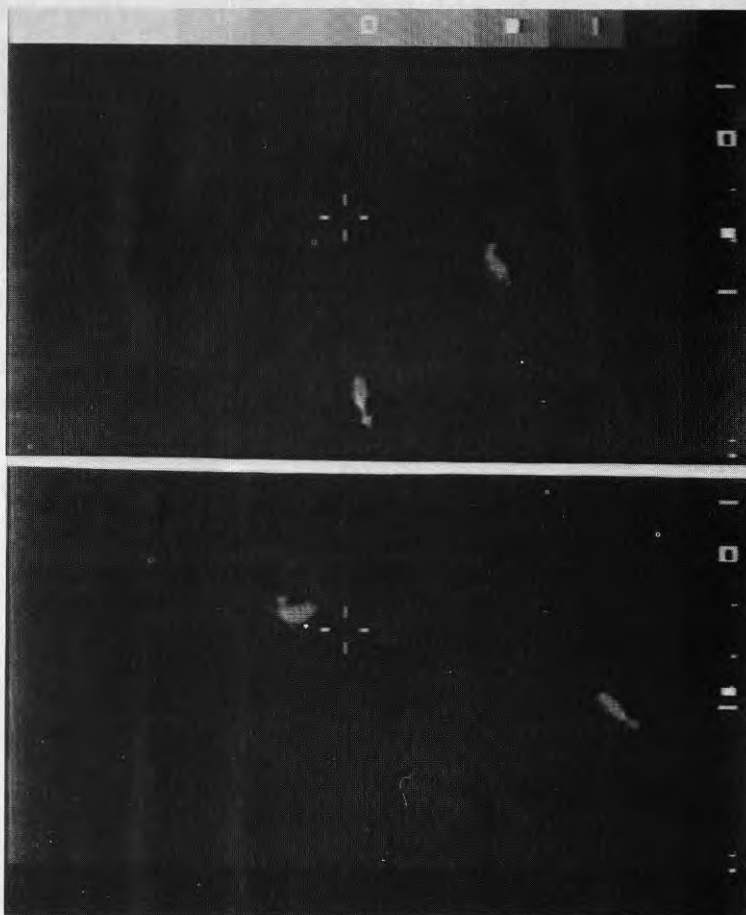
rade FLIR-upptagningarna. Vid något tillfälle var det exempelvis möjligt att med utrustningen följa en hares rörelser på marken. Tekniken borde möjliggöra vissa slag av viltinventering.

#### 5.4 Infrarödtermografering över stadsområden

Infrarödtermografiska studier av stadslandskap har tidigare utförts av några av författarna till denna rapport. Sålunda kunde bl.a. Mattsson et al. (1986) visa, att stadslandskapets detaljer, bl.a. dess gatugeometri, har ett komplext inflytande på den urbana atmosfären och på gatornas ytemperatur.

Genom minskad vindhastighet och turbulens i stadslandskapets "kanjoner" (gator etc.) reduceras förlusterna av sensibelt och latent värme. Infångad kortvågsstrålning i "gatukanjonerna" ökar energiabsorptionen. Byggnadernas bortskymmande av den kalla natt-himlen minskar värme-strålningens förlusterna av energi.

Den senare faktorn är troligen den mest betydelsefulla av de geometriska effekterna i fråga om försening av markens avkylning under klara, lugna kvällar och nätter. Motstrålningen från skymmande objekt såsom byggnader och träd är då normalt mycket kraftigare än från motsvarande fri himmel. Det-



*Figur 5:16. Nattregistrerade FLIR-bilder av betande hjortar.*

att stadsgatornas termiska mönster var kraftigt påverkat av gatukanjonernas geometri. De delar av gatorna som hade en reducerad himmelsavskärmning, t ex gatukorsningarna, var sålunda påtagligt kallare än de trängre gatukanjonerna mellan gatukorsningarna.

För att prova några av de helikopterburna värmekamerasystemen i stadsmiljö bedömdes det lämpligt att göra upptagningar med dessa vid betingelser som var likartade dem som präglade termograferingen från flygplan (tabell 5:2). Registreringarna gjordes sålunda över samma delar av Malmö och vid klart väder på förnatten. Av intresse var att undersöka hur väl termiska detaljer i staden, bl.a. gatornas termiska finstruktur, kunde fångas med de olika systemen. Också andra jämförelser gjordes med det flygplansregistrerade materialet.

En första jämförelse mellan det flygplansregistrerade materialet och helikopterregistreringarna visar, att stråkbredden är avsevärt mindre hos de senare. Delvis beror detta på den lägre helikopterflyghöjden, delvis på de registrerande systemens egenskaper.

En reducerad stråkbredd kan vara på gott och ont. Den kan sålunda innebära en ökad geometrisk upplösning i bilderna men på bekostnad av översiktligheten. Som framgår av tabellen var den geometriska upplösningen hos FLIR-systemet (med optik med  $28^\circ$  horisontell bildvinkel) 1,4 mrad, vilket är klart överlägset motsvarande upplösning hos de övriga systemen. Den termiska upplösningen kan för samtliga system anses acceptabel för klimatstudier i stadsmiljö.

Samtidigt med termograferingarna gjordes ett antal referensmätningar av temperaturen i några punkter i aktuella registreringsstråk. Sådana mätningar är

Tabell 5:2. Infrarödtermograferingar över Malmö

Instrument	Geometrisk upp- lösning (mrad)	Termisk upp- lösning (°C)	Plattform
Svepradiometer: <i>Daedalus DS 1210</i>	2.5	0.2	flygplan
<i>Daedalus DS 1210</i>	2.5	0.2	flygplan
Värmekamera: <i>AGEMA 782 LWB</i>	3.4	0.1	helikopter
<i>FLIR 2000G</i>	1.4	0.2	helikopter

Instrument	Tidpunkt	Flyghöjd (m)	Väder	Stråk- bredd (m)	Temperatur- område (°C)
Svepradiometer: <i>Daedalus DS 1210</i>	830216.2100h	700	0/8, svag NE vind	1000	-2 - -10
<i>Daedalus DS 1210</i>	840308.2100h	700	1/8 Sc, nästan lugnt	1000	+3 - - 6
Värmekamera: <i>AGEMA 782 LWB</i>	861112.2330h	600	0/8, svag W vind	300	jfr. tab. 5:3
<i>FLIR 2000G</i>	870429.2300h	600	0/8, måttl. E vind	320	jfr. tab. 5:3

nödvändiga för en mera ingående analys (ej redovisad i denna rapport) av det registrerade materialet. Några av referensdata presenteras i tabell 5:3.

Några bildexempel skall belysa kvaliteten hos registreringar gjorda med de olika systemen. Så tydliga fotografiska kopior som möjligt har tagits fram för denna analys. Samtliga bildkopior från de helikopterburna systemen har för att möjliggöra jämförelser framställts med ett och samma videoprintsystem.

Fig. 5:17 visar några upptagningar av området kring rondellen vid Ystadvägen/Ringvägen. I figuren har medtagits bildmaterial från flygplansregistreringarna med svepradiometer och från helikopterregistreringarna med värmekamera - AGEMA 782 LWB respektive FLIR 2000G.

Som framgår av figuren är den AGEMA-registrerade bilden förhållandevis fattig på detaljer. Ringvägens vägbanor kan nätt och jämt separeras liksom träden

Tabell 5:3. Referensdata rörande temperatur, °C, vid helikopterburna termograferingar över Malmö

	1986-11-12		1987-04-29	
	yta	luft, 2 m	yta	luft, 2 m
Landbygd (Fredriksberg)				
gräsbevuxet fält	+0,6	+3,3	+ 8,8	+10,9
asfaltbelagd väg	+2,4	+3,4	+13,4	+10,9
Centrala Malmö				
gatukors (Österg./ Mäst.Nilsg.)	+5,4	+7,0	+14,0	+13,4



intill Ystadvägen. Den temperaturhöjande effekten av motstrålningen från de upphöjda delarna av vägsystemet framträder som diffusa, ljusa områden. Enskilda byggnader urskiljts men utan tydliga detaljstrukturer.

FLIR-bilden är mycket detaljrik. Väg- och gatumönster liksom enskilda träd framträder tydligt. Motstrålningseffekter vid rondellen är distinkta. Man noterar vid denna också en "köldskugga" på Ringvägen. Denna "skugga" är troligen en kvarvarande termisk effekt efter verklig beskuggning under eftermiddagens solskenstimmar. Liknande köldskuggor framträder vid några av de mindre träden.

Den flygplansregistrerade svepradiometerbilden har upptagits från något större höjd än de båda föregående bilderna och är därför inte helt jämförbar. Detaljmässigt kan den sägas befinna sig mellan dessa.

En analys av det övriga bildmaterialet visar, att FLIR-registreringarna återgav en mängd detaljer som ej framträdde i AGEMA-bilderna och som också saknades eller framträdde mindre tydligt i svepradiometerbilderna. Några sådana detaljer är effekter i markytan av fjärrvärmeledningar, enskilda bilar på parkeringsplatser och i gator, detaljer på hustak (varma skorstenar) och småbåtar vid brygga.

I bilder från samtliga system kunde urskiljas termiska effekter i de enskilda gatorna av deras "geometri" och en mera lokal- till mesoskalig "ytvärmeöeffekt" (jfr Mattsson et al., 1986). Ytor, särskilt sten- och asfaltbeläggningar, som varit solexponerade under dagen, främst eftermiddagstimmarna, är påtagligt varma. Kalla skuggzoner förekommer också.

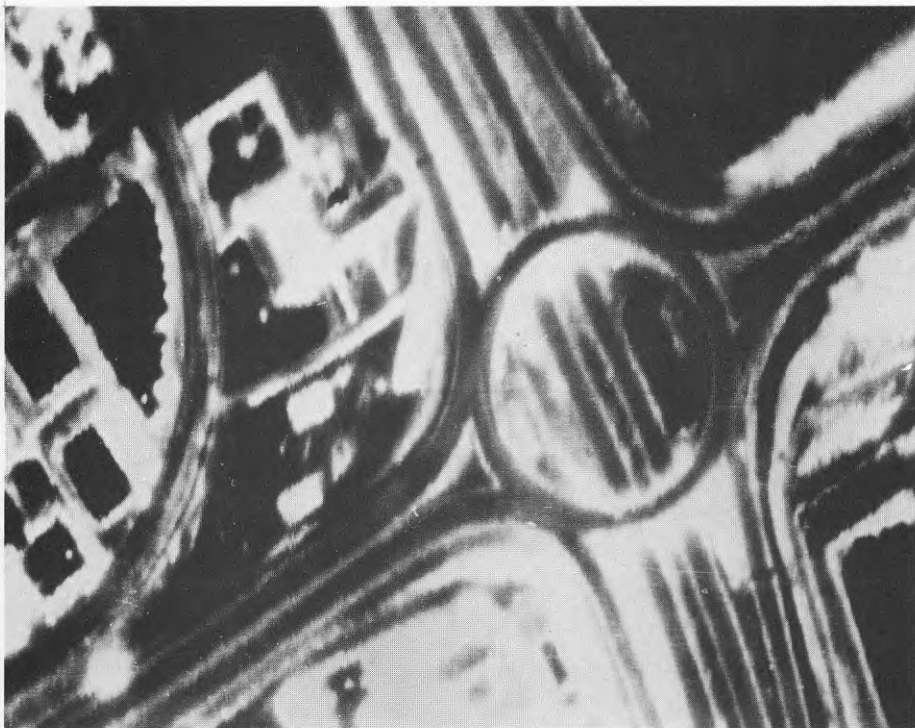
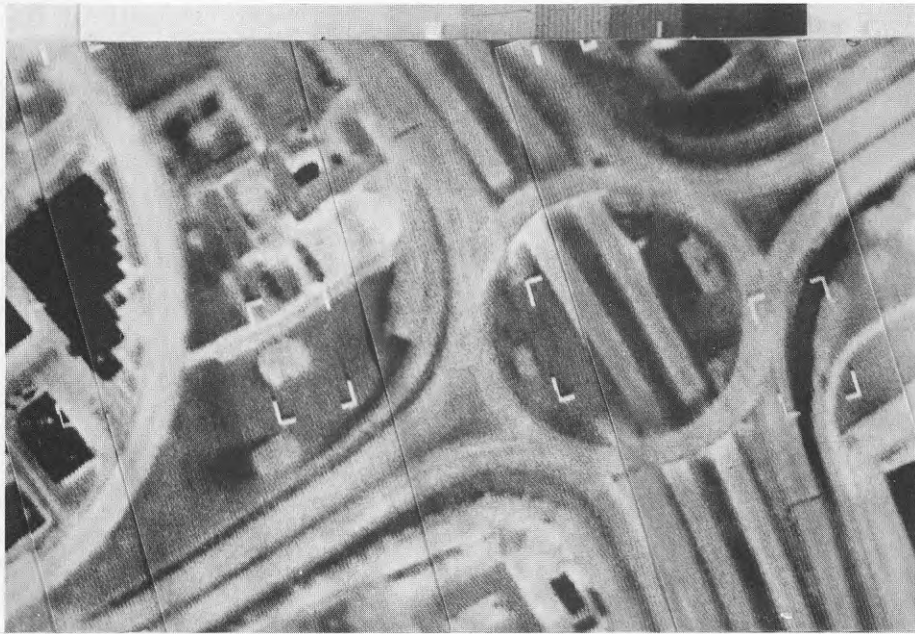
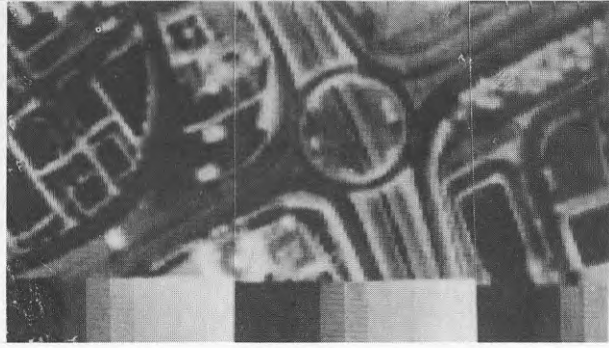
Fig. 5:18 är exempel på en FLIR-registrering som visar skilda termiska detaljer i stadslandskapet. På de kalla (mörka) hustaken framträder sålunda talrika varma skorstenar. Den kalla ytan till vänster om bildcentrum är en gräsmatta som legat i skugga under eftermiddagstimmarna. En häck utefter gatan till höger har också givit skugga, som resulterat i en kallzon på häckens högra (öst-) sida. De varma (ljusa) ytorna i bilden är sten- eller asfaltbeläggningar, som samtliga har ett sådant läge, att de sannolikt varit solexponerade under eftermiddagstimmarna. Sådana beläggningar kan magasinera stora värmemängder. Mönstret med bl.a. ovala ytor nedtill i bilden är en gårdsanläggning med varma, tidigare solexponerade sten- och asfaltytor (de förra varmast), något svalare sådana ytor, som troligen ej varit solbelysta under eftermiddagen samt kalla gräsmattor (avdunstningsavkylning och ringa värmeförråd). I bilden framträder också en varm fjärrvärmeledning, som övertvårar en av gatorna. Talrika parkerade bilar framträder i dessa.

En illustration till solexponeringens betydelse för det nattliga temperaturmönstret kring en byggnad ges av fig. 5:19. Den U-formade strukturen nederst till höger i bilden är en skolbyggnad. Den omges av en asfaltbelagd skolgård (P-plats) med ett starkt framträdande termiskt mönster. Asfaltytor väster om byggnaden har varit solexponerade senast och är därför varmest. Men också ytor på byggnadens sydsida, vilka varit solbelysta mitt på dagen, har en något förhöjd temperatur, vilket vittnar om asfaltbelägningens stora termiska tröghet. På byggnadens, under dagen skuggade nordsida är asfaltytan sval.

I trånga, under dagen beskuggade gator saknas det solexponeringsbetingade termiska mönstret. I bilden framträder tydligt det varma spåret av en fjärrvärmeledning.

Ytterligare en illustration till FLIR-systemets goda detaljåtergivande ges slutligen av fig. 5:20, som visar en upptagning över Stortorget och angränsande stadsområden. Figuren innehåller också en svepradiometerbild av samma område.

I den detaljrika FLIR-bilden framträder exempelvis de enskilda bilarna på

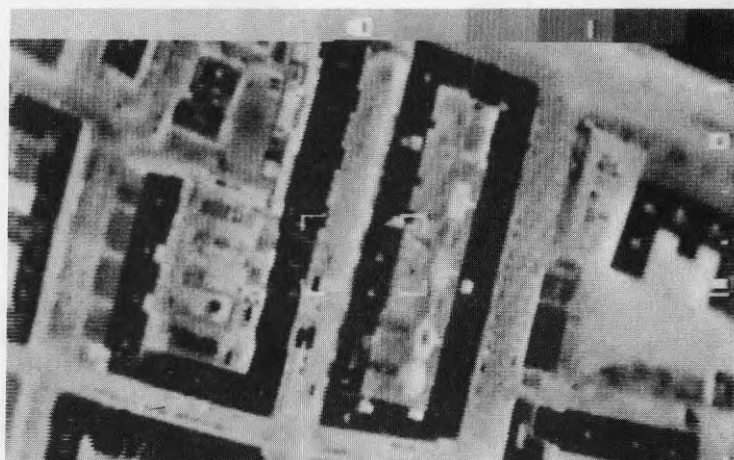


*Figur 5:17.*

*Figur 5:18. FLIR-registrering av stadsområde mellan Sorgenfriskolan oc Karlskronaplan i Malmö.*



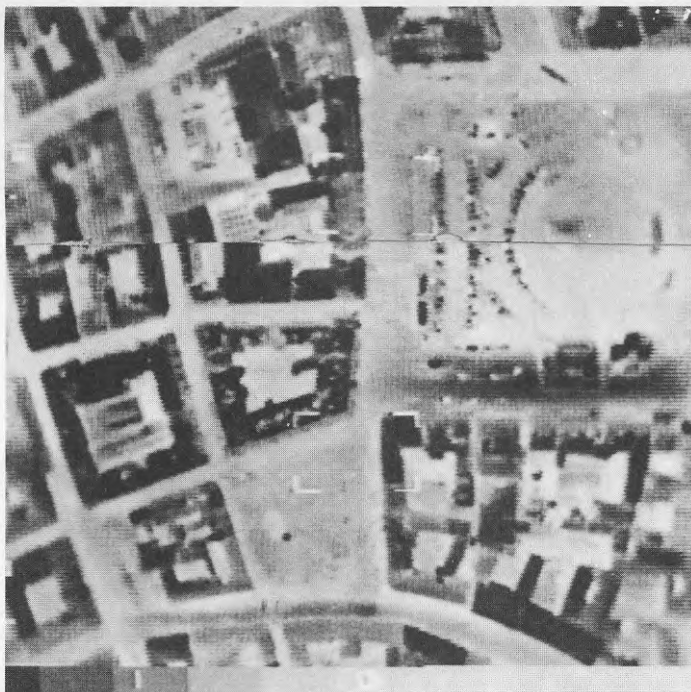
*Figur 5:19. FLIR-registrering av stadsområde vid Föreningsgatan/Disponentgatan i Malmö.*



torgets parkeringsplats. Man kan t.o.m. urskilja vilka bilar som nyligen ställts upp genom deras förhöjda motor- och kylartemperatur. Man noterar vidare att torgets temperatur är lägst i dess södra del, medan torgets nordsida är relativt varm. Denna temperaturfördelning är troligen orsakad av skillnader i solexponering under eftermiddagstimmarna. Särskilt tidigare solbelysta stenläggningar på torget har höga temperaturer. De varma, kringbyggda gårdarna i bebyggelsen kring torget är också framträdande. Trånga gator och fasadnära ytor i övrigt har genom motstrålning och tidigare solexponering förhöjd temperatur. Relativt kraftig vind verkar dock här i någon mån temperaturutjämnande.

Upptagningarna över Malmö har klart visat, att helikopterburen infrarödtermografi kan utnyttjas för studier av såväl termiska detaljstrukturer i stadslandskapet som profiler genom den urbana "ytvärmeön". Den registrerande utrustningen bör självfallet ha god termisk och geometrisk upplösning och helst vara försedd med enklare bildbehandlingskapacitet för utnyttjande i anslutning till registreringstillfället. FLIR-systemet uppfyller det första önskemålet. Dess avsaknad av bildbehandlingsutrustning, såväl i fält som i övrigt, kan i någon mån kompenseras genom att bilderna i efterhand digitaliseras och behandlas.

*Figur 5:17. Värmebilder av området kring rondellen vid Ystadvägen/Ringvägen i Malmö. Överst helikopterregistrering med AGEMA 782 LWB, i mitten helikopterregistrering med FLIR 2000G samt nederst flygplansregistrering med svepradiometer, Daedalus DS 1210 (1983-02-16).*



*Figur 5:20. FLIR-registrering (överst) och svepradiometerregistrering av Stortorget i Malmö samt angränsande stadsområden.*

## 5.5 Tillämpad vägklimatologi

Vid Naturgeografiska institutionen i Göteborg har sedan flera år drivits ett projekt rörande vägklimatologi i anslutning till vägunderhåll och trafiksäkerhet. Projektet har dels innehållit tillämpad klimatforskning, dels utvecklingsarbete vid framtagning av ett vägväderinformationssystem (VVIS).

Erfarenheten visar att det är svårt att med sensorer fastställa vägytans tillstånd. Det gäller vägytans temperatur, men även huruvida ytan är torr, våt, snöig eller isig och mängden restsalt. I detta sammanhang är endast bestämning av vägytans temperatur aktuell.

I halkvarningsstationer används för yttemperaturbestämning givare som placeras i sensorblock och med termiska egenskaper som är så lika omgivande väg som möjligt. Ett annat alternativ är att lägga en liten givare omedelbart under ytan. Självfallet är det svårt att göra en exakt yttemperaturbestämning med denna teknik, men radiometerbestämning av yttemperaturen är ännu inget alternativ i dessa stationer.

Sedan flera år tillbaka har vi använt precisionsradiometrar för yttemperaturbestämning vid bilmätfärder i samband med vägklimatkartering. De har en snabb respons, men det är svårt att kalibrera dem till en exakt yttemperatur, främst på grund av emissivitetsvariationer. Vid vägklimatkartering är en exakt temperaturbestämning dock ej lika viktig som vid mätningar i halkvarningsstationer, eftersom det i förra fallet främst är de relativa differenserna efter vägarna som är av intresse.

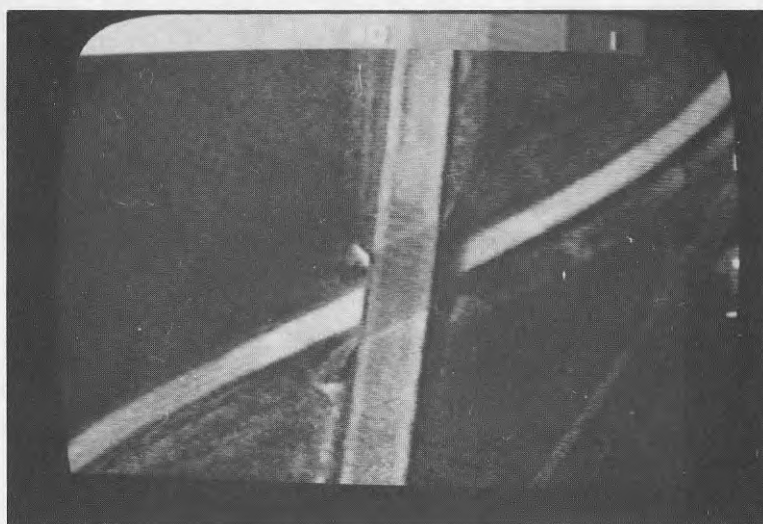
Vägklimatkarteringarna används för närvarande för lokalisering av optimala lägen för stationer i vägväderinformationssystem, men det planeras för att informationen även skall utnyttjas vid halkprognoser för vägsträckor. Vad avser yttemperaturregistreringarna ger dessa även information om halkkänslighet hos olika väguppbyggnad.

Sedan flera år tillbaka har vi provat infrarödtermografering för bestämning av vägytans temperatur. Det gäller för såväl flygburen som markbaserad utrustning (Lindqvist, 1975, 1976, 1987 m.fl.). Yttäckningen har visat sig vara en stor fördel och speciellt viktigt har det varit att kunna analysera andra differenser än lokalklimatologiska som påverkar vägytans temperatur. Här avses i första hand väguppbyggnad, brokonstruktion, trafikintensitet och skuggförhållanden. Nya programvaror för datoriserad bildanalys av termisk information har därvid varit ett viktigt utvecklingssteg.

I anslutning till det övergripande BFR-projektet har under våren 1987 FLIR-registreringar från helikopter företagits för några vägsträckor. Det gäller väg E6 från Landskrona till norr om Hallandsåsen och väg E4 från Nyköping till Kolmården.

Vid analys av registreringarna har använts kopior av videospelningar. Det har varit mycket intressant att på TV-skärm kunna följa variationer i vägytans temperatur efter vägsträckorna. Däremot är det svårt att från detta material göra en vidare analys och att ge en riktig presentation av resultaten. För detta krävs möjligheter till en mer ingående bildanalys.

Ovan angivna förhållanden bör ihågkommas då några exempel presenteras. Värmebilderna är avfotograferade från en TV-skärm. Det första exemplet (fig. 5:21), som är från väg E4, visar hur en speciell byggnadskonstruktion påverkar det termiska mönstret. Motortrafikleden har en bro över en mindre väg och bron får vid denna registrering på kvällen en betydligt lägre yttemperatur än den som råder för övriga delar av vägen. Dock finns ett angränsande mörkare, kallare parti, vilket tyder på att vägen här har en annorlunda uppbyggnad. Hur olika väguppbyggnad och brokonstruktioner påverkar vägytans temperatur är en in-



*Figur 5:21. Värmebild från väg E4 Nyköping - Kolmården med kall brokonstruktion.*

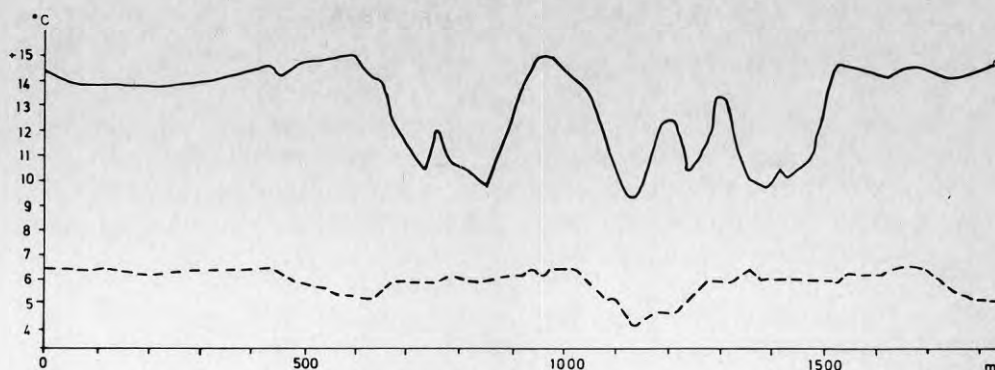
tressant frågeställning som vi också i fortsättningen kommer att arbeta aktivt med.

Det andra exemplet (fig. 5:22) är också från väg E4 mellan Nyköping och Kolmården och där ett speciellt isolerande material kommit till användning vid byggandet av vägen. Det har befarats att vägen skulle kunna vara förhållandevis utsatt för lokal halka. Värmebilden visar tydligt att vägytan vid detta tillfälle på kvällen är betydligt kallare i ett skogsparti med skärning än den är vid den öppna ytan. Detta beror troligen på kvarvarande skuggeffekter från föregående dag, men kan förstärkas av en speciell vägkonstruktion. Inom detta vägvägsnitt har stora differenser i vägytans temperatur kunnat konstateras vid väglimatekartering med mätbil hösten 1986 (fig. 5:23). Vägytans temperatur är orolig och är ner till 5°C lägre i skärningar med skuggzoner än i angränsande vägvägsnitt. Lufttemperaturen påverkas däremot endast i ringa omfattning. Dessa förhållanden leder till ökad halkrisk, och eftersom halkan uppträder fläckvis, och ofta oväntat, är olycksriskerna stora.

De kalla partierna på vägytan kan ha en mycket begränsad omfattning, vilket visas i figur 5:24 som är från väg E6 vid Hallandsåsen. Det framgår tydligt att effekten är olika stor på motorvägshalvorna och att ytemperaturen även lokalt



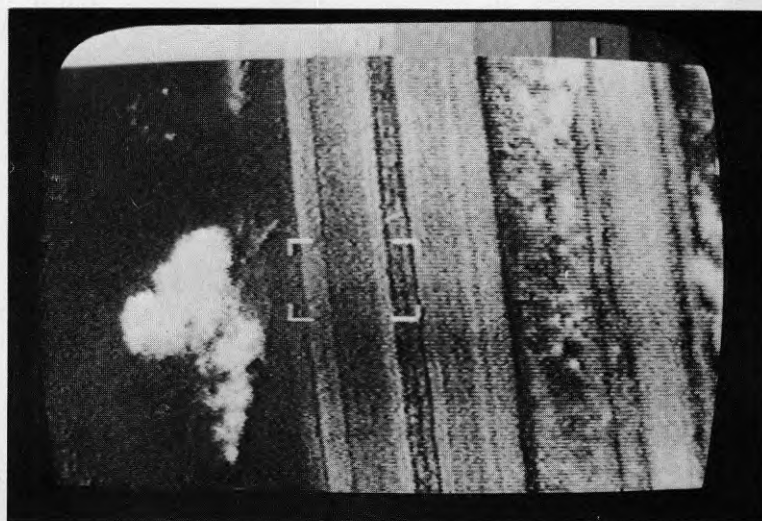
*Figur 5:22. Värmebild från väg E4 Nyköping - Kolmården som visar övergång mellan varm och kall vägbana vid gräns mellan öppen mark och skärning med skog.*



Figur 5:23. Registrering från bilmätfärd vid delvis samma vägvsnitt som visas i figur 5:22. Heldragen linje markerar vägytans temperatur, streckad linje lufttemperaturen på 0,3 m.

är något lägre på den gamla vägsträckningen till vänster i bilden.

Registreringar från helikopter med FLIR-utrustning har beställts för en sammanlagd vägsträcka av 30 mil. Dessutom kommer detaljerade studier av vissa avsnitt att ske med termovisionsutrustning och utvärdering i bildanalysator. Efter denna större försöksserie skall det kunna vara möjligt att bedöma om termograferingar fortsättningsvis kan användas mera rutinmässigt vid väglimateundersökningar.



Figur 5:24. Värmebild från väg E6 vid Hallandsåsen med lokalt kall vägyta.

## 6 FLYGTERMOGRAFERING FRÅN HELIKOPTER – PROBLEM OCH MÖJLIGHETER

### 6.1 Termograferingsutrustning

En utgångspunkt för diskussion kring olika värmekameror och deras prestanda och användbarhet i flygsammanhang skulle kunna vara att upprätta en kravspecifikation för utrustning idealiskt anpassad för helikopterburna termografering. Listan kan sedan jämföras med existerande, kommersiellt tillgängliga system. En sådan specifikation bör omfatta följande villkor:

- spektral känslighet inom det långvågiga bandet 8-14  $\mu\text{m}$
- god termisk upplösning,  $< 0,1^\circ\text{C}$
- god geometrisk upplösning,  $< 2$  mrad vertikalt och horisontellt vid  $20^\circ$  vinkelöppning
- dynamiskt omfång med min 100 gråskalenivåer eller intensitetsnivåer
- standard CCIR-videosignal ut för bearbetning med videoutrustning eller med datoriserad bildbehandling
- videobild i svartvitt eller färg med angivande av temperaturomfång, temperaturnivå (centertemperatur), tidskod, optik och filter m.m.
- bildkvalitet av FLIR-standard
- internt kryostatkyllt system eller gaskyllt system med kväve, argon eller liknande för att bl.a. möjliggöra lodmontering av scannern
- "fältmässig" konstruktion av scanner och elektronikenhet utprovad för flygsammanhang.

Då den maximala utstrålningen för de flesta föremål på jordytan vid rumstemperatur och därunder återfinns i den långvågiga delen av det infraröda spektrat, 8-14  $\mu\text{m}$ , bör systemets spektrala känslighet ligga inom detta område. Alla de tre använda utrustningarna har enligt respektive specifikation sin känslighet inom detta intervall.

Ett IR-systems termiska upplösning eller känslighet beskriver systemets möjligheter att urskilja små temperaturdifferenser i en avbildad yta. För bildalstrande instrument anges känslighet i MRTD (Minimum Resolvable Temperature Difference). MRTD är ett mått på den minsta termiska skillnaden som ett mänskligt öga kan uppfatta i en gråskala vid ett systemtest. Ett lågt MRTD indikerar ett system med höga prestanda. MRTD för FLIR 2000G och F har uppgivits till  $0,2^\circ\text{C}$ . Den termiska känsligheten för IR-system avsedda för mätteknik kan anges i NETD som står för Noise Equivalent Temperature Difference. NETD är ett mått på den temperaturskillnad mellan två objekt vars utsignal är lika med systemets egen brusnivå, det s.k. termiska bruset. Ju lägre brusnivån är desto mindre temperaturskillnader kan mätas. För INFRAMETRICS 600 anges NETD till  $0,2^\circ\text{C}$ . I specifikationen för AGEMA 782 anges känsligheten generellt till  $0,1^\circ\text{C}$  vid  $30^\circ\text{C}$ .

Den geometriska upplösningen hos ett IR-system är ett mått på systemets förmåga att tydligt avbilda och mäta temperaturen på små föremål, där små är ett mått relaterat till storleken på hela den avbildade ytan. Upplösningen beror dels på detektorn, dels på optiken. AGEMA-systemet har med  $20^\circ$  optiken en upplösning av 3,4 mrad, INFRAMETRICS med  $20^\circ$  optik 2 mrad samt FLIR med en optik med  $28^\circ$  horisonell bildvinkel 1,4 mrad.

Dynamiskt omfång redovisar ett IR-systems kapacitet att särskilja små temperaturdifferenser inom stora temperaturintervall. Dynamiskt omfång, som kan



liknas vid en termometers indelning, motsvarar antalet gråskalenivåer som används i ett system för att avbilda den termiska informationen. INFRAMETRICS redovisar varje del i bilden (varje pixel) som en nivå på en skala omfattande 128 nivåer.

Scanninghastigheten eller avsökningshastigheten är den hastighet med vilken ett IR-system uppdaterar den termiska informationen från en avbildad yta. Bildhastigheten är den hastighet med vilket den registrerade termiska informationen uppdateras på systemets bildskärm eller monitor. Låg scanninghastighet ger hög termisk känslighet och lågt bakgrundsbrus men resulterar å andra sidan i rörelseoskärpa om scannern eller det avbildade föremålet rör sig. Låg bildhastighet (< 50Hz) resulterar också i en knyckig bild med för ögat störande oskärpa om scannern eller föremålet är i rörelse.

I AGEMA:s kamera finns en HgCdTe-detektor som med hjälp av scannersystemet bygger upp en bild som består av 4 fält om 70 linjer. Avsökningshastigheten är 25 fält i sekunden som förskjuts något i 4 på varandra följande fält (interlace 4:1) för att bygga upp en bild om 280 linjer. Detektorn i INFRAMETRICS består av en HgCdTe-detektor som avsöker bilden med en horisontell hastighet av 4 kHz och en vertikal hastighet av 50 Hz med interlace 2:1. FLIR-systemet använder sig av 8 HgCdTe-detektorer i två rader ovanför varandra med 4 i varje. Vertikal avsökningshastighet är 50 Hz. Varje detektorrad ger upphov till 7 812,5 videolinjer per sekund. Eftersom den undre raden elektroniskt fördröjs för att presenteras under den första kommer den avbildade ytan att representeras av 15 625 videolinjer per sekund där varannan linje är signalen från den övre detektorraden och varannan signalen från den undre raden. Resultatet blir en standard CCIR-signal med 25 bilder per sekund och 625 linjer per bild.

FLIR och INFRAMETRICS ger sålunda en standard CCIR monokrom videosignal ut, kompatibel med standard TV- och videosystem. INFRAMETRICS understödjer också en PAL färgsignal. AGEMA-systemets bildhastighet är 25/4 bilder per sekund och signalen måste därför spelas in på en modifierad videobandspelare och presenteras via AGEMA:s displayenhet.

AGEMA-systemet kan också förses med en omvandlingsenhet, DISCON (Digital Infra-red System for Colouration), för konvertering av AGEMA:s videosignal. DISCON-enheten genererar en standard videosignal, i färg eller svart-vitt. Gråskalan i den ursprungliga värmebilden kan därmed översättas till en pseudo-färgskala med 10 färger där varje färg representerar ett givet temperaturintervall.

AGEMA 782 och INFRAMETRICS 600 är mätinstrument där AGEMA:s lägre avsökningshastighet troligen ger en stabilare termisk information medan INFRAMETRICS avsöknings- och bildhastighet ger bättre resultat om scannern eller målet är i rörelse. FLIR slutligen är konstruerat som ett bildalstrande instrument utan mätegenskaper där scanning- och detektorsystemets uppbyggnad resulterar i en bildkvalitet med mycket god termisk information.

Eftersom en stor del av bearbetningen av de termiska registreringarna är ett slags bildtolkningsarbete framstår det som angeläget att den termiska informationen för tolkaren kan presenteras på ett så tydligt sätt som möjligt. En bra bildkvalitet, möjligen på bekostnad av mätegenskaperna, är därför, enligt den tidigare uppställda önskelistan, ett viktigt krav för flygtermografering. Av de tre använda systemen har FLIR-systemet den klart bästa bilden vilket, med tanke på systemets avsedda användning i första hand för militära applikationer, kanske var väntat.

## 6.2 Signal- och bildbehandlingsutrustning

### *Registreringsutrustning*

De termiska registreringarna vid alla försöken spelades in på videobandspelare av typ VHS och U-Matic High Band. 1/2" VHS är den allmänt utbredda konsumentstandarden för videoutrustning. 3/4" U-Matic High Band är en professionell standard som används av bl.a. Sveriges Television. Upplösningen på en bra VHS-bandspelare är ca 240 linjer horisontellt och motsvarande värden för en U-Matic-bandspelare är 280 linjer.

Prov med båda videosystemen gav vid handen att en del termisk information går förlorad i VHS-systemet jämfört med U-Matic. Termiska registreringar bör alltså helst utföras med bandspelare av professionell klass av typ U-Matic High Band eller Betacam. Nackdelen är att dessa system är tunga och utrymmeskrävande samt att de bärbara systemen endast är konstruerade för en bandlängd av 20-30 minuter. Bandbyte under pågående termografering bör helst undvikas av rent praktiska skäl. Nya videosystem med goda prestanda, som kommer att möjliggöra bättre inspelningsresultat, kommer inom kort att finnas i marknaden.

### *Bildbehandlingsutrustning*

För två av de använda IR-systemen, AGEMA och Inframetrics, finns det framtaget datorbaserade bildbehandlingssystem. Båda systemen baseras på en IBM PC/CXT/AT eller kompatibel dator, försedd med en analog/digital-omvandlare i datorns systembuss jämte programvara för bildbearbetning. Programvarorna är anpassade till respektive IR-system och går inte att använda till registreringar från andra system.

Thermoteknix ThermaGRAM System, som bl. a. användes vid analysen av termograferingen av kraftledningar, är ett realtids bildbehandlings- och mätsystem för INFRAMETRICS 600 radiometer. Den inspelade analoga videosignalen från IR-scannern digitaliseras och presenteras samtidigt med registreringen i färg eller svart-vitt på en högupplösande RGB-monitor. Information relaterad till kamerans inställningar är inkodad i videosignalen och avläses kontinuerligt varför den kan användas vid all mätning och bildbearbetning. Den presenterade signalen har en upplösning av 380x576x7 bitar vilket medger en bild med maximalt 128 gråtoner eller färger, från en palett om 4 096. Med hjälp av separata grafikplan kan text och grafik läggas in i bilden som därför inte påverkas. Alla överlägg kan ändras eller tas bort i så väl realtids-digitalisering som stillbildsfunktion.

Av den omfattande programvaran till ThermaGRAM har följande rutiner använts:

- Stillbildsfunktion, dvs frysning av vald videobild.
- Grafik och textfunktioner med bl. a. möjlighet till notation av intressanta bildavsnitt.
- Presentation av flera stillbilder samtidigt.
- Punktmätning av temperatur.
- Justering av emissionsfaktor vid punkt- eller ytmätning av temperatur.
- I bilden vertikala eller horisontella temperaturprofiler.
- Geometrisk zoomfunktion.
- Termisk zoomfunktion, dvs minskning av temperaturintervallet.

- Filtrering för reduktion av termiskt brus.
- Lagring av bilder på diskett eller hårddisk.
- Utskrift av bilder på färgbildskrivare.

Under de senaste åren har det utvecklats kraftfulla bildbehandlingssystem, ofta använda i geografiska informationssystem och framtagna för arbete i mini- och mikrodatormiljö. Som exempel kan nämnas ARC/INFO, EBBA I & II, ER-DAS, IMAGEPRO, MICROIMAGE m. fl. I flera av dessa system ingår programvara för hantering och analys av termisk information från satellitbilder. En fördel vore att även kunna använda dessa system för analysen av värmebilder från de vanligaste mark- och flygbaserade civila systemen: Agema, Inframetrics, Hughes, FLIR med flera; t. ex. genom modultillägg anpassade till respektive tillverkarens IR-system.

Det finns vidare flera tillverkare av kretskort för analog/digital-omvandling som kan utnyttja programvara från fristående programutvecklare. Genom modifiering och komplettering av programvaran kan sådana system användas för bearbetning av termisk bildinformation registrerad i standard videoformat. Två sådana system har provats, DATA TRANSLATION 2851 med programvaran Image Pro samt MATROX MVP-AT med ett sub-rutin bibliotek Imager-At. Den använda versionen av Image Pro var emellertid en "demo-version" vilket medgav begränsade provmöjligheter. För att Imager-AT skall bli användarvänligt krävs att programmen skrivs i högnivåspråk. Inget av system kunde, av ovan angivna orsaker, provas mer än ytligt.

### 6.3 Plattform

Vid enkel fjärranalysverksamhet har helikoptern många fördelar som plattform:

- extremt god manöverförmåga
- stabil - tämligen okänslig för turbulens orsakad av termik eller vind
- utomordentligt god sikt
- brett fartregister, 0 – 120 knop
- stort praktiskt användbart höjdregister, 0 – 10 000 fot
- tillgång till ett nästan obegränsat antal landningsplatser

Bland helikopterns nackdelar kan nämnas:

- sidvinds känslighet i låga farter
- vibrationer från rotorsystemet som beror på rotorkonstruktion, varvtal, flygläge etc.

Helikopterns nackdelar kan minskas bl. a. genom val av lämplig helikopter (flerbladiga helikoptrar vibrerar mindre än tvåbladiga), genom vibrationsdämpande upphängning av sensorer och kringutrustning, samt slutligen genom planering av stråkriktning med hänsyn till rådande vind.

### *Kameraupphängning*

Den mest vibrationsdämpande upphängningen erbjuder ett fäste i vilket kameran eller sensorn genom mycket lång utfjädring så att säga ligger och "flyter" för sig själv oberoende av helikopterns rörelser. Kamerans egna svängningar måste emellertid dämpas. Det fäste som konstruerades för linjeinspektion hade en mycket god utdämpning och videobilderna från inspektionsflygningarna hade mycket lite rörelseoskärpa.

Modifieringen av fästet för lodbildstermografering visade sig vara mindre lyckad och den bandade signalen från flygningarna i maj och december 1986 lider i flera fall av en ormande rörelse i sidled som troligen också förstärkts av spegelarrangemanget för Inframetrics- och Agemasystemen. En bättre utbalanserad upphängning av värmekamerorna skulle kunna motverka dessa problem. Den största svårigheten är dock värmekamerornas ringa massa.

FLIR-systemets scannerhuvud, som är inbyggt i en styrbar kula upphängd i en kardanring, fästes under helikoptern i lastkrokens infästningspunkter. Detta innebar, att scannern kom att ligga rakt under helikopterns rotorhuvud och tyngdpunkt, vilket medförde att både vibrationerna från helikopterns dynamiska system och rörelser orsakade av luftens turbulens i mycket liten utsträckning kom att påverka bildkvaliten.

## **6.4 Flygning och flygsäkerhet**

Liksom för all annan fjärranalysverksamhet från flygplan och helikopter är ett bra kartunderlag för navigering av stor betydelse vid genomförandet av flygtermograferingar. Under dagen kan ett flertal karttyper duga från översiktskartor i skala 1:250 000 till EK-blad och primärkartor i skala 1:10 000 och större. För navigering under natten ökar kraven på läsbarhet och i synnerhet då precisionsnavigering av typ Malmö och Vitemölla erfordras. Idealet vid flygtermografering under natten, där värmebilden används som navigeringsstöd, är en karta som på något sätt liknar värmebilden; grå mark, svarta huskroppar, vita vägar etc. Bästa kartskalan för termografering av begränsade områden är troligen 1:10 000.

Enkel färgläggning av ekonomiska kartans planeringsversion är kanske en framkomlig väg.

Precisionsnavigering under mörker med flygplan och helikopter är förenat med svårigheter. Utanför tätort är det nästan omöjligt att uppnå hög noggrannhet utan hjälpmedel som FLIR, lågljus-TV eller roterande markljus ("saftblandare"). Utnyttjande av värmestrålningsreflekterande aluminiumplåtar, utlagda i målområdet, är däremot knappast något navigeringsstöd men kan i vissa fall underlätta bildtolkningen. Möjligheterna att navigera ökar emellertid betydligt över en upplyst tätort under förutsättning att navigeringen kan ske efter bra kartor och tydliga märken. Stråkflygningen över tätorter erbjuder därför egentligen inga svårigheter. Flygning utmed vägar och ledningssträckningar är genomförbar med god precision om sträckningen är belyst eller vägen så pass trafikerad att linjedragningen med hjälp av strålkastarskenet från fordon på vägen blir tydligt markerad. Erfarenheterna från nattflygningarna visar att möjligheterna att orientera sig och att navigera med god noggrannhet drastiskt ökar, om flygningen genomförs vid månsken. En rekommendation för framtiden skulle därför vara att planera all eventuell flygtermografisk verksamhet till de ca 10 dagar i månaden som infaller kring tidpunkten för fullmåne.

Som för all flygtermografering under mörker har gällt att flyghöjden 1 000 fot ej fick underskridas. Vidare måste föraren under dagen rekognoscera lämpliga

platser för nödlandning i de områden där termograferingen skulle äga rum. Flygningen måste sedan läggas upp så att det vid eventuellt motorbortfall eller störning gick att landa på något av dessa områden. Tilläggas kan att flygsäkerheten ökar om nattflygningarna förläggs till dagar med månsken då möjligheten att rätt bedöma lämpliga nödlandningsområden blir större.

## 7 SLUTSATSER

Den utvärdering av helikopterburen termografering som gjorts inom ramen för projektet har främst omfattat registreringssystemens kapacitet under fältmässiga (operativa) förhållanden. Möjligheterna till efterföljande digital bildbehandling av registrerade data har också, i enlighet med projektets syfte, behandlats, ehuru inte lika ingående. Utvärderingen har gällt tre skilda registreringssystem, vilka prövats i skilda applikationer med anknytning till främst samhällsplanering och miljöskydd. De erfarenheter av infrarödtermografi från helikopter som förvärvats inom projektet eller i närliggande studier kan sammanfattas som följande allmänna slutsatser:

*Kraftledningsinspektion* utfördes med värmekameran Inframetrics 600, som visade sig vara väl lämpad härför. Den ger en bra, kontrastrik bild med fin skärpa vid rätt inställning av temperaturomfång och nivå. Datorbearbetning i efterhand är en bra metod att analysera insamlad termisk information. Då inspektionen med nödvändighet måste utföras relativt nära kraftledningarna, är helikopter den mest lämpade plattformen. Av flygsäkerhetsskäl måste inspektionen göras i dager.

*Lokalisering av yt- och grundvattenutsläpp* genomfördes framgångsrikt med helikopterburen FLIR-utrustning. Försöken visade att termografering från helikopter är en operativt användbar metod för dokumentation och kartläggning av utsläpp i sjöar och vattendrag. I samband med inventering av utsläpp från industrier och verkstäder uppstår frågan, huruvida utsläppen upphör vid arbetsdagens slut. Trots att de termiska förhållandena för termografering oftast är bäst på natten, bör försök göras med utsläppstermografering även under dagtid.

*Lokalisering av äldre soptippar* med helikopterburen IR-termografi var syftet med några av de genomförda försöken. Dessvärre visade sig termograferingstekniken ej användbar för detektering och avgränsning av äldre deponier men syntes vara möjlig att tillämpa för övervakning av vattenläckage från deponier till angränsande ytvatten (jfr ovan).

*Detektering av oljespill* med hjälp av termografering från helikopter syntes möjlig, då oljan befann sig i strandzonens ytskikt. Däremot var metoden ej operativt användbar för detektering av olja under isytan.

*Mikro- och lokalklimatiska temperaturmönster* i mark och vegetation av intresse vid bl.a. frostlänthetsstudier i frukt- och bärödlingsdistrikt kunde framgångsrikt dokumenteras med helikopterbaserad infrarödtermografi. Möjligheterna att utnyttja låg flyghöjd och att kunna direktövervaka och eventuellt korrigera termograferingen under pågående flygning bedömdes i sammanhanget som stora fördelar. De bästa resultaten erhöles med FLIR-systemet, som med god termisk och geometrisk upplösning och genom sin riktbara kamera möjliggjorde detaljerade termiska analyser i både rum och tid. En nackdel med

systemet är dock att det saknar bildbehandlingsenhet.

*Infrarödtermografering över stadsområden* från helikopter kunde utnyttjas för studier av såväl termiska detaljstrukturer i stadslandskapet som profiler genom den urbana "ytvärmeön". FLIR-utrustningen gav särskilt goda resultat.

*Vägars termiska förhållanden*, av intresse för väghållning och trafiksäkerhet, kunde registreras från helikopter med FLIR-systemet. Bl.a. dokumenterades effekter som berodde på vägens konstruktion och material samt beskuggning. Mera omfattande försök med helikopterbaserad termografering av vägar har igångsatts efter utvärdering av dessa inledande studier.

*Helikopterbaserad termograferingsutrustning* för tillämpningar med anknytning till samhällsplanering och miljöskydd bör kunna presentera den termiska informationen för tolkaren på ett så tydligt sätt som möjligt. En bra bildkvalitet, eventuellt på bekostnad av mätegenskaperna, är därför ett viktigt krav för flygtermografering med sådana tillämpningar. Av de tre använda systemen gav FLIR-systemet den klart bästa bildprodukten. För att kunna nyttiggöra tekniken i samband med akutsituationer, t. ex. vid oljeutsläpp och industriläckage, krävs att registreringsutrustning finns snabbt och, sannolikt, regionalt tillgänglig.

*Den termiska registreringen* spelades in på videobandspelare av typ VHS och U-Matic High Band. Den förra typen är lättare (bärbar) och mera kompakt än den senare. Dessvärre förloras dock en del termisk information i VHS-systemet i motsats till U-Matic High Band. Dessutom är de bärbara systemen endast konstruerade för en bandlängd av 20-30 minuter. Nya videosystem med goda prestanda kommer dock snart att finnas i marknaden.

*Bildbehandlingsutrustning*. Till flera av systemen finns specifik bildbehandlingsutrustning. Att generellt användbara bildbehandlingssystem i praktiken saknas är emellertid ett besvärande förhållande ur användarsynpunkt.

*Plattform*. Helikopter som plattform vid termografering har många fördelar, t.ex. extremt god manöverförmåga, relativt stor okänslighet för turbulens, god sikt, stort fart- och höjregister och det förhållandet att den kan landas på en mängd platser. Dess nackdelar är bl.a. sidvindhänsyn i låga farter och vibrationer från rotorsystemet.

*Kameraupphängning och val av kameraposition* kräver stor omsorg för att möjliggöra tillfredsställande vibrationsdämpning. En gynnsam scannerplacering visade sig vara en position rakt under helikopterns rotorhuvud och tyngdpunkt.

*Flygning och flygsäkerhet* kräver självfallet stora insatser vid termografering från helikopter. Ett bra kartunderlag är av stor betydelse vid all flygning. Under nattlig termografering är det dessutom ett krav att kartorna skall vara lättlästa. För precisionsnavigering kan det framåtseende FLIR-systemet vara till god hjälp liksom roterande markljus utplacerade i målområdet. Månshen ökar drastiskt möjligheterna att orientera sig och att manövrera med noggrannhet. En rekommendation är därför att planera flygtermografisk verksamhet till de ca 10 dagar i månaden som infaller kring tidpunkten för fullmåne. Slutligen måste helikopterföraren under dagen rekognoscera lämpliga platser för nödlandning i och kring målterrängen.

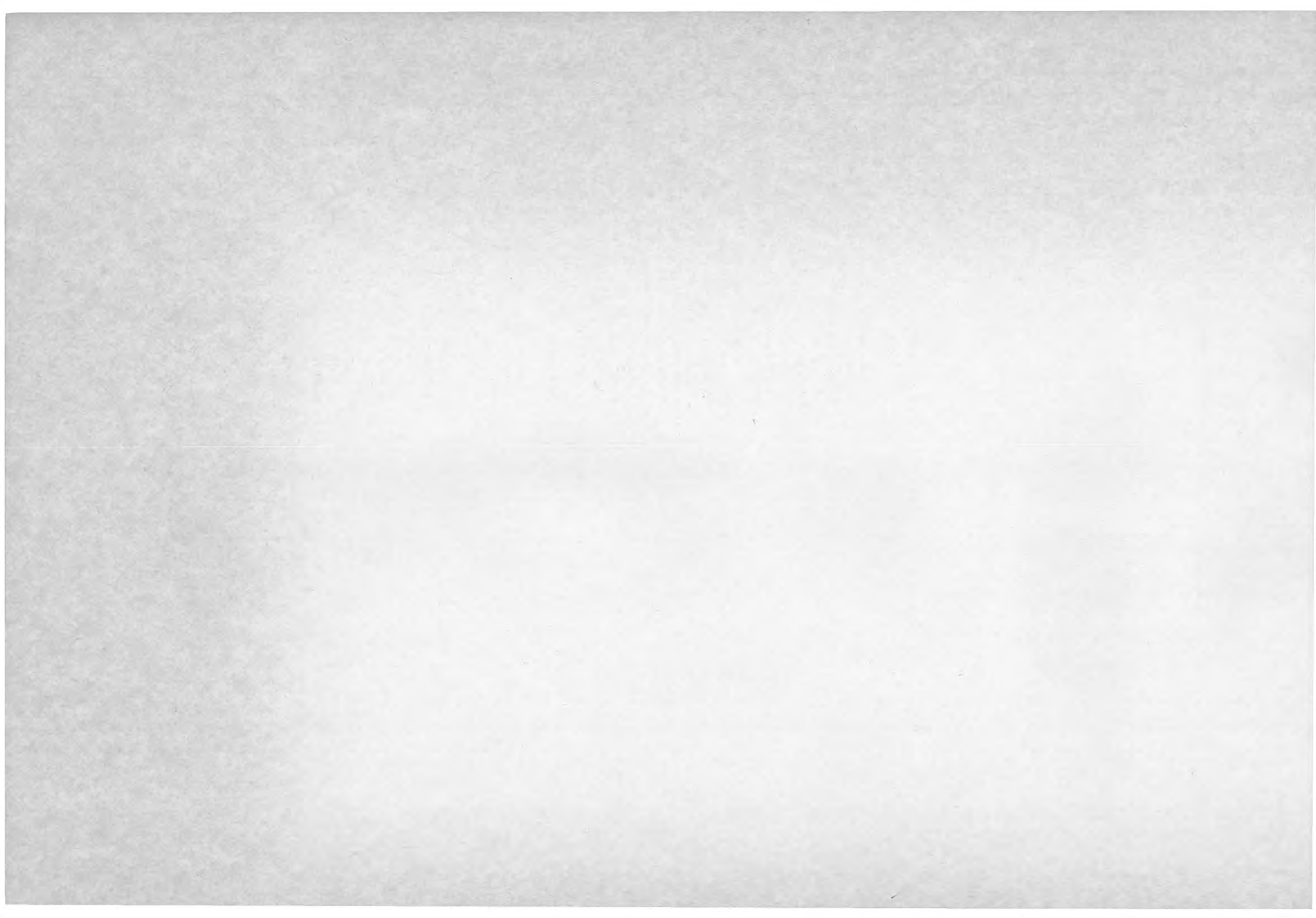
Sammanfattningsvis kan konstateras att den prövade kombinationen av helikopter och infrarödtermografi, speciellt FLIR, potentiellt utgör ett kraftfullt komplement till konventionell flygburen svepradiometri. Helikopterns stora flexibilitet som transportmedel och arbetsplattform möjliggör i vissa fall tillämpningar som ligger utanför det tekniskt möjliga med flygplan. Förhållandet att IR-operatören och navigatören realtidsmässigt kan betrakta registreringen har uppenbara fördelar; speciellt i beaktande av att navigatören lämpligen kan utgöras av klimatolog eller annan forskare. För att fullt kunna utnyttja systemen krävs dock att ett lämpligt bildbehandlingssystem finns att tillgå.

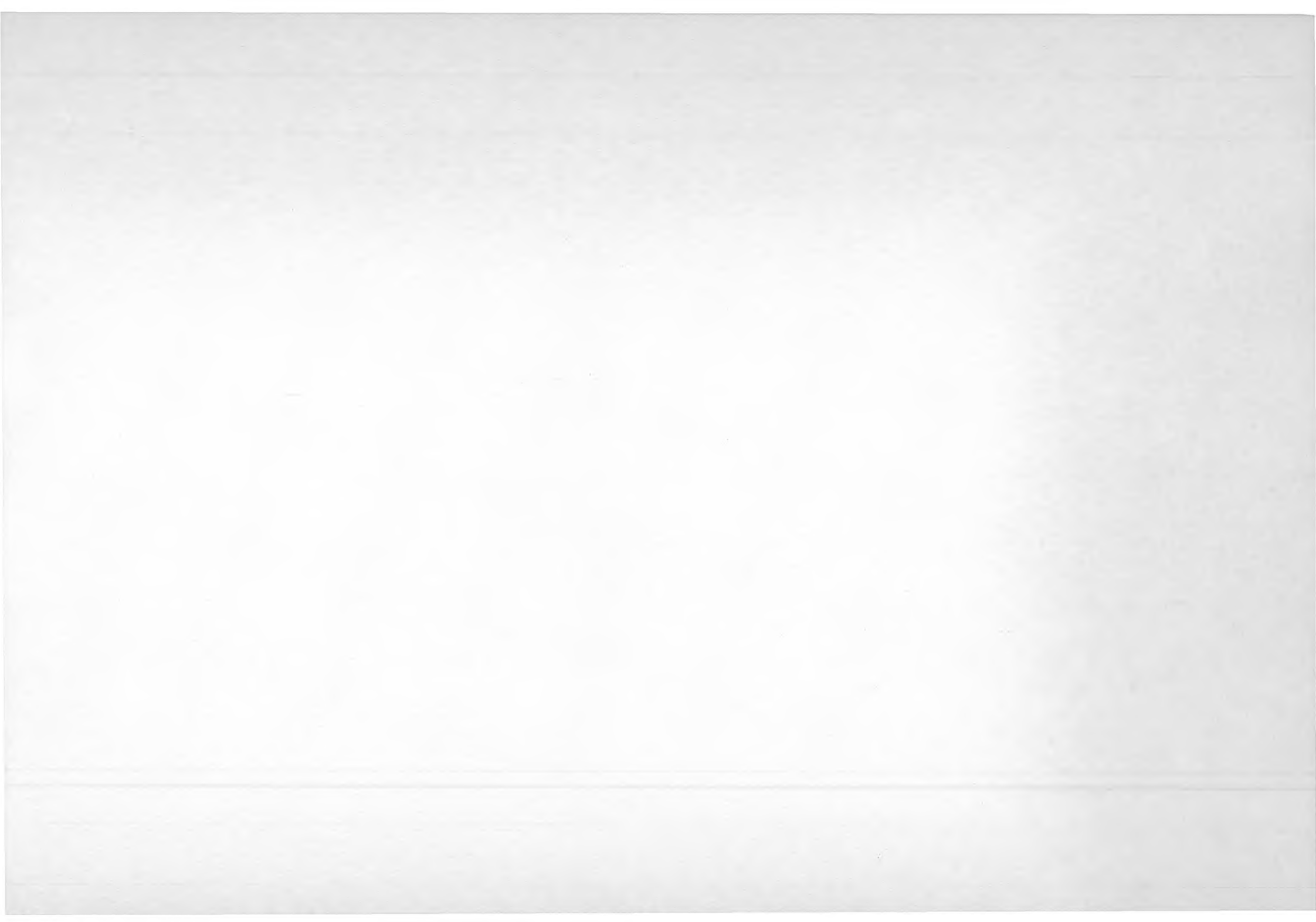
Det bör slutligen framhållas att de här redovisade studierna haft sin tyngdpunkt i att praktiskt pröva olika infrarödssystem/bildbehandlingssystem under praktiska operativa förhållanden och i mindre utsträckning att grundligt pröva gränserna för dessas användning i olika tillämpade forskningsuppgifter. Det finns därför all anledning att framöver närmare pröva kombinationen av helikopter och infrarödtermografi som fjärranalytiskt hjälpmedel inom ramen för mera renodlade forskningsuppgifter.

## REFERENSER

- Axelsson, S. (1981): Kartläggning av markytans fuktighet, avdunstning och termiska tröghet med IR-termografi. *Svensk Lantmäteritidskrift* 73:213-219.
- Axelsson, S. & Lundén, B. (1985): Experimental results on soil moisture correlation with thermal infra-red data. *Science du Sol* 1985:1.
- Björkbäck, F., Marklund, E., Sellin, L., Wallin, L. & Ågren, C.-H. (1970): Myrkartering med hjälp av flygfoto och termografi. *Fauna och Flora* 65:234-246.
- Brereton, N. R. (1984): *Groundwater discharge mapping by thermal infrared imagery*. IAEA-SR-104/19. Sofia, Bulgaria.
- Brereton, N. R. & Downing, R. A. (1975): Some applications of thermal infra-red linescan in water resources studies. *Water services* 79:91-96.
- Ericsson, L. O. & Hård, S. (1981): Termisk registrering - en metod att kartera markvattenhalt. *Geohydrologiska forskningsgruppen, Meddelande nr 61*. Chalmers tekniska högskola.
- Gandino, A. & Tonelli, A. M. (1983): Recent remote sensing technique in freshwater submarine springs monitoring: qualitative and quantitative approach. *Versl. Meded. Comm. hydrolog. Onderz. TNO* 31: 301-310.
- Hilton, J. (1984): Airborne remote sensing for freshwater and estuarine monitoring. *Water Res.* 18:1195-1223.
- Huntley, D. (1978): On the detection of shallow aquifers using thermal infrared imagery. *Water Res.* 14:1075-1083.
- Lindqvist, S. (1967): Indikering av bebyggelse- och topografibetingade temperaturdifferenser med infrarödteknik. *Svensk Geografisk Årsbok* 43:212-225.
- (1975): Infrarödtermografiska tillämpningar inom vägklimatologin. *Svensk Geografisk Årsbok* 51:116-123.
- (1976): Metoder för bestämning av halkfrekventa vägsträckor. Naturgeografiska institutionen, *GUNI rapport 8*. Göteborgs universitet.
- (1987): Sensing road surface temperatures with infrared techniques. Naturgeografiska institutionen, *GUNI rapport 23*. Göteborgs universitet.
- Ljungberg, S.-Å. (1986): *Flygtermografi - ett hjälpmedel vid kommunal energiplanering. En metodstudie*. Statens institut för byggnadsforskning. Gävle.
- Lundén, B. (1977): Infrarödtermografi för markvattenstudier. Naturgeografiska institutionen, *Forskningsrapport 25*. Stockholms universitet.
- (1981): Skogens temperatur avslöjar jordart - en möjlig fjärranalysteknik? *Svensk Lantmäteritidskrift* 73:208-212.
- (1984): IR-radiometri för upptäckt av biologisk stress hos vegetation. Naturgeografiska institutionen, *Forskningsrapport 54*. Stockholms universitet.
- (1985): Aerial thermography - a remote sensing technique - applied to detection of buried archaeological remains at a site in Dalecarlia, Sweden. *Geografiska Annaler* 67 A:161-166.
- Mattsson, J. O. (1967): Mikro- och lokalklimatindikering medelst infrarödtermografi. *Svensk Geografisk Årsbok* 43:191-211.
- (1968): Termisk registrering med infrarödtelevisionssystem - en ny teknik vid mikroklimatiska undersökningar. *Svensk Geografisk Årsbok* 44:36-52.
- (1969): Thermal patterns in the landscape recorded with infrared technique and simulated in model experiments. *Geografiska Annaler* 51 A: 219-238.
- Mattsson, J. O. & Börjesson, L. (1978): Lokalklimatiska temperaturstudier inom ett skånskt fruktodlingsdistrikt med särskilt beaktande av frostläntheten. *Konsulentavdelningens rapporter, Trädgård 131*. Sveriges lantbruksuniversitet.
- Mattsson, J. O., Lindqvist, S. & Barring, L. (1986): Stadsstruktur, bebyggelseförtätning, klimat. Resultat av studier i Malmö, särskilt inriktade på temperaturförhållanden. *Rapport från Byggnadsforskningsrådet R 78:1986*.
- Mattsson, J. O., Odin, H. & Palenius, H. P. (1983): Termografi över snötäckta hyggen för frostlänthetsstudier. Institutionen för skoglig marklära, *Rapporter i skogsekologi och skoglig marklära nr 46*. Sveriges lantbruksuniversitet.
- Roxburgh, I. S. (1985): Thermal infrared detection of submarine springs associated with the Plymouth Limestone. *Journal of scientific Hydrology* 30:185-196.
- Svensson, H. (1967): Termisk registrering av mark- och terränginformation, ett nytt fält inom den civila flygbildstolkningen. *Svensk Geografisk Årsbok* 43:171-190.
- (1969): Submarina källor i värmebilder. *Svensk Geografisk Årsbok* 45:98-106.
- Vanek, V. (1987): The interactions between lake and groundwater and their ecological significance. *Stygologia* 3:1-23.
- Åkerman, J. (1972): Topoklimatologiska studier inom ett profilavsnitt över Hallandsåsen medelst infrarödtermografi. *Svensk Geografisk Årsbok* 48:105-113.







**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 860353-8  
från Statens råd för byggnadsforskning  
till Naturgeografiska institutionen, Lunds universitet, Lund.**

**R30:1988**

**ISBN 91-540-4876-1**

**Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm**

**Art.nr: 6708030**

**Abonnemangsgrupp:  
X. Samhällsplanering**

**Distribution:  
Svensk Byggtjänst, Box 7853  
103 99 Stockholm**

**Cirka pris: 45 kr exkl moms**