

FFI RAPPORT

FORMULERING AV KRAV TIL TERMISK KAMUFLASJE

OLSEN, Frode Berg

FFI/RAPPORT-2003/00537

FFIE/843/044

Godkjent
Kjeller 13. oktober 2003

Stian Løvold
Forskningsjef

**FORMULERING AV KRAV TIL TERMISK KAMU-
FLASJE**

OLSEN, Frode Berg

FFI/RAPPORT-2003/00537

FORSVARETS FORSKNINGSINSTITUTT
Norwegian Defence Research Establishment
Postboks 25, 2027 Kjeller, Norge

| | | | | |
|--|---|----------------------------------|--|---|
| 1) PUBL/REPORT NUMBER FFI/RAPPORT-2003/00537 1a) PROJECT REFERENCE FFIE/843/044 | 2) SECURITY CLASSIFICATION UNCLASSIFIED 2a) DECLASSIFICATION/DOWNGRADING SCHEDULE - | 3) NUMBER OF PAGES 34 | | |
| 4) TITLE FORMULERING AV KRAV TIL TERMISK KAMUFLASJE FORMULATION OF REQUIREMENTS TO THERMAL CAMOUFLAGE | | | | |
| 5) NAMES OF AUTHOR(S) IN FULL (surname first) OLSEN, Frode Berg | | | | |
| 6) DISTRIBUTION STATEMENT Approved for public release. Distribution unlimited. (Offentlig tilgjengelig) | | | | |
| 7) INDEXING TERMS IN ENGLISH: <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> a) <u>Camouflage</u> b) <u>Thermal</u> c) <u>Infrared</u> d) <u>Requirements</u> e) <u>Detection</u> </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"> IN NORWEGIAN: a) <u>Kamuflasje</u> b) <u>Termisk</u> c) <u>Infrarød</u> d) <u>Krav</u> e) <u>Deteksjon</u> </td> </tr> </table> | | | a) <u>Camouflage</u> b) <u>Thermal</u> c) <u>Infrared</u> d) <u>Requirements</u> e) <u>Detection</u> | IN NORWEGIAN: a) <u>Kamuflasje</u> b) <u>Termisk</u> c) <u>Infrarød</u> d) <u>Krav</u> e) <u>Deteksjon</u> |
| a) <u>Camouflage</u> b) <u>Thermal</u> c) <u>Infrared</u> d) <u>Requirements</u> e) <u>Detection</u> | IN NORWEGIAN: a) <u>Kamuflasje</u> b) <u>Termisk</u> c) <u>Infrarød</u> d) <u>Krav</u> e) <u>Deteksjon</u> | | | |
| THESAURUS REFERENCE: 8) ABSTRACT This report discusses different methods for formulating requirements for thermal camouflage materials or systems. The methods discussed range from full-scale realistic combat simulations to laboratory measurements of material properties. As an introduction to the discussion, a brief overview of the physical processes governing the temperature of outdoors surfaces is given together with a basic introduction to the formalism and methods used in thermal systems performance prediction. | | | | |
| 9) DATE 13. October 2003 | AUTHORIZED BY This page only Stian Løvold | POSITION Director of Research | | |

INNHOLD

| | Side | |
|-------|---|----|
| 1 | PROBLEMSTILLING | 7 |
| 2 | TERMISK STRÅLING – LITT ENKEL FYSIKK | 8 |
| 2.1 | Overflatetemperatur | 9 |
| 3 | SENSORSYSTEMET | 10 |
| 3.1 | Kontrast fra objekt til observatør | 10 |
| 3.2 | Hva er ΔT ? | 14 |
| 4 | DETEKSJON, GJENKJENNING OG IDENTIFIKASJON | 14 |
| 4.1 | Observatøren | 14 |
| 4.2 | Clutter | 18 |
| 5 | ULIKE UTGANGSPUNKT FOR KRAVFORMULERINGER | 19 |
| 5.1 | Feltmålinger | 20 |
| 5.1.1 | Stridsøvelser | 20 |
| 5.1.2 | Deteksjonsavstand | 21 |
| 5.1.3 | Temperaturkontrast | 23 |
| 5.2 | Lab-målinger | 26 |
| 5.2.1 | Klimakammer | 26 |
| 5.2.2 | Materialparametere | 27 |
| 5.3 | Simulering av signaturer og overflatetemperaturer | 29 |
| 6 | OPPSUMMERING | 30 |
| | Litteratur | 32 |

FORMULERING AV KRAV TIL TERMISK KAMUFLASJE

1 PROBLEMSTILLING

Målet med kamuflasje er å redusere kontrasten mellom mål og bakgrunn mest mulig. For visuell observasjon er kontrasten et resultat av at mål og bakgrunn reflekterer lys ulikt. Lyse flater reflekterer mye lys, og mørke flater reflekterer mindre. Disse refleksjonsegenskapene er egenskaper ved overflatene, og forblir uendret selv om lysforholdene endrer seg. Det er selvsagt årstidsvariasjoner i fargene i naturen, men bortsett fra en kort periode om høsten er frisk vegetasjon grønn og visse vegetasjon brun. Dette gjør at det er mulig å definere et knippe farger som gir god kamuflasje i norsk natur uavhengig av tid på døgnet og værforhold.

For observasjon med termisk kamera er det temperaturforskjellen mellom mål og bakgrunn som avgjør kontrasten. Til forskjell fra visuell kontrast er ikke flatenes temperaturkontrast avhengig av flatenes egenskaper alene, men også en rekke egenskaper ved selve materialene i tillegg til påvirkning fra det ytre miljøet, dvs værforholdene. Temperaturene i naturen endrer seg raskt med værforhold og tid på døgnet, og ulike materialer som for eksempel vegetasjon og stein endrer temperatur ulikt. Dette gjør at temperaturkontrastene også endres raskt. For at et kamuflasjemateriale skal ha samme temperatur som omgivelsene, må det også endre temperatur i samme takt, dvs materialet må ha samme temperaturrepons på endringer i det ytre miljøet som materialene i naturen omkring. Dette gjør det langt mer komplekst å definere krav til termisk kamuflasje enn til tradisjonell optisk kamuflasje.

Når Forsvaret skal anskaffe kamuflasjemateriell slik som kamuflasjenett eller kjørekamuflasje må det ovenfor leverandørene stilles krav til materiellets ytelse. For egenskaper som slitestyrke, varmebestandighet og så videre finnes det etablerte målemetoder som gir grunnlag for å stille etterprøvbare krav, men for kamuflasjeeffektivitet finnes det ingen allment aksepterte eller etablerte metoder. For kamuflasjens farger og mønster (kamuflasje i det optiske området, ca 0.40 – 2.5 μm) er det stilt krav til de ulike fargenes reflektans ved ulike bølgelengder (1,2). Disse egenskapene kan etterprøves i laboratoriet, og ved hjelp av ”fargemålinger” på vareprøver er det derfor mulig å avgjøre hvorvidt materialer fra ulike leverandører oppfyller kravene som er stilt, og også mulig å måle hvilken leverandør som best oppfyller kravene.

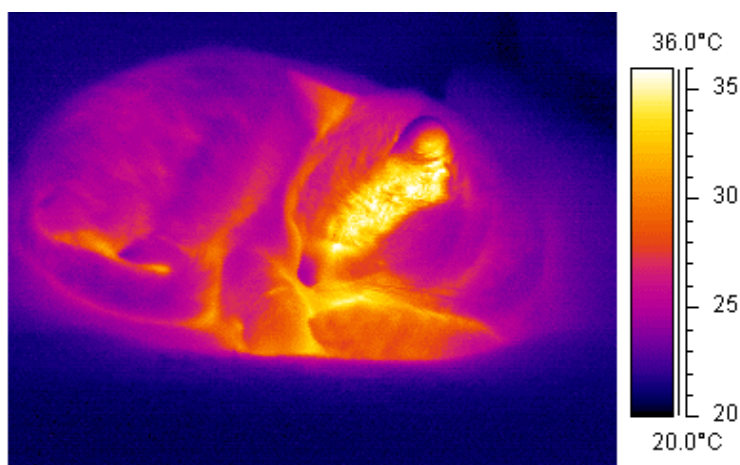
For termisk kamuflasje er det som nevnt ikke lenger kun de optiske egenskapene ved kamuflasjematerialene som er viktige, men også en rekke andre materialeegenskaper som blant annet termisk isolasjonsevne, varmekapasitet og evne til luftavkjøling. Det er ikke avklart at det er mest hensiktsmessig å formulere krav til termisk kamuflasje ved å stille krav til materialenes ulike egenskaper eller materialparametere. For termisk kamuflasje finnes det ingen allment aksepterte testmetoder, og derfor heller ingen allment akseptert måte å formulere krav til termisk kamuflasje på som leverandørene kan forholde seg til.

FFI-prosjekt 843 – *Deteksjon og kamuflasje* – har derfor som én målsetning å vurdere ulike metoder for å evaluere termisk kamuflasje, hvor hensikten er å finne frem til en eller to lovende metoder eller måter å betrakte problemstillingen på for så å undersøke disse nærmere. På sikt er målsetningen at arbeidet skal munne ut i en formulering av objektive, realistiske og etterprøvbare krav til termisk kamuflasjemateriell som skal anskaffes (3).

For å gi leseren en introduksjon til problemstillingene omkring det å stille etterprøvbare krav til termisk kamuflasje gis i Kapittel 2 en enkel fremstilling av de fysiske prosessene som innvirker på temperaturen til flater utendørs, det være seg naturlige overflater slik som vegetasjon og fjell eller overflatene på kjøretøy eller kamuflasjematerialer. I Kapittel 3 gis en grunnleggende fremstilling av deteksjonskjeden, dvs hvordan temperaturkontrasten mellom mål og bakgrunn til slutt medfører at målet kan sees av en observatør på en billedskjerm. Kapittel 4 gir en innføring i standard terminologi og metoder som benyttes ved evaluering av termiske sensorsystemers ytelse. Dette er relevant fordi metodene og begrepsapparatet ofte også benyttes i fm evaluering av kamuflasjeeffektivitet. I kapittel 5 diskuteres ulike metoder for å teste effektiviteten til termisk kamuflasje og hvorvidt metodene er egnet som grunnlag for å etablere etterprøvbare krav. Metodene som diskuteres spenner fra realistiske feltøvelser til måling av materialegenskaper i laboratorium og simuleringer.

2 TERMISK STRÅLING – LITT ENKEL FYSIKK

På samme måte som vanlige kameraer ”ser” forskjellen på ”lysheten” til flater og derved avbilder en scene, registrerer et termisk kamera temperaturene i scenen. Dette er mulig fordi alle flater sender ut termisk stråling med en intensitet som øker med temperaturen. Kameraet omsetter ulikheter i strålingsintensitet til en gråskala eller fargeskala, og viser strålingsintensiteten som et bilde på en skjerm. Et eksempel på termisk bilde med temperaturskala er gitt i Figur 2.1.



Figur 2.1 Eksempel på termisk bilde med temperaturskala.

Varmestråling eller termisk strålingen er ikke av en annen type enn vanlig lys, men har for vanlige temperaturer i omgivelsene bølglengder som er lenger enn bølglengdene for synlig lys. Dette kan illustreres ved følgende eksempel: Dersom en holder hånden over en varm kokeplate

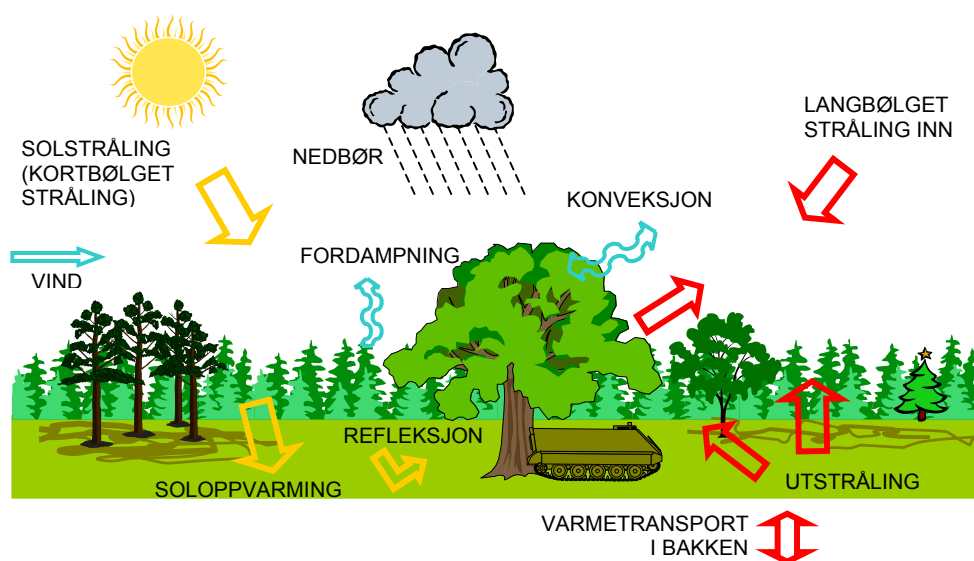
kan man føle varmen, dvs varmestrålingen, selv om platen er sort. Men dersom platens temperatur øker, vil den etter hvert bli rødglødende, dvs strålingen blir synlig for øyet. Varmestrålingen er med andre ord av samme natur som lys.

Et termisk kamera kan derfor sies å være et kamera som er følsomt for bølgelengder mye lenger enn det øyet kan oppfatte, og som derved kan registrere temperaturene i scenen også ved normale omgivelsestemperaturer. Men dersom to flater, f eks et mål og en bakgrunn, har samme temperatur kan ikke et termisk kamera se forskjell på disse, og målet vil gå i ett med bakgrunnen. Målet vil være kamuflert.

Hensikten med termisk kamuflasje er å redusere sannsynligheten for at det kamuflerte objektet blir oppdaget, eller alternativt formulert, redusere avstanden hvor objektet med en gitt sannsynlighet blir oppdaget. Målsettingen for termisk kamuflasje er derfor å endre den faktiske eller den tilsynelatende temperaturen til et objekt slik at det har, eller det ser ut som det har, samme temperatur som bakgrunnen, og det blir derfor viktig å forstå hvilke fysiske prosesser som innvirker på overflatetemperaturene i naturen og på militære objekter.

2.1 Overflatetemperatur

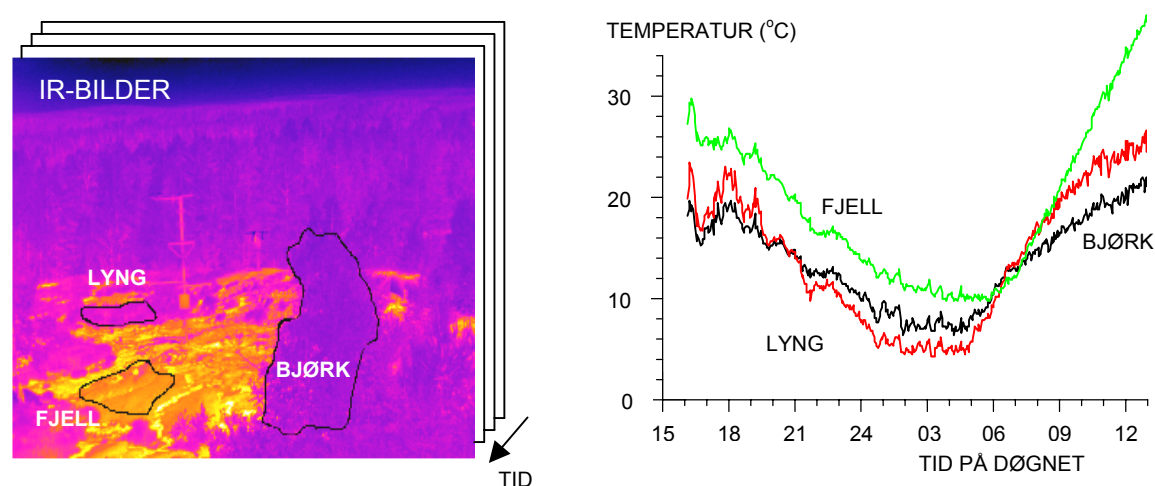
En utendørs overflate mottar varmestrålings fra solen og himmelen, og den avgir varme i form av stråling til omgivelsene (Figur 2.2). I tillegg utveksler overflaten varme med luften omkring enten ved at vind skifter ut luften over overflaten (tvungen konveksjon), eller ved at luften sirkulerer over overflaten som følge av temperaturdifferansen mellom luften og overflaten (fri konveksjon). Dersom overflaten er fuktig kjøles overflaten når vannet fordamper, og dersom vann kondenserer på overflaten bidrar dette til oppvarming. For overflater på massive objekter, f eks stein, er også intern varmeledning et viktig bidrag. Hvor raskt en overlates temperatur endrer seg avhenger av netto tilstrømning av varme og flatens effektive varmekapasitet.



Figur 2.2 Prosesser som bestemmer overflatetemperaturer utendørs.

For overflatetemperaturen til et kjøretøy vil intern varmeledning lede varmen fra f eks et varmt motorrom til utsiden av kjøretøyet. Varmen vil også bre seg utover overflaten, og hvor raskt temperaturen på overflaten endrer seg ved endret varmetilstrømning innenfra og utenfra avhenger av materialets varmekapasitet, ledningsevne og tykkelse.

Det er et samspill mellom de ulike varmetransportprosessene som er nevnt ovenfor som bestemmer hvor mye varme som totalt strømmer til eller fra en flate, og det er flatens materialparametere som bestemmer hvordan flatens temperatur endres som følge av nettostrømmen av varme til flaten. Siden naturlige bakgrunns-elementer som trær, gress, lyng og stein har ulike materialegenskaper, påvirkes overflatetemperaturene også ulikt av de rådende værforhold. Dette er illustrert i Figur 2.3.



Figur 2.3 Fjell, lyng og bjørk har ulik temperatur under de samme meteorologiske forholdene som følge av ulike materialegenskaper. Temperaturkurvene gjengir middeltemperaturen i de markerte områdene i IR-bildene beregnet ved forskjellige tidspunkt på døgnet.

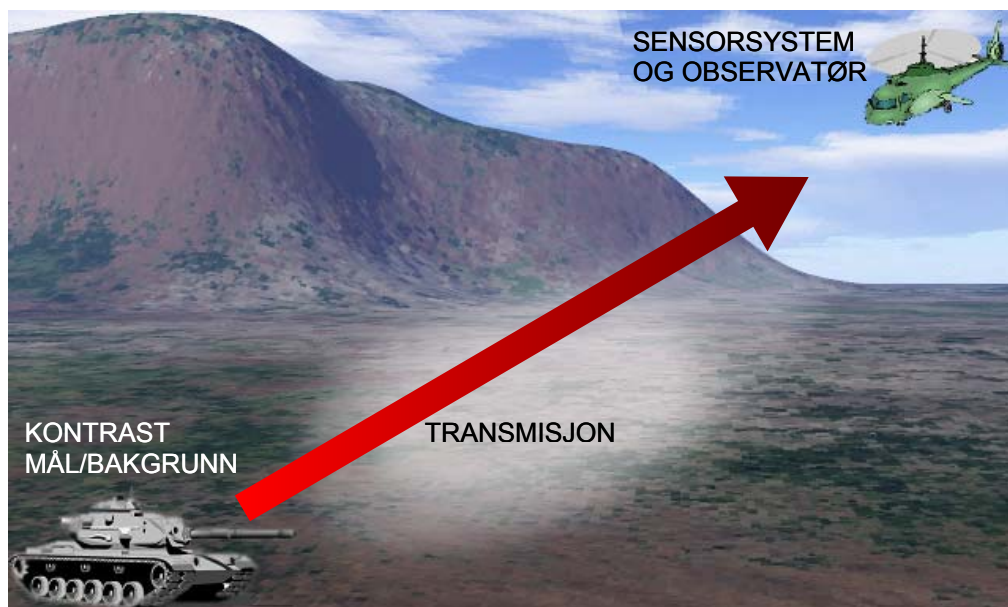
3 SENSORSYSTEMET

Intuitivt forstår vi at sannsynligheten for å detektere et objekt i en bakgrunn reduseres dersom avstanden til målet gjøres større eller kontrasten mellom mål og bakgrunn gjøres mindre. Sannsynligheten for deteksjon er både avhengig av sensorsystemets evne til å avbilde målet i bakgrunnen og observatørens evne til å tolke bildet sensorsystemet gir. Dette kapitlet omhandler hvordan sensorsystemenes ytelse kan beregnes, mens neste kapittel diskuterer observatørens evne til å nytte seg informasjonen i bildene, og hvordan deteksjonssannsynligheter og – avstander kan beregnes.

3.1 Kontrast fra objekt til observatør

Den termiske strålingen fra bakgrunn og objekt vandrer gjennom atmosfæren til sensorsystemet (Figur 3.1). Underveis svekkes strålingen pga absorpsjon og det tilkommer støy fordi luften selv

stråler og fordi stråling fra omgivelsene blir spredt inn i strålen av partikler i luften. Ofte er luften mellom målet og sensoren i bevegelse, noe som også bidrar til støy i bildet ved at bildet blir uskarpt (4). Når strålingen blir registrert av sensoren, blir ”bildet” delt i bildeelementer, ”pikseler”. Hvor godt målet oppløses blir bestemt av sensorsystemets synsfelt og antallet bildeelementer. Hvor ”godt” bildet er, avhenger også av sensorens temperaturfølsomhet og støyen i bildet.

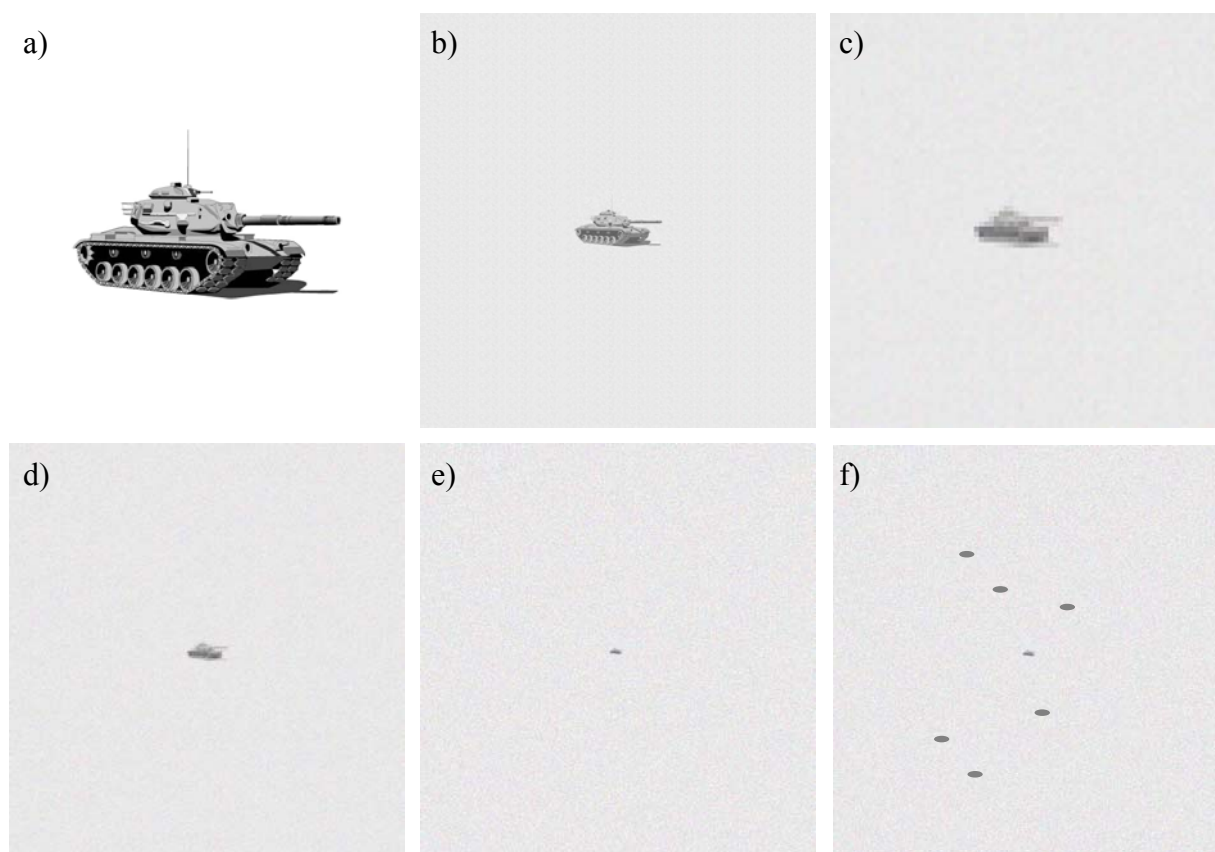


Figur 3.1 *Strålingen fra bakgrunn og objekt vandrer gjennom atmosfæren til lysåpningen på sensorsystemet.*

Figur 3.2 viser hvordan avbildningen av kjøretøyet i bilde a) kan se ut på ulike avstander: Kontrasten mellom mål og bakgrunn er redusert pga støy (b) og kjøretøyet dekkes av et endelig antall bildeelementer (c). Ved observasjon fra større avstander øker støyen fra atmosfæren ytterligere og antallet bildeelementer som dekker kjøretøyet minsker. I bilde d) er det ikke lenger mulig å identifisere kjøretøyet, og i bilde e) kan det bare detekteres som en prikk.

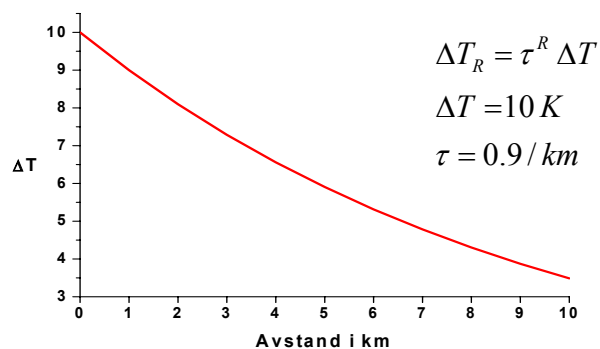
Dersom det introduseres forvekslingsobjekter i bakgrunnen blir det svært vanskelig, i mange tilfeller umulig, å skille ut det virkelige målet. I et realistisk scenario kan forveklingsobjektene være andre typer kjøretøyer eller deler av den naturlige bakgrunnen slik som steiner, fjellknauer eller trær og busker. Dette er vist i Figur 3.2f. For en grundigere diskusjon av termiske kameraers virkemåte se (5) eller (6).

Det finnes en rekke modeller for beregning av termiske sensorsystemers ytelse (Acquire, NVTherm, TRM3), men det går utenfor rammen for denne rapporten å gå i dybden i det teoretiske grunnlaget for disse. Istedenfor gis her en enkel innføring i den overordnede metoden som ligger til grunn for de fleste modellene.



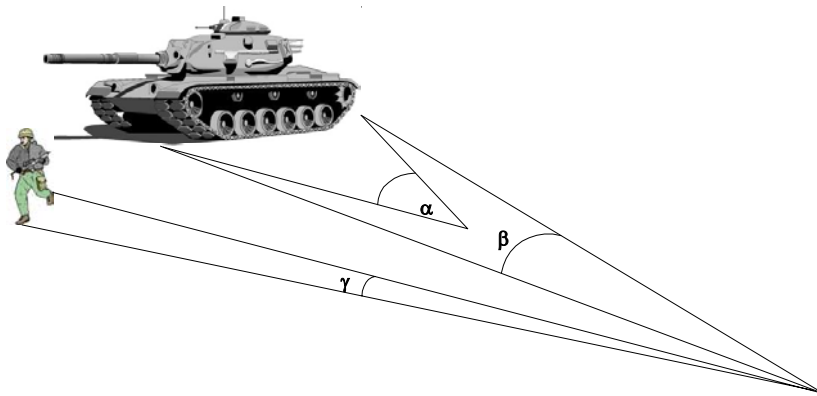
Figur 3.2 Bilde av stridsvogn simulert ved ulike avstander: a) Nært hold, b) støy, c) bildeelementer, d) større avstand, e) stor avstand, f) forvekslingsobjekter.

Felles for de fleste modellene er at de tar utgangspunkt i en temperaturdifferanse mellom mål og bakgrunn, ΔT . På grunn av effekter som absorpsjon og spredning svekkes strålingskontrasten mellom mål og bakgrunn gjennom atmosfæren mellom målet og sensoren. Ofte antas at absorpsjonen er uavhengig av bølgelengde og en midlere verdi for transmisjonen i atmosfæren, τ , brukes. Tilsynelatende temperaturforskjell ved sensoren i en avstand R fra målet, ΔT_R , blir med å anta en midlere absorpsjonskoeffisient $\Delta T_R = \tau^R \Delta T$. For klart vær brukes ofte verdien $\tau = 0.9 / km$, dvs temperaturforskjellen reduseres til 90 % for hver kilometer avstand til målet (se Figur 3.3).



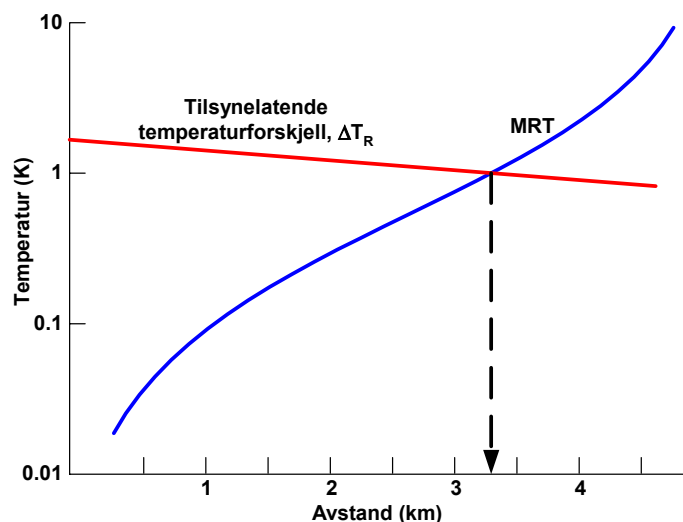
Figur 3.3 ΔT_R som funksjon av avstand.

Termiske avbildende systemer kan blant annet karakteriseres ved en funksjon kalt MRT (Minimum Resolvable Temperature: Minste oppløsbare temperatur). Denne funksjonen angir systemets minste oppløsbare temperatur som funksjon av målets vinkelutstrekning (se Figur 3.4). Funksjonen kalles også MRTD (minimum resolvable temperature difference) eller MDTD (minimum detectable temperature difference), men ofte utelates "difference" eller "differential" fordi det er underforstått at det refereres til målinger av differanser. For en gitt størrelse på målet kan vinkelutstrekning regnes om til avstand.



Figur 3.4 Vinkelutstrekning. Små objekter har mindre vinkelutstrekning enn store ved samme avstand. Når avstanden øker, minker vinkelutstrekningen.

MRT-funksjonen øker med avtagende vinkelutstrekning. Dette betyr at systemet kan se mindre temperaturdifferanser når målet er stort enn når det er lite, eller omsatt til avstand: Systemet kan se mindre temperaturdifferanser når målet er nære enn når det er langt unna. Største mulige deteksjonsavstand for et mål blir da den avstanden hvor systemets minste oppløsbare temperatur er lik den tilsynelatende temperaturdifferansen mellom mål og bakgrunn. Dette er illustrert i figuren nedenfor.

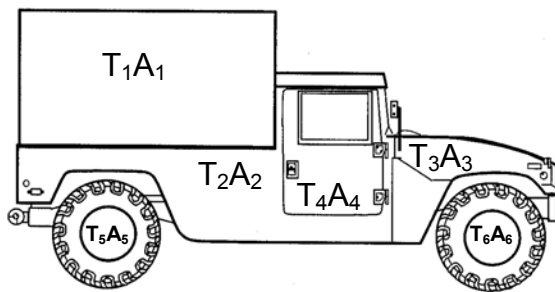


Figur 3.5 Deteksjonsavstand for typisk termisk system. Tilsynelatende temperatur $\Delta T_R = \tau^R \Delta T$ er en rett linje i et semi-logaritmisk koordinatsystem (Etter Holst (5)).

3.2 Hva er ΔT ?

For å beregne temperaturdifferansen mellom mål og bakgrunn, ΔT , brukes ofte en metode hvor målets overflate deles i arealer som antas å ha homogen temperatur. Deretter vektes temperaturen på arealene med arealenes størrelse og en gjennomsnittstemperatur beregnes, jf. Figur 3.6. Tilsvarende representeres bakgrunnen ofte ved en midlere temperatur og forskjellen mellom mål og bakgrunn reduseres til en enkelt faktor, ΔT .

Denne metoden har mange svakheter hvor den mest åpenbare kanskje er at et mål med et svært kaldt og et svært varmt område vil kunne få en ΔT lik null selv om målet har en svært røpende signatur. Studier har vist at det i mange tilfeller kan gi grunnlag for feil konklusjoner å basere en evaluering av et termisk sensorsystem på ΔT -beregninger når det ikke er tatt tilstrekkelig hensyn til spektral variasjon i flatenes strålingsintensitet, atmosfærens transmisjon og sensorens følsomhet (7).



$$T_{\text{middel}} = \frac{\sum_{i=1}^N A_i T_i}{\sum_{i=1}^N A_i}$$

Figur 3.6 Arealvektet temperatur.

Selv om det på tross av metodens mange svakheter til mange formål kan være tilstrekkelig å basere en analyse på arealvektet ΔT , må det tas hensyn til at ΔT varierer med mange forhold som

- Kjøretøyets retning.
- Kjøretøyets tilstand (motor av/på osv).
- Værforhold, sikt.
- Tid på døgnet.
- Kjøretøyets umiddelbare bakgrunn.

4 DETEKSJON, GJENKJENNING OG IDENTIFIKASJON

4.1 Observatøren

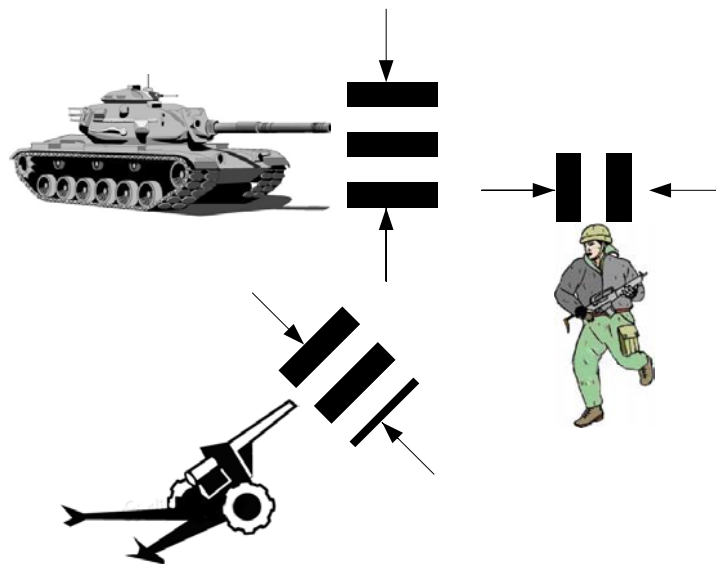
Ulikt responsen til en elektronisk krets, kan ikke responsen til en menneskelig observatør måles direkte, men må utledes av visuelle psykologiske eksperimenter. Det laveste nivået for oppløsningsevne (skjelning) er skjelningen mellom noe og ingenting, og mellom disse ytterpunktene ligger et kontinuum av skjelningsnivåer.

Noen ganger er visuell deteksjon enkelt å definere: Et fly kan lett detekteres mot en skyfri himmel, og meningen med deteksjon er klar. Deteksjon av et kjøretøy mot en sammensatt bakgrunn slik som en skog er vanskeligere. Her kan det være nødvendig å gjenkjenne kjøretøyet for å kunne si at det er detektert.

Ofte kan kontekstuell informasjon være til hjelp. En "fleck" på en vei kan antas å være et kjøretøy, mens den samme flekken på en åpen slette kan være hva som helst, med mindre den flytter seg. Et kjøretøy kan gjenkjennes eller til å med identifiseres av en trent observatør ved hjelp av karakteristisk utseende, posisjon og hastighet selv om sensorens oppløsning ikke er tilstrekkelig til å foreta klassisk automatisk mønstergjenkjenning. For eksempel, et objekt i bevegelse på en stor, dyp sjø er sannsynligvis en båt og ikke et fly eller en stridsvogn.

Identifikasjon er skjelning av et objekt på høyere nivå, og er siste trinn i en kompleks prosess. Første oppgave er å søke i synsfeltet for å finne objektet. Søk kan være tilfeldig eller systematisk, og varierer med observatørens trening og bakgrunn (8). Etter at et objekt er funnet brukes informasjon som størrelse og fasong som holdepunkter for deteksjon, gjenkjenning og identifikasjon. Sensorsystemets følsomhet og oppløsning eller en kombinasjon av disse innvirker på avstanden for de ulike nivåene av skjelning.

Johnson (9) la grunnlaget for det som i dag er standard metode for beregning av avstander for ulike nivåer av skjelning. Johnsons kriterier sier noe om hvor mange perioder i et stripemønster som må dekke et objekt for å oppnå ulike nivåer skjelning. Kriteriene gjelder ikke svært avlange objekter og refererer til et objekts minste karakteristiske dimensjon, uavhengig av orientering, se Figur 4.1.



Figur 4.1 Minste dimensjon er et objekts minste størrelse uavhengig av orientering (etter Holst (5) side 388).

Johnson delte skjelning inn i fire kategorier: deteksjon, orientering, gjenkjenning og identifikasjon. Han lot observatører se på skalamodeller av militære objekter gjennom en lysforsterker. Observatørene ble bedt om å detektere, orientere, gjenkjenne og identifisere objektene, og ved å sammenholde resultatene med observasjoner av et stripemønster etablerte Johnsen sammenhengen mellom bl a deteksjon av objekter og oppløsning av et stripemønster. Johnsons resultater er gjengitt nedenfor.

| Oppløsningsevne | Forklaring | Antall linjepar over målets minste dimensjon |
|-----------------|--|--|
| Deteksjon | Et objekt er i bildet (Signal vs støy) | 1.0±0.025 |
| Orientering | Objektets grad av symmetri og orientering kan skjelnes (side, front) | 1.4±0.35 |
| Gjenkjenning | Objektets klasse kan avgjøres (Stridsvogn, lastebil, person). | 4.0±0.80 |
| Identifikasjon | Objektets type kan spesifiseres (T-52 eller Leopard 2 stridsvogn) | 6.4±1.50 |

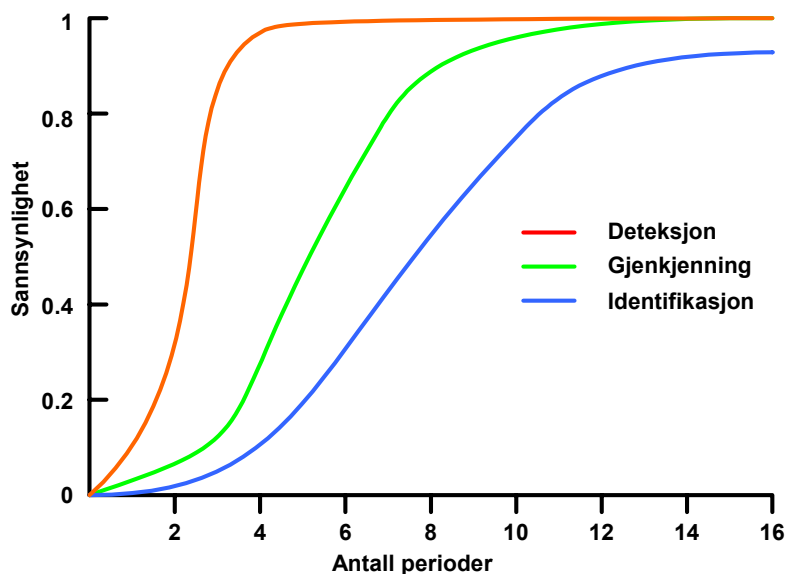
Tabell 4.1 Johnsons originale kriterier for ulike skjelningsnivåer. Resultatene bygger på observatørekseksperimenter med lysforsterkerutstyr (etter Holst (5), side 387).

Basert på Johnsons originale kriterier har studier av termiske kameraer ved NVL (Night Vision Laboratory, USA) vist at 8 linjepar er nødvendig for identifikasjon. NVLs kriterier for termiske kameraer kalles fortsatt Johnson-kriterier, og er gjengitt nedenfor.

| Oppgave | Forklaring | Antall linjepar over målets minste dimensjon |
|-----------------------|---|--|
| Deteksjon | "Flekken" er sannsynligvis objektet som søkes | 1,0 |
| Målfatning | Kan plassere trådkors på målet med tilstrekkelig nøyaktighet til å avfyre et missil. | 2,5 |
| Klassisk gjenkjenning | Målet sees med tilstrekkelig detaljer til at objektets klasse kan avgjøres, f eks stridsvogn | 4,0 |
| Identifikasjon | Målet kan sees med tilstrekkelig detalj til å avgjøre type innenfor en klasse, f eks T-72 ikke Leopard 2. | 8 |

Tabell 4.2 NVLs kriterier for ulike skjelningsnivåer ved bruk av termiske kameraer. Kriteriene er basert på Johnsons originale arbeid, og kalles derfor fortsatt Johnson-kriterier. NVLs kriterier er nå etablert som en industristandard (etter Holst (5), side 389).

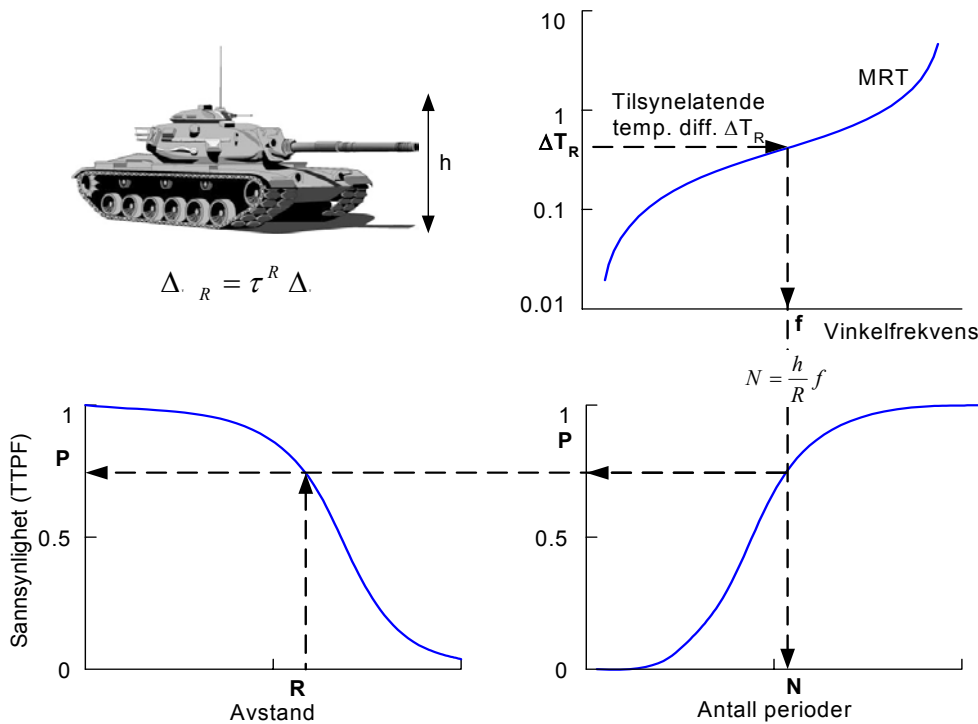
Tallene i tabellene Tabell 4.1 og Tabell 4.2 ovenfor er beregnet ut fra at 50 % av observatørene skal kunne utføre de gitte oppgavene, og antall perioder som gir 50 % sannsynlighet benevnes ofte N_{50} . Dersom den kumulative sannsynligheten for deteksjon, gjenkjenning og identifikasjon beregnes som funksjon av antall perioder over et mål får man det som kalles "Target Transfer Probability Function" (TTPF). Eksempler på TTPF for deteksjon, gjenkjenning og identifikasjon er gitt i Figur 4.2 nedenfor.



Figur 4.2 Eksempel på "Target Transfer Probability Function (TTPF)" for deteksjon, gjenkjenning og identifikasjon (etter Holst (5)).

Dersom man ønsker å beregne deteksjonsavstand eller sannsynlighet for en gitt skjelningsoppgave, må man ta hensyn til oppgavens vanskelighetsgrad, og justere kurvene (i praksis N_{50}) i Figur 4.2 i henhold til dette. En justering må baseres på eksperimentelle resultater, eventuelt en analogi til slike resultater eller tidligere erfaring. Uansett må resultater basert på en gitt TTPF-kurve betraktes som en representativ verdi, og ikke som en absolutt verdi.

TTPF kan benyttes for beregning av sannsynligheten for en gitt skjelningsoppgave som funksjon av avstand. Da velges en avstand R og $\Delta T_r = \tau^R \Delta T$ beregnes. Denne verdien skjærer MRT-kurven ved det som kalles den kritiske frekvensen. Når målets vinkelutstrekning er kjent kan antall perioder over målet beregnes. Ved hjelp av TTPF kan dermed sannsynligheten for f.eks deteksjon finnes for en gitt avstand. Deretter velges en ny avstand og prosessen repeteres til sannsynligheten for deteksjon er beregnet for alle interessante avstander. Denne metoden er illustrert i Figur 4.3.



Figur 4.3 Metode for å bestemme sannsynligheten for deteksjon som funksjon av avstand (Etter Holst (5)).

4.2 Clutter

Clutter beskrives ofte som en intensitetsvariasjon i bakgrunnen som har omtrent samme størrelse, intensitet og tekstur som objektet det søkes etter. Clutter kan være elementer i scenen som har samme kontrast og størrelse som målet, og som dermed må studeres i detalj som et mulig mål.

Johnson definerte deteksjon som det å se at det er et objekt tilstede i et bilde. Dersom det er clutterelementer i bildet må hvert potensielt mål studeres nærmere for å avgjøre om det er det virkelige målet eller ikke. Dette tilsvarer Johnsons definisjon av gjengkjennning, men i litteraturen omtales dette ofte i forbindelse med søk som deteksjon.

I analysen ovenfor er det antatt at målet er i bildets senter eller at observatøren vet hvor i bildet målet er. Vi kaller dette statisk deteksjon. I en scene med clutter må en observatør søke i bildet etter målet, og sannsynligheten for deteksjon er avhengig av tiden observatøren har til å søke. Sannsynligheten for deteksjon kan defineres til å være sannsynligheten for statisk deteksjon multiplisert med sannsynligheten for å finne målet etter tiden t . Matematisk formulert:

$$P_d(t) = P_{statisk} P_{søk}(t), \text{ hvor } P_{søk}(t) = P_{\infty} (1 - e^{-P_{\infty} t / \Omega}),$$

hvor Ω er midlere deteksjonstid for en gruppe av observatører.

I et generalisert tilfelle hvor observatørene gis så lang tid til å studere bildet som de ønsker kan den midlere deteksjonssannsynligheten skrives

$$P_d = P_{statisk} P_\infty \text{ hvor } 0 < P_\infty < 1. \quad (4.1)$$

Sannsynligheten for å detektere et mål i en scene med clutter er altså sannsynligheten for statistisk deteksjon multiplisert med en faktor $0 < P_\infty < 1$. Som et resultat av dette kan sannsynligheten for ulike nivåer skjelling beregnes som diskutert i kapittel 4.1, men med et justert nivå for N_{50} .

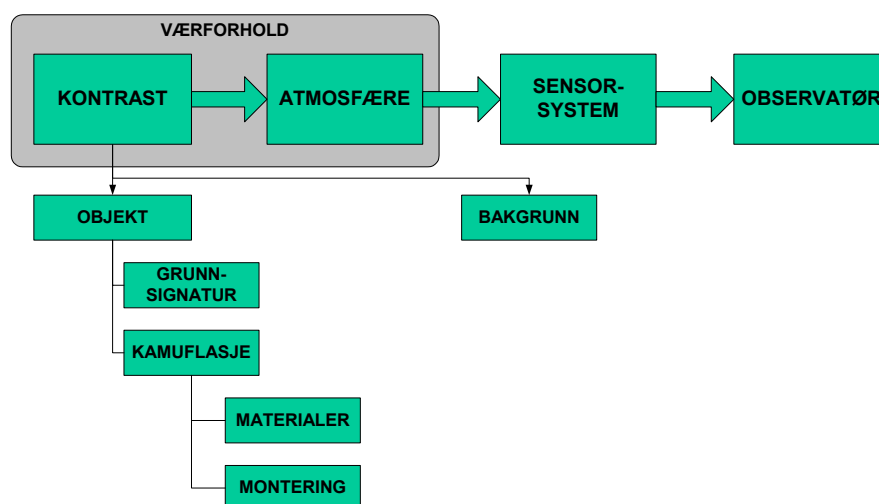
Schmieder og Weathersbye (10) har karakterisert clutternivået i tre nivåer, lavt, moderat og høyt. De normaliserte TTPF-kurven til tilfeller for moderat clutter, og fant god overensstemmelse med eksperimenter ved å multiplisere N_{50} med hhv 0.5, 1.0 og 2.5 for de tre nivåene.

En justering av N_{50} slik som foreslått ovenfor krever erfaring med observatørtester og et mål for clutternivået eller en metode for å karakterisere kontrasten mellom mål og bakgrunn som tar hensyn til clutter. Det er foreslått mange slike måter å karakterisere ulikhetene mellom mål og bakgrunn på (metrikker) som ikke kun benytter ΔT , men fordi ΔT passer så godt inn i de etablerte metodene som bygger på MRT-funksjonen som er beskrevet ovenfor er det denne som tross alle svakheter er dominerende (11,12,13,14). Gerhart med flere evaluerte i 1993 (15) ni forskjellige modifiserte ΔT -formuleringer og konkluderte med at en beskrivelse av mål/bakgrunn som bygger på enkle parametere som middelvei og standardavvik er utilstrekkelig når mål eller bakgrunn har intern tekstur eller det er clutter i bakgrunnen.

5 ULIKE UTGANGSPUNKT FOR KRAVFORMULERINGER

Diskusjonen i kapitlene 3 og 4 har vist at det finnes et teoretisk begrepsapparat og metoder for beregning av termiske avbildende sensorsystemers ytelse. Disse metodene baserer seg, svært enkelt sagt, på deteksjon av et stripemønster mot en homogen bakgrunn, og det er påvist at metodene har store svakheter når det gjelder deteksjon i mer realistiske situasjoner. Som et forsøk på en oppsummering kan det hevdes at metodene er egnet for karakterisering av sensorsystemers ytelse under idealiserte forhold, men utilstrekkelig til beregning av sannsynligheten for ulike nivåer skjelling under realistiske forhold. De standardiserte metodene som finnes for evaluering av sensorsystemer er altså uegnet for evaluering av kamuflasjesystemer, og andre utgangspunkt og metoder må søkes (16).

Figur 5.1 nedenfor viser en skjematisk fremstilling av ulike elementer i problemkomplekset omkring deteksjon og kamuflasje. Det avgjørende målet på kamuflasjeeffektivitet er hvor vanskelig det er for en observatør å detektere og gjenkjenne et mål i et realistisk scenario. Dette involverer dermed kjeden fra kontrast mellom mål og bakgrunn, transmisjon i atmosfæren, sensorsystemet og til sist observatøren selv. Men da det er kamuflasjeeffektiviteten som skal optimaliseres er det kontrasten mellom mål og bakgrunn som er av interesse.



Figur 5.1 Skjematisk fremstilling av problemkomplekset omkring deteksjon og kamuflasje.

Målets signatur kan brytes ned til to komponenter, nemlig målets grunnsignatur uten kamuflasje og kamuflasjesystemet selv. Kamuflasjesystemets ytelse bestemmes av kamuflasjematerialets egenskaper, hvordan kamuflasjesystemet er konstruert og montert på objektet det skal beskytte og hvordan objekt og kamuflasjesystem påvirkes av hverandre.

Nedenfor diskuteres forskjellige metoder for evaluering av kamuflasjematerialer og –systemer som tar ulike utgangspunkt i den skjematisk fremstillingen i Figur 5.1.

5.1 Feltnmålinger

5.1.1 Stridsøvelser

Det mest realistiske målet for et kamuflasjesystems effektivitet fås ved å gjennomføre realistiske stridsøvelser hvor avdelinger på bakken og eventuelt luftstyrker opererer realistisk. For bakkeavdelingene vil dette blant annet bety å utnytte terreng for å gi skjul mot observasjon. En pilot i et angripende kampfly eller kamphelikopter vil måtte søke i et relativt stort område, avhengig av hvilke etterretningsinformasjon han har, og målet han søker vil ofte helt eller delvis være skjult av terreng eller vegetasjon. Hvorvidt og ved hvilken avstand piloten detekterer målet bestemmes dermed ikke kun av kamuflasjesystemets effektivitet alene, men snarere i hovedsak av målets tilfeldige posisjon og grad av skjul.

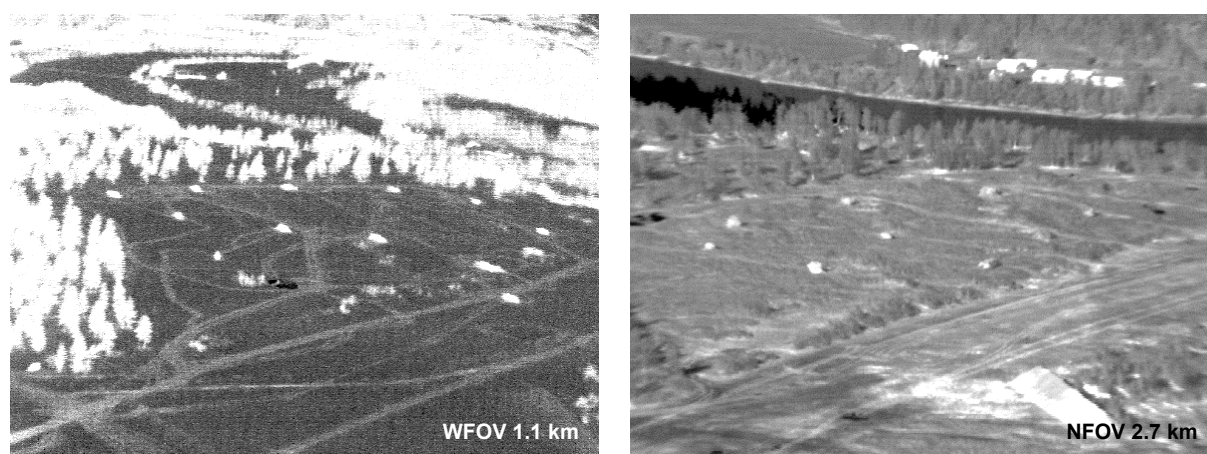
Allikevel gir metoden et realistisk inntrykk av hvor vanskelig eller eventuelt lett det er å oppnå deteksjon av målet, og slik informasjon er svært nyttig for mannskapene selv å inneha blant annet som grunnlag for øving og formulering av stridstaktikk. Informasjonen har også stor nytteverdi som inngangsverdier i forbindelse med stridsspill og simuleringer.

Som metode for test og evaluering av kamuflasjeeffektivitet er metoden mindre egnet siden det er vanskelig å isolere kamuflasjesystemets innvirkning på resultatet, og ikke minst fordi metoden er resurskrevende ved at den krever mye mannskap og materiell både i lufta og på bakken.

5.1.2 Deteksjonsavstand

Det mest nærliggende måltallet for kamuflasjeeffektivitet er deteksjonsavstand. Jo kortere deteksjonsavstanden er, jo vanskeligere er det å avsløre et kamuflert objekt. I duellsituasjoner er det dessuten slik at egne sjanser for å vinne avhenger sterkt av at en motstander må innenfor rekkevidden til eget våpen før man blir oppdaget.

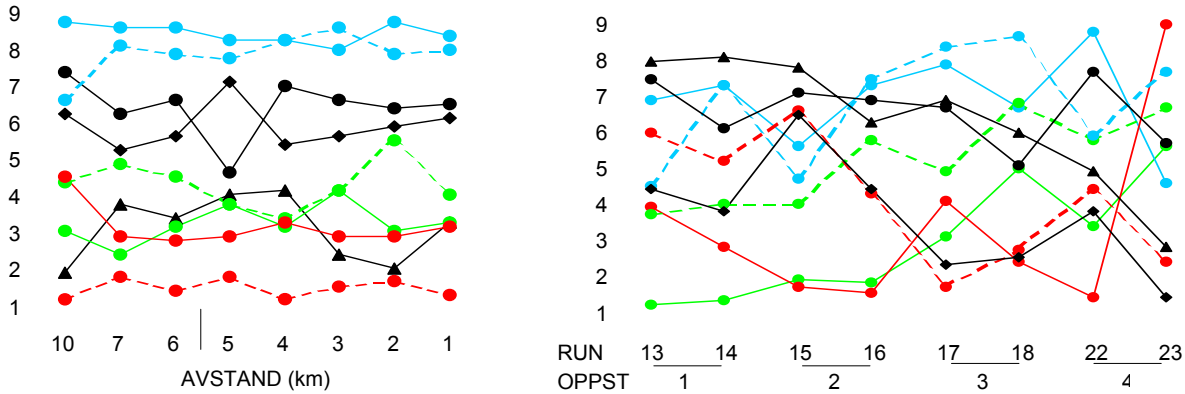
Ved målinger av deteksjonsavstand stilles vanligvis et antall kjøretøyer opp slik at det sikres fri sikt på avstander større enn det som er forventet deteksjonsavstand. Det vanlige er at sensoren er om bord i et fly eller helikopter fordi på den måten kan sensoren føres i rett linje og med jevn hastighet mot målet. Målets posisjon må være kjent for piloten og operatøren av sensoren, og ofte gjøres det videoopptak slik at flere observatører kan analysere opptakene i ettertid (17). Figur 5.2 nedenfor viser eksempler på termiske bilder fra en slik oppstilling (18,19).



*Figur 5.2 Termisk bilde av forsøksfelt med kjøretøyer tatt på avstander som angitt (18).
Til venstre: opptak med vidt synsfelt (snødekket bakke).
Til høyre: opptak med smalt synsfelt.*

Ved denne typen eksperimenter er måleresultatet avhengig av en rekke faktorer slik som målets umiddelbare bakgrunn, rådende værforhold, solens posisjon, sikt, anvendt sensorsystem og -plattform og observatørens erfaring. Ved å øke antallet observatører kan usikkerheten knyttet til observatørens innvirkning på resultatet reduseres, men forsøk har vist at usikkerheten knyttet til objektets umiddelbare bakgrunn spiller en vel så viktig rolle (20). Uansett hvor samvittighetsfullt eksperimentet utføres, vil det på grunn av begrensninger i antall bakgrunner og variasjon i værforhold i praksis alltid være slik at allmenngyldigheten av resultatene kan bestrides. Selv om metoden har alvorlige svakheter når det gjelder å gi statistisk representative deteksjonsavstander, er metoden velegnet til å gjøre sammenlignende målinger. Ved å sammenligne deteksjonsavstandene til f.eks. like kjøretøyer med forskjellige typer kamuflasje, kan kamuflasjeeffektiviteten til de ulike alternativene rangeres. Gjentas målingene for ulike vær-situasjoner, kan et robust grunnlag for rangering av effektiviteten til konkurrerende kamuflasjesystemer oppnås. Men også når metoden anvendes slik er det svært viktig å vurdere usikkerheten i målingene slik at det ikke gis konklusjoner det ikke er grunnlag for.

Et alternativ til å bestemme deteksjonsavstanden til ulike mål, er å rangere målenes signaturer ved et antall valgte avstander. Rangeringen kan enten gjøres av observatører eller av automatiske beregningsalgoritmer. Eksempler på rangering gjort av observatører er gitt i Figur 5.3 nedenfor (18).



*Figur 5.3 Et eksempel på resultater fra rangering av kjøretøysignaturer (18).
Til venstre: gjennomsnitt for 8 observatører foretatt på opptak fra 8 forskjellige avstander i samme run.
Til høyre: gjennomsnitt for en observatør for alle observasjonsavstander for hvert av de angitte run.*

Av figuren går det frem at én observatør rangerer de ulike signaturene ulikt ved ulike avstander (høyre), og videre at gjennomsnittlig rangering blant mange observatører varierer med kjøretøyenes posisjon på forsøksfeltet og orientering i forhold til sensoren (venstre). Som nevnt ovenfor må det derfor utvises forsiktighet ved tolking av resultatene slik at det ikke gis konklusjoner det ikke er statistisk grunnlag for.

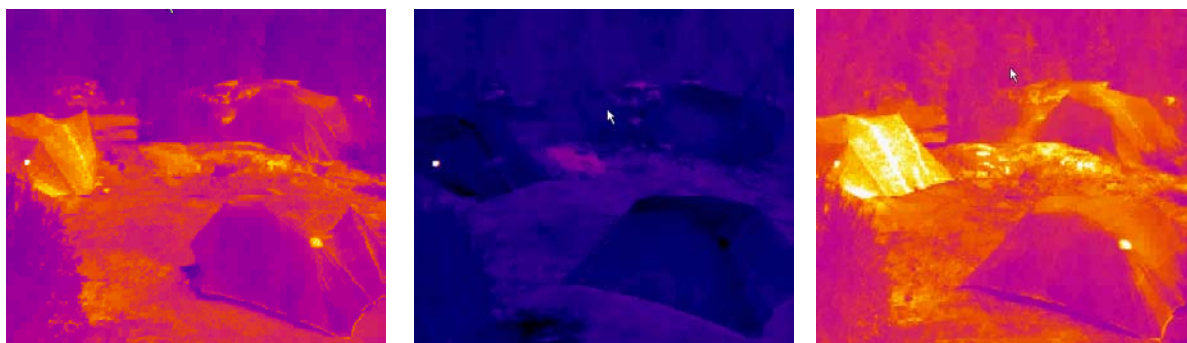
Et alternativ til å benytte observatører til å rangere hvor avslørende de ulike målsignaturene er, er å benytte automatiske datamaskinbaserte algoritmer. En enkel metode kan være at en operatør angir posisjonen til hvert enkelt mål og at algoritmen beregner målets midlere temperatur. Men det er ikke sikkert at bruk av midlere temperatur som måltall gir resultater som er sammenfallende med rangeringen en observatør ville gi siden en menneskelig observatør også tar hensyn til andre egenskaper ved målet slik som kontrast langs randen og tekstur (21). Det må derfor vurderes om slike egenskaper må tas med i beregningene. Fordelene ved å benytte datamaskinbaserte metoder er at resultatene er objektive og reproducerbare, mens ulempen er at resultatene blir sterkt avhengige av algoritmene som benyttes.

Det er også gjort forsøk med automatiske deteksjonsalgoritmer av varierende kompleksitet. I slike tilfeller finner algoritmene selv målene og angir deteksjonsavstand samt et måltall for hvor rørende en signatur er (22,23). En usikkerhet med å anvende slike metoder er hvorvidt resultatene kan korreleres til forsøk med observatører, og det vil kreve stor forskningsinnsats i årene fremover for å eventuelt etablere en slik sammenheng.

5.1.3 Temperaturkontrast

Som diskutert i kapittel 3 er temperaturkontrasten mellom mål og bakgrunn, ΔT , en viktig størrelse i beregninger av deteksjonsavstand. En liten temperaturforskjell mellom mål og bakgrunn gir liten sannsynlighet for deteksjon, eventuelt kort deteksjonsavstand. Ved å benytte ΔT som mål på kamuflasjeeffektiviteten fjernes mange av usikkerhetsmomentene knyttet til å bruke deteksjonsavstand som måltall fordi det ikke er nødvendig å ta i betraktning effekter som skyldes atmosfæren, sensorsystemet og observatøren. Men også temperaturkontrasten er avhengig av værforholdene, og for å oppnå et statistisk robust datagrunnlag må det gjøres målinger over en stor variasjon i værforhold. I praksis betyr dette at målingene må foregå over lang tid.

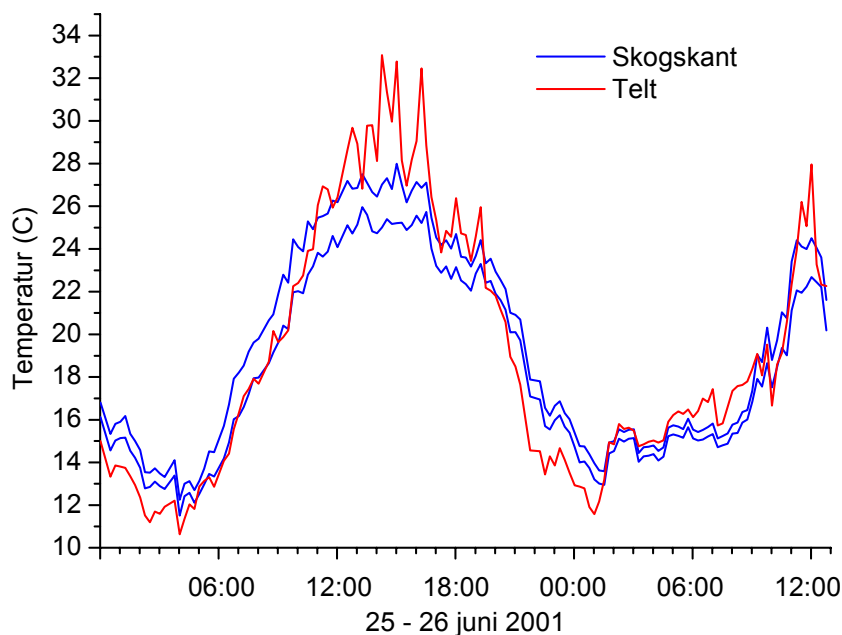
Enkelt sagt lar dette seg gjennomføre ved å sette et IR-kamera på et stativ, og programmere det til å gjøre registreringer av mål og bakgrunn f.eks hver time over en lang periode (24,25). Dette gir et utgangspunkt for å beregne temperaturkontrast mellom mål og bakgrunn under ulike meteorologiske forhold, se Figur 5.4. Slike langvarige målinger lar seg vanskelig gjennomføre for en stor variasjon av bakgrunner, men alternativt til å måle temperaturene i bakgrunnen kan modellberegninger benyttes.



Figur 5.4 Figuren viser eksempler på termiske registreringer av tre ulike kamuflasjematerialer på forskjellige tidspunkt. Dersom slike registreringer av mål og bakgrunn gjøres over en stor variasjon i meteorologiske forhold, gir metoden grunnlag for vurderinger av de ulike materialenes kamuflasjeeffektivitet. Bildene har samme temperaturskala.

FFIs prosjekt 775 – Termisk signaturreduksjon – har utviklet modeller for beregning av overflatetemperaturen til forskjellige bakgrunns-elementer som trær, lyng, fjell og grusvei under varierende værforhold (26,24). Målinger eller eventuelt beregninger av overflatetemperaturen til et kamuflert objekt (27) kan dermed sammenholdes med modellberegninger av bakgrunnstemperaturene og gi grunnlag for beregninger av kamuflasjeeffektivitet. Et mål på kamuflasjeeffektiviteten kan da være midlere temperaturavvik mellom mål og bakgrunn over en periode, eller andel av tiden målets temperaturdifferanse til bakgrunnen er under en gitt verdi (28).

Figur 5.5 viser et eksempel på temperaturvariasjon i mål og bakgrunn over en tidsperiode.



Figur 5.5 Eksempel på temperaturvariasjon i mål og bakgrunn. Temperaturen i bakgrunnen varierer mellom en øvre og nedre verdi som beskriver et "temperaturbånd". Et mål på kamuflasjeeffektivitet kan være andel av tiden målets temperatur er innen temperaturbåndet til bakgrunnen. Alternativt kan midlere temperaturforskjell mellom mål og bakgrunn beregnes.

Et viktig spørsmål er her hvordan temperaturvariasjonen til bakgrunnen skal beregnes. Det kan hende at temperaturen til objektet er innenfor variasjonen til for eksempel trær en del av tiden og innenfor variasjonen til lyng til andre tider. Det kan også tenkes at det er clutterelementer i scenen, slik som store steiner eller lignende. Selv om ideen med å beregne temperaturavvik mellom objekt og bakgrunn er forlokkende enkel, er det altså problemer knyttet til hvordan bakgrunns-temperaturene skal beregnes.

Midlere temperaturavvik, $\overline{\Delta T}$, kan beregnes etter formelen $\overline{\Delta T} = \frac{1}{N} \sum_N |T_{\text{Objekt}} - T_{\text{Bakgrunn}}|$,

hvor T_{Bakgrunn} er temperatur i bakgrunnen og T_{Objekt} er målets temperatur. Summasjonen er over N tidsintervall. T_{Bakgrunn} og T_{Objekt} kan beregnes på forskjellige måter, f eks som en arealvektet midlverdi, jf. avsnitt 3.2.

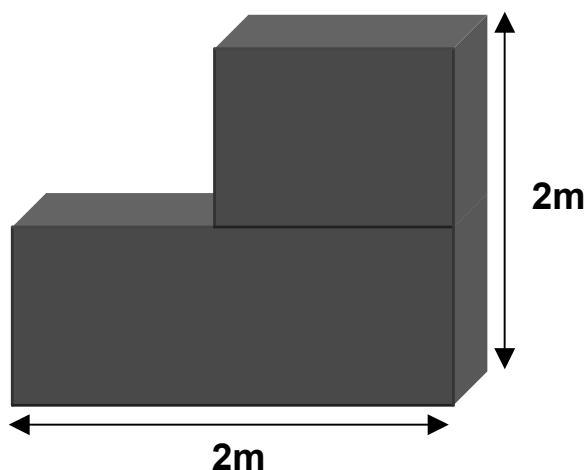
Med definisjonen av $\overline{\Delta T}$ ovenfor kan det tenkes tilfeller hvor to kamuflasjesystemer har samme $\overline{\Delta T}$, men hvor det er stor forskjell i hvor røpende signaturene er (jf. Kapittel 3.2). Det finnes andre metoder (metriker) for beregning av kontrast mellom mål og bakgrunn som tar hensyn til intern struktur (tekstur) og kontrast langs randen av målet (29), men det er ikke etablert en sammenheng mellom disse metrikkene og sannsynligheten for deteksjon slik det for arealvektet ΔT .

Det kan også sies å være en svakhet ved temperaturkontrast-metoden at den kun gir resultater for en fast observasjonsavstand, men dersom siktforholdene er kjent kan effektiv temperaturkontrast for andre avstander beregnes. Dersom temperaturforskjellen mellom målet og bakgrun-

nen er et godt mål for kamuflasjeeffektiviteten, er ikke avstanden til målet lenger av særlig interesse ved vurdering av kamuflasjeeffektivitet. Da er det temperaturforskjellene mellom mål og bakgrunn på kort hold som er avgjørende, og tilsynelatende eller effektiv temperaturforskjell ved andre avstander kun av interesse dersom temperaturkontrasten skal relateres til deteksjonsavstand eller deteksjonssannsynligheter.

Når et kamuflasjemateriale eller kamuflasjesystem brukes over eller på et kjøretøy kan det være vanskelig å kontrollere hvor mye av overflatetemperaturen som skyldes varme generert inne i kjøretøyet av motor eller varmeapparat. Dette usikkerhetsmomentet kan fjernes dersom kjøretøyet erstattes av et standardisert mål hvor overflatetemperaturen eller den internt genererte varmeeffekt kan kontrolleres, men da fjernes også muligheten til å relatere måleresultatene til et virkelig kjøretøy dersom ikke den indre genererte varmen i kjøretøyet er kjent. Metoden kan da benyttes for å studere og sammenligne egenskapene til kamuflasjematerialer.

Et eksempel på et slikt standardisert mål er "CUBI" som opprinnelig ble tatt i bruk for validering av simuleringsprogrammet PRISM (se Figur 5.6), og som senere er brukt som modell for et forslag til standardisert mål utarbeidet av en NATO arbeidsgruppe (AC225/LG6-SG7, Counter-surveillance¹).



Figur 5.6 CUBI.

Dersom testmålet skal illudere et militært kjøretøy, må det ha de samme termiske egenskapene og den samme indre genererte varme som kjøretøyet. Sanders (30) har vist at de termiske egenskapene til tykke stål- eller aluminiumsplater kan reproduseres med god nøyaktighet ved å bruke vannfylte kammer av en viss tykkelse. Kammerets tykkelse beregnes ut fra tykkelsen og materialeegenskapene til platene som skal simuleres. Indre generert varme kan simuleres ved hjelp av varmeelementer dersom varmen generert internt i kjøretøyet er kjent.

Kort oppsummert kan det sies at temperaturkontrast mellom mål og bakgrunn kan være et alternativ til deteksjonsavstand som måltall for kamuflasjeeffektivitet. Det finnes ved FFI og andre

¹ Nato Army Armaments Group, Panel 6 On Battlefield Surveillance, Target Acquisition, Night Observation, Counter-Surveillance and Electronic Warfare, Subpanel 7 on Counter-Surveillance.

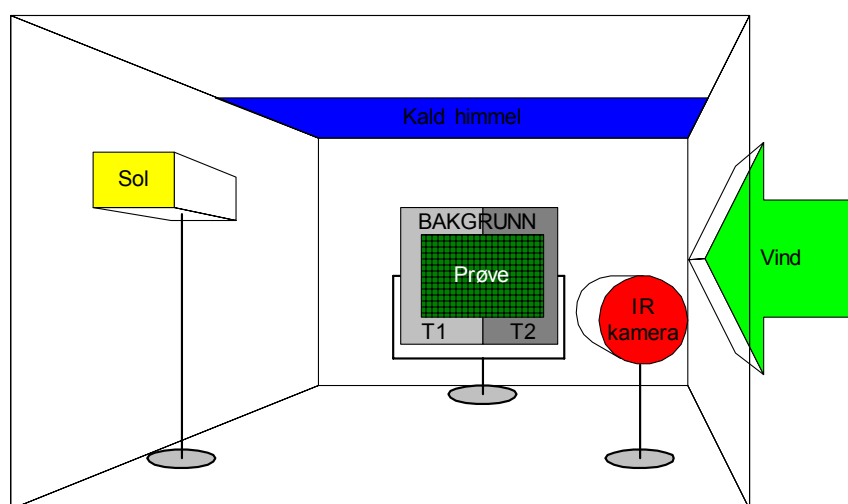
institutter kunnskap om enkeltdeler av det som kan bli en metode for evaluering av kamuflasje-effektivitet basert på temperaturkontrast, men det er ikke gjort systematiske forsøk på å etablere en kvantitativ sammenheng. Slike systematiske undersøkelser må gjøres før alle fordeler og ulemper ved metoden kan avklares.

5.2 Lab-målinger

I de foregående avsnittene har diskusjonen beveget seg fra forsøk med avdelinger som opererer realistisk til målinger på kamuflasjematerialer over standardiserte referansemål. Disse metodene baserer seg på målinger utendørs, noe som gjør det vanskelig eller ressurskrevende å gjøre målinger under ønskede værforhold eller en tilstrekkelig variasjon i værforhold.

5.2.1 Klimakammer

Et alternativ til utendørs målinger er å simulere realistiske utendørs forhold innendørs i et klimakammer. Et hovedelement i et slikt klimakammer er simulering av en himmel med varierende temperatur. ”Himmeltemperaturen” varierer utendørs mellom tilnærmet lufttemperatur når det er overskyet og kan være så kald som -60°C ved klar himmel. Også solinnstråling må kunne simuleres realistisk både mht intensitet og romlig og spektral fordeling. I tillegg må lufttemperatur, luftfuktighet og vindhastighet kunne reguleres. Et eksempel på et slikt klimakammer er bygd av det tyske forskningsinstituttet FGAN-FOM, og Figur 5.7 viser en skjematisk fremstilling av komponentene i et klimakammer.



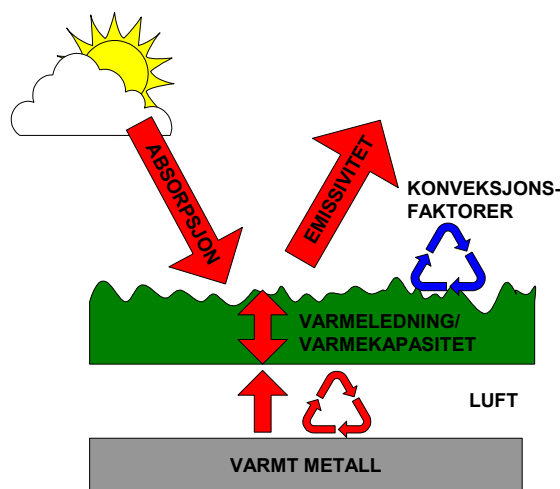
Figur 5.7 Skjematisk fremstilling av måleoppstilling i innendørs klimakammer.

Det ideelle ville være å bygge et klimakammer som er stort nok til å romme et kjøretøy, men dette er neppe praktisk gjennomførbart, og det er derfor mest aktuelt å bruke et klimakammer til å teste materialer. En aktuell måleoppstilling er å plassere kamuflasjematerialet som skal testes over en varm metallflate, og så registrere kamuflasjematerialets tilsynelatende temperatur med termisk kamera. Ved å benytte et dreiebord kan innsynsvinkel, innfallsvinkel for solinnstråling og retning i forhold til himmel og vind varieres.

Dersom temperaturen til ulike bakgrunnelementer er kjent for ulike vær-situasjoner kan kamuflasjematerialets overflatetemperatur sammenholdes med forventet bakgrunnstemperatur, og det er mulig å gjøre vurderinger av kamuflasjeeffektivitet. FFI har, som tidligere nevnt, i prosjekt 775 – Termisk signaturreduksjon – utviklet modeller for beregning av overflatetemperatur til ulike bakgrunnelementer, og kombinasjonen av klimakammer og beregningsmodeller som metode for måling av kamuflasjeeffektivitet vurderes i FFI-prosjekt 843 – Deteksjon og kamuflasje.

5.2.2 Materialparametere

Formålet med termisk kamuflasje er å tilpasse et kjøretøys overflatetemperatur til temperaturvariasjonen i bakgrunnen. Den vanligste bakgrunnen er vegetasjon (i hvert fall i Norge), og det perfekte kamuflasjemateriale vil for alle værforhold anta samme temperatur som vegetasjonen omkring. For å få dette til uten aktiv regulering av temperaturen, må kamuflasjematerialets egenskaper tilpasses slik at dette oppnås i best mulig grad. I andre typer terreng kan stein eller sand forekomme hyppigst og det mest effektive vil være om kamuflasjematerialet inntar samme temperatur som disse bakgrunnelementene. Siden sand og vegetasjon har ulike termiske egenskaper må også de termiske egenskapene til kamuflasjematerialet være forskjellige avhengig av hvilken bakgrunnstype som skal etterlignes. I det følgende diskuteres kort de ulike parametere som er bestemmende for et materiales termiske egenskaper (se Figur 5.8).



Figur 5.8 Parametere som bestemmer de termiske egenskaper til kamuflasjematerialer.

For et kamuflasjemateriale som skal benyttes på kjøretøyer er en hovedoppgave å isolere varmen fra kjøretøyets overflate. I denne sammenhengen er materialets varmeledningsevne (eller isolasjonsevne) og varmekapasitet viktig. Varmeledningsevnen er bestemt av hvor mye varme som ledes gjennom materialet pr tidsenhet, og varmekapasiteten bestemmes av mengden energi (varme) som skal til for å øke materialets temperatur.

En annen viktig varmekilde er solen. Hvor mye av solstrålingens energi som absorberes av materialet bestemmes av absorpsjonskoeffisienten. Absorpsjonen varierer med bølgelengden på lyset, men generelt absorberer visuelt mørke flater mer av sollyset enn lyse flater. Varmeledningsevnen og varmekapasiteten er også avgjørende for hvordan solstrålingen påvirker materia-

lets temperatur. Et materiale med liten varmeledningsevne vil f.eks. varmes raskt opp av solen fordi solenergien ikke ledes vekk fra overflaten. Hva som er optimal varmeledningsevne for et kamuflasjemateriale er derfor en avveining mellom isolasjon av varme fra kjøretøyet som skal kamufleres og hensynet til soloppvarming av materialets ytre overflate.

Kamuflasjematerialet absorberer stråling fra himmelen og omgivelsene omkring, samtidig som det selv også sender ut termisk stråling med intensitet som varierer med temperaturen. Hvor mye av den termiske strålingen som absorberes av materialet er bestemt av absorpsjonskoeffisienten α for termisk stråling, som for et ikke transparent materiale er lik den termiske emissiviteten ε . Emissiviteten er igjen relatert til refleksiviteten ρ ved at $\rho + \varepsilon = 1$. Refleksiviteten bestemmer hvor stor andel av den termiske strålingen fra omgivelsene som reflekteres av materialets overflate. Siden overflaten selv også stråler er den strålingen som et termisk kamera ser en kombinasjon av stråling som er emittert fra overflaten og stråling fra omgivelsene som reflekteres av overflaten. Dersom en overflate har lav emissivitet, dvs. høy refleksivitet, og omgivelsene som speiles har lavere temperatur enn flaten vil den tilsynelatende temperaturen som et termisk kamera registrerer være lavere enn overflatens fysiske (kontakt-) temperatur. Anvendelse av lav-emissive materialer kan altså bidra til å senke en overflates tilsynelatende temperatur. Men dette kan også ha uheldige konsekvenser: Ved klar himmel er himmeltemperaturen ned mot -60°C , og dersom en lav-emissiv overflate reflekterer strålingen fra en kald himmel kan den tilsynelatende temperaturen bli altfor lav i forhold til bakgrunnen og gi en svært røpende effekt. Et eksempel på dette er gitt i Figur 5.9.



Figur 5.9 Termisk bilde som illustrerer røpende effekt ved bruk av lav-emissivt materiale. Kamuflasjematerialet speiler en kald himmel, og flatens tilsynelatende temperatur blir mye lavere enn temperaturen i bakgrunnen.

Kamuflasjematerialet utveksler også varme med luften omkring (konveksjon), og hvor effektiv varmeovergangen mellom luft og materialet er avhenger av overflatens struktur og areal. Ofte benyttes frynser eller perforeringer for å øke den effektive overflaten til kamuflasjematerialer. På denne måten øker varmeovergangen til luft. Varmeovergangen drives enten av vind (tvungen konveksjon) eller av bevegelser i luften forårsaket av forskjeller mellom overflatens og luftens temperatur (fri konveksjon). I Tabell 5.1 nedenfor er de materialparameterne som er mest relevant for kamuflasjeegenskapene oppsummert.

Vegetasjon regulerer overflatetemperaturen ved å åpne og lukke porer på blader for på den måten å øke eller minske fordampning av vann. Slike aktive egenskaper kan tenkes implementert i kamuflasjematerialer, men aktiv styring av materialers egenskaper ligger utenfor temaet for denne rapporten.

| | |
|---|--|
| Isolasjonsevne: | Bestemmer hvor mye varme som ledes innenfra og ut til materialets overflate. |
| Varmekapasitet: | Bestemmer hvor mye varme som kreves for å endre materialets temperatur. |
| Kortbølget absorpsjon/reflektivitet: | Bestemmer hvor mye av energien i solstrålingen som absorberes/reflekteres. Absorbert energi bidrar til oppvarming av materialet. |
| Parametere for fri og tvungen konveksjon: | Bestemmer hvor effektivt overflaten utveksler varme med luften omkring. |
| Termisk emissivitet: | Bestemmer hvor effektivt overflaten avgir varme som varmestråling. Emissiviteten er relatert til termisk refleksivitet slik at en overflate med lav emissivitet i stor grad reflekterer varmestråling. En lav-emissiv overflate virker derfor som et speil for termisk stråling. For et materiale som ikke er transparent er emissiviteten lik absorpsjonskoeffisienten. |

Tabell 5.1 Viktige materialparametere.

5.3 Simulering av signaturer og overflatetemperaturer

Som diskutert i kapitlene 2.1 og 5.2 er en overflates temperatur bestemt av et samspill av en rekke varmetransportprosesser og materialets materialparametere. Overflatetemperaturer kan dermed beregnes dersom alle varmekilder og materialparametere er kjent. Rønning har for eksempel beskrevet enkle matematiske modeller for å beregne temperaturen til bygninger og kamuflasjenett under påvirkning av ulike værforhold (31,32). Disse modellene ble utviklet på slutten av 1970-tallet og var basert på svært enkle antagelser om overflatenes geometri.

De samme beregningsmodellene er selvsagt fremdeles gyldige, men i dag er det også tilgjengelig beregningsmodeller som baserer seg på en 3-dimensjonal beskrivelse av objektene. I disse geometriske representasjonene er hver flate tilordnet materialegenskaper og flatene er knyttet sammen for å ivareta varmeledning.

De mest kjente verktøyene for simulering av termisk signatur til kjøretøyer og terreng er RadTherm/MuSES (33) og NTCS/ShipIR (34). Disse modellene har også mulighet for å simu-

lere varmekilder slik som motorer, og er nå så sofistikerte at de genererer ”fotorealistiske” termiske bilder dersom den underliggende beskrivelsen av objektene (3D-tegning, materialparametere osv) er detaljert nok.

Men for å kunne benytte verktøyene til evaluering av kamuflasjetiltak er det viktige utfordringer som gjenstår. Kamuflasjematerialer er vanskelige å simulere fordi materialene ofte er perforert og ”frynsete”. Frynsene bidrar til økt konveksjon som er avhengig av frynsenes fasong og størrelse. Dette gjør konveksjonsparameterne vanskelige å bregne. Ytterligere kompliserende er det at kamuflasjematerialene ofte monteres med noe avstand til kjøretøyet, og dermed blir kamuflasjonens temperatur avhengig av hvordan luften mellom kjøretøy og kamuflasje beveger seg. Luftens bevegelse i rommet mellom kjøretøy og kamuflasje drives både av lokale temperaturskjeller og av vindfeltet omkring kjøretøyet, og dette er vanskelig å simulere med tilstrekkelig nøyaktighet for 3-dimensjonale geometrier som kjøretøy. Det kamuflerte kjøretøyets temperatur må videre sammenlignes med temperaturene i bakgrunnen. Det er derfor til liten hjelp at kjøretøyets signatur er nøyaktig simulert dersom temperaturene i bakgrunnen ikke er realistisk beregnet.

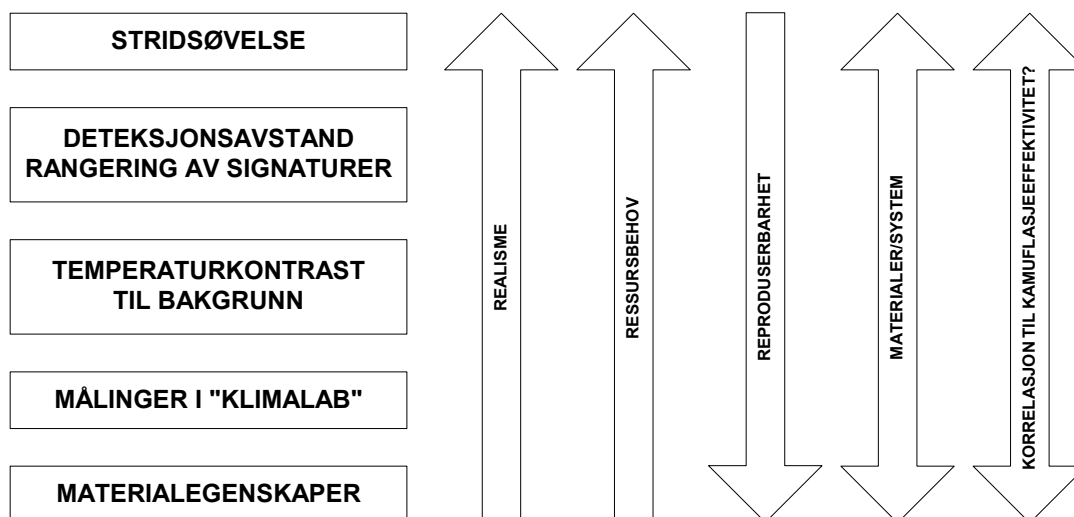
Et verktøy som CAMEO-SIM (35) (Defence Science and Technology Lab., UK) genererer fotorealistiske scener, men dette krever selvsagt en svært detaljert beskrivelse av scenen (søppel inn = søppel ut), og er svært regnekrevende.

En diskusjon av bruk av ulike simuleringsverktøy for beregning av kamuflasjeeffektivitet blir analog til diskusjonen av ulike målemetoder: De fotorealistiske verktøyene kan gi resultater med god nøyaktighet for en gitt scene, men generalisering av resultatene er vanskelig (jf. måling av deteksjonsavstand). Mindre detaljerte modeller kan gi resultater som statistisk sett er representative, men med en mer uklar sammenheng til kamuflasjeeffektivitet (jf. måling av materialparametere).

6 OPPSUMMERING

Ovenfor er diskutert noen eksempler på metoder for evaluering av kamuflasjematerialer eller kamuflasjesystemer. Metodene spenner fra realistiske stridsøvelser til laboratoriemåling av materialegenskaper og simuleringer, og de kan rangeres etter kriterier som realisme, ressursbehov eller reproducerbarhet av resultater. I hvilken grad de ulike målemetodene gir grunnlag for å korrelere måleresultater med kamuflasjeeffektivitet eller deteksjonsavstand er ikke avklart, men dette undersøkes både i FFIs prosjekt 843 – Deteksjon og kamuflasje – og internasjonalt.

Figur 6.1 viser en skjematisk rangering av ulike metoder for evaluering av kamuflasjeeffektivitet på ulike skalaer. Som det går frem av figuren er valg av metode en avveining mellom flere forhold. Avveiningen mellom realisme (nytte) og ressursbehov (kostnad) er velkjent, og enkel å klargjøre. Langt vanskeligere er vurderingen av metodenes korrelasjon til kamuflasjeeffektivitet.



Figur 6.1 Skjematisk rangering av ulike metoder for evaluering av kamuflasjeeffektivitet.

FFI-prosjekt 843 har som en av flere målsetninger å vurdere ulike metoder for formulering av krav til termisk kamuflasje. Det er ikke innenfor prosjektet målsetning å formulere slike krav, men snarere å anbefale en eller et fåtall metoder for nærmere vurdering. Hvilken metode som anbefales er ikke bare et resultat av rent faglige eller vitenskapelige vurderinger, men også mer pragmatiske hensyn må tas. En viktig faktor er i hvilken grad FFI og/eller Forsvaret i fremtiden vil drive utvikling og testing av kamuflasjematerialer og systemer, eller om det forventes å bli slik at behovet for testing vil begrenses til å avgjøre hva som er det beste alternative blant et mindre antall tilbydere av et kamuflasjesystem.

I sistnevnte tilfelle vil selv gjennomføring av ”stridsøvelser” eller omfattende målekampanjer kunne være hensiktsmessige metoder. I motsatt fall, dersom det blir et større behov for at FFI eller Forsvaret engasjerer seg i materialutvikling eller testing, vil behovet for etablering av andre målemetoder være nødvendig.

Litteratur

- (1) Lillesæter, O. (1990): Skandi-90, Avanserte kamuflasjefarger definert av FFI og FOA, FFI/Notat-90/4003, FFI
- (2) Forsvarets Standard: Nett, Kamuflasje (1995): FS 1080-0461, Hærens forsyningskommando
- (3) Olsen, F. B., Strømman, E., Søderblom, M., Gamborg, E. M., and Høimyr, T. (2002): FFI-prosjekt 843 - Deteksjon og kamuflasje, Prosjektavtale, FFI
- (4) Hadar, O., Sadot, D., Dror, I., Rotman, S. R., and Kopeika, N. S. (1995): Contrast-Limited Target Acquisition: Atmospheric and Motion Effects, Targets and Backgrounds: Characterization and Representation, Vol 2469, SPIE
- (5) Holst, Gerald C. (2003): Electro-Optical Imaging Systems Performance, JCD Publishing
- (6) Jacobs, Pieter A. (1996): Thermal Infrared Characterization of Ground Targets and Backgrounds, SPIE
- (7) Lauber, Yair Z. and Braun, David (2000): Correct Weighting of Atmospheric Transmittance and Target Temperature, Applied to IR Airborne Reconnaissance Systems, Targets and Backgrounds VI: Characterization and Representation, Vol 3062, SPIE
- (8) Snorrason, Magnús, Ruba, Harald, and Hoffman, James (1998): Modeling Cognitive Effects on Visual Search for Targets in Cluttered Backgrounds, Targets and Backgrounds IV: Characterization and Representation, Vol 3375, SPIE
- (9) Johnson, J. (1958): Analysis of Image Forming Systems, Proceedings of the Image Intensifier Symposium, U.S. Army Engineer Research and Development Lab
- (10) Schmieder, D. E. and Weathersby, M. R. (1983): Detection Performance in Clutter With Variable Resolution
- (11) Skjervold, J. (1995): Extensions of the US Night Vision Laboratory Static Performance Model for Thermal Viewing Systems on Structural Targets and Backgrounds in Cluttered Scenes, Targets and Backgrounds: Characterization and Representation, Vol 2469, SPIE
- (12) Drummond, O. E. (1996): Characteristics of the Acquisition of a Dim Target in Clutter, Targets and Backgrounds II: Characterization and Representation, Vol 2742, SPIE
- (13) Hilgers, J. H., Vockel, W. P., Reynolds, W. R., and Pickard, W. (1997): Sensor and Detection Algorithm Based Clutter Metrics, Targets and Backgrounds III: Characterization and Representation, Vol 3062, SPIE
- (14) Korn, A., Müller, M., and Sung, C.-K. (1997): Computer-Augmented Detection of Targets in Cluttered and Low-Contrast Backgrounds, Targets and Backgrounds III: Characterization and Representation, Vol 3062, SPIE
- (15) Gerhart, G. R., Meizler, T, Sohn, E. J., and Choe, H. (1993): The Evaluation of DT Using Statistical Characteristics of the Target and Background, Infrared Imaging Systems: Design Analysis, Modeling and Testing IV, Vol 1969, SPIE

- (16) Strømman, E. (2000): Field Trials Versus Other Methods for Camouflage Evaluation, Proceedings From the 11th Annual Ground Target Modeling and Evaluation Conference, Signature Research Inc.
- (17) Strømman, E. (1994): Detection of army targets with airborne FLIR - Results from trials at Terningmoen September 14-15, 1993, FFI/Rapport-94/00747, FFI
- (18) Strømman, E. and Olsen, F. B. (2001): Effekten av moderne kamuflasje for Leopard 1A5NO og BV206, FFI/Rapport-2001/03382, FFI
- (19) Clement, D. and Bartos, B. (1997): Statistical Evaluation of the Camouflage Effectiveness of Low Emissive Coatings, Targets and Backgrounds III: Characterization and Representation, Vol 3062, SPIE
- (20) Strømman, E. (2001): One Vs Several Observers in Evaluation of Thermal Camouflage, Proceedings From the 12th Annual Ground Target Modeling and Validation Conference, Signature Research Inc.
- (21) Strømman, E. (1997): Kamuflasje av KA-fort. resultater fra Forsøk 1 - SMP 6221, FFI/RAPPORT-97/00639, FFI
- (22) Birkemark, C. M. (1999): CAMEVA: A Methodology for Computerized Evaluation of Camouflage Effectiveness and Estimation of Target Detectability, Targets and Backgrounds V: Characterization and Representation, Vol 3699, SPIE
- (23) McManamey, J. R. (1997): Validation Plan for the German CAMAELEON Model, Vol 3062, SPIE
- (24) Olsen, F. B., Gamborg, E. M., Høimyr, T., Strømman, E., and Søderblom, M. (2001): Termisk signatur fra objekt og bakgrunn - Sluttrapport for prosjekt 775, FFI/Rapport-2001/05210, FFI
- (25) Strømman, E., Høimyr, T., Gamborg, E. M., and Olsen, F. B. (2001): An automatic station for measurement of meteorological parameters and thermal signatures, FFI/Rapport-2001/05402, FFI
- (26) Olsen, F. B. and Gamborg, E. M. (2003): Modelling the thermal signature of natural backgrounds, FFI/RAPPORT-201/05324, FFI
- (27) Rodgers, M. L. B., Vickers, A. F., Edwards, P. J., McComb, T. J. L., Tummey, S. P., and Turver, K. E. (1997): Diurnal Thermal Modelling of Camouflage Nets, Proc. of the 8th Annual Conf. on Ground Target Modelling and Validation, Signature Research Inc.
- (28) Jacobs, P. (1995): Experimental Evaluation of Thermal Camouflage Effectiveness, Targets and Backgrounds: Characterization and Representation, Vol 2469, SPIE
- (29) Lillesæter, O. (1993): Complex contrast, a definition for structured targets and backgrounds. *J.Opt.Soc.Am.A* 10:2453-2457
- (30) Sanders, Jeffrey S. (1998): A Novel Concept for the Emulation of Ground Target Diurnal Infrared Signature, Targets and Backgrounds IV: Characterization and Representation, Vol 3375, SPIE
- (31) Rønning, A. T. (1975): En-dimensjonal termodynamisk modell for beregning av overflate-temperatur i bygninger, Teknisk notat F-276, FFI

- (32) Rønning, A. T. (1979): Thermal modelling and measurement of selected net-camouflaged objects, Teknisk notet F-342, FFI
- (33) www.thermoanalytics.com/products/muses
- (34) Gamborg, E. M. and Søderblom, M. (2002): Modellering av termisk signatur med ShipIR, FFI-Rapport-2001/05447, FFI
- (35) Gilmore, M. A., Haynes, A., Filbee, D. R., and Stroud, C. A. (2003): Accurate Scene Modeling Using Synthetic Imagery, Targets and Backgrounds IX: Characterization and Representation, Vol 5075, SPIE