

KONFIDENSIELT  
i h t S-instruksen

i h. FFIE sikkerhetsinstruksen

Intern rapport E-240

Referanse: 251/134

Dato: Mai 1974

AVGRADERT

Dato: 11.11.09 Sign: SE

SIMULERING AV MÅLFØLGING OG BEREG-  
NING AV TREFFSANNSYNLIGHET FOR  
PENGUIN-RAKETT

av

E Bingen

Godkjent  
Kjeller 7 mai 1974



B Landmark  
Forskningsjef

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

KONFIDENSIELT  
i h t S-instruksen  
i h. t. Sikkerhetsinstruksen

KONFIDENSIELT  
i h t S-instruksen

i h. FFIE

Intern rapport E-240

Referanse: 251/134

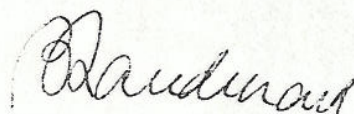
Dato: Mai 1974

SIMULERING AV MÅLFØLGING OG BEREG-  
NING AV TREFFSANNSYNLIGHET FOR  
PENGUIN-RAKETT

av

E Bingen

Godkjent  
Kjeller 7 mai 1974



B Landmark  
Forskningsjef

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

KONFIDENSIELT  
i h t S-instruksen  
i h. t. Sikkerhetsinstruksen

INNHALDSFORTEGNELSE

	Side	
1	INNLEDNING	3
2	SIMULERINGSMODELLENE	5
2.1	Målfølging	5
2.2	Penguin-rakett	8
3	SIMULERTE TAKTISKE SITUASJONER OG BRUKEN AV OBSERVASJONSMIDLENE	10
4	SIMULERINGSRESULTATER	13
4.1	Målfølgingsresultater	13
4.1.1	Resultater ved forskjellige sensorkombinasjoner	14
4.1.2	"Usikkerheten" i middelfeill og standardavvik	17
4.1.3	Virkingen av manøverlogikken	18
4.1.4	Vurdering av eget fartøys posisjon	19
4.2	Penguin se-sannsynlighet	20
4.2.1	Beregnete se-sannsynligheter	20
4.2.2	Degradering av se-sannsynligheten ved målmanøver	23
4.2.3	Diskusjon av usikkerheten i beregnede se-sann- synligheter	25
5	OPPSUMMERING	27
	Litteratur	30
Appendiks	Tegninger av taktiske situasjoner og simu- leringsresultater	31

SIMULERING AV MÅLFØLGING OG BEREGNING AV TREFFSANNSYNLIGHET FOR PENGUIN - RAKETT

SUMMARY

This report describes results from simulation of a multi-sensor firecontrol system. Target tracking results and hit-probabilities for the Penguin missile are presented for various target velocities and sailing patterns. The target tracking is performed with an Extended Bucy-Kalman filter that intergrates informations from various measuring devices. The following sensors have been used: Radar, TV and laser rangefinder.

(Simulation of target tracking and evaluation of hit probability for Penguin missiles)

1 INNLEDNING

Denne rapporten beskriver simuleringsresultatene for deler av et multi-sensor ildledningssystem som er tenkt benyttet i neste generasjons hurtiggående patruljebåter. De systemsimuleringene som er utført omhandler simuleringer av målfølgning og beregning av se-sannsynligheten for Penguin-raketter (sannsynligheten for at raketten får målet innenfor søkerens synsfelt). Treffsannsynligheten kan da finnes ved å multiplisere se-sannsynligheten med sannsynlighetene for tilfredsstillende sikt i IR-området, funksjonering av raketten, desisjon etter at målet befinner seg i søkerfeltet og treff etter at søkerlogikken har tatt desisjon. Verdier for disse sannsynlighetene er vanskelig å angi, men vurderinger (1) har vist at det er rimelig å anta at produktet av disse er 0,75.

I simuleringene er resultatene fra målfølgningen ildledningsdata ved simulering av Penguin-raketten. For å bestemme se-sannsynligheten som funksjon av tiden simuleres fyring av Penguin-raketter ved hvert observasjonstidspunkt. Resultatene av målfølgningen og se-sannsynlighetsberegningene er fremstilt grafisk. De taktiske situasjonene som er benyttet er også opptegnet.

Som nevnt er resultatene i denne rapporten fremkommet ved simuleringer. Den modellen som benyttes i simuleringene vil ikke være identisk med virkeligheten selv om dette tilstrebes når modellen formuleres. Det vil alltid gjøres forskjellige antakelser og approksimasjoner, som synes ubetydelige, for å komme fram til en praktisk brukbar modell. Simuleringsresultatene må derfor benyttes med det forbehold at de er fremkommet ved å benytte en ufullkommen modell.

Hensikten med disse simuleringene er ikke å vise hvor gode resultater det er mulig å oppnå, men heller å vise systemets egenskaper ved relativt kompliserte målbevegelser og et konservativt valg av observasjonsmidlenes målefeil.

Når det gjelder eget fartøy, er det valgt å la dette ligge i ro i alle simuleringene unntatt en. I denne ene simuleringen har eget fartøy konstant kurs og fart lik 15 m/s. Disse to "egenbevegelsene" er benyttet fordi det er naturlig at hurtiggående patruljebåter enten ligger i lurke-posisjon eller beveger seg med relativt stor fart. Eget fartøy ligger i ro i de fleste simuleringene fordi dette oftest stiller større krav til målfølgingslogikken.

Målet følger baner som er planlagt på forhånd. Det er således ikke tatt hensyn til eventuelle unnvikende manøvre som skyldes at målet har bestemt banen til en avfyrt rakett.

I enkelte tilfelle kan det være aktuelt også å følge egne fartøyer. Det er tatt med ett eksempel som viser at målfølgingslogikken også kan benyttes til dette selv om "målfartøyet" kommer meget nær.

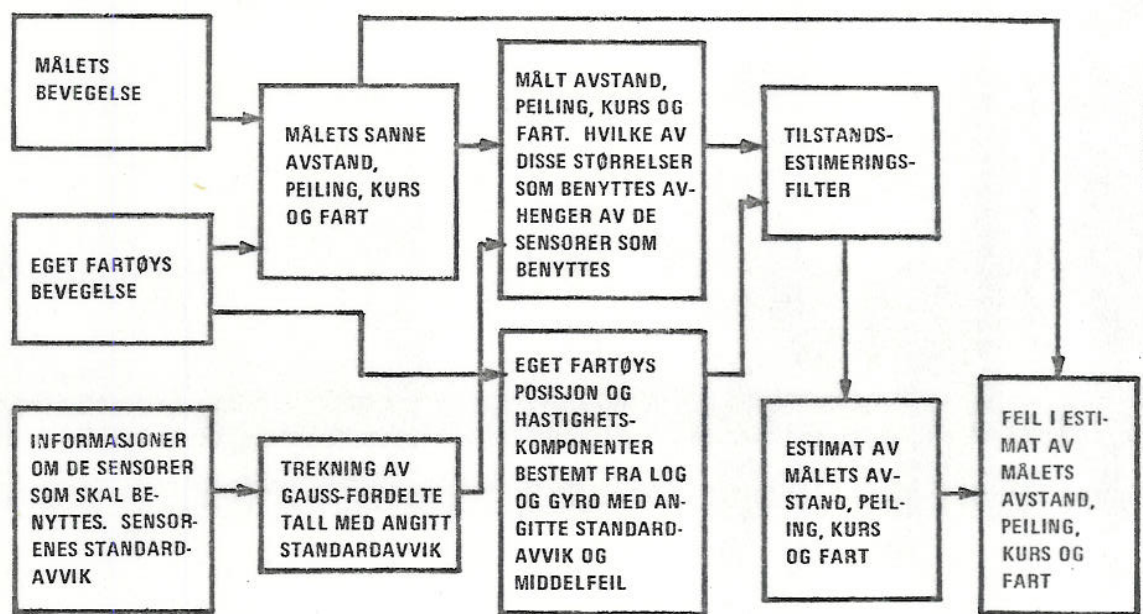
Simuleringene viser at når målet holder konstant kurs og fart er målfølgingen så god at se-sannsynligheten er tilnærmet 100% for alle simulerte taktiske situasjoner (maks avstand 20 000 meter) og sensorkombinasjoner. Når målet manøvrerer, degraderes se-sannsynligheten avhengig av taktisk situasjon, sensorbruk og avstand til målet. Ved avstander større enn ca 18 000 meter, målshastighet 15 m/s og radar som sensor vil det være rakettsens flyvetid (ekv avstanden til målet) som er den vesentligste årsak til degradering av se-sannsynligheten.

2 SIMULERINGSMODELLENE

I dette kapittelet beskrives kort hovedlinjene i simuleringsmodellene. Første del behandler modellen for målfølgingen og annen del hvordan se-sannsynligheten for Penguin-raketten beregnes ved simulering.

2.1 Målfølging

Simuleringsmodellen som er benyttet til å beregne målløsninger (d v s estimerer av målets avstand, peiling, kurs og fart) er vist skjematisk i figur 2.1. Modellen er søkt å representere et virkelig overflate-mot-overflate angrep korrekt i alle henseende som er vesentlig for beregning av målløsninger. Dette oppnås ved å simulere hver for seg de enkelte komponentene som er av betydning, samt komponentenes innbyrdes relasjoner. Typiske komponenter er målets navigasjon, eget fartøys taktikk og observasjonsmidlene (sensorene).



Figur 2.1 Skjematisk fremstilling av simuleringsmodellen

Simuleringsmodellen bygger i det vesentlige på forhåndsplanlegning. D v s at man ved et gitt gjennomløp av simuleringen har lagt inn i modellen hvilke hendelser som skal finne sted og tidspunktet for disse. Dette gjelder målets bevegelse, eget fartøys bevegelse og bruken av observasjonsmidlene.

Et grunnleggende trekk ved modellen er at den er stokastisk. Dette vil si at den tar hensyn til at mange av de hendelsene modellen beskriver ikke kan forutsies eksakt - de er preget av tilfeldighet. Eksempelvis vil en peiling tatt med et observasjonsmiddel i virkeligheten alltid avvike fra den sanne peiling. Avviket vil være avhengig av observasjonsmidelets nøyaktighet. Dessuten vil en del faktorer hvis innflytelse er ukjent og forskjellig fra måling til måling påvirke resultatet. Dersom det foretas et stort antall uavhengige målinger av den samme peiling, vil disse gruppere seg i en fordeling med et standardavvik om en middsverdi.

For et observasjonsmiddel uten kalibreringsfeil eller andre systematiske feil vil middsverdien være lik den sanne peiling. Man sier at målefeilen har middsverdi lik 0. I simuleringsmodellen bestemmes en målt peiling på følgende måte: Først beregnes den sanne peiling fra eget fartøy til målet ut fra begge fartøyers sanne posisjoner i peileøyeblikket. Så "trekkes" en tilfeldig målefeil som for alle observasjonsmidlene er forutsatt å være normalfordelt (Gaussfordelt) med middsverdi 0 og kjent standardavvik. Målefeilen som kan være positiv eller negativ, legges til den sanne peiling for å gi utfallet av peilingsmålingen (se figur 2.1). På tilsvarende måte bestemmes andre målte størrelser som f eks eget fartøys bestikk fra log og gyro avlesninger.

På grunnlag av opplysninger om eget fartøys bevegelser (fra log og gyro) og observasjoner av målfartøyet, vil tilstandsestimeringsfilteret beregne estimater for målfartøyets variable (se figur 2.1): avstand, peiling, kurs og fart. Tilstandsestimeringsfilteret er ikke som de tidligere beskrevne deler av simuleringen en modell av en prosess. Tilstandsestimeringsfilteret er representert ved selve det program som blir brukt for å fremskaffe en målløsning. Dette er i det vesentlige det samme som inngår i "Kobben"-klassens ildledningssystem MSI-70U (2). Logikken, som bygger på Bucy-Kalmans filter-teori, kan integrere informasjon fra flere observasjonsmidler, og denne integrasjonen foretas på en statistisk sett optimal måte. Dette vil si at hvert observasjonsmiddel som benyttes integreres i målfølgingen med en vekt som er avhengig av dets nøyaktighet.

For evalueringsformål beregnes til slutt feilen i estimatet av målfartøyets variable.

Simuleringsmodellen er tidsstyrt. Dette innebærer at et angreps forløp beskrives som en sekvens av statiske øyeblikksbilder - sammenlignbart med en kinofilm. Et fartøys bevegelse beskrives i øyeblikksbildet for tiden  $t$  ved posisjon og hastighetskomponenter. For det neste øyeblikksbildet (tiden  $t + \Delta t$ ) beregnes posisjonen ut fra en rettlinjete bevegelse fra posisjonen ved tiden  $t$ . Hendelser som kursendring og målobservasjon tilskrives tidspunkter for øyeblikksbilder - mellom øyeblikksbildene skjer intet annet enn rettlinjete bevegelse. Dette er en tilnærming til virkeligheten, og tilnærmelsen blir bedre jo mindre man gjør  $\Delta t$ . Minkende  $\Delta t$  gir økende tid for gjennomføring av simuleringen, slik at det i praksis må gjøres et kompromiss. I simuleringsmodellen er  $\Delta t = 1$  sek. Hvis et fartøy i virkeligheten bruker 15 sek på å gjennomføre en  $60^\circ$  kursendring ved kontinuerlig turn, vil dette i simuleringen representeres ved 15 kursendringer á  $4^\circ$  med 1 sek mellomrom og rettlinjete bevegelse mellom kursendringene.

Det innslag av tilfeldighet som ble beskrevet i forbindelse med observasjonene og avlesningen av eget fartøys log og gyro medfører at et gjennomløp av simuleringsmodellen vil gi noe forskjellig resultat fra en gang til neste. Simuleringen må derfor gjentas med alle parametre uforandret (unntatt målefeilene) så mange ganger at gjennomsnittresultatet ikke endres vesentlig ved ytterligere gjentakelser. 20 gjennomløp (Monte-Carlo simuleringer) er funnet å være et praktisk kompromiss mellom ønske om rimelig nøyaktighet i resultatene og kort regnetid ved utførelsen av simuleringene. Resultatet av disse 20 Monte-Carlo simuleringene evalueres ved hvert observasjonstidspunkt ved å beregne middelveirdi og standardavvik av feilen i estimatet av målefartøys variable.

I tilstandsestimeringsfilteret foregår de fleste beregninger ved hjelp av matrisearitmikk. Elementene i matrisene er representert ved flytende tall. Da simuleringene er utført på RBKs CYBER-74 regnemaskin hvor flytende tall representeres ved 48 bits mantisse, er mantissene i matrisealgebraen maskert til 32 bits for å simulere en SM-3 regnemaskin. Simuleringer med og uten maskerte mantisser viser at 32 bits mantisser gir ubetydelige numeriske feil i estimatet av målfartøys variable.



## 2.2 Simulering av Penguin-rakett

Simuleringsprogrammet som benyttes er skrevet av forsker Ottar Dagfinn Bergli ved Forsvarets forskningsinstitutt, Avdeling for elektronikk. Tilretteleggelse av dette programmet slik at det kan benytte resultatene fra målfølgingen som inngangsdata er foretatt av forfatteren.

Ved simulering av et angrep benyttes Penguin-raketten serie 1 som våpen. Resultatet av en simulering er raketts se-sannsynlighet (sannsynligheten for at raketten får målet innenfor søkerens synsfelt) som funksjon av tiden fra simuleringen starter til den slutter. Se-sannsynligheten er beregnet ved hvert observasjonspunkt.

Modellen som benyttes er stokastisk, da en raketts bane ikke kan forutsies eksakt. Dette skyldes at feil i ildledningsdata, d v s feilen i estimatet av målfartøyets variable, er stokastisk og at raketts data så som plattform skjevstilling, gyrodrift, feil i utgangshastighet o s v er stokastiske variable (se tabell 2.1). Alle disse feilene antas uavhengige og samles til en resultatfeil uttrykt ved middelerverdi og standardavvik. En raketts bane bestemmes deretter ved å trekke ett tilfeldig tall fra en normalfordeling med resultatfeilens middelerverdi og standardavvik. For å bestemme se-sannsynligheten ved et observasjonstidspunkt med rimelig nøyaktighet er et større antall raketbaner (e g 200) bestemt ved å trekke tilfeldige tall. Deretter telles det opp hvor mange raketter som har målet innenfor søkerens synsfelt. Se-sannsynligheten fremkommer til slutt ved å dividere dette antallet med antall skutte raketter. I simuleringene er det bare benyttet "rett skudd", d v s raketten skytes ut langs siktelinjen til målet. Informasjonen om avstanden til målet er ikke benyttet til å aktivisere søkeren i noen bestemt avstand fra målet. Nominell bredde på søkerfeltet er 1200 m.

De to normalfordelte variablene "Feil i utgangshastighet langs XP" og "Feil i utgangshastighet langs YP" (se tabell 2.1) oppstår vesentlig på grunn av eget fartøys stamp og rull. Det er utført to simuleringer hvor disse standardavvikene er satt lik null for å undersøke hvor mye se-sannsynligheten kan økes ved å benytte opplysninger om eget fartøys stamp og rull til å redusere feilen i utgangshastighetskomponentene. Det er å vente at man ved dette vil oppnå økning i se-sannsynligheten

når ildledningsdataene er gode (små feil) og avstanden til målet er relativt stor.

#### A Rakettdata

Normalfordelte feil angitt ved standardavvik:

Plattform skjevstilt i asimut	:	2,2 mrad
Gyrodrift i asimut	:	0,0 grad/time
Gyrodrift i asimut i boostfase	:	50,0 grad/time
Gyrodrift i pitch i boostfase	:	50,0 grad/time
Gyrodrift i roll i boostfase	:	100,0 grad/time
Feil i utgangshastighet langs XP <sup>1)</sup>	:	1,0 m/s
Feil i utgangshastighet langs YP	:	1,1 m/s
Temperaturavhengighet i XP-akselerometer	:	3,0 promille
Temperaturavhengighet i YP-akselerometer	:	3,0 promille
Skalafaktorfeil i XP-FAD <sup>2)</sup>	:	2,0 promille
Skalafaktorfeil i YP-FAD	:	10,0 promille

Rektangulært fordelte feil angitt ved positiv yttergrense:

Plattform skjevstilt i pitch	:	2,6 mrad
Plattform skjevstilt i roll	:	2,6 mrad
Gyrodrift i pitch	:	15,0 grad/time
Gyrodrift i roll	:	15,0 grad/time
Nullpkt forskyvning i XP-akselerometer	:	1,0 mG
Nullpkt forskyvning i YP-akselerometer	:	1,0 mG
Skalafaktorendring i XP-akselerometer	:	1,0 promille
Skalafaktorendring i YP-akselerometer	:	1,0 promille
Hastighetsinkrementfeil XP	:	0,2 m/s
Hastighetsinkrementfeil YP	:	0,0 m/s

#### B Ildledningsdata

Middelverdi og standardavvik av feilen i følgende estimer:  
(beregnes i målfølgingsprogrammet)

Avstand  
Peiling  
Hastighet langs siktelinjen  
Hastighet tvers siktelinjen

Tabell 2.1 Stokastiske variable som benyttes ved beregning av se-sannsynlighet for Penguin-rakett

- 1) XP- og YP-aksene er henholdsvis langs og tvers rakettens fartsretning
- 2) FAD-analog til frekvensomformer

3 SIMULERTE TAKTISKE SITUASJONER OG BRUKEN AV OBSERVASJONSMIDLENE

De taktiske situasjonene som er simulert er vist i figur 3.1.

Målfartøyets og eget fartøys fart er konstant i alle simuleringene. Eget fartøys log og gyro har null middelfeil og standardavvik på henholdsvis 0,13 m/s og 0,3°.

I taktisk situasjon 2 er den initielle avstanden til målet liten. I dette tilfellet er eget fartøy posisjonert slik at minste avstand til målet blir ca 100 meter. Denne simuleringen er tatt med for å vise at tilstandsestimeringsfilteret kan benyttes selv om fartøyet kommer meget nær, som ved "målfølging" av egne fartøyer.

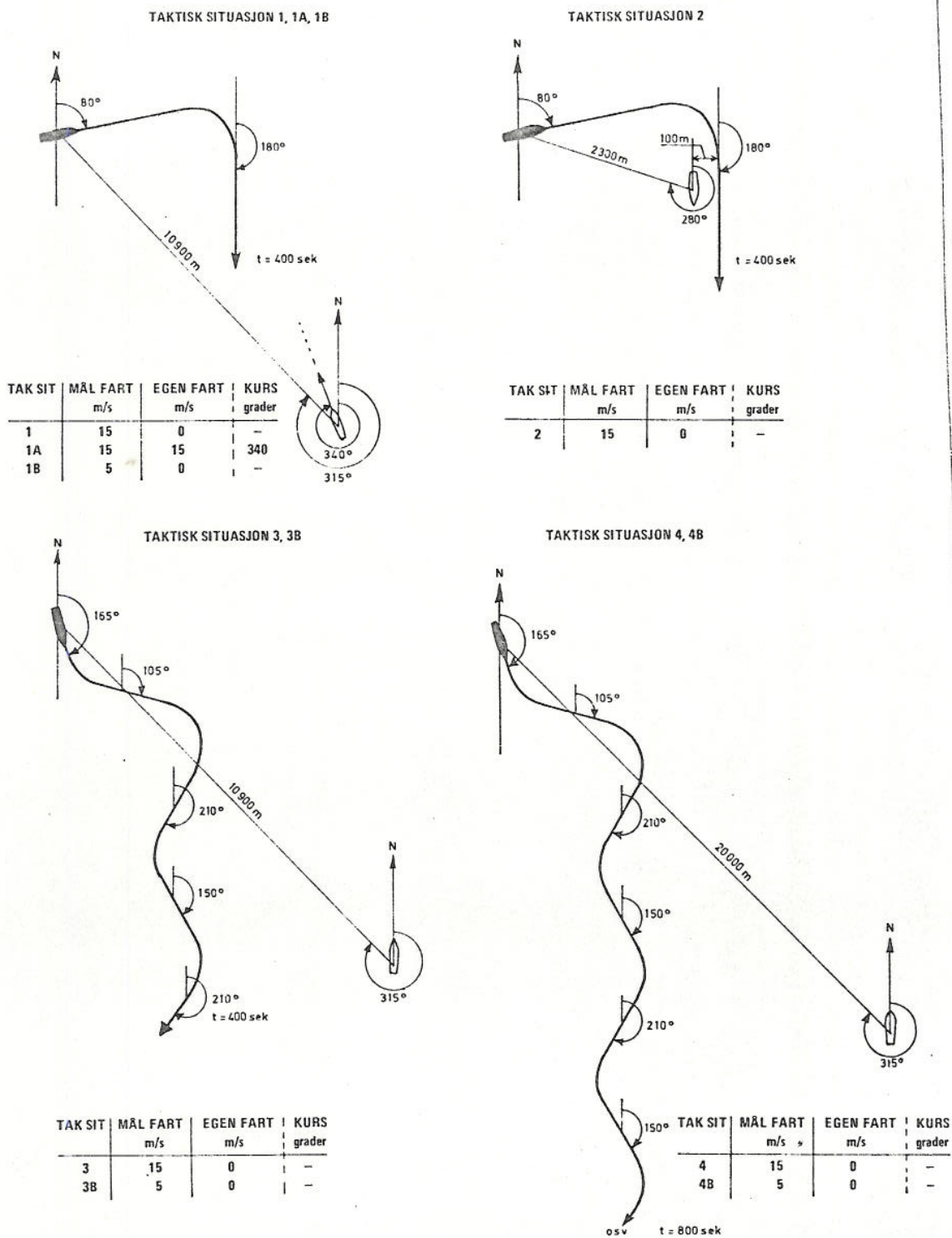
De taktiske situasjonene er også tegnet i riktig målestokk. Tallene i parentes viser til tegning nr: 1 (1), 1A (3), 1B (5), 2 (15), 3 (17), 3B (19), 4 (25) og 4B (27). I disse tegningene er målets bevegelse og eget fartøy markert med henholdsvis M og S. Estimerte posisjoner av målet for en Monte-Carlo simulering er også inntegnet. Denne kurven er markert med M. Markeringsbokstavene er også tidsreferanser da det er ett minutt mellom hver markering.

I taktiske situasjoner hvor målbanen er sinuerende (3, 3B, 4 og 4B) forandrer målet kurs hvert annet minutt. Initiell kurs følges i de første 15 sekunder. Deretter følger en babord turn på 60°. Den nye kursen på 105° beholdes til to minutter etter første kursforandring startet. Ved dette tidspunkt starter en styrbord tårn på 105°. Den nye kursen på 210° følges til neste kursforandring (babord 60°) o s v.

Ved alle kursforandringer er svingradius 300 meter.

De taktiske situasjonene som er beskrevet ovenfor er simulert med forskjellige observasjonsmidler. Tabell 3.1 viser hvilke observasjonsmidler som er benyttet i de forskjellige taktiske situasjonene.

Med sensoren TV (IR) i tabell 3.1 kan man forstå enten vanlig sort/hvitt televisjonsutstyr eller billeddannende IR-kamera. Avstandsmålinger ved "Avstandsbedømmelse" foregår ved at sensoroperatøren forsøker å bestemme avstanden ved hjelp av TV, IR-bildet eller andre metoder. Sensoren "laser" er forkortelse for laser avstandsmåler.



Figur 3.1 Taktiske situasjoner (tegningene er ikke i riktig målestokk)

TAKTISK SITUASJON	OBSERVASJONSMIDDEL			KODE	TEGNING NR
	TYPE	STANDARD- AVVIK I AVSTAND meter	STANDARD- AVVIK I PEILING grader		
1	RADAR	50	0,2	RADAR-I	1, 2
1A	RADAR	50	0,2	RADAR-IA	3, 4
1B	RADAR	50	0,2	RADAR-IB	5, 6
1	RADAR	50	0,2	RADAR-IC <sup>†</sup>	7, 8
1	RADAR	50	0,4	RADAR-II	9, 10
1	TV (IR) AVSTANDS- BEDØMMELSE	— 1500	0,17 —	TV OG AVST. BED.	11, 12
1	TV (IR) LASER	— 15	0,17 —	TV OG LASER	13, 14
2	RADAR	50	0,2	RADAR-I KA	15, 16
3	RADAR	50	0,2	RADAR-I	17, 18
3B	RADAR	50	0,2	RADAR-IB	19, 20
3	RADAR	50	0,4	RADAR-II	21, 22
3	TV (IR) LASER	— 15	0,17 —	TV OG LASER	23, 24
4	RADAR	50	0,2	RADAR-I L	25, 26
4B	RADAR	50	0,2	RADAR-IBL	27, 28
4	RADAR	50	0,2	RADAR-ICL <sup>†</sup>	29, 30
4	RADAR	50	0,4	RADAR-IIL	31, 32

<sup>†</sup> I denne simuleringen er rakettdataene "Feil i utgangshastighet langs-XP" og "Feil i utgangshastighet langs-YP" (se tabell 2.1) begge lik 0.

Tabell 3.1 Observasjonsmidler og taktiske situasjoner

Hvordan observasjonsmidlene benyttes i en simulering er vist ved en symbolsk figur på tegningene (se f eks tegning 14). De to lavest stilte tallene angir henholdsvis tiden når første måling foretas og tiden mellom første måling i en gruppe målinger og første måling i neste gruppe. Det første av de to høyrestilte tallene angir tiden mellom målingene i en gruppe. Det siste angir antall målinger i en gruppe. Der- som det bare er en måling i en gruppe angis bare de lavest stilte tall. For sensoren TV i tegning 14 betyr den symbolske figuren at første mål- ing foretas etter 5 sekunder, deretter en måling hvert 5. sekund. Teg- ningene er også forsynt med sensorenes standardavvik og målets fart.

#### 4 SIMULERINGSRESULTATER

Resultatet av simuleringene er presentert i tegninger og grafiske fremstillinger. I tabell 3.1 er det referert til to tegninger for hver taktisk situasjon og sensorkombinasjon. Det første tallet refererer som før nevnt til tegning av den taktiske situasjonen i riktig målestokk (estimerte målposisjoner for en Monte-Carlo simulering er også inntegnet). Det siste tallet refererer til grafiske fremstillinger av resultater fra Monte-Carlo simuleringer. Alle de grafiske fremstillingene har tiden langs den horisontale akse. Først fremstilles målets sanne avstand og kurs. Deretter fremstilles feilen i estimatet av målets variable (kurs- feil, avstandsfeil, fartsfeil og peilefeil). Komponentene av fartsfeilen langs (||) og tvers (⊥) siktelinjen blir også tegnet. Til slutt tegnes Penguin-rakettens se-sannsynlighet. I alle fremstillingene som viser hvordan feilen i en størrelse varierer, er det tegnet tre kurver. Den midtre er middelverdien av feilen. Den øvre og nedre er henholdsvis middelverdien pluss og minus ett standardavvik. Disse tre kurvene vil når målløsningen er god, være i nærheten av den opptrukne null-linjen. Null er skrevet ved linjens høyre endepunkt.

##### 4.1 Målfølgingsresultater

I dette avsnittet diskuteres målfølgingsresultatene for de forskjellige sensorkombinasjonene som er benyttet i simuleringene: Radar, TV (IR) og avstandsbedømmelse, TV og laser. Videre diskuteres "usikkerheten"

(e g konfidensintervaller) i middelvei og standardavvik til estimeringsfeilene. Deretter vises ved et eksempel betydningen av den logikk som er lagt inn i tilstandsestimeringsfilteret for at dette til en viss grad skal kunne følge målmanøvre (manøverlogikk) (3). Til slutt gis visse vurderinger av hvor eget fartøy bør posisjoneres for å oppnå best mulig målfølgingsresultater.

For bruk i det følgende defineres tilstandsestimeringsfilterets konvergenstid som tiden fra første observasjon til standardavviket i estimert kurs er mindre enn  $10^{\circ}$  når målet holder konstant kurs og fart. Konvergenstiden for det tilstandsestimeringsfilteret som er benyttet vil i det vesentlige avhenge av sensortype, tid mellom observasjonene og målets fart. Det er valgt å benytte kursstandardavviket ved bestemmelse av konvergenstiden fordi denne størrelsen normalt konvergerer langsomt.

#### 4.1.1 Resultater ved forskjellige sensorkombinasjoner

Simuleringsresultatene for de forskjellige sensorkombinasjonene er følgende:

##### a) Radar

I dette tilfellet initieres tilstandsestimeringsfilteret ved hjelp av første observasjon. Initiell hastighet og kurs er lik null. Konvergenstiden for RADAR-I ( $\sigma_r = 50$  m,  $\sigma_\phi = 0,2^{\circ}$ ) er 18 sekunder når målhastigheten er 15 m/s (se tegning 2 og 6). For RADAR-II ( $\sigma_r = 50$  m,  $\sigma_\phi = 0,4^{\circ}$ ) er konvergenstiden 24 sekunder ved målhastighet 15 m/s (se tegning 10). Tiden mellom observasjonene er i alle tilfellene 3 sekunder. Dersom målet holder konstant kurs og fart i tidsrom lenger enn konvergenstiden, oppnås stasjonære forhold. D v s standardavvikene til estimatet av målets variable blir tilnærmet konstant. Ved stasjonære forhold er standardavvikene i farts- og kursestimatene for RADAR-I henholdsvis ca 1,5 m/s og ca  $5,5^{\circ}$  når målhastigheten er 15 m/s og ca 0,5 m/s og  $5,5^{\circ}$  når hastigheten er 5 m/s. For RADAR-II og målhastighet 15 m/s er standardavvikene i farts- og kursestimatene tilnærmet de samme som for RADAR-I. Stasjonærverdiene for standardavvikene i avstands- og peileestimatene er tilnærmet halvparten av radarens standardavvik i avstand og peiling.

Årsaken til at standardavvikene til estimatet av målets variable oppnår stasjonære verdier når målet holder konstant kurs og fart, er at manøverlogikken er konstruert slik at den også påvirker estimatet når målet ikke manøvrerer. Dette er gjort for at tilstandsestimeringsfilteret skal kunne detekttere og tilnærmet følge en manøver. Uten manøverlogikk vil standardavvikene til de esti-

merete størrelsene gå tilnærmet monotont mot en nedre grense som er bestemt av regnemaskinens nøyaktighet.

Når målet manøvrerer, viser simuleringresultatene (se f.eks. tegning 2) at det oppstår middelfeil og økende standardavvik på estimatet. Middelfeilen skyldes at bevegelsesmodellen for målet i tilstandsestimeringsfilteret (det antas her konstant kurs og fart) ikke er i overensstemmelse med den virkelige bevegelsen og at manøverlogikken trenger tid for å detektere denne uoverensstemmelsen. Økningen i standardavviket skyldes i det vesentlige at manøverlogikken søker å "begrave" feilen i bevegelsesmodellen i hvit støy. I simuleringene er det benyttet tre forskjellige manøvre med kursendringer  $100^\circ$  (taktisk situasjon 1, tegning 1 og 2),  $60^\circ$  og  $105^\circ$  (taktisk situasjon 3, 4, tegning 17, 18 og 25, 26). Manøvrene foretas med 3 °/s og 1 °/s når målhastigheten er henholdsvis 15 m/s og 5 m/s. Simuleringene viser at for både RADAR-I og II er middelfeilen i kursestimatet ubetydelig 3 - 6 målinger (-10 - 20 sek) etter at manøveren er slutt. Likeledes er standardavviket til kursestimatet mindre enn  $10^\circ$  7 - 9 målinger (-20 - 30 sek) etter manøverens slutt. De maksimale verdier av middelfeil (absoluttverdi) og standardavvik i kursen er mindre enn henholdsvis  $35^\circ$  og  $20^\circ$ . Disse resultatene gjelder for målhastigheter på både 15 m/s og 5 m/s. Når det gjelder fartsfeilen i forbindelse med manøvre, er middelverdien (absoluttverdi) og standardavviket henholdsvis i området 1,5 - 2,5 m/s og 4 - 5 m/s når målhastigheten er 15 m/s og henholdsvis -0,5 m/s og 1 - 1,5 m/s ved målhastighet 5 m/s. Middelfeil og standardavvik i avstand og peiling ved manøvre er mindre enn radarens standardavvik i avstand og peiling. Simuleringen med kode RADAR-I KA (Kort Avstand) viser at peilefeilen (middelverdi og standardavvik) overskrider radarens standardavvik i peiling når avstanden går ned til 100 meter. Grunnen til dette er at tilstandsestimeringsfilteret estimerer posisjoner og hastighetskomponenter. En liten posisjonsfeil ved så små avstander vil lett gi relativt stor feil i estimert peiling.

Det er benyttet relativ høy observasjonsrate for radaren (1 måling/3. sek) da denne er tenkt tilkoblet utstyr som automatisk vurderer målingen før denne benyttes av tilstandsestimeringsfilteret.

#### b) TV (IR) og avstandsbedømmelse

I dette tilfellet benyttes to sensorer med forskjellig tidsintervall mellom målingene (se tegning 11 og 12). Tilstandsestimeringsfilteret initieres her med første peiling. Initiell avstand settes lik 10 000 m med standardavvik 7000 m. Hastighet og kurs er lik null. Første avstandsbedømmelse utføres samtidig med fjerde peiling. Konvergenstiden for denne sensorkombinasjonen er ca 140 sek. Denne tiden vil avta dersom eget fartøy er i bevegelse og utfører manøvre. Standardavvikene til estimatet av målets variable i stasjonær tilstand er ikke mulig å angi da denne tilstanden ikke oppnås i løpet av simuleringstiden som er 400 sek. Dette ville man ha oppnådd dersom målet ikke hadde manøvrert.

Når målet manøvrerer, viser simuleringresultatene (tegning 12) at det oppstår store middelfeil og standardavvik på estimatet. Middelfeilen i kurs blir først relativt liten ( $5^\circ$  -  $6^\circ$ ) 225 sek etter manøveren. På dette tidspunkt blir også standardavviket i kurs mindre enn  $10^\circ$ . De maksimale verdier av middelfeil (absoluttverdi)



og standardavvik i kursen er henholdsvis  $80^\circ$  og  $120^\circ$ . Målets fart er 15 m/s. Maksimalverdien av middelfeilen (absoluttverdi) og standardavviket i fartsestimatet ved manøveren er henholdsvis 6 m/s og 4,5 m/s. Middelfeilen (absoluttverdi) og standardavviket i avstandsestimatet er for alle tidspunkt etter første avstandsbedømmelse, mindre enn standardavviket i "avstandsmålingen". For peileestimatet er derimot, under og umiddelbart etter manøveren, middelfeilen (absoluttverdi) og standardavviket større enn sensorens standardavvik (lik  $0,17^\circ$ ). Maksimalverdiene er henholdsvis  $0,44^\circ$  og  $0,5^\circ$ .

Denne simuleringen er tatt med for å vise at selv med meget dårlig avstandsinformasjon og eget fartøy i ro, oppstår det ikke divergens i tilstandsestimeringsfilteret når målet foretar en kraftig manøver. Det skal også nevnes at simuleringer som ikke er tatt med i denne rapporten, har vist at når målfartøyet holder konstant kurs og fart og eget fartøy er i ro, oppnår man etter en tid ved bare peilingsmålinger gode estimater av peiling, kurs og forholdet mellom avstand og fart. For å få et godt estimat av målets variable, kan man da gjøre en avstandsmåling med laser eller radar.

c) TV (IR) og laser

I disse simuleringene benyttes også to sensorer med forskjellig tidsintervall mellom målingene (se tegning 13, 14 og 23, 24). Laseravstandsmåleren benyttes intermitterende med ett minutts opphold mellom første måling i en gruppe til første måling i neste gruppe. En gruppe består av fire målinger med 10 sekunders intervall. Initieringen av tilstandsestimeringsfilteret er den samme som for TV og avstandsbedømmelse da første måling er en peiling. Første avstandsmåling foretas 3 sek etter første peiling. Konvergenstiden for denne sensorkombinasjonen er 15 sek (4 peilinger og 2 avstandsmålinger). På grunn av den intermitterende bruken av laseren får man i dette tilfellet bare tilnærmet stasjonære forhold når målet holder konstant kurs og fart. Estimatenes standardavvik øker noe i det tidsrom hvor det ikke foretas avstandsmålinger. Dette er spesielt tydelig for standardavviket i avstand (se tegning 14). Stasjonærverdiene for de forskjellige standardavvikene er som følger: Kurs  $4^\circ - 5,5^\circ$ , fart 1 - 1,7 m/s, peiling  $\sim 0,13^\circ$  og avstand 11 - 50 m.

Når målet manøvrerer, viser simuleringene at middelfeilen i kursestimatet er ubetydelig 10 - 20 sek etter manøveren er slutt. Likeledes er standardavviket til kursestimatet mindre enn  $10^\circ$  15 - 30 sek etter manøverens slutt. De maksimale verdier av middelfeil og standardavvik i de estimerte størrelser vil for denne sensorkombinasjonen være avhengig av om eventuelt når det gjøres avstandsmålinger i forbindelse med en manøver. Maksimalverdiene av middelfeil (absoluttverdi) og standardavvik i de estimerte størrelsene ved de to utførte simuleringene er (de to første tall gjelder middelfeil; de to neste standardavvik): Kurs  $28^\circ$ ,  $34^\circ$  og  $14^\circ$ ,  $13^\circ$ , fart 2,3 m/s, 5,5 m/s og 2,3 m/s, 3,3 m/s, peiling  $0,17^\circ$   $0,26^\circ$  og  $0,2^\circ$ ,  $0,2^\circ$  og avstand 25 m, 206 m og 46 m, 80 m. Sammenlignes resultatene for denne sensorkombinasjonen med resultatene for radar (målhastighet 15 m/s) ser man at unntatt for kursestimatet er resultatene for radar noe bedre. Dette skyldes at observasjonsraten er lavere både for peilinger og spesielt avstandsmålinger

enn når radar benyttes. Den relativt lave observasjonsraten ved avstandsmålinger (1 måling/10. sek) er valgt fordi man i en implementasjon har tenkt at en operatør skal vurdere resultatet av avstandsmålingen før dette benyttes i beregningene. Laseren benyttes intermitterende for å vise at manøverlogikken også funksjonerer tilfredsstillende ved denne sensorbruken.

#### 4.1.2 "Usikkerheten" i middelfeil og standardavvik

I kapittel 2.1 ble det poengtert at man måtte gjøre et visst antall gjennomløp av simuleringsmodellen for å få rimelig nøyaktighet i middelfeilen og standardavviket til estimatet av målets variable. I alle simuleringene som er beskrevet i tabell 3.1 er middelfeilen og standardavviket evaluert over 20 gjennomløp (20 Monte-Carlo simuleringer). Da feilen i estimatet (f eks i avstanden) ved hvert gjennomløp er en stokastisk variabel, vil også de beregnede middelfeil og standardavvik være stokastiske variable. Antas feilen i estimatet (e g hvert av elementene i estimatet) normalfordelt med middelvei  $\mu$  og standardavvik  $\sigma$ , vil den beregnede middelfeilen,  $\hat{\mu}$ , og det beregnede standardavvik,  $\hat{\sigma}$ , være mer eller mindre gode anslag for verdien av  $\mu$  og  $\sigma$ . De beregnede verdiene av middelfeil og standardavvik vil selvfølgelig bli bedre og bedre tilnærmelser til  $\mu$  og  $\sigma$  når antall Monte-Carlo simuleringer øker. Størrelsene  $\mu$  og  $\sigma$  er således grenseverdiene for den beregnede middelfeilen og det beregnede standardavviket når antall Monte-Carlo simulering går mot uendelig. Med den antagelsen som er gjort om fordelingen av feilen i estimatet, kan det beregnes konfidensintervaller for den virkelige middelfeilen,  $\mu$ , og standardavviket,  $\sigma$ , til estimatet (4). D v s intervaller som med spesifisert sannsynlighet (konfidenskoeffisient) inneholder verdiene av  $\mu$  og  $\sigma$ .

Med 95% konfidenskoeffisient og 20 Monte-Carlo simuleringer er konfidensintervallene

$$\hat{\mu} - 0,48 \hat{\sigma} < \mu < \hat{\mu} + 0,48 \hat{\sigma} \quad (4.1)$$

$$0,76 \hat{\sigma} < \sigma < 1,46 \hat{\sigma} \quad (4.2)$$

Da disse konfidensintervallene er relativt store, spesielt for standardavviket, ble det utført 500 Monte-Carlo simuleringer av taktisk situasjon 1 med kode RADAR-I (tegning 2) og taktisk situasjon 4 med kode RADAR-II (tegning 26) for å se hvordan simuleringsresultatene forandret

seg. Disse simuleringene har henholdsvis kode RADAR-I MC (tegning 35) og RADAR-I MC (tegning 36). Med 95% konfidenskoeffisient og 500 Monte-Carlo simuleringer er konfidensintervallene

$$\hat{\mu} - 0,115 \hat{\sigma} < \mu < \hat{\mu} + 0,115 \hat{\sigma} \quad (4.3)$$

$$0,93 \hat{\sigma} < \sigma < 1,08 \hat{\sigma} \quad (4.4)$$

En sammenligning mellom resultatene ved 20 og 500 Monte-Carlo simuleringer viser at resultatene ved 500 simuleringer nærmest fremkommer ved passende lavpassfiltrering av resultatene ved 20 simuleringer. Dette betyr at resultatene ved 20 Monte-Carlo simuleringer gir et riktig bilde av hovedtrekkene i middelfeilen og standardavvikets tidsutvikling. Resultatene ved 500 simuleringer spesielt tegning 35 viser også at når målet holder konstant kurs og fart, oppstår det oscillasjoner i estimatet. Amplityden er imidlertid meget liten; ca 2,5 m i avstand og  $0,01^\circ$  i peiling o s v, slik at kvaliteten av estimatet forringes uvesentlig.

#### 4.1.3 Virkningen av manøverlogikken

For å studere virkningen av manøverlogikken, ble det utført en simulering (500 Monte-Carlo simuleringer) hvor denne logikken var satt ut av funksjon. Denne simuleringen har kode RADAR-I MC UMD (uten manøver deteksjon) og resultatene er presentert i tegning 37. Disse resultatene kan sammenlignes med resultatene i tegning 35 som viser en simulering av den samme situasjonen hvor manøverlogikken er benyttet. Som man ser av resultatene er manøverlogikken meget effektiv når det gjelder å redusere middelfeilen i estimatet, når målet manøvrerer. Standardavviket derimot avtar som før nevnt tilnærmet monotont mot en nedre grense når manøverlogikken ikke benyttes. Konvergenstiden (tiden til kursstandardavviket er mindre enn  $10^\circ$ ) for de to simuleringene er den samme, slik at manøverlogikken har ingen innvirkning på estimatets innsvingningsforløp. Sammenlignes spesielt kurvene for fartsfeilen i tegning 35 og 37 (oppløsningen er størst i tegning 37) ser man at oscillasjonene i estimatet bare er til stede når manøverlogikken benyttes (tegning 35). Dette skyldes at manøverlogikken er konstruert slik at deler av den er virksom også når målet holder konstant kurs og fart.

## 4.1.4 Vurdering av eget fartøys posisjon

I de simuleringene som er omtalt ovenfor er det ikke gjort forsøk på en optimal posisjonering av eget fartøy. D v s den posisjonering som gir kortest konvergenstid og minimum feil i estimatene. Dersom man i et aktuelt tilfelle har forhåndsinformasjon om målets hovedkurs, og at målet på grunn av farvannet må foreta en eller flere manøvre (f eks for å nå innløpet til en fjord), kan det stilles opp generelle regler for hvor eget fartøy bør posisjoneres. Eget fartøys posisjon er spesielt viktig ved dårlig avstandsinformasjon (målløsningen baseres vesentlig på peilinger) og ved manøver. Generelt ønsker man så stor avstandsrate (forandring av avstanden pr tidsenhet) og peilerate som mulig for at målestøyen ikke skal overskygge forandringen i avstand og peiling mellom hver måling. Dette er til dels motstridende ønsker da peileraten er null når avstandsrate er maksimal. Tar man imidlertid hensyn til de krav våpnene, spesielt Penguin-raketten, stiller til målløsningen, bør egenposisjonen velges slik at peileraten blir maksimal. Dette vil gi små feil i estimert peiling og hastighetskomponent på tvers av siktelinjen. Som før nevnt benytter tilstandsestimeringsfilteret en modell av målbevegelsen hvor det antas konstant kurs og fart. Beregnes avstandsrate og peileraten for denne modellen, finner man at når avstanden er større enn ca 1000 m, så er disse meget langsomtvarierende funksjoner av tiden. Dette betyr at når en målmanøver er tilnærmet kjent på grunn av farvannet, bør eget fartøy posisjoneres slik at peileraten er så stor som mulig og fortsatt en langsomtvarierende funksjon av tiden under manøveren. Dette oppnår man ved å la eget fartøy ligge på samme side av målbanen som krumningssenteret og på linjen gjennom krumningssenteret og skjæringspunktet mellom forlengelsene av målbanen før og etter manøveren. Ved denne plassering av eget fartøy oppnår man at feilen i estimert peiling og hastighetskomponent loddrett siktelinjen på grunn av uoverensstemmelse mellom modell og virkelig bevegelse blir så liten som mulig. Tegning 25 og 26 viser en simulering hvor eget fartøy har ugunstig posisjon ved første og annen manøver. Peileraten forandres raskt og skifter endog tegn i de to manøvrene. Dette gir relativt stor "fartsfeil i siktelinje". I siste del av simuleringen blir eget fartøys posisjon stadig gunstigere uten at den er optimal for noen av manøvrene. Fremstillingen av "fartsfeil i siktelinje" i tegning 26 viser tydelig dette. At peilefeilen har tilnærmet samme tidsforløp som

"fartsfeil i siktelinje" er mindre tydelig i tegning 26. Benyttes imidlertid 500 Monte-Carlo simuleringer, vises dette tydelig (se tegning 36).

#### 4.2 Penguin se-sannsynlighet

I dette avsnittet beskrives beregningsresultatene for Penguin-rakettens se-sannsynlighet. Først beskrives resultatene for de simuleringene som er oppført i tabell 3.1. I disse simuleringene er middelfeil og standardavvik i målfølgingsresultatene fremkommet ved 20 Monte-Carlo simuleringer og se-sannsynligheten ved å simulere 200 rakettutskytninger i hvert observasjonstidspunkt. Deretter vises i ett tilfelle, RADAR-IL, om det er raketts data og flyvetid eller feilen i estimatet av målets variable som gir størst degradering av se-sannsynligheten ved målmanøver. Til slutt diskuteres usikkerheten i den beregnede se-sannsynligheten og det vises i to eksempler hvor mye se-sannsynligheten forandres når målfølgingsresultatene er fremkommet ved 500 Monte-Carlo simuleringer og det er simulert 1000 rakettutskytninger i hvert observasjonstidspunkt.

Det gjøres oppmerksom på at i tegning 12, 14 og 24 går tidsaksen for se-sannsynligheten til 400 sek, mens den går til 440 sek for de øvrige aksekors på disse tegningene.

##### 4.2.1 Beregnede se-sannsynligheter

I alle simuleringene er Penguin-rakettens se-sannsynlighet tilnærmet 100% når målet holder konstant fart og kurs. Dette gjelder alle de benyttede sensorkombinasjoner og taktiske situasjoner med avstander opp til 20 000 meter.

Når målet beveger seg med 5 m/s (taktisk situasjon 1B, 3B og 4B), er se-sannsynligheten tilnærmet 100% (minimum 85,5% i 4B) også når målet manøvrerer.

Ved målhastigheter på 15 m/s avtar se-sannsynligheten når målet manøvrerer og avstanden er stor. Årsaken til dette er at raketten før den får målet innenfor søkerfeltet, beveger seg som om målet har den kurs og fart som estimeres i utskytningsøyeblikket. Da raketten bruker ca

74 sekunder på 20 000 meter, kan et mål med 15 m/s i løpet av denne tiden bevege seg slik at det er utenfor søkerfeltet når raketten er fremme.

Den minimale se-sannsynlighet under en manøver er avhengig av flere parametre. De som har størst betydning er følgende: Avstand og peiling til målet, kurs før manøver, kurs etter manøver, kursforandring/tidsenhet (i simuleringene  $3^{\circ}/s$  når målhastigheten er 15 m/s), hvor ofte man observerer, standardavvikene til observasjonsmidlene og målfølgingslogikkens evne til å følge en manøver. Avhengig av hvilke observasjonsmidler som benyttes, vil eget fartøys bevegelse ha større og mindre betydning. Egenbevegelse gir i de aller fleste tilfelle bedre estimater av målets variable enn når eget fartøy ligger i ro. Spesielt stor betydning har egenbevegelsen når estimatene i det vesentlige er basert på peilinger.

En operativt mer interessant parameter i forbindelse med manøver, enn den minimale se-sannsynligheten, er forholdet mellom den tiden se-sannsynligheten er under en viss grense, f.eks. 80%, og den tiden manøveren varer. I tabell 4.1 er dette forholdet angitt i prosent for de taktiske situasjonene hvor målets hastighet er 15 m/s. Videre er midlere avstand kursforandring og varigheten av manøvrene tabulert.

Resultatene i tabell 4.1 for taktisk situasjon 4 viser at når avstanden er større enn ca 16 000 meter er se-sannsynligheten mindre enn 80% i opptil dobbelt så lang tid som manøveren varer. Dette skyldes at manøveren har betydning for de raketter som skytes før manøveren når disse når frem etter at manøveren har startet. Av simuleringresultatene ser man imidlertid at se-sannsynligheten går raskt mot 100% etter at manøveren er slutt. Dette viser at tilstandsestimeringsfilteret umiddelbart etter en manøver gir tilstrekkelig gode estimater av målets variable.

Tabell 4.1 viser også at en radar med  $0,4^{\circ}$  standardavvik i peiling (RADAR-II og RADAR-IIL) gir vesentlig dårligere resultat i en manøver enn når standardavviket er  $0,2^{\circ}$  (RADAR-I og RADAR-IL).

Ved å sammenligne resultatene i taktisk situasjon 1 og 4 for RADAR-I, RADAR-IC og RADAR-IL, RADAR-ICL finner man at i manøver er resultatene

TAKTISK SITUASJON	AVSTAND METER	KURSFOR- ANDRING grader	MANØVERENS VARIGHET sekunder	FØRHOLEDET $\frac{\text{TID SE-SANN. } < 80\%}{\text{MANØVERENS VARIGHET}}$ i %					TEGNING NR
				RADAR-I	RADAR-IC	RADAR-II	TV & AVST BED	TV & LASER	
1	9700	100	33	18	9	45	60	36	2, 8, 10 12 og 14
1A	7500	100	33	RADAR IA 0					4
3	10700	-60	20	RADAR-I 0	RADAR-II 0	TV & LASER 0			18, 22 og 24
	8900	105	35	0	26	5,7			
	8300	-60	20	0	0	0			
	6900	60	20	0	0	0			
	19600	-60	20	RADAR-IL 150	RADAR-ICL 150	RADAR-IIL 210			
4	18100	105	35	170	170	223			26, 30 og 32
	17450	-60	20	120	90	150			
	15800	60	20	0	0	30			
	15400	-60	20	0	0	0			
	13900	60	20	0	0	0			
	13975	-60	20	0	0	0			

Tabell 4.1 Forholdet mellom den tiden se-sannsynligheten er mindre enn 80% og manøverens varighet

bedre for raketter uten feil i utgangshastigheten når avstanden er mindre enn ca 18 000 meter. Når avstanden er over 18 000 meter, er virkningen av ildledningsfeilene og målbevegelsen i manøver så dominerende at en feil i raketts utgangshastighetskomponenter på ca 1 m/s er tilnærmet uten betydning.

Resultatene for sensorkombinasjonen TV og laser i taktisk situasjon 1 og 3 er dårligere enn hva man kan vente å oppnå i et operativt system. En måling hvert 10. sekund og spesielt 30 sekunders opphold mellom måleseriene - er meget konservativt for laser avstandsmåleren. En trent operatør bør kunne holde vesentlig høyere datarate enn dette.

#### 4.2.2 Degradering av se-sannsynligheten ved målmanøver

For å undersøke hvordan Penguin-raketts data (del A i tabell 2.1) og målets bevegelse påvirker se-sannsynligheten er taktisk situasjon 4 også simulert med:

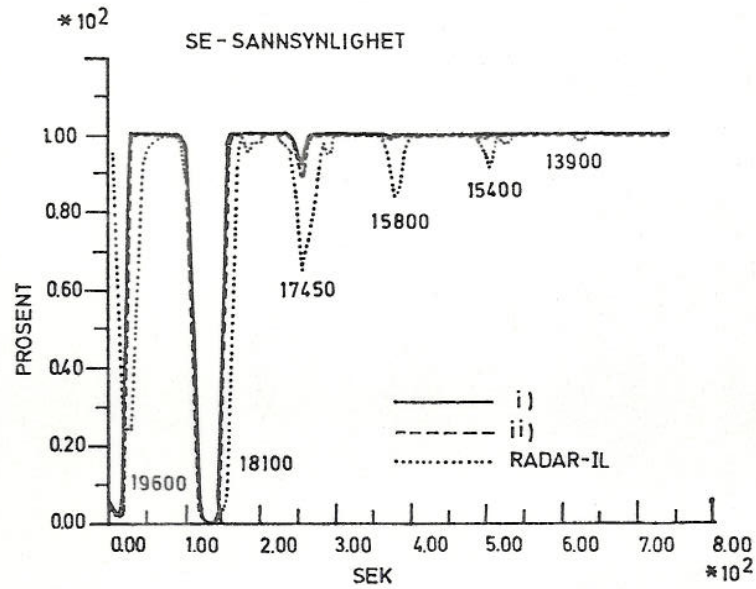
- i) Ideell målfølgning
- ii) Ideell radar

Ideell radar betyr at radarens standardavvik i avstand og peiling er null. Ideell målfølgning betyr at middelfeil og standardavvik i estimatet av målets variable er null. I simulering i) er således målets riktige posisjoner og hastighetskomponenter kjent i fyringsøyeblikket. Denne simuleringen viser således hvordan raketts data og målets bevegelse degraderer se-sannsynligheten. Simulering ii), med kode RADAR-III (tegning 34), viser i tillegg betydningen av de feil i estimatet av målets variable som selve tilstandsestimeringsfilteret genererer. I begge simuleringene er målets hastighet 15 m/s.

Figur 4.3 viser en sammenligning av se-sannsynlighetene som funksjon av tiden for simuleringene i), ii) og RADAR-IL (tegning 26).

Figur 4.1 viser at se-sannsynligheten for simuleringene i) og ii) er tilnærmet like. Dette betyr at selve tilstandsestimeringsfilteret genererer ubetydelige feil i estimatet av målets variable. Dette ser man også ved å studere feilene i estimatet som er vist i tegningene 33 og 34. Figur 4.1 viser videre at i tiden fra 0 - 18 sek er se-sannsyn-





Figur 4.1 Sammenligning av se-sannsynlighetene for simuleringene i), ii) og RADAR-IL  
(Tallene på kurven angir avstanden til målet ved minimal se-sannsynlighet)

ligheten for RADAR-IL høyest. Dette skyldes en kombinasjon av tilstands-estimeringsfilterets innsvingningsforløp og målmanøveren. For tider større enn 18 sek ser man at se-sannsynligheten for RADAR-IL er lavest spesielt når målet manøvrerer. Årsaken til dette er at feilen i estimatet av målets variable øker når målet manøvrerer. Figuren viser imidlertid tydelig at når avstanden er stor (her ca 18 000 meter), degraderes se-sannsynligheten i manøver vesentlig på grunn av raketts data og målets bevegelse i løpet av raketts flytid. Man må imidlertid være oppmerksom på at den avstanden hvor dette opptrer er avhengig av den taktiske situasjonen, målets fart og hva slags manøver som utføres.

Til slutt vises til tegning 37 som viser resultatene fra en simulering uten manøverlogikk. Denne simuleringen kan sammenlignes med resultatene i tegning 35. Som man ser går se-sannsynligheten i tegning 37 umiddelbart til null når målet manøvrerer. Den forblir også null etter manøveren fordi tilstandsestimeringsfilteret bruker meget lang tid på å konvergere mot målets nye tilstand.

## 4.2.3 Diskusjon av usikkerheten i beregnede se-sannsynligheter

De verdiene av rakettsens se-sannsynlighet som er beregnet ved hjelp av simuleringene er beheftet med en viss usikkerhet fordi både målfølgingsresultatene og rakettsens data er stokastiske variable. For en bestemt Monte-Carlo simulering av målfølgingen, d v s ett sett verdier for middelfeil og standardavvik i estimatet av målets variable, vil man ved å simulere uendelig mange rakettutskytninger i et observasjonstidspunkt finne en se-sannsynlighet som kan kalles  $p_m$ . Subskript m indikerer at denne se-sannsynligheten er avhengig av antall Monte-Carlo simuleringer som benyttes til å beregne middelfeilen og standardavviket i estimatet av målets variable. I de se-sannsynlighetsberegningene som er presentert i denne rapporten, er  $p_m$  søkt estimert ved estimatoren

$$\hat{p}_m = \frac{X}{N} \quad (4.5)$$

hvor N er antall rakettutskytninger i et observasjonstidspunkt og X er antall raketter som får målet innenfor synsfeltet. Da antall raketter som får målet innenfor synsfeltet er binomisk fordelt (5 p 71), kan det vises at standardavviket til estimatoren  $\hat{p}_m$  er gitt ved (6 p 77)

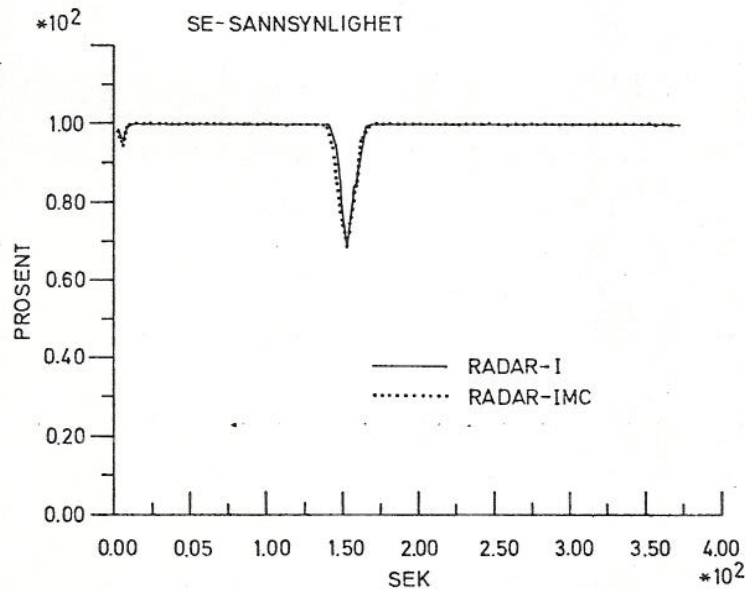
$$\sigma_{\hat{p}_m} = \left( \frac{p_m(p_m-1)}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.6)$$

I de simuleringene som er beskrevet i tabell 3.1 er  $N = 200$  (antall Monte-Carlo simuleringer lik 20). Da høyre side av ligning (4.6) er maksimal når  $p_m = 50\%$ , finner man at standardavviket for den estimerte se-sannsynligheten  $\hat{p}_m$  ligger i intervallet

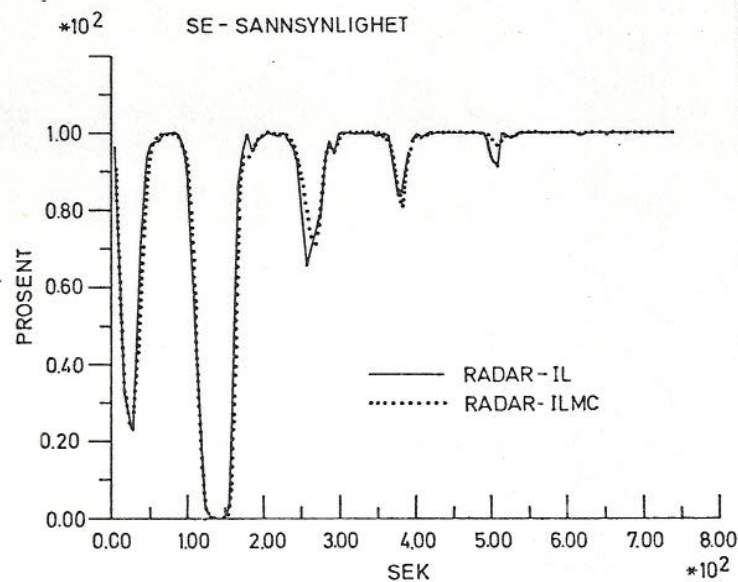
$$0\% \leq \sigma_{\hat{p}_m} \leq 3,5\% \quad (4.7)$$

Resultatet i ligning (4.7) gjelder for en bestemt Monte-Carlo simulering av målfølgingen. Dersom f eks antall Monte-Carlo simuleringer forandres, vil se-sannsynligheten  $p_m$  og estimatet av denne,  $\hat{p}_m$ , forandres. Hvordan standardavviket til den estimerte se-sannsynligheten avhenger av antall Monte-Carlo simuleringer kan trolig ikke uttrykkes analytisk. Det er imidlertid rimelig å anta at dette går mot null når både antall Monte-Carlo simuleringer av målfølgingen og antall simulerte rakettutskytninger går mot uendelig. For å vise hvordan estimert se-sannsyn-

lighet,  $\hat{p}_m$ , forandrer seg, er taktisk situasjon 1, kode RADAR-I, og taktisk situasjon 4, kode RADAR-IL, også simulert med 500 Monte-Carlo simuleringer og 1000 rakettutskytninger i hvert observasjonstidspunkt. Disse simuleringene har henholdsvis kode RADAR-IMC (tegning 35) og RADAR-ILMC (tegning 36). For å forenkle sammenligningen av resultatene er de estimerte se-sannsynlighetene fremstilt i figurene 4.2 og 4.3.



Figur 4.2 Sammenligning av se-sannsynlighet for RADAR-I og RADAR-IMC i taktisk situasjon 1



Figur 4.3 Sammenligning av se-sannsynligheten for RADAR-IL og RADAR-ILMC i taktisk situasjon 4

Figur 4.2 viser at den estimerte se-sannsynligheten i dette tilfellet forandres ubetydelig når antall Monte-Carlo simuleringer og rakettutskytninger økes. I figur 4.3 er forskjellen mellom de estimerte se-sannsynlighetene noe større enn i foregående figur, men forskjellen er ikke større enn at man kan anta at 20 Monte-Carlo simuleringer og 200 rakettutskytninger hvert observasjonstidspunkt gir et rimelig nøyaktig estimat av den virkelige se-sannsynligheten. D v s den se-sannsynligheten som vil fremkomme ved et uendelig antall Monte-Carlo simuleringer og rakettutskytninger.

## 5

OPPSUMMERING

Hensikten med dette arbeidet har vært å frembringe simuleringresultater for deler av et multi-sensor ildledningssystem som er tenkt benyttet i neste generasjons hurtiggående patruljebåter. Simuleringresultatene viser kvaliteten av målfølgingen og se-sannsynligheten for Penguin-raketten ved bruk av sensorene evt sensorkombinasjonene radar, TV (IR) og avstandsbedømmelse, TV (IR) og laser. Det er benyttet to radarer med forskjellig kvalitet i peiling. Det er også benyttet forskjellige taktiske geometrier og målmanøvre, med 20 000 meter som maksimal avstand til målet. Målbanene har enten lange partier med konstant kurs og fart før og etter en turn eller de er tilnærmet oscillerende. Måletts fart er konstant i hver simulering, og det er benyttet 15 m/s og 5 m/s. Eget fartøy ligger i ro i alle unntatt en simulering. Til målfølgingen er benyttet et "Extended Bucy-Kalman filter" som i det vesentlige er det samme som inngår i "Kobben"-klassens ildledningssystem MSI-70U. I tillegg til dette filteret er det også benyttet en manøverlogikk som bedrer målfølgingen ved manøver. Denne logikken reduserer imidlertid kvaliteten av målløsningen noe når målet holder konstant kurs og fart. Reduksjonen er uten betydning for det våpen (Penguin-raketten) som er benyttet i disse simuleringene.

Målfølgingsresultatene viser at når det benyttes sensorer med god avstand- og peilnøyaktighet, f eks radar eller TV (IR) og laser, så er konvergenstiden for målløsningen (d v s den tiden det tar før standardavviket til kursestimatet er mindre enn  $10^0$ ) fra 15 sek - 18 sek når målet holder konstant kurs og fart (lik 15 m/s). Denne konvergens-

tiden kan reduseres noe ved å øke sensorenes datarate. Spesielt gjelder dette sensorkombinasjonen TV (IR) og laser. En økning av dataraten vil imidlertid bare gi ubetydelig reduksjon av konvergenstiden når målet holder lav hastighet ( $<5$  m/s), fordi et nøyaktig kursestimat krever en viss utseilt distanse. Etter innsvingningsforløpet følges målet med relativt stor nøyaktighet inntil målet manøvrerer. Under en manøver øker middelfeilen og standardavviket til estimatet av målets variable avhengig av kursforandringen og manøverens varighet. Etter manøveren avtar middelfeilen og standardavviket, p g a manøverlogikken, meget raskt til sine opprinnelige verdier. Denne innsvingningstiden er tilnærmet lik konvergenstiden.

Når det benyttes sensorer med god peilenøyaktighet og unøyaktige avstandsmålinger som f eks TV (IR) og avstandsbedømmelse (standardavvik i avstand 1500 m), blir konvergenstiden for målløsningen meget lang, ca 140 sek, og det oppstår store middelfeil og standardavvik i estimatet når målet manøvrerer. Denne sensorkombinasjonen er tatt med i simuleringene for å vise at selv om eget fartøy ligger i ro og avstandsinformasjonen er meget dårlig, så oppnår man at målløsningen konvergerer og at det ikke oppstår divergens etter en manøver. De resultatene som ble oppnådd med denne sensorkombinasjonen vil bedres dersom eget fartøy settes i bevegelse og utfører manøvre.

Simuleringsresultatene viser også at man kan følge egne fartøyer selv om disse kommer meget nær uten at det oppstår noen form for divergens i målløsningen.

Resultatene av målfølgingen er benyttet som inngangsdata for et program som simulerer skyting av Penguin-raketter. Dette programmet beregner rakettsens se-sannsynlighet (sannsynligheten for at raketten får målet innenfor søkerens synsfelt) for hvert observasjonstidspunkt i målfølgingsprogrammet. Rakettsens treffsannsynlighet kan ved hjelp av se-sannsynligheten beregnes som skissert i innledningen.

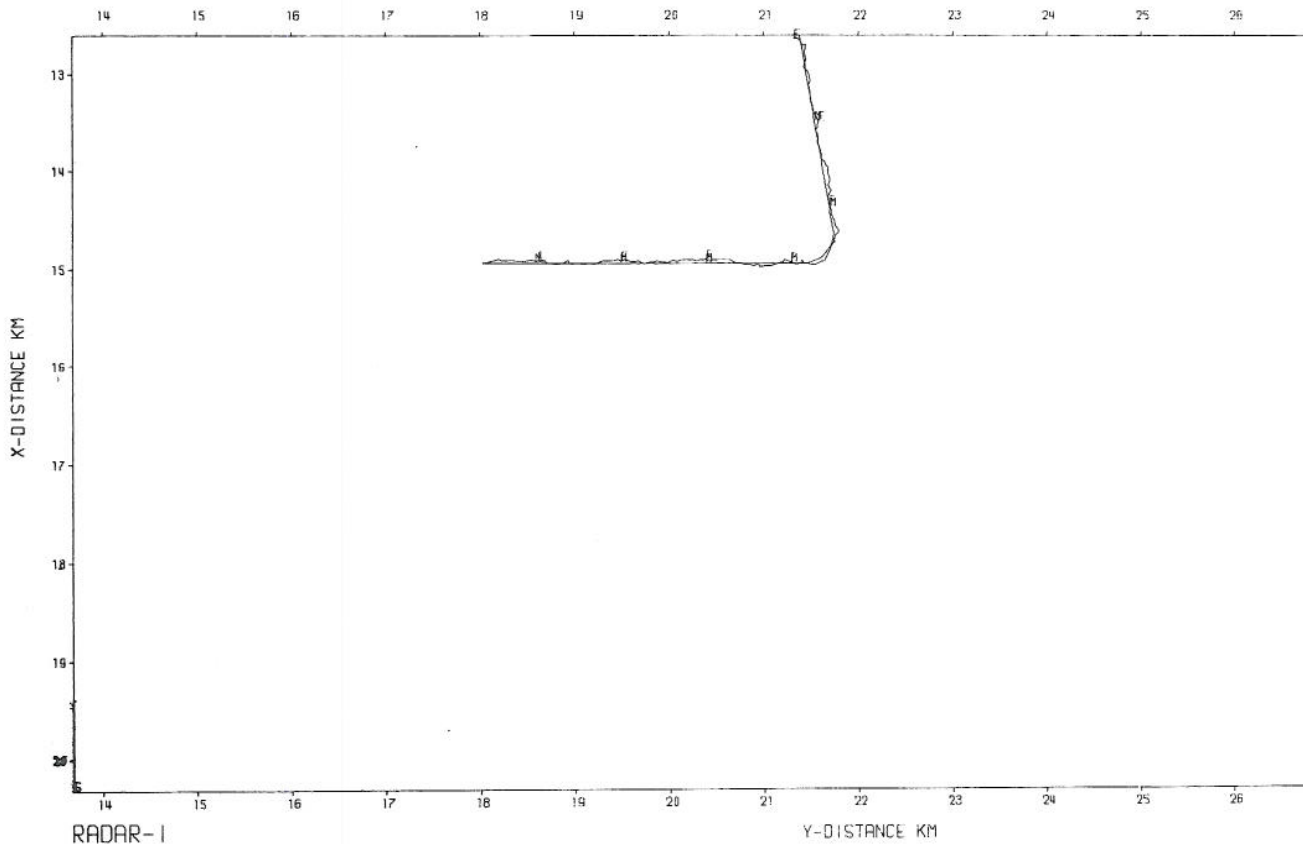
Simuleringsresultatene viser at for de målavstander som er benyttet (maks 20 000 meter) så er se-sannsynligheten alltid tilnærmet 100% når målet holder konstant kurs og fart. Ved målhastigheter på 5 m/s er den tilnærmet 100% også under målmanøvre. Når målets hastighet er 15 m/s og avstanden større enn ca 9000 meter, avtar se-sannsynligheten når

målet manøvrerer. Reduksjonen er vesentlig avhengig av kursforandringen og taktisk geometri. For avstander større enn 18 000 meter er det fremkommet resultater hvor se-sannsynligheten blir lik 0 når målet forandrer kursen  $105^{\circ}$  i løpet av 35 sek. Tilleggssimuleringer har vist at ved denne mål-avstanden og -farten bruker raketten så lang tid frem til målet at dette ved å manøvrere har beveget seg ut av søkerens synsfelt. Det er således en kombinasjon av målets bevegelse og raketts flyvetid som i det vesentlige bestemmer se-sannsynligheten ved store avstander når målet manøvrerer.

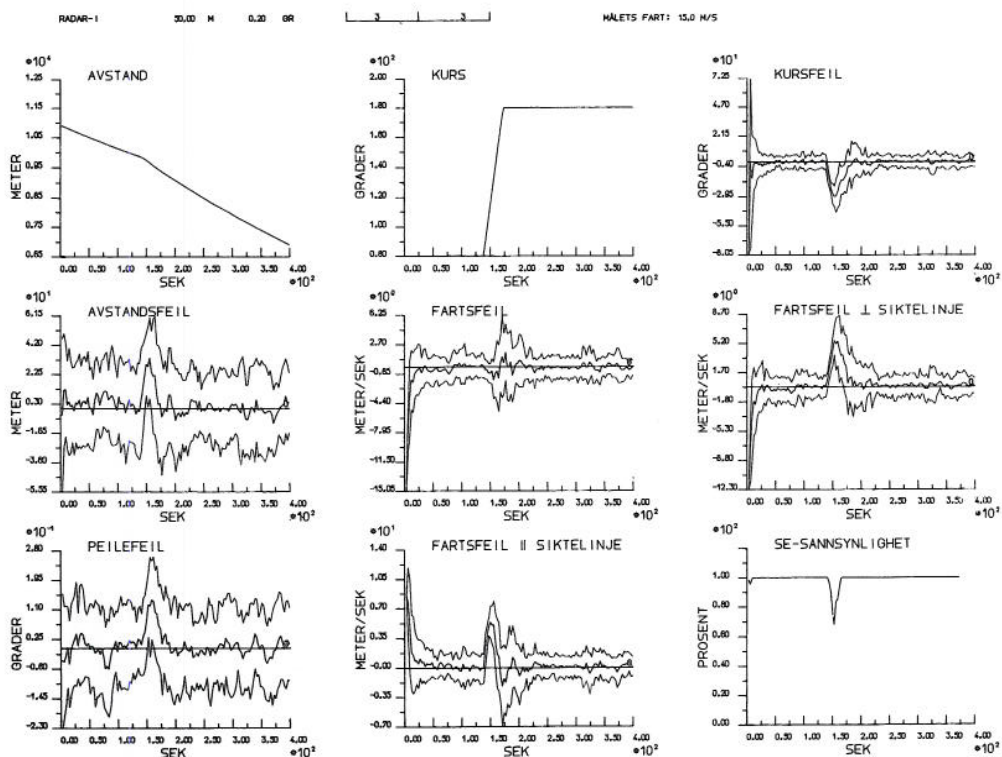
De simuleringsresultatene som presenteres i denne rapporten er fremkommet ved 20 Monte-Carlo simuleringer når det gjelder målfølgingen, og ved simulert utskytning av 200 Penguin-raketter i hvert observasjonstidspunkt når det gjelder beregningen av se-sannsynligheten. Statistiske betraktninger og tilleggssimuleringer har vist at hovedtrekkene i resultatene forandres uvesentlig når antall Monte-Carlo simuleringer og rakettutskytninger økes.

Litteratur

- (1) Ekre, H - Alternative beregninger av treffsannsynligheten for Penguin, Teknisk notat E-96, Forsvarets forskningsinstitutt (1966)
- (2) Berg, B D  
S Braathen  
A Fagri - Description of the MSI-70U, Tracking programme, Notat S-235, Forsvarets forskningsinstitutt (1971) Restricted
- (3) Bingen, E - Generell beskrivelse av et målfølgingsprogram for overflatefartøyer, Teknisk notat E-638, Forsvarets forskningsinstitutt (Publiseres senere) Begrenset
- (4) Bendat, J S  
A G Piersol - Measurement and analysis of random data, John Wiley and Sons (1966)
- (5) Høyland, A - Sannsynlighetsregning og statistisk metodelære - Del I Sannsynlighetsregning, TAPIR (1973)
- (6) Høyland, A - Sannsynlighetsregning og statistisk metodelære - Del II Statistisk metodelære, TAPIR (1973)



TEGNING 1



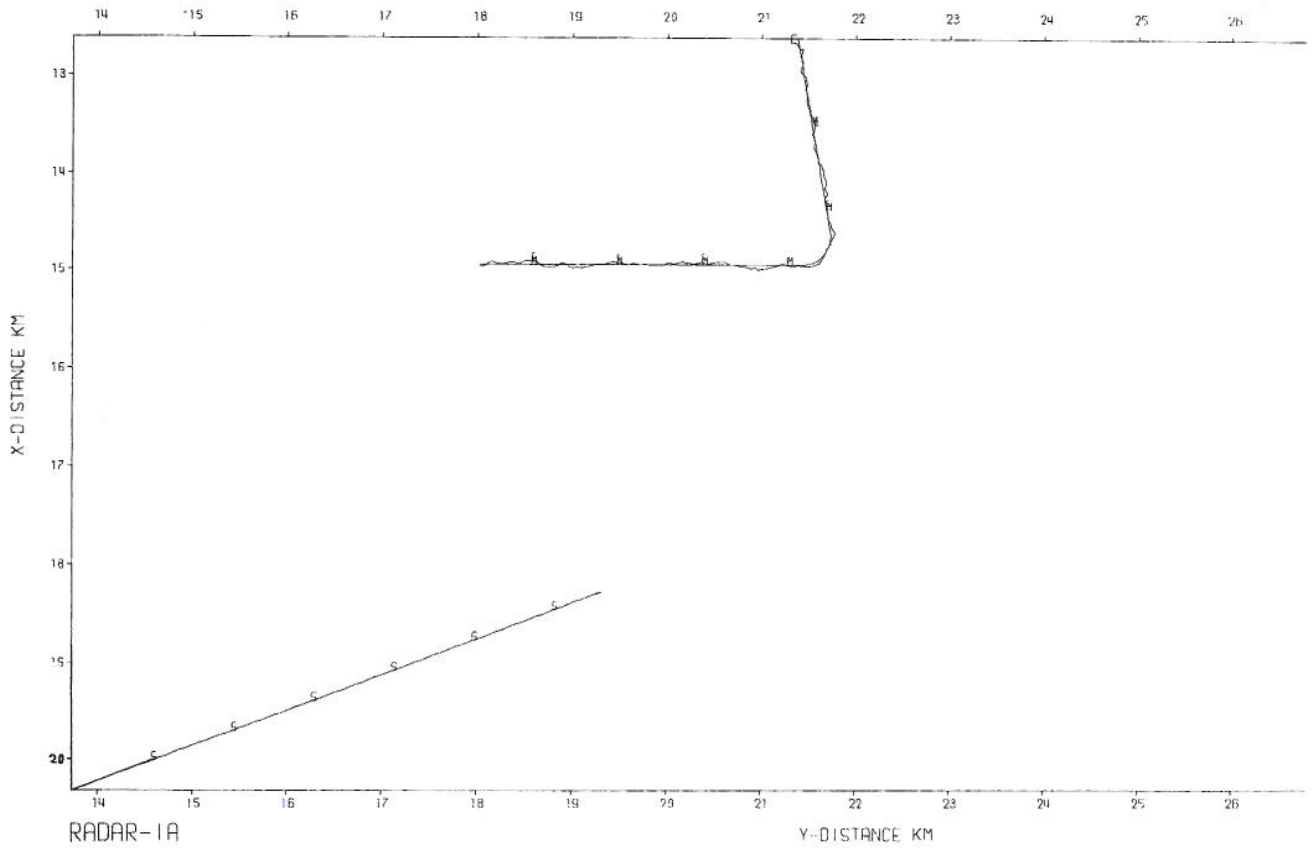
TEGNING 2

KONFIDENSIELT

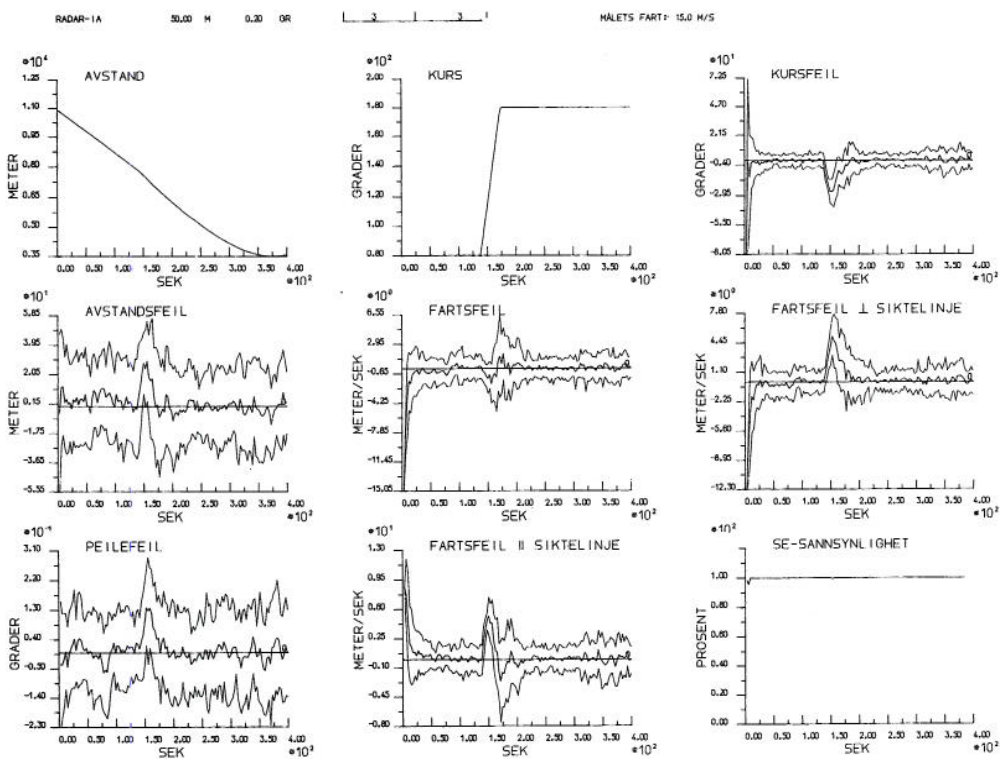
KONFIDENSIELT

TEGNING





TEGNING 3

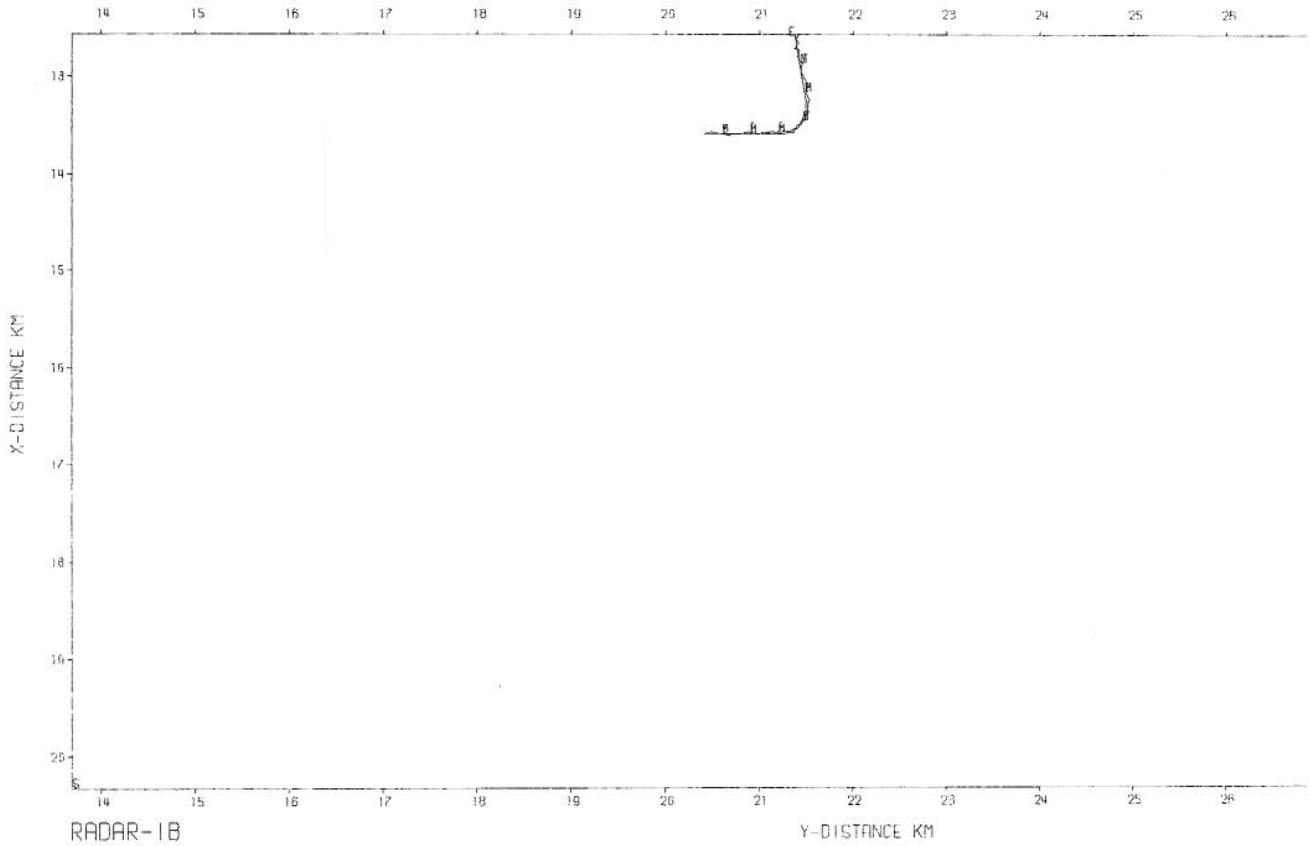


TEGNING 4

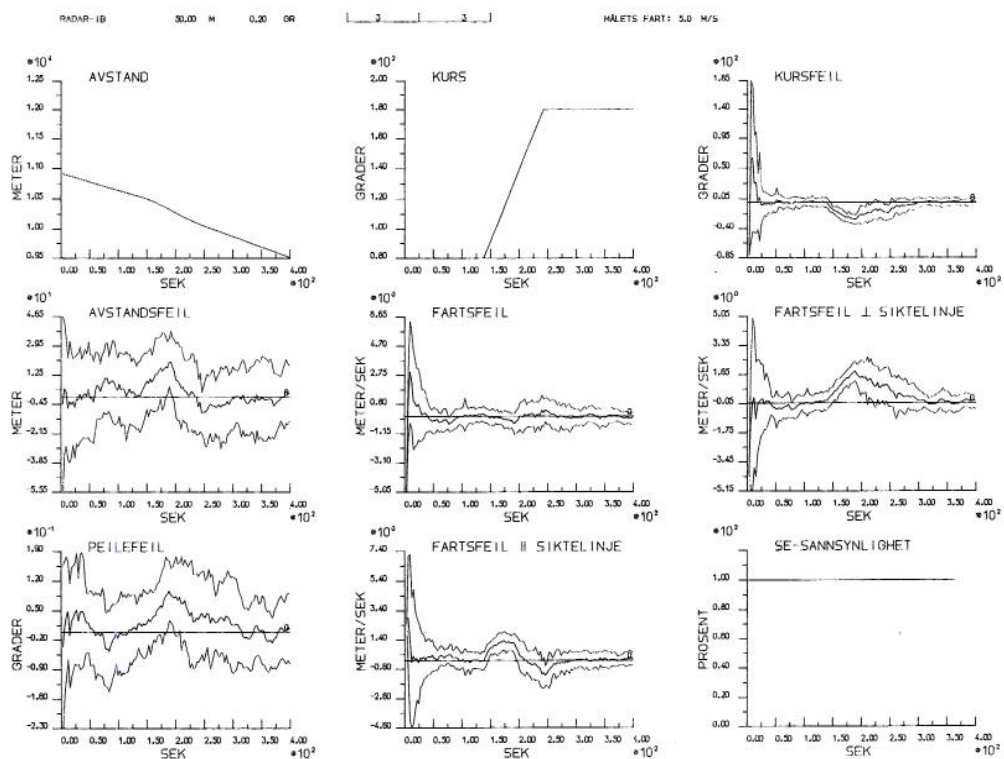
KONFIDENSIELT

KONFIDENSIELT

TEGNING



TEGNING 5

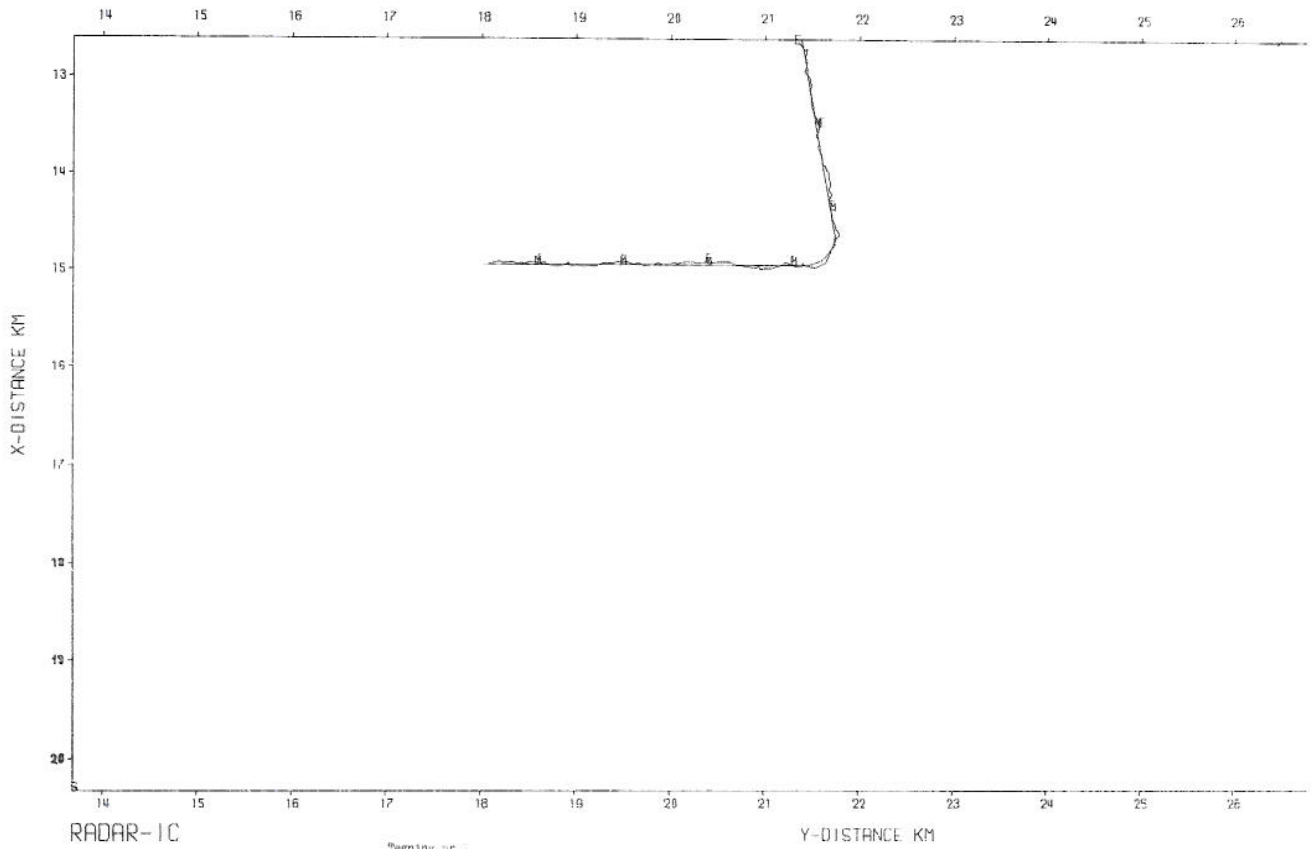


TEGNING 6

KONFIDENSIELT

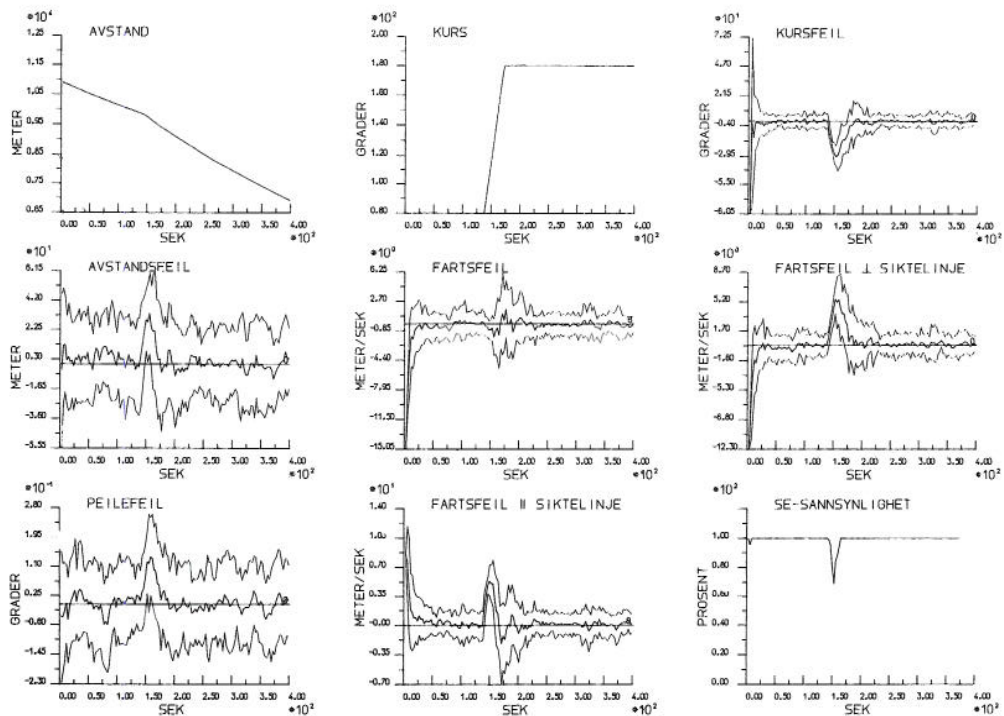
KONFIDENSIELT

TEGNING



TEGNING 7

RADAR-IC 30.00 M 0.20 DR 3 3 HÅLETS FART: 15.0 M/S

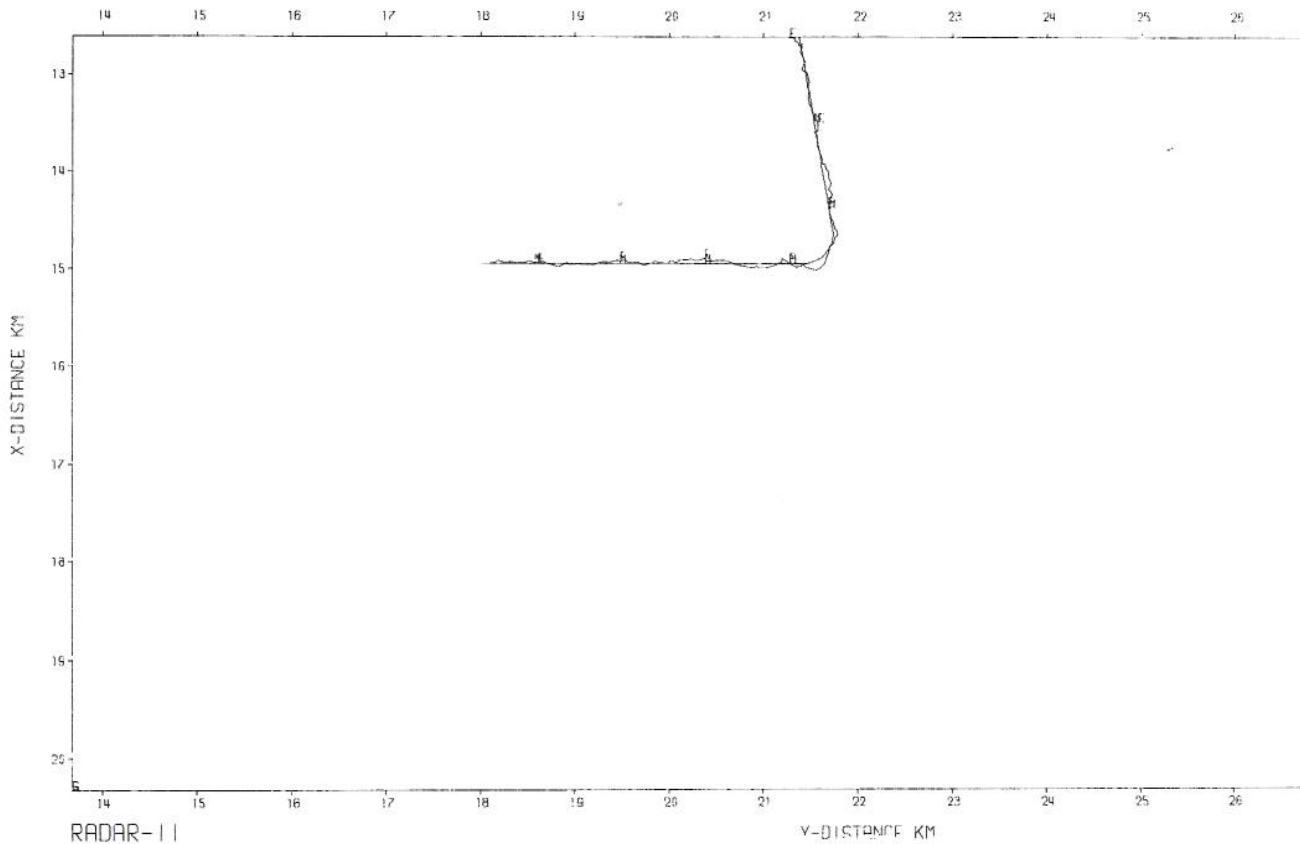


TEGNING 8

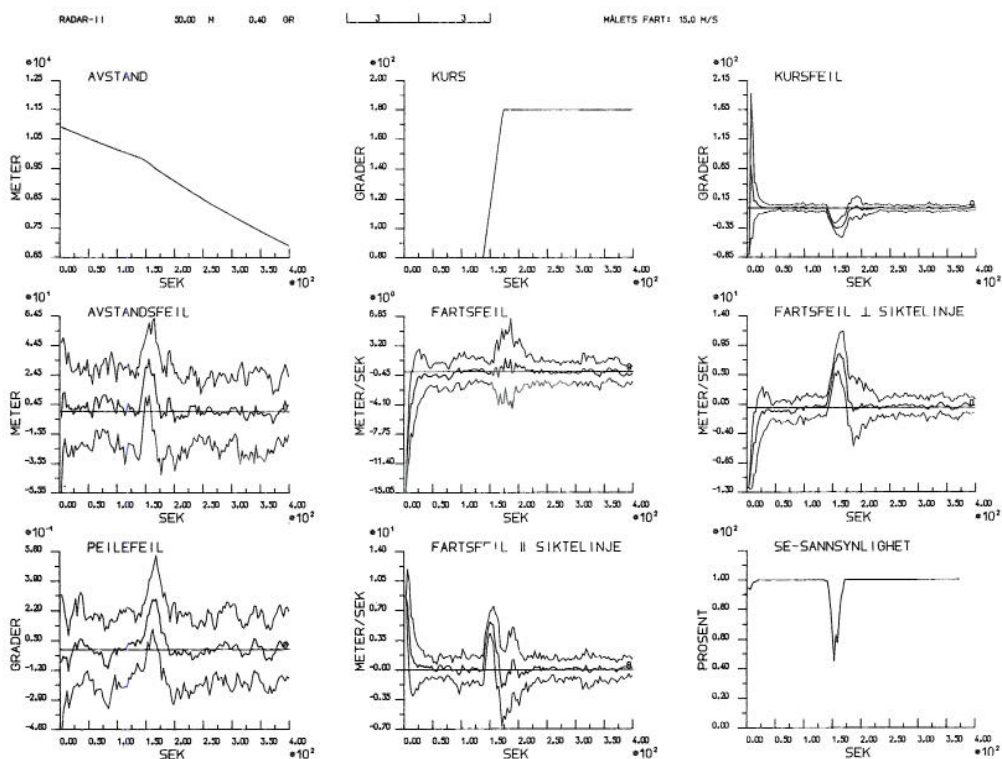
KONFIDENSIELLT

KONFIDENSIELLT

TEGNING



TEGNING 9

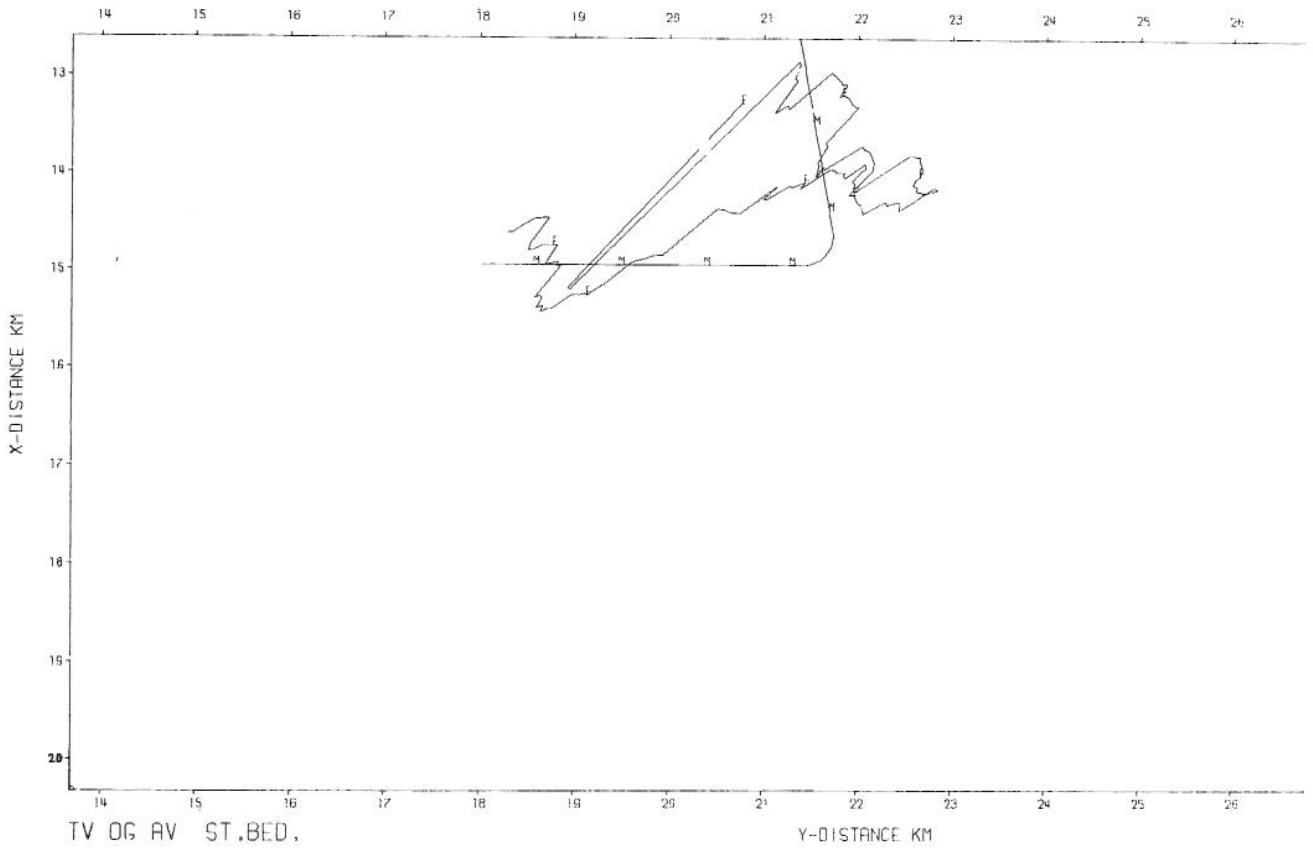


TEGNING 10

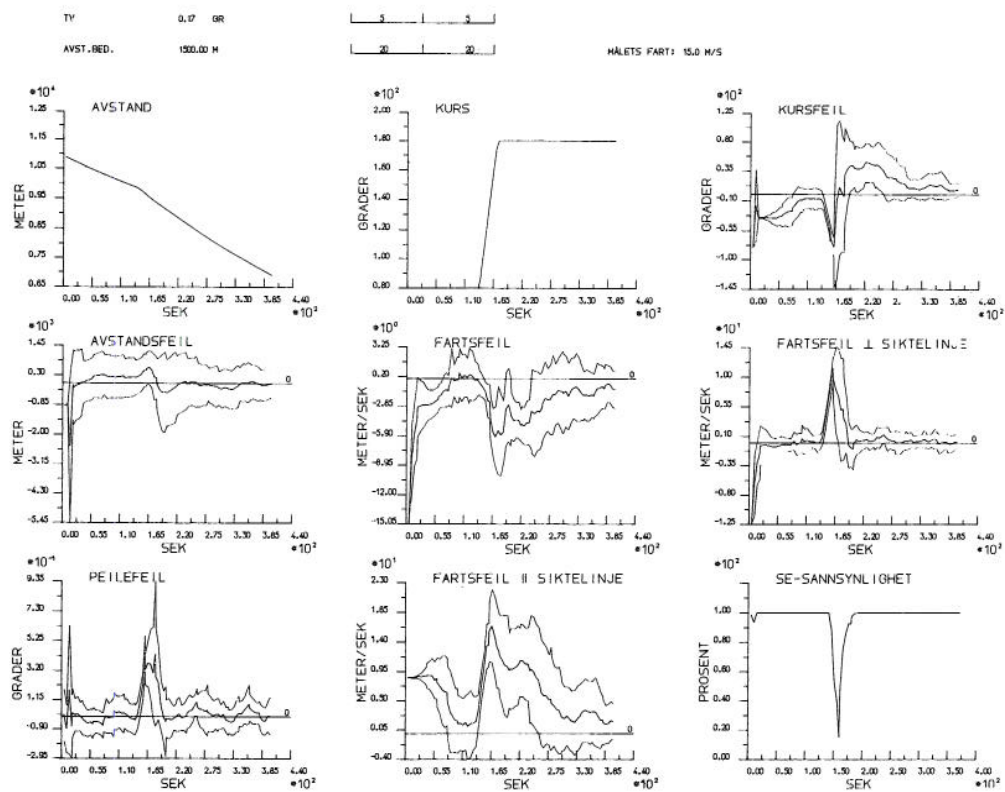
KONFIDENSIELT

TEGNING

KONFIDENSIELT



TEGNING 11

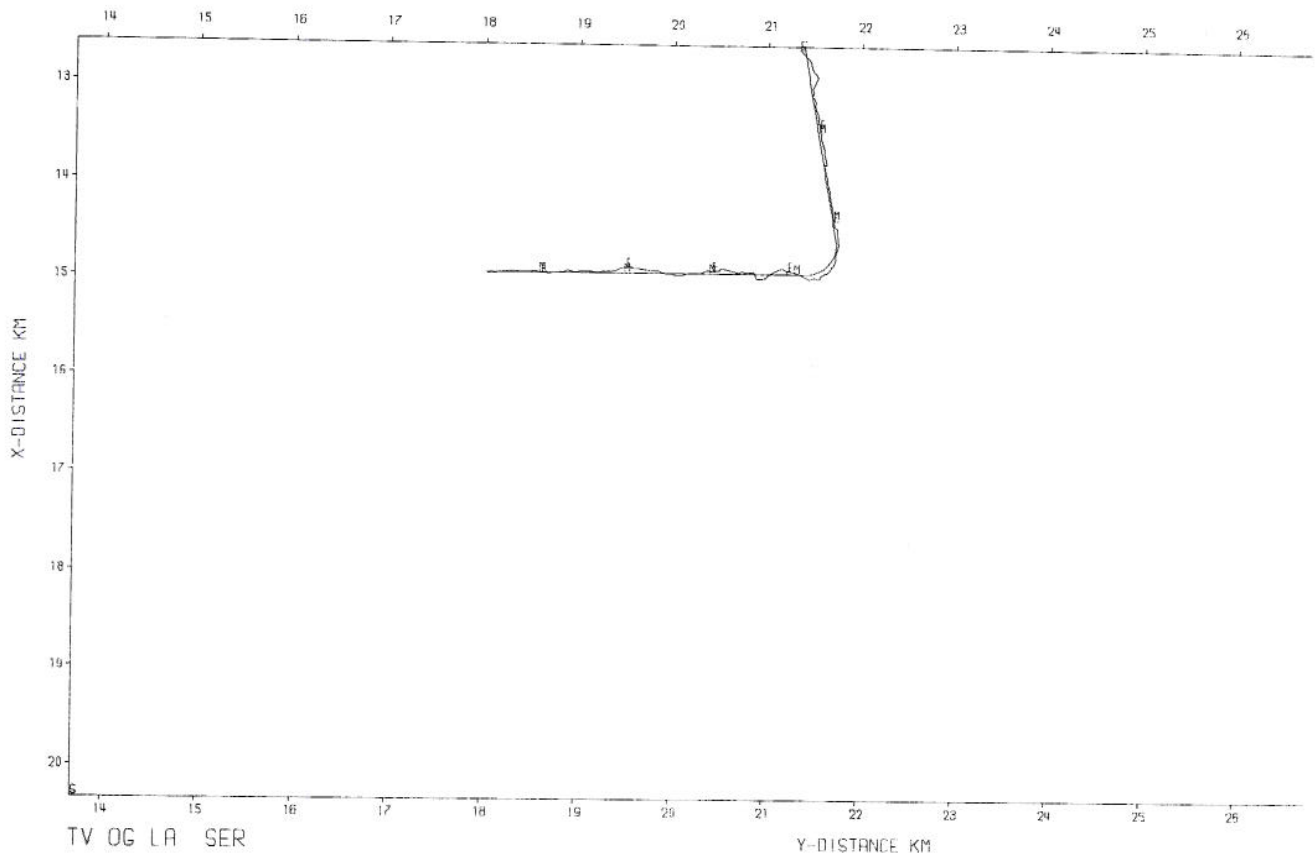


TEGNING 12

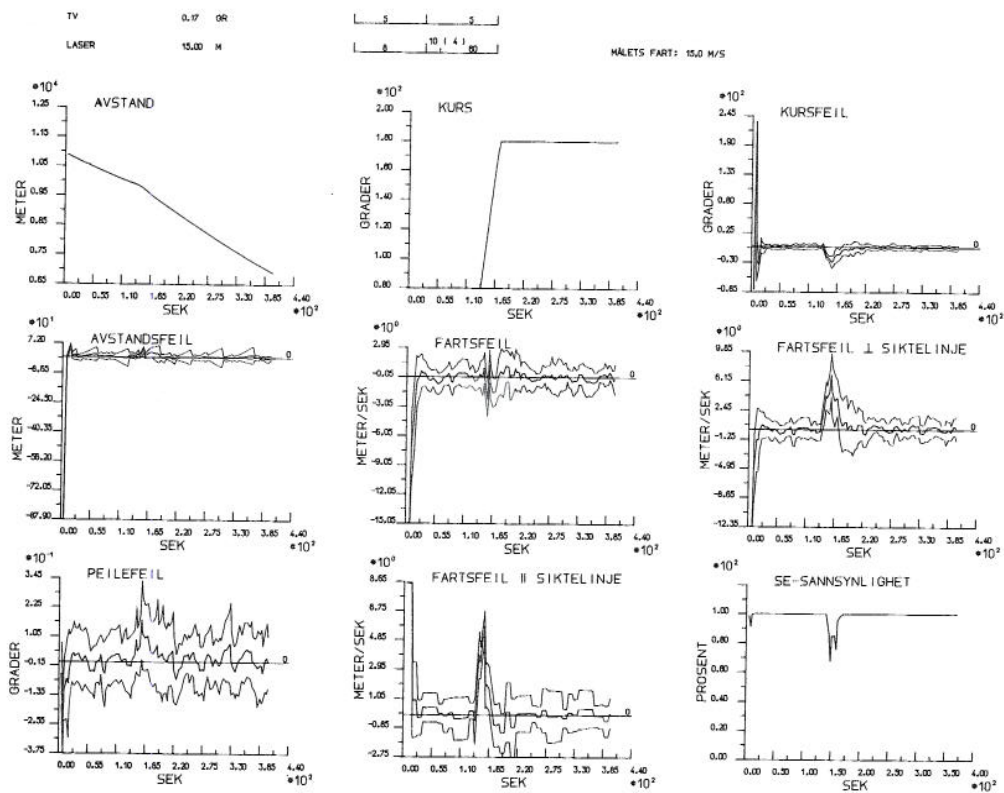
KONFIDENSIELT

KONFIDENSIELT

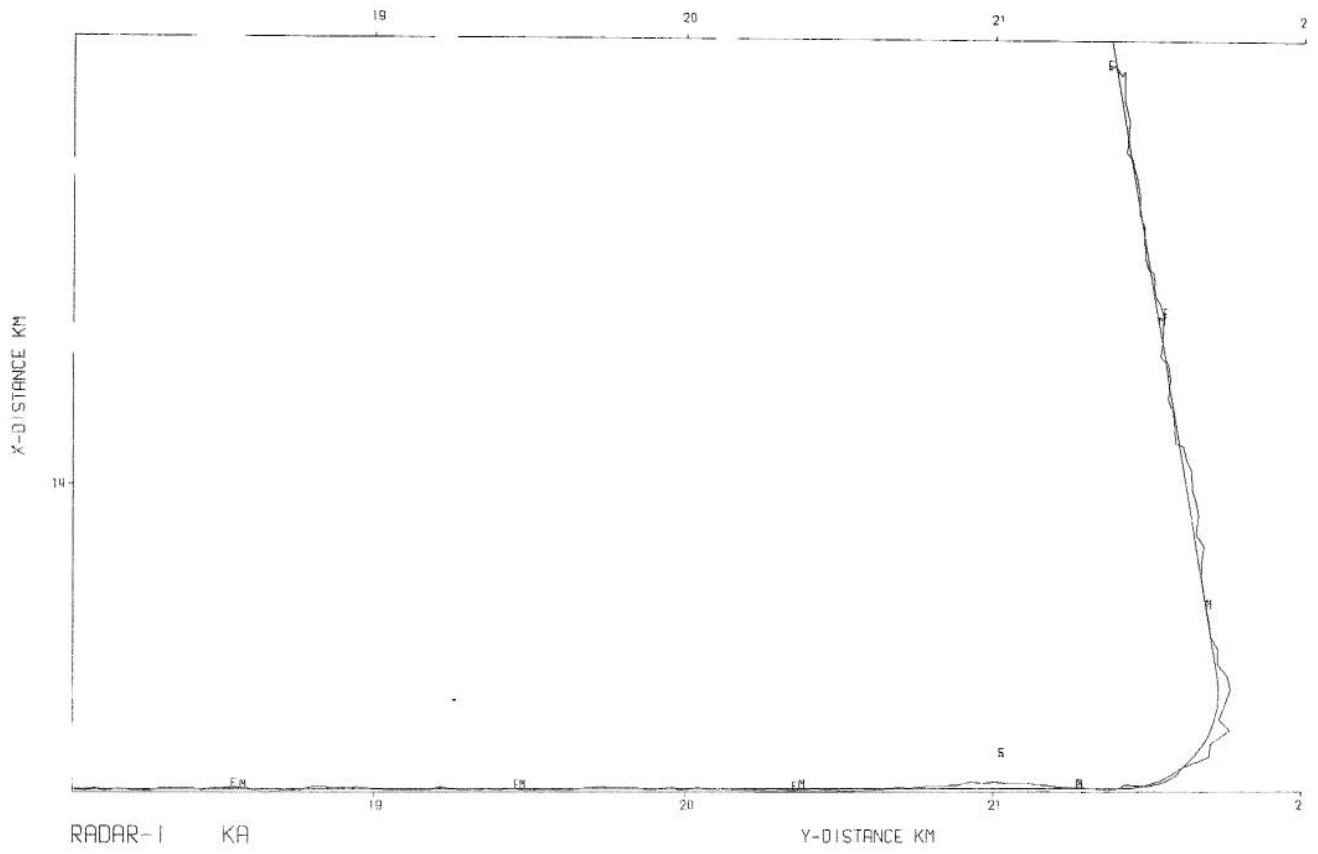
TEGNING



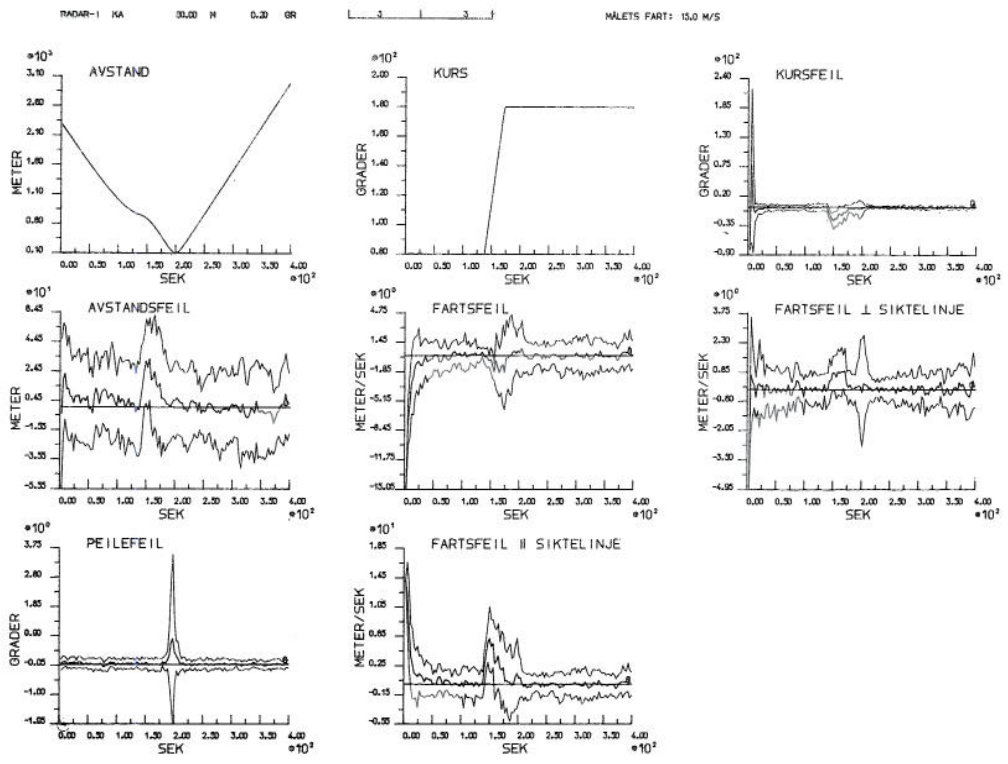
TEGNING 13



TEGNING 14



TEGNING 15

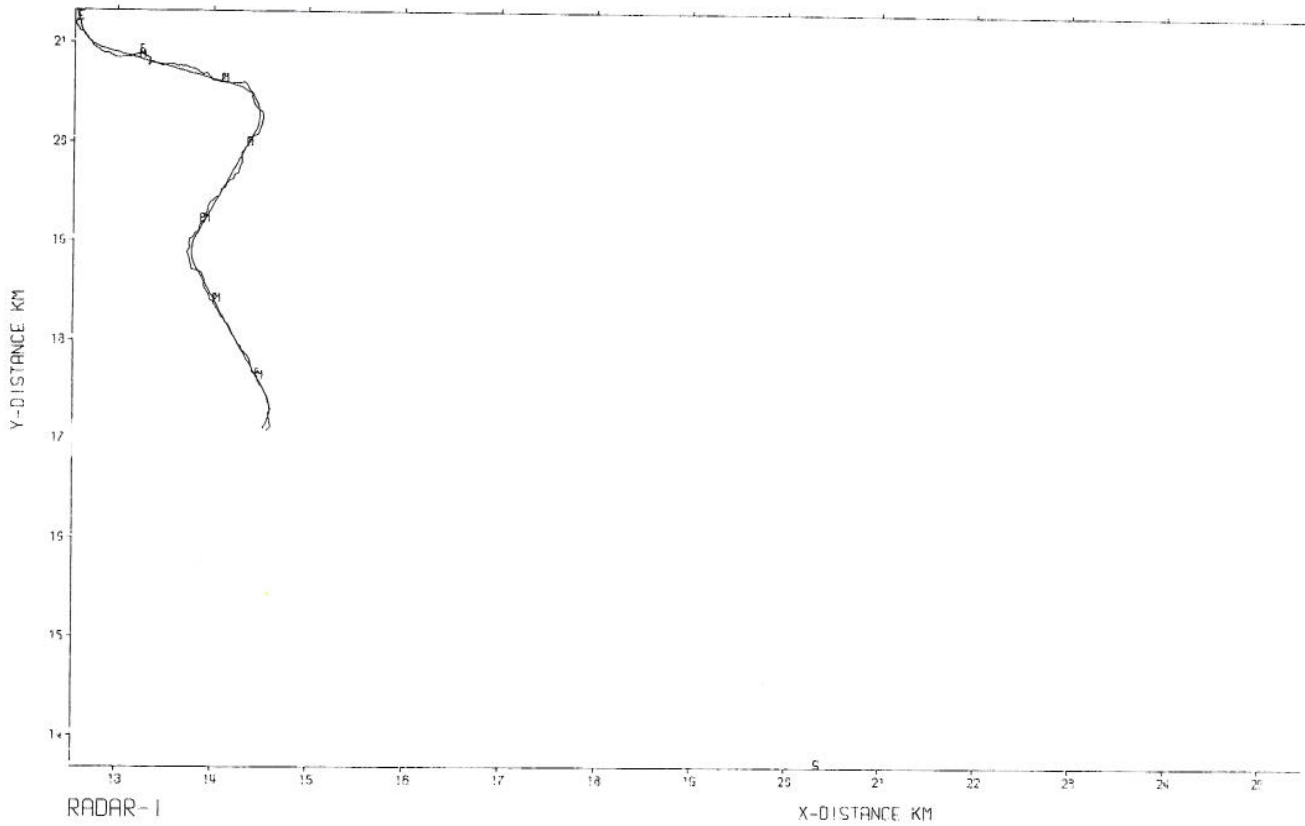


TEGNING 16

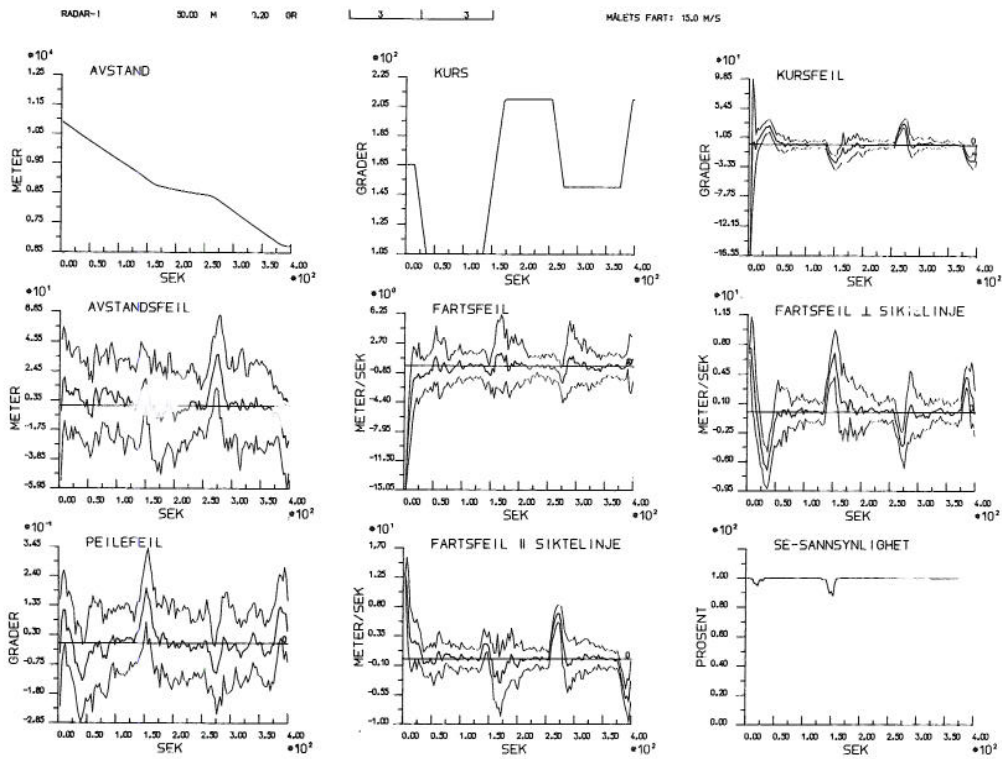
KONFIDENSIELT

KONFIDENSIELT

TEGNING 15  
15



TEGNING 17



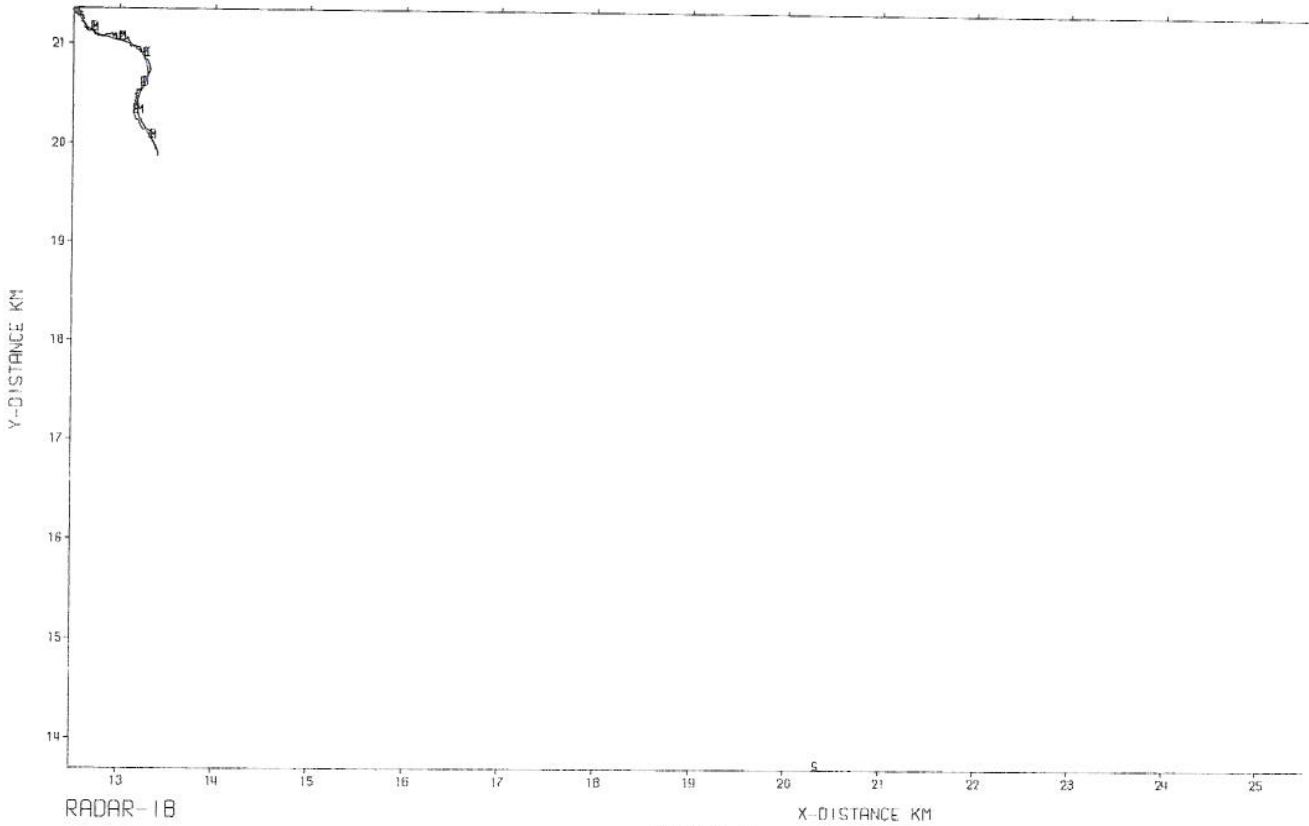
TEGNING 18

KONFIDENSIELT

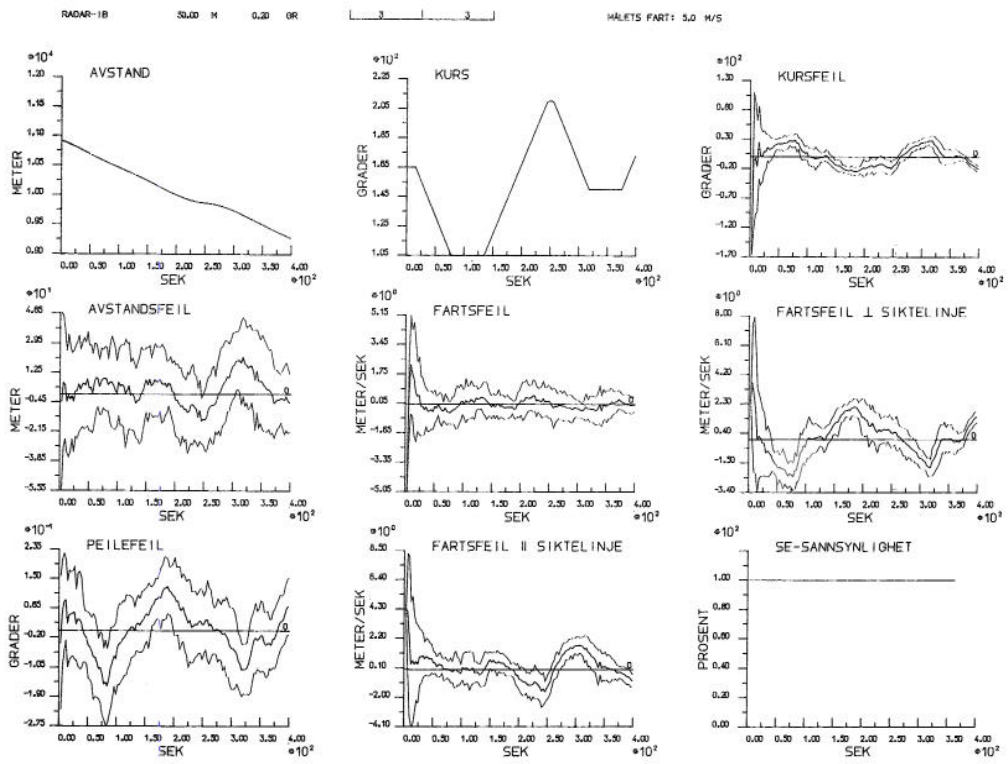
KONFIDENSIELT

TEGNING 17  
18

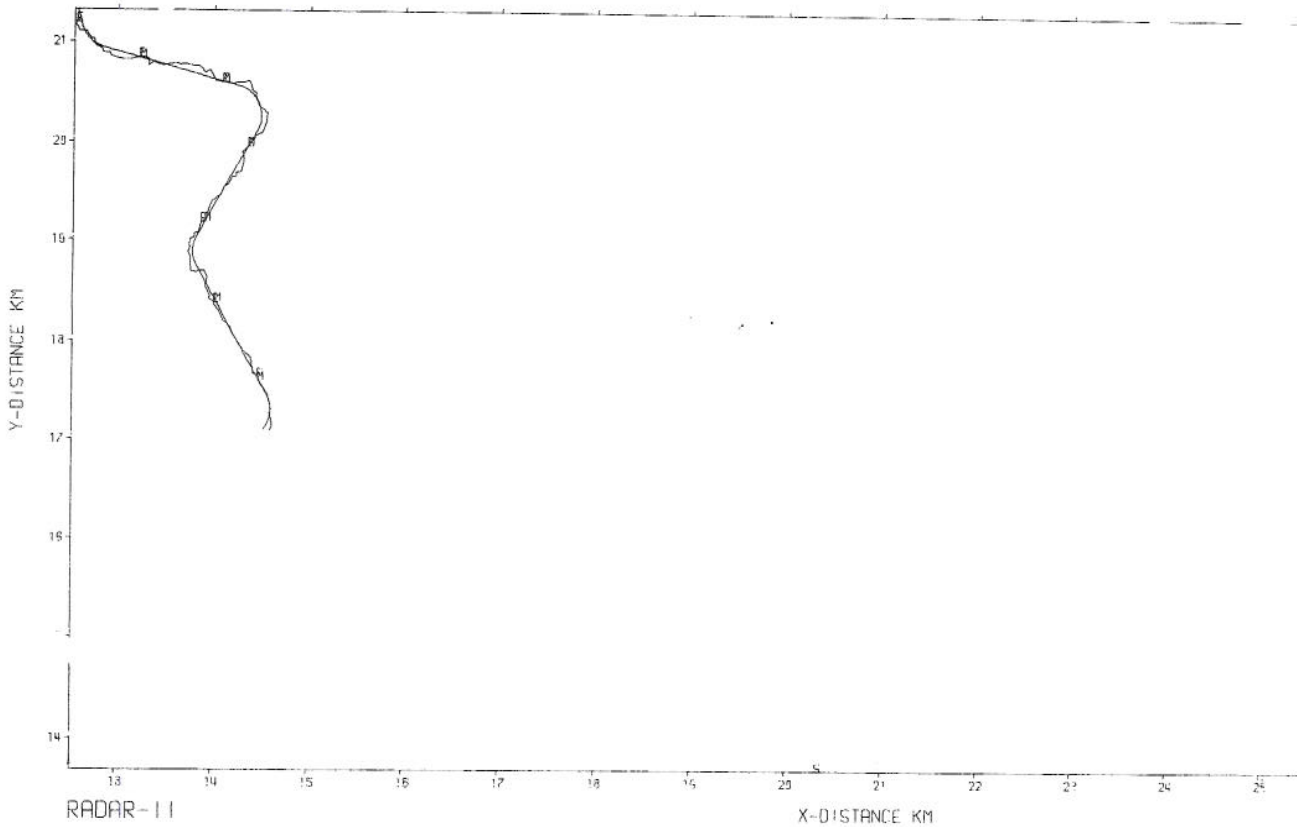




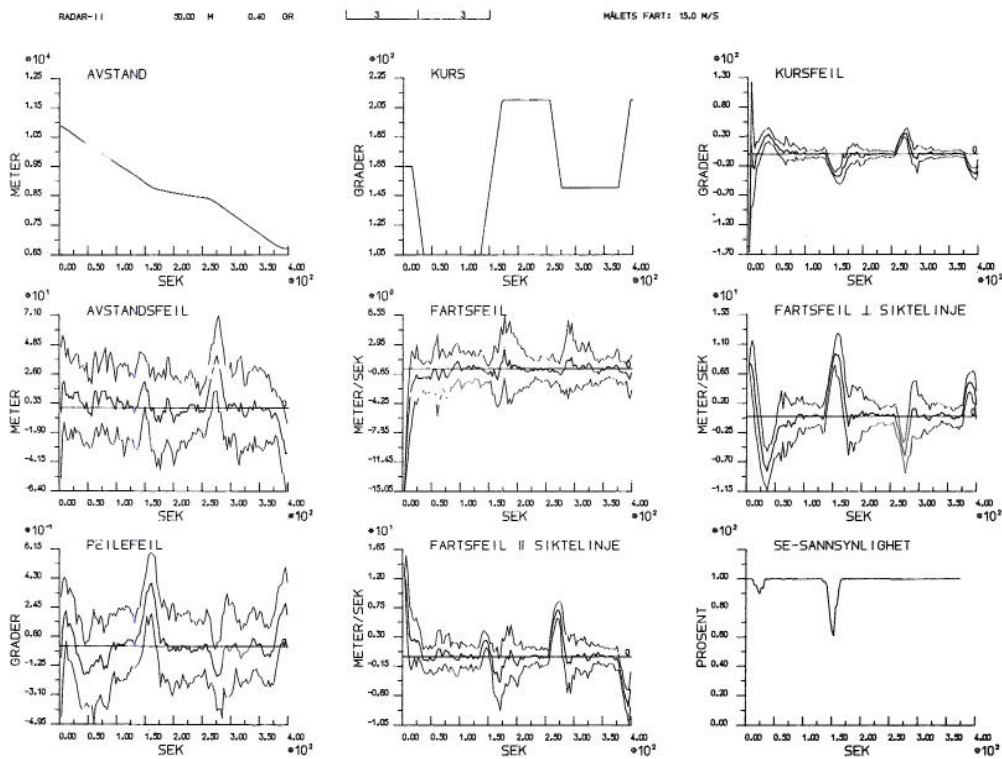
TEGNING 19



TEGNING 20



TEGNING 21

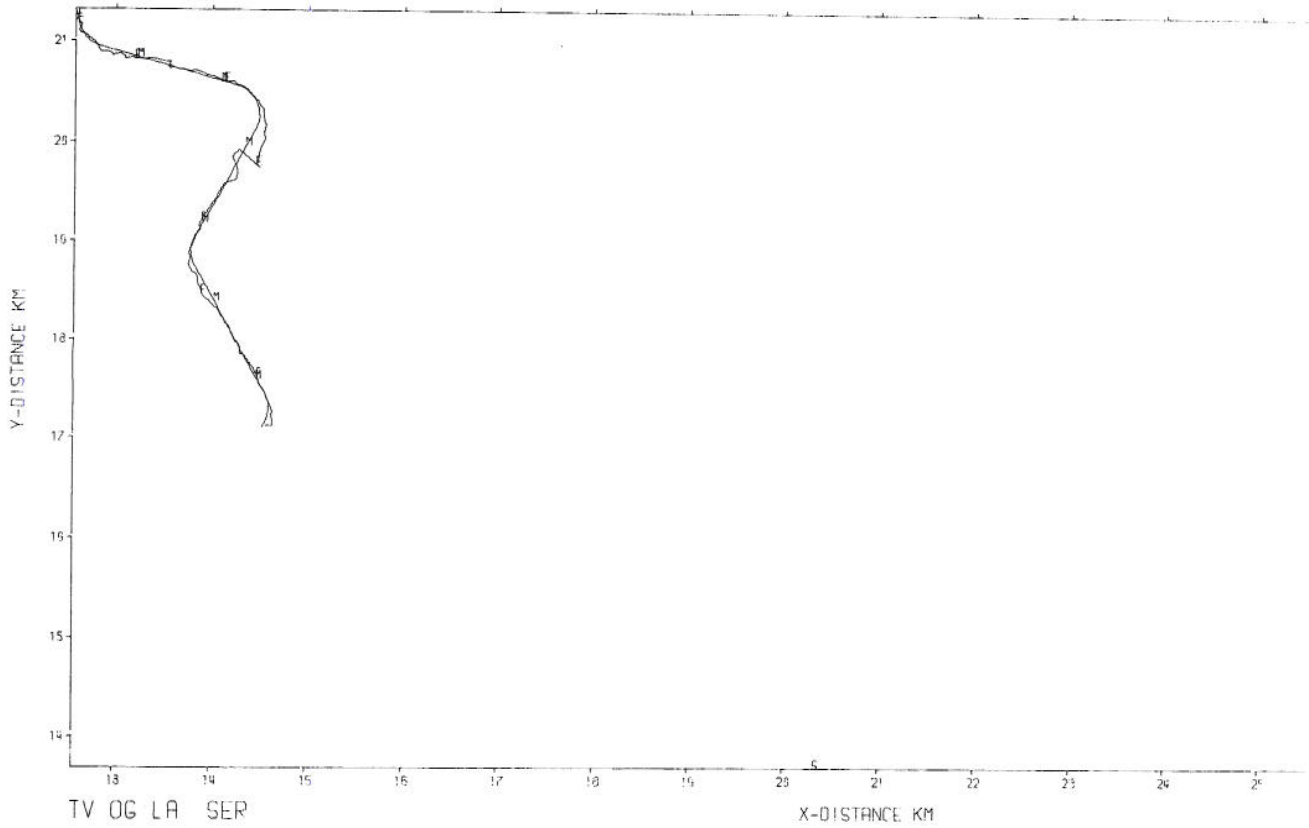


TEGNING 22

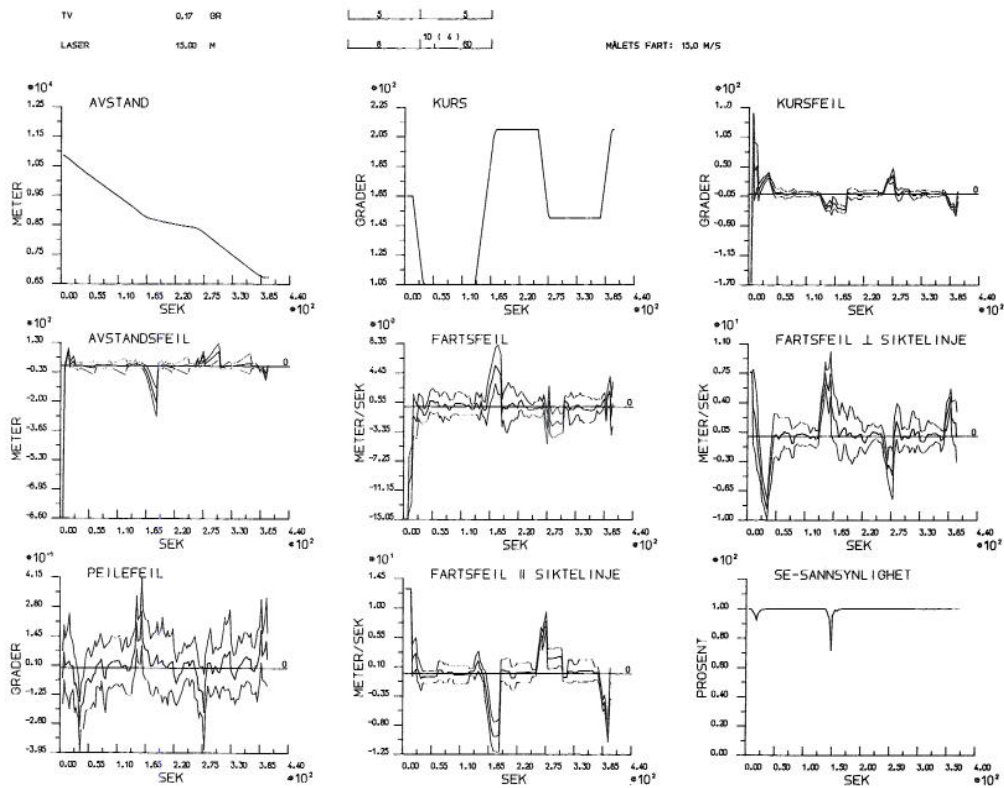
KONFIDENSIELT

KONFIDENSIELT

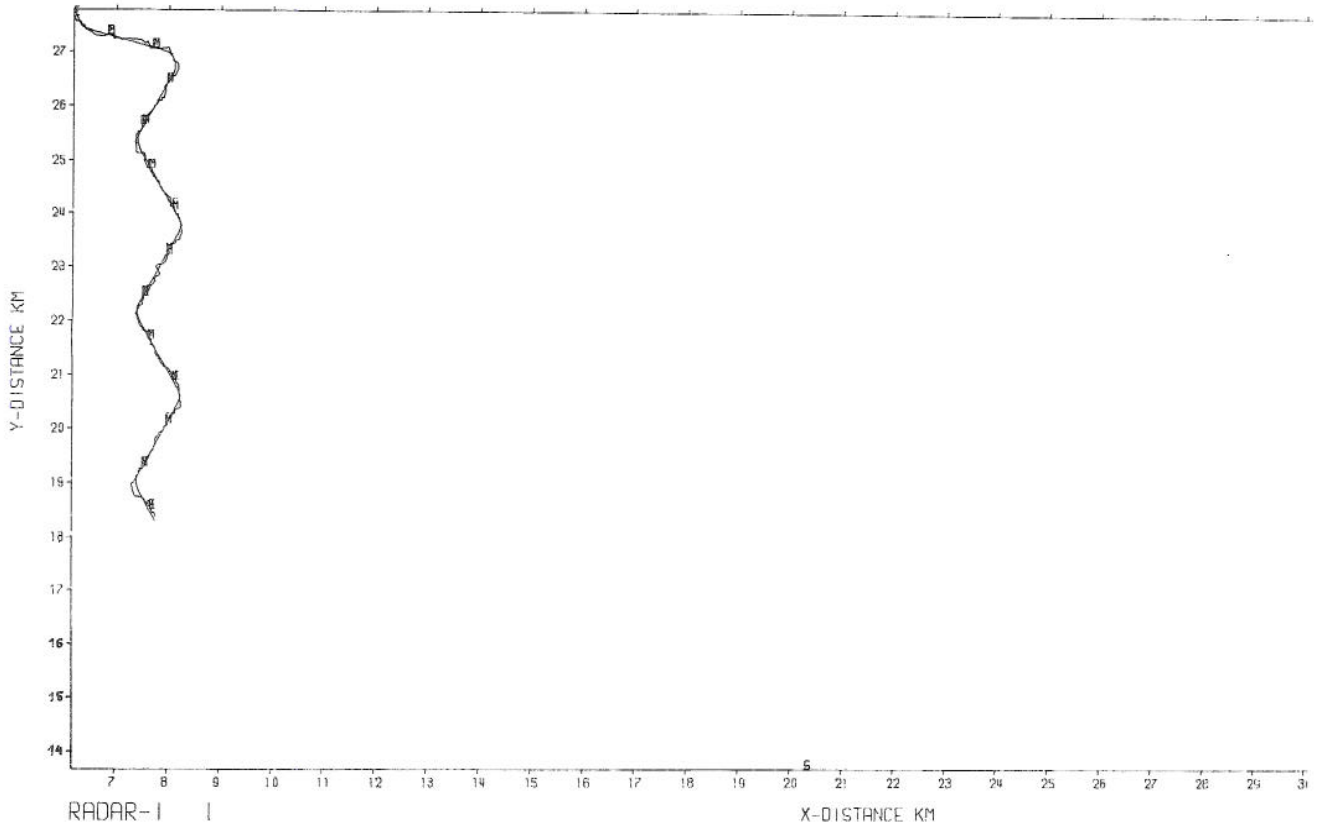
TEGNING 21  
TEGNING 22



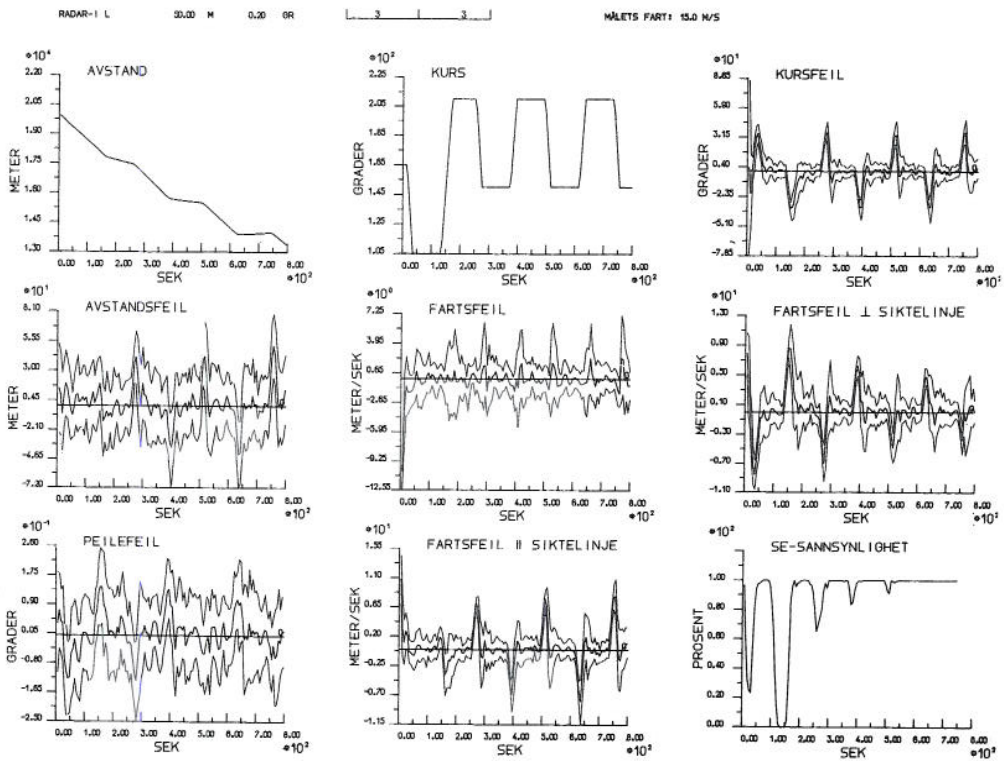
TEGNING 23



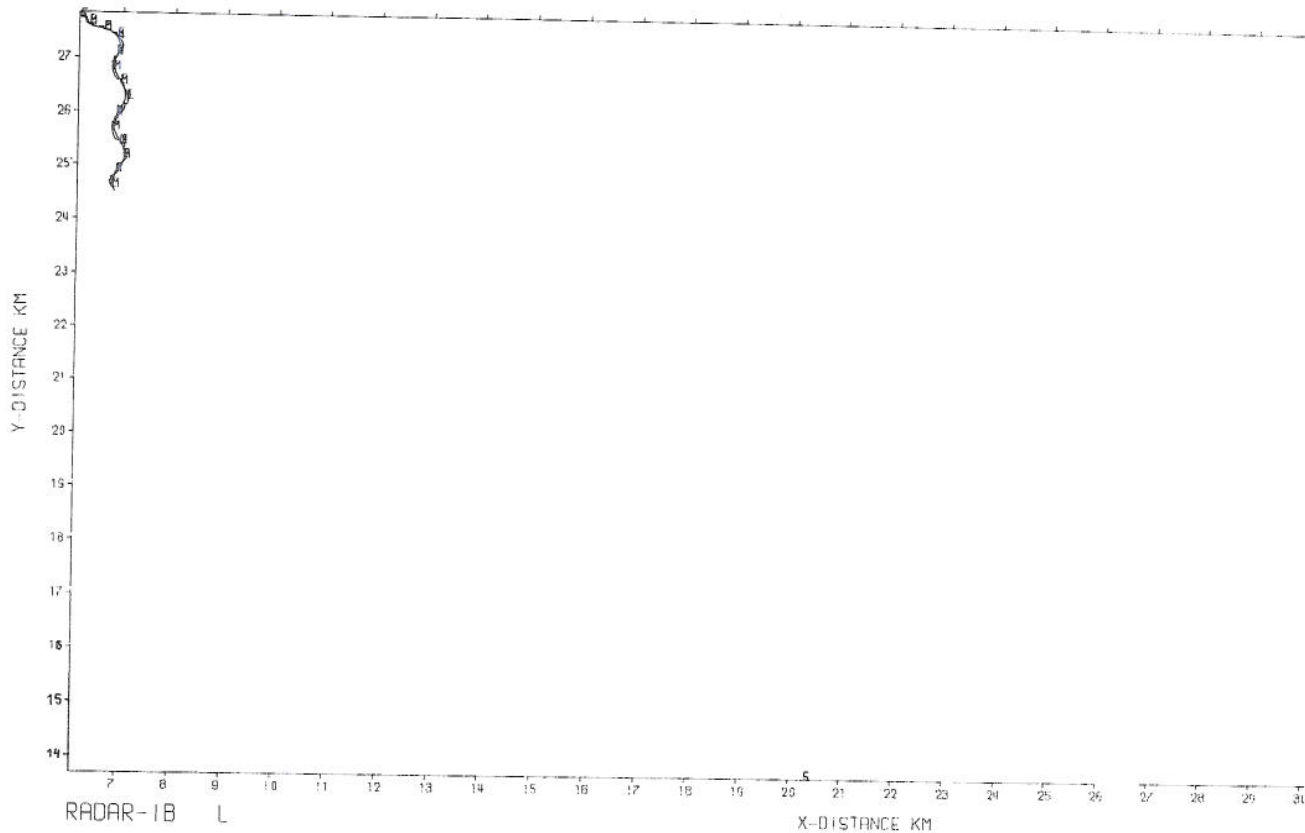
TEGNING 24



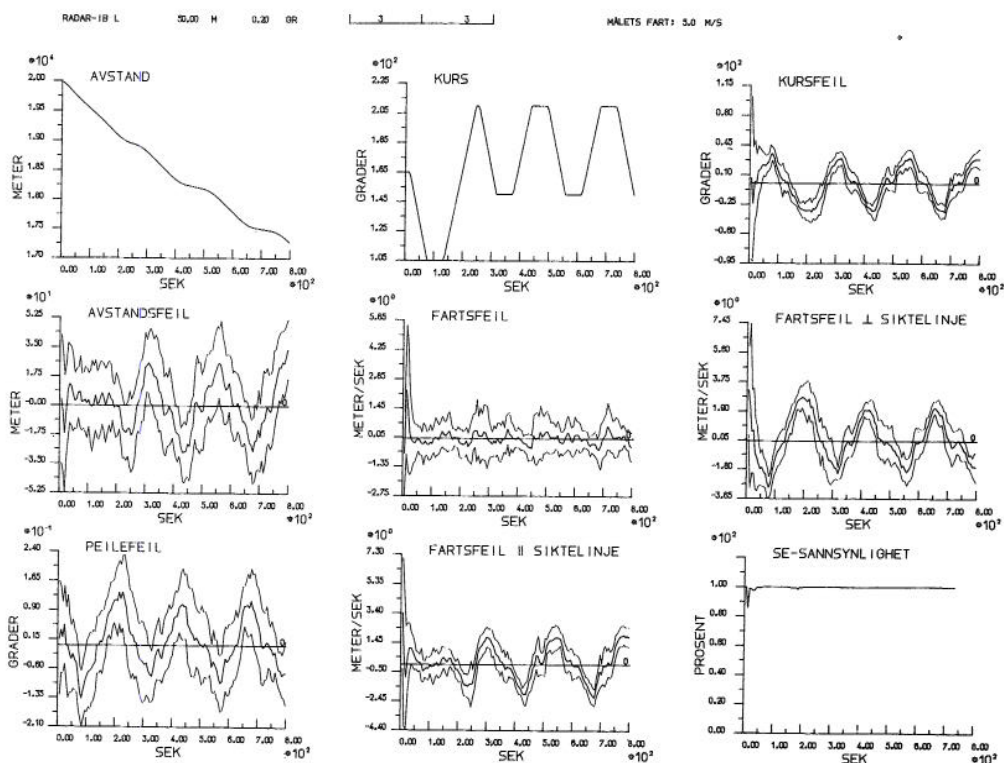
TEGNING 25



TEGNING 26



TEGNING 27

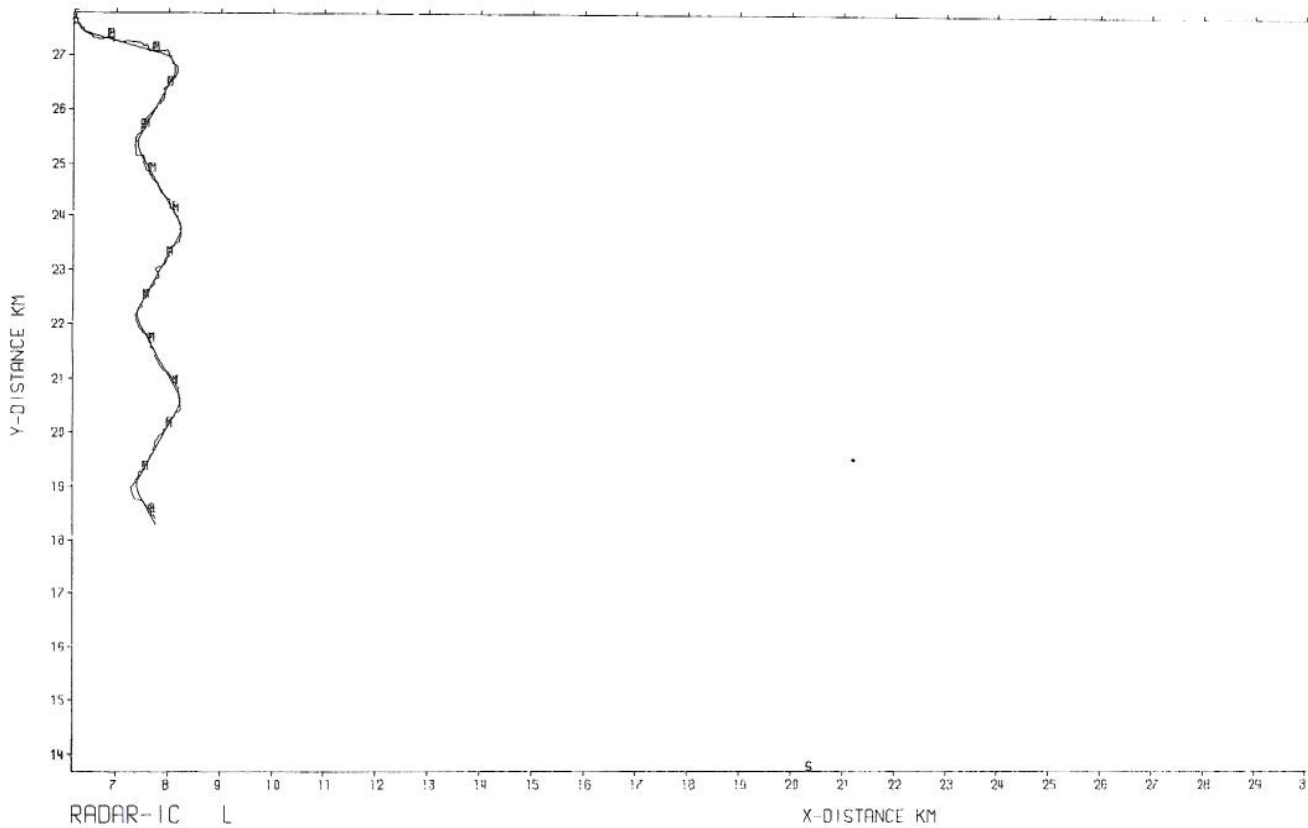


TEGNING 28

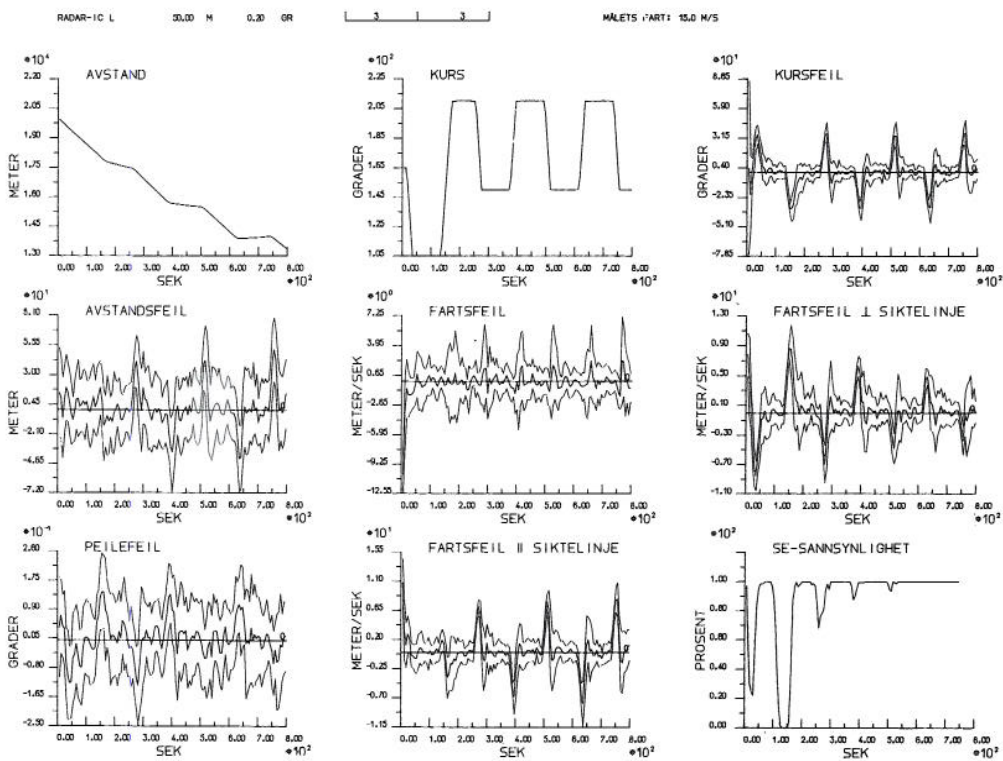
KONFIDENSIELT

TEGNING 2

KONFIDENSIELT



TEGNING 29

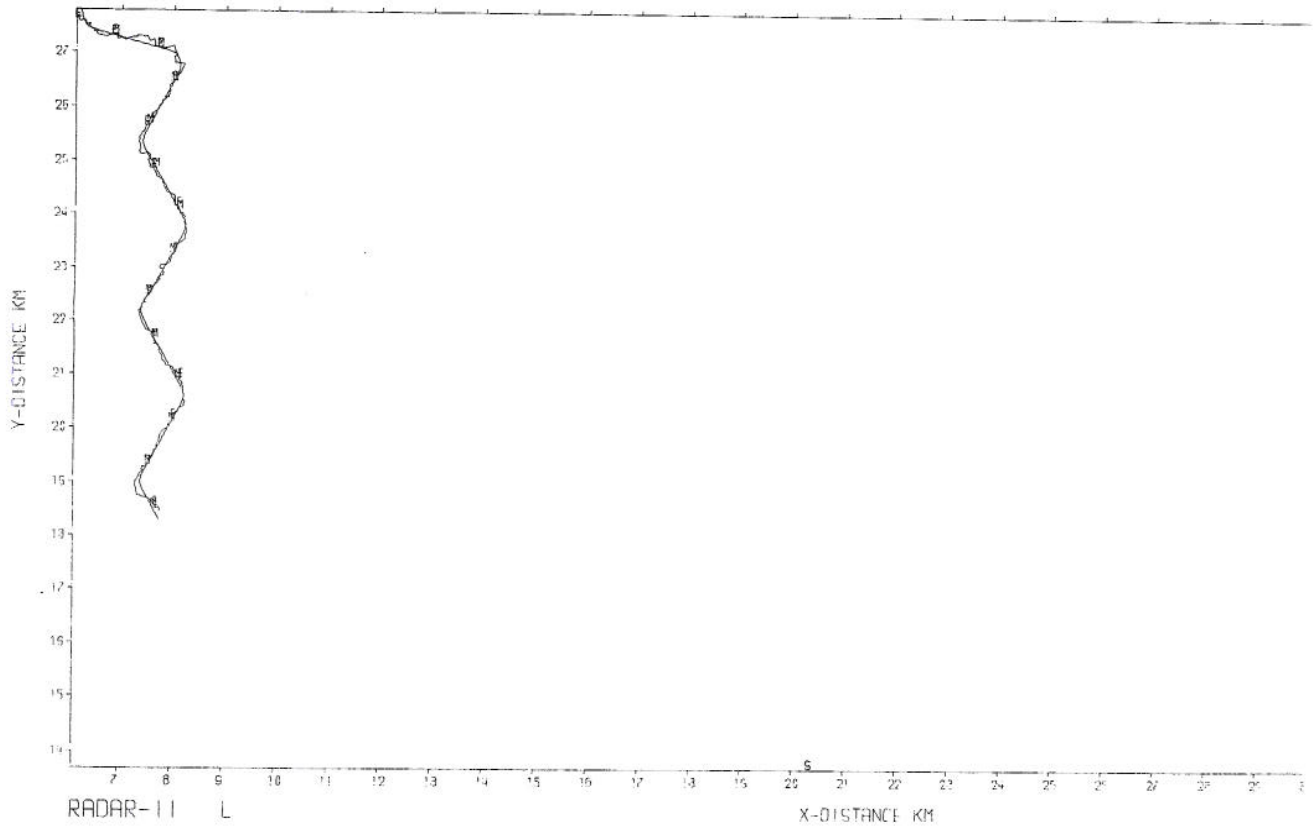


TEGNING 30

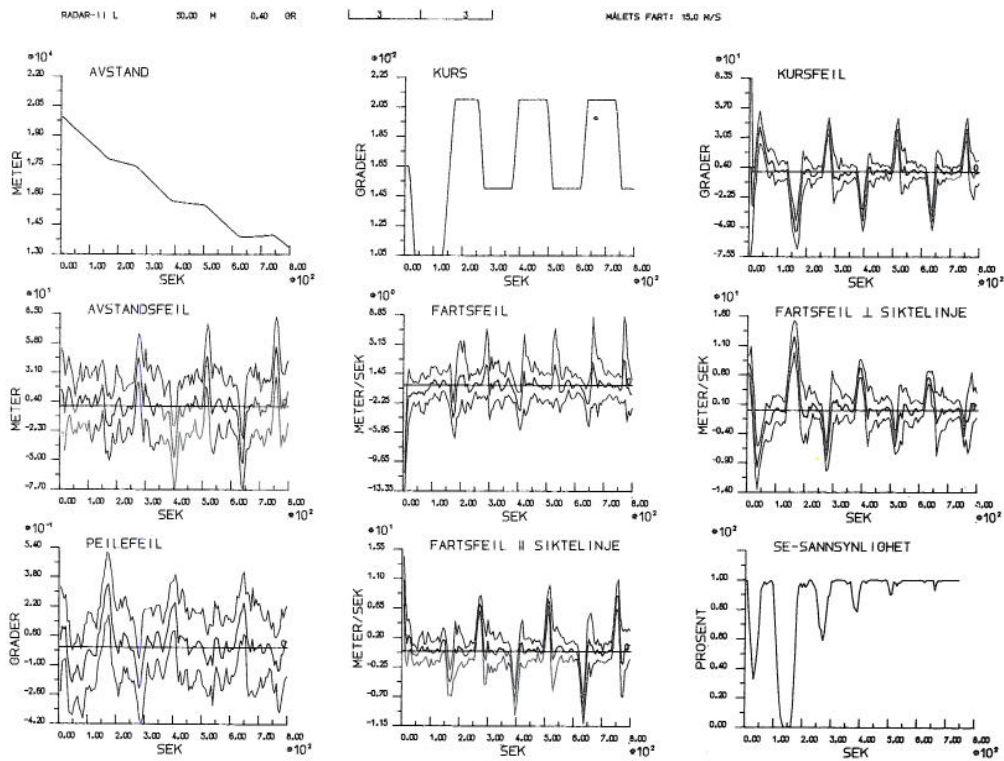
KONFIDENSIELT

TEGNING 2  
3

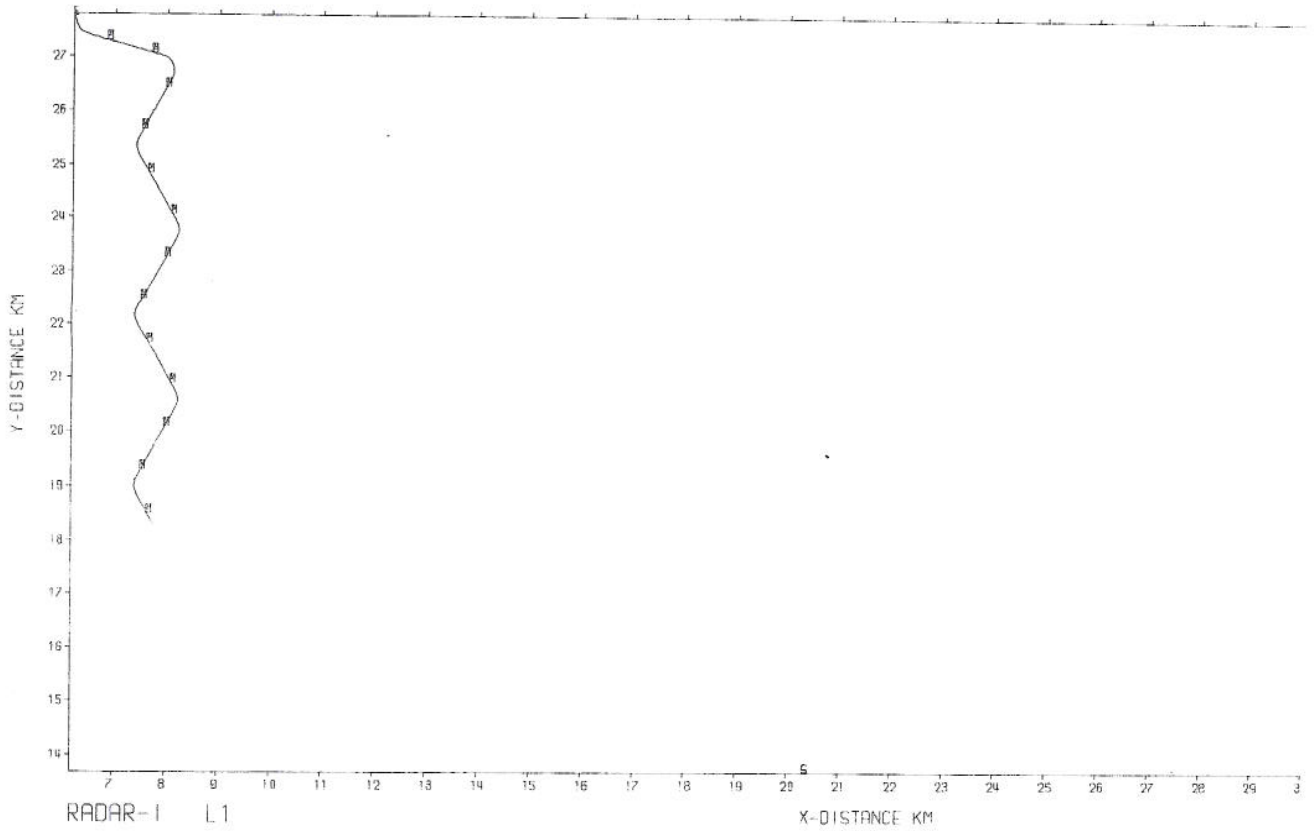
KONFIDENSIELT



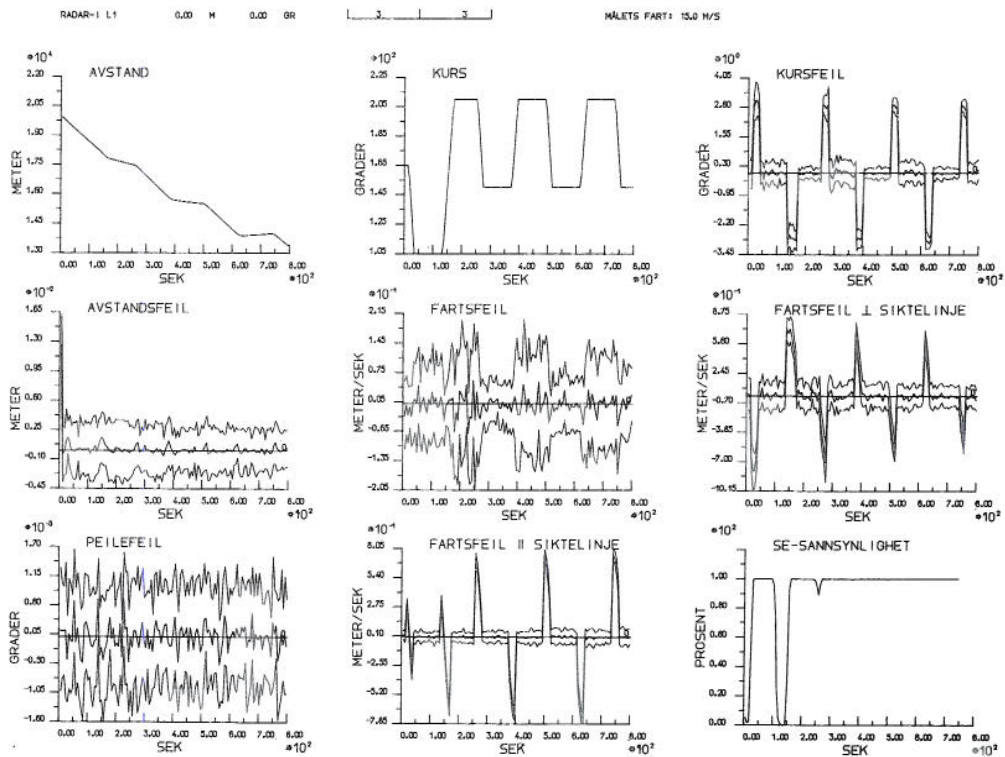
TEGNING 31



TEGNING 32



TEGNING 33



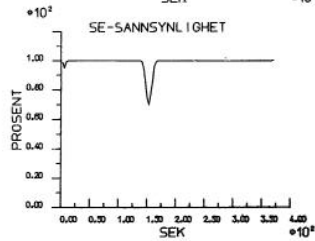
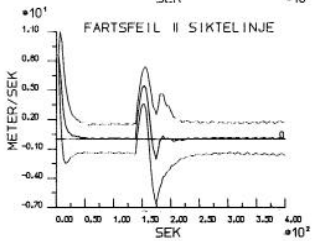
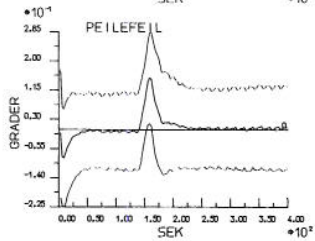
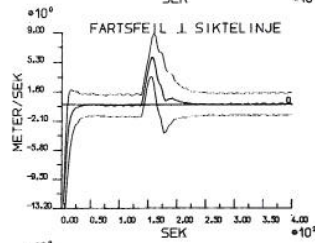
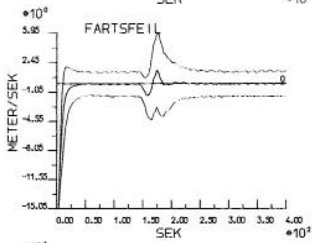
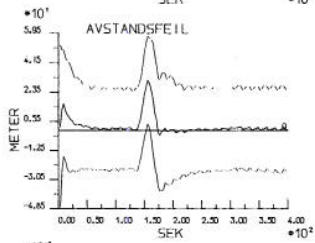
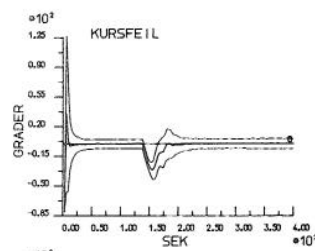
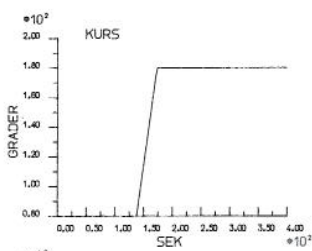
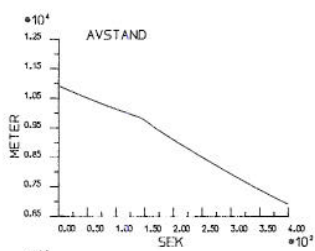
TEGNING 34



RADAR-1 MC 30.00 M 0.20 GR

3 3

MÅLETS FART: 15.0 M/S

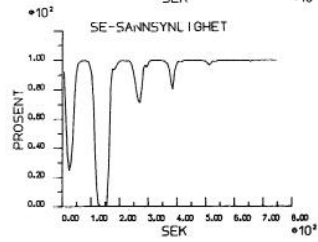
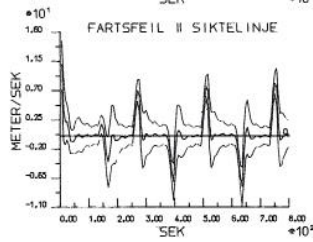
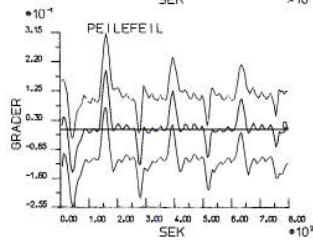
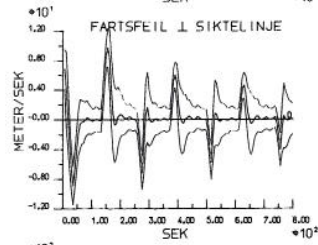
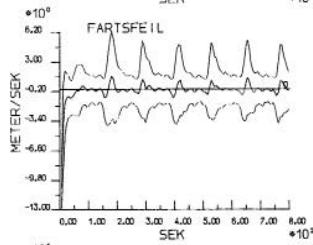
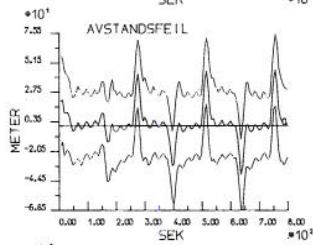
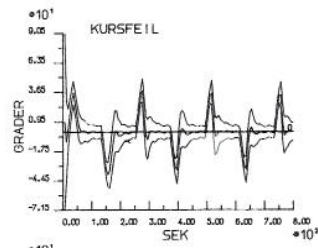
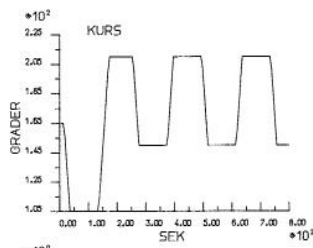
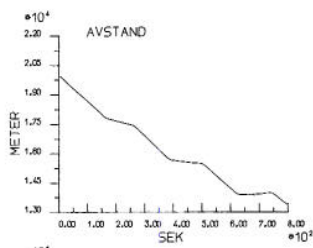


TEGNING 35

RADAR-1 LHC 30,00 M 0,20 GR

3 2

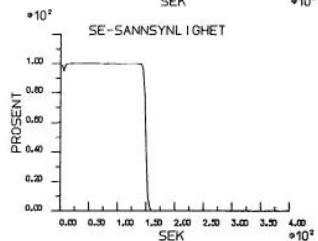
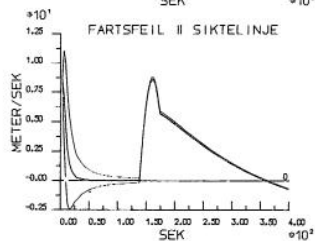
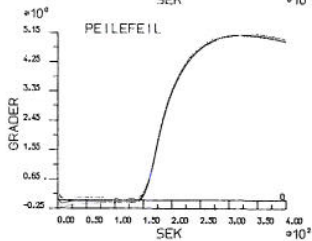
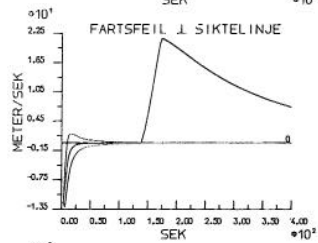
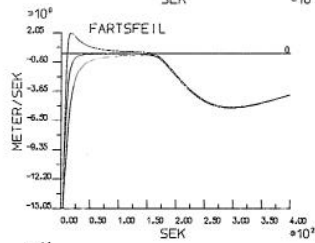
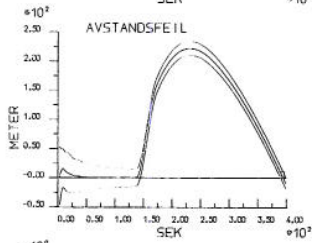
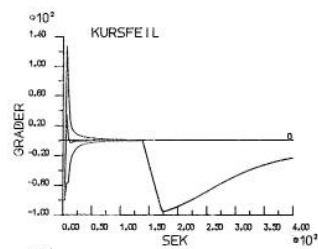
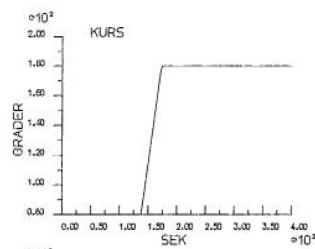
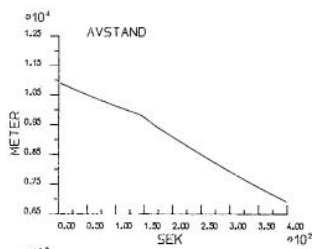
MALETS FART: 15,0 M/S



RADAR-1 10 040 30,00 M 0,20 GR



MALETS FART: 15,0 M/S



TEGNING 37

KONFIDENSIELT i h t S-instruksen

TEGNING 37

KONFIDENSIELT i h t S-instruksen