

~~KONFIDENSIELT~~  
KONFIDENSIELT  
i h. t. Sikkerhetsinstruksen  
FFIE

Intern rapport E-279  
Referanse: Jobb 345/113  
Dato: November 1977

AVGRADERT  
Dato: 11.11.09 Sign.: *Si*

A N A L Y S E A V R A D A R S E T T F A N R 15  
M K 1 C Y M B E L I N E

av

B Gravdal

Kjeller, 10 februar 1978

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

~~KONFIDENSIELT~~  
KONFIDENSIELT  
i h. t. Sikkerhetsinstruksen

**KONFIDENSIELT**  
KONFIDENSIELT  
i h. t. Sikkerhetsinstruksen  
FFIE

Intern rapport E-279  
Referanse: Jobb 345/113  
Dato: November 1977

A N A L Y S E A V R A D A R S E T T F A N R 15  
M K 1 C Y M B E L I N E

av

B Gravdal

Kjeller, 10 februar 1978

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

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

## INNHOLD

	Side	
1	INNLEDNING	4
2	GENERELL BESKRIVELSE AV CYMBELINE	5
2.1	Systemets oppbygging	6
2.2	Rutine for lokalisering av bombekaster	8
3	VURDERING AV RADAREN	9
3.1	Data for radaren	10
3.2	Radarens ytelse	11
3.2.1	Oppløsning	11
3.2.2	Nøyaktighet i avstand, retning og tidsberegning	12
3.2.3	Radarens rekkevidde	16
3.2.4	Uønskede ekko	17
3.3	Mulige forbedringer av radaren	
4	ANALYSE AV EKSTRAPOLERINGSALGORITMENE I CYMBELINE	28
4.1	Metoden benyttet i CYMBELINE for be- regning av et prosjektils utskytningspkt	28
4.2	Regnemaskinprogram for evaluering av ekstrapoleringsalgoritmene	30
4.3	Typiske feil introdusert av ekstrapoleringsalgoritmene	31
4.4	Feil på grunn av vind	37
4.5	Forsøk med varierende kompensasjon for luftmotstanden	38
5	BETYDNINGEN AV FEIL I REGISTRERING AV DATA	46
5.1	Estimatets følsomhet for operatørfeil	46
5.2	Beregning av følsomhetskoeffesientene	47
6	SIMULERING AV TOTALSYSTEM	66
6.1	CYMBELINE simuleringsmodell	66
6.2	Simuleringsresultater	70

	Side
7 FORSLAG TIL NY SIGNALBEHANDLINGS- ENHET	79
7.1 Radarekstraktorens funksjon	79
7.1.1 Digitalisering av videosignalet	80
7.1.2 Deteksjon av punktmål	80
7.1.3 Deteksjon av bevegelige mål	81
7.1.4 Operatørens rolle	82
7.1.5 Estimering av våpenets posisjon	83
7.2 Radarekstraktorens oppbygning	84
7.3 Simulering av radarekstraktoren	87
7.4 Implementering av en radar- ekstraktor i CYMBELINE	91
8 SAMMENDRAG	94
9 KONKLUSJON	97
 Referanser	 99
 APPENDIKS A	 100
 APPENDIKS B	 102

A N A L Y S E A V R A D A R S E T T F A N R 1 5  
M K 1 C Y M B E L I N E

SUMMARY

A detailed analysis of the different sources of error in the antimortar radar set FA No 15 Mkl CYMBELINE has been carried out. The results from the analysis will be used as a base for a possible modification program to improve the role of CYMBELINE in the Norwegian Army.

Simulation have shown that the errors introduced by the electromechanical components together with the relatively simple trajectory algorithm - used to estimate the firing mortar position - do not contribute much to the overall error, except when the projectile is intercepted near the top of the trajectory.

However, the CYMBELINE system is very sensitive to errors introduced by the operator during detection and registration of the echoes from the projectile. Hence, it is required to improve the accuracy in this activity to accomplish a better final result.

The report proposes an automatic detection and registration system that utilizes the radar video signal directly. Further simulations verifies a significantly improved accuracy. By increasing the computing power of the signal processing equipment it is possible to improve the trajectory computation to allow intercepts at the top of the trajectory and also intercept artillery firing.

1 INNLEDNING

Radarsett F A Nr 15 Mkl CYMBELINE er et integrert radar og regnemaskinsystem konstruert primært for å lokalisere fiendtlige bombekastere samt å lede egen kontrabeskytning. Det kan også anvendes for områdeovervåkning, kontroll av helikopter og småfly og rask feltmåling.

Erfaringer viser imidlertid at systemet bare delvis oppfyller de operative krav. Resultatet av en bombekasterlokalisering er i stor grad avhengig av operatørens dyktighet, og nøyaktigheten er gjennomsnittlig for dårlig.

FFI har utført et forprosjekt for å analysere CYMBELINE, og denne rapporten behandler problemstillinger som har vært studert i prosjektet. Sentrale spørsmål har vært:

- Hvilke begrensninger ligger i selve radaren
- Hva kan oppnås ved å forbedre radaren
- Hvor gode er algoritmene for beregning av et prosjektils utgangspunkt
- Hvilke feil introduseres ved deteksjon og data-registrering (operatørvhengige feil)
- Hvilke feil introduseres forøvrig i systemet
- Hva kan oppnås ved et forbedret signalbehandlings-system

For å besvare disse spørsmålene er det utarbeidet to simuleringsprogram for systemet.

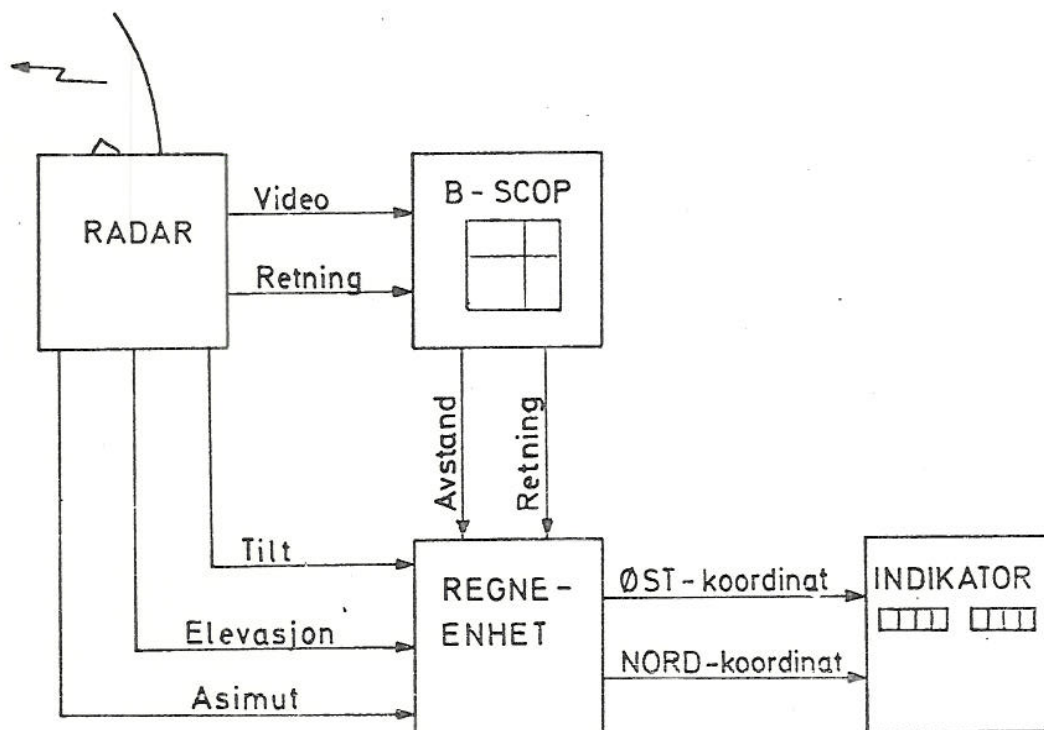
I et eget notat (TN-E-923) er det foreslått et system for automatisk overføring av data fra CYMBELINE til ildledningssentralen.

## 2 GENERELL BESKRIVELSE AV CYMBELINE

Betingelsen for at utskytningspunktet for et prosjektil skal beregnes er at en bestemmer to punkter på prosjektillets bane. Ved hjelp av forenklete ballistiske ligninger beregnes så utgangspunktet. I denne prosessen er operatøren et viktig ledd.

2.1 Systemets oppbygging

I figur 2.1 er det vist et blokkskjema av CYMBELINE.



Figur 2.1 Blokkskjema over sentrale deler av CYMBELINE

Radaren er en ikke-koherent pulset X-bånd radar med magnetron sender. Mottakeren består av en tunnel-diode HF forforsterker etterfulgt av et båndpass-filter med 100 MHz båndbredde. Blandetrinnet er av ortogonal ballansert type. Mellomfrekvens-forsterkeren er oppbygget av seks avstemte trimm arrangert i to

"staggered tripples". Forsterkningen i fire av trinnene kan reguleres manuelt eller fra en "swept gain" krets. Når "swept gain" kretsen er aktiv, er forsterkningen proporsjonal med 4 potens av tiden i området fra 0 til 4 km. og deretter konstant. Mellomfrekvens-forsterkeren etterfølges av en lineær envelope detektor og en video forsterker med inngang for signal fra en simulatorenhet.

Antenne-systemet består av en trippelkjegle Foster scanner med bevegelige fødehorn og parabolisk reflektor. Antennens hovedlobe er "pensel"-formet med 30 streker åpningsvinkel i elevasjon og 40 streker i asimut. (1 strek =  $1/6400$  sirkelomkrets). Antennestrålens retning i asimut innenfor et scan er en funksjon av scannerens posisjon. Scansektoren er på  $\pm 360$  streker omkring antennens akse.

I elevasjon kan strålens retning forandres relativt antennes akse eller referanse-elevasjon ved at fødehornet forskyves ut fra reflektorens fokus-punkt. En kan da få ekko fra samme prosjektil i to forskjellige høyder ved at radarstrålen heves etter at første ekko er mottatt. Fødehornet kan innta 4 forskjellige posisjoner. I en femte posisjon er effekten fordelt mellom to fødehorn, og radaren sender to stråler samtidig med en separasjon i elevasjon på 90 streker.

I tillegg til dette kan hele antenne-systemet beveges i asimut og elevasjon.

En polarisator kan svinges i posisjon mellom fødehornene og reflektoren. Når denne er på plass, blir vertikalt polarisert signal transformert til sirkulært polarisert. Følgen av dette er at ekko fra nedbør dempes.



B-scopet består av et 10x10 cm katodestrålerør. I asimut vises videoinformasjonen relativt antennens akse. Avstandsområdet kan velges. På skjermen kan også framvises to markeringslinjer, en for avstand og en for retning. Markeringslinjene kontrolleres av operatøren og brukes for overføring av avstands- og retningsinformasjon til regneenheten. I tilknytning til B-scopet er det plassert en rekke kontrollorganer for systemet.

I regneenheten blir bombekasterens posisjon beregnet av en fast innebygget algoritme i en analog regnemaskin. Som inngangsdata benyttes informasjon fra B-scopet formidlet av operatøren, antennens orientering i asimut og elevasjon samt radarstrålens separasjonsvinkel ved deteksjon av to punkter på prosjektillets bane. Tiden mellom detektering av de to punktene på banen er også registrert og lagret i regnemaskinen.

Resultatet av beregningen presenteres med fire siffer og oppløsning 10 m på indikatoreneheten. Før lokaliseringen starter, settes radarens posisjon og antatt høyde for bombekasteren inn. Dersom høyden til beregnet posisjon for bombekasteren avviker med mer enn 30 m fra antatt høyde, settes et nytt estimat for høyden inn og beregningene justeres.

## 2.2 Rutine for lokalisering av bombekaster

Før lokaliseringen starter, bestemmes radarens posisjon og antennens orientering i forhold til rutenett nord.

Radarstrålens separasjonsvinkel (tiltvinkel) mellom lokalisering av de to punktene på banen velges. Søke-sektoren rettes mot området hvor en antar at bombekasteren befinner seg. Operatøren overvåker B-scopet, og når et prosjektil passerer antennestrålen, plotter han ekkoet (P1) på skjermen. Samtidig trykker han på en "TILT"-knapp. Radarstrålen heves da den valgte vinkel og et tidsregistreringssystem starter. Når prosjektil-et igjen passerer radarstrålen, plotter operatøren også dette ekkoet (P2) og stanser tidsregistreringen ved på nytt å trykke på TILT-knappen. Informasjon om prosjektilets bane forligger nå som avstand og retning til to punkter på banen relativt radaren og tiden prosjektilet brukte på å tilbakelegge avstanden mellom punktene.

Avstand og retning til punktene overføres til regnemaskinen ved at operatøren plasserer markeringslinjene over punktene. Dette gjøres først for P2, så for P1. Regnemaskinen beregner så bombekasterens posisjon og presenterer resultatet på indikatorenheten. Ut fra kartet sammenlignes så bombekasterens høyde med antatt høyde. Beregningene justeres dersom avviket er større enn 30 m.

## 3

VURDERING AV RADAREN

I dette kapitlet vil en foreta en nærmere analyse av radaren. Hensikten med dette er å klarlegge hvilke begrensende faktorer som er knyttet til selve radaren og hvilke muligheter som foreligger til å forbedre disse forhold.

3.1 Data for radaren

Nedenfor gjengis sentrale data for radaren.

## Sender/mottaker

Frekvens	X-bånd
Puls repetisjons frekvens:	$f_p =$ Fire valgbare, 3.656, 3.747, 3.843 og 3.944 kHz
Maksimal effekt	$P_t = 100$ kW
Puls lengde	$\tau = 250$ ns
Avstandsområde	$R = 1-20$ km
Mellomfrekvens	$f_{if} = 90$ MHz
Båndbredde (mellomfrekvensfor- sterker)	$B_n = 6$ MHz
Støytall for mottakeren	$F_n = 8.5$ dB

## Antennesystem

Type	Trippel-kjegle Foster scanner med bevegelige fødehorn og parabolisk reflektor
Scan sektor	$\phi_c = 720$ streker
Scan hastighet	$f_c = 1000$ scan/min
Polarisering	Vertikal eller sirku- lær
Strålebredde, elevasjon	$\phi = 30$ streker
Strålebredde, asimut	$\theta = 40$ streker

Vertikal stråle separasjon (tilt)	$\phi_t = 25, 40, 45, 65$ eller 90 streker avhengig av valgt modus
Elevasjon av antenne akse	$\phi_E = -90$ til $+360$ streker relativt horisontalplanet
Bevegelse i asimut	$\phi_A = 12000$ streker total rotasjon

### 3.2 Radarens ytelse

#### 3.2.1 Oppløsning

Radarens oppløsning, d v s dens evne til å skille nærliggende mål i avstand, retning og elevasjon er begrenset av pulslengden og radarstrålens horisontale og vertikale åpningsvinkel. Mål som samtidig ligger innenfor det tredimensjonale element beskrevet av radarstrålen og pulslengden, flyter sammen til et ekko på radarskjermen. Radarstrålens form er bestemt av antennesystemets dimensjon og utforming og radarpulsens frekvens.

Oppløsningen i avstand  $\Delta R$  er:

$$\Delta R = \frac{c \cdot \tau}{2} \quad (3.1)$$

der  $c$  er lysets hastighet i vakuum og  $\tau$  er pulslengden.

Innsatte tallverdier gir:

$$\Delta R = 37,5 \text{ m}$$

Horisontal ( $\Delta h$ ) og vertikal ( $\Delta l$ ) oppløsning er proporsjonal med avstanden til målet:

$$\Delta h = R \cdot \theta \quad (3.2)$$

$$\Delta l = R \cdot \phi \quad (3.3)$$

der  $\theta$  og  $\phi$  er henholdsvis radarstrålens åpningsvinkel i asimut og elevasjon. Innsatte tallverdier gir:

$$\Delta h = 30 \text{ m/km}$$

$$\Delta l = 40 \text{ m/km}$$

Oppløsningen horisontalt og vertikalt er dårligere enn oppløsningen i avstand for alle praktiske avstander til målet.

### 3.2.2 Nøyaktighet i avstand, retning og tidsberegning

Den nøyaktighet posisjonen til et mål kan angis med er avhengig av radarens parametere så som utsendt effekt, puls form, puls repetisjonsfrekvens og radarstrålens scanfrekvens. Videre er den en funksjon av målets radartverrsnitt, avstand til målet og atmosfæriske forhold. Støy generert i radarens mottaker er også en begrensende faktor.

Dersom avstanden til et mål beregnes ut fra tiden fra utsendt puls til forflanken av reflektert signal krysser en bestemt terskelverdi, kan det vises (1) kap 7.2 at standardavviket pr puls for målt tid er:

$$\sigma_T = \left( \frac{\tau}{2B_n \cdot E/N_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.4)$$

eller omregnet til avstand:

$$\sigma_R = \frac{\sigma_T \cdot c}{2} \quad (3.5)$$

der

$B_n$  - mellomfrekvens båndbredde

$E$  - signal energi

$N_o$  - støy-effekt pr båndbredde enhet

I tabell 3.1 er det gitt noen verdier for standardavvik i avstand som funksjon av signal-støy forholdet (effekt) beregnet for CYMBELINE. Disse verdiene gjelder for en enkelt puls.

S/N(db)	6,0	8,0	10,0	12,0	14,0	16,0	18,0	20,0
$\sigma_R$ (m)	8,9	7,0	5,6	4,4	3,5	2,8	2,2	1,8

Tabell 3.1 Standardavvik i målt avstand for en enkelt puls som funksjon av signal-støy forholdet (effekt)

Dersom flere pulser integreres øker nøyaktigheten avhengig av hvor effektiv integreringen er.

I tillegg til dette kommer usikkerhet i radaren forbundet med bestemmelse av tidspunktet for utsendt puls. Fra sweep til sweep vil nøyaktigheten variere på grunn av at signalet er modulert med radarstrålens form. Fra scan til scan vil en i tillegg ha variasjoner på grunn av endret aspektvinkel, endringer i atmosfæriske forhold og endringer i ekko fra bakken og fra nedbør (clutter).

Nøyaktigheten vinkelen til et mål kan bestemmes med ved hjelp av en pulset radar er avhengig av hvilken beregningsmetode som anvendes. Resultatet som oppnås ved forskjellige metoder er beskrevet i flere artikler, f eks (2), (3) og (4). I (2) benytter Swerling statistiske metoder for å bestemme den nedre grense for nøyaktigheten. Denne grensen er bestemt av radarens parametere og signal/støy forhold. Disse beregningene forutsetter at antall pulser som mottas fra målet pr scan er større enn 10 og at radartverrsnittet ikke fluktuerer fra puls til puls. Disse forutsetningene er tilfredsstilt i vårt tilfelle. Resultatet fra beregningene med innsatte verdier for aktuelle parametere i CYMBELINE er gjengitt i tabell 3.2.

S/N(db)	5.0	10.0	15.0	20.0
$\sigma_{\phi}$ (°)	0.22	0.13	0.06	0.03

Tabell 3.2 Nedre grense for standardavviket til målt vinkel som funksjon av signal/støy forholdet

Nøyaktigheten i tidsbestemmelsen for når et prosjektil passerer radarstrålen kan bestemmes ved hjelp av tilsvarende beregningsmåter som for nøyaktighet i vinkel. Se Appendiks A. Foruten signal/støy forhold og radarparameterene er avstanden til prosjektilet og prosjektilets vertikale hastighet bestemmende for nøyaktigheten. Det forutsettes at antall scan som gir ekko når prosjektilet passerer er større enn 10. Dette er tilfreds-

stilt for de fleste praktiske tilfeller. I tabell 3.3 er den nedre grense for standardavviket i tidsberegningen gitt. Avstand mellom radar og prosjektil er 5000 m og prosjektilets gjennomsnittlige hastighet når det passerer antennestrålen er 150 m/s. Tiden prosjektilet er innenfor strålen er da ca 1.0 sek, dvs det mottas ekko i 17 scan.

S/N(db)	5.0	10.0	15.0	20.0
$\sigma_t$ (s)	0.08	0.04	0.02	0.01

Tabell 3.3 Nedre grense for standardavviket for beregning av tidspunktet når prosjektilet passerer radarstrålen

Nøyaktighetene for avstand, retning og tid som er beskrevet her, er bestemt av radaren og støyen i systemet. I tillegg til dette kommer de unøyaktighetene som operatøren innfører når han merker av ekkoene på radarskjermen og opererer TILT-knappen for registrering av tiden. Når 4 km avstandssone benyttes tilsvarer 1 mm på radarskjermen 40 m i avstand. I retning tilsvarer 1 mm 7,2 streker ( $=0,41^\circ$ ) for alle avstandsområder. Utstrekningen av et ekko på skjermen fra en granat er ca 1,5 mm i avstand og 6 mm i retning. Dette tilsier at den nøyaktighet som kan oppnås ved plotting av ekkoene og senere posisjonering av markørene ikke er begrenset av radaren men av operatørens ferdigheter. Det samme er tilfelle for registrering av tiden mellom ekkoene.



## 3.2.3 Radarens rekkevidde

Radarligningen (3.6) uttrykker mottatt effekt fra et mål som funksjon av radarparametrene og avstanden til målet:

$$P_r = \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (3.6)$$

der

$P_t$  - utsendt effekt

$G$  - antenne vinning

$\lambda$  - radarens bølgelengde

$\sigma$  - målets radartverrsnitt

$R$  - avstanden til målet

Den nedre grense for mottatt effekt som er nødvendig for å detektere et mål, bestemmer maksimal deteksjonsavstand. Denne verdi for  $P_r$  betegnes  $S_{\min}$ . Denne verdien er funksjon av minimum aksepterbart signal/støy forhold på utgangen av mellomfrekvensforsterkeren og støyen generert i mottakeren.

$$S_{\min} = k \cdot T_o \cdot B_n \cdot F_n \left( \frac{S_o}{N_o} \right)_{\min} \quad (3.7)$$

Kombineres (3.6) og (3.7) og løses m h p  $R$  gir dette:

$$R_{\max} = \left[ \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot k \cdot T_o \cdot B_n \cdot F_n \left( \frac{S_o}{N_o} \right)_{\min}} \right]^{1/4} \quad (3.8)$$

der

$k$  - Boltzmanns konstant

$T_0$  - Standard temperatur ( $290^{\circ}\text{K}$ )

$F_n$  - mottakerens støytall

$\left(\frac{S_0}{N_0}\right)_{\min}$  - minste signal/støy forhold på mellom-  
frekvensforsterkerens utgang nød-  
vendig for å detektere mål

$F_n$  er et uttrykk for hvor mye støy som genereres i mottakeren relativt en ideell mottaker. Radarens rekkevidde kan økes ved å øke utsendt effekt og/eller redusere støytallet og kravet til signal/støy forholdet.  $\left(\frac{S_0}{N_0}\right)_{\min}$  er bestemt av akseptabel falsk alarm- og deteksjonssannsynlighet og hvor effektivt signalet integreres fra puls til puls. Integrasjonen foregår i radarskjermens fosfor og i operatørens øye når han betrakter skjermen.

En utførlig diskusjon av radarligningen finnes i (1) kapittel 2.

#### 3.2.4 Uønskede ekko

I tillegg til reflektert signal fra prosjektiler (mål) vil det også bli mottatt ekko fra terrenget og fra eventuelle nedbørspartikler. Ekkoene blir mottatt både via antennens hovedlobe og sideløber. Første sidelobenivå er på  $-16,9$  db relativt hovedloben. Det betyr at ekko via sidelobene er synlig på radarskjermen for avstander mindre enn  $R_{\max}/7$  der  $R_{\max}$  er

maksimal deteksjonsavstand for det aktuelle radartverrsnitt. Ekko via sidelover fra terrengformasjoner er i enkelte tilfeller godt synlig på skjermen og kan virke forvirrende da det ut fra topografiske forhold ikke forventes ekko i dette området.

Alle uønskede ekko virker forstyrrende på radarbildet og øker belastningen på operatøren og dermed reduserer systemets totale ytelse. Spesielt er ekko fra nedbør (vær-clutter) begrensende på systemet og vil bli nærmere diskutert i det følgende.

Nedbør har to forskjellige begrensende effekter på radarens ytelse. For det første reflekteres effekt fra nedbørspartiklene og for det andre dempes radarsignalet når det passerer nedbøren.

Ekko fra et nedbørsområde er sammensatt av reflektert signal fra hver enkelt partikkel innenfor en oppløsnings-celle, dvs volumet begrenset av radarstrålen og pulslengden. Volumet til en oppløsnings-celle i avstand R er:

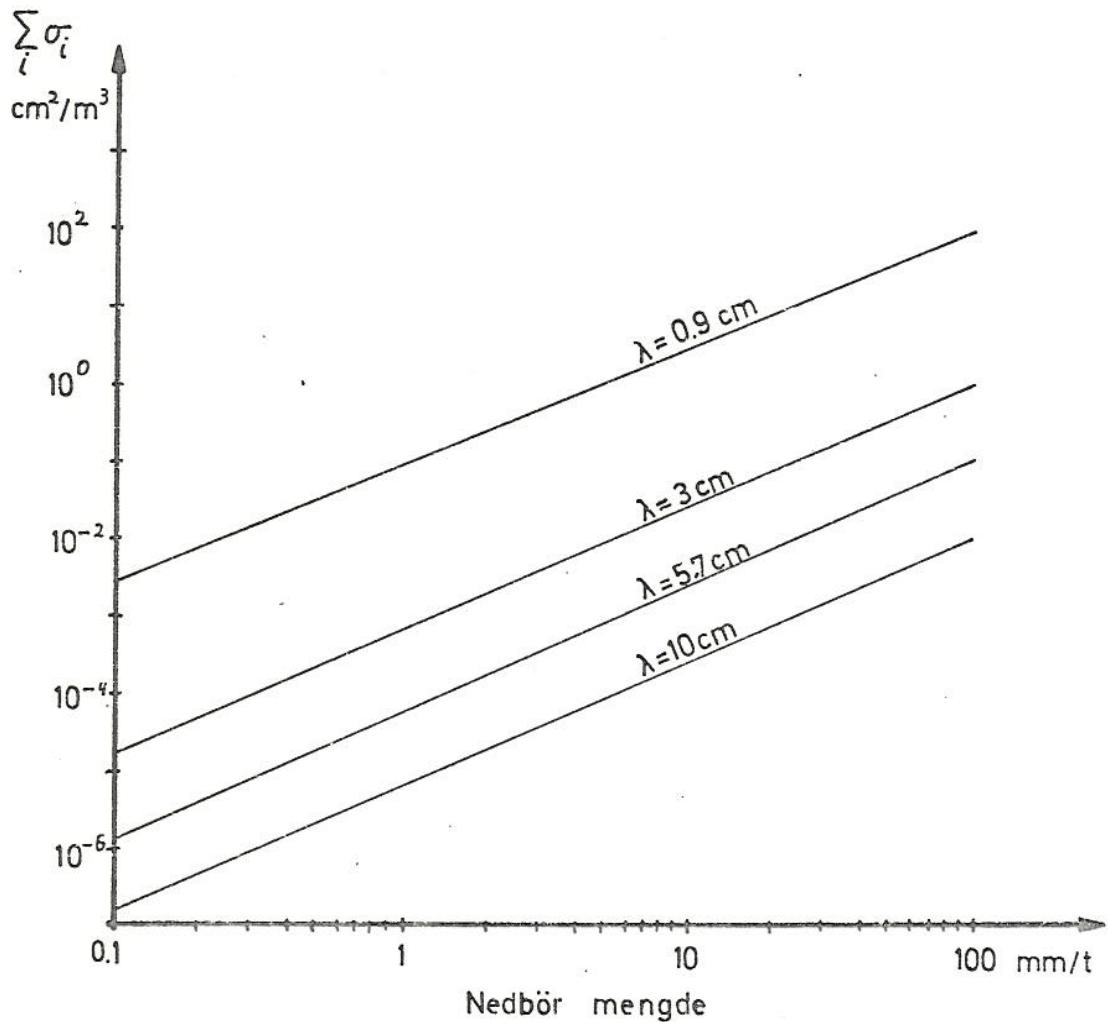
$$V_m = \frac{R^2 \cdot \theta \cdot \phi \cdot \tau \cdot c}{2} \quad (3.9)$$

Det gjennomsnittlige radartverrsnitt pr volumenhet betegnes  $\sum_i \sigma_i$ . Midlere radartverrsnitt fra en oppløsnings-celle i avstand R er da  $V_m \cdot \sum_i \sigma_i$ . Innsatt i (3.6) får en da midlere mottatte effekt pr puls fra et nedbørsområde i avstand R:

$$\bar{P}_r = \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \theta \cdot \phi \cdot \tau \cdot c}{(4\pi)^3 \cdot 2 \cdot R^2} \sum_i \sigma_i \quad (3.10)$$

når det ikke tas hensyn til dempningen av signalet gjennom nedbøren.

I figur 3.1 er det vist gjennomsnittlig radartverrsnitt pr volumenhet som funksjon av nedbørsmengde (regn) for forskjellige bølgelengder. Radartverrsnittet øker med avtagende bølgelengde og er betydelig for bølgelengder i X-båndet.



Figur 3.1 Radartverrsnitt pr volum enhet for regn ved temperatur  $18^\circ\text{C}$

Egenstøyen i radaren og clutter fra nedbør er ukorre-  
lert og adderes sammen i radar mottakeren. Minimum  
signal/støy forhold for deteksjon av et mål er det  
samme både for egenstøy alene og for egenstøy pluss  
clutter. Dette uttrykkes i ligning (3.11):

$$\frac{P_d}{N_r} = \frac{P_w}{N_r + N_c} \quad (3.11)$$

der

$P_d$  - mottatt effekt fra målet i oppholdsvær

$P_w$  - mottatt effekt fra målet i nedbør

$N_r$  - støyeffekt i mottakeren =  $kT_o B_n F_n$

$N_c$  - gjennomsnittlig clutter effekt

Settes (3.6) inn for  $P_d$  og  $P_w$  i (3.11) med henholds-  
vis avstanden  $R_d$  og  $R_w$  og (3.10) inn for  $N_c$  med av-  
stand  $R_w$  gir dette:

$$R_d^4 = R_w^4 + R_w^2 \cdot K \cdot \sum_i \sigma_i \quad (3.12)$$

der

$$K = \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \theta \cdot \phi \cdot c \cdot \tau}{2(4\pi)^3 \cdot k \cdot T_o \cdot B_n \cdot F_n} \quad (3.13)$$

$R_d$  - maksimal deteksjonsavstand for målet i  
oppholdsvær

$R_w$  - maksimal deteksjonsavstand for det samme  
målet i nedbør

Med polarisatoren i posisjon antar en at ekkoet fra nedbøren dempes med  $1/Q_w$  og ekkoet fra målet med  $1/Q_T$ . Sammenhengen mellom avstandene blir da:

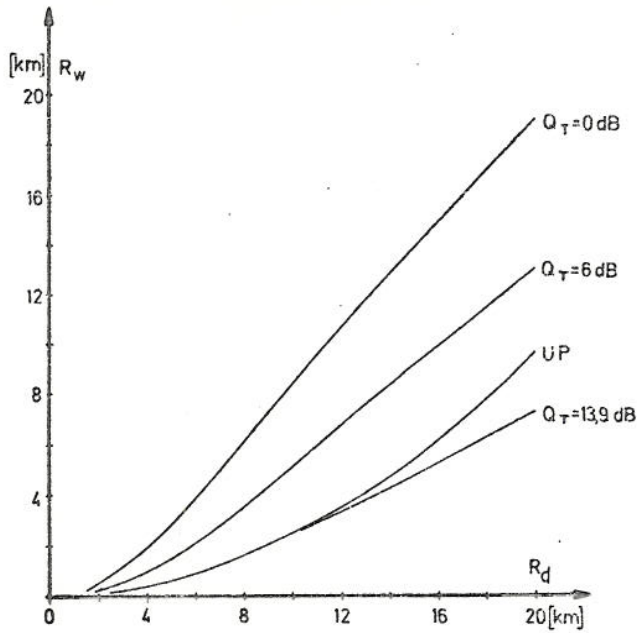
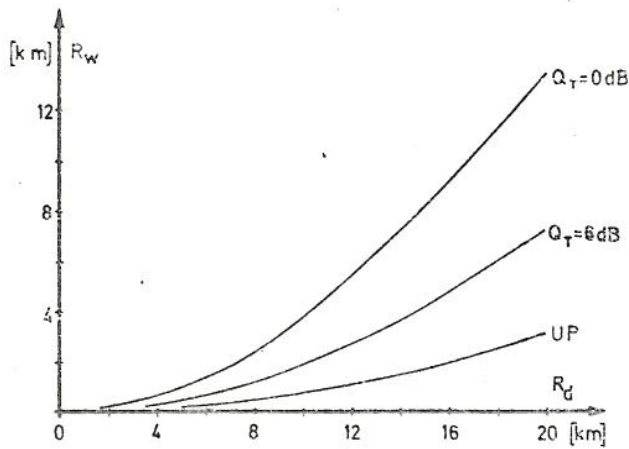
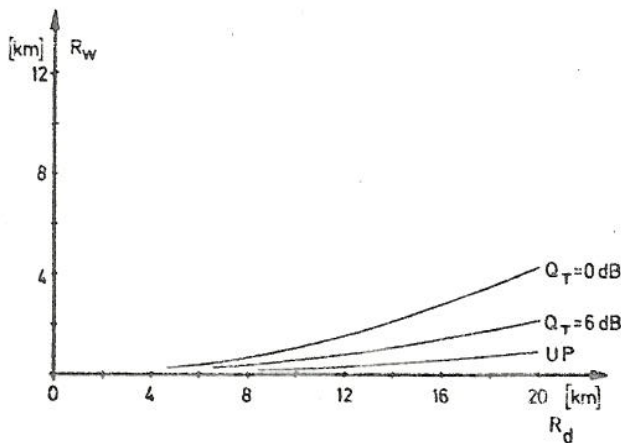
$$R_d^4 = R_w^4 \cdot Q_T + \frac{R_w^2 \cdot K \cdot Q_T}{Q_w} \cdot \sum_i \sigma_i \quad (3.14)$$

I følge spesifikasjonene for CYMBELINE reduseres maksimal deteksjonsavstand for et sfærisk legeme til 0,45 ganger opprinnelig deteksjonsavstand når polarisatoren benyttes, dvs en dempning i signalet på 13,9 db. For regn vil dempningen være av denne størrelse, for snø noe mindre.

Størrelsen på dempningen av ekko fra målet er avhengig av målets geometri og aspektvinkel. Ut fra eksempler omtalt i (1) kapittel 12.7 antas det at en dempning i området 0 til 6 db er realistisk.

I figur 3.2 er maksimal deteksjonsavstand i regn  $R_w$  vist som funksjon av maksimal deteksjonsavstand i oppholdsvær  $R_d$  ved tre forskjellige nedbør mengder. Kurven merket UP gjelder uten polarisatoren i bruk, de øvrige er med polarisator og ekko fra målet dempet med  $Q_T$  i polarisatoren. Dempningen av nedbøren i polarisatoren er 13,9 db.

En ser at reduksjonen av maksimal deteksjonsavstand er betydelig selv ved små nedbørsmengder når polarisatoren ikke benyttes. Bruk av polarisatoren bedrer forholdet, men ved noe større nedbørsmengder er likevel avstanden kraftig redusert. En granattype som

aNedbør  $r = 0,25$  mm/t,b $r = 1$  mm/tc $r = 4$  mm/t

Figur 3.2 Maksimal deteksjonsavstand  $R_w$  i regn som funksjon av maksimal deteksjonsavstand  $R_d$  i oppholdsvar.  $Q_w = 13,9$  db.

kan detekteres på maksimalt 12 km i oppholdsvær vil f eks ikke kunne detekteres på avstander større enn 5 km ved nedbørmengde på 1 mm/t i målområdet når en antar at granatekkoet ikke dempes i polarisatoren.

Ved meget små nedbørsmengder kan bruk av polarisatoren redusere signal/støy forholdet. Det betyr at i (3.14) skal maksimal deteksjonsavstand være den samme enten polarisatoren benyttes eller ikke.

$$P_w^4 Q_T + \frac{R_w^2 \cdot K \cdot Q_T}{Q_w} \cdot \sum_i \sigma_i = R_w^4 + R_w^2 \cdot K \cdot \sum_i \sigma_i \quad (3.15)$$

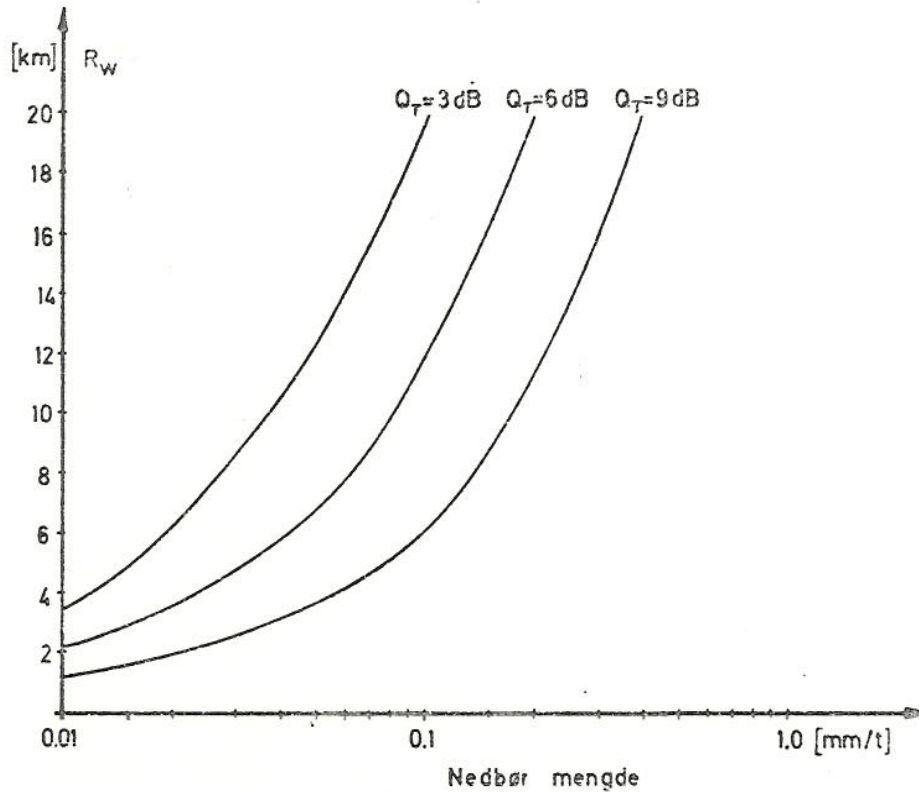
Løst m h t  $\sum_i \sigma_i$ :

$$\sum_i \sigma_i = \frac{R_w^2 (Q_T - 1) Q_w}{K \cdot (Q_w - Q_T)} \quad (3.16)$$

der K er gitt i (3.13).

Figur 3.3 viser sammenheng mellom nedbørsmengde (regn) i mm/t og maksimal lokalisering av polarisatoren bør brukes ved for tre forskjellige dempninger av mål-ekkoet.  $Q_w = 13,9$  db. Ved f eks nedbør på 0,1 mm/t (lett duskregn) i målområdet og  $Q_T = 6$  db bør polarisatoren brukes ved lokalisering på avstander inntil 12 km.





Figur 3.3 Maksimal avstand hvor bruk av polarisator gir reduksjon i signal-støyforhold som funksjon av nedbør intensitet (regn).  $Q_w = 13,9 \text{ db}$

I de foregående beregninger er det ikke tatt hensyn til at radarsignalet dempes når det passerer et nedbørsområde. Dempingen er avhengig av radarfrekvens, nedbørtype og intensitet. I tabell 3.4 er det gitt typiske verdier for en X-bånd radar i db/km (en vei) ved regn av forskjellig styrke.

Nedbør (mm/t)	Duskregn	Lett regn	Moderat regn 4,0	Kraftig regn 16,0	Styrt- regn 40,0
Demp- ning (db/km)	$3 \cdot 10^{-3}$	$10^{-2}$	$8,6 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-1}$	1,0

Tabell 3.4 En veis dempning i regnvær i db/km for X-bånd radar ved 18°C

Til eksempel reduseres maksimal deteksjonsavstand for et mål fra 10 km til 9,2 km ved moderat regn (4 mm/t) og til 6,8 km ved kraftig regn (16 mm/t). Det forutsettes da at nedbøren er konstant mellom radaren og målet men opphold rundt målet. Dersom det i tillegg er nedbør i målområdet vil dette utgjøre den begrensende faktor. Polarisatoren har ingen innvirkning på dempningen av radar-signalet på grunn av nedbør.

Virkningen av snø og hagl vil generelt være den samme som nevnt foran. Men for samme nedbør mengde snø som regn, gir snø mindre radartverrsnitt pr volumenhet, for tørr snø er det redusert med en faktor på ca 0,22. Snø gir også betydelig mindre dempning enn regn og polarisatoren er mindre effektiv mot ekko fra snø.

### 3.3 Mulige forbedringer av radaren

Radaren i CYMBELINE er gjennomsnittlig god, dens enkle oppbygging og begrensning i volum og tilgjengelig effekt tatt i betraktning. Men en forbedret undertrykking av clutter og øket deteksjonsavstand ville gi systemet større ytelse.

Begrensninger p g a vær-ekko kan reduseres ved at sender/mottaker bygges om til en doppler radar. Da vil ekko fra mål som ikke har en hastighetskomponent langs radarstrålen, bli kansellert. En radar av denne typen kan gi undertrykking av bakke-ekko på ca 50 db og av vær-ekko opp til 30 db. Men med samme deteksjons- og registreringsmetoder som i nåværende system, vil en ikke oppnå forbedring i nøyaktigheten. En doppler-radar vil også innføre begrensningen på grunn av blindhastigheter, det vil si hastigheter som medfører at ekko fra målet kanselleres i mottakeren. Blindhastighetene for bevegelige mål er gitt ved:

$$v_n = \frac{n \cdot \lambda \cdot f_p}{2} \quad n = 1, 2, 3 \quad (3.17)$$

der

$v_n$  - radiell komponent av blindhastighet nr n

$\lambda$  - radarens bølgelengde

$f_p$  - puls repetisjons frekvens

Brukes samme bølgelengde og puls repetisjons frekvens som for den nåværende radaren gir dette:

$$v_n = n \cdot 59,2 \text{ m/s} \quad (3.18)$$

Følgelig er det flere blindhastigheter innenfor de prosjektilhastigheter som CYMBELINE skal dekke. Problemet kan reduseres ved at puls repetisjons frekvensen varieres kontinuerlig.

Likevel vil en ikke kunne detektere prosjektil med skuddretning på tvers av antennestrålen, dvs med null radiell hastighet. Dette medfører en betydelig begrensning av systemet, og gjør en doppler radar mindre aktuell.

Økning av maksimal deteksjonsavstand kan oppnås ved å øke utsendt effekt eller redusere egenstøyen i mottakeren. På grunn av begrenset tilgjengelig effekt i systemet kan ikke sendereffekten økes med mer enn 1,5 - 2 ganger. Dette øker deteksjonsavstanden med en faktor på 1,11 til 1,19.

Støytallet i mottakeren er oppgitt til 8,5 db. Største gevinst i reduksjon av egenstøyen oppnås ved å redusere støyen i det første forsterkertrinnet. Dette er en tunnel-diode HF forsterker med støytall 5,3 db. Ved å bruke en annen type forsterker vil støytallet kunne reduseres med ca 2 db (5). Dette gir en økning i maksimal deteksjonsavstand med en faktor på 1,12. En kan således oppnå en total økning i maksimal deteksjonsavstand med en faktor på 1,2 til 1,3 ved å øke sendereffekten og å redusere egenstøyen. Dette vil også øke deteksjonssannsynligheten og redusere falsk alarm sannsynligheten på kortere avstander.

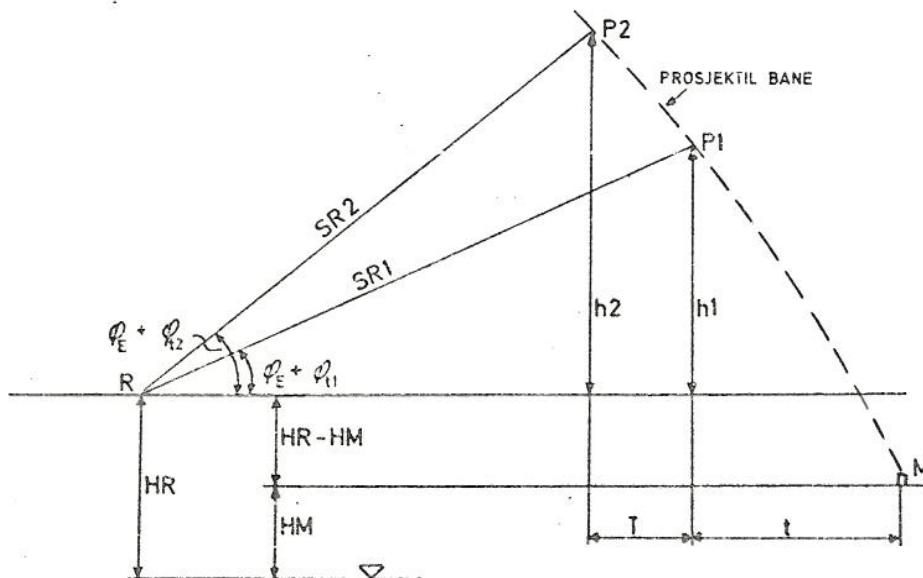
Det er også et problem av mer praktisk karakter knyttet til radaren, nemlig at utrente operatører har vanskelig for å innstille optimal forsterkning på mellomfrekvens forsterkeren. Dette kan forbedres ved å bygge inn automatisk forsterkningskontroll og bare la operatøren foreta en finjustering innenfor bestemte grenser.

#### 4 ANALYSE AV EKSTRAPOLERINGSALGORITMENE I CYMBELINE

I dette kapitlet sammenlignes resultatet av ekstrapoleringsalgoritmene i CYMBELINE med korrekte verdier for prosjektillets utskytningspunkt. Det viser seg at feilen som introduseres av algoritmene, kan være av betydelig størrelse når deteksjonen av prosjektilet foregår nær toppunktet av banen.

##### 4.1 Metoden benyttet i CYMBELINE for beregning av et prosjektils utskytningspunkt

Ved hjelp av radaren bestemmes koordinatene til to punkter, P1 og P2, på en prosjektilbane og tiden T prosjektilet bruker på å tilbakelegge distansen mellom punktene. Denne informasjonen behandles i en algoritme som bygger på bevegelsesligningene for et massepunkt i vakuum og kompenserer for luftmotstanden ved å sette tyngdens akselerasjon til  $8.2 \text{ m/s}^2$ . Det tas ikke hensyn til at luftmotstanden varierer med hastigheten og er forskjellig for ulike typer prosjektil, avdrift på grunn av vind eller avbøyning på grunn av spinn.



Figur 4.1 Vertikal projeksjon av en lokaliseringssituasjon. Radaren er plassert i R, bombekasteren i M.

I fig 4.1 er vertikal-projeksjonen av en lokaliseringssituasjon vist. Skråavstanden SR1 og SR2 til henholdsvis P1 og P2 måles med radaren og tiden T mellom punktene registreres. Forholdet mellom tiden t fra utskyting til registrering av P1 og tiden mellom P1 og P2 er:

$$K = \frac{t}{T} \quad (4.1)$$

Faktoren K kan beregnes av ligningen:

$$h1 - K(h2-h1) = \frac{1}{2}gT^2K(K+1) + (HM-HR) \quad (4.2)$$

der

h1 - prosjektillets høyde relativt radaren i P1

h2 - prosjektillets høyde relativt radaren i P2

HR - radarens høyde relativt havoverflaten

HM - bombekasterens høyde relativt havoverflaten

K beregnes i den analoge regnemaskinen i CYMBELINE ut fra ligning (4.2). I (4.3) er K uttrykt eksplisitt:

$$K = \frac{\sqrt{(0.5 g \cdot T^2 + h2 - h1)^2 + 2g \cdot T^2 (h1 - HM + HR) - \frac{1}{2}g \cdot T^2 + h1 - h2}}{g \cdot T^2} \quad (4.3)$$

I CYMBELINE er K begrenset til 3 og T til 25 sek.

Prosjektillets horisontale hastighetskomponent antas å være konstant, dvs horisontalprojeksjonen av prosjektillets posisjon er direkte proporsjonal med tiden fra utskyting. Øst- og nord-koordinaten til bombekasteren relativt radaren, EM og NM, beregnes etter ligning (4.4) og (4.5):

$$EM = E1 + K(E1 - E2) \quad (4.4)$$

$$NM = N1 + K(N1 - N2) \quad (4.5)$$

der  $E1$  og  $N1$  er øst- og nordkoordinaten til  $P1$ ,  $E2$  og  $N2$  er øst- og nordkoordinaten til  $P2$  relativt radaren. Bombekasterens sanne posisjon beregnes dersom radarens egen posisjon er matet inn. For utledning av ekstrapoleringsalgoritmene, se Appendiks B.

#### 4.2 Regnemaskinprogram for evaluering av ekstrapoleringsalgoritmene

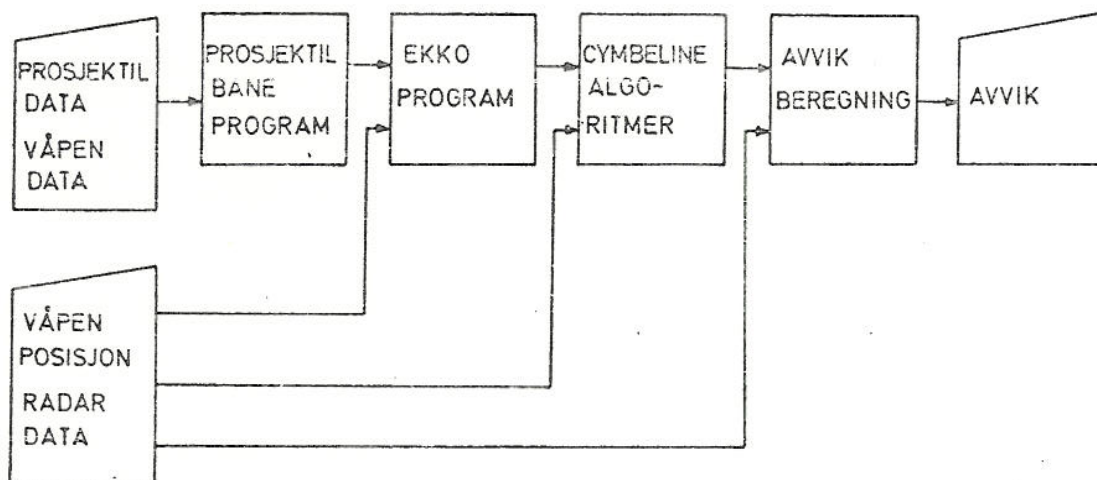


Fig 4.2 Blokkskjema over programsystem for evaluering av ekstrapoleringsalgoritmene i CYMBELINE.

Fig 4.2 viser et blokkskjema over programsystemet som benyttes for å evaluere ekstrapoleringsalgoritmene i CYMBELINE.

Prosjekttilbane-programmet beregner prosjektilets posisjon langs banen som funksjon av tiden. Nøyaktigheten er bedre enn 0.1 ‰ ved standard atmosfære.

Inngangsdata til prosjektilbaneprogrammet er prosjektil type, prosjektil data, utgangshastighet, våpenets elevasjonsvinkel (QE), og skyteretning samt høyde over havet. Data om vindforhold kan også legges inn.

Ekko-programmet beregner koordinatene til punktene P1 og P2 på prosjektilbanen relativt radaren og tiden T mellom ekkoene. Inngangsdaga til programmet er prosjektillets posisjon som funksjon av tiden, våpenets posisjon relativt radaren, radarens søkeretning og antennens elevasjon- og seperasjonsvinkel.

CYMBELINE algoritme rutinen beregner faktoren K etter ligning (4.3) og bombekasterens øst- og nord-koordinat etter (4.4) og (4.5). Inngangsdata er koordinatene til P1 og P2 samt radarens og våpenets høyde over havet.

I avvik-rutinen beregnes differansen mellom våpenets virkelige posisjon og posisjonen ekstrapolert av CYMBELINE algoritmene. Avviket kan gis som differanse i øst- og nord-koordinaten eller som radiell feil gitt som størrelse og retning på en feilvektor. Inngangsdata er våpenets virkelige posisjon og estimert posisjon relativt radaren.

#### 4.3 Typiske feil introdusert av ekstrapoleringsalgoritmene

Programmet er kjørt for to våpentyper. 81 mm bombekaster med prosjektil type N123 er brukt som eksempel på bombekastere, og 155 mm haubits med prosjektil type M107 er brukt som eksempel på artilleri. Da nødvendige



data for andre våpen typer ikke har vært tilgjengelig, har en latt haubitsen skyte med overgrader og lav hastighet for å gi et inntrykk av feilen for spinnstabiliserte bombekaster-granater.

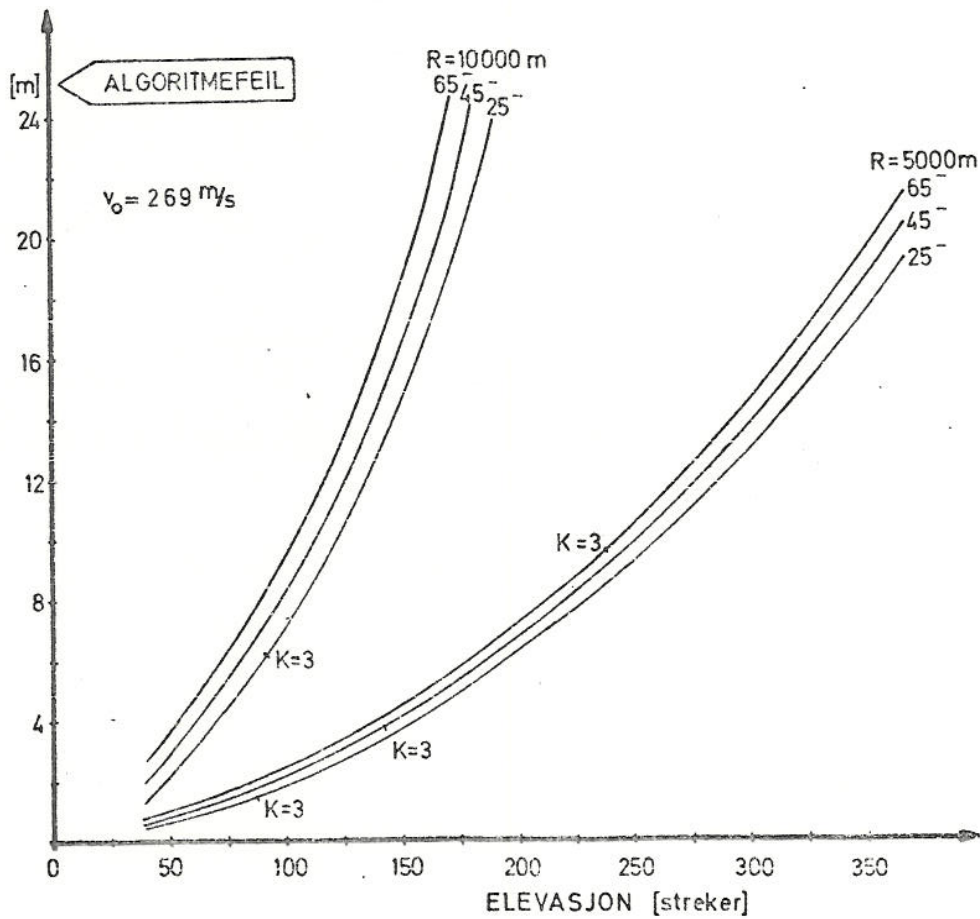
For skyting med bombekaster (inkludert haubitsen som skyter med overgrader), er følgende oppsett benyttet når ikke annet er oppgitt: retning fra radar til våpen  $60^{\circ}$ , skyteretning  $190^{\circ}$ , våpen elevasjon QE  $65^{\circ}$ .

For felt-artilleri benyttes: retning fra radar til våpen  $40^{\circ}$ , skyteretning  $170^{\circ}$ , våpen elevasjon QE  $22,5^{\circ}$ .

Avstand fra radaren til våpenet er gitt betegnelsen R og er oppgitt i figurene sammen med prosjektilets utgangshastighet  $v_0$ . For alle kjøringar har radar og våpen samme høydekoordinat.

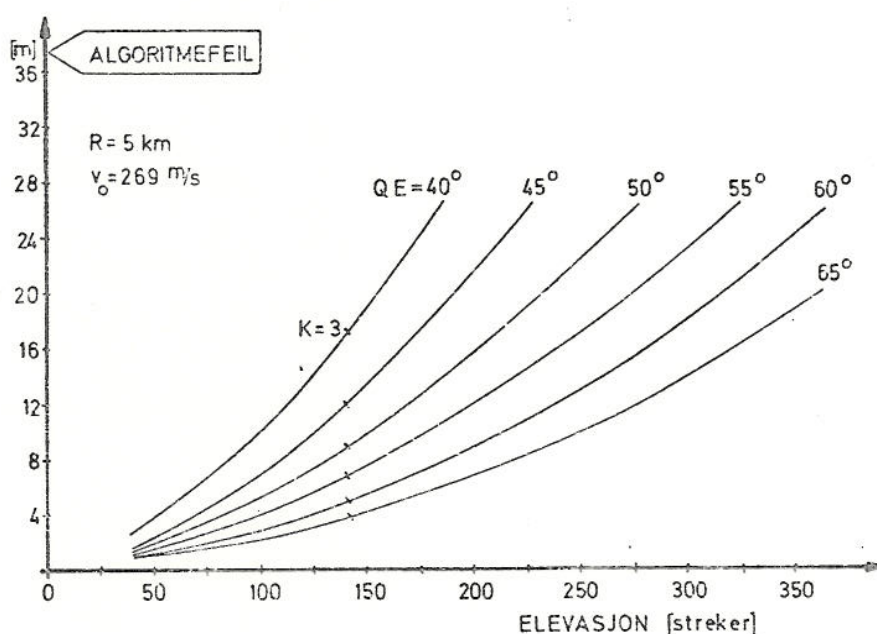
Resultatet viser at for 81 mm tiltar feilen etter hvor høyt oppe på banen prosjektilet detekteres. Dette medfører også at feilen tiltar med økende separasjonsvinkel. Men forskjellen i algoritme-feil mellom største og minste separasjonsvinkel er så liten at den har mindre betydning for totalfeilen i systemet. Av større betydning er sammenhengen mellom separasjonsvinkel og størrelsen på elevasjonsvinkelen som gir metning i K. For separasjonsvinkler på 25, 45 og 65 streker går K i metning ved henholdsvis ca 75, 150 og 250 streker elevasjon når radar og bombekaster er på samme høyde og prosjektilet detekteres på den nederste halvpart av banen. Ved deteksjon nærmere toppen går K i metning først ved noe større elevasjonsvinkler.

Med verdien  $g=8.2$  i ligning (4.2) ligger den beregnede posisjon bakenfor bombekasteren på en linje rettet motsatt skyteretningen. For 81 mm bombekaster er algoritmefeilen av betydelig størrelse bare når prosjektilet detekteres nær toppen av banen.



Figur 4.3 Radiell algoritmefeil for 81 mm bombekastergranat som funksjon av elevasjonsvinkel ved separasjonsvinklene 25, 45 og 65 streker

Fig 4.3 viser radiell algoritmefeil for en 81 mm granat med utgangshastighet  $v_0=269$  m/s. På kurvene er retningsspunktet for K merket "K=3", men kurvene er beregnet ut over dette punktet for å vise algoritmens egenskaper uavhengig av begrensingen i K. Fra figuren ser en at når P1 er detektert midt på banehøyden, ligger feilen mellom 9 og 11 m på 5 000 m avstand, og mellom 11 og 13 m på 10 000 m avstand, avhengig av separasjonsvinkelen.

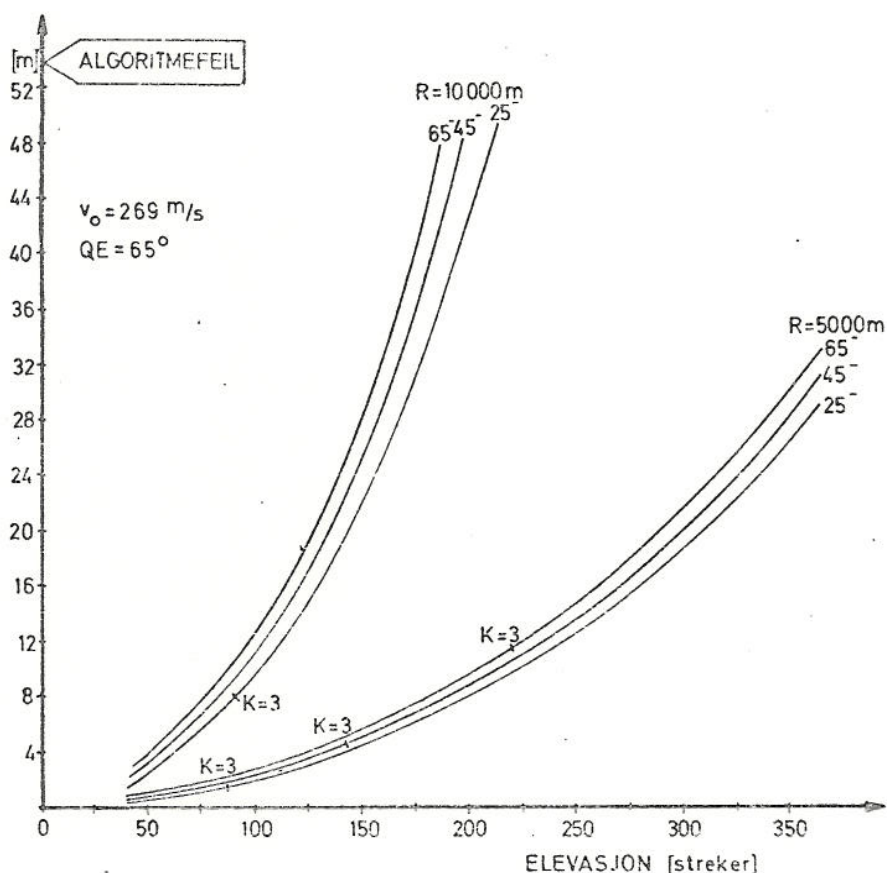


Figur 4.4 Radiell algoritmefeil for 81 mm bombekastergranat som funksjon av elevasjonsvinkel ved QE=65°, 60°, 55°, 50°, 45° og 40°. Separasjonsvinkel 45 streker

I Fig 4.4 er algoritmefeilen vist som funksjon av radarens elevasjonsvinkel og med bombekasterens elevasjon (QE) variert fra 45° til 65°. Feilen tiltar med avtakende våpenelevasjon på grunn av at deteksjonen da foregår nærmere banens toppunkt.

Disse resultatene er typisk også for andre utgangshastigheter enn den som er brukt i figurene. Så lenge forholdet mellom deteksjonshøyden og høyden på banens toppunkt er det samme, varierer feilen lite.

Resultatet for 155 mm haubits viser samme tendens som for 81 mm når det skytes med overgrader, men feilen er større. For dette våpenet, som har spinn-stabiliserte granater, blir det også et tillegg i feilen på grunn av at algoritmene ikke tar hensyn til banens avbøyning på grunn av spinn-kreftene. Denne feilkomponenten er rettet normalt på skyteretningen.

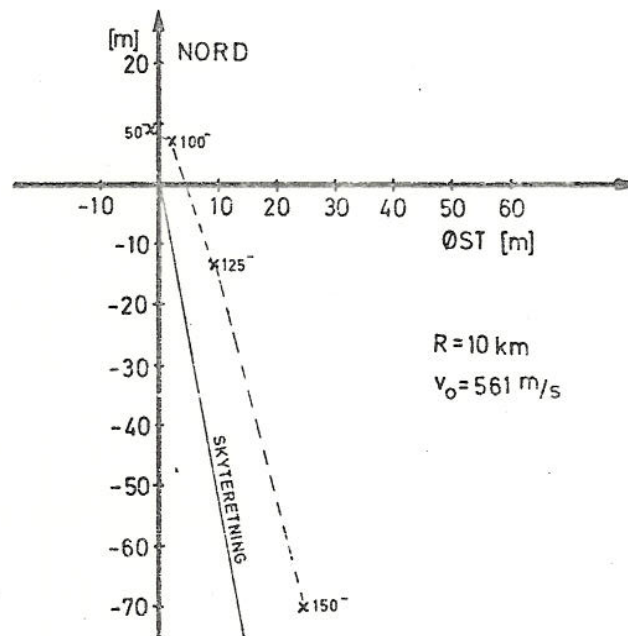


Figur 4.5 Radiell algoritmefeil for 155 mm artillerigranat som funksjon av elevasjonsvinkel ved separasjonsvinklene 25, 45 og 65 streker, avstand 5 km og 10 km

Fig 4.5 viser radiell feil for en 155 mm granat med utgangshastighet 269 m/s og våpen elevasjon  $65^\circ$ . Algoritme-feilen kan her være av betydelig størrelse. F eks gir deteksjon av P1 midt på banen (elevasjon 140 streker) og avstand til våpenet 10 km en algoritmefeil mellom 20 og 25 m, avhengig av separasjonsvinkel.

Når det skytes med undergrader, blir forløpet av feilen noe annerledes. Foruten at feilen er avhengig av hvor på banen prosjektilet detekteres, er den også hastighets-

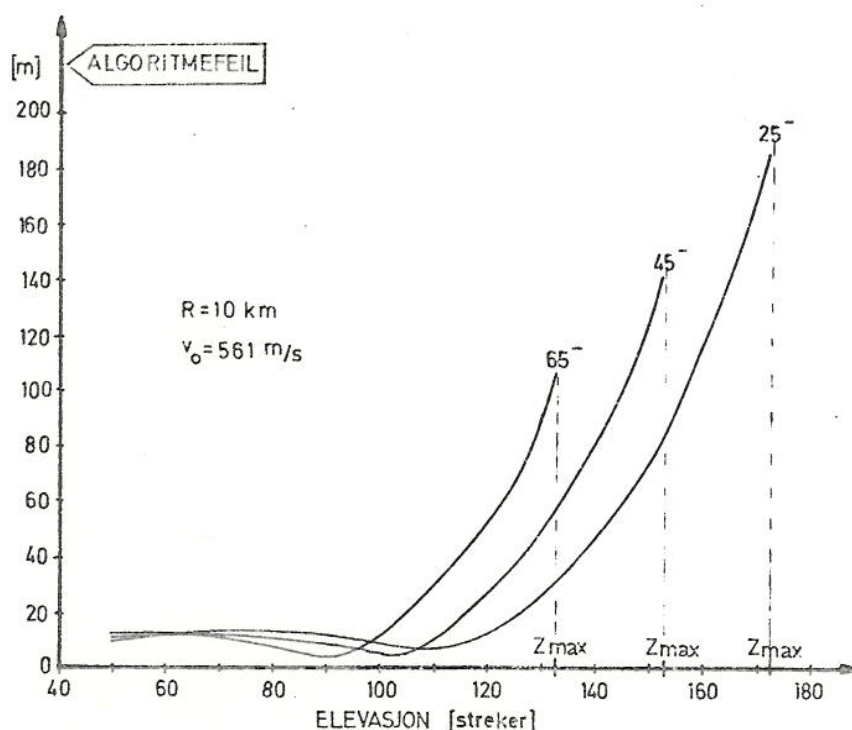
avhengig. For underlydshastigheter øker feilen monotont med stigende deteksjonshøyde, og beregnet posisjon ligger bak virkelig posisjon. (Se fig 4.14  $g=8.2$ ). For overlydshastigheter ligger beregnet posisjon bak virkelig posisjon ved deteksjon lavt nede på banen og beveger seg langs skyteretningen ved stigende deteksjonshøyde. Se figur 4.6.



Figur 4.6 Estimerte posisjoner for 155mm M107 haubits ved forskjellige elevasjonsvinkler. Separasjonsvinkel 25 streker

Beregnet posisjon ligger på siden av linjen for skyteretningen på grunn av at det ikke kompenseres for spinn-krefter.

I fig 4.7 er radiell feil vist for utgangshastighet  $561 \text{ m/s}$ ,  $\alpha_E = 22.5^\circ$ , og avstand til våpenet lik  $10 \text{ km}$ . En ser at feilen er mindre enn  $20 \text{ m}$  for deteksjon opp til omtrent midt på banen hvorpå den tiltar hurtig. Minimumspunktet på kurvene angir feilen på grunn av at det ikke kompenseres for spinnkrefter. Se også fig 4.18 for  $g = 8.2$ .

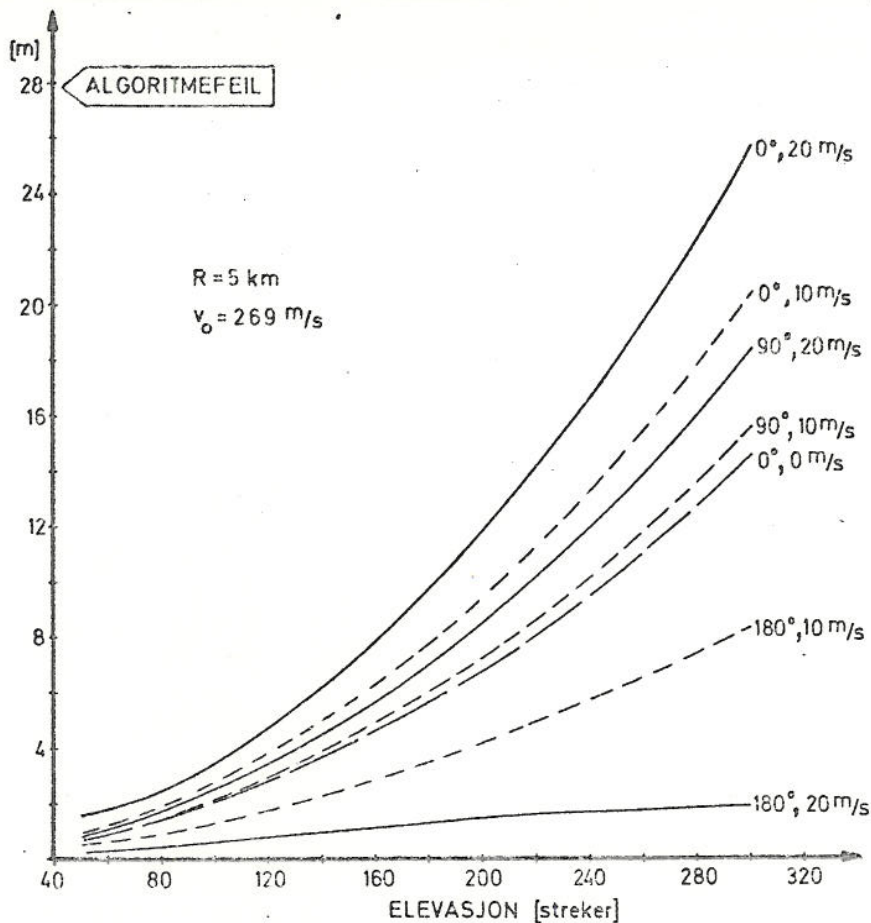


Figur 4.7 Radiell algoritmefeil for 155mm M107 haubits som funksjon av elevasjonsvinkel ved separasjonsvinklene 25, 45 og 65 streker

Ut fra dette kan en slutte at for artillerigranater vil estimeringsalgoritmene ofte gi feil som overskrider nøyaktighetskravene til CYMBELINE.

#### 4.4 Feil på grunn av vind

Algoritmene i CYMBELINE tar ikke hensyn til prosjektillets avdrift på grunn av vind. For å undersøke hvilke feil dette fører til, er det foretatt kjøring hvor prosjektilet utsettes for vind. Det viser seg at vind rett forfra eller rett bakfra gir størst utslag, men det er først ved vindstyrke opp i sterk kuling og deteksjon høyt oppe på banen at utslaget blir større enn 10 m. I figur 4.8 er total algoritmefeil vist for en 81 mm bombekaster granat som skytes i retning 180°, ved vindstyrkene 10 m/s (frisk bris) og 20 m/s (sterk kuling). Vindretningene er 0° (rett bakfra), 90° (fra siden) og 180° (rett forfra). Av dette fremgår det at feil på grunn av vind vil ha liten betydning i praksis.

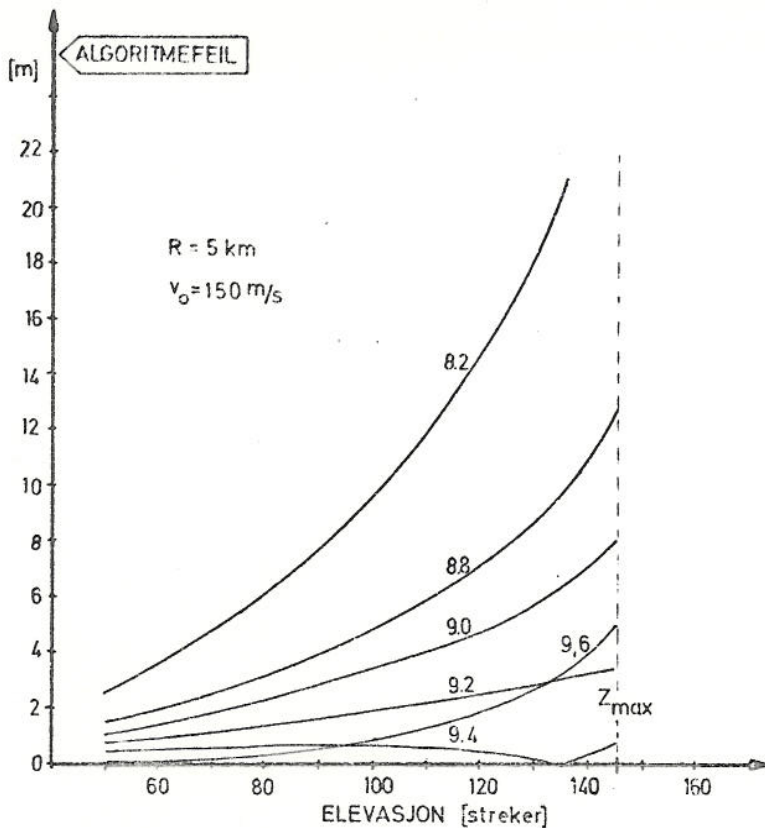


Figur 4.8 Total estimeringsfeil for 81mm bombekastergranat som funksjon av elevasjonsvinkel ved vindhastighet 10m/s og 20m/s. Separasjonsvinkel 45 streker

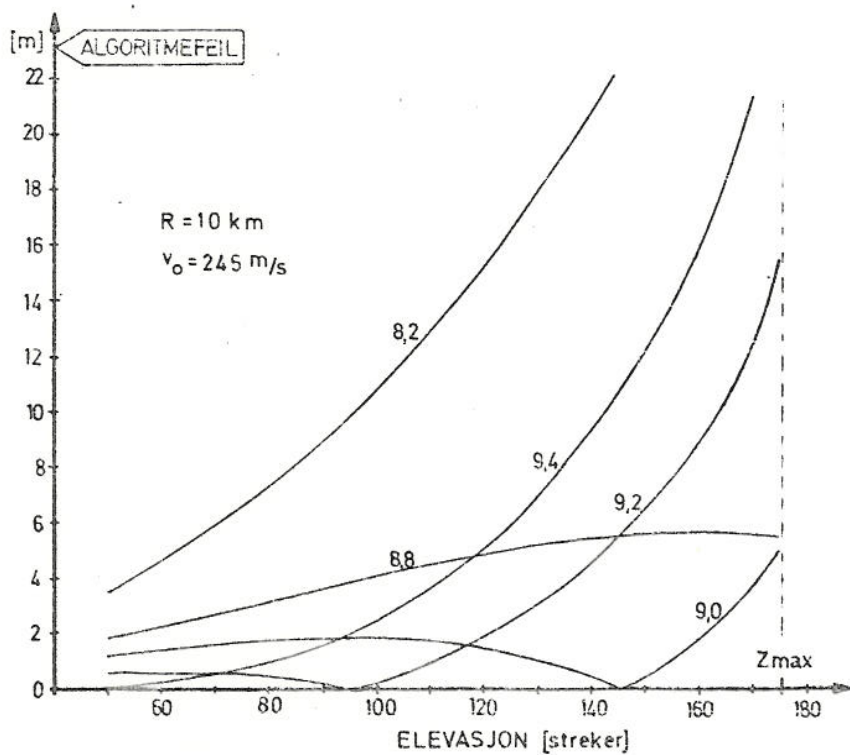
#### 4.5 Forsøk med varierende kompensasjon for luftmotstanden

I de ballistiske ligningene i CYMBELINE er det kompensert for luftmotstanden ved å sette tyngdens akselerasjon  $g$  i ligning (4.2) til  $8.2 \text{ m/s}^2$ . Resultatene i kap 4.3 viser at algoritmene likevel kan gi betydelige feil. Det er derfor utført simuleringer for å klarlegge om det finnes andre verdier for  $g$  som er mer optimale.

Fig 4.9 og 4.10 viser radiell algoritme feil ved forskjellige verdier for  $g$  for en 81 mm bombekastergranat. Utgangshastigheten er henholdsvis 150 og 245 m/s og våpenelevasjon  $65^\circ$ . Estimert bombekasterposisjon er vist i fig 4.11 for samme situasjon som i fig 4.10, men med antenne-elevasjon 120 streker.

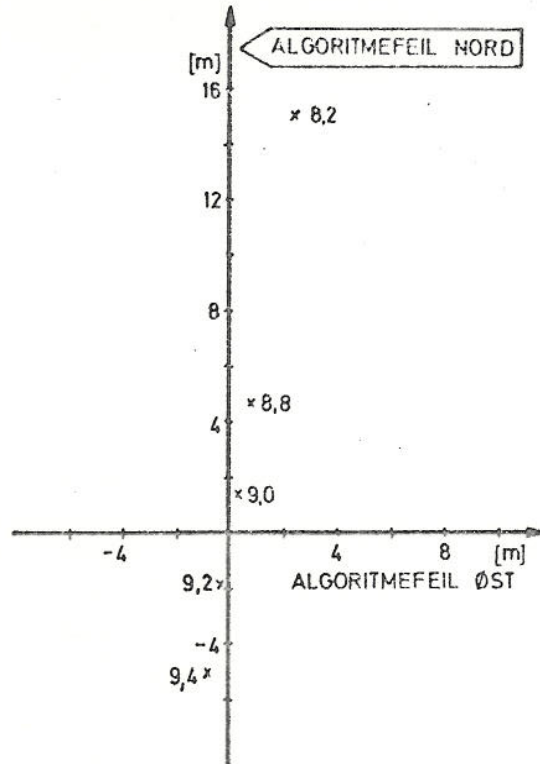


Figur 4.9 Algoritmefeil for 81mm bombekastergranat som funksjon av elevasjon ved forskjellige verdier for g. Separasjonsvinkel 45 streker



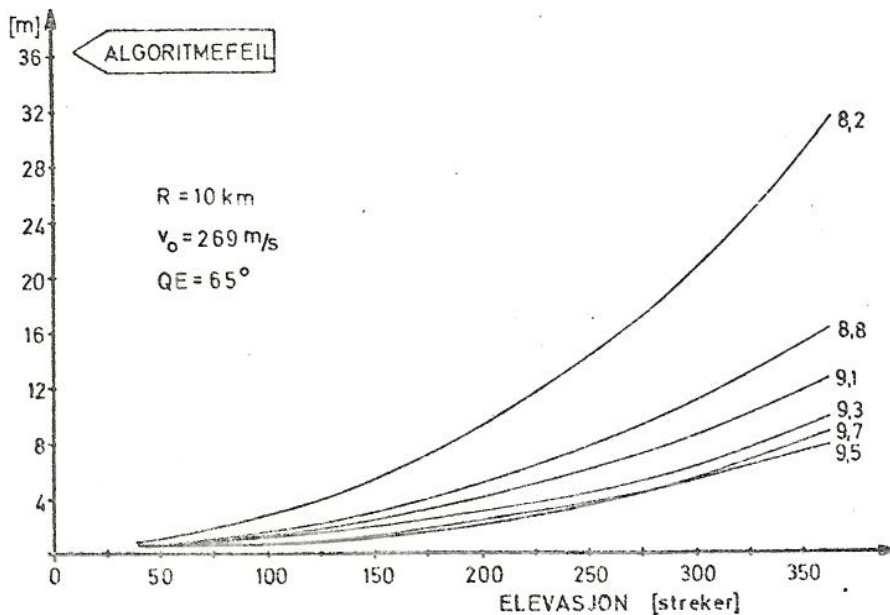
Figur 4.10 Algoritmefeil for 91mm bombekastergranat som funksjon av elevasjon ved forskjellige verdier for g. Separasjonsvinkel 45 streker



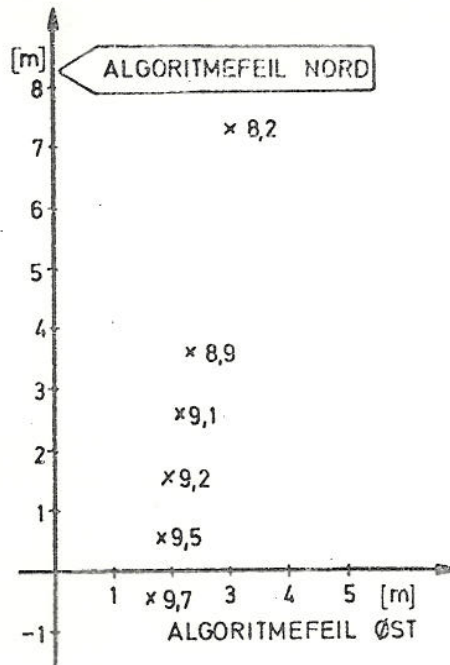


Figur 4.11 Estimert bombekasterposisjon for situasjonen i figur 4.10 ved elevasjon 120 streker. Sann posisjon i origo, skyteretning  $190^\circ$ .

I figur 4.12 er radiell algoritmefeil vist for en 155mm haubits som skyter med elevasjon  $65^\circ$  og utgangshastighet 269 m/s. Estimert våpenposisjon ved 210 streker antenne-elevasjon vises i figur 4.13.

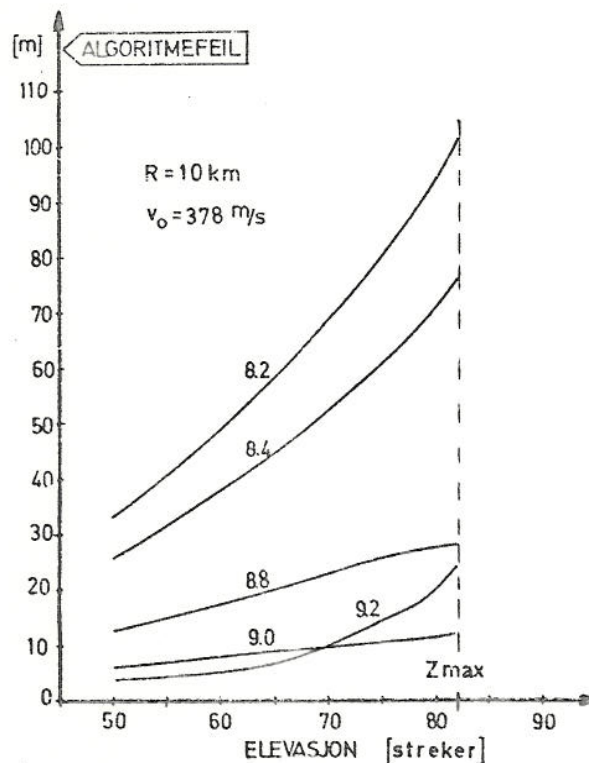


Figur 4.12 Algoritmefeil for 155 mm haubits som funksjon av elevasjon ved forskjellige verdier for q. Separasjonsvinkel 45 streker

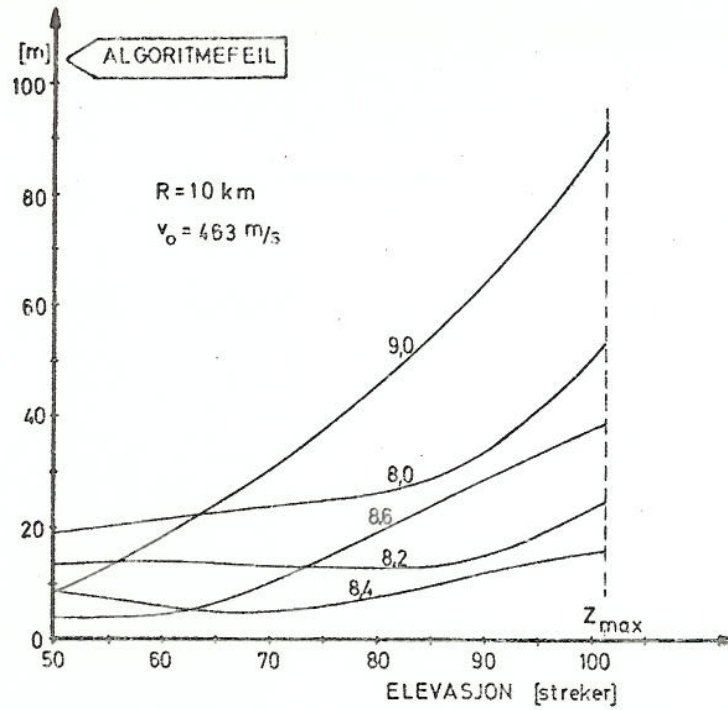


Figur 4.13 Estimert våpenposisjon for situasjonen i figur 4.12 ved elevasjon 210 streker.  
Sann posisjon i origo, skyteretning 190°

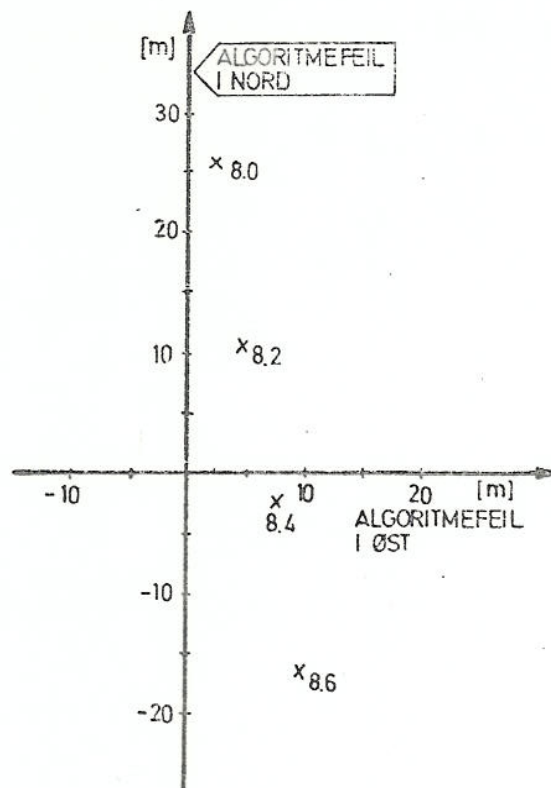
De følgende figurene viser algoritmefeil for en 155 mm haubits ved forskjellige  $g$ -verdier. Utgangshastighetene er henholdsvis 378 m/s, 463 m/s, 561 m/s og 684 m/s. Våpenelevasjonen er redusert til  $22,5^\circ$ .



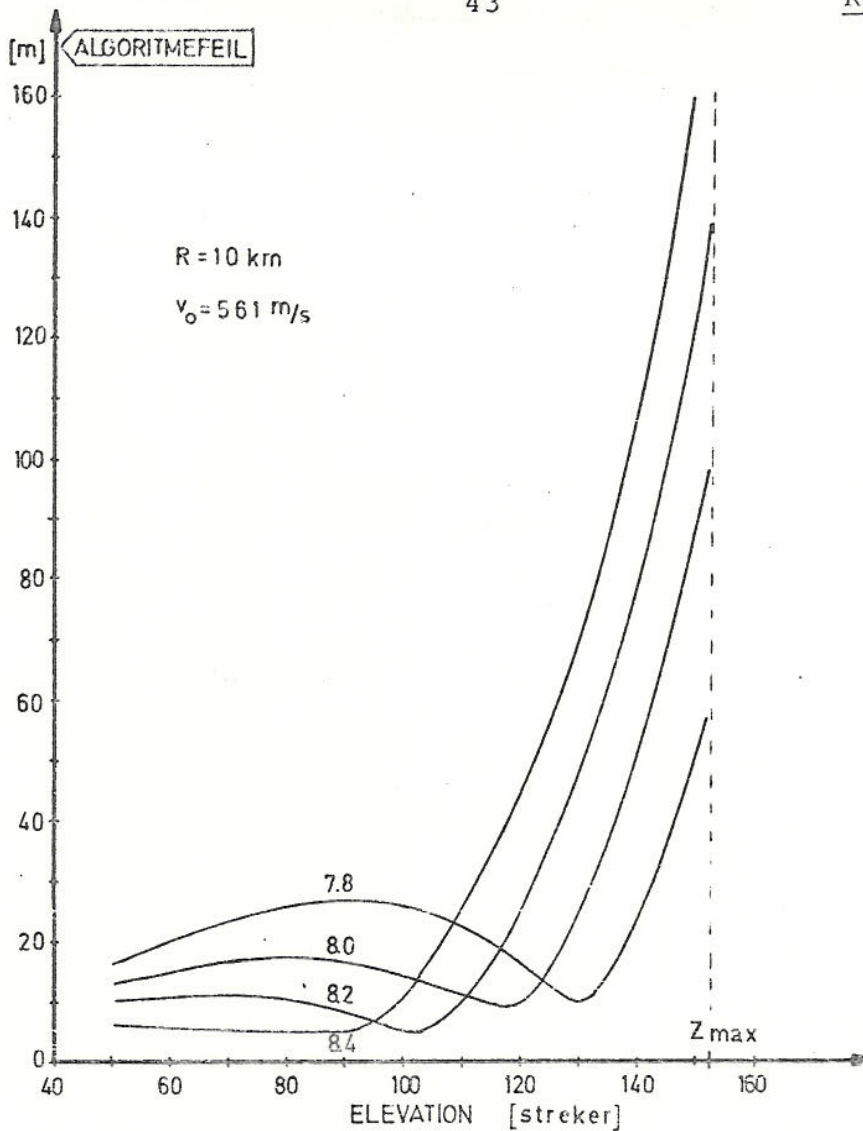
Figur 4.14 Algoritmefeil for 155mm haubits som funksjon av elevasjon ved forskjellige verdier for  $g$ .  
Separasjonsvinkel 45 streker



Figur 4.15 Algoritmefeil for 155mm haubits som funksjon av elevasjon ved forskjellige verdier for  $\alpha$ . Separasjonsvinkel 45 streker

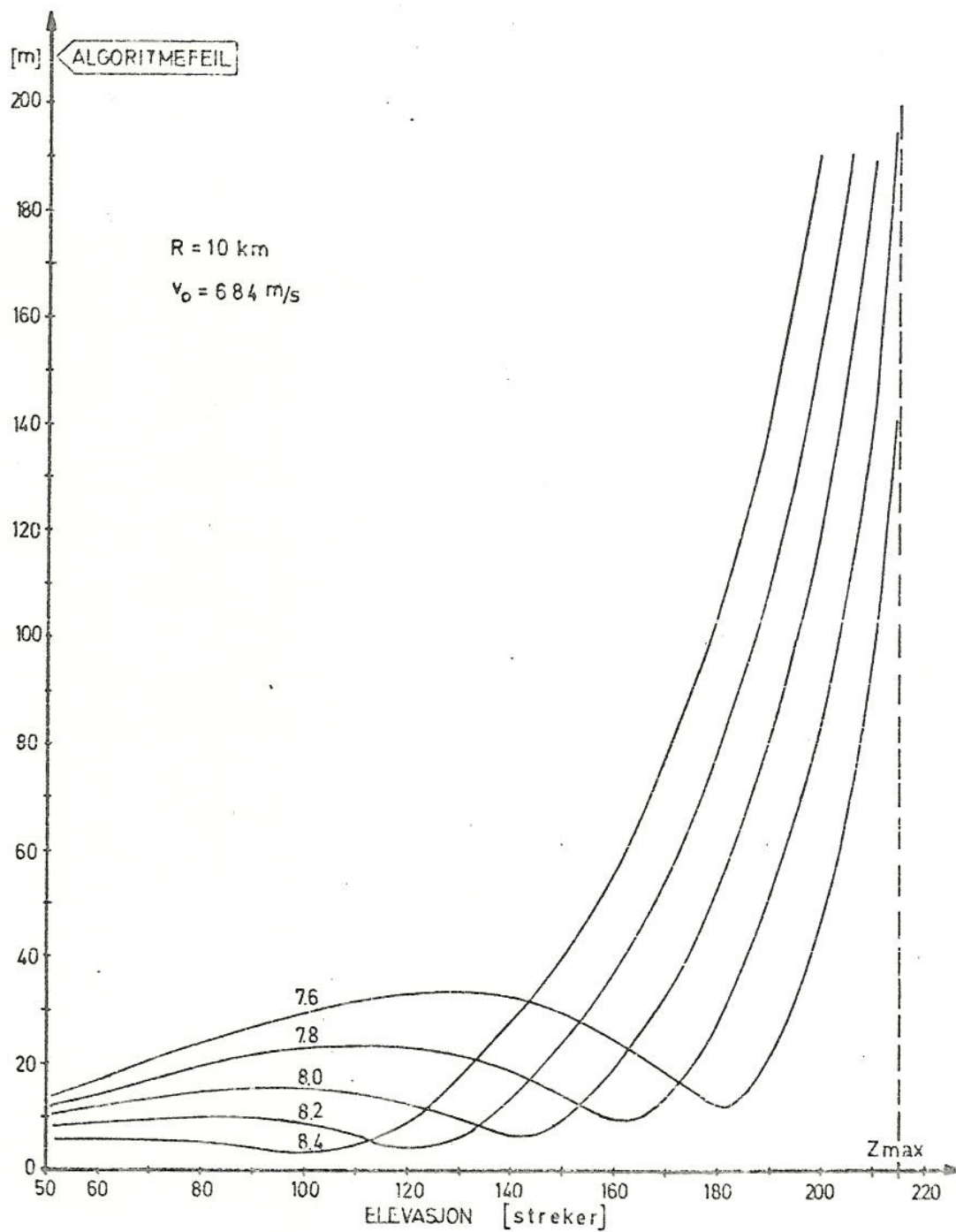


Figur 4.16 Estimert våpenposisjon for situasjonen i figur 4.15 ved elevasjon 80 streker. Sann posisjon i origo, skyteretning 170°

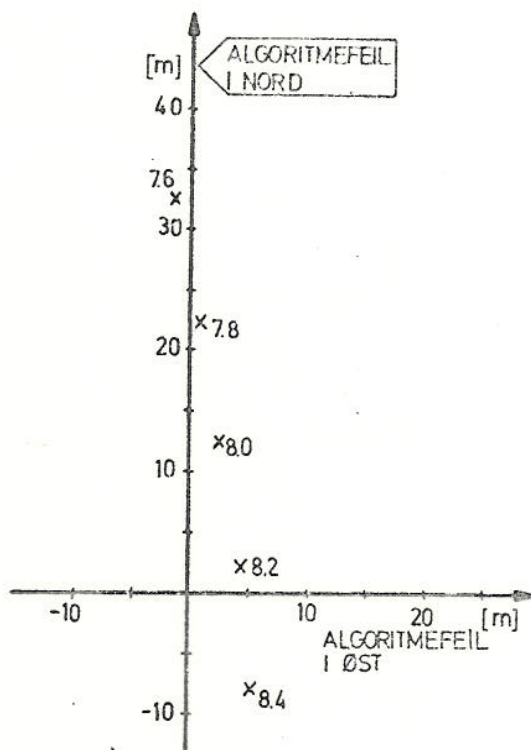


Figur 4.17 Algoritmefeil for 155mm haubits som funksjon av elevasjon ved forskjellige verdier for  $g$ . Separasjonsvinkel 45 streker

Resultatene viser at den  $g$ -verdi som gir minst feil varierer med våpentype, utgangshastighet, våpenets elevasjonsvinkel og deteksjonshøyden. I tabell 4.1 er det gitt et sammendrag av resultatene hvor optimal verdi for  $g$  er vist sammen med aktuelle skytedata.



Figur 4.18 Algoritmefeil for 155mm haubits som funksjon av elevasjon ved forskjellige verdier for  $\alpha$ . Separasjonsvinkel 45 streker



Figur 4.19 Estimert våpen posisjon for situasjonen i fig 4.18 ved elevasjon 120 streker.  
Sann posisjon i origo, skyteretning 170°

Våpen type	81 mm		155 mm				
	Utg hast (m/s)	150	245	269	378	463	561
Våpen elev (°)	65	65	65	22.5	22.5	22.5	22.5
$g_{opt}$ (m/s <sup>2</sup> )	9.4	9.0	9.5	9.0	8.4	8.0	8.0

Tabell 4.1 Optimal g-verdi

En ser at underlyds granathastigheter gir markert høyere verdi for  $g$  enn overlyds hastigheter. For underlyds hastigheter vil en  $g$ -verdi omkring  $9.1 \text{ m/s}^2$  gi relativt betydelig mindre algoritmefeil enn nåværende verdi på  $8.2 \text{ m/s}^2$ .

Ved overlyds hastigheter er situasjonen mer komplisert. Feilen er her i større grad en funksjon både av utgangshastigheten og hvor på banen prosjektilet detekteres. En g-verdi som gir liten feil ved deteksjon på den nedre del av banen gir stor feil ved deteksjon høyere oppe. Algoritmer med fast g-verdi vil derfor gi stor variasjon i feilen for artilleri-granater. En verdi for g på omkring  $8.0 \text{ m/s}^2$  vil gi best gjennomsnittelig resultat. Den nåværende verdi på  $8.2 \text{ m/s}^2$  ser ut til å være et godt kompromiss når CYMBELINE skal brukes både mot bombekastere og artilleri.

## 5 BETYDNINGEN AV FEIL I REGISTRERING AV DATA

I dette kapitlet er det undersøkt hvilken sammenheng det er mellom feil som operatøren innfører ved registrering av data og feilen i estimert posisjon. Det viser seg at det stilles meget store krav til nøyaktigheten ved registrering. Avvik på mindre enn en millimeter ved avmerking av ekko fra et prosjektil og et sekund i registrering av tiden mellom ekkoene kan føre til betydelige feil i estimatet av utgangsposisjonen.

### 5.1 Estimatets følsomhet for operatørfeil

Operatøren registrerer ekko fra en granat ved å merke av punktene for P1 og P2 på radarskjermen og tiden T ved å trykke inn TILT-knappen. Data overføres til regnemaskinen ved å plassere markeringslinjene over punktene. I disse operasjonene introduseres det følgende feil i skråavstand, retning og tid:

$\Delta SR1$	-	feil i skråavstand til P1
$\Delta SR2$	-	" " " " P2
$\Delta \phi_{AM1}$	-	" " retning til P1
$\Delta \phi_{AM2}$	-	" " " " P2
$\Delta T$	-	" " T

Den totale feil  $\Delta EM$  i estimert østkoordinat på grunn av feil introdusert av operatøren blir da:

$$\Delta EM = \frac{\partial EM}{\partial SR1} \Delta SR1 + \frac{\partial EM}{\partial SR2} \Delta SR2 + \frac{\partial EM}{\partial \phi_{AM1}} \Delta \phi_{AM1} + \frac{\partial EM}{\partial \phi_{AM2}} \Delta \phi_{AM2} + \frac{\partial EM}{\partial T} \Delta T \quad (5.1)$$

Tilsvarende for nord-koordinaten:

$$NM = \frac{\partial NM}{\partial SR1} \Delta SR1 + \frac{\partial NM}{\partial SR2} \Delta SR2 + \frac{\partial NM}{\partial \phi_{AM1}} \Delta \phi_{AM1} + \frac{\partial NM}{\partial \phi_{AM2}} \Delta \phi_{AM2} + \frac{\partial NM}{\partial T} \Delta T \quad (5.2)$$

De partiellderiverte ( $\frac{\partial EM}{\partial SR1}$ ,  $\frac{\partial EM}{\partial SR2}$  etc) i ligning (5.1) og (5.2) gir uttrykk for følsomheten mellom de enkelte operatørfeilene og feilen i sluttresultatet.

## 5.2 Beregning av følsomhetskoeffisientene

I det følgende er det utledet uttrykk for disse koeffisientene, og typiske størrelser er vist i form av kurver. Det er ikke benyttet noe spesielt våpen for beregning av disse verdiene, men en har gått ut fra tilnærmede bevegelsesligninger for et prosjektil i en situasjon som er typisk for en bombekaster. For alle beregningene er våpenets elevasjon  $QE = 60^\circ$ , og radar og våpen har



samme høydekoordinat ( $\phi$ ):  $HR=HM$ ). Når ikke annet er angitt i figuren, er skråavstanden fra radaren til prosjektilet 6 km og prosjektilets utgangshastighet  $v_0 = 250$  m/s.

Følgende ligninger gjelder for estimat av øst- og nordkoordinatene og forholdstallet K (Appendiks B):

$$EM = E1 + K(E1 - E2) \quad (5.3)$$

$$NM = N1 + K(N1 - N2) \quad (5.4)$$

$$K = \frac{\sqrt{(\frac{1}{2}gT^2 + h2 - h1)^2 + 2gT^2(h1 - HM - HR)} - \frac{1}{2}gT^2 + h1 - h2}{gT^2} \quad (5.5)$$

Ved beregning av koeffisientene har radar og våpen samme høyde,  $\phi$ ):  $HM=HR$ .

Øst- og nordkoordinaten for P1 og P2 er gitt av (Appendiks B):

$$E1 = SR1 \cos(\phi_E + \phi_{t1}) \sin(\phi_{AR} + \phi_{AM1}) \quad (5.6)$$

$$N1 = SR1 \cos(\phi_E + \phi_{t1}) \cos(\phi_{AR} + \phi_{AM1}) \quad (5.7)$$

$$E2 = SR2 \cos(\phi_E + \phi_{t2}) \sin(\phi_{AR} + \phi_{AM2}) \quad (5.8)$$

$$N2 = SR2 \cos(\phi_E + \phi_{t2}) \cos(\phi_{AR} + \phi_{AM2}) \quad (5.9)$$

der

SR1 - registrert avstand til P1 (operatørfunksjon)

SR2 - " " P2 "

$\phi_{AM1}$  - Registrert vinkel til P1 relativt antennens akse (operatørfunksjon)

$\phi_{AM2}$  - registrert vinkel til P2 relativt antennens akse (operatørfunksjon)

- $\phi_E$  - antenneaksens elevasjonsvinkel  
 $\phi_{t1}$  - radarstrålens elevasjonsvinkel relativt antenneaksen ved deteksjon av P1  
 $\phi_{t2}$  - Radarstrålens elevasjonsvinkel relativt antenneaksen ved deteksjon av P2  
 $\phi_{AR}$  - antenneaksens retning relativt nord

Følsomhet i estimatet av øst- og nord-koordinatene for feil i avstandene til P1,  $\Delta S_{R1}$ :

$$\frac{\partial EM}{\partial S_{R1}} = (1 + K) \frac{\partial E1}{\partial S_{R1}} + (E1 - E2) \frac{\partial K}{\partial S_{R1}} \quad (5.10)$$

$$\frac{\partial NM}{\partial S_{R1}} = (1 + K) \frac{\partial N1}{\partial S_{R1}} + (N1 - N2) \frac{\partial K}{\partial S_{R1}} \quad (5.11)$$

Derivasjon av (5.5), (5.6) og (5.7) m h p  $S_{R1}$  gir innsatt:

$$\frac{\partial EM}{\partial S_{R1}} = (1+K) \cos(\phi_E + \phi_{t1}) \sin(\phi_{AR} + \phi_{AM1}) + (E1-E2) \left[ \frac{\frac{1}{2}gT^2 - h2+h1}{gT^2 \sqrt{\quad}} + \frac{1}{gT^2} \right] \sin(\phi_E + \phi_{t1}) \quad (5.12)$$

$$\frac{\partial NM}{\partial SR1} = (1+K) \cos(\phi_E + \phi_{t1}) \cos(\phi_{AR} + \phi_{AM1}) +$$

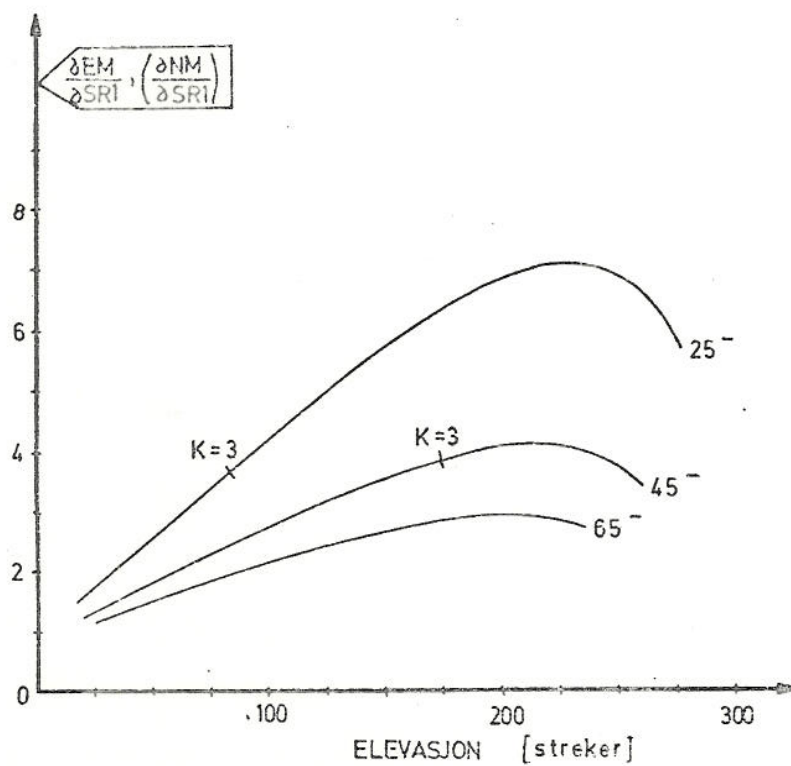
$$(N1-N2) \left[ \frac{\frac{1}{2}gT^2 - h2 + h1}{gT^2 \sqrt{\quad}} + \frac{1}{gT^2} \right] \sin(\phi_E + \phi_{t1}) \quad (5.13)$$

$$\text{der } \sqrt{\quad} = \sqrt{(\frac{1}{2}gT^2 + h2 - h1)^2 + 2gT^2(h1 + HR - HM)}$$

Beregninger viser at tallverdien av det siste leddet i (5.12) og 5.13) er lite. Dette leddet kan derfor sløyfes for praktiske formål, og uttrykkene er da uavhengig av differansen i øst- og nordkoordinatene til P1 og P2. En ser at følsomhetene er en funksjon av antenneaksens elevasjonsvinkel, separasjonsvinkelen mellom deteksjonene av P1 og P2 og av retningen til prosjektilet. Figur 5.1 til 5.3 illustrerer disse forholdene nærere.

I figur 5.1 er  $\frac{\partial EM}{\partial SR1}$  og  $\frac{\partial NM}{\partial SR1}$  framstilt som funksjon av elevasjon for separasjonsvinkler på 25, 45 og 65 streker. For  $\frac{\partial EM}{\partial SR1}$  er retningen fra radaren til målet  $60^\circ$ , og for  $\frac{\partial NM}{\partial SR1}$  er retningen  $30^\circ$ . Merket "K=3" angir når forholdstallet K overskrider 3, dvs når kretsene i regnemaskinen går i metning. En har valgt å beregne kurvene utover metningspunktet for å undersøke forholdet dersom begrensningen i K fjernes. Av figuren framgår det at følsomheten tiltar med økende elevasjon og avtar med økende separasjonsvinkel. Eksempelvis framgår det av figuren at en feilavmerking  $\Delta SR1$  i avstand fører til en feil på ca  $3.5 \cdot \Delta SR1$  i resultatet for elevasjonsvinkler nær metningsgrensen.

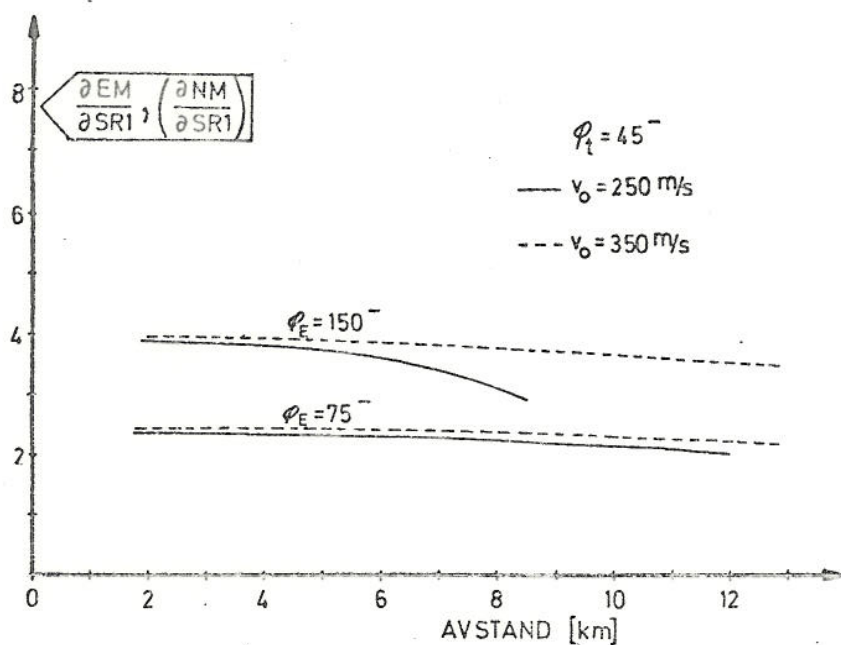
Figur 5.2 framstiller  $\frac{\partial EM}{\partial SR1}$  og  $\frac{\partial NM}{\partial SR1}$  som funksjon av avstand for to forskjellige elevasjonsvinkler og hastigheter. Retningen fra radaren til målet er som oppgitt for figur 5.1.



Figur 5.1 Koeffisientene  $\frac{\partial EM}{\partial SRI}$  og  $\frac{\partial NM}{\partial SRI}$  frastilt som funksjon av elevasjon for tre separasjonsvinkler

Følsomheten avtar svakt med økende avstand, først ved deteksjon av P2 nær toppen av banen avtar koeffisientene sterkere.

Figur 5.3 viser  $\frac{\partial EM}{\partial SRI}$  og  $\frac{\partial NM}{\partial SRI}$  som funksjon av retning til målet for tre separasjonsvinkler. For estimering av øst-koordinaten er følsomheten for feil i avstanden til P1 størst når retningen er rett øst eller vest, for nord-koordinaten når retningen er rett nord eller sør.



Figur 5.2 Koeffisientene  $\frac{\partial EM}{\partial SR1}$  og  $\frac{\partial NM}{\partial SR1}$  som funksjon av avstand

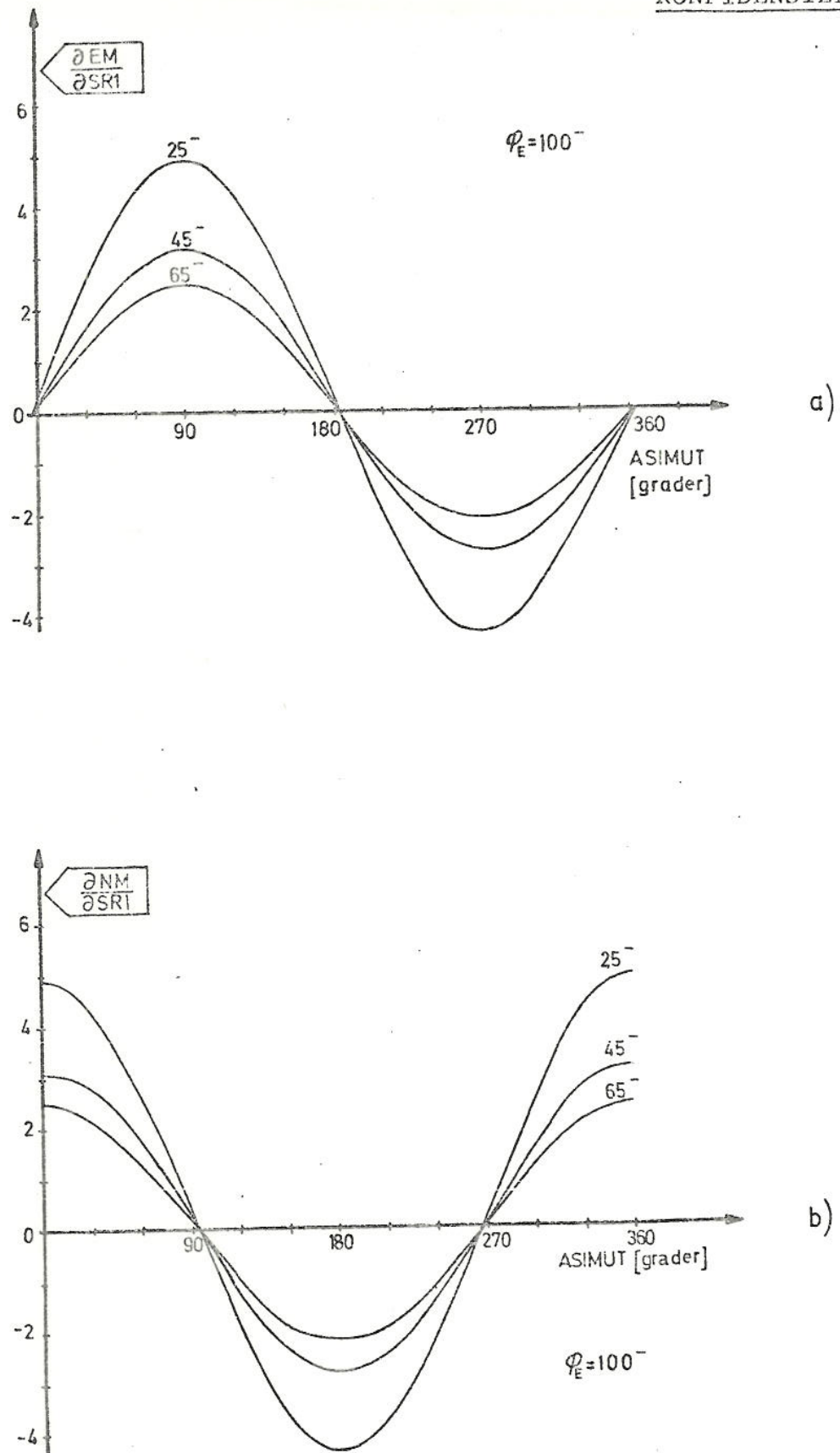
Følsomheten i estimat av øst-og nord-koordinaten for feil i avstanden til P2,  $\Delta SR2$ :

$$\frac{\partial EM}{\partial SR2} = \frac{\partial K}{\partial SR2} (E1-E2) - K \frac{\partial E2}{\partial SR2} \quad (5.14)$$

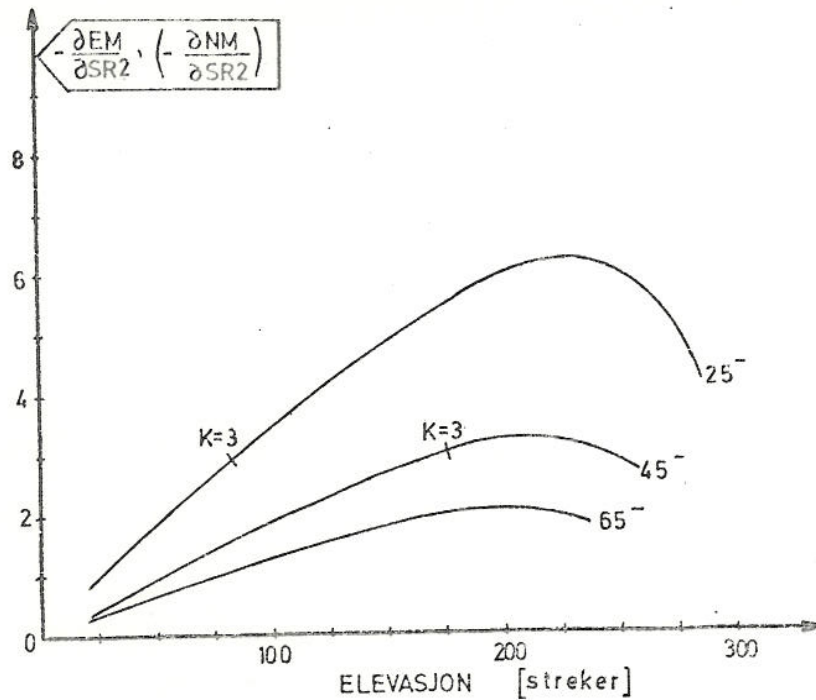
$$\frac{\partial NM}{\partial SR2} = \frac{\partial K}{\partial SR2} (N1-N2) - K \frac{\partial N2}{\partial SR2} \quad (5.15)$$

Derivasjon av (5.5), (5.8) og (5.9) gir innsatt:

$$\frac{\partial EM}{\partial SR2} = (E1-E2) \left[ \frac{\frac{1}{2}gT^2+h2-H1}{gT^2 \sqrt{\quad}} - \frac{1}{gT^2} \right] \sin(\phi_E+\phi_{t2}) - K \cdot \cos(\phi_E+\phi_{t2}) \sin(\phi_{AR}+\phi_{AM2}) \quad (5.16)$$



Figur 5.3 a) framstiller  $\frac{\partial EM}{\partial SR1}$  og b)  $\frac{\partial NM}{\partial SR1}$  som funksjon av retning til målet for tre separasjonsvinkler



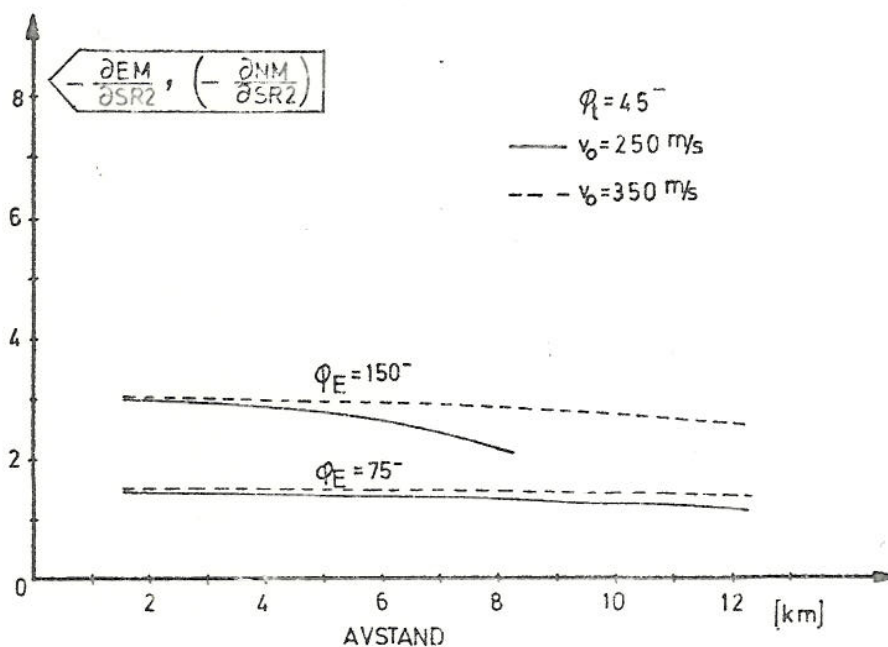
Figur 5.4 Koeffisientene  $\frac{\partial EM}{\partial SR2}$  og  $\frac{\partial NM}{\partial SR2}$  framstilt som funksjon av elevasjon for tre separasjonsvinkler

$$\frac{\partial NM}{\partial SR2} = (N1-N2) \left[ \frac{\frac{1}{2}gT^2+h2-h1}{gT^2 \sqrt{\quad}} - \frac{1}{gT^2} \right] \sin(\phi_E + \phi_{t2}) - K \cos(\phi_E + \phi_{t2}) \cos(\phi_{AR} + \phi_{AM2}) \quad (5.17)$$

Første ledd i ligning (5.16) og (5.17) kan for praktiske formål sløyfes fordi tallverdien er liten.

Figur 5.4 framstiller  $\frac{\partial EM}{\partial SR2}$  og  $\frac{\partial NM}{\partial SR2}$  som funksjon av elevasjonsvinkler på 25, 45 og 65 streker. For  $\frac{\partial EM}{\partial SR2}$  er retningen fra radaren til målet  $60^\circ$ , og for  $\frac{\partial NM}{\partial SR2}$  er retningen  $30^\circ$ . En ser her samme tendensene som for følsomheten ovenfor  $\Delta RS1$ , men fortegnet er motsatt og tallverdien noe mindre.

I figur 5.5 er følsomhets-koeffisientene framstilt som funksjon av avstanden til prosjektilet. Retningen fra radaren til målet er som oppgitt for figur 5.4. Koeffisientene avtar svakt med økende avstand og er lite avhengig av prosjektilets utgangshastighet inntil P2 nærmer seg toppen av banen. Da avtar verdien raskere.

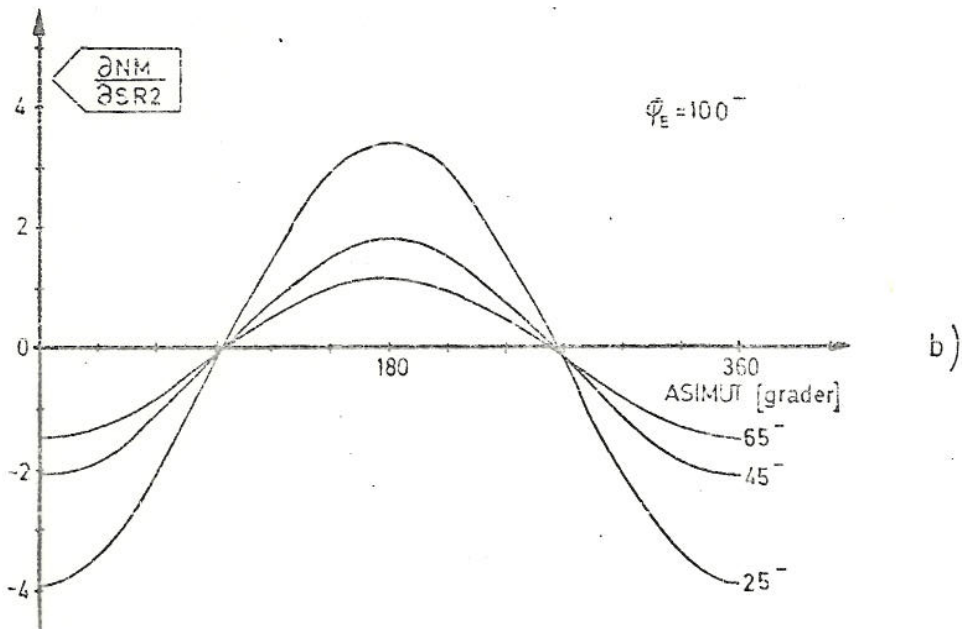
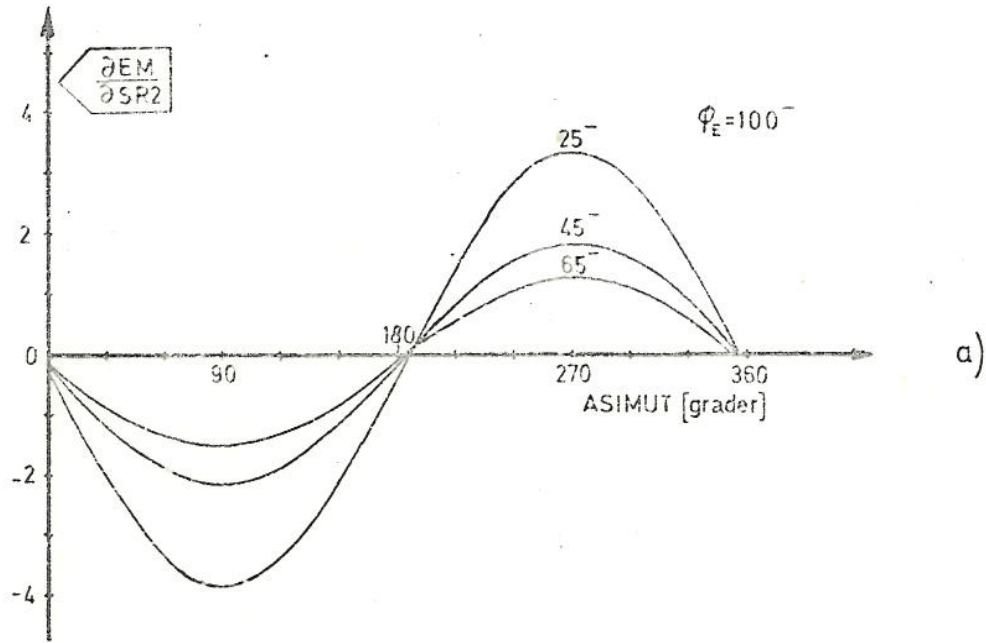


Figur 5.5 Koeffisientene  $\frac{\partial EM}{\partial SR2}$  og  $\frac{\partial NM}{\partial SR2}$  framstilt som funksjon av avstand ved elevasjonene 75 og 150 streker

Figur 5.6 viser koeffisientene som funksjon av retning til P2. Følsomhet for feil i øst-koordinaten på grunn av feil i avstanden til P2 er størst når retningen er rett øst eller vest, for nord-koordinaten når retningen er rett nord eller sør.

Følsomheten i estimatet er øst- og nordkoordinaten for feil i vinkelen til P1,  $\Delta\phi_{AM1}$  er:





Figur 5.6 a) framstiller  $\frac{\partial EM}{\partial SR2}$  og b)  $\frac{\partial NM}{\partial SR2}$  som funksjon av retningen til målet for tre separasjonsvinkler

$$\frac{\partial EM}{\partial \phi_{AM1}} = (1+K) \frac{\partial E1}{\partial \phi_{AM1}} \quad (5.18)$$

$$\frac{\partial NM}{\partial \phi_{AM1}} = (1+K) \frac{\partial N1}{\partial \phi_{AM1}} \quad (5.19)$$

Derivasjon av (5.6) og (5.7) gir:

$$\frac{\partial EM}{\partial \phi_{AM1}} = (1+K) SR1 \cdot \cos(\phi_E + \phi_{t1}) \cos(\phi_{AR} + \phi_{AM1}) \quad (5.20)$$

$$\frac{\partial NM}{\partial \phi_{AM1}} = -(1+K) SR1 \cdot \cos(\phi_E + \phi_{t1}) \sin(\phi_{AR} + \phi_{AM1}) \quad (5.21)$$

En ser at  $\frac{\partial EM}{\partial \phi_{AM1}}$  og  $\frac{\partial NM}{\partial \phi_{AM1}}$  har samme amplitude og varierer med retningen til P1 som  $\cos \phi_{A1}$  og  $-\sin \phi_{A1}$  der  $\phi_{A1} = \phi_{AR} + \phi_{AM1}$

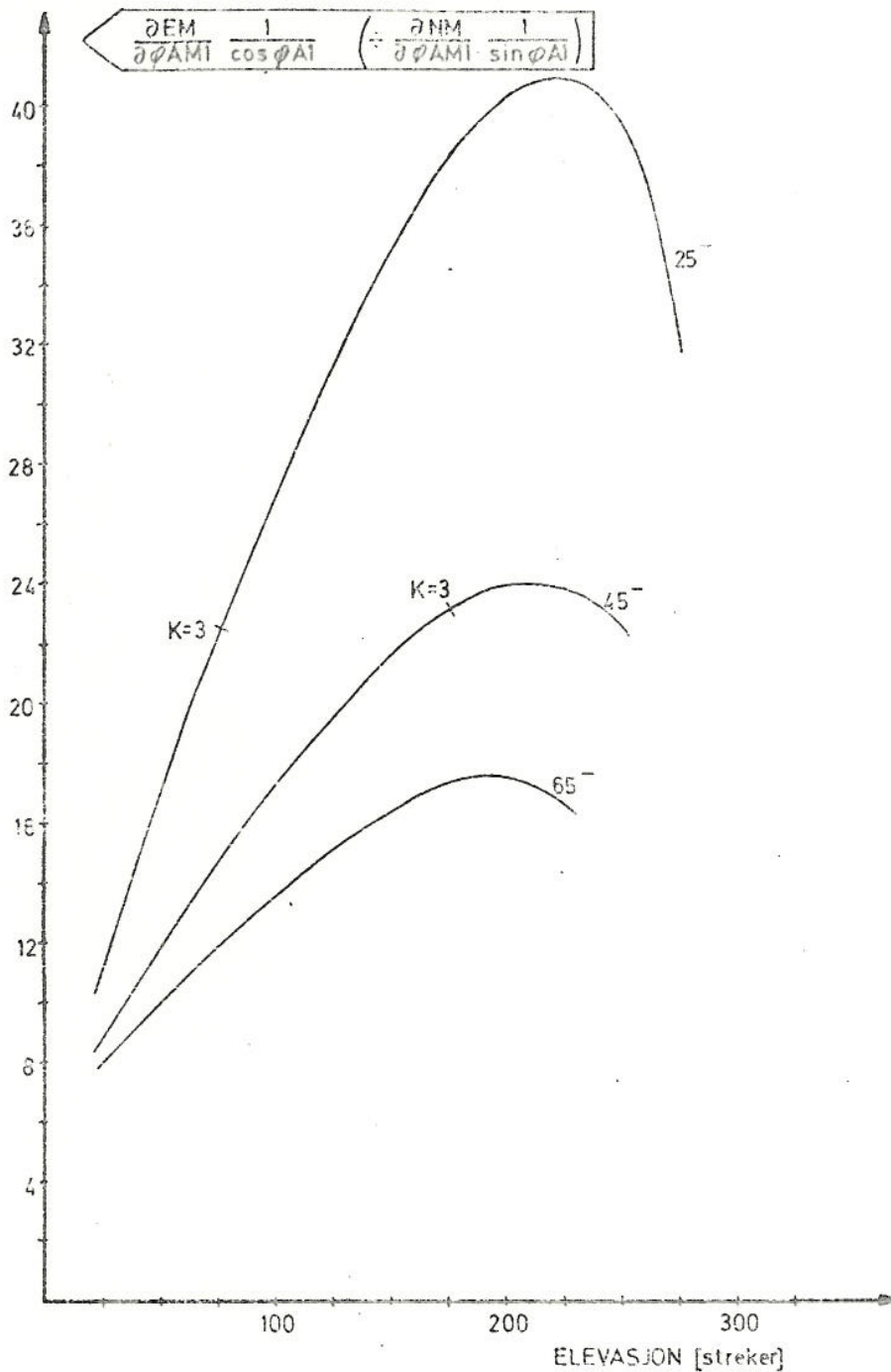
I figur 5.7 er koeffisientenes amplitude framstilt som funksjon av elevasjon for separasjonsvinkler på 25, 45 og 65 streker. Tallverdiene for koeffisientene er beregnet slik at de skal multipliseres med feilvinkelen i streker for å gi resulterende feil i meter. En ser at følsomhetene øker med økende elevasjon inntil P2 nærmer seg toppen av banen hvorpå den avtar inntil toppunktet er nådd. I figur 5.8 er det vist hvordan koeffisientenes amplitude øke med økende avstand.

Følsomheten i estimat av øst- og nord-koordinatene for feil i vinkelen til P2,  $\Delta \phi_{AM2}$  er:

$$\frac{\partial EM}{\partial \phi_{AM2}} = -K \frac{\partial E2}{\partial \phi_{AM2}} \quad (5.22)$$

$$\frac{\partial NM}{\partial \phi_{AM2}} = -K \frac{\partial N2}{\partial \phi_{AM2}} \quad (5.23)$$

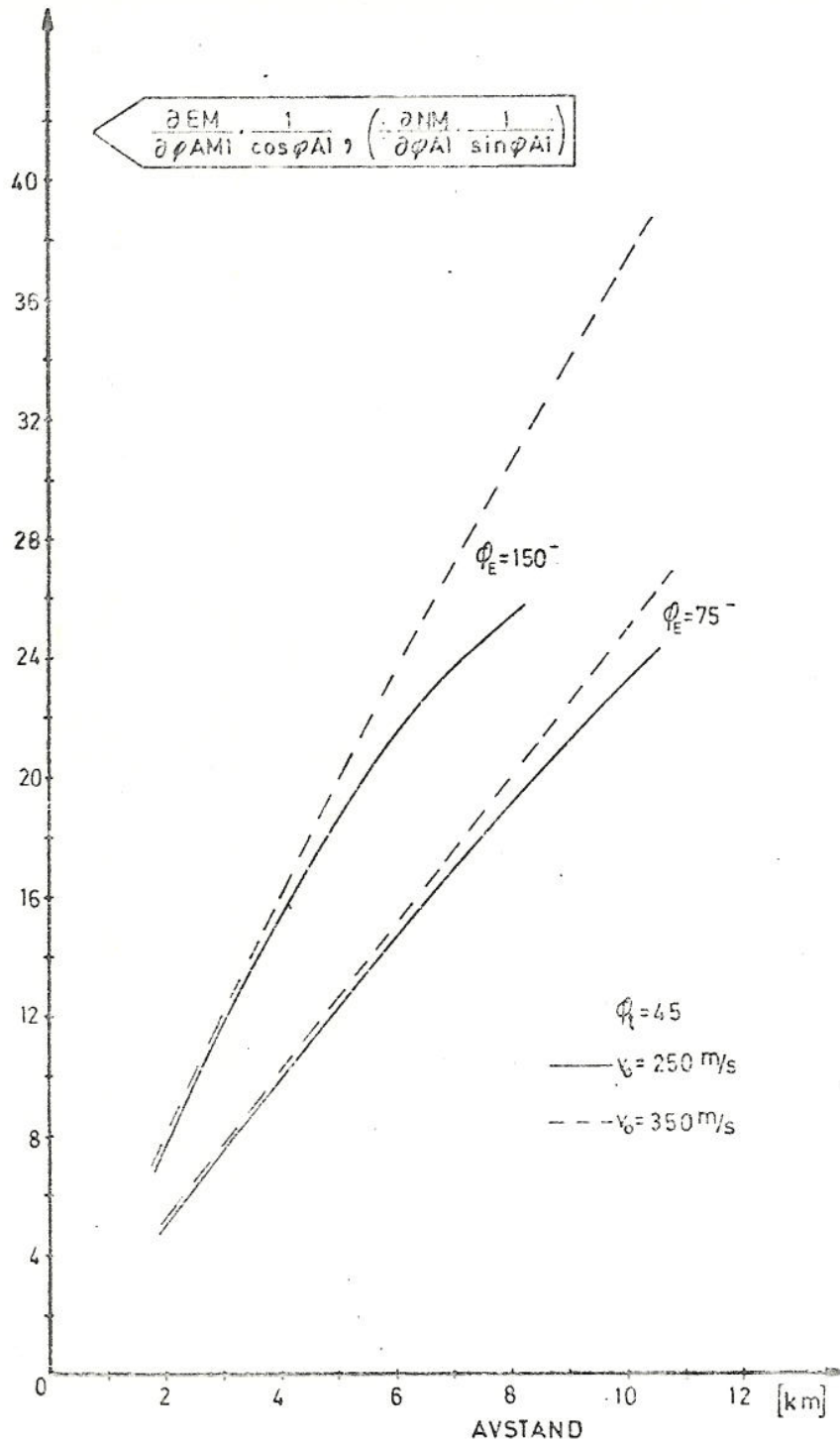
Derivasjon av (5.8) og (5.9) gir:



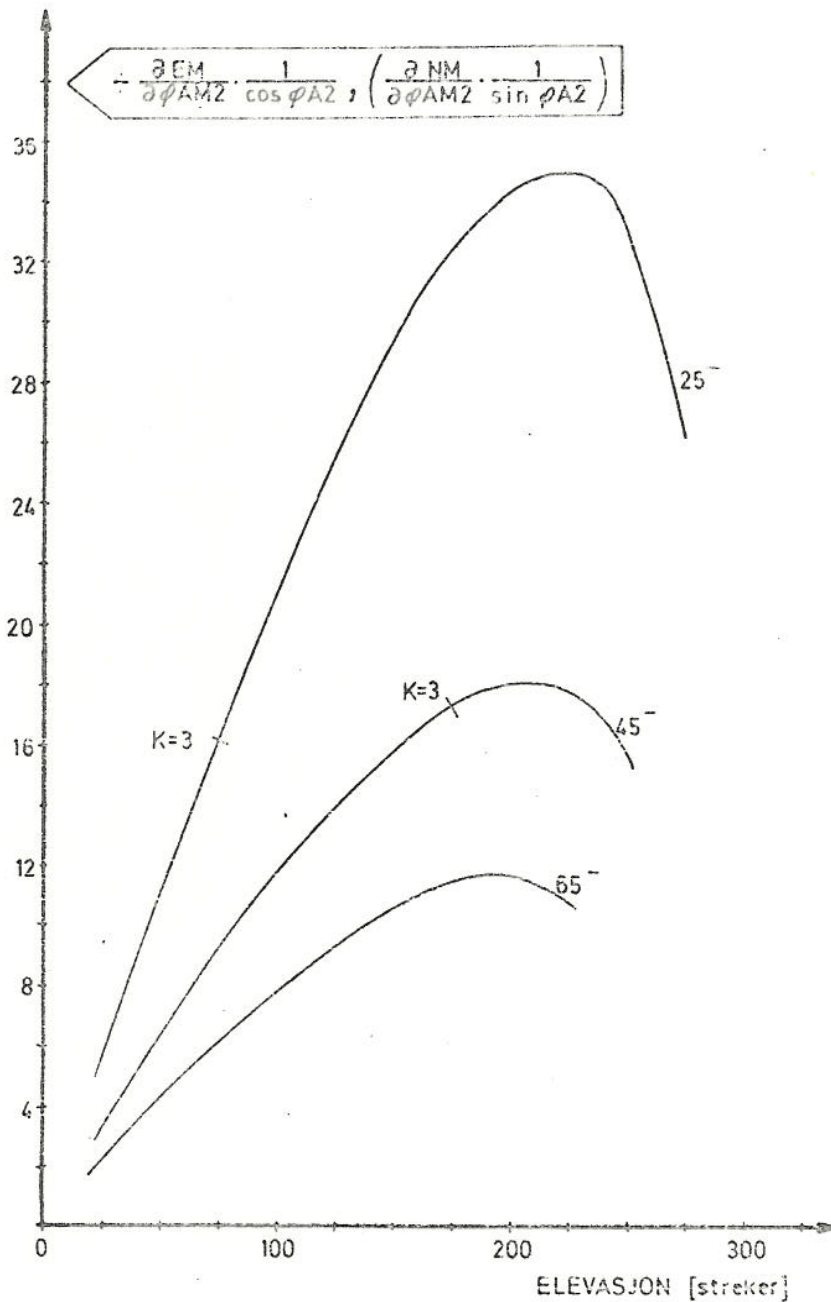
Figur 5.7 Amplituden til koeffisientene,  $\frac{\partial EM}{\partial \phi_{AM1}}$  og  $\frac{\partial NM}{\partial \phi_{AM1}}$  som funksjon av elevasjon for separasjonsvinklene 25, 45 og 65 streker

$$\frac{\partial EM}{\partial \phi_{AM2}} = -K \cdot SR^2 \cos(\phi_E + \phi_{t2}) \cos(\phi_{AR} + \phi_{AM2}) \quad (5.24)$$

$$\frac{\partial NM}{\partial \phi_{AM2}} = K \cdot SR^2 \cos(\phi_E + \phi_{t2}) \sin(\phi_{AR} + \phi_{AM2}) \quad (5.25)$$

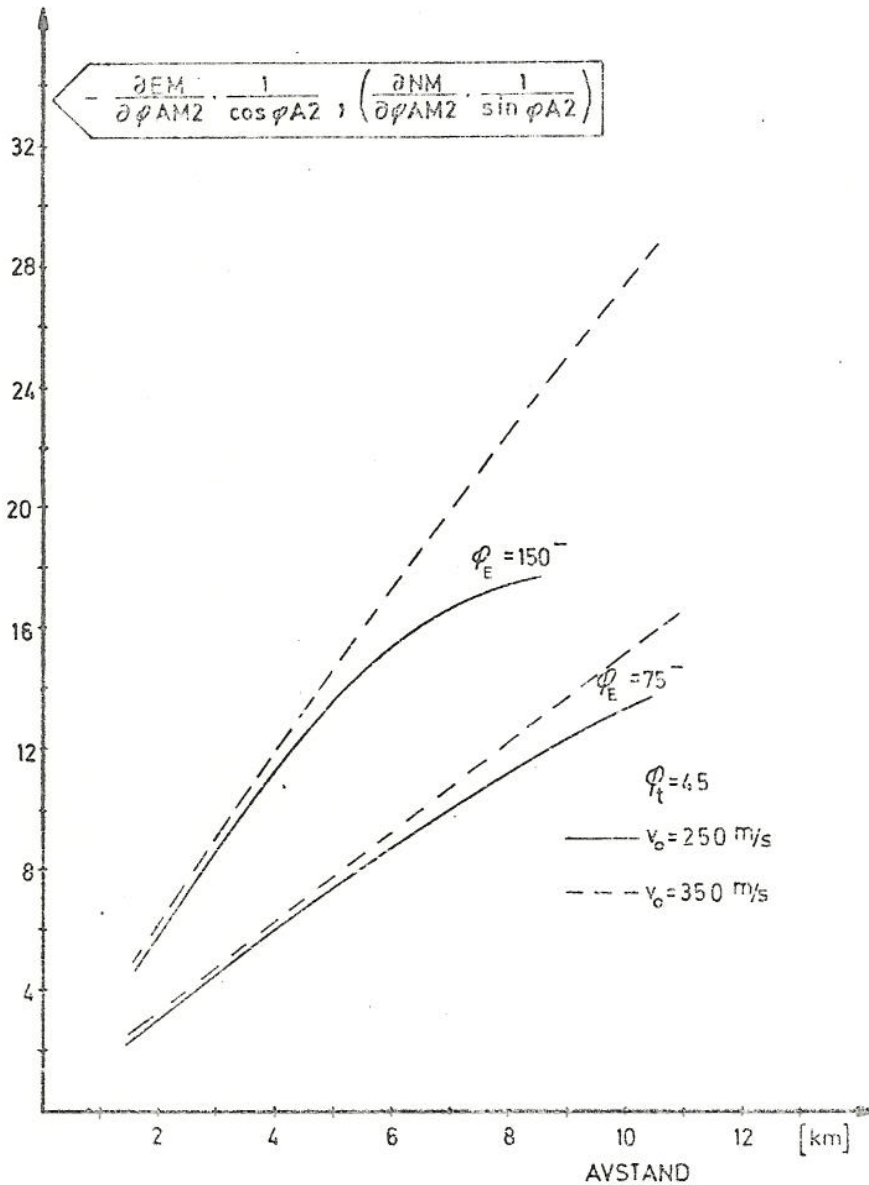


Figur 5.8 Amplituden til koeffisientene  $\frac{\partial EM}{\partial \phi_{AM1}}$  og  $\frac{\partial NM}{\partial \phi_{AM1}}$  framstilte som funksjon av avstand for to elevasjonsvinkler



Figur 5.9 Amplituden til koeffisientene  $\frac{\partial EM}{\partial \phi_{AM2}}$  og  $\frac{\partial NM}{\partial \phi_{AM2}}$  framstilt som funksjon av elevasjon for tre separasjonsvinkler

Også disse koeffisientene har samme amplitude, men varierer med retningen til P2 ( $\phi_{A2}$ ) som  $-\cos \phi_{A2}$  og  $\sin \phi_{A2}$ . I figur 5.9 og 5.10 er koeffisientenes amplitude framstilt som funksjon av elevasjon og avstand.



Figur 5.10 Amplituden til koeffisienten  $\frac{\partial EM}{\partial \phi_{AM2}}$  og  $\frac{\partial NM}{\partial \phi_{AM2}}$  framstilt som funksjon av avstand for to elevasjonsvinkler

Følsomheten i estimat av øst- og nordkoordinaten for feil i registrering av tiden mellom P1 og P2,  $\Delta T$  er:

$$\frac{\partial EM}{\partial T} = \frac{\partial K}{\partial T} (E1 - E2) \quad (5.26)$$

$$\frac{\partial NM}{\partial T} = \frac{\partial K}{\partial T} (N1-N2) \quad (5.27)$$

der derivasjon av (5.5) gir:

$$\frac{\partial K}{\partial T} = \frac{(\frac{1}{2}gT^2+h2-h1)+2(h1-HM+HR)}{T \cdot \sqrt{\quad}} - \frac{(\sqrt{-\frac{1}{2}gT^2+h1-h2})}{gT^3} - \frac{1}{T} \quad (5.28)$$

I figur 5.11 og 5.12 er  $\frac{\partial EM}{\partial T}$  og  $\frac{\partial NM}{\partial T}$  framstilt som funksjon av elevasjon og avstand. For  $\frac{\partial EM}{\partial T}$  gjelder verdiene for skyteretning øst-vest, for  $\frac{\partial NM}{\partial T}$  skyteretning nord-sør. Siden koeffisientene er proporsjonale med henholdsvis E1-E2 og N1-N2 betyr dette at for andre skyteretninger kan tallverdien tilnærmet finnes etter:

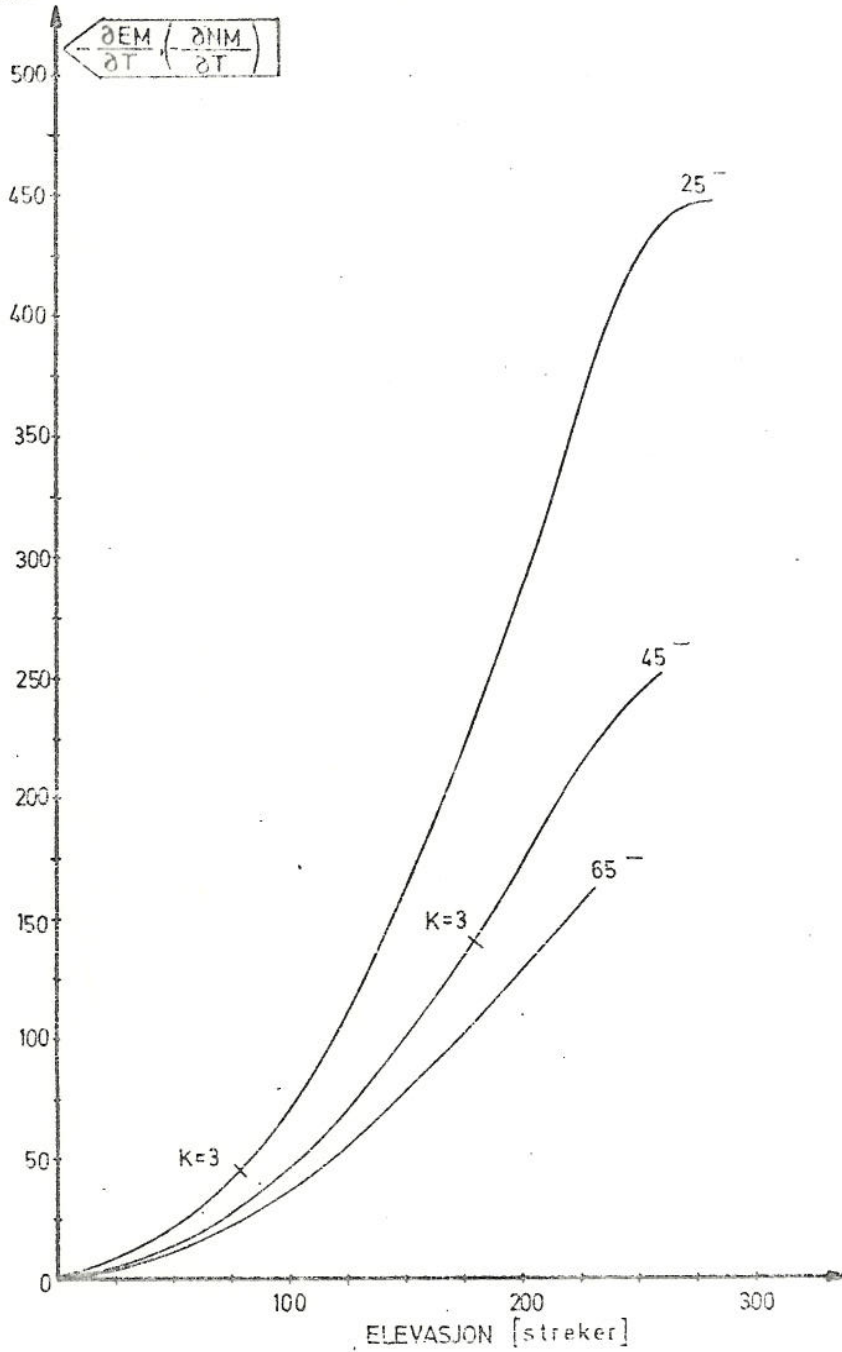
$$\left(\frac{\partial EM}{\partial T}\right)_{\phi} \approx \frac{\partial EM}{\partial T} \cdot \sin \phi \quad (5.29)$$

$$\left(\frac{\partial NM}{\partial T}\right)_{\phi} \approx \frac{\partial NM}{\partial T} \cdot \cos \phi \quad (5.30)$$

der  $\phi$  er våpenets skyteretning og  $\frac{\partial EM}{\partial T}$  og  $\frac{\partial NM}{\partial T}$  er verdiene for skyteretning henholdsvis øst-vest og nord-sør.

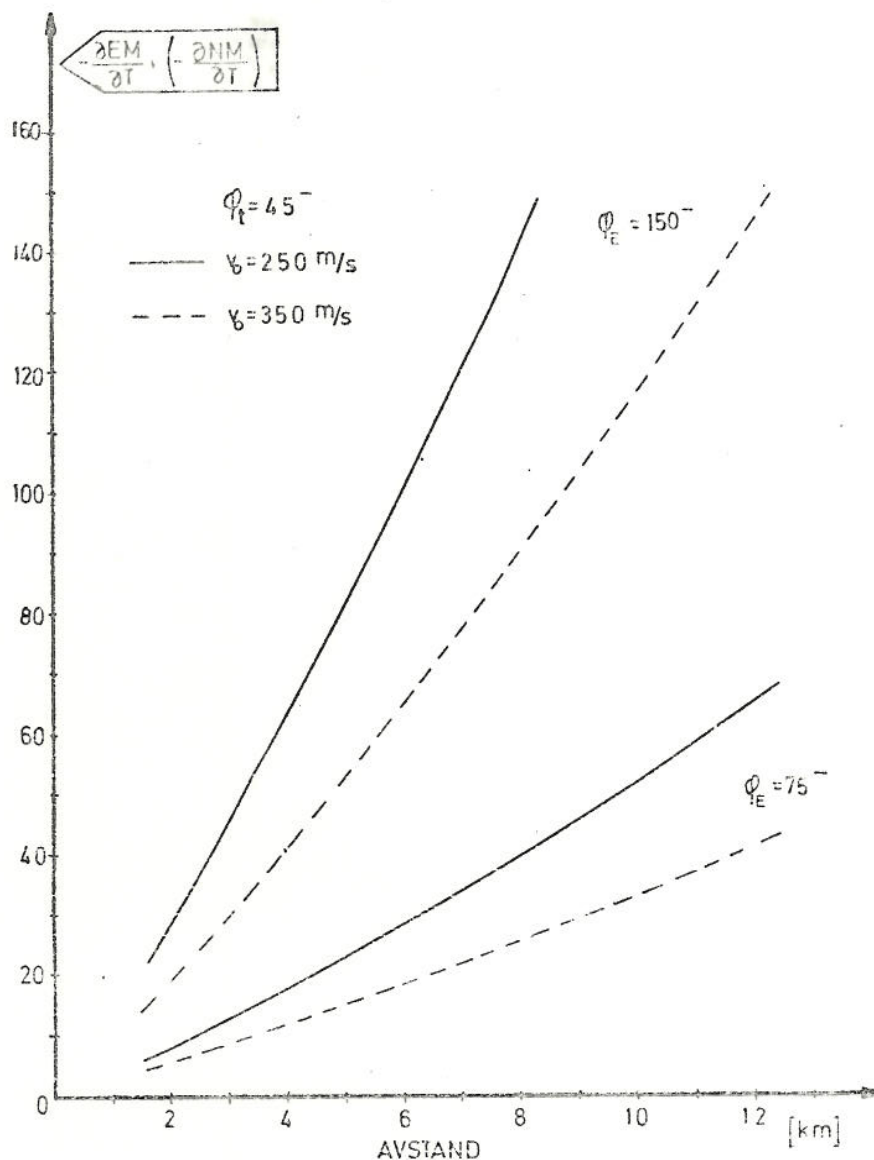
Ut fra dette ser en følgende sammenheng så lenge prosjektilet ikke detekteres nær toppen av banen:

- Følsomheten for feil i avstand varierer lite med avstanden til prosjektilet og med prosjektilets hastighet
- Følsomhet for feil i retning er proporsjonal med avstanden, men varierer lite med prosjektilets hastighet
- Følsomhet for feil i tid tiltar med økende avstand og avtar med økende prosjektil hastighet
- Felles for alle feiltyper: følsomheten tiltar med økende antenne elevasjon.



Figur 5.11 Koeffisientene  $\frac{\partial EM}{\partial T}$  og  $\frac{\partial NM}{\partial T}$  som funksjon av  
elevasjon for tre separasjonsvinkler





Figur 5.12 Koeffisientene  $\frac{\partial EM}{\partial T}$  og  $\frac{\partial NM}{\partial T}$  framstilt som funksjon av avstand ved elevasjonene 75 og 150 streker

Koeffisientene er ved praktiske elevasjonsvinkler av en slik størrelse at feil i avmerking på radarskjermen av størrelsesorden 0.5 mm og feil i tid på ca 0.5 sek kan gi avgjørende feil i estimatet.

Et eksempel vil belyse forholdet:

Antar følgende situasjon:

Avstand fra radar til våpen:	6 km
Retning til ekkoene:	60. <sup>o</sup>
Separasjonsvinkel:	45 streker
Antenne elevasjon:	100 "
Avstandssone på radarskjermen:	4-8 km
Skyteretning:	rett nord
Prosjektilets utgangshastighet:	250 m/s

1 mm feil i registrering i avstand gir  $\Delta SR=40$  m.

1 mm feil i registrering i retning gir  $\Delta \phi_A=7.2$  streker.

Pr mm i retning og avstand og pr sekund i tid gir dette følgende enkeltbidrag til totalfeilen når koeffisientene avleses i figurene 5.3a, 5.6 a, 5.7, 5.9 og 5.11:

Registreringsfeil	Koeffisient		Delfeil i estimatet	
	E	N	$ \Delta E $ (m)	$ \Delta N $ (m)
$\Delta SR1$	2.75	1.6	110	64
$\Delta SR2$	-1.8	-1.2	72	48
$\Delta \phi_{AM1}$	8.75	-15.6	63	112
$\Delta \phi_{AM2}$	-5.75	1.0	41	72
$\Delta T$	0	48	0	48

Tabell 5.1 Delfeil i estimat pr mm og sek

Hver enkelt av feilbidragene er av betydelig størrelse. Resulterende feil er avhengig av operatørfeilenes fortegn. Antar en at feilene i registrering av uavhengige og guassiske fordelt med standardavvik på 1 mm og 1 sek og middelværdi null, blir standardavviket til estimatet av øst og nordkoordinatene:

$$\sigma_E \approx 150 \text{ m}$$

$$\sigma_N \approx 160 \text{ m}$$

## 6 SIMULERING AV TOTALSYSTEM

For å bestemme forventet nøyaktighet til estimatet av et våpens posisjon, er det laget en simuleringsmodell av radarsystemet. Modellen omfatter alle funksjonene i en lokaliseringsprosess inklusiv operatørens operasjoner. Ved hjelp av modellen kan en også studere hvilke feil som introduseres av hver enkelt funksjon i systemet.

Resultatene viser at den største begrensingen i systemet ligger deteksjons- og registreringsprosessen.

### 6.1 CYMBELINE simuleringsmodell

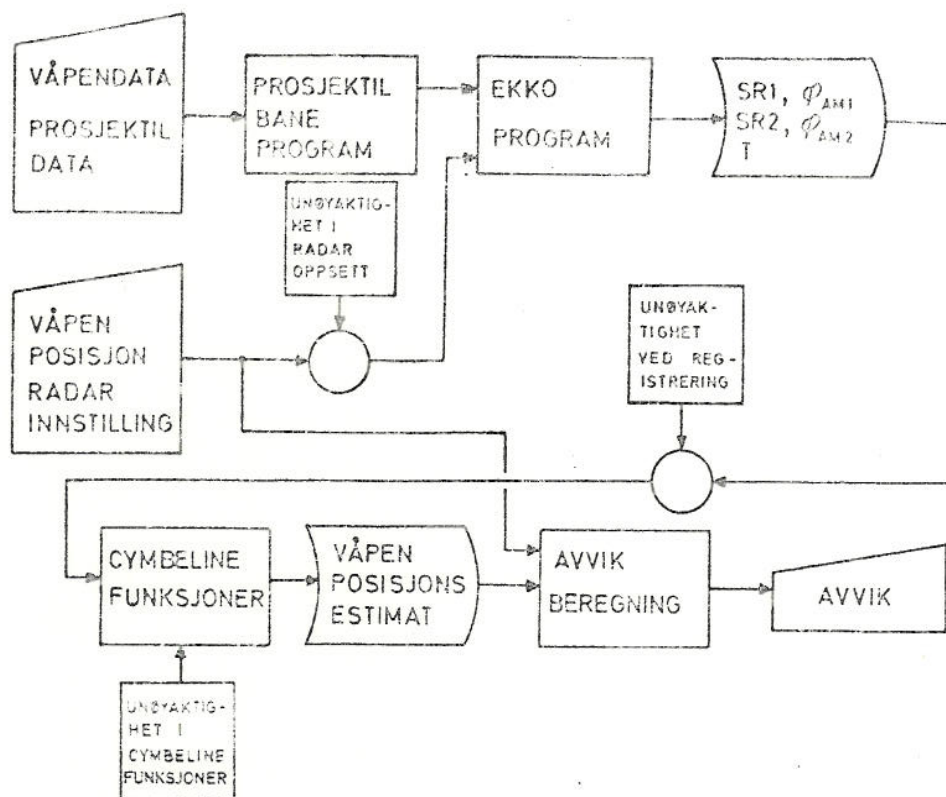
I simuleringsmodellen utføres alle de viktigste funksjonene i en lokaliseringsprosess, og hver funksjon tillegges en typisk usikkerhet. Disse usikkerhetene omfatter:

- Unøyaktighet ved oppsetting av radaren
- Unøyaktighet introdusert av operatøren ved registrering av data
- Unøyaktighet i de forskjellige funksjonene i CYMBELINE

Fig 6.1 viser et blokkskjema over simuleringsmodellen.

Prosjektilbane programmet er det samme som er beskrevet i kap 4.2 og benytter samme type inngangsdata.

Ekko-programmet beregner nøyaktige verdier for koordinatene til P1 og P2 og for tiden T mellom ekkoene. Koordinatene til punktene er gitt ved henholdsvis SR1,  $\phi_{AM1}$  og SR2,  $\phi_{AM2}$  der SR angir skråavstanden og  $\phi_{AM}$  vinkelen i asimut relativt antennens akse. Før denne informasjonen be-



Figur 6.1 CYMBELINE simulerings modell

handles videre, legges det inn usikkerheter i de beregnede verdier for avstand, retning og tid. Disse omfatter feil som introduseres av operatøren og unøyaktighet i scanner og i markeringssystem. Verdiene avrundes i henhold til systemets oppløsning. Ved oppstilling av radaren må nord-retningen finnes og systemet stilles horisontalt. Programmet legger inn unøyaktigheter som simulerer feil i oppstillingen. Også unøyaktighet i fødehorn kontrollen legges inn her. Inngangsdata til ekko-programmet er prosjektillets posisjon relativt våpenet, våpenets posisjon relativt radaren og radarens innstilling gitt ved søkesektorens retning, elevasjon og separasjonsvinkel.

I den etterfølgende programdelen simuleres funksjoner som utføres i det analoge signalbehandlingssystemet i CYMBELINE. Det består av resolverkjede, hukommelse og estimeringsenhet. Resolverkjeden inneholder tilt transformator, elevasjons resolver, asimut markør resolver og retningsresolver. Her blir avstands- og retningsinformasjonen omregnet til øst-, nord- og høydekoordinater. Se Appendiks B. Koordinatene for P2 lagres i hukommelsen og anvendes siden i estimeringsenheten sammen med koordinatene for P1 når våpenets posisjon beregnes. Hver enkelt av disse funksjonene er beheftet med feil som simuleringsprogrammet legger til for hvert trinn i prosessen. Til slutt beregnes avvik mellom estimert posisjon og sann posisjon.

Det er her forutsatt at usikkerhetene i systemet er uavhengige og Gauss-fordelt med middelvei null. Hver enkelt feil er spesifisert med dens standardavvik og trekkes fra en Gauss-fordeling generert i regnemaskinen. (Standardavviket ( $\sigma$ ) angir størrelsen på usikkerheten ved at 68% av alle verdier ligger innenfor et område på  $\pm\sigma$  omkring middelveien).

Programmet gjennomløpes gjentatte ganger (Monte-Carlo kjøring), og middelvei og standardavvik beregnes. Feilene trekkes slik at hver lokalisering ( ): gjennomløp av programmet) representerer et nytt oppsett med en tilfeldig valgt radar.

Standardavviket for de enkelte feilene er bestemt på grunnlag av spesifikasjoner og dokumentasjon for CYMBELINE (6). I tabell 6.1 er feiltyperne som er realisert i simuleringsprogrammet og typisk størrelse på standardavvikene gjengitt. For standardavviket på registrering av avstand, retning og tid er oppgitt rimelige yttergrenser.

Feilkilde	Feiltype	Størrelse ( $\sigma$ )
Oppstilling av radaren	Horisontal innstilling	0.5 <sup>-</sup>
	Nord innretning	1.0 <sup>-</sup>
Registre- ring av Pl, P2 og T (operatør)	Registrering av avstand	0-40m
	Registrering av retning	0-7.2 <sup>-</sup>
	Registrering av tid	0-1s
Føde- horn kontroll	Feil i separasjonsvinkel ved 0 streker	0.25 <sup>-</sup>
	Feil i separasjonsvinkel ved 25 streker	0.5 <sup>-</sup>
	Feil i separasjonsvinkel ved 45 streker	1.0 <sup>-</sup>
	Feil i separasjonsvinkel ved 65 streker	1.25 <sup>-</sup>
Scanner	Ulinearitet i scanner	1.5 <sup>-</sup>
Markør	Feil i avstandsmarkør	3m
Tilt trans	Feil i tilt-transformator	2m
Elevasjons- resolver	Feil i bakke-avstand (GR)	$GR \cdot 2 \cdot 10^{-4} \text{ m}$
	Feil i høyde (H)	$H \cdot 2 \cdot 10^{-4} \text{ m}$
Asimut markør resolver	Feil i X-komponent	$X \cdot 2 \cdot 10^{-4} \text{ m}$
	Feil i Y-komponent	$Y \cdot 2 \cdot 10^{-4} \text{ m}$
Retnings- resolver	Feil i øst-koordinat (E)	$E \cdot 2 \cdot 10^{-4} \text{ m}$
	Feil i nord-koordinat (N)	$N \cdot 2 \cdot 10^{-4} \text{ m}$
Hukommelse	Feil i øst-koordinat for P2 (E2)	$E2 \cdot 10^{-4} \text{ m}$
	Feil i nord-koordinat for P2 (N2)	$N2 \cdot 10^{-4} \text{ m}$
	Feil i høyde for P2 (H2)	$H2 \cdot 10^{-4} \text{ m}$
Ekstrapol- eringssyst.	Ulinearitet i K-potensiometer	$K \cdot 0.03$

Tabell 6.1 Usikkerhet i CYMBELINE

Standardavviket for feilmerking i avstand gis i meter, for feilmerking i retning i streker. For registrering av tiden legges det til en feil både ved start og stopp av registreringen. Standardavviket  $\sigma_t$  til fordelingen hvor feilen trekkes fra regnes i forhold til tiden  $\Delta t$  prosjektilet bruker på å passere radarstrålen, dvs den tiden ekkoet er synlig på skjermen.

$$\sigma_t = k \cdot \Delta t \quad (6.1)$$

der  $k$  er en valgt størrelse.

## 6.2 Simuleringsresultater

Simuleringsmodellen er kjørt for å bestemme størrelsen på feilbidraget fra forskjellige deler av systemet og totalfeilen når det tas hensyn til alle feil og unøyaktigheter.

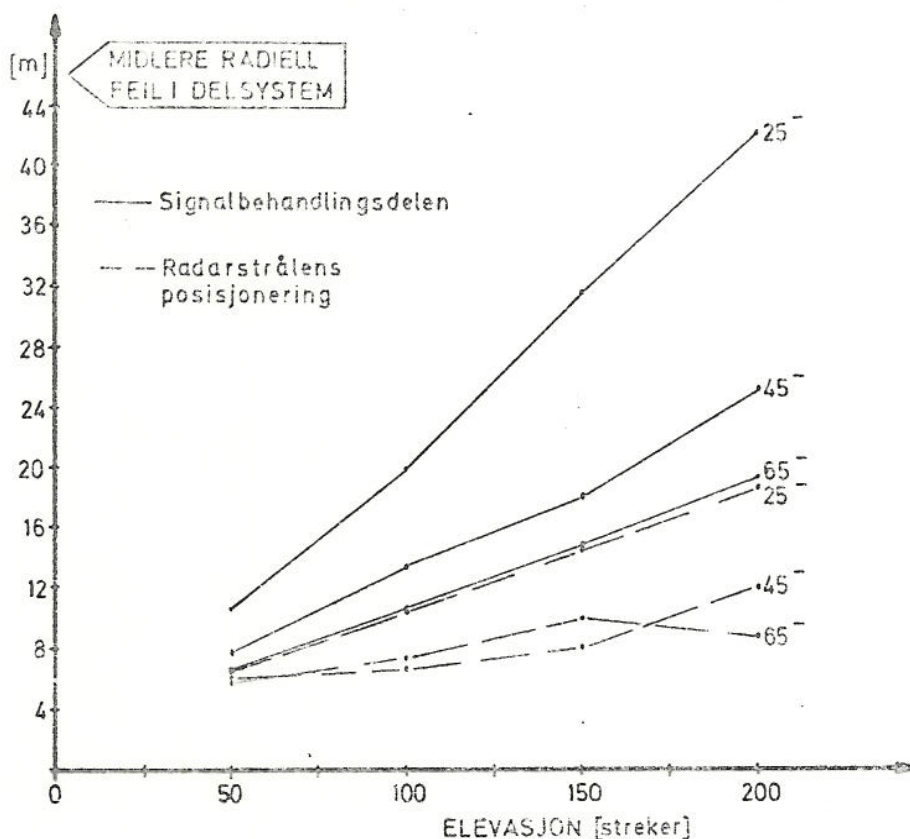
I det følgende er det presentert typiske resultater for 81 mm bombekaster. For figurene gjelder følgende data når ikke noe annet er oppgitt: retningen fra radaren til våpenet er  $60^\circ$ , avstanden 5 km, våpenets skyteretning  $190^\circ$ , våpenets elevasjon  $QE=65^\circ$  og prosjektilets utgangshastighet  $V_0=269$  m/s. Tabell 6.2 viser resultatet av en følsomhetsanalyse for de forskjellige feiltypene i systemet. Tabellene er beregnet for følgende situasjon: antenneaksens elevasjonsvinkel er 100 streker og separasjonsvinkelen er 45 streker. Avstanden mellom radar og våpen er 6 km, retning  $45^\circ$  og skyteretningen er  $135^\circ$ . For hver feiltype er standardavviket på feilen doblet, de øvrige feilene beholder typisk verdi. Tabellen viser resulterende økning i midlere radiell feil, som i dette tilfellet er 16,49m når alle feilkildene opererer med typiske standardavvik.

Figur 6.2 viser bidraget til midlere radiell feil fra to forskjellige deler av systemet.

Feiltype	Økning i midlere radiell feil (m)
Horisontal innstilling	0.64
Nord innretting	1.84
Feil i separasjonsvinkel ved 0 streker	0.58
Feil i separasjonsvinkel ved 45 streker	1.12
Ulinearitet i scanner	4.24
Feil i avstandsmarkør	4.96
Feil i tilt-transformator	3.58
Feil i bakke-avstand	1.84
Feil i høyde	0.45
Feil i X-komponent	0.17
Feil i Y-komponent	1.32
Feil i øst-koordinat	0.81
Feil i nord-koordinat	1.08
Feil i øst-koordinat for P2	0.02
Feil i nord-koordinat for P2	0.48
Feil i høyde for P2	0.57
Ulinearitet i K-potensiometer	3.50

Tabell 6.2 Økning i midlere radiell feil ved dobling av standardavviket på de forskjellige feiltyper

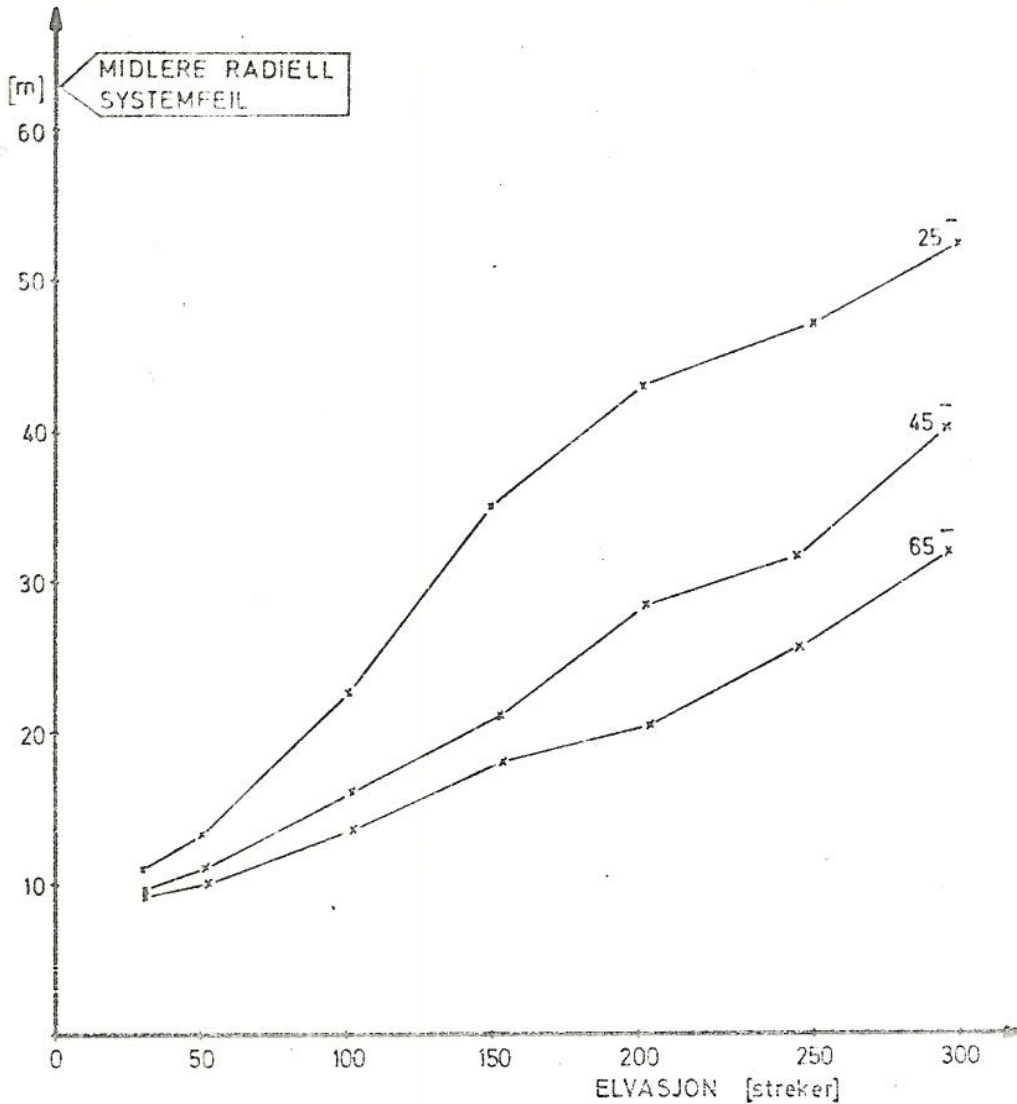




Figur 6.2 Midlere radiell feil p g a unøyaktighet i signalbehandlingsdelen og posisjonering av radarstrålen som funksjon av elevasjon og separasjonsvinkel

Heltrukne kurver er feil på grunn av unøyaktigheter i signalbehandlingsdelen, dvs markørsystem, tilt-transformator, resolvere, hukommelse og ekstrapoleringssystem. Stiplede kurver viser feil knyttet til posisjonering av radarstrålen, dvs unøyaktigheter i fødehornkontroll og scanner. En ser at feilene på grunn av unøyaktigheter i signalbehandlingsdelen er dominerende.

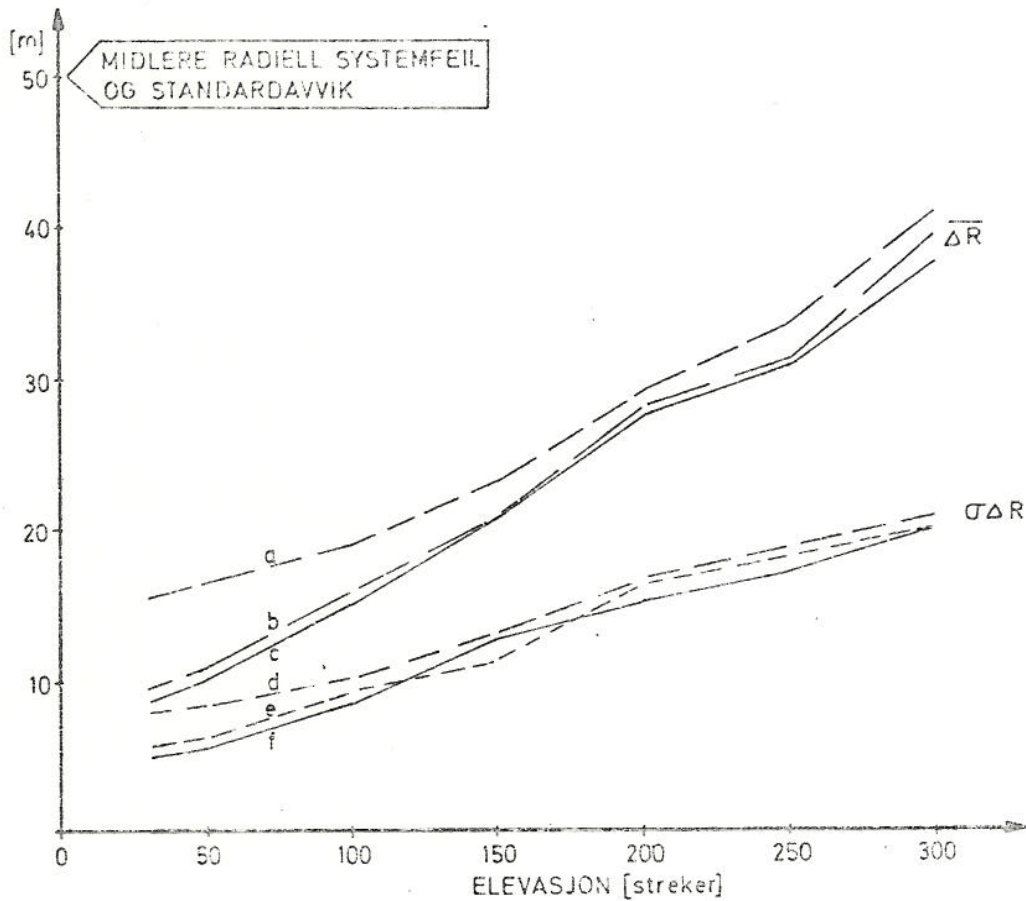
I figur 6.3 er total systemfeil vist. Her er også tatt med unøyaktighet i oppstilling av radaren. Standardavviket på feilen i de forskjellige delene i systemet er som angitt i tabell 6.1, operatørfeil for registrering av P1, P2 og T er satt til null.



Figur 6.3 Midlere radiell feil for hele radarsystemet som funksjon av elevasjon og separasjonsvinkel

En ser at for praktiske situasjoner er midlere radiell feil bedre enn den spesifiserte grense for CYMBELINE på 50 m.

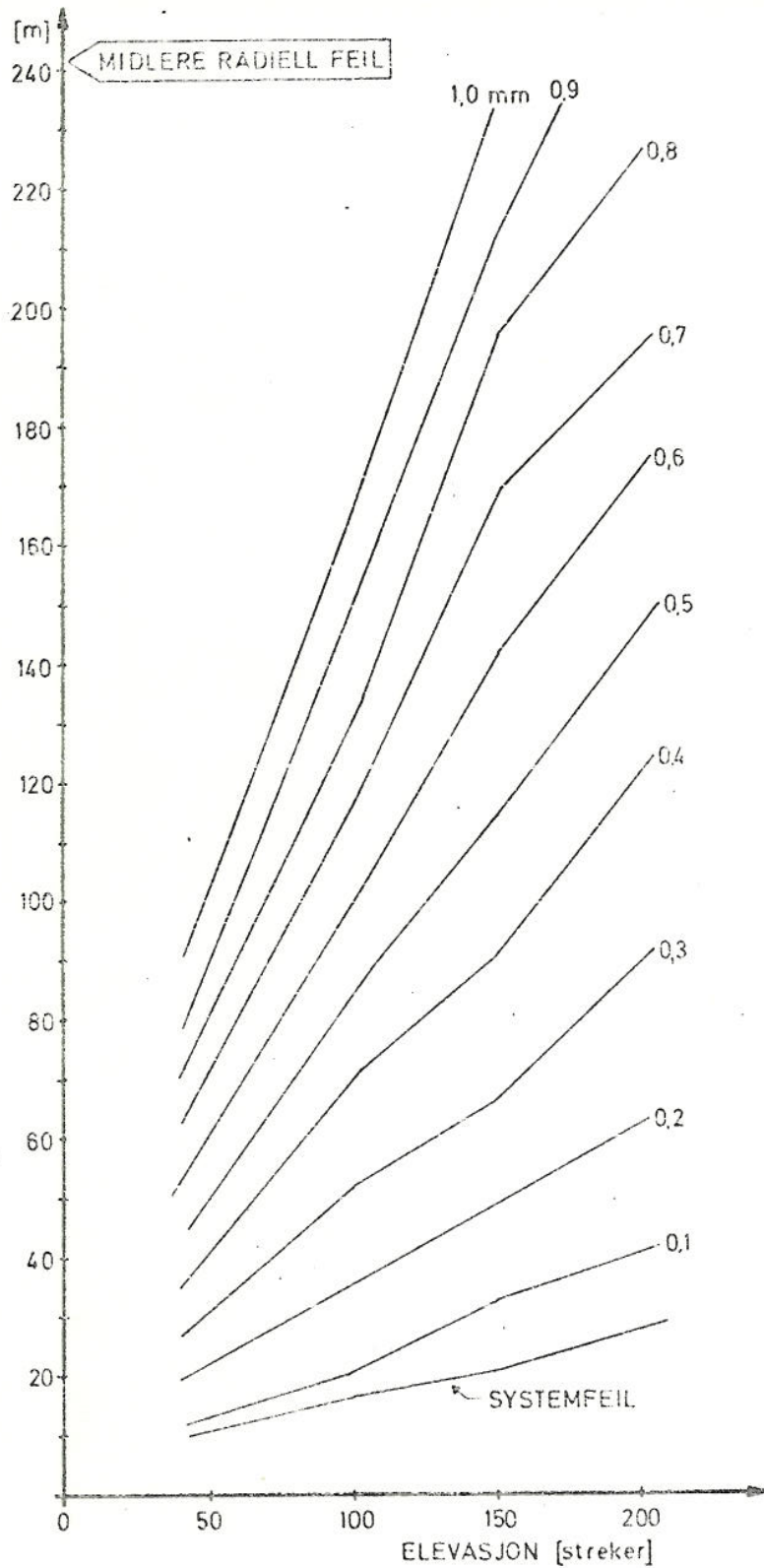
Figur 6.4 viser midlere radiell system feil og standardavvik på feilen for tre forskjellige verdier for usikkerhetene i horisontal innstilling  $\sigma_h$  og nordinnretning  $\sigma_n$  av radaren. For kurve a er  $\sigma_h=2$  streker og  $\sigma_n=3$  streker, for b er  $\sigma_h=0,5$  streker og  $\sigma_n=1$  strek og for c er radaren korrekt innstilt. Kurvene d, e og f viser standardavviket på middel-feilen framstilt i a, b og c. Registreringsfeil for P1, P2 og T er satt til null. Separasjonsvinkelen er 45 streker.



Figur 6.4 Midlere radiell feil ( $\Delta R$ ) og standardavvik på feilen ( $\sigma \Delta R$ ) som funksjon av elevasjon og oppstillingsfeil

Oppstillingsfeil innenfor de verdier som er benyttet i figuren, har i gjennomsnitt liten innflytelse på systemets totale feil.

Figur 6.5 viser midlere radiell feil når også unøyaktighet i avmerking av P1 og P2 samt registrering av tiden mellom ekkoene er tatt med. Standardavviket for avmeringsfeilen i avstand og retning er i figuren gitt i mm avmerkingsfeil på radarskjermen når 4 km avstands-



Figur 6.5 Midlere radiell feil som funksjon av elevasjon.  
Standardavvik for avmerking i avstand/retning  
er variert fra 0,1 til 1,0 mm

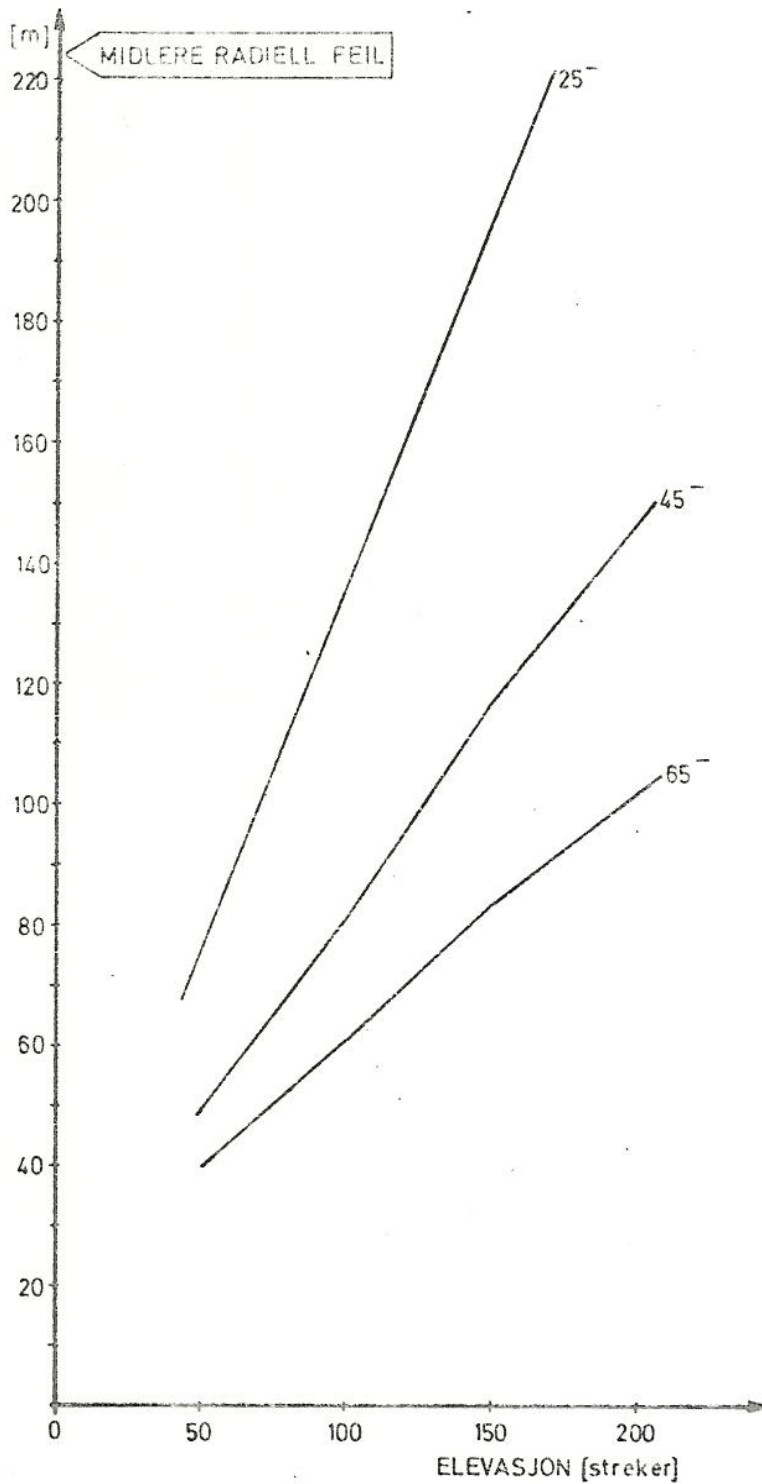
sone benyttes. Separasjonsvinkelen er 45 streker. For beregning av standardavviket i tid er det benyttet tre verdier for  $k$  i ligning (6.1).  $k=0,15$  for avmerkingsfeil 0,1 til 0,3 mm, 0,25 for 0,4 til 0,7 mm og 0,35 for 0,8 til 1,0 mm. Fra figuren ser en at feil i avmerking er avgjørende for estimatets nøyaktighet. For standardavvik i avmerkingsfeilen større enn 0,5 mm i avstand/retning og 0,2 sek i tid er midlere radiell feil større enn 50 m for alle elevasjonsvinkler over 50 streker.

I figur 6.6 er midlere radiell feil vist for tre separasjonsvinkler. Standardavvik for registreringene er 0,5 mm i avstand/retning og  $k=0,25$  for beregning av standardavviket i tid. Avstandssone 4 km. En ser at i middel bedres resultatet vesentlig med økning av separasjonsvinkelen. Det betyr at økning i algoritmefeilen som funksjon av økende separasjonsvinkel (kapittel 4) har mindre betydning enn reduksjon i følsomheten ovenfor operatørfeil (kapittel 5) og andre feil i systemet.

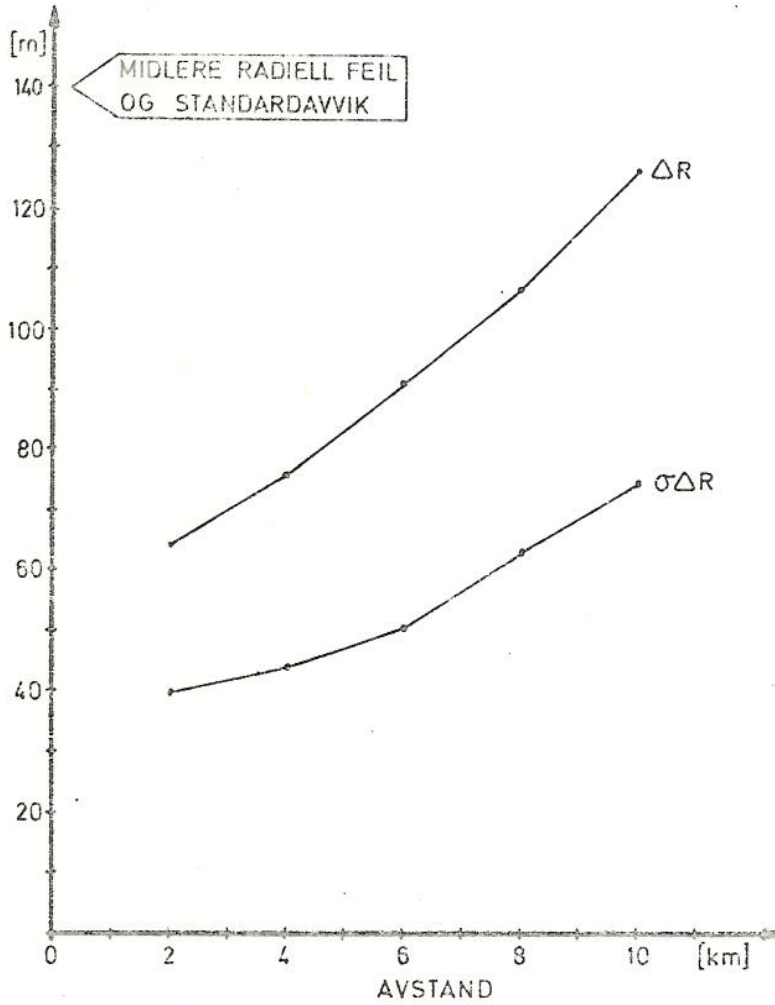
I figur 6.7 er det vist hvordan midlere radiell feil og feilens standardavvik øker med avstanden. Også her er standardavviket for registreringene i avstand og retning 0,5 mm og  $k=0,25$ . Antenneaksens elevasjon er 100 streker, separasjonsvinkelen er 45 streker og en avstandssone på 4 km er benyttet.

Det er også foretatt simuleringer hvor bombekasterens skyteretning, retningen til bombekasteren fra radaren og granatens utgangshastighet er variert. Det viser seg at disse parametrene ikke har vesentlig betydning for nøyaktigheten. Resultatene i det foregående er derfor representative for bombekastere.

For 155 mm haubits som skyter med overlyds hastighet og elevasjonsvinkel på  $22,5^{\circ}$ , viser det seg at feilene er noe større enn for bombekaster, men tendensen i feilene er den samme.



Figur 6.6 Midlere radiell feil som funksjon av elevasjon og separasjonsvinkel



Figur 6.7 Midlere radiell feil og standardavvik på feilen som funksjon av avstand

7 FORSLAG TIL NY SIGNALBEHANDLINGSENHET

De foregående analyser viser at det stilles meget store krav til operatørens nøyaktighet ved avmerking av ekko og registrering av tid. Først ved deteksjon nær toppen av banen er feilen som introduseres av algoritmene av betydelig størrelse. Nøyaktigheten kan derfor bedres vesentlig dersom registreringen av posisjon og tidspunkt for ekkoene utføres av et automatisk system som ekstraherer denne informasjonen direkte fra radar video signalet. Operatørens funksjon blir da å overvåke systemet og ta beslutninger i tilfeller da det ikke kan gjøres automatisk.

Dette kapittel beskriver et forslag til en slik signalbehandlingseenhet eller radarekstraktor. Det er også vist simuleringsresultater der viktige, grunnleggende prinsipp er prøvet.

7.1 Radarekstraktorens funksjon

Radarekstraktoren baseres på digital signalbehandling, og følgende funksjoner tenkes utført:

- Digitalisering av video signalet
- Puls til puls integrasjon av video informasjonen, deteksjon av punktmål
- Scan til scan integrasjon av punktmålene, deteksjon av bevegelige mål
- Estimering av våpenets posisjon
- Presentasjon av informasjon, kommunikasjon med operatøren og overføring av data til ODIN

Disse funksjonene beskrives nærmere i det følgende.



### 7.1.1 Digitalisering av video signalet

I amplitude kan video-signalet kvantiseres i to nivå, binær kvantisering, eller i flere nivå. Sammenlignet med binær kvantisering krever kvantisering i flere nivå mer komplisert elektronikk, men gir liten forbedring i systemets ytelse ((1), kap 9.9). Dette forslaget er derfor basert på binær kvantisering.

Kvantiseringen utføres prinsipielt ved at video-signalet sammenlignes med et terskel-signal i en analog komparator. Når video signalets amplitude overskrider terskelen, gir utgangen et logisk sant signal. I kvantiseringskretsen ønsker en å skille mellom støy og signal pluss støy. Terskelen kan være fast, eller bedre generert ut fra støymengden i det mottatte signalet. Det er også mulig å generere terskelen ut fra clutter-fordelingen i området omkring mottatt signal ("clutter mapping"). For å få informasjonen på en fullstendig digital form, må også avstandsinformasjonen kvantiseres. Dette gjøres i prinsippet ved at en oscillator eller avstandsklokke starter når radaren sender ut en puls. Mottatt ekko synkroniseres til oscillatoren. Oscilatorens frekvens bestemmer oppløsningen i avstand, og oppløsningen må være bedre enn radarens pulslengde.

### 7.1.2 Deteksjon av punktmål

Neste trinn i signalbehandlingen er å detektere mål og beregne avstand og retning til målene etter hvert som radarstrålen scanner forbi. Deteksjonsporsessens oppgave er å bestemme om en samling av ekko er støy eller signal pluss støy. Binær integrasjon er en vanlig metode for dette formålet, se (1) kap 9.9. Metoden går ut på at en teller mottatte ekko på samme avstand for de n siste radarpulsene. Dersom en har

mottatt minst  $m$  ekko av  $n$  mulige, er kriteriet oppfylt for at ekkoene kommer fra et mål. Tallet  $n$  er det maksimale antall ekko som kan mottas fra et punktmål når radarstrålen scanner forbi. For radaren i CYMBELINE er  $n$  ca 11.

For hvert ekko som tilhører et mål, registreres avstanden. Dette gjøres ved at avstandsklokken driver en tellekrets som starter opp-telling når radarpulsen sendes ut og stopper når ekkoet blir mottatt. Telleren inneholder da avstanden til ekkoet. Resulterende avstand beregnes som middelveiden av avstandene til de enkelte ekkoene fra målet.

Retningen til et mål bestemmes som midtpunktet mellom retningen når målkriteriet er oppfylt første gang og retningen når målkriteriet ikke lenger er oppfylt.

Et prosjektil har typisk karakteristikk av et punktmål. En del ekko fra bakken vil være forskjellig fra et punktmål på grunn av større utstrekning. Disse ekkoene vil det være mulig å skille ut på dette stadium i signalbehandlingen.

### 7.1.3 Deteksjon av bevegelige mål

For å skille mellom stasjonære mål og mål som opptrer innenfor radarens dekningsområde i et kort tidsintervall, må de detekterte punktmålene sammenlignes over flere scan. Deteksjon av et nytt mål innenfor radarens dekningsområde kan også gjøres ved hjelp av binær integrasjon. En teller hvor mange scan det er detektert punktmål av et antall mulige omkring samme avstand. Antall scan som gir ekko når et prosjektil passerer radarens dekningsområde, varierer med avstanden. Målkriteriet må derfor være en funksjon av avstanden.

Tidsintervallet målet er innenfor radarstrålen kan brukes for å skille mellom bevegelige og faste mål.

Avstand og retning til det detekterte punkt på banen, f eks P1, beregnes som middelveiden av registreringene i hvert scan. Tidspunktet for passeringen beregnes som middelveiden av tidspunktet når målkriteriet er oppfylt, dvs når prosjektilet går inn i radarstrålen, og tidspunktet når kriteriet ikke er oppfylt lenger, dvs når prosjektilet passerer ut av strålen igjen.

Det vil også være mulig å gi et estimat for målets hastighet ut fra informasjonen i flere på hverandre følgende scan. Dette kan utnyttes til å anslå området for P2 ut fra observasjonene som er foretatt ved bestemmelsen av P1. En kan da søke etter P2 innenfor et avgrenset område, noe som reduserer sannsynligheten for falske løsninger i de tilfeller det er flere prosjektiler i luften samtidig.

#### 7.1.4 Operatørens rolle

Samspillet mellom operatør og ekstraktor i deteksjonsfasen kan foregå på forskjellige måter.

Ved lav falsk alarm sansynlighet, dvs lokalisering på korte avstander og i gunstige værforhold, kan systemet arbeide helautomatisk. Det innebærer at når P1 på en prosjekttilbane er registrert, heves radarstrålen automatisk for deteksjon av P2.

I tilfelle når falsk alarm sansynligheten er større, f eks i nedbør, bør operatøren kontrollere systemet. Når et nytt mål oppdages, kan ekstraktoren markere dette ved å tegne en ramme omkring målet på radarskjermen. Dersom dette målet skal følges, trykker operatøren på en knapp. Ekstraktoren fortsetter da som i den hel-

automatiske modus.

Når falsk alarm sansynligheten er meget stor eller det opptrer mange mål samtidig, bør operatøren også velge hvilke av flere mulige mål som skal følges. Målene anvises av ekstraktoren, og operatøren peker ut det valgte målet ved hjelp av f eks en lyspenn. Når prosjektilet har passert, heves radarstrålen for å søke etter P2 som i helautomatisk modus.

En bør merke seg at i dette systemet kan operatøren utføre kontrollerende funksjoner og velge ut mål, men selve registreringen gjøres automatisk. Nøyaktigheten blir da begrenset av signal/støy forhold, radarens parametere og beregningsmetodene som anvendes.

#### 7.1.5 Estimering av våpenets posisjon

Når posisjonen til to punkter på prosjektilets bane, P1 og P2, og tiden mellom dem er registrert, kan utskytningspunktet estimeres etter de samme algoritmer som i den eksisterende enhet. Men i et system som inneholder en digital regnemaskin, er det mulig å legge inn algoritmer som beregner prosjektilets bane med større nøyaktighet ved at det tas hensyn til at luftmotstanden varierer med prosjektilets hastighet og banens høyde. Dersom prosjektilet kan klassifiseres slik at en nøyaktig luftmotstands koeffesient for prosjektilet kan legges inn, er det mulig å forbedre nøyaktigheten ytterligere.

Det vil også være mulig å gi ut grovt estimat av våpenets posisjon ved å detektere prosjektilet på den nedadgående del av banen, dvs nær nedslaget. Dette kan så brukes til å bestemme et avgrenset søkeområde på den oppadgående del av banen for å få et nøyaktigere estimat.

## 7.2 Radarekstraktorens oppbygning

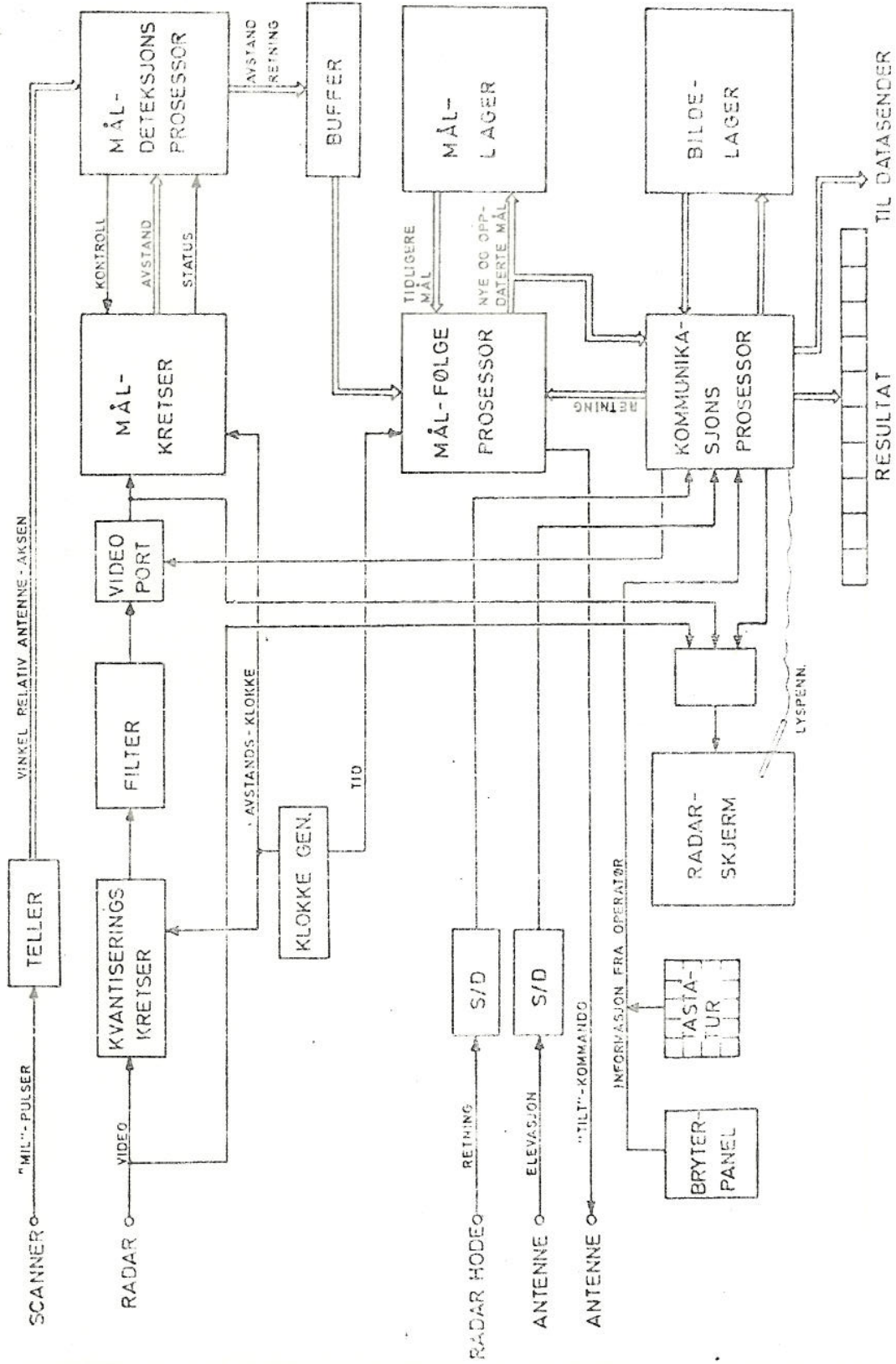
Figur 7.1 viser et blokkskjema over et forslag til en digital signalbehandlingsenhet. Etter funksjon kan den deles i tre grupper:

- Digitalisere videosignalet og detektere mål innenfor hvert scan.
- Sammenligne mål fra scan til scan, detektere prosjektil, beregne prosjektillets posisjon i banen og estimere hastigheten.
- Kommunisere med omgivelsene, beregne våpenets posisjon.

Videosignalet føres til en kvantiseringskrets hvor det digitaliseres i amplitude og synkroniseres til avstandsklokken. Utgangssignalet går inn på et filter hvor støy-pulser fjernes. Dette gjøres ved at signalet sammenlignes over flere pulser. Bare hvis et enkelt ekko finnes i et avstandsområde, defineres dette som en støypuls og utelukkes. Forekommer flere ekko, føres disse videre for nærmere analyse. Hensikten med filteret er å hindre at støypulser skal belaste den etterfølgende deteksjonslogikken.

Fra filteret går signalet videre til en video-port. Denne kan styres for å ta bort uinteressante deler av radarbildet, som f eks områder med mye bakke-ekko og nedbørsområder. Dette reduserer belastningen på ekstraktoren og gir et renere radarbilde dersom en velger å vise signalet på portens utgang på radarskjermen i stedet for rå-video signalet.

Fra video-porten føres signalet til et sett målkretser. Målkretsene arbeider etter prinsippet for binær deteksjon og har til oppgave å detektere alle mål innenfor



Figur 7.1 Blokkkjema over foreslått radarekstraktor

et scan og registrere avstanden til alle ekko. En målkrets er "låst" på et mål så lenge det kommer ekko fra målet når radarstrålen scanner forbi. For at ekstraktoren skal kunne arbeide med flere mål som ligger på samme retning, kreves det flere like målkretser.

Måldeteksjons-prosessoren er en mikro-prosessor som kontrollerer mål-kretsens status etter hver radarpuls. Den akkumulerer registrert avstand til alle ekko fra hvert mål og antall ekko som er mottatt. Når antennestrålen har passert et mål, beregner den resulterende avstand til målet som middelveidien av de registrerte avstandene. Prosessoren registrerer også radarstrålens vinkel når kriteriet for et mål er oppfylt første gang og når det igjen ikke er oppfylt. Retningen til målet beregnes som middelveidien av disse verdiene. Data for alle punktmål i et scan blir sendt videre til målfølge-prosessoren via et buffer-lager.

Målfølge-prosessoren er også en mikroprosessor. Den lagrer data fra tidligere scan i en hukommelse og sammenligner denne informasjonen med data fra inneværende scan. Ved å integrere måldata fra samme område over flere scan, skiller den mellom bevegelige og stasjonære mål. For mål som defineres som prosjektil, beregnes midlere avstand og retning til det detekterte punktet på banen og tidspunktet for deteksjonen. For P1 beregnes også hastigheten, og avhengig av operatøren og hvilken modus systemet arbeider i, gis det kommando til fødehornkontrollen om å heve radarstrålen for deteksjon av P2. Data for P1 og P2 samt tiden mellom deteksjonene overføres så til en tredje mikroprosessor, kommunikasjonsprosessoren.

Kommunikasjons-prosessoren utfører alle operasjoner i forbindelse med innsamling av stasjonære data, kommunikasjon med operatøren og presentasjon av resultater.

Også algoritmene for beregning av våpenets posisjon er tenkt lagt til denne prosessoren.

Radarens posisjon og antatt våpenhøyde settes inn via et tastatur, avstandsområdet avleses fra en vender. Radarstrålens orientering i retning og elevasjon avleses via synkro til digital omformere fra retnings- og elevasjons-synkro sendere.

Kommunikasjon via radarskjermen for å peke ut aktuelle mål og å definere uinteressante områder kan foregå ved hjelp av en lyspenn. Dette forutsetter at det er mulig å vise syntetisk informasjon på radarskjermen. Denne informasjonen lagres i en egen billed-hukommelse som leses ut synkront med radarens scan. Når et punkt skal vises, summeres en puls til videosignalet når det presenteres på skjermen. Informasjonen i billed-hukommelsen om hvilke områder som skal fjernes fra radarbildet, brukes til å styre video-porten.

Resultatet av posisjonsberegningene for et våpen presenteres på en numerisk indikator. Denne informasjonen kan også overføres til en data-sender enhet.

### 7.3 Simulering av radarekstraktoren

Det er gjort simuleringer for å undersøke hvilken nøyaktighet en kan oppnå med en radarekstraktor. For dette formål er simuleringsmodellen beskrevet i kap 6.1 utstyrt med et nytt ekko-program. I det nye programmet er det lagt inn funksjoner som tilsvarende deteksjonsprosessen i en radarekstraktor. En tar da hensyn til at det fra et prosjektil mottas flere ekko pr scan og at prosjektilet er "synlig" i flere scan. På grunn av forholdet som er beskrevet i kap 3, varierer nøyaktigheten i avstand fra scan til scan og fra puls til puls innen hvert scan. Dette tas det hensyn til ved



at det for hvert scan legges til unøyaktigheter i avstand som trekkes fra en Gauss-fordeling med standardavvik henholdsvis  $\sigma_{sc}$  og  $\sigma_p$ .

For hvert scan utfører ekko-programmet følgende:

- Beregner nøyaktig avstand til prosjektilet.
- Legger til avvik p g a scan til scan variasjon.
- Beregner retningen til prosjektilet og simulerer unøyaktighet i registreringen ved å legge til et avvik trukket fra en Gauss-fordeling med standardavvik  $\sigma_\phi$ .
- Beregner middelveiden av avstander som er registrert for hver puls (se nedenfor).

For hver puls som gir ekko innenfor et scan, utfører programmet:

- Legger til avvik i avstandsregistreringen p g a puls til puls variasjon.
- Kvantiserer avstanden til ekkoet.
- Akkumulerer kvantisert avstand for senere å beregne middelveiden.

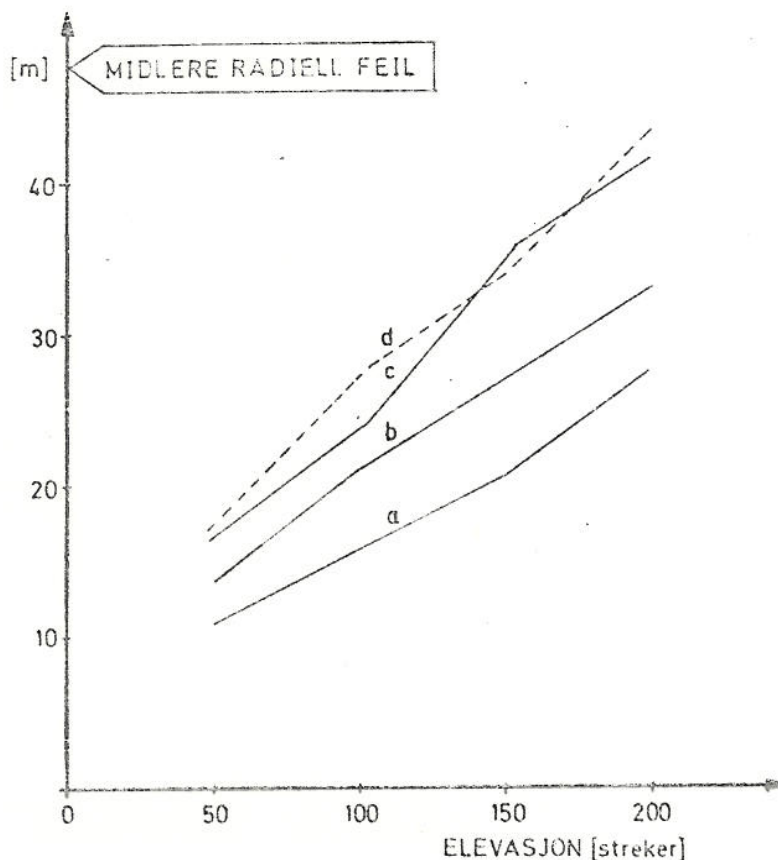
For hvert scan er det således beregnet avstand og retning til prosjektilet, og dette gjøres så lenge prosjektilet er innenfor radarstrålen. Når prosjektilet passerer senter av radarstrålen i elevasjon, registeres tidspunktet, og for å simulere usikkerhet i tidsberegningssystemet legges det til et avvik som trekkes fra en Gauss-fordeling med standardavvik  $\sigma_t$ .

Etter at prosjektilet har passert radarstrålen, beregnes resulterende avstand og retning for denne registreringen som middelveiden av beregningene utført i hvert scan.

Når registreringer er gjort for P1 og P2, beregnes tiden T som differansen mellom de registrerte tidspunktene.

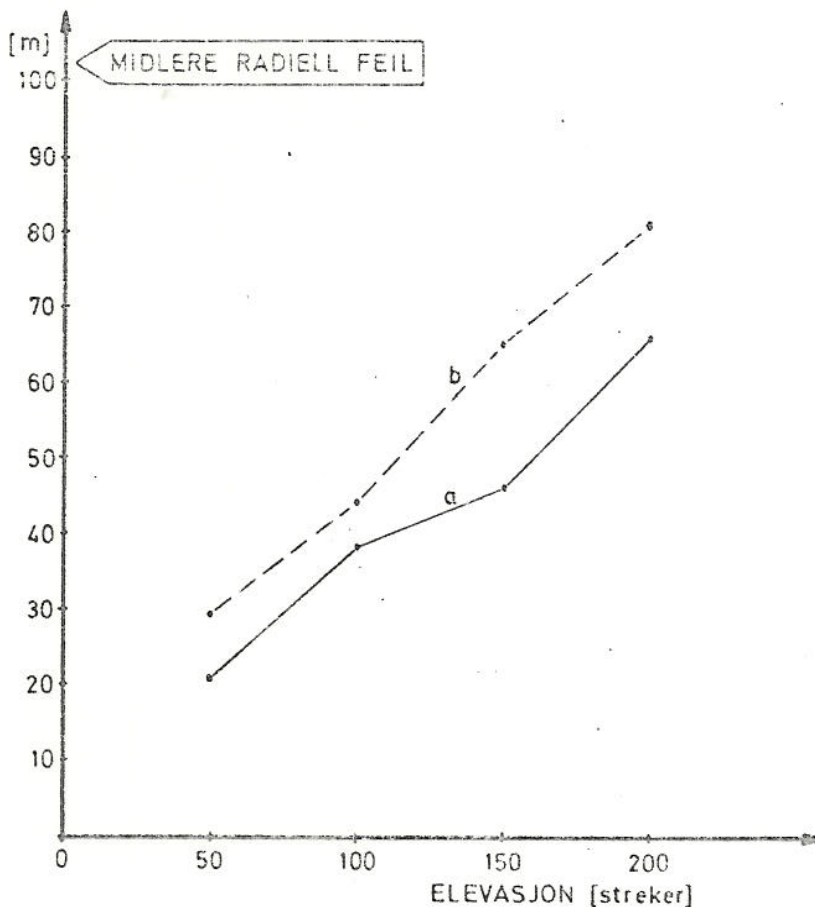
Disse data benyttes så i den videre signalbehandlingen i simuleringsmodellen. Denne delen av modellen er uforandret, og simuleringene gir derfor uttrykk for hvilke forbedringer som kan oppnås ved innføring av et automatisk registreringssystem.

I det følgende gjengis det noen resultater fra simuleringene. I figur 7.2 vises midlere radiell feil for en 81 mm bombekaster på 5 km avstand. Retningen til bombekasteren er  $60^{\circ}$ , skyteretningen  $190^{\circ}$ , prosjektilets utgangshastighet 269 m/s og våpenets elevasjon  $65^{\circ}$ . Kvantiseringsintervallet i avstand er 30 m og radarstrålens separasjonsvinkel mellom registreringene er 45 streker.



Figur 7.2 Midlere radiell feil ved lokalisering av 81 mm bk som funksjon av elevasjon ved forskjellige nøyaktigheter i avstand, retning og tid

Kurven merket a viser systemfeil, dvs feil i lokaliseringen når registreringen av P1, P2 og T er uten feil. For kurve b er  $\sigma_{sc} = \sigma_p = 10\text{m}$ ,  $\sigma_\phi = 0.2^\circ$  og  $\sigma_t = 0.1$  sek. I følge kap 3 tilsvarer dette signal/støy forhold på ca 5 db, hvilket betyr relativt dårlige radarforhold. For kurve c er  $\sigma_{sc} = 20$  m,  $\sigma_p = 15$  m,  $\sigma_\phi = 0.2^\circ$  og  $\sigma_t = 0.1$  sek, og for kurve d er  $\sigma_{sc} = \sigma_p = 10$  m,  $\sigma_\phi = 0.3^\circ$  og  $\sigma_t = 0.2$  sek. Dette viser at selv under dårlige radarforhold er forventet nøyaktighet god sammenlignet med manuell registrering. Først ved markeringsnøyaktighet på 0.1 mm i 4 km sone er feilene av samme størrelsesorden som for den simulerte radarekstraktoren. (se fig 6.5)



Figur 7.3 Midlere radiell feil ved lokalisering av en 155 mm haubits

Figur 7.3 viser simuleringresultat for en 155 mm

haubits på 5 km avstand. Retningen til våpenet er  $60^{\circ}$ , skyteretningen  $190^{\circ}$ , prosjektillets utgangshastighet 561 m/s og våpenets elevasjon  $22.5^{\circ}$ . Kvantiseringsintervallet i avstand er 30 m og radarstrålens separasjonsvinkel mellom registreringene er 45 streker.

Kurve a viser systemfeil, kurve b viser feil når  $H\sigma_{sc} = 15$  m,  $\sigma_p = 10$  m,  $\sigma_{\phi} = 0.2^{\circ}$  og  $\sigma_t = 0.1$  sek.

En ser her, som for 81 mm, at systemfeilen utgjør en vesentlig del av den totale feilen, men på grunn av at prosjektilet har en flatere bane blir feilen større enn for bombekasteren.

Ut fra simuleringene kan en slutte at med et automatisk registreringssystem vil en oppnå betydelig bedre resultat enn ved manuell registrering.

#### 7.4 Implementering av en radarekstraktor i CYMBELINE

En radarekstraktor vil erstatte de eksisterende signalbehandlings-funksjonene og en del av kontroll-funksjonene i CYMBELINE. Ved at enhetene som utfører disse funksjonene, fjernes eller modifiseres forutsettes det at dette vil gi plass til en radarekstraktor. De største forandringene må gjøres i kontrollenheten (enhet 8), koordinatindikator (enhet 9) og i den elektroniske hovedenheten (enhet 10). Radarscanneren (enhet 3), elevasjonsresolveren (enhet 4) og retningsresolveren (enhet 11) gir retningsinformasjon til radarekstraktoren, og her kan en del komponenter fjernes som blir overflødige i et nytt system. I det følgende gis det en oversikt over forandringen i de enkelte enhetene.

Kontrollenheten (enhet 8) vil hovedsakelig få de samme funksjoner som i nåværende system, men avstands- og retningsmarkørene fjernes. Dette fører til en forandring i enhet 8b, "Generator-sweep". I stedet bygges det inn kretser for interaktiv kommunikasjon via radar-skjermen og presentasjon av syntetiske data.

Koordinatindikatoren (enhet 9) må bygges helt om. De elektro-mekaniske komponentene erstattes med numeriske halvleder-indikatorer for visning av estimert våpen posisjon og antatt våpen høyde. Tastatur og brytere for innmating av data til radarekstraktoren samt kontrollorganer og tilkoplingsplugg for en data sender (7) legges også til denne enheten.

I elektronisk hovedenhet (enhet 10) plasseres radarekstraktorens sentrale deler. Følgende underenheter fjernes:

- Regnemaskin (enhet 10d)
- Datahukommelse (enhet 10g)
- "Range-Timer" (enhet 10c) unntatt 10c2
- Regnemaskin kontroll (enhet 10.2)
- Modus kontroll (enhet 10.4)

Følgende underenheter modifiseres ved at overflødige funksjoner fjernes:

- Fødehorn kontroll (enhet 10.2)
- Kontroll logikk (enhet 10.5).

Dette vil gi plass for radarekstraktoren og spenningsforsyningen.

I radarscanneren (enhet 3) fjernes følgende deler knyttet til asimut markør systemet:

- Asimut markør posisjonskontroll (enhet 3a1)
- Asimut servo kontroll (enhet 3a2)
- Forsterker, asimut markør generator (enhet 3a6)
- Bevegelig lesehode system (enhet 3a8)
- Resolver, motor og gear.

Informasjon om radarstrålens relative retning gis da i form av et pulstog fra de faste lesehodene. Det genereres en puls for hver strek radarstrålen dreies, "mil"-pulser, og en "gate"-puls ved starten av hvert scan.

I elevasjonsresolveren (enhet 4) fjernes resolveren og resolverforsterkeren (enhet 4a). Gear og synkro-senderen beholdes, og elevasjons-vinkelen hentes fra synkro-senderen.

I retningsresolveren (enhet 11) fjernes resolveren, resolverforsterkeren (enhet 11a) og gearet. Synkro-senderen plasseres i resolverens posisjon og gir ut retningsinformasjon.

På grunn av begrenset tilgang på effekt og begrenset kjølekapasitet må radarekstraktoren i størst mulig grad bygges opp av komponenter med lavt effektforbruk.

Erfaringer med CYMBELINE viser at nøyaktigheten ved lokalisering av krumbane våpen gjennomsnittlig er for dårlig. For å bestemme systemets ytelse, er det foretatt en analyse, og denne rapporten inneholder resultatene av analysen. Det er tatt hensyn til alle de viktigste feilkildene i systemet, så som unøyaktigheter i elektriske og mekaniske komponenter, tilnærmelser i algoritmer og feil introdusert av operatøren. Til slutt presenteres et forslag til en automatisk signalbehandlingsenhet som vil eliminere unøyaktighetene som introduseres av operatøren og dermed forbedre nøyaktigheten i estimatet.

En studie av selve radaren i kapittel 3 viser at nøyaktigheten i radarinformasjonen selv ved dårlige signal/støy forhold (5 db) er bedre enn den nøyaktighet en kan forvente at en operatør kan registrere ekkoene med. Med hensyn til radarens ytelse i nedbør, viser det seg at maksimal deteksjonsavstand blir betydelig redusert - selv ved små nedbørsmengder i målområdet. Bruk av polarisatoren bedrer forholdet, men graden av forbedring er avhengig av hvor mye ekkoet fra målet dempes i polarisatoren. Innføring av doppler-radar vil bedre deteksjonsavstanden i nedbør, men det vil ha liten innflytelse på systemets nøyaktighet.

I CYMBELINE bestemmes et prosjektils utskytningspunkt ved registrering av koordinatene til to punkter på banen og tidsintervallet mellom punktene. Ut fra disse opplysningene beregnes koordinatene for utskytningspunktet. Algoritmene for denne beregningen bygger på

ballistiske ligninger for et legeme i vakuum. Kompensering for luftmotstanden gjøres ved å forandre verdien for  $g$ . I kapittel 4 er det undersøkt hvilke feil denne tilnærmingen medfører. Resultatene viser at for en 81 mm bombekaster tiltar feilen jo høyere opp på banen prosjektilet detekteres. Ved deteksjon midt på banen er feilen ca 10 m,  $2/3$  opp på banen er feilen ca 18 m og nær toppunktet ca 30 m når våpenets elevasjon er omkring  $60^{\circ}$ . For artilleri som skyter prosjektiler med underlyds hastighet, er tendensen den samme som for bombekastere, men feilen er vesentlig større. Ved overlyds hastigheter varierer tallverdien av feilen lite på den nederste halvdel av banen, størrelsen er her ca 20 m. Ved deteksjon på den øverste banehalvdelen tiltar feilen hurtig med høyden og blir større enn 100 m nær toppen. For spinn-stabiliserte prosjektiler introduseres det en feil fordi algoritmene ikke tar hensyn til avbøyning på grunn av spinnkreftene. Men denne feilen er så liten at den ikke er utslagsgivende for systemets totale nøyaktighet. Det samme gjelder for avbøyning på grunn av vind opp til og med kuling styrke.

En har også forsøkt å forandre på kompensasjonen for luftmotstandskraften i algoritmene. Det viser seg at verdier som gir godt resultat for prosjektiler med underlyds hastighet gir mindre gode resultat ved overlyds hastigheter.

Den nåværende verdi for  $g$  synes derfor optimal når CYMBELINE skal benyttes både mot bombekastere og artilleri.



I kapittel 5 er det gjort en undersøkelse som viser sammenhengen mellom feil i operatørens registreringer av avstand, retning og tid og resulterende feil i estimatet. Det viser seg at nøyaktigheten av disse registreringene er av avgjørende betydning for resultatet. Følsomheten øker med økende elevasjon av antennen og avtar med økende separasjonsvinkel. For avmerkingsfeil i retning og feil i tidsregistreringen øker også følsomheten med avstanden til prosjektilet.

For å få en oversikt over alle feilkildene i systemet, er det laget en simuleringsmodell som tar hensyn til unøyaktigheter i de forskjellige elektriske og mekaniske deler, og til unøyaktigheter i operatørens arbeid. (Kapittel 6).

Resultatet viser at unøyaktigheter ved registrering av ekkoene og feil i algoritmene nær toppen av banen er de dominerende feilkildene. F eks viser figur 6.5 at feil i beregning av posisjonen for en bombekaster til- tar drastisk med økende avmerkingsfeil. Ved 100 strekers antenne-elevasjon vil en avmerkingsfeil med standardavvik 0.3 mm resultere i at grensen for nøyaktighet, som er 50 m midlere radiell feil, overskrides.

En signalbehandlingsenhet som ekstraherer avstands- og retningsinformasjon fra radar video signalet vil kunne erstatte operatørens registreringsfunksjon. Et slikt system er beskrevet i kapittel 7. Simulering av registreringsfunksjonene i systemet viser at for bombekastere blir estimeringsfeilen redusert til størrelsen som ligger innenfor kravet til CYMBELINE.

En oppnår også den samme relative forbedring for artilleri. I et slikt system vil det også være mulig å legge inn bedre algoritmer som tilpasser luftmotstandskoeffisienten etter prosjektillets hastighet og banehøyde. Det kan også være mulig å legge inn algoritmer som beregner banen for raketter hvis det på forhånd gis informasjon til ekstraktoren om at det er raketter som detekteres.

En radarekstraktor vil også redusere belastningen på operatøren ved at han ikke behøver å overvåke radarskjermen på samme intense måte som tidligere. Systemets gjennomsnittlige deteksjonsevne blir bedre fordi en unngår virkningene av at en operatør trettes ut eller fester oppmerksomheten til en del av radarskjermen. Nøyaktigheten blir også uavhengig av operatørens dyktighet og det antas at systemet blir enklere å operere, noe som spesielt er en fordel for nytt personell og personell på repetisjonsøvelse.

9

KONKLUSJON

Den foreliggende analyse viser at feil som introduseres av de elektriske og mekaniske komponentene samt algoritmene i CYMBELINE normalt ikke overskrider kravet til nøyaktighet (50 m midlere radiell feil). Men estimatet av et prosjektils utskytningspunkt er meget følsomt ovenfor feil i registrering av avstand, retning og tid. Det er sannsynligvis bare godt trente operatører som i gjennomsnitt vil oppnå tilfredsstillende resultat med det nåværende system.

Informasjoner som foreligger i radar video signalet har en så god oppløsning og nøyaktighet at en bedre signalbehandling av denne informasjonen vil forbedre nøyaktigheten vesentlig. Det er mulig å utvikle et elektronisk signalbehandlingssystem som ekstraherer data direkte fra radarsignalet og beregner våpenets posisjon. I et slikt system er det også mulig å implementere bedre algoritmer for beregning av våpenets posisjon enn hva tilfellet er i nåværende system. Operatørens oppgave blir å kontrollere, overvåke og i enkelte tilfeller ta beslutning om valg av mål.

Referanser

- (1) Skolnik, M I - Introduction to Radar Systems, McGraw-Hill (1973)
- (2) Swerling, P - Maximum Angular Accuracy of a Pulsed Search Radar, Proc IRE 44, 1146-55 (1956)
- (3) Cooper, D H - Binary Quantization of Signal Amplitudes: Effect for Radar Angular Accuracy, IEEE Transactions on Aerospace and Navigational Electronics, ANE-11, 65-72 (1964)
- (4) Dinneen, G P  
Reed, I S - An Analyses of Signal Detection and Location by Digital Methods, IRE Trancations on Information Theory, IT-2, 29-38 (1956)
- (5) Okean, H C  
Kelly, A J - Low-Noise Receiver Design Trends Using State-of-the-Art Building Blocks, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, MTT-25, 4, (1977)
- (6) - Teknisk håndbok, Radarsett Tilhengermontert F A Nr 15 Mkl CYMBELINE, del 1-4. Hærens forsyningskommando (1975)
- (7) Horn, H - Forslag til interface mellom CYMBELINE og Data-Sender/mottaker, Teknisk notat E-923, Forsvarets forskningsinstitutt (1977)

## BEREGNING AV STANDARDAVVIK PÅ TIDSMÅLING

I (2) har Swerling beregnet den nedre grense for standardavviket  $\sigma_\phi$  på et vinkelestimat foretatt ved hjelp av en pulset radar. Som funksjon av signal/støy forholdet har han beregnet en faktor (her kalt k):

$$k = \frac{\sigma_\phi \sqrt{Ng}}{\theta_g} \quad (A1)$$

der

$\sigma_\phi$  - nedre grense for standardavviket

$Ng$  - antall ekko fra målet innenfor antennens  
åpningsvinkel  $2\theta_g$

$2\theta_g$  - antennens åpningsvinkel mellom 1/e-effekt  
punktene for en to-veis Gaussisk antennelebe

(Hvis  $\theta_B$  er vinkelen mellom 3 db punktene for en en-veis Gaussisk antennelebe, så er  $2\theta_g = 0,85 \theta_B$ ).

(A1) kan skrives:

$$\sigma_\phi = \frac{k \cdot \theta_g}{\sqrt{Ng}} \quad (A2)$$

En ønsker nå å beregne tidspunktet for deteksjonen av et prosjektil. Dersom antennestrålen dreier med en vinkelhastighet  $\omega$  og tiden beregnes som funksjon av vinkelen, blir standardavviket på tidsberegningen:

$$\sigma_t = \frac{\sigma_\phi}{\omega} = \frac{k \cdot \theta_g}{\sqrt{Ng} \cdot \omega} \quad (A3)$$

Når et prosjektil passerer antennestrålen, vil det ha en gjennomsnittlig vinkeldreining  $\omega_e$  i elevasjon sett fra radaren:

$$\omega_e = \frac{v_v \cdot 180}{\pi \cdot R} \quad (A4)$$

der

$v_v$  - prosjektillets gjennomsnittlige vertikale hastighetskomponent ved passering av radarstrålen

$R$  - avstanden fra radaren til prosjektillet

Antall mottatte ekko:

$$N_g = \frac{2\phi_g \cdot \pi \cdot R \cdot f_c}{180 \cdot v_v} \quad (A5)$$

der

$2\phi_g$  - antennens åpningsvinkel i elevasjon

$f_c$  - radarens scan-frekvens

(A4) og (A5) innsatt i (A3) gir:

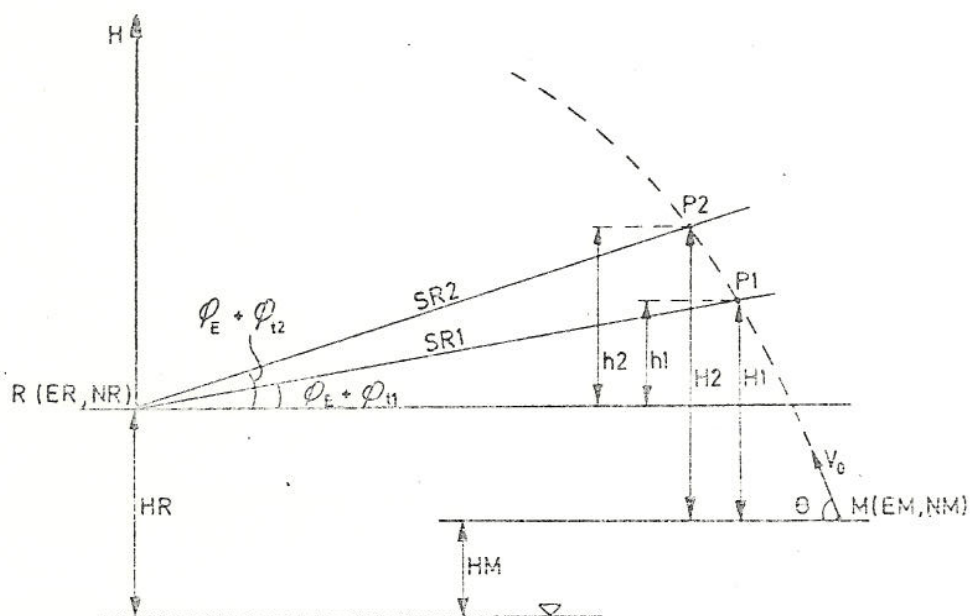
$$\sigma_t = \frac{k}{\left( \frac{f_c \cdot v_v \cdot 360}{\phi_g \cdot \pi \cdot R} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (A6)$$

Innsatt verdier for parametrene i CYMBELINE gir dette:

$$\sigma_t = \frac{k}{51.6} \sqrt{\frac{R}{v_v}} \quad (A7)$$

## ALGORITMENE I CYMBELINE

Algoritmene i CYMBELINE for beregning av en prosjektilbane.



Figur A.1 Lokalisering av en bombekaster, vertikal projeksjon

Figur A.1 viser vertikal projeksjon av en situasjon for lokalisering av et krumbanevåpen. Radaren R har posisjonen ER, NR og høyden over havet HR. Våpenet M har posisjonen EM, NM og høyden HM. Våpenets elevasjonsvinkel er  $\theta$ , og prosjektillets utgangshastighet er  $v_0$ . P1 og P2 er to punkter på banen. Ved deteksjon av disse punktene er radarstrålens elevasjon henholdsvis  $\phi_E + \phi_{t1}$  og  $\phi_E + \phi_{t2}$ .  $\phi_E$  er

antenneaksens elevasjon,  $\phi_{t1}$  og  $\phi_{t2}$  er den vinkel strålen heves med i forhold til antenneaksen ved de to deteksjonene. SR1 og SR2 er skråavstanden målt fra radaren til ekkoene P1 og P2. Tiden fra et prosjektil skytes ut og til det er i punktet P1 betegnes  $t$ , tiden mellom P1 og P2, som registreres av operatøren, betegnes  $T$ . Ser en bort fra luftmotstanden, gjelder følgende uttrykk for prosjektillets bevegelse:

$$H1 = (v_0 \cdot \sin\phi) \cdot t - \frac{1}{2}gt^2 \quad (A8)$$

$$H2 = (v_0 \cdot \sin\phi)(t+T) - \frac{1}{2}g(t+T)^2 \quad (A9)$$

der

H1 - høyden til P1 relativt våpenet

H2 - høyden til P2 relativt våpenet

I CYMBELINE lar en uttrykkene (A8) og (A9) gjelde, og kompenserer for luftmotstanden ved å sette  $g$  til  $8.2 \text{ m/s}^2$ . Videre innføres forholdstallet:

$$K = \frac{t}{T} \quad (A10)$$

Kombinasjon av ligning (A8), (A9) og (A10) gir:

$$H1 - K(H2 - H1) = \frac{1}{2}gT^2 \cdot K(K+1) \quad (A11)$$

Våpenets høyde over havet, HM, gjettes i første omgang. Innføring av HM gir:

$$H1 = h1 + (HR - HM) \quad (A12)$$

$$H2 = h2 + (HR - HM) \quad (A13)$$



der  $h_1$  og  $h_2$  er høyden til punktene P1 og P2 relativt radaren. Dette gir innsatt i (A11):

$$h_1 - K(h_2 - h_1) = \frac{1}{2}gT^2 \cdot K(K+1) + (HM - HR) \quad (A14)$$

Ut fra dette uttrykket beregnes K i den analoge regnemaskinen i CYMBELINE. Systemet setter følgende krav til K og T:

$$K \leq 3$$

$$T \leq 25 \text{ sek}$$

Dersom disse grensene overskrides, går regnemaskinen i metning.

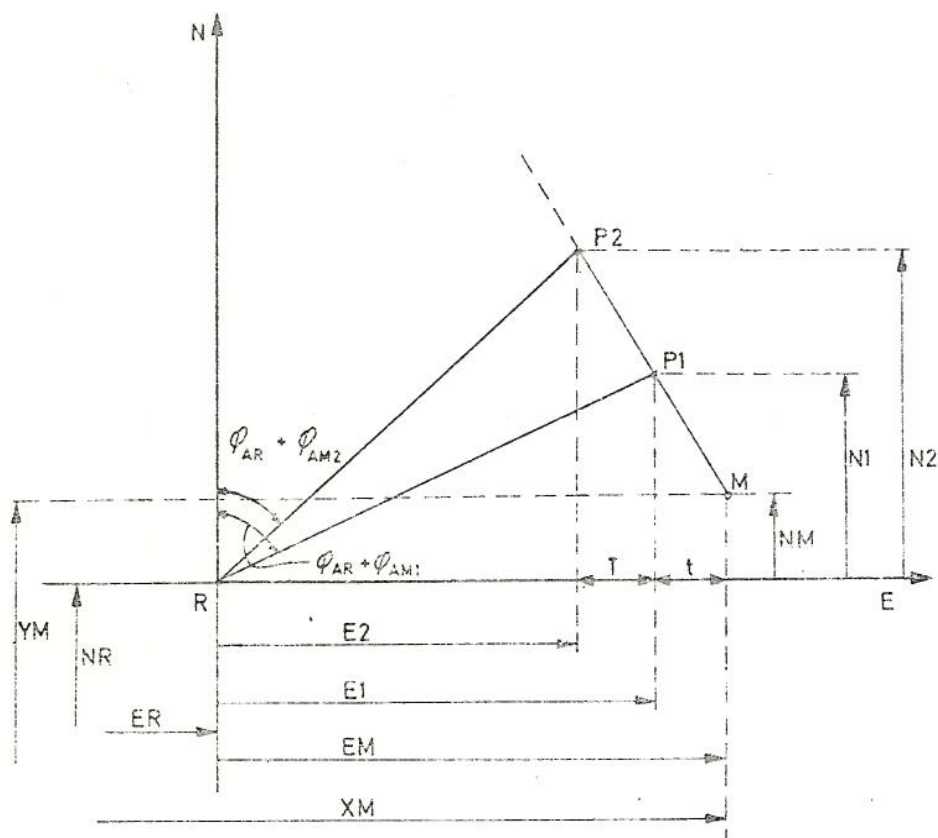
Figur A.2 viser horisontal projeksjonen av en lokaliseringssituasjon i øst-nord koordinat system med radaren i origo.

$E_1, N_1$  er koordinatene til P1 og  $E_2, N_2$  koordinatene til P2. Retningen til P1 og P2 er henholdsvis

$\phi_{AR} + \phi_{AM1}$  og  $\phi_{AR} + \phi_{AM2}$  der  $\phi_{AR}$  er antenneaksens retning relativt nord og  $\phi_{AM}$  er retningen til punktet relativt antenneaksen.

Når en antar at prosjektillets horisontale hastighetskomponent er konstant, kan følgende relasjon settes opp ut fra enkle geometriske betraktninger:

$$\frac{t}{T} = K = \frac{EM - E1}{E1 - E2} \quad (A15)$$



Figur A.2 Lokalisering av et våpen, horisontal projeksjon

Tilsvarende uttrykk kan settes opp for nord-koordinatene. Dette gir estimatet for våpenets posisjon relativt radaren:

$$EM = E1 + K(E1 - E2) \quad (A16)$$

$$NM = N1 + K(N1 - N2) \quad (A17)$$

Når radarens koordinater relativt rutenettet ( $ER, NR$ ) er satt inn, gir systemet våpenets koordinater relativt rutenettet ( $XM, YM$ ).

Etter at våpenets koordinater er estimert, sammenligner en på kartet våpenets antatte høyde med korrekt høyde. Dersom avviket er mer enn 30 m, settes en ny høyde inn, og en ny posisjon blir beregnet.

Beregning av koordinatene til P1 og P2.

Et punkt P på prosjektilbanen registreres i et sfærisk koordinatsystem med følgende variable:

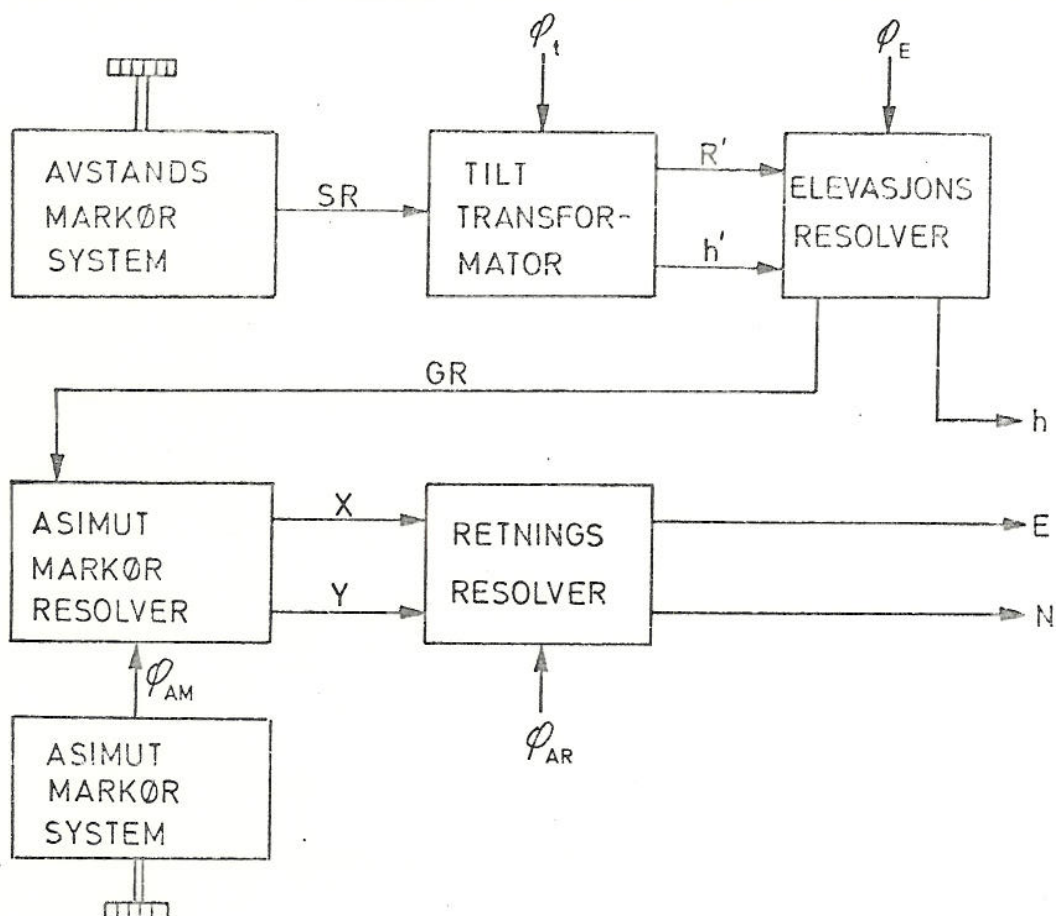
SR - avstanden til P

$\phi_E + \phi_t$  - elevasjonen til P

$\phi_{AR} + \phi_{AM}$  - retningen til P

I et resolverssystem blir disse omformet til kartesiske koordinater gitt i øst, nord og høyde med radaren i origo.

Figur A3 viser et blokkskjema over resolverkjeden. Antenneaksens elevasjonsvinkel  $\phi_E$  og retning relativt nord  $\phi_{AR}$  samt radarstrålens vinkel i elevasjon relativt antenneaksen  $\phi_t$  (tiltvinkel) er valgt på forhånd. Skråavstanden SR til punktet og retningen  $\phi_{AM}$  relativt antenneaksen innstilles av operatøren etter at punktet er avmerket på radarskjermen. Dette gjøres ved at avstands- og retningsmarkørene plasseres over punktet.

Figur A3 Resolverkjeden

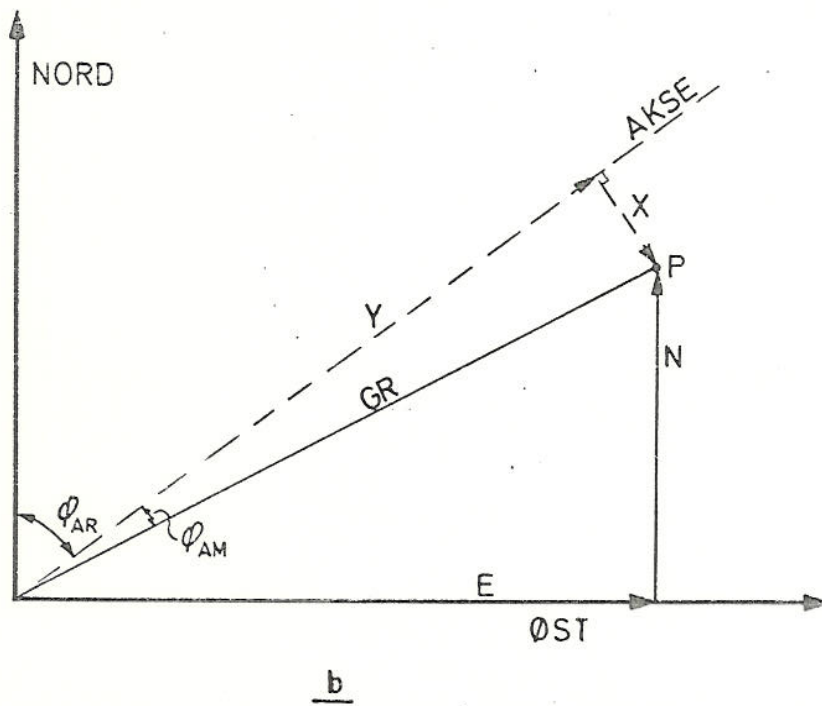
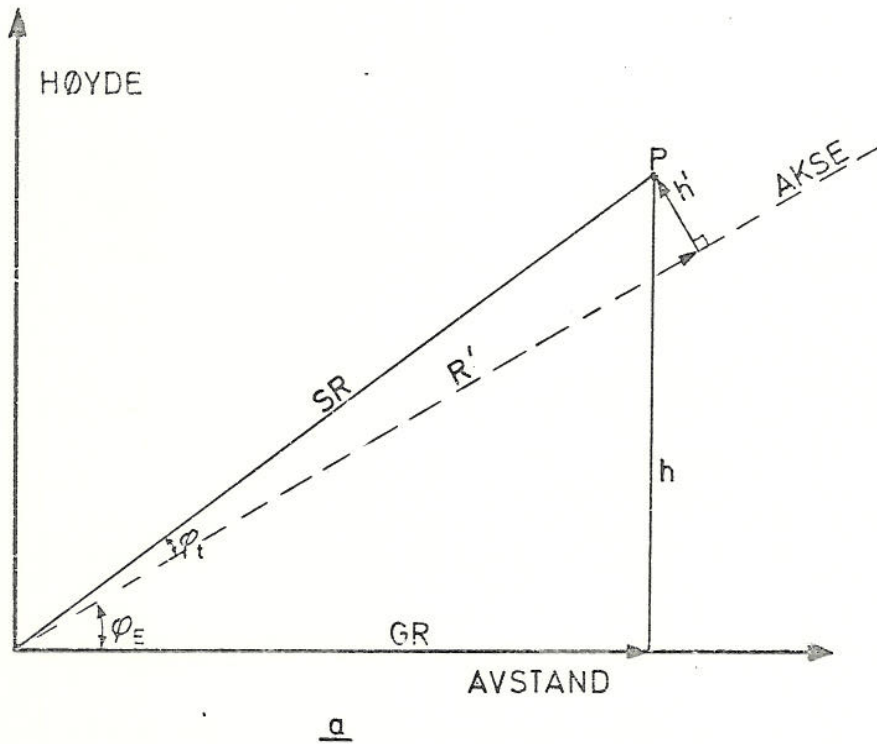
Figur A4 viser omformingen av koordinatene. A4a viser operasjonene i vertikalplanet utført av tilt-transformatoren og elevasjons resolveren. A4b viser dekomponeringen i horisontalplanet hvor øst- og nord-koordinatene beregnes.

Følgende uttrykk er realisert i resolverkjeden:

$$E = SR \cdot \cos(\phi_E + \phi_t) \sin(\phi_{AR} + \phi_{AM}) \quad (A18)$$

$$N = SR \cdot \cos(\phi_E + \phi_t) \cos(\phi_{AR} + \phi_{AM}) \quad (A19)$$

$$h = SR \cdot \sin(\phi_E + \phi_t) \quad (A20)$$



Figur A4 Omforming fra sfæriske til kartesiske koordinater