



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

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



Rapport

R54:1989

# Satellitgeodesi inom lokala nät

Transit-systemet inom speciellt  
2:a ordningens triangelnät

Lars Ollvik

R  
7/11

INSTITUTET FÖR BYGGDOKUMENTATION	
Acron	
Plac	Ser

Byggeforskningsrådet

R54:1989

SATELLITGEODESI INOM LOKALA NÄT

Transit-systemet inom speciellt  
2:a ordningens triangelnät

Lars Ollvik

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag  
840575-5 från Statens råd för byggnadsforskning  
till Inst. för geoteknologi, LNTH, Lund.

## REFERAT

Det pågår för närvarande en stark utveckling av satellitgeodesin. Det nuvarande satellitsystemet NNSS kommer inom några få år att ha kompletterats med ett nytt system GPS.

Syftet med projektet var att undersöka noggrannhet, precision och tidsåtgång vid Doppler-mätningar inom speciellt 2:a ordningens triangelnät, samt att göra jämförelser med resultat från konventionella metoder.

En mätkampanj utfördes på en punktkonfiguration hörande till ett 2:a ordningens triangelnät. Inmätning utfördes med satellitmetoder av kända triangelpunkter. Resultatet av satellitmätningarna har sedan jämförts med de ur kända koordinater och med hänsyn till projektiionskorrektioner framräknade längderna.

Resultaten visar att genom att bestämma avstånden ur de erhållna koordinaterna erhålls goda avståndsbestämningar under förutsättning att hänsyn togs till att observationerna från de olika mottagarna är korrelerade.

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

Denna skrift är tryckt på miljövänligt, oblekt papper.

R54:1989

ISEN 91-540-5045-6  
Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm  
Svenskt Tryck Stockholm 1989

## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Sammanfattning	1
1 Inledning	3
1.1 Problemets bakgrund	3
1.2 Projektets syfte	3
1.3 Idéer, hypoteser	4
1.4 FoU-metod	4
2 Satellit-doppler positionering	5
2.1 NNSS- eller Transit-systemet	5
2.2 Principen för Doppler-mätningen	6
2.3 Enkelpunktsbestämning och translokation	9
3 Beräkningsprogram för satellit-Doppler bestämningar	11
3.1 SWD2 - ett system för avståndsbestämning med satellit-Doppler teknik.	12
4 Fältmätningar	15
4.1 Koordinatförteckning	16
5 Beräkningar av fältdata	20
5.1 Beräkningar med SWD2	48
5.2 Analys av resultaten	48
6 Slutsatser och rekommendationer	50
7 Litteraturförteckning	51

## FÖRORD

Denna rapport utgör en redovisning av ett BFR-projekt "Satellitgeodesi inom lokala nät" (nr 840575-5) inom ämnesområdet satellitgeodesi vid avdelningen geodetisk mätningsteknik, LNTH.

Jag vill speciellt tacka Bo-Gunnar Reit, Lantmäteriverket, Allen Anderson, Uppsala universitet samt Arne Håkansson, Kungl. Tekniska Högskolan för att de välvilligt ställde satellitmottagare till förfogande.

Ett varmt tack riktas även till Bo Jonsson, Lantmäteriverket samt projektledarna Arne Bjerhammar och Leif Svensson för deras ovärderliga hjälp och engagemang.

Lund, 31 mars 1988

Lars Ollvik

## SAMMANFATTNING

Det pågår för närvarande en stark utveckling av satellitgeodesin. Det nuvarande satellitsystemet NNSS (Navy Navigational Satellite System) kommer inom några få år att ha kompletterats med ett nytt system GPS (Global Positioning System).

U.S. Navy Navigation Satellite System (NNSS), också känt som Transit Satellite System, utvecklades mellan 1958-1963 för U.S. Navy. Applied Physics Laboratory vid John Hopkins University (APL) har haft en central roll vid utvecklingen av Transit-systemet. Transit-systemet, som ursprungligen var ett helt militärt system släpptes 1967 för civilt bruk. De flesta civila användarna brukar systemet för navigations-syften.

Systemet används idag i stor utsträckning vid prospektering till havs, för sjömätning, vid mätningar i utvecklingsländer och för projektering av större anläggningsarbeten. Man torde kunna förvänta sig att satellitmetoderna inom några få år kommer att vinna insteg också inom mera vardagliga geodetiska tillämpningar.

Syftet var att undersöka noggrannhet, precision och tidsåtgång vid Doppler-mätningar inom speciellt 2:a ordningens triangelnät, samt att göra jämförelser med resultat från konventionella metoder.

En mätkampanj utfördes på en punktkonfiguration hörande till ett 2:a ordningens triangelnät. Inmätning utfördes med satellitmetoder av kända triangelpunkter vilkas koordinatnoggrannhet är sådan att avstånden mellan punkterna för våra syften kan anses felfria.

Vid bearbetningen av fältdata från satellitmottagarna har beräkningsprogrammet GEODOP använts vilket ger de tredimensionella geocentriska koordinaterna. Resultatet av satellitmätningarna har sedan jämförts med de ur kända koordinater och med hänsyn till projektionskorrektioner framräknade längderna.

Resultaten visar att genom att bestämma avstånden ur de erhållna koordinaterna erhålls goda avståndsbestämningar under förutsättning att hänsyn togs till att observationerna från de olika mottagarna är korrelerade. Undersökningen har visat att Transit-Doppler systemet fortfarande kan vara ett utmärkt hjälpmedel för geodetiska ändamål. För att få tillförlitliga avståndsbestämningar bör problemet med de ofta mycket starkt korrelerade observationerna beaktas.



## 1 INLEDNING

### 1.1 Problemets bakgrund

Det pågår för närvarande en stark utveckling av satellitgeodesin. Det nuvarande satellitsystemet NNSS (Navy Navigational Satellite System) kommer inom några få år att ha kompletterats med ett nytt system GPS (Global Positioning System). Medan NNSS har byggt uteslutande på Doppler-principen, kommer GPS att involvera också avstånds- och interferometriska mätningmetoder. NNSS-systemet är relativt väl representerat med mottagare i Sverige (Lantmäteriverket 3 st, Kungl. Tekniska Högskolan 2 st, Sjöfartsverket 3 st och Uppsala universitet 1 st). Systemet används idag i stor utsträckning vid prospektering till havs, för sjömätning, vid mätningar i utvecklingsländer och för projektering av större anläggningsarbeten.

Man torde kunna förvänta sig att satellitmetoderna inom några få år kommer att vinna insteg också inom mera vardagliga geodetiska tillämpningar. Det område, som står närmast i tur är vad som kallas 2:a ordningens triangelnät i Lantmäteriverkets publikation TFA (Tekniska Förklaringar och Anvisningar) med en utsträckning av 4-10 km mellan triangelpunkterna. Detta område är, även internationellt, förvånansvärt lite undersökt vad gäller Dopplertekniken.

### 1.2 Projektets syfte

Syftet var att undersöka noggrannhet, precision och tidsåtgång vid Doppler-mätningar inom speciellt 2:a ordningens triangelnät, samt att göra jämförelser med resultat från konventionella metoder.

Avsikten var att ta fram ett system som är praktiskt användbart, samt att bygga upp en beredskap inför den omvälvning,

som introduktionen av GPS (Global Positioning System) i full skala 1992, kommer att innebära.

### 1.3 Idéer, hypoteser

Så kallad translokation (samtidigt utnyttjande av två eller flera mottagare) har länge använts för lokal förbättring av koordinater. För fallet av två mottagare har en sådan konstruerats av projektledaren (Svensson, S.L., A Satellite-Doppler Distance Measurement System, KTH, 1983). Motsvarande för tre eller flera mottagare ansågs ge optimalt resultat för den typ av mätningar, som projektet avsåg.

En i stort sett ekvivalent modell erhålles genom att utnyttja de estimat av koordinater och kovariansmatriser, som erhålles från ett konventionellt program för samtidig utjämnings av observationer från flera stationer, som t.ex. GEODOP. Teoretiskt har detta behandlats av Persson, C.G. (1981).

### 1.4 FoU-metod

En mätkampanj utfördes på en punktkonfiguration hörande till ett 2:a ordningens triangelnät. Inmätning utfördes med satellitmetoder av kända triangelpunkter vilkas koordinatnoggrannhet är sådan att avstånden mellan punkterna för våra syften kan anses felfria. Resultatet av satellitmätningarna har sedan jämförts med de ur kända koordinater framräknade längderna.

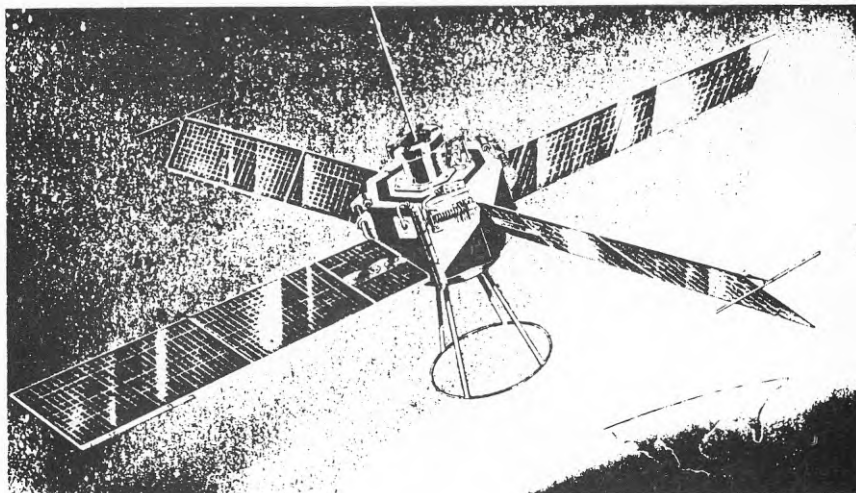
## 2 SATELLIT-DOPPLER POSITIONERING

### 2.1 NNSS- eller Transit-systemet

U.S. Navy Navigation Satellite System (NNSS), också känt som Transit Satellite System, utvecklades mellan 1958-1963 för U.S. Navy. Applied Physics Laboratory vid John Hopkins University (APL) har haft en central roll vid utvecklingen av Transit-systemet. Transit-systemet som ursprungligen var ett helt militärt system släpptes 1967 för civilt bruk. De flesta civila användarna brukar systemet för navigations-syften.

Satellitssystemet kan sägas vara uppbyggt av tre segment: satelliter, markkontroll och satellitmottagare (användare). Transit-systemet omfattar 4-6 satelliter i polära, nästan cirkulära banor med en medelhöjd av 1100 km. Omloppstiden är cirka 107 minuter. Varje satellit sänder två kontinuerliga bärvågsvärd frekvenser där en frekvens nominellt är 399.968 MHz och den andra frekvensen är  $3/8$  av den första. Dessa två frekvenser är modulerade för att ge tidsmarkeringar och "satellit ephemeris" från vilka positionen av satelliten kan beräknas.

Transit-satelliterna spåras av 13 spårstationer (TRANET) runt jorden. Observationerna från detta nät används för att beräkna bandata sk "precise ephemeris", vilka kan erhållas i efterhand för att få en högre noggrannhet i positionsbestämningarna. De bandata, sk "broadcast ephemeris", som erhålles från satelliten beräknas i ett nät av fyra stationer OPNET. "Broadcast ephemeris" är beräknade vid NNSS Computing Centre tillsammans med korrektioner till satellitklockorna. Varje satellit erhåller ett kodat meddelande med uppdateringar av banparametrar och tidskorrektioner från en av de sk injekteringsstationerna för nästkommande 12 timmar.



FIGUR 2.1 TRANSIT-satellit (Motorola, 1986)

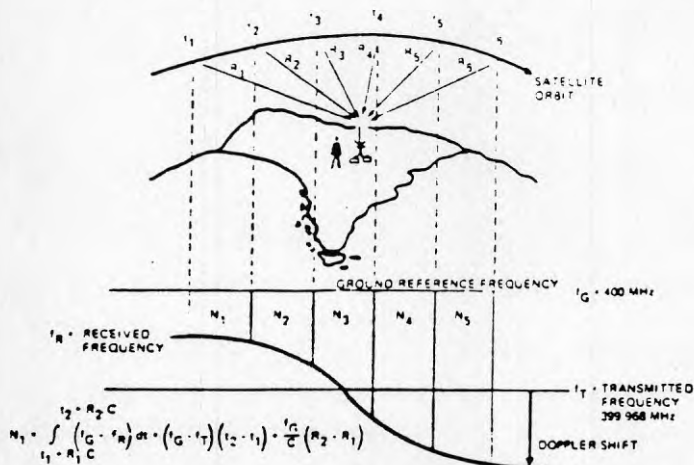
Transitmottagarna erhåller informationen från satelliterna när dessa passerar över mottagaren. Under satellitpassagen blandas den mottagna signalen med mottagarens referenssignal för beräkning av det integrerade frekvensfelet, vilket ger möjlighet till mätningar av avståndsdifferenser. Informationen från satelliterna, tidgivning, satellitidentitet och "broadcast ephemeris" erhålls från det fasmodulerade budskapet. En satellitpassage varar cirka 10 - 20 minuter.

## 2.2 Principen för Doppler-mätningen

Det man mäter i Doppler-tekniken är inte det momentana frekvensfelet utan ett integrerat sådant. Beteckna med  $f_T$  den fixa frekvens, som transmitteras av satelliten, och med  $f_R$  den mottagna frekvensen, som varierar på grund av Doppler-effekten. Låt  $f_G$  vara mottagarens referensfrekvens.

Vi betraktar nu den del av signalen, som utsänds från satelliten mellan tiderna  $t_1$  och  $t_2$ . Denna del av signalen når mottagaren mellan tiderna  $\tau_1$  och  $\tau_2$  och mottagaren registrerar Doppler-mätningen.

$$N = \int_{\tau_2}^{\tau_1} (f_G - f_R) d\tau \quad (2.1)$$



Figur 2.2 De integrerade Doppler-observationerna.

Vi gör den enkla omskrivningen

$$N = \int_{\tau_1}^{\tau_2} f_G d\tau - \int_{\tau_1}^{\tau_2} f_R d\tau. \quad (2.2)$$

Den första termen är  $f_G (\tau_2 - \tau_1)$ , ty  $f_G$  är konstant. För den andra gäller

$$\int_{\tau_1}^{\tau_2} f_R d\tau = \int_{t_1}^{t_2} f_T dt. \quad (2.3)$$

Formel (2.3) är helt enkelt en följd av att lika många cykler, som sänts under tidsintervallet mellan  $t_1$  och  $t_2$ , tas emot under intervallet mellan  $\tau_1$  och  $\tau_2$ . Eftersom  $f_T$  också är konstant finner vi

$$N = f_G(\tau_2 - \tau_1) - f_T(t_2 - t_1) \quad (2.4)$$

Om vi korrigerat för refraktionen i atmosfären gäller  $\tau_j = t_j + R_j/c$ , där  $R_j$  betecknar avståndet mellan satellit och mottagare och  $c$  är ljushastigheten. Man kan nu välja mellan att utnyttja satellit-tid, i vilket fall (2.4) blir

$$N = (f_G - f_T)(t_2 - t_1) + \frac{f_G}{c} \cdot (R_2 - R_1), \quad (2.5)$$

eller mottagartid, i vilket fall

$$N = (f_G - f_T)(\tau_2 - \tau_1) + \frac{f_T}{c} \cdot (R_2 - R_1). \quad (2.6)$$

Formlerna (2.5) och (2.6) är fundamentalformlerna för Doppler-tekniken. Villkendera man skall använda har med tidmätningen att göra. Om man använder mottagartid måste man bestämma motsvarande satellittider  $\tau_j = t_j + R_j/c$  iterativt ur beräknade koordinater. Detta eftersom ephemeriderna refererar till satellittid och man behöver satellitpositionerna vid tiderna  $t_j$  för att beräkna avstånden  $R_j$ . Om man använder satellittiderna har man svårigheter med att effektivt mäta  $N$ . I bl a Magnavox MX 1502 används en kompromiss så att tiden visserligen mäts i mottagarsystemet men med intervalländpunkterna triggade via satellitsignalen.

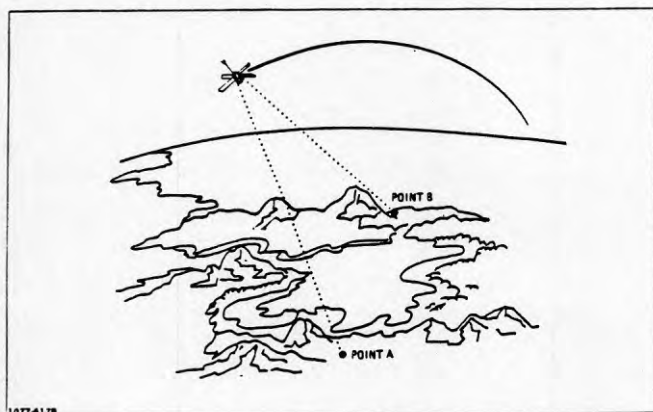
Man använder nu observationsekvationerna (2.5) eller (2.6) för att, med användande av närmevärden på mottagarens koordinater, göra en minsta kvadrat-uppskattning. De obekanta, man under alla omständigheter har med är frequency offset  $\Delta f = f_G - f_T$  samt stationens koordinater  $X, Y, Z$ . Om man gör samtidig bestämning från flera stationer kan också banparametrar, meteorologiska parametrar osv bestämmas. I det enklaste fallet beräknas  $N^{\text{ber}}$  ur (2.1) eller (2.2) ur närmevärden på  $f, X, Y, Z$  varefter den lineariserade observationsekvationen är (2.2)

$$N-N^{\text{ber}} = \Delta f \cdot (t_2 - t_1) + \frac{f}{c} \left( \frac{\partial \Delta R}{\partial X} \Delta X + \frac{\partial \Delta R}{\partial Y} \Delta Y + \frac{\partial \Delta R}{\partial Z} \Delta Z \right). \quad (2.7)$$

Ur de lineariserade observationsekvationerna (2.7) bestäms inkrementen  $\Delta f$ ,  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$  och  $\Delta Z$ , som skall läggas till frequency offset och närmekoordinater. Man måste i allmänhet iterera räkningen flera gånger med bättre och bättre närmekoordinater. Ur MK-skattningen får man också skattningar av felet i de beräknade koordinaterna.

### 2.3 Enkelpunktsbestämning och translokation

Enkelpunktsbestämning innebär att observationer utförs från en enda station och att antingen broadcast eller precise ephemeris används för banbestämningen. För varje passage erhålls ett antal observationsekvationer enligt tidigare avsnitt. För att få snabb konvergens mot slutliga koordinater med små beräknade fel är det viktigt att observationerna tilldelas rimliga vikter vid en gemensam utjämnning. Ett enkelt sätt att göra detta är att göra en beräkning för varje passage först, beräkna grundmedelfelet för denna och sedan sätta vikten på passagens observationer på grundval av detta. För att nå goda resultat måste man hålla på länge att mäta.



Figur 2.3 Principen för translokation (Magnavox 1979)

För att snabbt uppnå en högre grad av noggrannhet används translokation, dvs man gör en gemensam utjämning på grundval av observationer från flera stationer, figur 2.3, Eftersom banfel och refraktionsfel är i stort gemensamma för alla stationerna, kommer noggrannheten i relativa koordinater att förbättras. Den enklaste tekniken är att man gör oberoende utjämningar för varje station och sedan beräknar relativa koordinater. Den vanligaste tekniken är den så kallade short-arc-tekniken, varvid förbättringar av de variabla banparametrarna  $\Delta E$ ,  $\Delta A$  och  $H$  beräknas vid den gemensamma utjämningen. Utjämningsräkningen vid translokation utförs som efterbehandling på en stordator.

För vidare läsning kan följande publikationer rekommenderas:  
The Transit-navigation satellite system, T.A. Stansell, 1979.

Geodetiska satellitmetoder - en översikt, L. Sjöberg, 1981.  
Satellit- och fysikalisk geodesi, S.L. Svensson, 1984.



### 3 BERÄKNINGSPROGRAM FÖR SATELLIT-DOPPLER BESTÄMNINGAR

Det mest välkända icke-kommersiella programmet för efterbehandling heter GEODOP och har utvecklats vid Geodetic Survey of Canada. GEODOP är utvecklat av J. Kouba och J.D. Boal i början på 1970-talet och finns i flera versioner. Den version av GEODOP som finns vid avd Geodetisk mätningsteknik har beteckningen III. För att möjliggöra praktiskt användande av GEODOP har ett antal hjälpprogram utvecklats vid Geodetic Survey of Canada. PREDOP som är utvecklat av P. Lawnikanis läser MJV (majority voting) satellitdata. Programmet korrigerar Doppler-observationerna för jonosfärisk refraktion och översätter variabla och fixa parametrar. Satellitbanan beräknas för varje passage och transformeras till ett terrestert koordinatsystem. Slutligen kontrolleras Doppler-observationerna innan resultatet lagras på en binär resultatfil. Dessa utdata utgör indata till GEODOP. MERGE är ett program som också är utvecklat av P.G Lawnikanis. Programmet lägger samman PREDOP-filer från flera stationer för att en multistationslösning skall kunna beräknas i GEODOP. Genom att använda MERGE kan man även komplettera med "precise ephemeris". Resultatfilen är i binär form och utgör indata till GEODOP.

GEODOP är beräkningsprogrammet vilket ger de tredimensionella geocentriska koordinaterna från antingen PREDOP- eller MERGE-datafiler för de sökta stationerna. Programmet ger möjlighet att i en beräkning utöver koordinater för de sökta stationerna erhålla bl a varians-kovariansuppskattningar, viktsmatriser och en utförlig dokumentation över de olika stationernas statistiska data. Programsystemet GEODOP är ett väl fungerande beräkningssystem, men det kräver en stordator på grund av sin storlek och krav på beräkningsnoggrannhet.

### 3.1 SWD2 - ett system för avståndsbestämning med satellit-Doppler teknik.

SWD2 är ett beräkningssystem som skiljer sig från de flesta beräkningsprogrammen för geodetiska bestämningar ur satellit-Doppler mätningar. De flesta beräkningsprogrammen för bestämning av 3-dimensionella koordinater är vanligtvis en utvidgning av den teknik som används vid navigation (2-dimensionella koordinater). SWD2 skiljer sig härvid genom att resultatet från beräkningarna ej ges av 3-dimensionella koordinater utan avståndet mellan två stationer. Det som skiljer SWD2 från tidigare beräkningsprogram är att de geometriska aspekterna har beaktats i högre grad.

SWD2 har utvecklats av projektledaren Leif Svensson i rapporten "A Satellite-Doppler Distance Measurement System", 1983, vilken kan rekommenderas för vidare läsning.

En kort beskrivning av hur den geometriska aspekten har beaktats ges här:

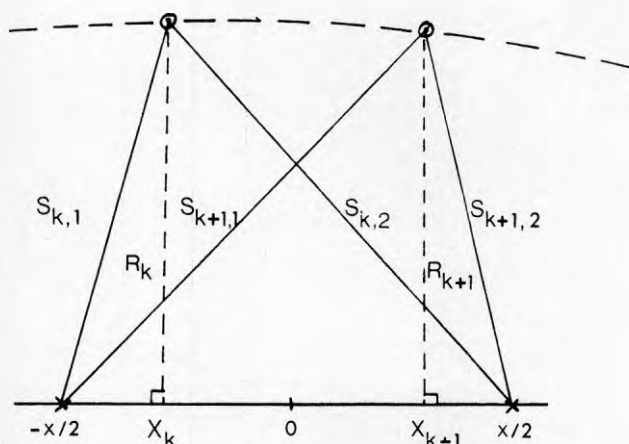
Antag att satellitmätningar är gjorda från två olika stationer under en gemensam satellitpassage. Om man bortser från alla fel, utom banfel, kan man utgå från att observationsekvationerna är av formen

$$(S_{k+1,i} - S_{k,i})/\lambda - N_{k,i} = 0,$$

där, för k:e tidsintervallet, N är den integrerade Dopplerobservationen över intervallet vid stationen nr i. S är avståndet från satelliten till stationen vid början av intervallet, medan S är motsvarande vid slutet av intervallet.

Ett lokalt koordinatsystem x, y, z definieras så att origo är beläget vid mittpunkten på kordan mellan stationerna och

X-axeln är riktad från station 1 mot station 2. Vidare ges satellitkoordinaterna i detta lokala system av X, Y, Z.



Figur 3.1 Två punkts translokation (S. Leif Svensson, 1983)

Enligt ovan erhålles:

$$S_{k,i} = ((X_k - (-1)^i x)^2 + Y_k^2 + Z_k^2)^{1/2}.$$

Härav följer om  $R_k = (Y_k^2 + Z_k^2)^{1/2}$

$$((X_k - (-1)^i x)^2 + R_k^2)^{1/2} - ((X_{k+1} - (-1)^i x)^2 + R_{k+1}^2)^{1/2} / \lambda - N_{k,i}.$$

Här kan noteras att Doppler-observationerna från de två stationerna inte innehåller någon information om riktningen av vektorn (Y,Z). Emellertid är kordans längd mellan de två stationerna helt bestämd förutsatt att X och R är kända. Det är möjligt att från observationerna utjämna X,R med tillräcklig noggrannhet. Enligt ovanstående är problemet reducerat från 3- till 2-dimensionellt och resultatet (X,R) används med fördel som koordinater istället för (X,Y,Z).

För att bestämma x från observationsekvationerna, så är ekvationerna linjariserade för ett approximativt värde på x

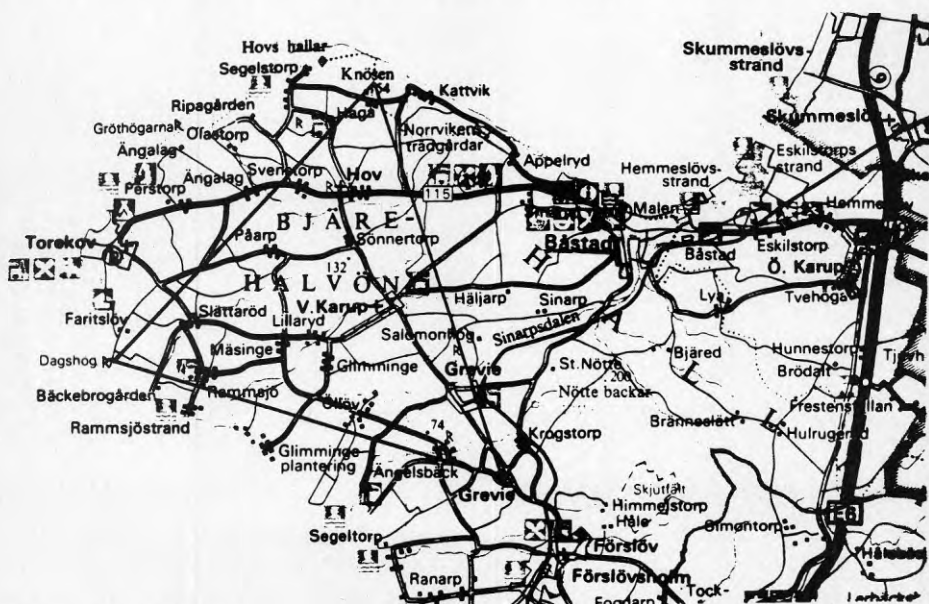
För att bestämma  $x$  från observationsekvationerna, så är ekvationerna linjariserade för ett approximativt värde på  $x$  och det erhållna linjära systemet beräknas med hjälp av minsta kvadrat-metoden.

SWD2 är ett programsystem som består av två huvudprogram, MERGE och SWD2. MERGE läser i PREDOP-formatterade filer från två stationer och lägger samman simultana observationer och beräknar satellitkoordinater. Resultatet lagras på en utdatafil vilken sedan läses av SWD2 för den slutliga beräkningen.

#### 4 FÄLTMÄTNINGAR

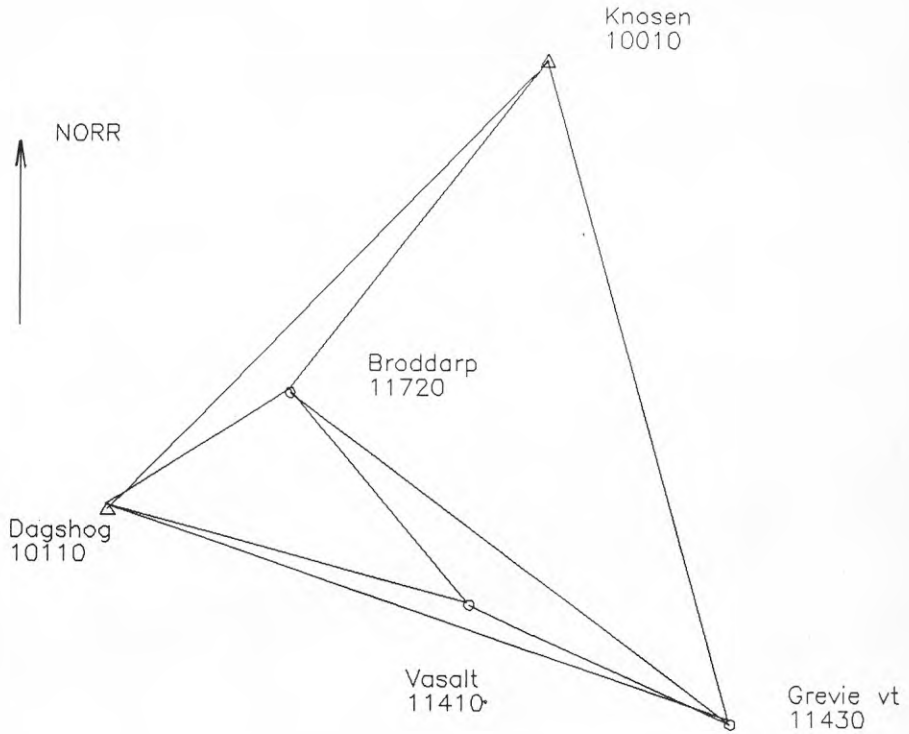
Fältmätningarna utfördes på Bjärehalvön på grund av att området under många år har varit fältmätningsområde för Lantmäteriutbildningen vid Kungl. Tekniska Högskolan. Det huvudsakliga skälet för att använda detta fältområde är att befintliga triangel- och polygonpunkter är välbestämda efter upprepade mätningar, men även att berörda markägare är vana vid geodetisk fältverksamhet.

Fältarbetet utfördes vid två mätkampanjer. Mätkampanj nr 1 utfördes under tiden 13 augusti - 7 september 1984 och mätkampanj nr 2 utfördes under tiden 10 juni - 5 juli 1985.



Figur 4.1 Karta över Bjärehalvön och fältområdet.

Följande punkt- och mätkonfiguration valdes dels med hänsyn till att de inbördes avstånden skulle vara mellan 4-10 km, dels att punkternas belägenhet skulle vara sådan att satellitmottagarna i möjligaste mån var skyddade för åverkan.



Figur 4.2 Punkt- och mätkonfiguration

#### 4.1 Koordinatförteckning

Koordinater i system 5 gon W Skåne 67 x- och y-koordinaterna avrundade till centimeter. Höjdvärdena är angivna på 5 centimeter när.

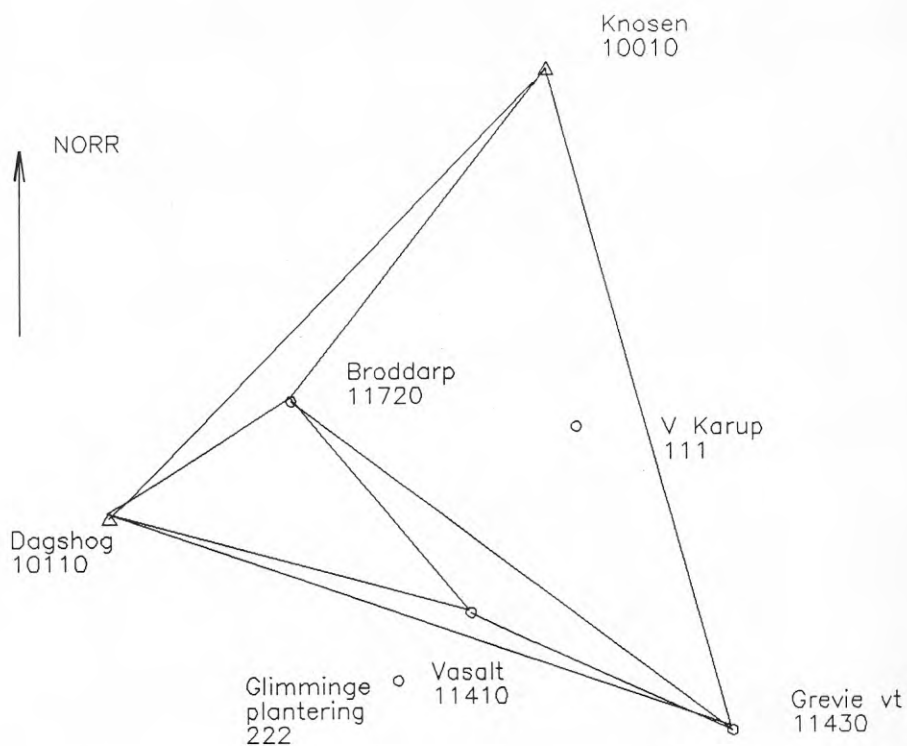
Punkt	x(m)	y(m)	h(m)	Namn
10010	6259708.90	-50348.29	153.15	Knösen
10110	6252667.47	-57211.67	23.40	Dagshög
11410	6251161.69	-51555.32	59.85	Vasalt
11430	6249299.48	-47477.08	98.60	Grevie vattentorn
11720	6254510.40	-54365.22	65.30	Broddarp

## Längder

Sträcka		Mätt längd
Från	Till	(m)
10010	10110	9833.633
10010	11410	8632.386
10010	11430	10798.172
10010	11720	6570.114
10110	11410	5853.293
10110	11430	10300.784
10110	11720	3391.124
11410	11430	4483.371
11410	11720	4371.325
11430	11720	8637.033

På grund av mätningstekniska problem vid mätkampanj nr 1 genomfördes en ny fältmätning. Vid mätkampanj nr 2 infördes två reservpunkter.

Dessa två nya punkter var inte koordinatkända utan valdes helt av fältmässiga skäl, med tanken att eventuellt utföra nödvändiga konventionella mätningar i efterhand.



Figur 4.3 Punkt- och mätkonfiguration vid mätkampanj nr 2.





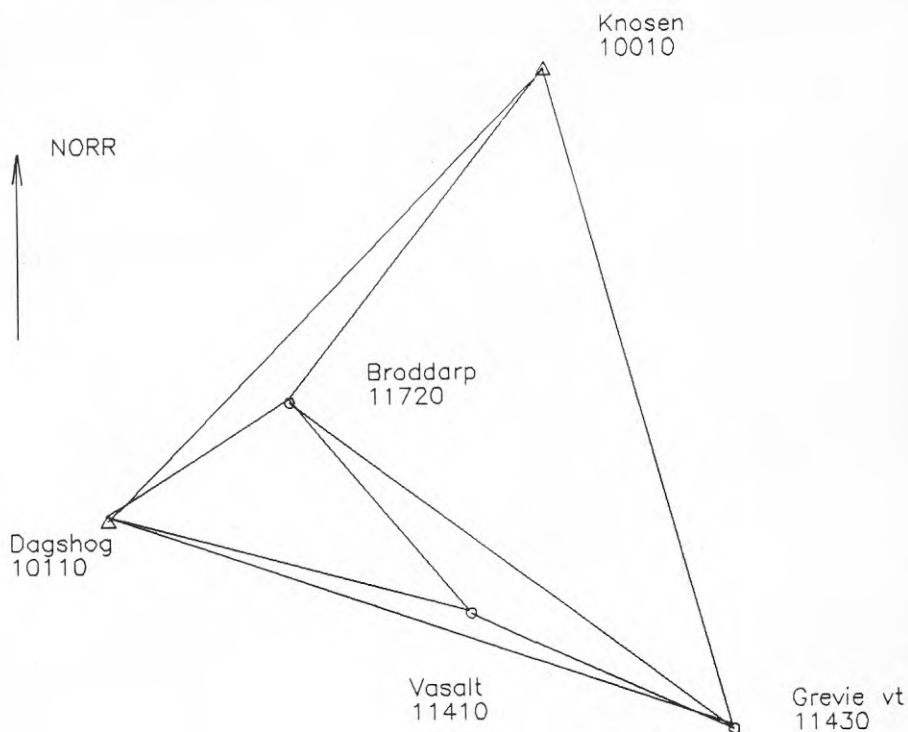
Figur 4.4 Uppställning av satellitutrustning vid Dagshög



Figur 4.5 För att skydda satellitmottagaren var denna placerad i ett litet tält.

## 5. BERÄKNINGAR AV FÄLTDATA

Fältkampanj nr 1 omfattade satellitmätningar under tiden 15 aug till 3 sep 1984. Det nät som användes under denna fältkampanj redovisas nedan i figur 5.1. Vid denna fältkampanj användes fyra satellitmottagare av typ JMR-1, inlånade från Lantmäteriverket.

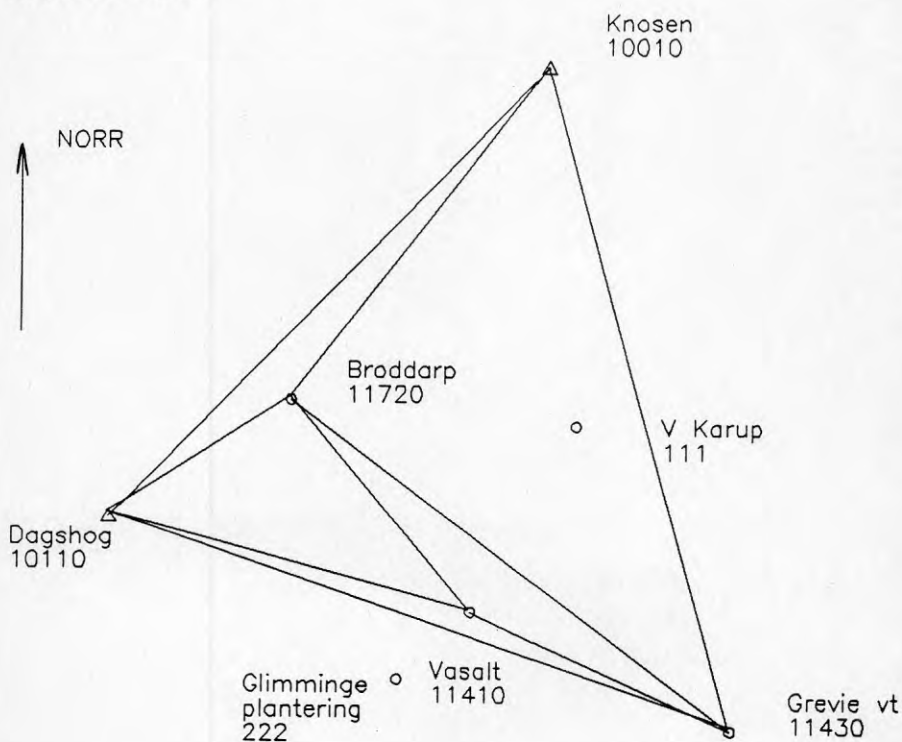


Figur 5.1 Nätkonfiguration i fältkampanj nr 1.

Den uppgjorda planeringen av fältkampanjen kunde ej genomföras på grund av fältproblem. Det kom även vid bearbetningen i GEODOP att visa sig att erhållna observationer var av skiftande kvalitet. En ny fältkampanj genomfördes därför.

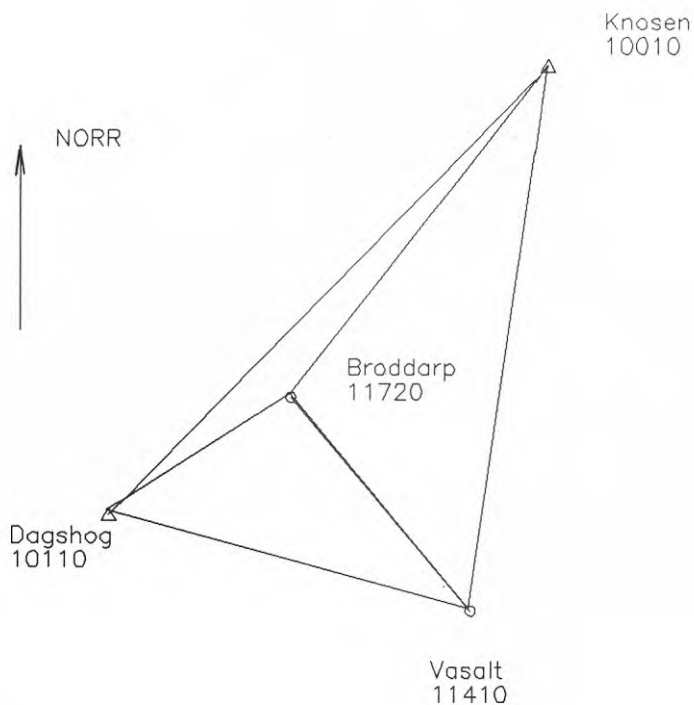
Fältkampanj nr 2 omfattade satellitmätningar under tiden 12 juni till 27 juni 1985. Det nät som använts under fältkampanj nr 1 kom att utökas med två reservpunkter. Skälet för detta var att förutom de fyra satellitmottagarna av typ JMR-1, från Lantmäteriverket, lånades även tre satellitmottagare av typ Magnavox MX 1502, från KTH och Uppsala Universitet.

Tanken var nu att de fem triangelpunkter som ingick i testnätet skulle inmätas simultant och att de två extra satellitmottagarna skulle finnas i reserv. En Magnavox MX 1502 placerades på Grevie vattentorn och de fyra JMR-1 mottagarna på de fyra övriga triangelpunkterna. De två övertaliga mottagarna placerades på reservpunkterna. Se nätskiss nedan i figur nr 5.2.

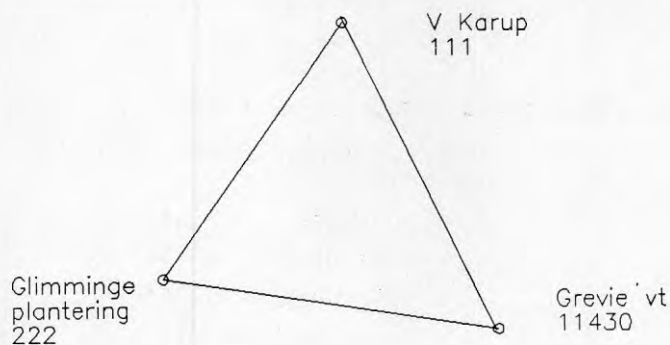


Figur 5.2 Nätkonfiguration i fältkampanj nr 2.

Vid efterbehandlingen visade det sig att den radiosändare som finns på Grevie vattentorn hade stört mottagaren. Detta medförde att de statistiska test som finns i GEODOP sorterade ut de flesta av observationerna. Därför kommer redovisningen av erhållna avstånd ur satellitmätningarna att delas upp i två grupper. Dessa två nät visas nedan i figur 5.3 och 5.4.



Figur 5.3 Nät nr 1 vid beräkningarna.



Figur 5.4 Nät nr 2 vid beräkningarna.

Från GEODOP erhöles följande resultat för nät nr 1.

Längder

Sträcka		Mätt längd	Sat. längd	Medel-	Diff
Från	Till	(m)	(m)	fel (m)	(m)
10010	10110	9833.633	9833.578	0.2184	0.055
10010	11410	8632.386	8632.061	0.1250	0.325
10010	11720	6570.114	6569.529	0.1523	0.585
10110	11410	5853.293	5853.560	0.2811	-0.267
10110	11720	3391.124	3391.222	0.1937	-0.098
11410	11720	4371.325	4370.926	0.1532	0.399

Totala antalet passager involverade i beräkningen var 321 st och frihetsgradens ackumulerade summa var 22259.

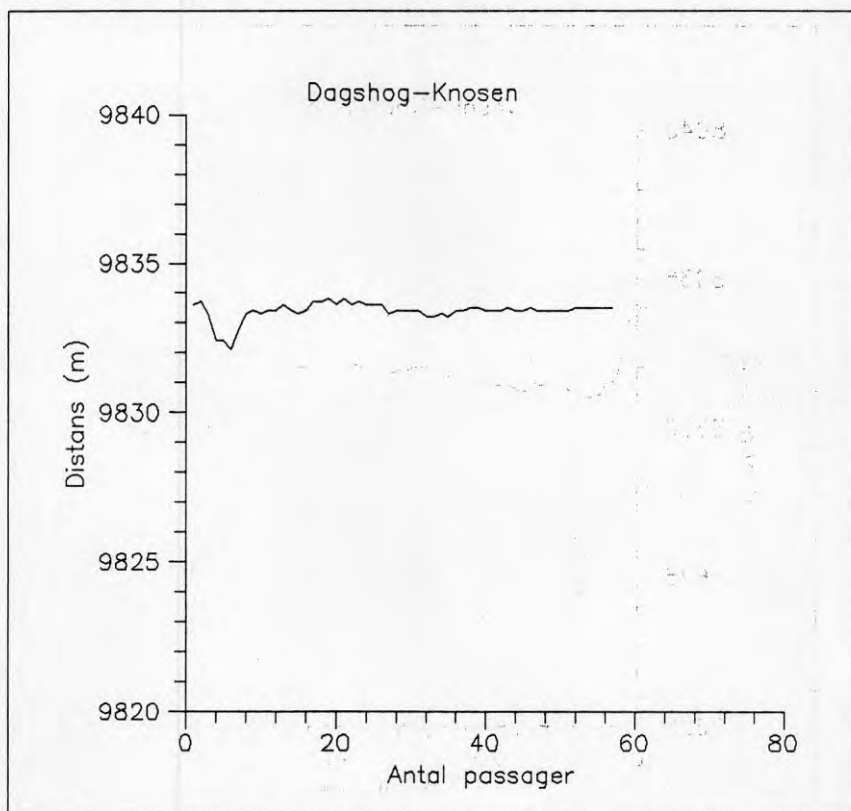
Från GEODOP erhöles följande resultat för nät nr 2.

Längder

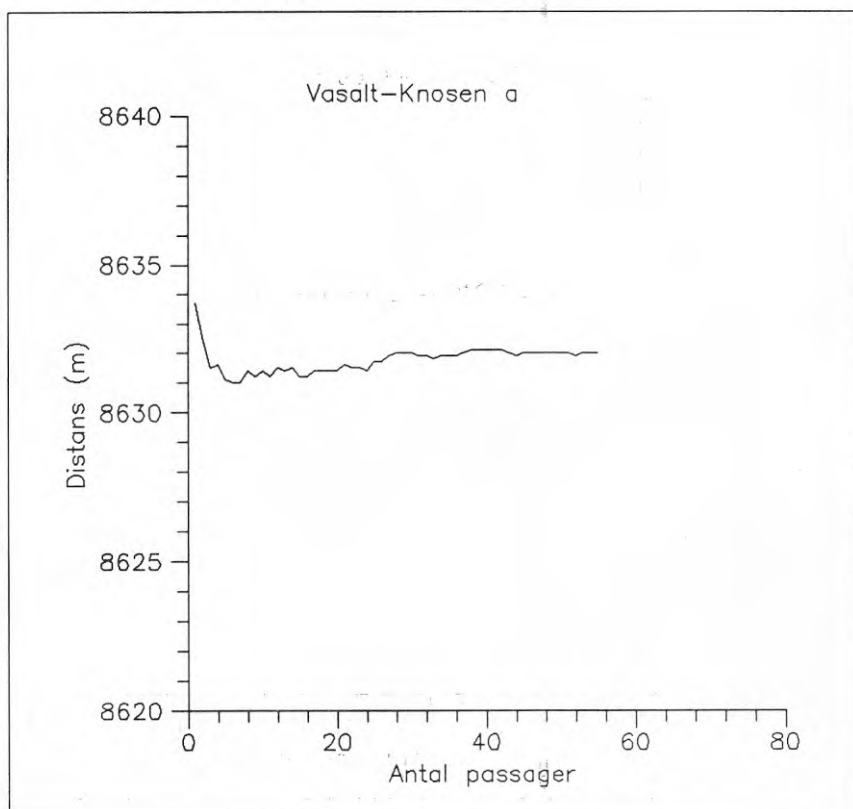
Sträcka		Mätt längd	Sat. längd	Medel	Diff
Från	Till	(m)	(m)	fel (m)	(m)
222	111		4726.496	0.3290	
11430	111		5374.954	0.3567	
222	11430		5095.536	0.2670	

Totala antalet passager involverade i beräkningen var 215 st och frihetsgradens ackumulerade summa 8552.

I figurerna 5.5 till 5.10 visas resultat från nät nr 1 samt i figuren 5.11 till 5.13 motsvarande för nät nr 2.

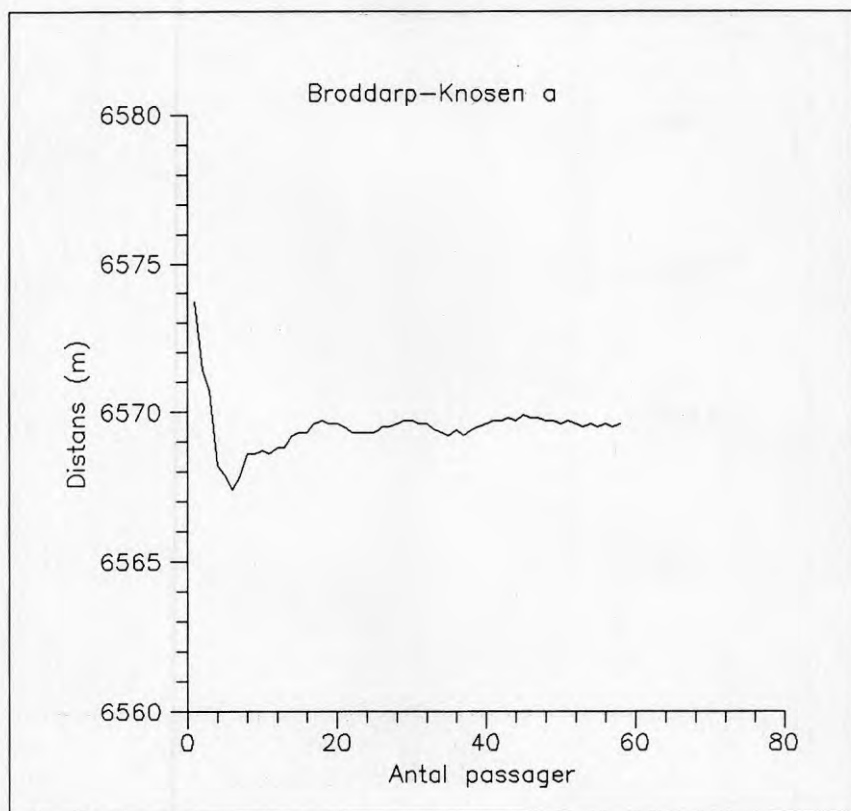


Figur 5.5 Avståndet mellan 10010-10110 (Knösen och Dagshög) beräknat ur erhållna satellitkoordinater. Figuren visar hur avståndet stabiliseras med antalet passager.

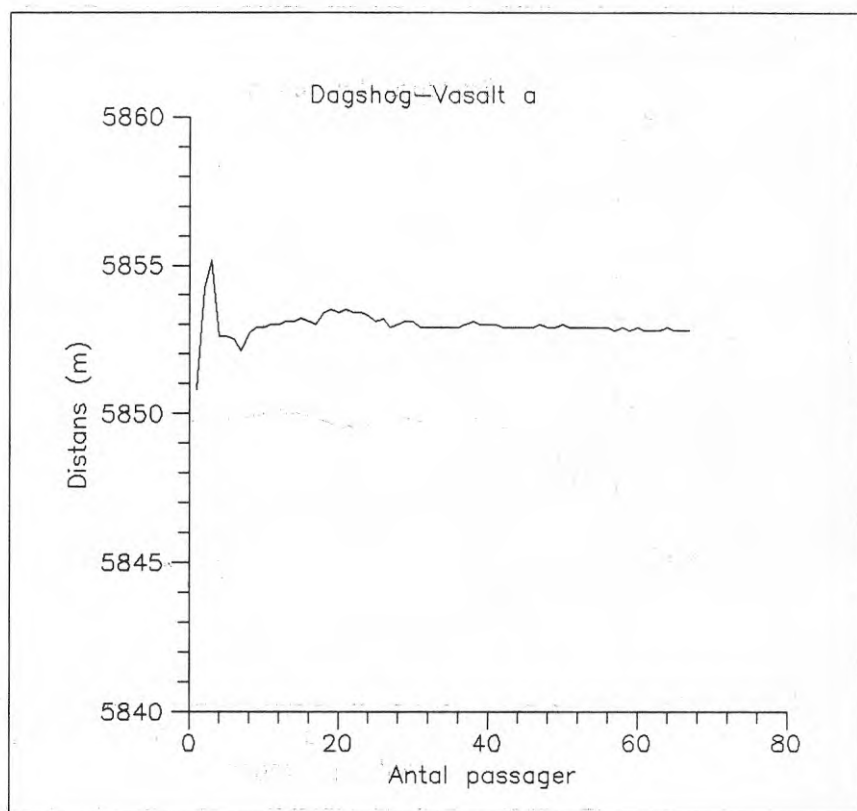


Figur 5.6 Avståndet mellan 10010-11410 (Knösen och Vasalt) beräknat ur erhållna satellitkoordinater. Figuren visar hur avståndet stabiliseras med antalet passager.

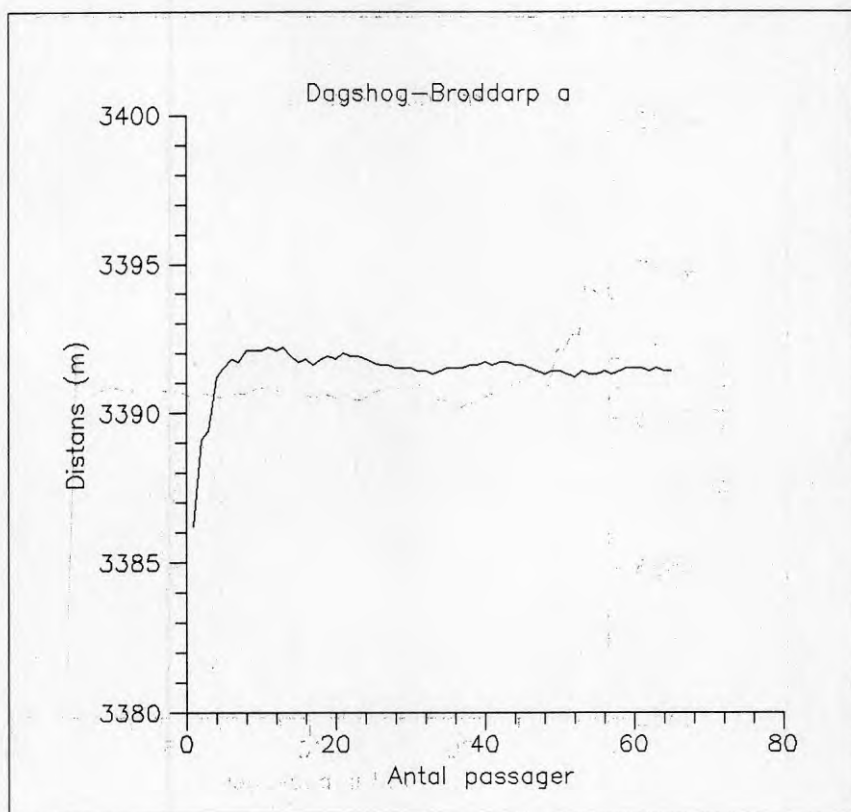




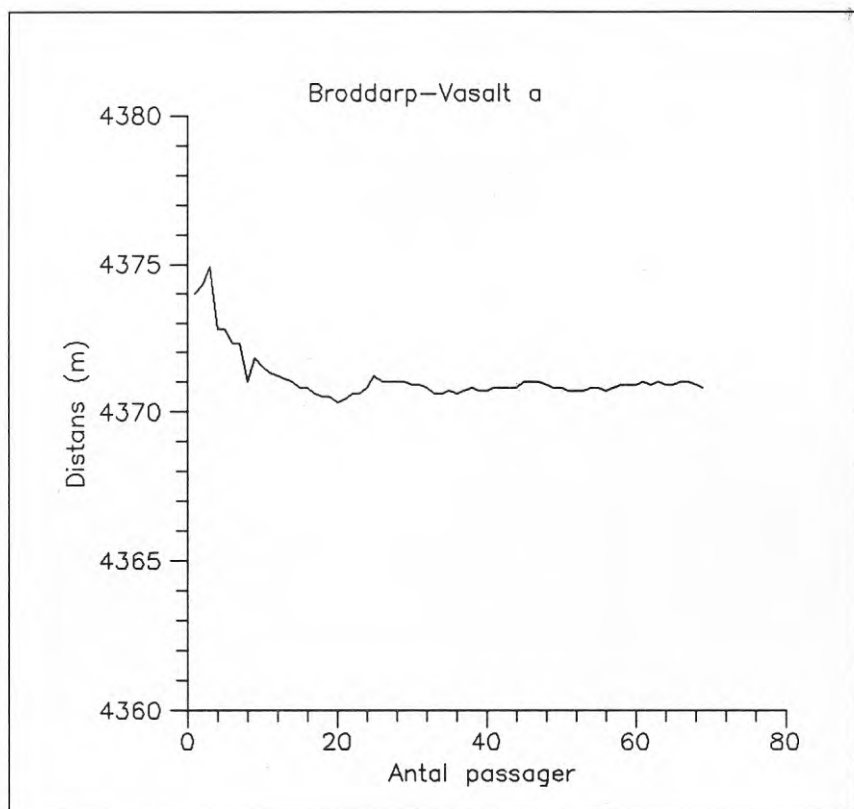
Figur 5.7 Avståndet mellan 10010-11720 (Knösen och Broddarp) beräknat ur erhållna satellitkoordinater. Figuren visar hur avståndet stabiliseras med antalet passager.



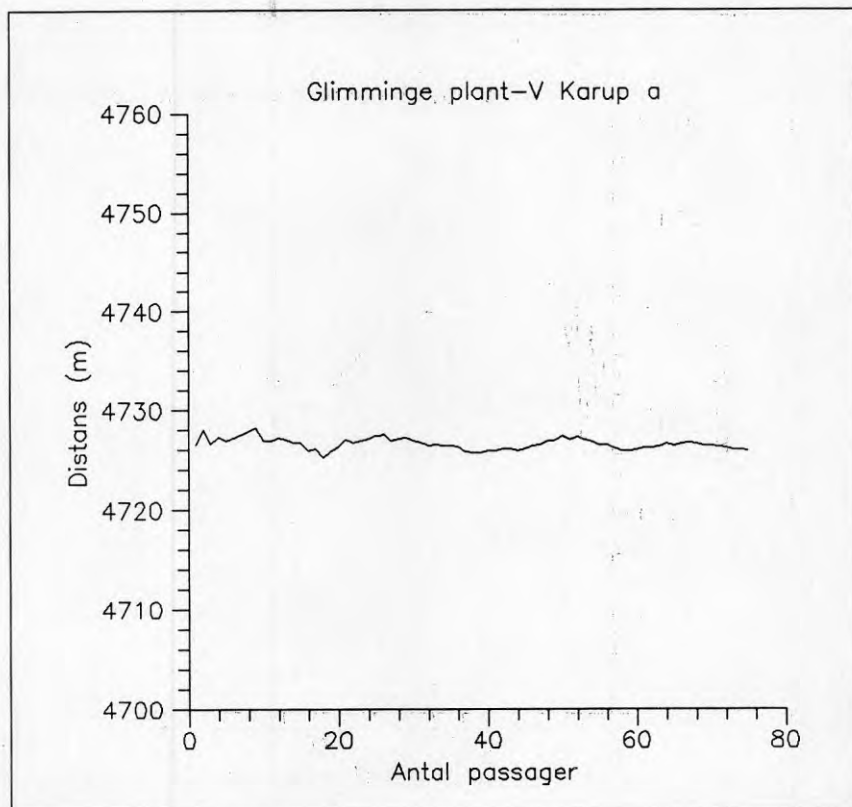
Figur 5.8 Avståndet mellan 10110-10410 (Dagshög och Vasalt) beräknat ur erhållna satellitkoordinater. Figuren visar hur avståndet stabiliseras med antalet passager.



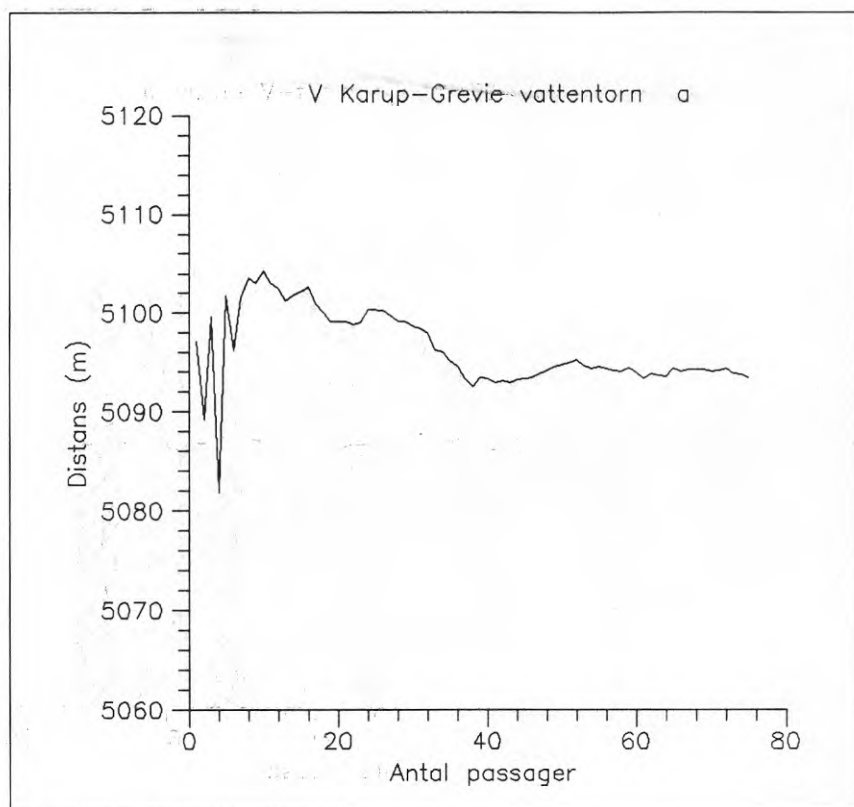
Figur 5.9 Avståndet mellan 10110-11720 (Dagshög och Broddarp) beräknat ur erhållna satellitkoordinater. Figuren visar hur avståndet stabiliseras med antalet passager.



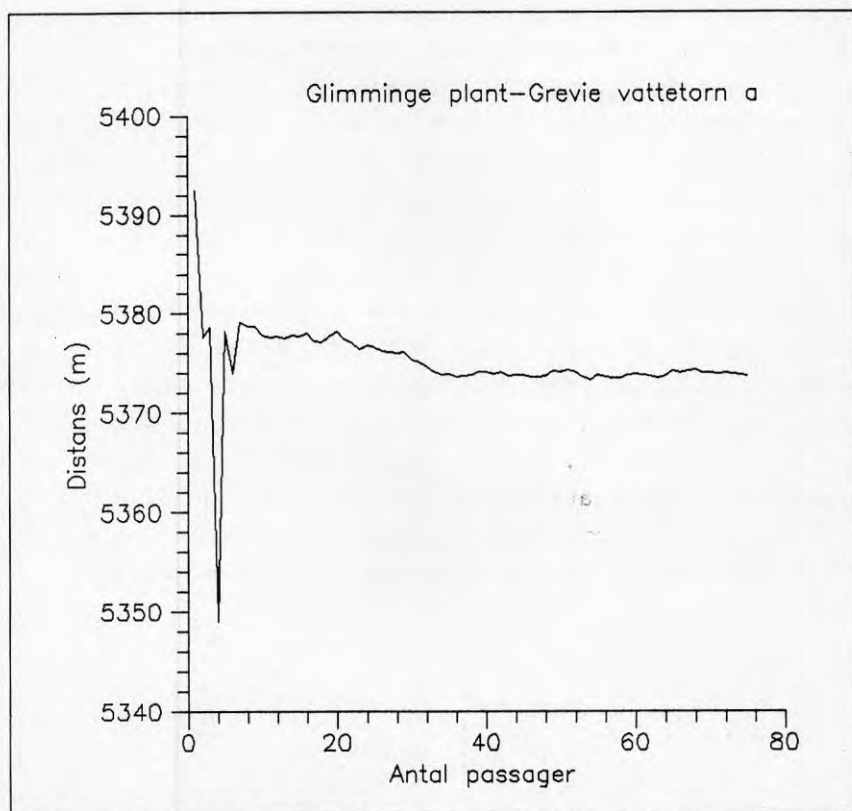
Figur 5.10 Avståndet mellan 11410-11720 (Vasalt och Broddarp) beräknat ur erhållna satellitkoordinater. Figuren visar hur avståndet stabiliseras med antalet passager.



Figur 5.11 Avståndet mellan 222-111 (Glimminge plantering och Västra Karups Vt) beräknat ur erhållna satellitkoordinater. Figuren visar hur avståndet stabiliseras med antalet passager.



Figur 5.12 Avståndet mellan 11430-111 (Grevie Vt och Västra Karup-VT) beräknat ur erhållna satellitkoordinater. Figuren visar hur avståndet stabiliseras med antalet passager.



Figur 5.13 Avståndet mellan 222-11430 (Glimminge plantering och Grevie Vt) beräknat ur erhållna satellitkoordinater. Figuren visar hur avståndet stabiliseras med antalet passager.

Vid utjämningsberäkningen med GEODOP har viktsmatrisen, som tillhör stationskoordinaterna normalt en diagonal form. Koefficienterna har samma värde. Viktsmatrisen kan dock uttrycka ett önskat tvång mellan stationerna, som t ex azimut eller avstånd. Detta medför att beräkningsmodellen kan genomföras med en mera realistisk viktsmatris. Därför har en ny beräkning utförts där den ur GEODOP erhållna viktsmatrisen från föregående beräkning har använts. Därvid måste naturligtvis beaktas att man på ett i och för sig otillåtet sätt ändrar storleksordningen på ingångskoordinaternas fel. Avsikten är att på ett realistiskt sätt införa tvångsvillkor mellan koordinaterna. Att detta inte på något väsentligt sätt förbättrade resultatet kan noteras. De fel, som erhålles med den nya viktsmatrisen är genomgående mindre än de ursprungliga med en faktor  $1/\sqrt{2}$  precis som man skulle förvänta sig vid en iteration med helt okorrigerade data. Man kan säga att resultatet tyder på en viss inre konsistens i beräkningssystemet. Nedan visas i figur 5.14 överst den ursprungliga viktsmatrisen för nät nr 2 och underst den erhållna som har använts i den nya beräkningen. I figur 5.15 visas på motsvarande sätt varians-kovarians matriserna.



.62500+003	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
	.62500+003	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
		.62500+003	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
			.62500+003	.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
				.62500+003	.00000	.00000	.00000	.00000
					.62500+003	.00000	.00000	.00000
						.62500+003	.00000	.00000
							.62500+003	.00000
								.62500+003
.16238+001	.13421+000	-.65342+000	.14009+001	.19976+000	-.65009+000	.13709+001	.21269+000	-.64436+000
	.10010+001	-.14600+000	.19597+000	.52451+000	-.15145+000	.20215+000	.47611+000	-.14802+000
		.65170+000	-.64911+000	-.15237+000	.49016+000	-.64666+000	-.15409+000	.47130+000
			.16423+001	.13757+000	-.64223+000	.13688+001	.21195+000	-.64189+000
				.10051+001	-.15967+000	.20503+000	.47452+000	-.15167+000
					.66703+000	-.64546+000	-.15676+000	.46955+000
						.14860+001	.18488+000	-.64164+000
							.70227+000	-.15737+000
								.55127+000

Figur 5.14 Viktsmatriser tillhörande nät nr 2.  
Den övre matrisen tillhör beräkning nr 1 och den undre beräkning nr 2.

.27246+000	.22519-001	-.10964+000	.23505+000	.33518-001	- .10908+000	.23002+000	.35687-001	-.10812+000
	.16795+000	-.24498-001	.32882-001	.88007-001	-.25413-001	.33918-001	.79886-001	-.24835-001
		.10935+000	-.10891+000	-.25566-001	.82243-001	-.10850+000	-.25855-001	.79079-001
			.27555+000	.23083-001	-.10776+000	.22967+000	.35562-001	-.10770+000
				.16864+000	-.26790-001	.34402-001	.79619-001	-.25449-001
					.11192+000	-.10830+000	-.26303-001	.78785-001
						.24933+000	.31021-001	-.10766+000
							.11783+000	-.26405-001
								.92497-001
.13668+000	.11348-001	-.55056-001	.11799+000	.16848-001	-.54776-001	.11545+000	.17935-001	-.54288-001
	.84037-001	-.12302-001	.16529-001	.44075-001	-.12759-001	.17046-001	.40003-001	-.12469-001
		.54791-001	-.54695-001	-.12837-001	.41246-001	-.54481-001	-.12981-001	.39660-001
			.13823+000	.11631-001	-.54117-001	.11528+000	.17873-001	-.54082-001
				.84385-001	-.13449-001	.17290-001	.39870-001	-.12777-001
					.56078-001	-.54381-001	-.13205-001	.39513-001
						.12509+000	.15601-001	-.54053-001
							.58960-001	-.13254-001
								.46361-001

Figur 5.15 Varians kovarians matriser tillhörande nät 2.  
Den övre matrisen tillhör beräkning nr 1 och den  
undre beräkning nr 2.

Från GEODOP erhöills följande resultat för nät 1 med ny viktsmatris.

Längder

Sträcka		Mätt längd	Sat.längd	Medel-	Diff
Från	Till	(m)	(m)	fel (m)	(m)
10010	10110	9833.633	9833.417	0.1546	0.216
10010	11410	8632.386	8632.488	0.0885	-0.102
10010	11720	6570.114	6569.631	0.1078	0,483
10110	11410	5853.293	5853.227	0.1990	0.066
10110	11720	3391.124	3391.138	0.1371	-0.014
11410	11720	4371.325	4371.325	0.1084	0.000

Totala antalet passager involverade i beräkningen var 321 st och frihetsgradens ackumulerade summa var 22259.

Från GEODOP erhöills följande resultat för nät 2 med ny viktsmatris.

Längder

Sträcka		Mätt längd	Sat.längd	Medel-	Diff
Från	Till	(m)	(m)	fel (m)	(m)
222	111		4726.161	0.2326	
11430	111		5374.446	0.2522	
222	11430		5095.447	0.1888	

Totala antalet passager involverade i beräkningen var 215 st och frihetsgradens ackumulerade summa var 8552.

De erhållna observationerna har uppvisat en större inhomogenitet än vad som förväntats. Utöver enbart avstånd mellan stationer har även tidpunkt, satellitens inflyg-

ningsvinkel och elevation studerats. Dessa redovisas för några avstånd i figurerna 5:16 till 5:21. Det förefaller inte finnas något systematiskt beroende mellan dessa olika variabler och erhållet resultat. I figurerna 5:22 och 5:23 visas några exempel på konvergens av  $x, y, z$ -koordinater.

I "A Satellite-Doppler Distance Measurement System" av S.L. Svensson har en normeringsfaktor för det förväntade felet införts. Denna betecknas med  $c$  och definieras som  $\sqrt{n} s$ , där  $n$  är antalet gemensamma passager och  $s$  är medelfelet i avståndet.

Sträcka		Antalet gemensamma passager	Normeringsfaktor $\sqrt{n} s$ (m)
Från	Till		
10010	10110	223	3.575
10010	11410	205	1.961
10010	11720	208	2.408
10110	11410	205	4.409
10110	11720	208	3.063
11410	11720	205	2.403

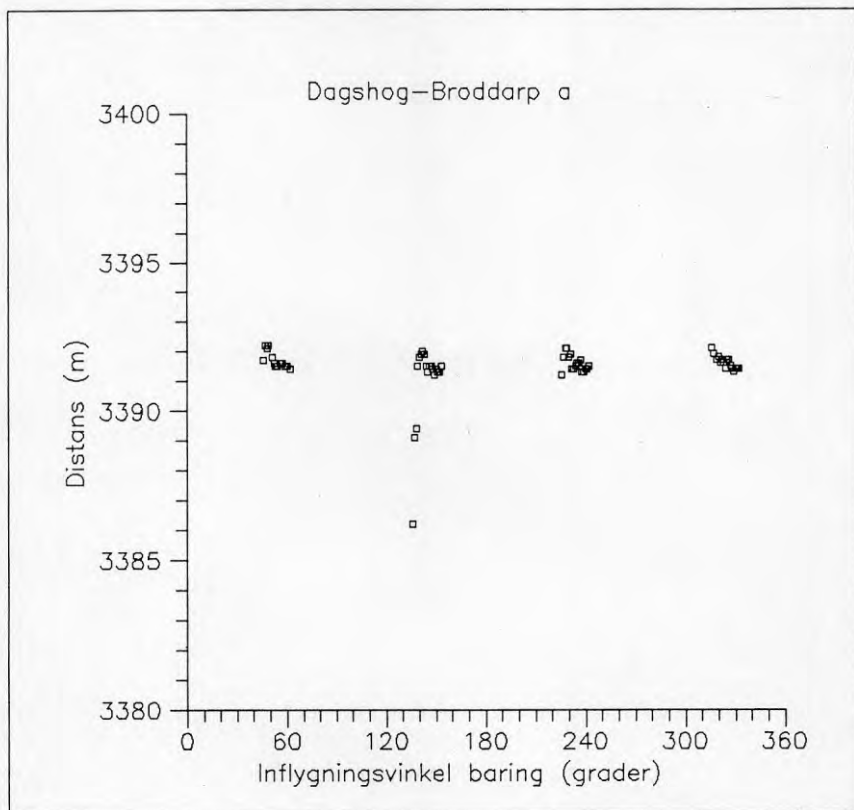
Från GEODOP erhöles följande resultat för nät nr 2.

#### Längder

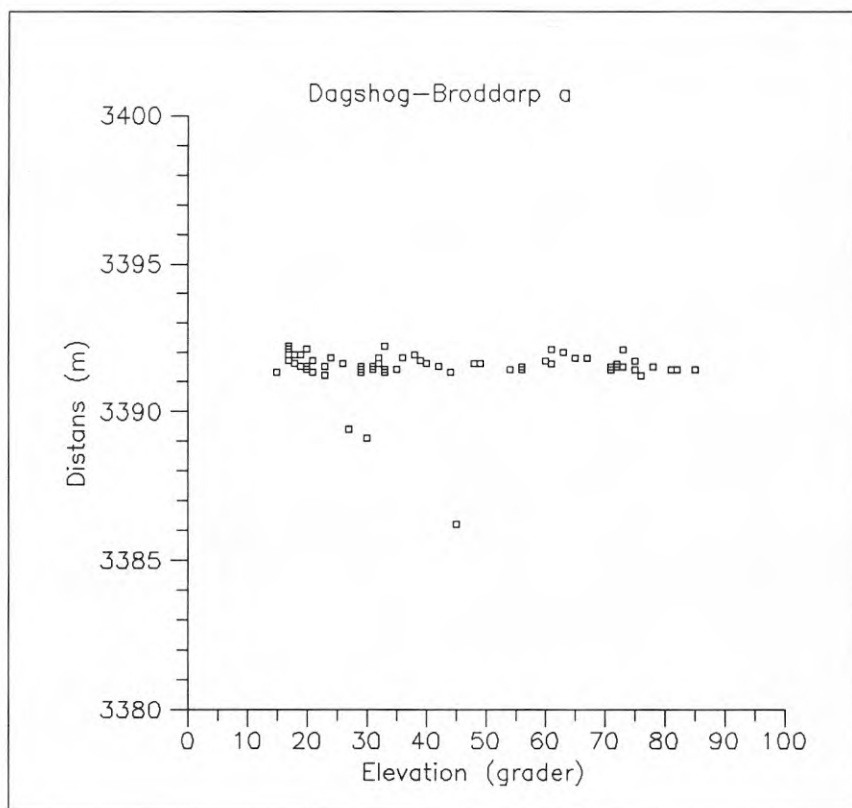
Sträcka		Antalet gemensamma passager	Normeringsfaktor $\sqrt{n} s$ (m)
Från	Till		
222	111	84	3.306
11430	111	84	3.585
222	11430	92	2.800

För nät nr 1 erhålles för de tre kortare avstånden ett medelvärde av 2.1 m för beräkning nr 1. Motsvarande för de tre längre avstånden är 3.4 m. Resultatet för nät nr 2 är 3.0 m. Dessa resultat skall jämföras med 1.7-1.9 m för avstånd 29-43 km och 2.1-3.4 m för avstånd 200-489 km i den tidigare undersökningen.



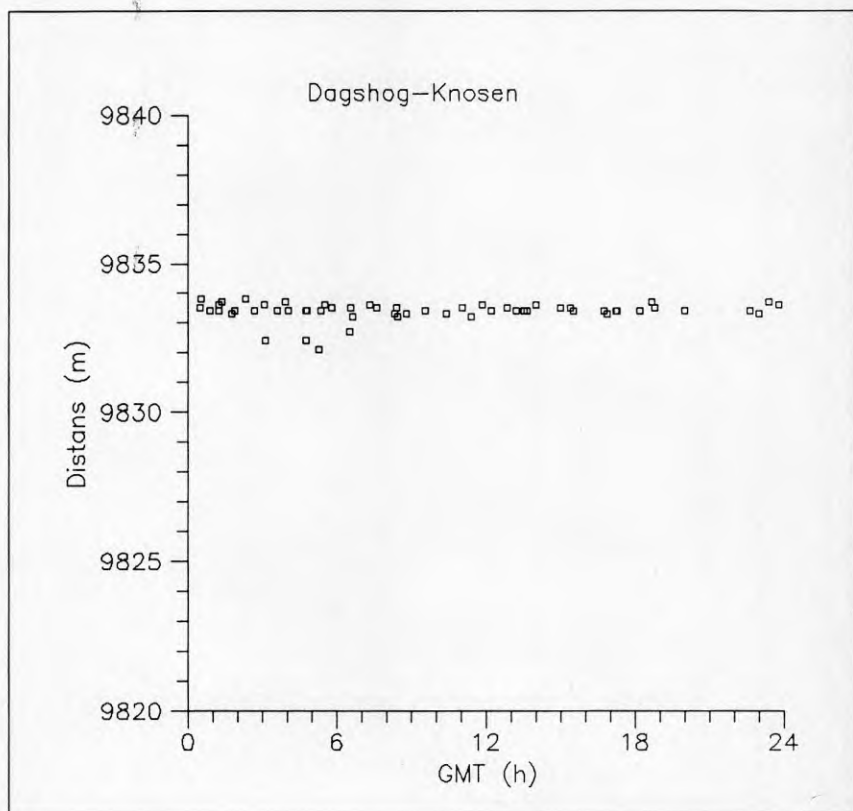


Figur 5.17 Figuren visar för en kortare sträcka (10110-11720) hur avståndet varierar beroende på satellitens inflygningsvinkel (vinkeln relateras till norriktningen).



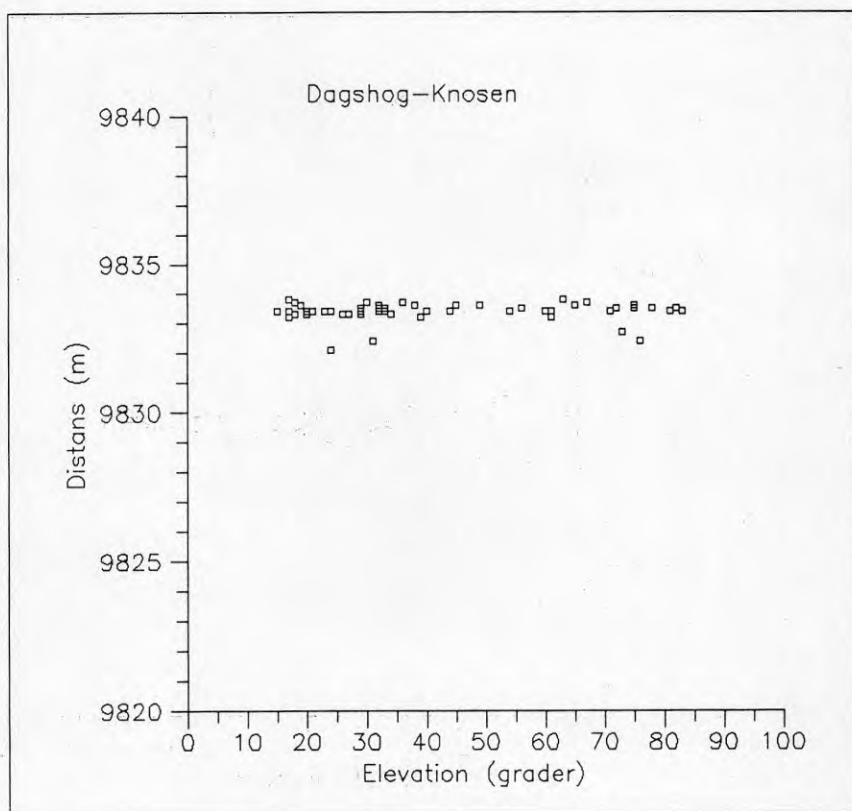
Figur 5.18 Figuren visar för en kortare sträcka (10110-11720) hur avståndet varierar beroende på satellitens elevation.



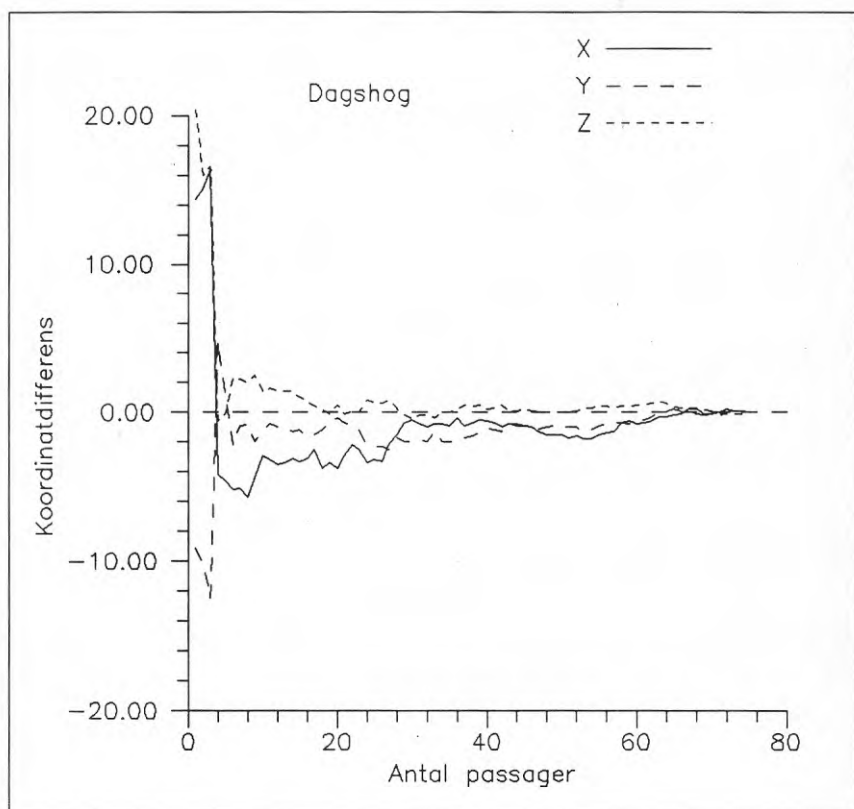


Figur 5.19 Figuren visar för en längre sträcka (10010-10110) hur avståndet varierar under dygnet.

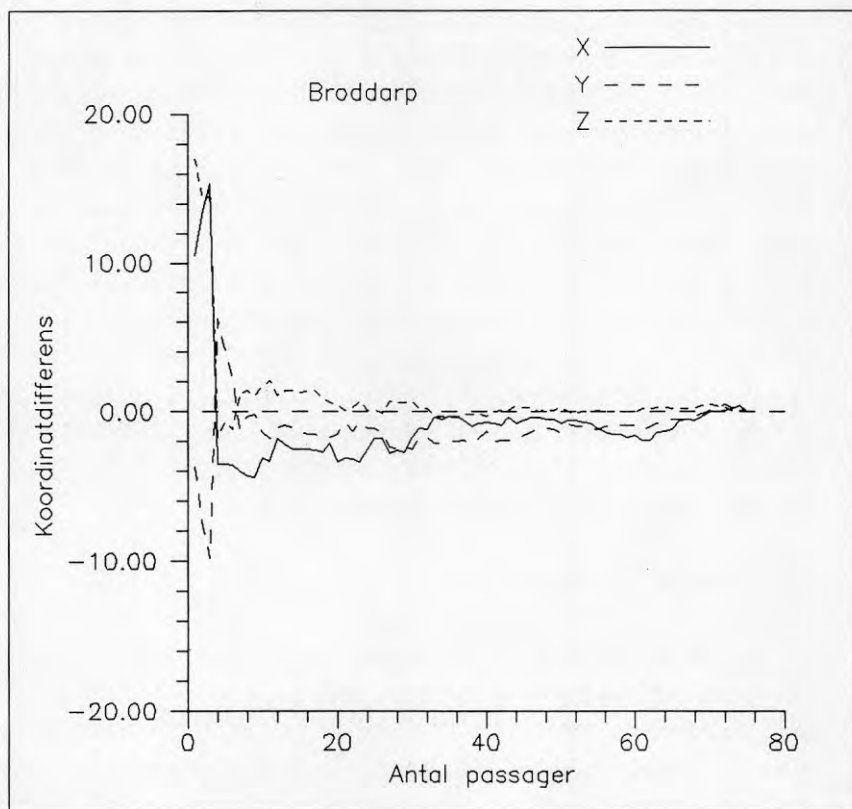




Figur 5.21 Figuren visar för en längre sträcka (10010-10110) hur avståndet varierar beroende på satellitens elevation.



Figur 5.22 Figuren visar för en station (10110) hur  $x, y, z$ -koordinaterna konvergerar som en funktion av antalet passager.



Figur 5.23 Figuren visar för en station (11720) hur  $x, y, z$ -koordinaterna konvergerar som en funktion av antalet passager.

### 5.1 Beräkningar med SWD2

De försök som tidigare utförts med programsystemet SWD2 och givit goda resultat för längre avstånd (Svensson S.L., "A Satellite Doppler Distance Measurement System", 1983) har inte kunnat genomföras här. Det huvudsakliga skälet för detta är de inhomogena data som erhållits under fältkampanjerna. Detta medförde att programsystemet SWD2 ej skulle ge någon signifikant skillnad mot GEODOP. Programmet är ursprungligen konstruerat för satellitdata från Magnavox MX 1502, som har bearbetats med PREDOP. De skillnader som finns mellan Magnavox MX 1502 och JMR-1 mottagarna gör det inte möjligt att direkt bearbeta JMR-data i programsystemet SWD2. Då det inte har funnits utrymme till ett omfattande programmeringsarbete inom projektets ram, utnyttjades i stället möjligheten att räkna om resultat från flerstationsutjämnningen med GEODOP. Sådana beräkningar har företagits av bl a C.L. Persson (1981) och torde vara i stort sett ekvivalenta med den ovan nämnda metoden.

### 5.2 Analys av resultaten

Det förväntade felet i avstånd efter  $n$  passager är  $\sigma=c/\sqrt{n}$ , där  $c$  är den normeringsfaktor, som infördes ovan. Omvänt, om det förväntade felet skall understiga en viss nivå  $\sigma_0$ , bör antalet passager vara  $n \geq (c/\sigma_0)^2$ . Skalfaktorn  $c$  är alltså ett gott mått på mätmetodens effektivitet. Därför måste det sägas vara ett negativt resultat av de gjorda beräkningarna att  $c$  snarast blev större än då 10 respektive 100 gånger längre avstånd mättes i tidigare undersökningar.

I själva verket pekar detta resultat på nödvändigheten att utveckla nya beräkningsmodeller, som bättre tar hand om starkt korrelerade observationer.

Sådana börjar komma i allt större utsträckning inför GPS-systemet, se Wells (Guide to GPS Positioning). Ett vanligt sätt att komma tillrätta med problem, som består i att ta tillvara korrelationer mellan observationer, är att bilda differenser (single differences, double differences etc.)

## 6 SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER

Resultaten visar att genom att bestämma avstånden ur de erhållna koordinaterna erhålls goda avståndsbestämningar under förutsättning att hänsyn tages till att observationerna från de olika mottagarna är korrelerade. Resultatet visar också att skillnaden mellan de med satellitmetoder bestämda längderna och mätta längder är mellan 0.000 till 0.216 m för dessa avstånd mellan 3390 m och 9834 m. Visserligen finns en avvikelse på 0.483 m för ett av avstånden, men denna avvikelse skiljer sig så radikalt från de övriga att den ej bör beaktas. Medelfelen i beräkningen för de olika längderna ligger mellan 0.1250 m och 0.2811 m.

Undersökningen har visat att Transit-Doppler systemet fortfarande kan vara ett utmärkt hjälpmedel för geodetiska ändamål. För att få tillförlitliga avståndsbestämningar bör problemet med de ofta mycket starkt korrelerade observationerna beaktas. Den tumregel som ges i "A Satellite Doppler Distance Measurement System" att felet i avstånd approximativt är  $3/\sqrt{n}$  i avstånd 200-500 km samt  $2/\sqrt{n}$  i avstånd 30-50 km kan ej direkt extrapoleras för avstånd 4-10 km. Här är  $n$  lika med antalet passager.

Genom att vidare studera och utveckla modeller för att skapa en mera realistisk felmodell för att kunna hantera de för kortare avstånd starkt korrelerade observationerna kan dels en metod utvecklas för att även i fortsättningen använda Transit-Doppler i 2:a ordningens triangelnät, dels att använda dessa erfarenheter för att studera motsvarande problem för Global Positioning System (GPS).



## 7 LITTERATURFÖRTECKNING

Brunell, R.D., (1980) How to obtain the best results from NNSS. JMR Document No. 80026, JMR Instruments Inc, Chatsworth, USA.

DECCA SURVEY, Group Technical Publication. "Decca survey sat-fix. Surveying by satellite. An introduction to U.S. Navy Navigational Satellite System and JMR Survey Equipment as used for geodetic and marine survey work." Brixham, England.

Jonsson, B. (1980) Positionsbestämning vid Lantmäteriverket med hjälp av portable dopplermottagare. Lantmäteriverket, Teknisk tidskrift 1980:6

JMR Instruments Inc. (1972) GP-1S Program suite, an overview and operator's manual. JMR Document No. 2003500-8, revised 1982. Chatsworth, USA.

Kouba, J. (1974) Program GEODOP. Mathematical Adjustment Section, Geodetic Survey of Canada, Survey and Mapping Branch, Dept. of Energy, Mines & Research. Ottawa, Canada.

Lawnikanis, P.G. (1975) GEODOP Utilities Programs. Computations and Adjustments Section, Geodetic Survey of Canada, Surveys and Mapping Branch, Dept. of Energy, Mines & Resources. Ottawa, Canada.

MAGNAVOX (1979) Surveyor's Operation and Service Manual MX 1502, Satellite Surveyor. Magnavox Report R-5807C, No. 60029, Magnavox Government and Industrial Electronics Company, Advanced Products Division, Torrance, USA

- Persson, C.-G. (1982) Adjustment and Statistical Filtering of Satellite Doppler Observations, Inst för Geodesi, Kungl. Tekniska Högskolan, Stockholm.
- Sjöberg, L.E. (1981) Geodetiska satellitmetoder - en översikt. Lantmäteriverket, Teknisk Tidskrift 1981:6.
- Stansell, T.A. (1978) The Transit-Navigational Satellite System, Magnavox Government and Industrial Electronics Company, Torrance, USA
- Svensson, L. (1983) A Satellite-Doppler Distance Measurement System. Inst för Geodesi, Kungl. Tekniska Högskolan, Stockholm.
- Svensson, L. (1984) Satellit- och fysikalisk geodesi. Geodetisk Mätningsteknik, Tekniska Högskolan i Lund, Lunds universitet.
- Wells, D.E. (1986) Recommended GPS Terminology. Dept. Surveying Engineering, University of New Brunswick, New Brunswick, Canada.
- Wells, D.E. Red. (1986) Guide to GPS Positioning. Canadian GPS Associates, Fredericton, N.B., Canada.

**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 840575-5  
från Statens råd för byggnadsforskning till Inst. för geoteknologi,  
LNTH, Lund.**

**Art.nr: 6709054**

**Abonnemangsgrupp:  
S. Byggplatsens verksamhet  
T. Fastighetsförvaltning  
V. Anläggningsteknik**

**R54: 1989**

**ISBN 91-540-5045-6**

**Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm**

**Distribution:  
Svensk Byggtjänst  
171 88 Solna**

**Cirkapris: 40 kr exkl moms**