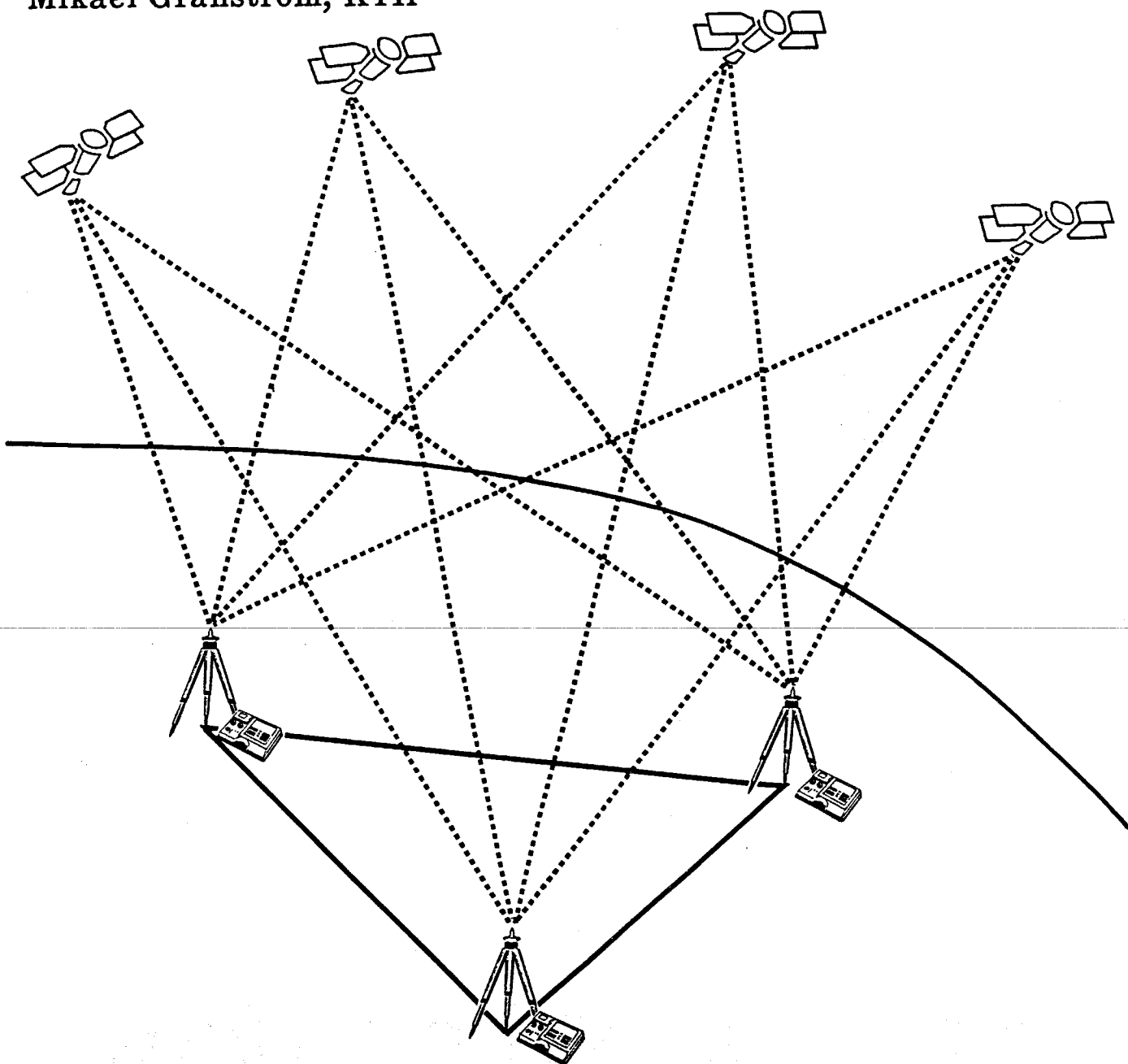


# MÄTNING AV MINDRE PRIMÄRNÄT MED GPS-TEKNIK

Examensarbete av  
Mikael Granström, KTH



Lantmäteriverkets senaste Tekniska skrifter i geodesi

- 1987:6 Nordqvist A & Olsson A: Längdmätning mot plastreflektorer, tillämpad vid upprättande och utnyttjande av mindre primärnät.
- 1987:9 Svensson R: Precision och tillförlitlighet vid fri uppställning - en simuleringsstudie.
- 1987:11 Lidberg M & Svensson R: En studie av viktsfunktionen vid trigonometrisk höjdmätning i samband med fri uppställning.
- 1987:12 Karlsson B & Löfqvist R: Koordinatsystemsbyte i kommunala nät.
- 1987:18 Jivall A-C & Jakobsson L: Mäta med GPS - beräkningsprogram samt detaljstudie och beräkningsexempel med POPS.
- 1988:10 Becker J-M: Tröghetspositioneringstekniken.
- 1988:12 Becker J-M, Lithén T, Nordqvist A: Erfarenheter med motoriserad trigonometrisk höjdbestämningsteknik (MTL) - jämförelser med övriga tekniker. (Engelsk version 1988:23.)
- 1988:16 Haller L-Å & Ekman M: The Fundamental Gravity Network of Sweden.
- 1988:24 Lidberg M: Frihöjd - ett datorprogram för höjdbestämning vid fri uppställning.
- 1988:26 Ekman M: The Impact of Geodynamic Phenomena on Systems for Height and Gravity.
- 1989:4 Ekman M: Geodesins historia i Sverige - en liten översikt.
- 1990:3 Edgren M & Sundstrand G: Utredning om och förslag till stornät och koordinatsystem i Stor-Stockholm.
- 1990:8 Becker J-M: The Swedish Experience with the ISS Uliss 30 - Results from Tests and Pilot Projects.
- 1990:10 Hedling G, Jivall A-C, Jonsson B: Results and Experiences from GPS Measurements 1987 - 1990 - SVENAV-87, Local Control Networks and Dual-frequency Measurements.
- 1990:11 Jonsson B & Jivall A-C: Experiences from Kinematic GPS Measurements.
- 1990:13 Jivall A-C & Ollvik L: BFR-projektet "Pseudo-kinematisk/kinematisk GPS-mätning för geodetiska tillämpningar" - lägesrapport för etapp 1.



Titel

MÄTNING AV MINDRE PRIMÄRNÄT MED GPS-TEKNIK

av Mikael Granström

Huvudinnehåll

Denna rapport utgör resultatet av ett examensarbete som utförts vid geodetiska utvecklingsenheten under okt-nov 1988. Arbetet har bestått i att genomföra ett praktiskt fältförsök, för att studera GPS-teknikens möjligheter och eventuella begränsningar vid upprättande av ett mindre primärnät för byggplatsmätningar. GPS-mätningarna har utförts med Wild-Magnavox WM 101 i Byggeforskningsinstitutets testnät vid Mårtsbo-observatoriet. För beräkningen har Wild-Magnavox beräkningsprogram PoPS ver 2.02 använts.

Undertecknade har fungerat som handledare för arbetet.

Lars Sjöberg  
Geodetiska Institutionen  
KTH, Stockholm

Bo Jonsson  
Kartavdelningen  
Geodetiska utvecklings-  
enheten  
LMV, Gävle

---

LDOK

Kg Satellitgeodesi

---

Beställs hos

Lantmäteriverket  
Blankettförrådet  
801 82 GÄVLE

Allmänna Förlaget



# INNEHÅLLSFÖRTECKNING

FÖRORD

SAMMANFATTNING

ABSTRACT

<u>INNEHÅLLSFÖRTECKNING</u>	SID
1 INLEDNING	1
2 PRIMÄRNÄT	2
2.1 Byggmätning	2
2.2 Primärnät	3
2.3 Testnät	3
3 GPS-SYSTEMET	5
3.1 Satellitsystemet	5
3.2 Styr- och övervakningssystem	6
3.3 Koordinatsystem	7
3.4 GPS-mottagare	7
4 FÖRUTSÄTTNINGAR FÖR EXAMENSARBETET	10
5 NÄTUTFORMNING	11
5.1 Empirisk metod	11
5.2 Snays metod	12
5.2.1 Kriterier för nätutformning	12
5.2.2 Slingalgoritmer för Snays metod	13
6 PLANERING AV MÄTNING I PRIMÄRNÄT	16
6.1 Terrestra mätmetoder	16
6.2 GPS-mätning	18

7	MÄTNING	20
7.1	Förberedande arbete	20
7.1.1	Försöksområde	20
7.1.2	Satellittäckning	21
7.2	Mätningarnas genomförande	22
8	BERÄKNING	25
8.1	Beräkningsprogrammet PoPS	25
8.2	Beräkning av mätdata	28
9	ANALYS AV MÄTRESULTAT	30
9.1	Längdjämförelser	30
9.1.1	Byggnorm för bedömning av punktnoggrannhet	30
9.1.2	Analys av GPS-mätningarna	30
9.2	Transformationer	34
10	SLUTORD	37
11	REFERENSER	38
12	BILAGOR	39

## FÖRORD

Denna rapport utgör resultatet av ett examensarbete utfört under hösten 1988 vid geodetiska utvecklingsenheten, Lantmäteriverket. Arbetet har bestått i att genomföra ett praktiskt fältförsök, för att studera GPS-teknikens möjligheter och eventuella begränsningar vid upprättande av ett mindre primärnät för byggplatsmätningar.

Handledare för projektet har varit observator Bo Jonsson, geodetiska utvecklingsenheten, LMV och professor Lars Sjöberg institutionen för geodesi, KTH. Jag vill tacka dem för deras goda råd och synpunkter, vilket underlättat färdigställandet av denna rapport. Hjärtligt tack även till Gunnar Hedling, Ann-Charlotte Jivall, Martin Lidberg och Kurt Nilsson, samtliga från LMV, för deras beaktningsvärda arbetsinsats i samband med fältarbetet.

Mikael Granström



GPS-observatör i aktion, med satellit-mottagare WM 101.  
(Foto: WM Satellite Survey Company)

## SAMMANFATTNING

Syftet med projektet var att undersöka förutsättningarna för att upprätta ett mindre primärnät för byggplatsmätningar med hjälp av GPS-teknik. Mätningarna genomfördes under åtta dagar i okt-nov 1988 på byggforskningsinstitutets testnät i Mårtsbo, 11 km SO om Gävle. Nätet är ett byggplatstäckande system och består av sju fixpunkter bestämda i både plan och höjd. Avståndet mellan punkterna är maximalt 200 meter.

Tre enfrekvens-mottagare av fabrikat Wild Magnavox, WM 101 användes vid mätningarna. Bearbetningen av insamlat observationsmaterial utfördes med tillhörande beräkningsprogram PoPS (Post Processing Software), version 2.02.

En stor nackdel med GPS är att det vid mätningarna behövs minst tre mottagare för att kunna utnyttja tekniken på ett rationellt sätt. Detta innebar höga instrumentkostnader eftersom GPS-tekniken ännu inte var färdigutvecklad vid denna tidpunkt. Varje mottagare betingade ett betydligt högre pris än en traditionell totalstation.

En förutsättning för ett effektivt upprättande av mindre primärnät är att mätningarna kan genomföras med markuppställning. Montering av antenner på teleskopmaster eller med förlängare på stativ vid mätningarna, är en faktor, som förutom att den är tidsödande, knappast bidrar till att öka punktnoggrannheten. I vårt fall var dock inte förutsättningarna helt idealiska eftersom det krävdes speciella åtgärder vid tre punkter för att få fri sikt till satelliterna.

Vid inmätningen användes två olika observationsstrategier: dels mätning med gemensamma baslinjer mellan observations-sessioner, dels mätning enligt Snays metod. Man kan konstatera att osäkerheten i GPS-mätningarna och överensstämmelsen med de terrestra bestämningarna är av den storleksordningen att det inte är möjligt att uppfylla de krav som ställs på noggrannheten för mindre primärnät. Några säkra slutsatser beträffande vilken mätprecision som kan uppnås i de båda strategierna är svåra att fastslå. De erhållna avvikelserna mellan metoderna beror av allt att döma på kvalitets-skillnader i observerade mätdata.

Mätning av korta eller långa avstånd (100 m eller 1 km) kräver i princip lika lång observationstid. Mättidens längd avgörs också från fall till fall mycket beroende på erfarenheter av dylika mätningar. En minskning av observationstiden är absolut nödvändigt ifall GPS skall kunna användas rutin mässigt vid mätning av korta avstånd.

En vidareutveckling av den statistiska relativa mätningen, pseudo-kinematisk mätning, har visat sig vara en möjlig väg att nedbringa observationstiden utan att noggrannheten i mätningarna försämras.

De interna medelfel som redovisas i beräkningen, då PoPS användes, är presenterade på ett sådant sätt att inga direkta möjligheter finns för att uppskatta noggrannheten i mätningarna. En fortsatt utveckling på detta område är nödvändig för att rimliga noggrannhetsanalyser skall kunna utföras. Ur kontroll- och säkerhetssynpunkt är det att rekommendera att åtminstone två oberoende uppställningar sker på varje punkt i nätet vid mätning av korta avstånd.

När registrerade mätdata är av sämre kvalitet, vilket kan vara svårt att konstatera under mätförloppet, krävs att observationstiden förlängs för att erhålla ett bra resultat. I sessioner med sämre mätdata än normalt var beräkningarna relativt komplicerade och tidskrävande.

Trots att beräkningsprogrammet PoPS är logiskt uppbyggt och välstrukturerat, förekommer det i den version som användes, i mitt tycke, påtagligt många manuella ingrepp i en fullständig GPS-beräkning för att det skall fungera effektivt för praktisk användning. Dessa förhållanden har förbättrats i den nya upplagan av PoPS, version 3.1.

Resultaten från försöken visar att det är nödvändigt med fortsatt utveckling av såväl GPS-mottagare och beräkningsprogram som observationsmetod innan GPS-tekniken kan utnyttjas på ett snabbt och tillförlitligt sätt vid rutinmässig mätning av korta avstånd.

Som ovan sagts är det ett flertal faktorer som är svåra att bemästra. Utvecklingen går dock snabbt framåt, och mycket av svårigheterna under detta arbete har nu lösts på ett tillfredsställande sätt. GPS-tekniken torde inom några år vara användarvänlig för produktionsmätningar även i detta sammanhang.



## ABSTRACT

The purpose of the project was to investigate the conditions for establishing a small primary network for a building site by GPS-technique. The observations were carried out during eight days in October-November 1988 at the National Swedish Institute for Building Research test network in Mårtsbo, 11 km S.E. of Gävle. The network is a building covering one, consisting of seven fix points fixed both in horizontal plane and in height. The distances between the points are at most 200 meters.

Three one-frequency receivers of the Wild Magnavox make, WM 101, were used for the measurements. The processing of the collected observation material was made with the matching calculation program PoPS (Post Processing Software) version 2.02.

One big disadvantage with GPS is that at least three receivers are required in order to fully utilize the technique. This means high cost of instrumentation, because the GPS-technique was not fully developed at that time. Each receiver involved a considerably higher price than that of the traditional total-station.

A condition for an effective set up of a smaller primary network is that the observations can be carried out with ground instrument set-ups. The rigging of antennas at the observations, either on masts or with extensions on tripods, is a factor that, besides being time consuming, deteriorates the accuracy. In our case conditions were not ideal since it required special cautions at three of the points in order to get a clear line of sight to the satellites.

Two different observation strategies were applied: partly measuring with common baseline between observation sessions, partly measuring according to Snays method. It can be concluded that the variance in the GPS-data and the agreement with the terrestrial data is of such a magnitude that it is not possible to meet the demands on accuracy for small primary networks. Any firm conclusions regarding the measuring precision that can be achieved with the different strategies is hard to make. The obtained variances between methods are most likely due to quality differences in the observations.

The observation of short ( $\sim 100$  m) or long distances ( $\sim 1$  km) basically requires equally long observation time. The length of the observation time is also decided from case to case principally based on experiences from similar observation sessions. A shortening of the observation time is definitely required if the GPS-technique is to be used on a routine basis.

A further development of the "static" relative technique, pseudo-kinematic observation has proved to be a possible way of shortening the observation time without impairing the precision.

The computed internal standard errors in PoPS-computations are presented in such a way that there is no possibilities to estimate the accuracy of the measurements. Further research in this field is necessary in order to come up with reasonable accurate estimates. From a control and reliability point of view it is recommended that at least two independent measurements are carried out at each point in the network for short distances.

If recorded data is of inferior quality, which can be difficult to detect during the survey, it is required that the observation time is prolonged in order to achieve a good result. In sessions with less good data, the computations were rather complicated and time consuming.

In spite of the fact that the PoPS is a logical and well structured program, it occurs in the used version, in my opinion, definitely too many manual operations are required in a complete GPS-processing in order to be functional and effective. This fact is much improved in the new edition of PoPS, version 3.1.

The results of the tests show that both GPS receivers and processing software as well as observation methods have to be further developed before the GPS-technique can be used rapidly and satisfactory for determination of short distance on a routine basis.

As earlier mentioned, there are a number of factors that are difficult to control. However, the development is proceeding rapidly, and much of the difficulties experienced during this work have now been solved satisfactory. Within a few years the GPS-technique should be easy to use for production surveys also in this type of networks.

## 1 INLEDNING

Mätningar på eller i anslutning till jorden för bestämning av dess form, dimensioner, massfördelning och gravitationsfält har sedan urminnes tid fångat människans intresse. Det först kända försöket att utföra en direkt bestämning av jordens dimensioner sträcker sig så långt tillbaka i tiden som år 200 f Kr och utfördes av egyptiern Eratosthenes.

Under århundraden har mättekniken efter hand förfinats, för att i dag bestå av mycket avancerade system baserade på satelliter. Introduktionen av navigations- och positioneringssystemet, NAVSTAR-GPS (The NAVigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System), kommer på sikt med all sannolikhet att få stort inflytande på och även öppna nya möjligheter för den framtida utvecklingen inom bl a den geodetiska mättningssektorn.

När satellitsystemet är fullt utbyggt, i mitten av 90-talet, och tillgången till färdigutvecklade observationsmetoder och beräkningsprogram ökar torde en rutinmässig användning av GPS-tekniken få stor betydelse vid geodetisk mätning ur såväl teknisk som ekonomisk synvinkel. Redan i dag användes GPS-tekniken för produktionsarbeten, i de fall där det är lämpligt, t ex vid uppmätning och anslutning av lokala stornät. Noggrannheten vid relativ positionering, dvs bestämning av en punkts läge i förhållande till en referensstation (med kända koordinater), kan i dag ur  $\frac{1}{2}$ - $1\frac{1}{2}$  timmes observationer i allmänhet bestämmas med centimeter noggrannhet.

Tack vare GPS-systemets flexibilitet, är det möjligt att finna tillämpningar för tekniken inom de flesta delområden av den geodetiska mätningen t ex vid vetenskapliga försök, större regionala projekt, samhällsmätning eller byggplatsmätning.

Eftersom tillämpning av GPS-tekniken inom samhällsmätning alltjämt befinner sig i en utvecklingsfas, bedömdes möjligheterna att finna uppslag till intressanta projekt inom området som goda. Kontakt togs med verksam instans, lantmäteriverket i Gävle, där det förutom utvecklingsverksamhet även har byggts upp både sakkunskap och teknisk kompetens inom GPS-området. Upprättande av ett mindre lokalt primärnät för byggplatsmätningar bedömdes vara en lämplig uppgift som examensarbete.

## 2 PRIMÄRNÄT

I TFA rekommenderas att i princip alla stommätningar skall anslutas till rikets system, enligt 6 § mätning-kungörelsen (MK). Avsteg från denna huvudregel sker i många fall av såväl praktiska som ekonomiska skäl. Vid upprättande av lokala system för byggplatsmätningar är detta snarare regel än undantag.

### 2.1 BYGGMÄTNING

Vid mätningar på större byggarbetsplatser är syftet med utsättningsarbetet att markera huvudpunkter (baslinjer och detaljpunkter), för att ange läget i plan och höjd, för olika byggnadskomponenter i en byggnadskropp. Användningen av prefabricerade byggelement tillsammans med höga arbetskostnader för justeringar innebär att relativt snäva toleranskrav måste uppfyllas vid utsättning av detaljpunkters läge i en byggnadskropp.

Vid byggnadstekniska mätningar är det främst närnoggrannheten (inbördes noggrannheten) mellan de detaljpunkter som styr byggelementens inpassning i byggnadskroppen och mot varandra som är av väsentlig betydelse, inte avvikelser i relation till andra närbelägna byggnadskroppar.

När det gäller byggnadskroppar skiljer man vanligen mellan yttre noggrannhet (läge och orientering) och inre noggrannhet (storlek och form). I det förra fallet är kraven ofta inte större än att de kommunala stomnäten kan godtas för utsättning. I det senare fallet däremot är kraven i regel så stora att motsägelser (spänningar) i ett befintligt nät inte kan accepteras. Motsägelseerna kan bero på:

- att utjämning av nätet har skett i olika ordningar, med olika grader av noggrannhet
- att mätinstrument med olika noggrannhet har används
- nätets geometriska utformning
- felaktigheter i beräkningarna
- rubbade utgångspunkter.

En förutsättning för ett rationellt byggande och god kvalitet, är att utsättningsens noggrannhet inte påverkas av fel i lägesbestämningen i omgivande referenspunkter. Komponenters sammansättning till ett färdigt hus kommer att fungera endast om tillverknings-, monterings- och utsättningstoleranserna beaktas. Det blir därför i regel nödvändigt att anlägga ett lokalt primärsystem vid lite större husbyggnadsprojekt.

## 2.2 PRIMÄRNÄT

Med primärnät avses ett system av fixpunkter (primärpunkter) inom ett begränsat mätningssområde, t ex en byggarbetsplats, till vilket all övrig geodetisk mätning under byggtiden är relaterad. Primärpunkterna sammanförs vid inmätningen vanligtvis till ett enda nät för att sedan beräknas och utjämnas i sin helhet, ett lokalt byggsplats-täckande system har upprättats.

Lokalt innebär det att anslutning av nätet endast sker i en punkt, ex en koordinatbestämd punkt i ett kommunalt stamnät eller något annat officiellt system. Eventuella motsägelser vid anslutning av ett primärsystem till ett överordnat system bör normalt inte utjämnas i nätet. Felaktigheter i lägesbestämningen i referenspunkterna kan medföra tvång vid beräkningen vilket lätt leder till deformationer i det nybestämda nätet. Det viktiga är som tidigare betonats, att de bestämda punkterna i nätet skall ha en hög inbördes noggrannhet.

För att bestämma ett primärsystem med den punktnoggrannhet som är nödvändig vid byggmätning, krävs att såväl mätning som beräkning har genomförts på ett tillfredsställande sätt. Men eftersom punktnoggrannheten inte bara beror på mätnoggrannheten är det även viktigt att nätets geometriska utformning har utförts enligt de normer som rekommenderas i den internationella standarden för utsättning och inmätning, SS-ISO 4463.

En fördel med ett välbestämt primärnät är att flexiblere metoder, som inskränning, inbindning eller skärbindning, kan tillämpas vid utsättningsarbetet. Vid mätningar på byggarbetsplatser händer det ganska ofta att utsättaren råkar ut för tillfälliga sikthinder, i form av uppställda arbetsmaskiner, störande trafik etc. I stället för att vara bunden till ett fast punktläge är det att föredra en fri uppställning som eliminerar alla störande inslag.

## 2.3 TESTNÄT

Statens institut för byggnadsforskning erhöll i samband med utflyttningen till Gävle anslag för anläggande av ett provfält för byggnadsmätningar. Provfältet är beläget i Mårtsbo, 11 km SO om Gävle och består av primärnät, ett kombinerat sekundär/detaljnät samt en längdmätningssbas, se figur 1.

För att på ett ändamålsenligt sätt täcka det aktuella mätområdet, har primärnätet utformats som ett triangelnät. Primärnätet består av totalt sju fixpunkter, bestämda i plan och höjd, vilka är markerade i fast berg med dubbar av rostfritt stål.



### 3 GPS-SYSTEMET

NAVSTAR-GPS (NAVigation Satellite Time and Ranging Global Positioning System) är ett amerikanskt satellitsystem för navigering och positionering, som är under uppbyggnad. GPS-systemet är främst avsett för realtidspositionering vid militära tillämpningar på land, i luften och till sjöss, för de amerikanska enheterna och dess NATO-allierade. Under utvecklingsfasen är GPS-systemet fullt tillgängligt även för civila användare. När systemet är fullt utbyggt kan tillgängligheten till koderna begränsas men detta har troligen inga allvarliga begränsningar vid geodetiska tillämpningar.

GPS-systemet består av tre huvuddelar:

- rymddelen med de aktiva satelliterna utplacerade i olika banor på 20200 km höjd med en omloppstid på 12 timmar, stjärntid
- kontroldelen för övervakning och styrning av satelliterna
- användardelen med olika typer av GPS-mottagare anpassade för skilda användningsområden.

#### 3.1 SATELLITSYSTEMET

Sedan mitten av 1960-talet har amerikanska flottan och flygvapnet bedrivit enskilda projekt för utveckling av passiva navigationssystem, envägssystem. USA:s försvarsdepartement beslöt år 1973 att dessa projekt skulle läggas samman. Riktlinjer för utveckling av ett nytt satellitsystem utarbetades nämligen NAVSTAR-GPS.

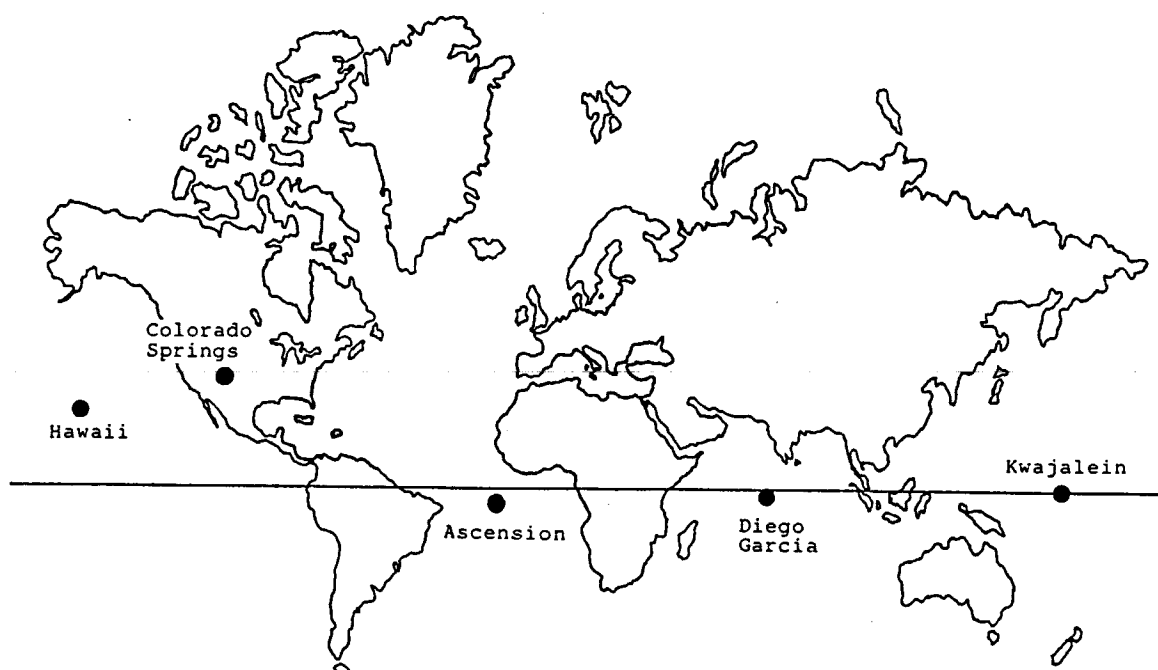
Vid examensarbetets genomförande hösten 1988 bestod GPS-systemet av sju aktiva prototypsatelliter, s k block I-satelliter. En av dessa, NAVSTAR 4/PRN 8 har uppvisat problem med frekvensnormalen (oscillatorn - vilken genererar bärvåg och kod) och bör användas med viss uppmärksamhet, det kan inträffa att vissa mottagare tappar "låsningen" av satellitsignalen.

Under testfasen är prototypsatelliterna placerade i tre olika banplan med 63° lutning (inklination) mot ekvatorplanet. Banornas läge har valts så att bästa möjliga täckning skall uppnås för testning av systemet över två militära områden i USA. För mätningar i Sverige (okt 1988) innebär detta att minst fyra satelliter är synliga över horisonten samtidigt under cirka fem timmar per dygn.

Fasen med produktionssatelliterna, block II-satelliterna, planerades att vara fullt utbyggd vid slutet av 1988 och bestå av totalt 18 aktiva satelliter plus tre reservsatelliter fördelade på sex olika banplan. Men utplaceringen av produktionssatelliter med rymdfärjor fick ett abrupt avbrott när Challenger exploderade i januari 1986. Beroende på problem och förseningar i programmet med rymdfärjan, togs beslut om en återgång till raketuppskjutning. I mars 1988 beslöts om en utökning av antalet satelliter till 24, varav tre skall fungera som aktiva reservsatelliter. Dessa har fördelats på lika många banplan som tidigare, dvs fyra satelliter cirkulerar i varje banplan. Avsikten är att satellitsystemet skall vara färdigt i mitten av 1993.

### 3.2 STYR- OCH ÖVERVAKNINGSSYSTEM

Rutiner för övervakning och styrning av satelliterna i GPS-systemet samordnas i en ledningscentral i Colorado Springs, USA. Denna station ansvarar för att nödvändiga åtgärder vidtas när eventuella komplikationer inträffar vid drift av en satellit. I händelse att någon satellit avviker från sin tilldelade bana, skall den åter styras till sitt "rätta" läge. Vidare är det även ledningscentralens uppgift att besluta om lämpliga åtgärder, när driftstörningar uppstår på en satellit och eventuellt ersätta den med en reservsatellit.



Figur 2 GPS-systemets spårstationer.



Från ett globalt nät med fem strategiskt utplacerade spårstationer, se figur 2, sker en kontinuerlig registrering av signaler från samtliga satelliter som befinner sig över respektive stations horisont. Inspelade GPS-data från spårstationerna, vars positioner är bestämda med mycket hög noggrannhet (och som i detta sammanhang kan betraktas som felfria), sänds till ledningscentralen. Observationerna ligger till grund för prediktion av varje satellits banparametrar och beräkning av klockkorrektionen.

Dessa data sänds upp till respektive satellit från någon av spårstationerna Ascension, Diego Garcia och Kwajalein, vilka har utrustning för sådan kommunikation, en gång per dag.

### 3.3 KOORDINATSYSTEM

Vid lägesbestämning med hjälp av GPS-satellitssystemet erhålles mottagarantennens position för närvarande i det geodetiska datumet WGS-84 (World Geodetic System 1984). Systemet är ett tredimensionellt geocentriskt koordinatsystem (X,Y,Z), där origo sammanfaller med jordens tyngdpunkt. Z-axeln definieras av medelpositionen för rotationsaxelns läge mellan åren 1900-1905. X-axeln ingår i ett plan genom Greenwich meridianen och är vinkelrät mot Z-axeln. Y-axeln har slutligen valts så att ett ortogonalt högerhandssystem bildats.

För att beräknade positioner ur GPS-observationer skall bli användbara vid geodetiska tillämpningar, krävs i regel att punktkoordinaterna transformeras och inpassas i något lokalt koordinatsystem, se vidare kapitel 9.

### 3.4 GPS-MOTTAGARE

En GPS-mottagare är vanligtvis uppbyggd av följande komponenter:

- antenndel och förstärkardel
- radiofrekvensdel (oscillator)
- microprocessor
- kontrollenhet (display och tangentbord)
- registreringsenhet
- kraftaggregat.

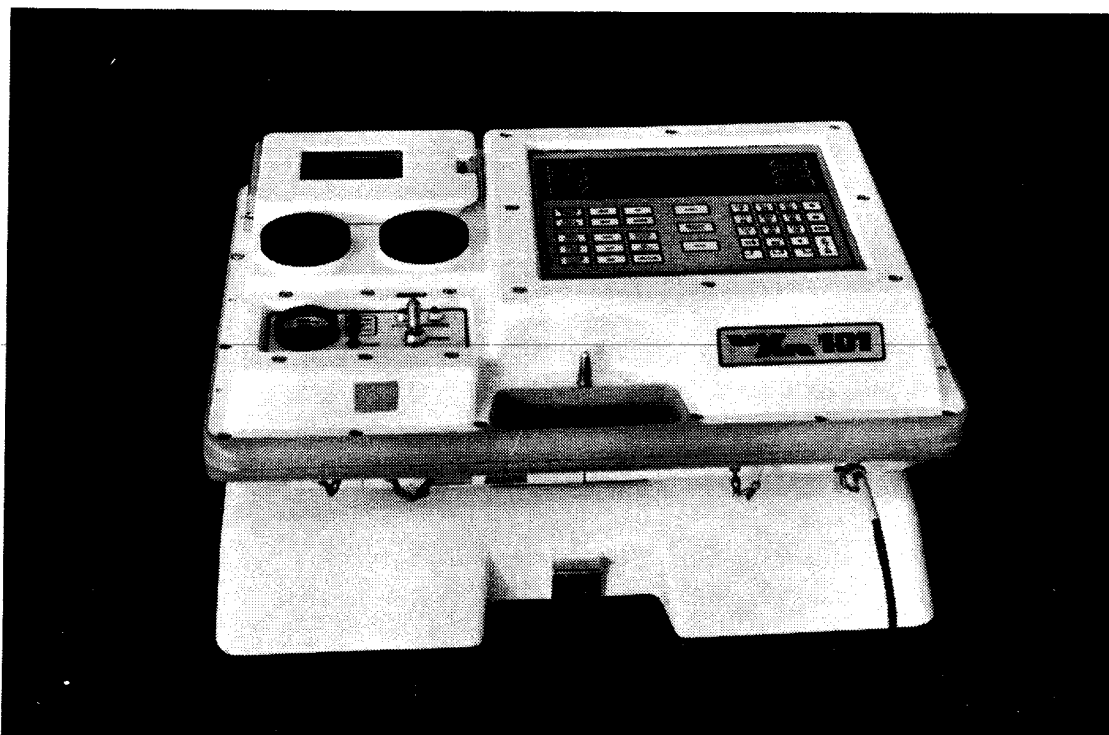
Av det rika utbudet av GPS-mottagare på marknaden, drygt trettio olika instrument för navigering och geodetisk mätning, är det några principiella förutsättningar som skiljer mellan olika instrumentmodellers konstruktion. Exempel på kriterier att ta ställning till i olika användningssammanhang:

- arbetar mottagaren med eller utan kod ?
- mäter mottagaren på L1-frekvensen eller på både L1/L2-frekvenserna ?
- hur många kanaler har mottagaren ?
- registreras satellitsignalen kontinuerligt eller växlande ?
- hur registreras insamlad data ?

Dessa faktorer finns utförligare redovisade i "Mäta med GPS" av Jivall & Jakosson (1987).

#### Wild Magnavox, WM 101:

Vid inmätning av primärnätet användes GPS-mottagare av fabrikat Wild Magnavox, WM 101. Observationsdata registreras på kassett som rymmer upp till 14 timmars komprimerade observationer (1 min epok). Med hjälp av beräkningsprogrammet PoPS kan observationsdata bearbetas.



Figur 3 GPS-mottagare Wild Magnavox, WM 101.

WM 101 är en sekventiell 4-kanalers mottagare som enbart mäter på L1-frekvensen (C/A-koden). Den kan utföra kodmätning och mätning av bärvågsfas mot maximalt sex samtidiga satelliter. Noggrannheten vid längdbestämmningar är, enligt fabrikanter, specificerad till  $10\text{mm} \pm 2\text{ppm}$ . (Sedan något år finns även en modell WM 102 som mäter på både L1 och L2-frekvenserna).

WM 101 är ett ganska litet och robust instrument och relativt fältmässigt för geodetiska mätningar. Den skall kunna klara temperaturvariationer från  $-25^{\circ}$  till  $+50^{\circ}$  C.

Energiförbrukningen på 25W skall kunna klaras av internbatterier vid ca 3 timmars observationer. Möjlighet finns även till extern anslutning av 12-volts bilbatterier. Uppvärmningstiden på ca 30 minuter är dock alltför lång jämfört med de allra senaste tillkomna instrumenten där det bara tar någon minut.

## 4 FÖRUTSÄTTNINGAR FÖR EXAMENSARBETET

Avsikten med projektet var att:

- få erfarenhet av hur stornätsplanering, mätning och efterbearbetning av insamlade observationsdata genomförs när GPS-tekniken används
- utföra positionsbestämning av punkter i ett mindre primärnät, baserad på GPS-teknik
- studera noggrannhet och tillförlitlighet i plan och höjd för GPS-bestämningarna genom jämförande studier av resultatet från GPS-observationerna med bestämningar erhållna på traditionellt sätt, dvs längd- och riktningmätning
- bedöma GPS-teknikens användbarhet vid inmätning av mindre primärnät. Kan tillämpningen av GPS-tekniken i dessa sammanhang vara ett komplement till, eller en ersättning för, traditionella mätmetoder redan idag ?

En målsättning med testmätningar är som regel dels att vid t ex instrumentinköp jämföra olika mottagare med varandra, dels att jämföra resultatet från GPS-observationer med traditionella terrestra metoder.

Tester av GPS-mottagare och tillhörande beräkningsprogram, observationsstrategi, nätutformning - eller tekniken som helhet - sker i forsknings och utvecklings-sammanhang lämpligen i ett välutformat testnät. Användningen av ett testnät med såväl hög som känd noggrannhet, innebär att mätningarna kan utföras efter ett särskilt utformat observationsschema. Med detta testmaterial underlättas jämförelser och analyser av slutresultatet.

Detta projekt genomfördes på byggforskningsinstitutets provfält i Mårtsbo. Mätning enligt två olika observationsstrategier utfördes. Vid inmätningen av primärnätet användes tre enfrekvens-mottagare av fabrikat Wild Magnavox, WM 101.

För att behärska beräkningsprogrammet PoPS på ett tillfredställande sätt ingick som en förberedande åtgärd, även att utföra beräkningar av lantmäteriverkets tidigare utförda försöksmätningar i testnätet.

## 5 NÄTUTFORMNING

Några allmängiltiga riktlinjer angående hur nätutformning och observationsstrategier lämpligen bör utföras vid GPS-mätning är svårt att finna i dagens litteratur.

För att kunna lägesbestämma punkter med den höga noggrannhet som används vid geodetiska tillämpningar, krävs att mätningarna utförs på åtminstone två stationer samtidigt. Mätmetoden som användes var statisk relativ bärvågsmätning.

Nedan redogörs för två olika observationsstrategier som har tillämpats vid mätningarna i detta projekt:

- dels en empirisk metod
- dels Snays metod.

### 5.1 EMPIRISK METOD

Den empiriska metoden bygger på en princip med gemensamma baslinjer mellan observationssessioner. Observationsschemat har utformats mot bakgrund av primärnätets konfiguration. En av mottagarna var placerad på en fast referenspunkt under hela mätkampanjen. I detta fall användes testnätets centralpunkt. De två andra mottagarna förflyttades växelvis mellan övriga punkter i nätet. De i sessionerna ingående baslinjerna har definierats så att ett stjärnnät bildats, se nätfigur bilaga B:3. Det valda tillvägagångssättet innebär att en baslinje kommer att ingå i två på varandra följande sessioner.

En modifierad version av ovanstående strategi, empirisk studie 3, utfördes vid ett tidigare mättillfälle av lantmäteriverket. Avsikten var dels att mäta in primärnätet under en dag (observationsperiod), dels att undersöka om en mottagare kan användas för att mäta in flera punkter i samma beräkningssession (någonting som påstås av instrumenttillverkaren). Mätningarna utfördes med kortare observationstid än normalt på varje punkt i en av sessionerna, se bilaga B:4.

Mätning med gemensamma baslinjer tillämpas som en säkerhetsåtgärd för att upptäcka eventuella vridningar mellan sessionerna, förorsakade av ändringar i satellitsystemet, och för att öka tillförlitligheten.

## 5.2 SNAYS METOD

Algoritmerna för denna observationsstrategi är framtagna vid National Geodetic Survey i Rockville, Maryland, USA, se Snay (1986). Algoritmen är användbar för nätutformning, där samtidig mätning i en session utförs med tre mottagare.

Metoden förväntas producera effektiva nätverk, p g a att en baslinje mellan två stationer inte observeras i mer än en session. Detta betyder att ett maximalt antal direkt observerade baslinjer för ett givet antal mottagare och sessioner erhålles. Tanken är att eliminera såväl slumpmässiga som systematiska fel i mätningarna.

Den presenterade metoden bygger på observationer av baslinjer där stationspunkterna är placerade nära varandra. Användningen av närbelägna stationspunkter innebär att tiden för flyttning av mottagarna mellan punkterna i nätet reduceras, därigenom kan den tillgängliga observationstiden för mätningarna utnyttjas maximalt.

### 5.2.1 Kriterier för nätutformning

För att förenkla framställningen, antas i ett första skede att nätet som skall mätas är homogent i bemärkelsen att lika många uppställningar kommer att utföras på samtliga stationspunkter. Låt  $n$  representera antalet uppställningar på en punkt i en mätkampanj. Olika fall när  $n=2$  och  $n=3$  presenteras i följande avsnitt.

Ett noggrannare resultat och en ökad tillförlitlighet beträffande koordinatbestämningen förväntas i ett mätprogram där varje punkt ingår i tre olika sessioner. I detta val underlättas felsökning av en punkts position, då en helt avvikande bestämning lätt kan lokaliseras till en av mätningarna. Felet kan ha berott på t ex fel inslagen antennexcentricitet. För ett mera tidsbesparande genomförande väljs två uppställningar på varje punkt, vilket dock innebär att antalet observerade sessioner minskar liksom tillförlitligheten.

Det totala antalet sessioner,  $s$ , som skall mätas för ett nät, erhålles ur ekvationen:

$$s = \frac{n \times m}{r} \quad \text{där;} \quad (1)$$

$n$  = antal uppställningar/punkt  
 $m$  = antal punkter i nätet  
 $r$  = antal mottagare

Vid mätningar med tre uppställningar per punkt förväntas att noggrannheten i koordinatdifferanser mellan punkter ökar, eftersom mätförfarandet medför  $1\frac{1}{2}$  gånger fler oberoende observationer än vid två uppställningar. Detta faktum följer av att antalet oberoende observerade baslinjer,  $b$ , är direkt proportionellt mot  $n$ , vilket ges av ekvationen:

$$b = (r-1) s = \frac{(r-1) n \times m}{r} \quad (2)$$

Noterbart är att observationer av en baslinje i den framtagna algoritmen inte kommer att utföras mer än en gång, dvs att två punkter finns med samtidigt endast i en session. Det mätta nätet kommer att bestå av totalt:

$$\frac{(r-1) n \times m}{2} \quad (3)$$

direkt observerade baslinjer.

### 5.2.2 Slingalgoritmer för Snays metod

Slingalgoritmen tillämpas med fördel vid mätningar av nät där punkterna inom området är belägna så att en approximativ cirkel kan dras genom dessa.

#### Mätschema för en kampanj med tre uppställningar på varje punkt - (L.3.3):

(L.r.n)

L = nät av slingor

r = antal mottagare

n = antal uppställningar/punkt

m = antal punkter i nätet

Steg 1) På lämpligt kartunderlag anpassas en cirkel (sluten polygon) vilken sammanbinder punkterna i det tänkta nätet.

Steg 2) Starta i en godtycklig punkt och fortsätt i endera riktningen, från 1 till  $m$ , varvet runt.

Steg 3) För session  $i$  (där  $i = 1, 2, 3, \dots, m$ ) placeras de tre mottagarna på punkterna  $i, i+1$  och  $i+3$ .

I steg 3 ovan får dock inte  $i+1$  och  $i+3$  bli större än  $m$ . Punktnumreringen modifieras i dessa fall och numreringen börjar om från början igen, se tabell 1.

Mätschema för kampanj	(L.3.3) m=12			m=12			(L.3.2) m=13			m=14		
	Session	1	2	4	1	2	4	1	2	4	1	2
	2	3	5	2	3	6	2	3	6	2	3	6
	3	4	6	4	5	7	4	5	7	4	5	7
	4	5	7	5	6	9	5	6	9	5	6	9
	5	6	8	7	8	10	7	8	10	7	8	10
	6	7	9	8	9	12	8	9	12	8	9	12
	7	8	10	10	11	1	10	11	13	10	11	13
	8	9	11	11	12	3	11	12	2	11	12	1
	9	10	12				13	1	3	13	14	2
	10	11	1							14	1	3
	11	12	2									
	12	1	3									

Tabell 1 Mätsschema för slingalgoritmen, med tre GPS-mottagare och två eller tre uppställningar på varje punkt.  $m$  = antalet punkter i nätet.

Mätschema för en kampanj med två uppställningar på varje punkt - (L.3.2):

(L.r.n)  
 $L$  = nät av slingor  
 $r$  = antal mottagare  
 $n$  = antal uppställningar/punkt  
 $m$  = antal punkter i nätet

Steg 1) Se metod (L.3.3).

Steg 2) Se metod (L.3.3).

Steg 3) För session  $i$ , sätt  $k = i-1 + \text{int}((i+1)/2)$   
där  $i = 1, 2, \dots, (m - \text{int}(m/3))$ .

När  $i$  är udda, placeras de tre mottagarna på punkterna  $k, k+1$  och  $k+3$ .

När  $i$  är jämnt, placeras de tre mottagarna på punkterna  $k, k+1$  och  $k+4$ .

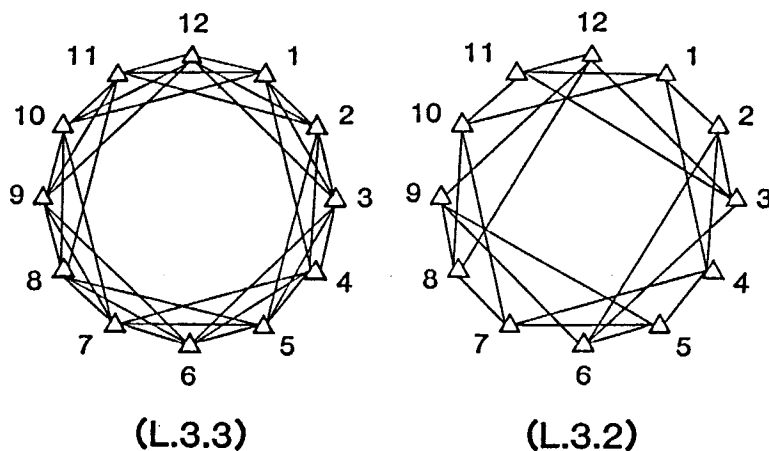
Ovanstående mätschema har exakt två uppställningar per punkt endast i de fall när antalet punkter är en multipel av antalet mottagare.



För nät där antalet punkter inte är jämnt delbart med tre, användes formeln  $(m - \text{int}(m/3))$  för att bestämma hur många sessioner som skall mätas och att ekvationerna (2) och (3) skall gälla.

När resten är 2, modifieras mätschemat för den sista sessionen och mottagarna placeras på punkterna  $k$ ,  $k+1$  och  $k+3$ . Av tabell 1 framgår att mätningarna i ett nät med ex 14 punkter, sker uppställningar på samtliga punkter åtminstone två gånger med undantag av punkterna 1 och 2.

När resten är 1, krävs ingen modifiering av mätschemat för att erhålla minst två uppställningar per punkt.



Figur 4 Generella nätfigurer för slingalgoritmen, med tre GPS-mottagare och två eller tre uppställningar på varje punkt. Observerade baslinjer är markerade.

## 6 PLANERING AV MÄTNING I PRIMÄRNÄT

Upprättande av primärnät för byggplatsmätningar innebär ofta att någon idealisk utformning av nätens geometriska struktur sällan är möjlig. Detta kan bero på existerande terrängförhållanden inom området, mätområdets omfattning etc. Vid planeringen måste hänsyn tas till att primärpunkterna ska kunna användas under hela byggnadstiden, nät med mycket skiftande former och varierande längder är inte alldeles ovanligt. Punkterna bör placeras så att de:

- inte riskerar att raderas under byggnadstiden
- är användbara för inmätning/utsättning av sekundärpunkter
- kan användas som bakåtoobjekt för alternativa mätmetoder, t ex fri uppställning.

Punkternas placering, i mätområdets ytterkant, innebär i regel att polygonmätning ofta blir lämpligaste mätmetoden vid inmätning av nätet.

### 6.1 TERRESTRA MÄTMETODER

Vid planering av geodetiska stornät kan man på förhand med hjälp av nätsimuleringsprogram studera noggrannheten (precision och tillförlitlighet) i en mätsituation. Användningen av simuleringsprogram är ett praktiskt hjälpmedel för analys och utformning av effektiva mätprogram med en optimal nätstruktur.

I Nordqvist & Olsson (1987) redovisas simuleringsstudier för olika inmätningalternativ av byggforskningsinstitutets primärnät. Följande, vanligen förekommande, metoder för inmätning av stompunkterna studerades.

Dels tillämpning av två olika traditionella huvudtyper av plana geodetiska stornät:

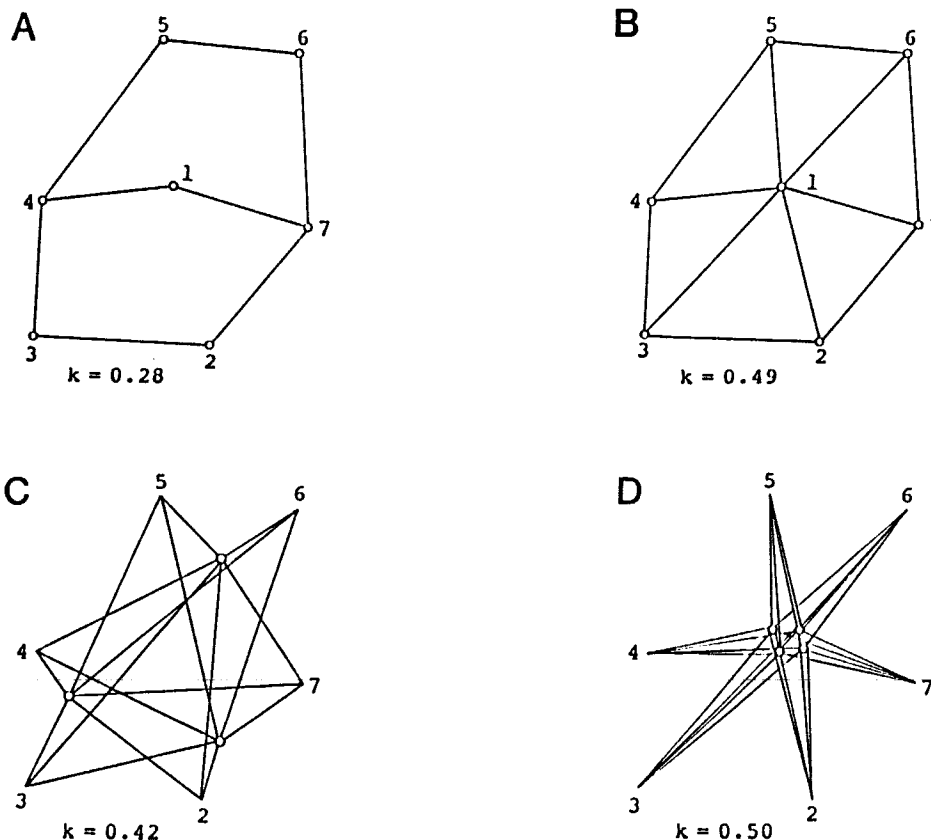
- inmätning av nätet som ett polygonnät med en yttre slinga, samt ett uppstagande tåg tvärs igenom nätet, se figur 5:A
- inmätning av nätet som ett triangelnät, dvs den metod som byggforskningsinstitutet använde vid nätets upprättande, se figur 5:B.

dels tillämpning av en metod som används vid upprättande av väggmarkerade stomnät:

- inmätning av nätet med hjälp av fri uppställning. Två olika alternativ studerades, med tre eller fyra uppställningar, se figur 5:C och 5:D.

Simuleringsresultaten visar att polygonnätalternativet var väsentligt svagare än övriga bestämmningar. Främsta orsaken är att metoden i sig ger ett litet antal överbestämningar och därmed lägre kontrollerbarhet. Den svaga länken vid polygonmätning är vinkelmätningen. Effekten av fel i en vinkel förstoras successivt i ett långt tåg.

Av de genomförda simuleringsstudierna framgår att det krävs mätmetoder med tillräckligt många överbestämningar när ett stomnät med hög noggrannhet och god kontrollerbarhet skall upprättas.



o = instrumentuppställning för inmätning av primärpunkterna 1 - 7.

k = kvalitetstal; för uppskattning av ett stomnäts geometriska styrka. Ett nät bedöms vara starkt om  $k \geq 0.5$

Figur 5 Simuleringsalternativ.

## 6.2 GPS-MÄTNING

Noterbart är (se figur 5) att ett nät med bra geometrisk struktur är nödvändigt för att noggrannheten och tillförlitligheten i punktbestämningen skall bli hög vid terrestra bestämningar. Vidare gäller beroende på vilken mätmetod som valts, att man skall ha sikt mellan punkterna eller sikt till så många punkter som möjligt från varje instrumentupställning.

När GPS-tekniken används vid inmätning av ett primärnät ställs i viss utsträckning andra krav på planeringen. De kriterier som nämndes inledningsvis i kapitlet, vid val av punkternas placering inom mätområdet, förutsättes gälla även i detta fall.

När man anlägger ett GPS-nät bör man dessutom tänka på följande vid punkternas placering:

- se till att kraven för fortsatta mätningar är uppfyllda, t ex utgående sikt
- se till att fri sikt till satelliterna existerar på varje stationspunkt, dvs att inga skymmande föremål finns inom en höjdvinkel  $> 15^\circ$
- se till att mätningarna om möjligt kan utföras med markuppställning, eftersom mätning med mast kan påverka noggrannheten i punktbestämningen och dessutom är en tidsödande faktor
- för att erhålla god signalmottagning, bör punkter placerade i närheten av reflekterande föremål och sändare som arbetar inom samma frekvensområde undvikas.

Några fördelar med användandet av GPS-teknik, jämfört med traditionell mätmetodik, för lägesbestämning av punkter är:

- vid utplacering av nypunkter, i plan och höjd, behöver ingen hänsyn tas till nätets konfiguration (dvs dess geometriska utformning), utan stompunkterna kan placeras där de bäst behövs för fortsatta mätningar.
- att det för mätningarnas genomförande inte krävs sikt mellan punkterna. Punkterna placeras vanligen parvis med fria siktlinjer emellan, såvida inte referensriktning kan bestämas ur annan utgående sikt, så att övergång till terrester mätning kan ske.
- mätningarna kan genomföras oberoende av tidpunkt på dygnet och väderleksförhållanden, t ex regn, dis och dimma. Erfarenheter från tidigare projekt tyder dock på att registrerade observationer utförda vid mätningar i åskväder kan vara av lägre kvalitet.

GPS-mätning är en tredimensionell mätmetod, dvs initialt erhålles koordinater i såväl plan som höjd för de observerade punkterna vid samma måttillfälle. En noggrann höjdbestämning kan ske i ett lokalt höjdsystem under förutsättning att tillräcklig information om geoidens variation är tillgänglig.

- vid anslutning av t ex mindre lokala eller avlägset belägna stornät till riksnätet eller något annat överordnat system, kan mätningarna genomföras relativt problemfritt med GPS-teknikens hjälp. Bestämning av en punkts läge och en azimut i det lokala nätet, bör ske genom mätning mot minst tre helst fyra omslutande högre ordningens punkter. Vid terrestra mätmetoder förutsättes i många svenska terrängtyper, p g a siktpromblem, att mättern byggs eller att polygontåg läggs ut.

Det finns även några nackdelar förenade med GPS-teknikens användande i samband med geodetiska mätningar då examensarbetet genomfördes. Bl a kan nämnas:

- att den tillgängliga observationstiden vid mätningarna (okt 88) var mycket begränsad p g a rådande satellittäckning.
- att observationsmetoden som använts, statisk relativ positionering, inte är speciellt lämplig vid mätning av korta avstånd, eftersom observationstiden med nuvarande metoder inte kan minskas nämnvärt.
- att för ett rationellt mätförfarande observationsmetoden kräver minst tre, helst fler mottagare. Detta innebär relativt höga instrumentkostnader.
- den tillgängliga programvarans begränsning.

För att bestämma punkter med den noggrannhet som krävs vid geodetiska tillämpningar, är det vid GPS-mätningar nödvändigt att arbeta med relativ positionering baserad på observationer av bär vågens fas. Noggrannheten i lägesbestämningen, beror på nedanstående faktorer:

- precisionen i mätningen och den inbördes geometriska konfigurationen mellan satelliterna och mottagaren, (inbindning i rymden)
- noggrannhet i bestämningen av satelliternas banddata
- korrektionsmodell för troposfäriska och jonsfäriska refraktioner
- val av mottagare, observationsmetodik och beräkningsmodell för bearbetning av insamlade mätdata
- mottagningsförhållanden för satellitsignalerna.

## 7 MÄTNING

### 7.1 FÖRBEREDANDE ARBETE

Vid planering av mätkampanjer i ett testnät reduceras de förberedande åtgärderna avsevärt. Den egentliga planeringen kommer i dessa fall att inskränka sig till att gälla följande:

- dels upprättande av observationsschema för hur GPS-mätningarna skall genomföras. Man bestämmer vilka punkter som skall mätas samtidigt i en session och observationstidens längd.
- dels kontrollera att det för varje stationspunkt finns fri sikt uppåt och besluta om lämpliga åtgärder där avskärningsproblem föreligger.

#### 7.1.1 Försöksområde

Som testnät för mätningarna har, som tidigare nämnts, byggforskningsinstitutets primärnät i Mårtsbo valts. Nätet är utformat som ett berlinernät vilket kännetecknas av en centralt belägen punkt. Området omfattar en yta av 200 x 200 meter och består av totalt sju primärpunkter. Terrängen inom området är förhållandevis öppen och måttligt kuperad. Det inbördes avståndet mellan punkterna varierar från 65 till 105 meter, största höjdskillnad är ungefär tre meter.

För att undvika avskärningsproblem, störande vegetation och dyl, var det nödvändigt att tillgripa särskilda åtgärder på några av stationspunkterna.

- SIB 2: Över punkten har ett 13 meter högt trätorn rests för att kunna utföra terrestra anslutningsmätningar till riksnätet. Markuppställning vid GPS-mätning är således omöjlig.
- SIB 6: Norr om punkten, 12 meter, finns en skogsskärm på ungefär 8 meters höjd. För att uppfylla siktkravet krävdes en instrumenthöjd på fyra meter, uppställningen utfördes med bushstativ och förlängningsrör.
- SIB 7: Över punkten, vilken är omgärdad av flera träd, restes en transportabel och stabil 9-meters teleskopmast speciellt framtagen för GPS-mätningar.

För övriga stationer bedömdes att mätningarna skulle kunna genomföras med markuppställning.

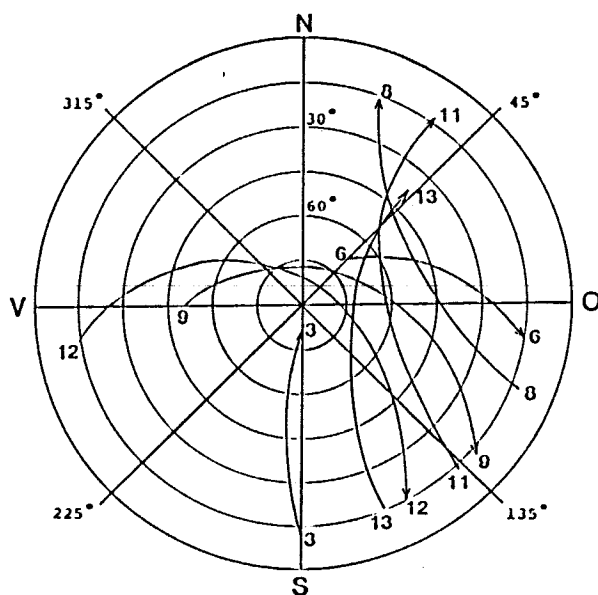
### 7.1.2 Satellittäckning

Vid planering av mätkampanjer är det av intresse att veta när nödvändigt antal satelliter är "synliga" över horisonten. Med hjälp av prognosprogrammet "field preparation" i PoPS kan man genom att ange en approximativ position för mätområdet, beräkna tidpunkten för satelliternas passage. Beräkningarna baseras på almanack-data från "broadcast ephemeris" (utsända bandata).

Den erhållna informationen redovisas i både grafisk och numerisk form. Utskrifter från beräkningen redovisas i bilaga A. Ur diagrammen framgår när erforderligt antal satelliter, fyra eller fler, samtidigt är tillgängliga för observation. I elevationsdiagrammet kan man mer exakt se när varje satellit är tillgänglig. Registrering av satellit signalerna sker vanligtvis inte för höjdvinklar under  $15^{\circ}$  p g a ogynnsamma mottagningsförhållanden (kraftig troposfärsrefraktion).

Med anledning av att GPS-systemet befann sig i en utvecklingsfas, medförde det begränsade antalet tillgängliga satelliter samt deras bankonfigurationer, att observations-tiden vid mätningarna (okt 1988) inskränkte sig till ungefär fem timmar per dygn.

Figur 6 visar banorna för varje satellit. Azimut och elevation uttrycks som en funktion av tiden. Gynnsammaste geometrin vid relativ positionering är när det finns åtminstone en satellit i varje kvadrant och att de observeras under en höjdvinkel av  $40^{\circ}$  -  $70^{\circ}$  över horisonten.



Figur 6 Polardiagram, som visar satellittäckningen under observationsperioden 00.00-06.00 GMT, okt 1988.

## 7.2 MÄTNINGARNAS GENOMFÖRANDE

Instrumentpoolens tre WM 101 mottagare (en uppsättning instrument för forskning och utveckling, inköpta av Lantmäteriverket tillsammans med KTH, CTH och UU) var disponibla för projektets genomförande under sex dagar i oktober 1988, samt för kompletterande mätningar (ommätning) under veckoslutet tre veckor senare. (Efter användningen sändes mottagarna till Magnavox Survey Systems Inc, Torrance, för inmontering av en L2-frekvenstillsats. Modellbeteckningen för det utbyggda instrumentet kommer att ändras till WM 102.)

Den upplagda planeringen gick ut på att samla tillräckligt med mätdata så att tre av varandra oberoende mätkampanjer skulle kunna beräknas. En detaljerad planering för hur observationerna skulle genomföras skedde med hjälp av "field preparation" i PoPS. Ur elevationsdiagrammet framgår som nämnts att den tillgängliga observationstiden, när samtidig mätning kunde bedrivas mot minst fyra satelliter, var ca fem timmar. Förflyttning av mottagarna mellan stationerna, valdes med hänsyn till satelliters upp- och nedgång och en observationstid av 90 minuter.

För mätningar under hösten innebar rådande satellitkonstellation att GPS-observationerna måste ske under den mörka delen av dygnet. I det här fallet genomfördes mätningarna mellan 00.00-06.00, lokal tid. Mätsignaler från samtliga satelliter (totalt sju stycken) registrerades, dvs även satellit PRN8 observerades trots dess problem med sina frekvensnormaler. Det tillgängliga observationsintervallet kan förlängas genom mätning mot tre satelliter under en kortare period (t ex 20 min). Detta har en stabiliserande effekt vid beräkningen. Vid ommätningen togs hänsyn till ovanstående faktum.

På grund av att tidigare erfarenheter av satellitmätningar saknades, inleddes första mätdagen med en kortare genomgång av mottagarens funktioner. Demonstrationen skedde under ledning av erfaren personal från geodetiska utvecklingsenheten på LMV. Instruktören deltog även i mätningarna under de inledande två dagarna.

Andra användares rekommendationer att beräkningarna (kontrollering av insamlade mätdata) bör utföras så nära i tiden som möjligt kunde inte uppfyllas i detta projekt främst p g a att det inledningsvis saknades tillgång till persondator samt att de personella resurserna var starkt begränsade.

Innan mätningarna påbörjades den fjärde mätdagen så tömdes satellitalmanackans minne i den ena mottagaren för att läsa in en ny från satellitmeddelandet. Under mätningen konstaterades att registrering ej skedde på denna mottagare. En misstanke var att något misstag hade begåtts vid



raderingen. Efter felsökning stod det dock klart att brister fanns i den använda 30-meters kabeln, förmodligen beroende på glapp i kontaktfästet. På grund av den uppkomna situationen beslöts om en revidering av mätprogrammet. Sessioner som ingick i flera kampanjer fick i fortsättningen utföras i blott en mätning. Även under den påföljande dagens mätningar inträffade ytterligare missöden vid registreringen av mätdata, två av tre sessioner gick förlorade.

Mottagaren, som inte fungerade problemfritt under näst sista dagens mätningar på punkt SIB 6, placerades inomhus sista dagen och kom att stå under kontinuerlig bemanning. Under mätningarna registrerades ett antal mindre "ofarliga" felmeddelanden på denna mottagare. Detta utvecklas vidare under avsnitt 8.2.

DATUM	STATIONER	(L.3.2)	(L.3.3)	Empirisk studie 1
19	SIB 3 SIB 4 SIB 6		X	
	SIB 1 SIB 3 SIB 4			X
20	SIB 4 SIB 5 SIB 7	X	X	
	SIB 1 SIB 5 SIB 6		X	X
	SIB 2 SIB 6 SIB 7		X	
21	SIB 1 SIB 3 SIB 7	X	X	
	SIB 1 SIB <del>2</del> SIB 4			
	SIB 2 SIB 3 SIB 5		X	
22				
23	SIB <del>2</del> SIB 5 SIB <del>6</del>	X		
	SIB 2 SIB 3 SIB <del>6</del>	X		
	SIB 1 SIB 2 SIB 4	X	X	
24	SIB 1 SIB 2 SIB 3			X
	SIB 1 SIB 2 SIB 7			X *
	SIB 1 SIB 6 SIB 7			X *
	SIB 1 SIB 4 SIB 5			X *

Tabell 2 Utförda observationssessioner i testnätet, oktober 1988.

X = observationer i mätkampanj

\ = station där avbrott inträffade i registreringen av mätdata

\* = session där inte samtliga periodobekanta kunde bestämmas till heltal

Insamling av meteorologiska data gjordes inte under mätningarna. I det här fallet ansågs det inte vara nödvändigt eftersom området var så begränsat.

Erfarenheter från fältmätningarna visar att många felkällor och missöden kan uppstå i det praktiska arbetet. Kyla och hög luftfuktighet är orsaker som kan nedsätta batterikapaciteten och ge andra störningar ex i de klena kontaktfästena. Fabrikantens påstående att apparaturen är driftssäker och lätt att använda är väl något man inte helt kan hålla med om. Olika problem kan också uppstå med ledningsbrott, dålig inspelningskvalité och givetvis personliga misstag vid hanteringen av instrumenten.

I tabell 3 nedan redovisas observationsschemat för testmätningarna av de empiriska studierna 2 och 3 som lantmäteriverket genomförde i november 1987.

DATUM	STATIONER	Empirisk studie 2	Empirisk studie 3
5	SIB 1 SIB 6 SIB 7	X	
	SIB 1 SIB 2 SIB 7	X	
	SIB 1 SIB 2 SIB 3	X	
6	SIB 1 SIB 3 SIB 4	X	
	SIB 1 SIB 4 SIB 5	X	
	SIB 1 SIB 5 SIB 6	X	
14	SIB 1 SIB 6 SIB 7		X
	SIB 1 SIB 2 SIB 3	}	X
	SIB 4 SIB 5 SIB 7		
	SIB 1 SIB 5 SIB 6		X

Tabell 3 Utförda observationssessioner i testnätet, november 1987.

## 8 BERÄKNING

Vid mätning med GPS-mottagare WM 101 lagras observationsdata på kassetband. För efterbearbetning av mätdata, när tre-dimensionella koordinater för de observerade punkterna skall bestämmas med geodetisk noggrannhet, används tillhörande beräkningsprogram PoPS (Post Processing Software), i detta fall version 2.02.

### 8.1 BERÄKNINGSPROGRAMMET PoPS

PoPS är ett multistationsprogram, där samtidig utjämning av maximalt tio punkter i ett nät kan utföras. Programmet är uppbyggt av moduler och har en menydriven dialog.

PoPS bygger på algoritmer utvecklade vid astronomiska institutionen, universitetet i Bern, Schweiz. Beräkningarna baseras på linjärkombinationer (dubbeldifferenser) av bärvågsmätningar på punktpar för att bestämma baslinjer. Programmet är skrivet i Fortran 77 och är anpassat för att användas på persondatorer typ IBM AT/XT eller kompatibla utrustningar.

#### Programstruktur

##### I. Fältplanering:

Fältplanering (field preparation) är en fristående programmodul som används vid planering av en mätkampanj. Genom att ange dag och ungefärlig position för området, beräknas (predikteras) data för när de olika satelliterna finns tillgängliga för mätning. Informationen ges i både numerisk och grafisk form, se utskrifter i bilaga A och avsnitt 7.1.2.

##### II. Bearbetning och beräkning:

Bearbetning och beräkning av insamlade mätdata utförs i "campaign processor". Innan bearbetning kan påbörjas skapas en databas för den aktuella mätkampanjen i denna modul. I databasen lagras såväl mätdata som beräkningsresultat. Denna modul kan i sin tur uppdelas i:

**Dataöverföring:** I denna modul överförs registrerad mätdata från kassetbanden till kampanjens databas i PoPS. I samband med inläsningen indelas observationsintervallet där mätning har utförts på två eller fler stationer samtidigt till en gemensam mätperiod - beräkningssession. Här kan även korrigerings felaktigt införda stationsuppgifter utförda i fält göras innan mätdata tilldelas en

kampanjpunkt. Om man upptäcker fel efter att ha passerat detta steg är det möjligt, till skillnad från äldre programversioner, att korrigeras detta i "data editor" modulen.

**Pre-processing:** Insamlade observationsdata kan inte användas för beräkning av baslinjer direkt, utan att följande förbearbetning har vidtagits:

- samtliga satelliters banor under en observationsperiod beräknas med hjälp av navigationsmeddelandet och Keplers banlagar.
- absoluta positioner och klockkorrektionsparametrar beräknas ur kodmätningen för varje mottagare i en session. Koordinaterna används som närmevärden och klockkorrektionerna som kända vid beräkningen.
- PoPS beräknar baslinjevektorer (koordinatdifferenser) mellan olika punktpar i en session. För att definiera baslinjerna kan operatören välja antingen ett automatiskt eller ett manuellt förfarande.
- i nästa moment skapas mellanstations-differensfiler automatiskt av programmet.
- slutligen sker felsökning för att konstatera ifall några signalavbrott, s k "cycle-slips", har inträffat i den kontinuerliga bärvågsmätningen i en mottagare. Eventuella avbrott i signalsekvensen lokaliseras genom polynom Anpassning av på varandra följande differenser (mellan-epokdifferenser) och korrigeras. Detta utförs dels för enkel-differenser (mellanstations-differenser) och dels för dubbel-differenser. Operatören har även möjlighet att avlägsna "brusiga" data som har orsakats av externa effekter, t ex atmosfäriska störningar eller elektronisk interferens, som kanske har registrerats under mätningen.

Efter att dessa moment har genomförts på ett tillfredsställande sätt kan den egentliga beräkningen (utjämnings) genomföras.

**Beräkning:** I PoPS kan upp till tio punkter beräknas samtidigt i en kampanj. Beräkningarna kan utföras för en baslinje i taget eller för flera baslinjer i samma session samtidigt. Vid utjämnings av ett helt nät väljer man vilka sessioner och baslinjer som skall ingå i beräkningen.

I resultatutskriften från beräkningsmodulen redovisas:

- vald nätdefinition (valda icke-triviala baslinjer) och en lista med de olika parametrar som ingår i beräkningen.
- statistiska data från beräkningarna, bl a visas antalet dubbel-differenser, totala antalet obekanta koordinater och periodobekanta ("ambiguities"), och hur många period obekanta som kunnat fixeras till heltal. Grundmedelfelet för dubbel-differensresidualerna före och efter bestämning av periodobekanta.
- beräknade koordinater för de mätta punkterna. Lösningen erhålles, för närvarande, i det gällande satellitdatumet WGS-84. Positionerna är uttryckta dels i kartesiska koordinater (X,Y,Z) och dels i geodetiska koordinater (latitud, longitud och höjd).
- lutande avstånd mellan stationspunkterna, beräknade ur de erhållna koordinaterna.

### III. Transformationer:

Koordinaterna som har erhållits från beräkningsmodulen är uttryckta i det globala referenssystemet, WGS-84. Eftersom man vanligen, i de flesta geodetiska sammanhang, arbetar i lokala koordinatsystem är det nödvändigt att GPS-koordinaterna transformeras för att de skall bli användbara.

Transformationsmodulen i denna programversion har uppdaterats med de nödvändiga programdelar som krävs för att kunna utföra datumtransformationer, dvs överföring av en punkts position från ett datum till ett annat.

Projicering av ellipsoidkoordinater till plana koordinater är enligt tillverkaren ingen egentlig "GPS-uppgift" och överlåtes till användaren. Främsta anledningen är att de kartprojektionsformler som behövs för dessa transformationer i regel är specifika för varje land. Hur transformationerna har utförts i detta arbete redovisas i kapitel 9.

Tillverkaren har tagit hänsyn till den totala strukturen vid utvecklingen av PoPS-programmet, det är förhållandevis lätt att använda p g a att det mesta av datahanteringen sköts av menyprogrammet.

## 8.2 BERÄKNING AV MÄTDATA

Vid överföring av registrerade mätdata från de första två dagarnas mätningar (samma band) fungerade inläsning och tilldelning av "rådata" till de olika kampanjpunkterna utan komplikationer för band I och II. När mätdata från det sista bandet skulle läggas ner i databasen inträffade någonting okontrollerbart. Databasen tömdes på tidigare inläst "rådata". Inläsning i andra kombinationer medförde samma resultat.

Inläsning av samma mätdata utfördes senare under beräkningarna utan att några som helst komplikationer inträffade. Vad problemet kan ha berott på är fortfarande oklart. Eventuellt kan användningen av äldre band, vilka har raderats ett antal gånger, vara en bidragande orsak. Bruket av nya kassetband torde vara att rekommendera.

Vid beräkningar av korta baslinjer är det nödvändigt att alla periodobekanta (antal hela våglängder) som existerar för varje mottagare/satellit kombination, de s k ambiguities, kan bestämmas till heltal.

I samband med bearbetning och beräkning av observationsmaterialet framkom att mätningarna var av mycket skiftande kvalitet. I de sessioner där komplikationer uppstod vid lösandet av periodobekanta kunde beräkningstiden vara avsevärt längre än normalt. I t ex sista sessionen femte mät dagen var det inte alldeles lätt att lösa alla periodobekanta utan hjälp av handledare. De inre medfelen i beräkningen tydde på normala värden. Däremot visade jämförelser med de terrestra mätningarna på stora avvikelser, för två av baslinjerna blev differenserna 26 respektive 33 mm. De relativt stora avvikelserna beror med största sannolikhet på noggrannheten i mätningarna istället för felaktig centrering av stativet i punkten SIB 4.

Att under sista dagen mäta in resterande fyra sessioner i den empiriska studien visade sig inte vara vidare lyckat. Vid beräkningen var det inte möjligt att lösa ut alla periodobekanta för tre av sessionerna. I en session var det inte ens möjligt att bestämma absolutpositionen för SIB 1.

Användningen av beräkningsprogrammet PoPS föregicks av en kortare genomgång av systemets uppbyggnad, studier av manualen samt beräkningar av en mätkampanj med bra observationsdata. Vid beräkningar av observationsdata med sämre kvalite blir slutsatsen att det ställs större krav på operatörens kunskaper och erfarenhet.

MÄTKAMPANJ	(L.3.2)	(L.3.3)	Empirisk studie 1	Empirisk Studie 2	Empirisk studie 3
Antal dubbel-differenser	2857	3801	3376	2675	1469
Antal epoker (1 min)	550	698	626	485	313
Grundmedelfel före best av periodobek.	0.007	0.007	0.006	0.006	0.006
Grundmedelfel efter best av periodobek.	0.008	0.009	0.009	0.008	0.008
Bestämda periodobek/ tot periodobekanta	39/39	53/53	46/46	47/47	31/31

Tabell 4 Statistik från nätutjämningsarna. Mätintervall 1 minut.

Som framgår av tabellen är antalet periodobekanta som skall bestämmas olika för varje kampanj. (Antalet obekanta koordinater är däremot konstant, nämligen 18). Beroende på hur länge mätningarna har utförts för varje session och kvalitén i registrerad observationsdata varierar antalet dubbel-differenser på fasmätningen för mätkampanjerna. Notabelt vid statisk GPS-mätning är att det krävs en betydande mängd observationer jämfört med terrestra mätmetoder för att erhålla pålitliga beräkningsresultat. Detta är inte så konstigt eftersom skillnaderna beror på fundamentala olikheter i mättekniken.

## 9 ANALYS AV MÄTRESULTAT

### 9.1 LÄNGDJÄMFÖRELSER

#### 9.1.1 Byggnorm för bedömning av punktnoggrannhet

Vid byggplatsmätningar tillämpas de normer som återges i den internationella standarden SS-ISO 4463 när olika punkt kategoriers (primär-, sekundär- och detaljpunkter) noggrannhet skall kontrolleras.

Noggrannhetskraven vid inmätning och utsättning ges i denna standard som tillåtna avvikelser för avstånd, vinklar och höjder, erhållna som resultat av mätoperationer. Anledningen till att man har valt att arbeta med avvikelser, till skillnad från TFA där felgränser anges som ex lokala punktmedelfel, beror främst på följande orsaker:

- vid byggmätning är det inbördes noggrannheten mellan mätpunkter som är av väsentlig betydelse, inte avvikelser i förhållande till ett teoretiskt läge
- att det i fält skall vara möjligt att enkelt kunna kontrollera noggrannheten. Ute på byggarbetsplatsen har man som regel bara tillgång till en koordinat förteckning.

Noggrannhetskraven för det inbördes läget mellan primärpunkter i planet bedöms dels vid upprättande av nätet, dels vid kontrollmätning, enligt följande:

1. vid inmätning av primärpunkter får avvikelserna, dvs förbättringarna, mellan mätta värden och motsvarande ur utjämnade koordinater beräknade värden för längder vara högst,  $\pm 0.75\sqrt{L}$  mm. L = längd mellan primärpunkter i meter.
2. vid kontrollmätning av primärpunkter får avvikelserna mellan mätta värden och motsvarande ur koordinater beräknade värden för längder vara högst,  $\pm 2\sqrt{L}$  mm.

#### 9.1.2 Analys av GPS-mätningarna

På grund av att baslinjerna ej beräknades var för sig utan sessionsvis innan de kombinerades till en slutgiltig nätutjämnning, kan ingen bedömning av noggrannheten i plan ske enligt normerna i punkt 1 ovan som gäller vid upprättande av primärnät. Analyser av resultaten vid testmätningar är ofta av grundläggande natur, dvs jämförelser mellan GPS- och terrestra bestämningar.



Av beräkningshandlingarna framgår att punkterna i test-nätet var mycket noggrant bestämda vid den terrestra mätningen. Samtliga längder i primärnätet var mätta med en Kern Mekometer. Enligt fabrikanten uppskattas å-priorimedel-felet i en längd till  $\pm(0.2 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$ . Noggrannheten kan betraktas som mer än tillfredställande för dessa bestämningar. Största förbättringen till en enskild längd är 1.5 mm. För den använda GPS-mottagaren WM 101 uppges noggrannheten i en observerad baslinje vara  $10 \text{ mm} \pm 2 \text{ ppm}$ .

Baslinjelängderna som erhållits från beräkningarna med PoPS jämfördes med de sidor i nätet mellan vilka terrestra längdmätningar har utförts. En sammanställning av längd-differenserna för mätkampanjerna redovisas i tabell 5 nedan.

BASLINJE	LÄNGD meter	MAX AVV. mm *	(L.3.2)		(L.3.3)		Empirisk studie 1		Empirisk studie 2		Empirisk studie 3	
			$\Delta M-T$	$\Delta U-T$	$\Delta M-T$	$\Delta U-T$	$\Delta M-T$	$\Delta U-T$	$\Delta M-T$	$\Delta U-T$	$\Delta M-T$	$\Delta U-T$
1-2	86	19	-3	-1	-3	-1	-15	-12	-2	-5	-10	-10
1-3	104	20	13	-17	13	-16	0	4	4	2	-7	-7
1-4	67	16	-31	-24	-31	-18	-8	-7	7	2	2	2
1-5	77	17	-	9	-2	5	4	6	5	11	6	6
1-6	94	19	-	20	5	17	14	14	27	17	14	6
1-7	74	17	-3	20	-3	17	-3	-5	-7	-8	-15	-15
2-3	90	19	-5	-4	8	-14	1	-3	15	4	-2	-2
3-4	70	17	-	-2	-15	-5	-3	7	12	18	5	5
4-5	105	20	5	2	5	3	14	4	-2	7	-7	-2
5-6	70	17	8	9	-4	-15	-4	-6	-21	-13	-5	-6
6-7	91	19	-	-9	14	15	7	3	-21	10	11	-13
7-2	80	18	-	11	-7	11	-7	-1	-4	-3	2	3
medel			-2.3	+1.2	-1.7	-0.1	0.0	+0.5	+1.1	+3.5	-0.5	-2.8
RMS			14.3	13.6	12.5	13.4	8.7	7.3	13.9	9.7	8.7	7.4

Tabell 5 Längdjämförelser i testnätet (GPS — Terr)

\* = högsta tillåtna avvikelse vid kontrollmätning av primärpunkter enligt standarden för byggmätning SS-ISO 4463, 2 L. (Hänsyn ej tagen till att kontrollmätningen utförts med Mekometer.)

$\Delta M-T$  = avvikelser i de sessionsvisa GPS-beräkningarna.

$\Delta U-T$  = avvikelser i de kampanjvisa GPS-beräkningarna.

Differenserna mellan de ur GPS-observationerna beräknade längderna och motsvarande terrestra längder är relativt skiftande i samtliga versioner. För enstaka baslinjer är differenserna så stora att de till och med överskrider den högsta tillåtna avvikelse som gäller vid kontrollmätning.

De erhållna GPS-längderna visar ingen konsekvent avvikelse, dvs att längderna skulle vara kortare eller längre jämfört med de terrestra mätningarna. Avvikelser beroende på en skalskillnad i mätningarna kan därför inte anses troligt.

Någon signifikant skillnad mellan versionerna (L.3.2) och (L.3.3) i Snays metod kan inte konstateras. En bidragande orsak till att resultaten blev i stort sett identiska är att bestämningarna till stora delar består av samma observationsdata.

Vidare gav Snays metod, som framgår av tabell 5, något sämre överensstämmelse med de terrestra bestämningarna än vad de empiriska metoderna gav. I några fall är avvikelserna mellan GPS- och de terrestra bestämningarna större för nätutjämningsarna än de sessionsvisa beräkningarna. En tänkbar förklaring till detta kan vara att algoritmerna som POPS använde vid samtidig beräkning av flera än en beräkningssession ej gav varje baslinjebestämning korrekt vikt.

I de empiriska metoderna är det möjligt att studera repeterbarheten för baslinjemätningarna. I den första empiriska studien var avvikelserna mellan baslinjebestämningar i olika sessioner påtagligt stora, från 8 till 28 mm. I den andra empiriska studien visade sig överensstämmelsen vara bättre, ingen avvikelse var större än 9 mm med undantag för en baslinje där avvikelsen var 13 mm. Resultatet från sessionsberäkningarna visar dock att varken mätprecisionen eller tillförlitligheten var särskilt bra i någon av dessa versioner.

Osäkerheten i mätningarna beror förmodligen till en del på den använda antennens egenskaper. En trolig förklaring kan vara att antennens elektriska centrum inte är tillräckligt stabilt och därmed inte sammanfaller med dess geometriska centrum.

Att dra någon säker slutsats beträffande vilken precision som kan uppnås med de olika observationsstrategierna är vanskligt. De skiljaktigheter som har uppnåtts i detta projekt beror förmodligen snarare på skillnader i observationsdatas kvalitét än på metodskillnader. I det långa loppet borde versionen (L.3.3) ge ett bättre/noggrannare resultat än den empiriska metoden, eftersom man får medelvärdesbildning av ett större antal observationer där. I det här försöket blev resultatet det omvända.

Vad det beträffar tillförlitligheten så är felsökning i båda metoderna möjligt genom att bilda slingor av baslinjer ingående i olika observationssessioner, sk icke-triviala baslinjer. Tillvägagångssättet är en utmärkt hjälp för att hitta grova fel i baslinjeberäkningen eller i den sessionsvisa beräkningen. Detta är speciellt användbart när det är frågan om korta avstånd då kvalitetsmätten på beräkningarna är för intetsägande. Ur slutningsfelen kan fel både upptäckas och lokaliseras i den empiriska metoden och i version (L.3.3). I version (L.3.2) kan fel endast upptäckas och i vissa fall lokaliseras.

Eventuella fel av typen centreringsfel kan det dock vara synnerligen svårt att upptäcka på endast detta sätt. Ur denna synvinkel torde mätning enligt Snays metod ge bättre tillförlitlighet. I version (L.3.2) kan ett fel upptäckas i högre grad än i den empiriska metoden och i (L.3.3) versionen kan det alltid upptäckas. Resonemanget bygger givetvis på att tvångscentrering inte används vid mätningarna.

Då det gäller observationstiden går det inte att dra några generella slutsatser om hur lång den bör vara. Vid både korta och långa observationstider (70 eller 120 minuter), har beräkningarna gett såväl bra som dåliga resultat.

Vid krav på hög inbördes noggrannhet av punkters bestämning vid korta avstånd är den använda GPS-utrustningen, som framgått av resultaten från mätningarna i testnätet, i dagsläget inte särskilt lämpad. Testmätningarna understryker behovet av ytterligare utveckling av instrument och beräkningsprogram, om GPS-tekniken skall kunna användas rutinmässigt vid geodetiska mätningar av mycket korta avstånd.

Tester med mottagare (WM 102, Ashtech L-XII och Trimble 4000ST) som kommit ut på marknaden efter försökets genomförande tyder på att högre noggrannhet kan uppnås vid mätningar på korta håll (punkttäthet 0.5-1.0 km). För dessa mottagare har fabrikanterna angivit en högre noggrannhet i specifikationen (5 mm konstantfel jmf med 10 mm för WM 101).

På grund av att mycket avancerad teknik används vid GPS-mätningar finns det naturligtvis en rad detaljer som kan inverka på noggrannheten i mätningarna, t ex:

- hur väl kan mottagarnas oscillatorer synkroniseras med varandra och i förhållande till GPS-systemets normaltids ?
- med vilken precision mäter mottagaren fasen i den mottagna bärvågen ?
- hur väl är antennens elektriska centrum definierat i förhållande till det geometriska centrumet ?

Hur påverkas resultatet och tillförlitligheten av eventuella brister i dessa faktorer? Det är något som kräver vidare undersökningar för att få svar på.

## 9.2 TRANSFORMATIONER

Punktkoordinaterna som redovisas i PoPS-beräkningarna är, som tidigare nämnts, relaterade till GPS-satelliternas koordinatsystem, WGS-84, som är ett globalt referenssystem.

För att få ytterligare bekräftelse på noggrannheten i GPS-koordinaterna och en överskådlig jämförelse med den terrestra bestämningen överräknades och transformerades WM 101/PoPS lösningarna till det lokala testnätet. Beräkningsgången för transformation av GPS-koordinaterna i två dimensioner beskrivs i korthet nedan. Följande steg utfördes:

Först utfördes en preliminär inpassning av GPS-beräkningens koordinater i WGS-84 till RT90, den nya realiseringen av datumet för riksnätet i plan. Datumtransformationen gjordes med en 7-parameterstransformation enligt Bursa-Wolfs modell. För transformationen användes ett av LMV framtaget transformationssamband mellan systemen och den genomfördes med hjälp av lantmäteriverkets program BW-TRANS. De erhållna kartesiska koordinaterna omvandlades till latitud ( $\varphi$ ), longitud ( $\lambda$ ) och höjd på Bessels ellipsoid.

Efter detta togs LMVs transformationsprogram GAUSS i anspråk för överräkning av latitud och longitud på Bessels ellipsoid till plana koordinater (X,Y) i projektionsplanet, enligt Gauss-Krügers konforma projektionsmetod. Beräkningarna baserades på en lokal medelmeridian för att minimera projektionskorrekturerna.

För den slutliga inpassningen av de GPS-mätta näten till det lokala terrestra systemet användes LMVs program SNOOPY. Koordinattransformationen är baserad på en plan Helmert-transformation med fast skala. Programmet medger statistisk kontroll av de erhållna transformationsresultaten. I tabell 6 redovisas resultaten för transformation med samtliga sju primärpunkter som passpunkter.

Transformationsresultatet från inpassningarna bekräftar att noggrannheten i GPS-bestämningarna med WM 101 i dag inte håller den höga noggrannhet som är möjligt med terrestra mätmetoder. Resultatet var inte direkt oväntat, ty redan vid längdjämförelsen fick man en klar antydning åt vart det lutade. Noggrannheten i mätningarna och överensstämmelsen med de terrestra bestämningarna är som framgått av föregående avsnitt ej tillfredsställande för byggplatsmätning.

Motsägelserna i passpunkterna visar att överensstämmelsen med det terrestra nätet i allmänhet var undermålig för de flesta punkter i samtliga kampanjer. Grundmedelfelet i inpassningarna blev genomgående ungefär 3-4 gånger större än vad som kan uppnås med terrestra geodetiska mätmetoder, se Nordqvist och Olssons examensarbete LMV rapport 1987:6.

Passpunkt	(L.3.2)		(L.3.3)		Empirisk studie 1		Empirisk studie 2		Empirisk studie 3	
	$V_x$	$V_y$	$V_x$	$V_y$	$V_x$	$V_y$	$V_x$	$V_y$	$V_x$	$V_y$
SIB 1	-4	-18	-5	-11	-5	-2	-9	-2	-9	1
SIB 2	-1	-2	-3	-10	7	-5	-2	4	2	0
SIB 3	2	3	3	5	-8	-3	-10	-2	0	3
SIB 4	-3	6	-3	7	-2	5	7	-5	4	-1
SIB 5	4	-1	0	8	-1	9	2	13	-5	5
SIB 6	-3	7	11	-6	6	2	11	-1	-3	1
SIB 7	5	6	-3	7	3	-6	1	-8	11	-10
Grundmedelf/ koordinat	7 mm		8 mm		6 mm		8 mm		6 mm	

Tabell 6 Plan Helmerttransformation, utan skalparameter, av GPS-mätkampanjerna till testnätet. Förbättringarna anges i mm.

I version (L.3.2) framkom att förbättringen för punkt SIB 1 blev tämligen stor. Inpassning av kampanjen utan denna punkt föranledde inga väsentliga förändringar i förbättringarna till varje enskild koordinat.

I den två-dimensionella inpassningen har ingen hänsyn tagits till ellipsoidhöjderna vid transformationen. Tillvägagångssättet valdes för att undvika att de normalt sämre bestämda höjderna skulle ha någon inverkan på de plana koordinaterna.

Som tidigare påpekats är GPS-mätningen en tredimensionell mätmetod, dvs den kan även utnyttjas för höjdbestämmning av primärpunkterna i det lokala testnätet. För att kunna studera noggrannheten i höjdbestämmningarna krävs att mera avancerade transformationsmodeller, än vid bestämning av plana koordinater, används vid inpassningen. I det här fallet användes en tredimensionell Helmerttransformation, 7-parameter-transformation, vid inpassningen av GPS-mätkampanjerna till testnätet. Liksom vid den tvådimensionella transformationen ansågs det inte nödvändigt att beräkna någon skalparameter på primärnätets begränsade storlek.

Förbättringarna redovisas i ett lokalt system (norr, öst, upp). Som framgår av tabell 7, är överensstämmelsen mellan GPS-mätningarna och de terrestra bestämningarna något bättre när det gäller läget i höjd än i plan. Att de GPS-bestämda höjderna inte fått sämre noggrannhet beror främst på att mätningarna har utförts inom ett relativt plant och ytterst begränsat område.

Passpunkt	(L.3.2)			(L.3.3)			Empirisk studie 1			Empirisk studie 2			Empirisk studie 3		
	V <sub>n</sub>	V <sub>ö</sub>	V <sub>u</sub>	V <sub>n</sub>	V <sub>ö</sub>	V <sub>u</sub>	V <sub>n</sub>	V <sub>ö</sub>	V <sub>u</sub>	V <sub>n</sub>	V <sub>ö</sub>	V <sub>u</sub>	V <sub>n</sub>	V <sub>ö</sub>	V <sub>u</sub>
SIB 1	2	19	-1	0	12	1	-3	4	0	-7	4	-11	-8	1	1
SIB 2	-1	3	-1	-1	11	-6	7	3	2	-5	-2	4	1	0	6
SIB 3	2	-4	3	2	-7	8	-7	4	4	-9	4	3	-1	-3	6
SIB 4	-3	-5	0	-5	-7	-4	-2	-4	-4	9	2	0	5	-1	-15
SIB 5	2	1	-5	-4	-7	-3	-6	-7	-2	-5	-12	3	-8	-4	13
SIB 6	-3	-5	6	14	4	5	7	-4	7	13	-2	4	-1	1	-4
SIB 7	2	-8	-3	-7	-6	1	4	4	-7	2	7	-2	12	5	-5
Grundmedelf/ koordinat	7mm			8mm			6mm			8mm			8mm		

Tabell 7 Tredimensionell Helmerttransformation av GPS-resultatet till testnätet med fast skala. Förbättringarna redovisas i ett lokalt system (norr, öst, upp) och anges i mm.

## 10 SLUTORD

De redovisade resultaten tillsammans med erfarenheter från mätningarna och beräkningarna visar att ytterligare instrument- och metodutveckling är nödvändig innan GPS-tekniken kan tillämpas rutinmässigt vid mätningar av mindre primärnät.

Erfarenheter från andra projekt inom samhällsmätningen visar att mätning med GPS för närvarande är gynnsammast vid bestämning av punkter på kommunal huvudstomnätetsnivå och uppåt. Tack vare sin "obegränsade" räckvidd ger GPS möjligheter att utföra geodetiska mätningar som tidigare inte varit praktiskt genomförbara med traditionella mätmetoder.

GPS-teknikens användbarhet och tillgänglighet kommer under de närmaste åren att förbättras i takt med satellit-systemets successiva utbyggnad. Fortsatt teknisk utveckling av mottagare, beräkningsalgoritmer, observationsmetoder samt andra tekniska förbättringar innebär även att det blir nya användningsområden. Med lägre priser kommer troligen också ett genombrott för tekniken vid mätningar av korta avstånd mellan stompunkterna, t ex i polygonnät.

Mot bakgrund av de utförda tillämpningsstudierna är jag av den åsikten, även om nuvarande begränsningar/brister avhjälpas, att man en tid framöver får lita till gammal beprövad lantmåteriteknik vid dylika mätningar.

Samtidigt med GPS-teknikens framsteg är det viktigt att fortsatt forskning och metodutveckling ges tillfälle att utvecklas. Det är också viktigt att den tekniska utvecklingen följs upp i utbildningen på högskolor och tekniska gymnasier. För redan yrkesverksamma mätningssingenjörer bör kurser och seminarier ordnas under de närmaste åren för att tekniken skall få den spridning som är nödvändig.

## 11 REFERENSER

van den Berg J, Lindberg Å, Olsson R, (1978):  
Provfälta för byggnadsmätningar. SIB meddelande M78:23.

van den Berg J, Lindberg Å, (1985):  
Primärnät. Projekt 277 byggnadsmätning, Statens institut  
för byggnadsforskning.

Jivall A-C, Jakobsson L, (1987):  
Mäta med GPS - beräkningsprogram samt detaljstudie och  
beräkningsexempel med PoPS. LMV rapport 1987:18.

Olsson A, Nordqvist A, (1987):  
Längdmätning mot plastreflektorer, tillämpad vid  
upprättande och utnyttjande av mindre primärnät.  
LMV rapport 1987:6.

PoPS Manual, (1988):  
PoPS (Post Processing Software) Manual version 2.02  
Wild Magnavox Satellite Survey Company, A joint venture  
of Magnavox Survey Systems Inc and Wild Heerbrugg Survey  
Corporation.

Snay R.A., (1986):  
Network design strategies applicable to GPS surveys using  
three or four receivers. Bulletin Geodesique, The Journal  
of the International Association of Geodesy, volume 60,  
no 1 1986, Bureau Central de l'association Internationale  
de Geodesie, rue de Grenelle 140 - 75700 Paris.

Svensk standard, SS-ISO 4463, (1983):  
SIS - Standardiseringskommissionen i Sverige,  
SS-ISO 4463, Byggmätning - utsättning och inmätning  
- tillåtna mätningsavvikelser. Utgåva 1 1983.



## 12 BILAGOR

- A FÄLTPLANERING, utskrifter från PoPS
  - A:1 Satellite predictions
  - A:2 Satellite passes
  - A:2 Satellite availability
  - A:3 Satellite elevations
  - A:4 Satellite azimuths
  
- B NÄTFIGURER, sessionsindelning för mätkampanj
  - B:1 (L.3.2)
  - B:2 (L.3.3)
  - B:3 Empirisk studie 1 och 2
  - B:4 Empirisk studie 3

PoPS V2.0  
WM Satellite Survey Company  
Satellite predictions

Page 1  
Fri 7 Oct 1988  
11:18

PoPS SATELLITE PREDICTIONS

Date : Wed 19 Oct 1988  
Site : Mårtsbo Time zone GMT + 0  
Latitude : 60°35' N  
Longitude : 17°15' E  
Height : 100 m Elevation cut-off 15°

Almanac from Sat 20 Aug 1988

+-----+  
: The GPS satellites currently in :  
: operation are experimental in nature. :  
: The U.S. government has the right to :  
: modify the position or terminate the :  
: operation of these satellites at :  
: any time. :  
+-----+



POPS V2.0  
 WM Satellite Survey Company  
 Satellite elevations (degrees)

Page 4  
 Fri 7 Oct 1988  
 11:16

Mårtsbo Wed 19 Oct 1988 Cut-off angle 15°  
 60°35' N 17°15' E 100 m All times GMT + 0

Sat.No	3	6	8	9	11	12	13	(04) (07)	
00:00		77		23					
00:10		80		28					
00:20		81	3	32					
00:30		79	7	37		1			
00:40		75	12	41		5			
00:50		71	17	46		9			
01:00		67	21	50		13			
01:10		62	26	55		17			
01:20		58	31	60	2	22			
01:30		53	35	64	7	26			
01:40		49	39	68	12	30			
01:50		44	43	72	17	34			
02:00		40	46	75	22	38			
02:10		35	48	77	27	43			
02:20		31	49	78	32	47	0		
02:30		27	50	76	37	52	5		
02:40		23	49	73	42	56	10	1	0
02:50		19	47	69	46	61	15	6	4
03:00		15	45	65	51	65	20	11	8
03:10		11	42	61	55	69	25	16	12
03:20		7	38	56	58	74	31	21	17
03:30		3	34	52	61	78	36	26	21
03:40	2		30	47	62	81	41	31	25
03:50	7		25	42	62	82	47	36	30
04:00	12		21	38	61	80	52	42	34
04:10	17		16	33	58	77	58	47	39
04:20	22		12	29	55	72	63	53	44
04:30	27		7	25	51	68	67	58	49
04:40	32		3	20	46	63	71	63	54
04:50	37			16	42	58	73	68	59
05:00	42			12	37	53	73	72	64
05:10	48			8	32	48	71	75	70
05:20	54			3	28	43	68	76	75
05:30	59				23	38	64	75	81
05:40	65				18	34	59	71	87
05:50	70				14	29	54	67	88
06:00	76				9	24	49	62	82
06:10	82				5	19	44	57	76
06:20	86				1	15	39	52	71
06:30	85					10	34	47	65
06:40	80					6	29	42	59
06:50	75					1	25	37	54
07:00	69						20	32	48
07:10	64						16	28	43
07:20	58						12	23	37
07:30	53						7	18	32
07:40	48						3	14	27
07:50	43							10	22
Sat.No	3	6	8	9	11	12	13	(04) (07)	

-----  
 PoPS V2.0  
 WM Satellite Survey Company  
 Satellite azimuths (degrees)  
 -----

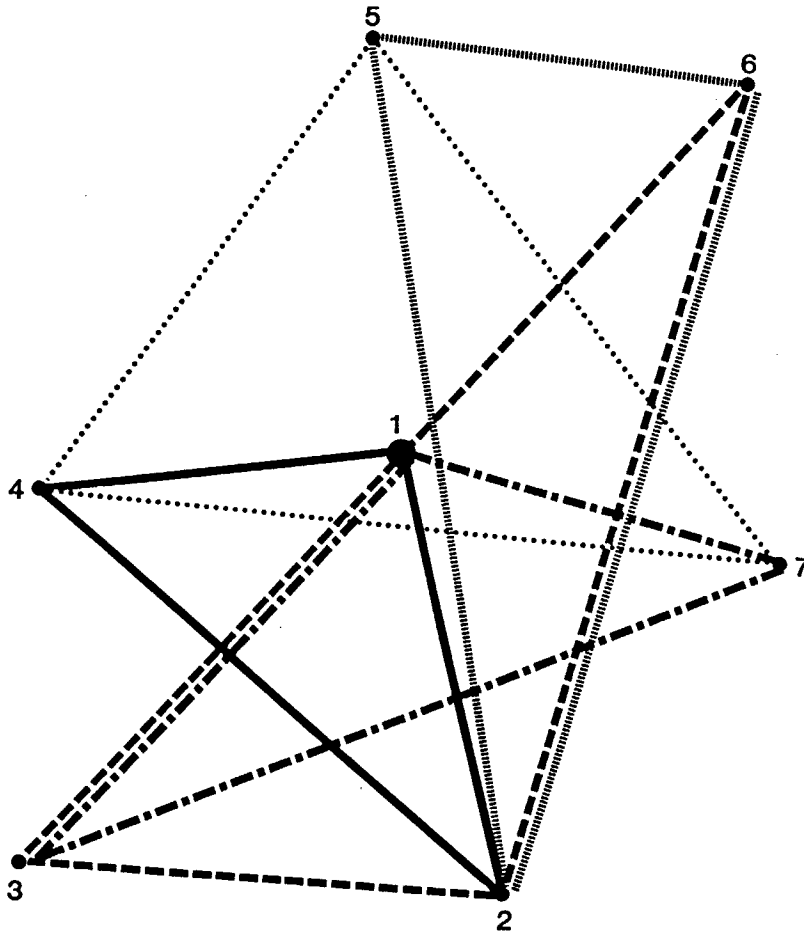
Page 7  
 Fri 7 Oct 1988  
 11:19

-----  
 Märtsbo Wed 19 Oct 1988 Cut-off angle 15°  
 60°35' N 17°15' E 100 m All times GMT + 0  
 -----

Sat.No	3	6	8	9	11	12	13	(04)	(07)
00:00		277		246					
00:10		302		249					
00:20		336	117	253					
00:30		6	115	257		250			
00:40		25	113	261		253			
00:50		38	111	265		257			
01:00		47	109	270		260			
01:10		54	107	275		263			
01:20		60	104	282	139	266			
01:30		65	100	289	138	270			
01:40		69	96	298	137	273			
01:50		73	90	310	136	277			
02:00		78	84	327	135	280			
02:10		81	77	349	134	284			
02:20		85	69	15	132	288	159		
02:30		89	61	38	130	292	159		
02:40		92	53	56	127	297	158	162	278
02:50		96	46	69	124	302	158	162	281
03:00		99	40	78	119	308	158	162	284
03:10	102	34	86	113	315	158		162	287
03:20	105	30	92	106	325	157		162	290
03:30	108	27	98	97	339	157		162	293
03:40	178		24	103	86	3	156	162	296
03:50	179		23	107	75	39	154	161	299
04:00	180		21	111	64	72	152	161	302
04:10	181		21	115	55	93	149	160	305
04:20	182		20	118	48	105	144	159	308
04:30	183		20	122	43	113	136	156	311
04:40	184		21	125	39	120	124	152	313
04:50	185			128	37	125	107	146	316
05:00	186			131	35	129	88	136	318
05:10	187			133	34	133	72	119	320
05:20	189			136	34	136	60	96	322
05:30	189				34	140	52	75	323
05:40	190				35	142	48	61	320
05:50	190				35	145	45	52	166
06:00	188				36	148	43	47	158
06:10	180				38	150	43	45	159
06:20	146				39	152	43	44	160
06:30	70					154	44	43	162
06:40	50					156	45	44	163
06:50	45					157	46	44	165
07:00	44						48	46	167
07:10	45						49	47	169
07:20	46						51	49	170
07:30	48						53	51	172
07:40	50						56	53	173
07:50	52							55	175

Sat.No 3 6 8 9 11 12 13 (04) (07)

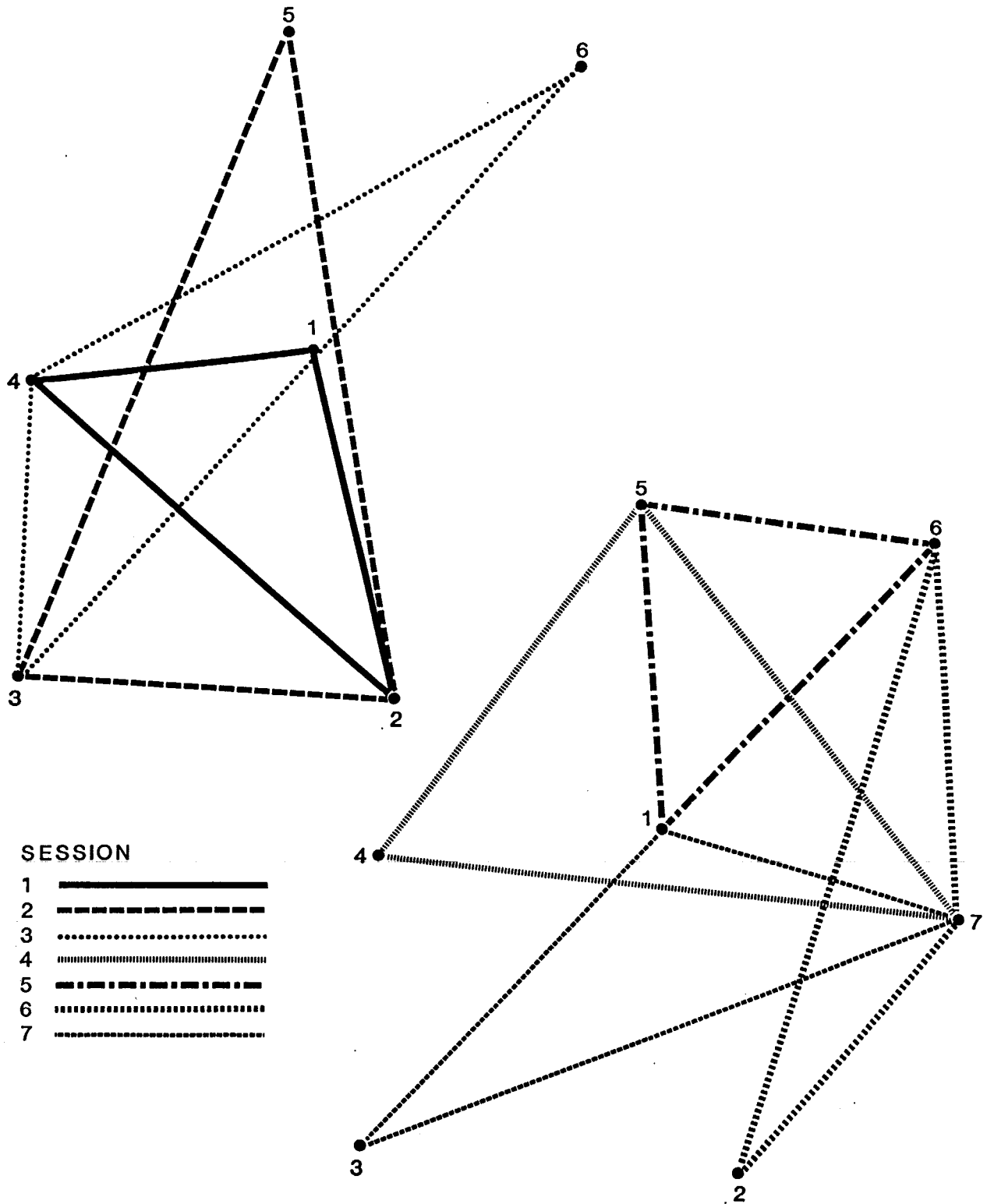
# SESSIONSINDELNING FÖR MÄTKAMPANJ (L.3.2)



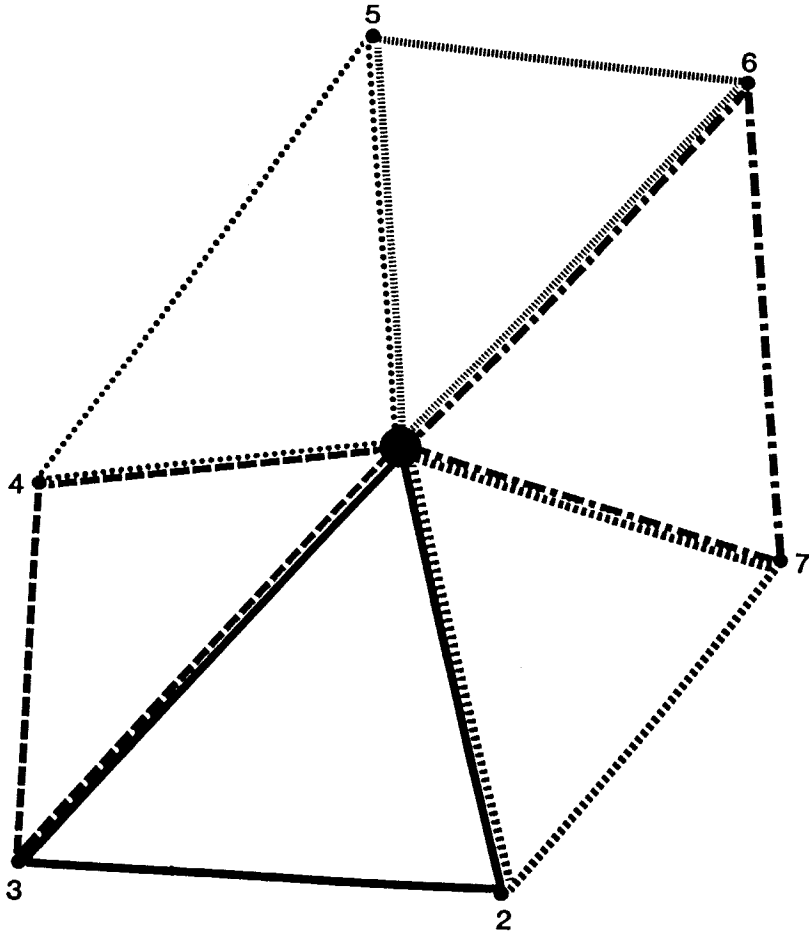
## SESSION

- 1 —————
- 2 - - - - -
- 3 .....
- 4 - - - - -
- 5 - - - - -







# SESSIONSINDELNING FÖR MÄTKAMPANJ (L.3.3)



# SESSIONSINDELNING FÖR MÄTKAMPANJ EMPIRISK STUDIE 1 OCH 2

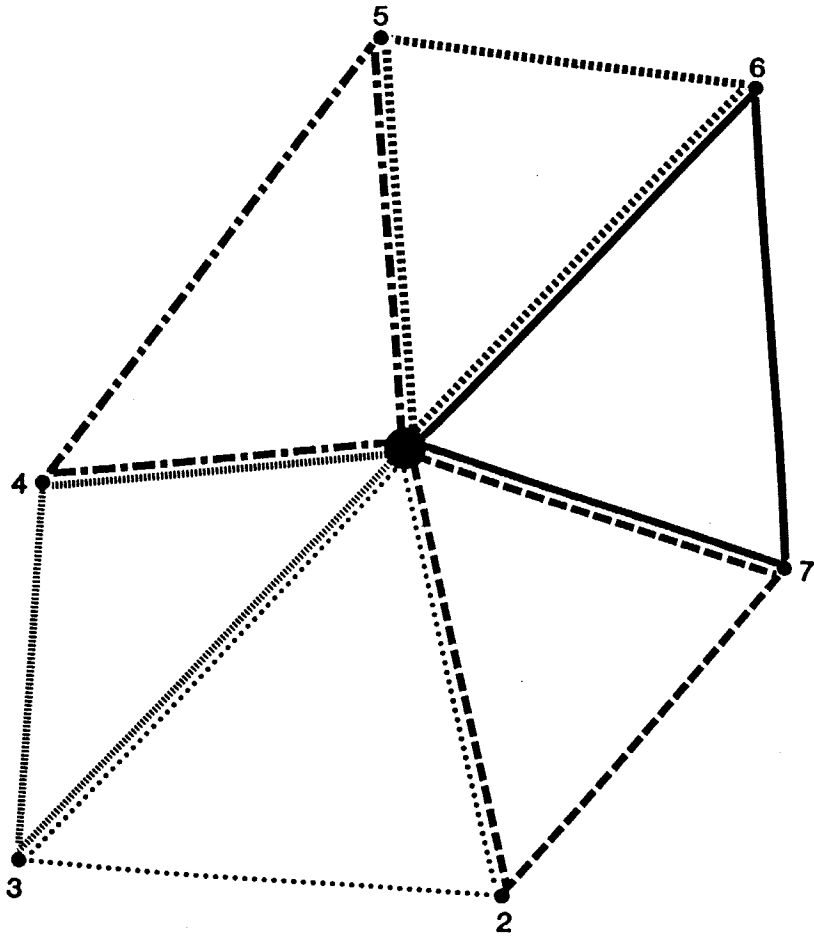


## SESSION






- 1 
- 2 
- 3 
- 4 
- 5 
- 6 



SESSIONSINDELNING FÖR  
MÄTKAMPANJ  
EMPIRISK STUDIE 3



SESSION

- 1      
- 2:1    
- 2:2    
- 2:3    
- 2:4    
- 3      