



**Titel: Nøjagtigheden af GPS**

**Tema: Teknologi og naturvidenskab i en globaliseret verden**

**Projektperiode: p1 3/10/97 - 15/12/97**

**Projektgruppe: 347**

**Deltagere:**

**Robert Stepien  
Peter Korsgaard  
Tonny Gregersen  
Karsten Jensen  
Mads Christensen**

**Vejledere:**

**Børge Linberg  
Morten Hajn**

**Synopsis:**

Denne rapport omhandler positioneringssystemet Global Positioning System.

Ved opsamling af data ved hjælp af en Shipmate RS5800 GPS-modtager tilkoblet en PC undersøges nøjagtigheden af positioneringen.

Baggrunden for USA's Selective Availability-politik og strømninger i amerikansk politik på dette område undersøges.

Desuden behandles Differential GPS og muligheden for en kombination af GPS og det russiske GLONASS.

**Oplagstal: 12**

**Sideantal: 78**

**Bilag: Diskette**

## Forord

Vi takker Hans Ebert og Stefan Overby for deres foredrag om GPS, som inspirerede os til dette projekt. Vi vil endvidere takke Hans Ebert for lån af udstyret, som blev brugt til dette projekt.

Desuden takker vi vores vejledere Børge Lindberg og Morten Hajn for gode råd og ideer.

## Læsevejledning

I rapporten vil henvisninger til litteratur ske på følgende måde: [<forkortelse>, s. <side>].

Værket, som forkortelsen henviser til, kan findes i litteraturhenvisningen.

Hvis kilderne er internetsider bliver de i rapporten refereret til på følgende måde: [<forkortelse>]. Forkortelsen henviser til en URL, som kan findes i kildehenvisningen. Nogle steder vil kildehenvisningen dog skrives på følgende måde: [<forkortelse>, <URL-udvidelse>].

Her angiver "URL-udvidelse" en udvidelse af den i kildehenvisningen anviste URL.

Links til kilderne kan findes efter emne på links-siden på den vedlagte diskette [a:\links\index.htm]. Desuden kan links-siden findes på internettet på adressen <http://www.but.auc.dk/~36kors-/p1/>

Rapporten er udarbejdet af:

---

**Robert Stepien**

---

**Tonny Gregersen**

---

**Mads Christensen**

---

**Peter Korsgaard**

---

**Karsten Jensen**

# Indholdsfortegnelse

<b>1. INDLEDNING</b> .....	<b>6</b>
<b>2. PROBLEMANALYSE</b> .....	<b>7</b>
2.1 FRA LANDBASERET RADIONAVIGATIONEN TIL SATELLITNAVIGATION .....	7
2.1.1 De landbaserede radionavigationssystemer.....	7
2.1.2 Fordelene ved satellitnavigation .....	7
2.1.3 Forstadiet til GPS - Transit-satellitterne .....	8
2.1.4 Udviklingen af GPS.....	9
2.2 GPS' ANVENDELSESMULIGHEDER.....	10
2.2.1 Maritimt.....	10
2.2.2 På land .....	10
2.2.3 I luften .....	11
2.3 OPBYGNING AF GPS.....	12
2.3.1 Satellitsegmentet.....	12
2.3.2 Kontrolsegmentet .....	13
2.3.3 Brugerssegmentet .....	13
2.4 SIGNALERNE.....	14
2.4.1 PRN-kode.....	14
2.4.2 Standard Positioning Service .....	16
2.4.3 Precise Positioning Service.....	16
2.4.4 Navigationsdataene.....	17
2.4.5 Fejlkilder .....	19
2.5 POSITIONSBESTEMMELSEN .....	20
2.5.1 Princippet i positionsbestemmelsen.....	20
2.5.2 Modtageren.....	22
2.5.3 Matematikken bag positionsbestemmelsen.....	24
2.6 REFERENCESYSTEMER.....	27
2.6.1 Omdrejningsellipsoiden.....	28
2.6.2 Omregning.....	28
2.6.3 WGS 1984.....	29
2.7 SELECTIVE AVAILABILITY .....	31
2.7.1 Baggrund.....	31
2.7.2 Midlet .....	31
2.7.3 Militære interesser.....	32
2.7.4 Civile interesser.....	32
2.7.5 Udarbejdningen af SPS.....	33
<b>3. PROBLEMAFGRÆNSNING</b> .....	<b>34</b>

<b>4. UNDERSØGELSE AF GPS' NØJAGTIGHED.....</b>	<b>35</b>
4.1 DATAOPSAMLING .....	35
4.1.1 Forsøgspstilling .....	35
4.1.2 Dataopsamlingen.....	35
4.1.3 Programmet og dokumentationen.....	35
4.1.4 Problemformulering.....	37
4.1.5 Problemanalyse .....	37
4.1.6 Problemanalyse - Serielport kommunikation .....	37
4.1.7 Problemanalyse - Databehandling .....	39
4.1.8 Problemanalyse - Filhåndtering.....	40
4.1.9 Løsningsmetode - Serielport kommunikation .....	40
4.1.10 Initialisering:.....	44
4.1.11 Hente tegn fra serielporten: .....	44
4.1.12 Deinitialisering:.....	44
4.1.13 Løsningsmetode - Databehandling .....	45
4.1.14 Løsningsmetode - Filhåndtering.....	45
4.1.15 Afprøvning.....	46
4.1.16 Brugervejledning .....	46
4.2 STATISTISK METODE .....	46
4.2.1 Grundlæggende begreber.....	46
4.2.2 Normalfordelingskurver.....	48
4.2.3 Nøjagtigheden.....	51
4.3 DATABEHANDLING .....	52
4.3.1 Implementation .....	52
4.3.2 Resultater .....	53
4.3.3 Fejlkilder .....	58
<b>5. FORBEDRINGER AF GPS.....</b>	<b>59</b>
5.1 MOD OPGIVELSE AF SA? .....	59
5.1.1 Problemer i 90'erne.....	59
5.1.2 Rapporterne.....	59
5.1.3 Dekretet.....	60
5.1.4 Fremtiden .....	61
5.1.5 Konklusion.....	61
5.2 GLONASS .....	62
5.2.1 Forskelle på GPS og GLONASS.....	62
5.2.2 PZ 90.....	63
5.2.3 PZ 90 og WGS 84.....	64
5.2.4 Tidskala.....	65
5.2.5 1996.....	66

5.2.6	<i>GLONASS-M</i> .....	67
5.2.7	<i>Konklusion</i> .....	67
5.3	<b>DIFFERENTIEL GPS</b> .....	68
5.3.1	<i>Korrektionsteori</i> .....	69
5.3.2	<i>Fejlkilder</i> .....	70
5.3.3	<i>Wide-Area DGPS</i> .....	71
5.3.4	<i>Pseudolitter</i> .....	72
5.3.5	<i>Konklusion</i> .....	72
<b>6.</b>	<b>KONKLUSION</b> .....	<b>73</b>
6.1	NØJAGTIGHEDEN .....	73
6.2	FORBEDRINGER .....	73
<b>7.</b>	<b>PERSPEKTIVERING</b> .....	<b>74</b>
7.1	VIDEN .....	74
7.2	ORGANISATION.....	74
7.3	TEKNIK .....	74
7.4	PRODUKT .....	75
<b>8.</b>	<b>LITTERATURLISTE</b> .....	<b>76</b>
<b>9.</b>	<b>KILDELISTE</b> .....	<b>77</b>

# 1. Indledning

Det amerikanske satellitpositioneringssystem Global Positioning System er inden for de sidste år blevet mere og mere fremtrædende inden for positionering og navigation. Oprindeligt blev systemet udviklet af det amerikanske forsvar. For almindelige brugere medførte det, at præcisionen blev begrænset af en politik kaldet Selective Availability. I dag hersker der dog en tvivl om, hvorvidt degraderingen af præcisionen stadig udføres, da det amerikanske forsvar aktiverer og deaktiverer den efter egne interesser. Dette medfører, at mange almindelige brugere er i tvivl om i, hvilken grad de kan stole på data fra deres GPS-modtager, da de ikke ved om SA er effektueret eller ej. Systemet rummer store perspektiver, men også problemer i en globaliseret verden.

Projektets problemstillinger begyndte at forme sig under et foredrag af Hans Ebert. Foredraget omhandlede grundprincipperne ved positionsbestemmelse og navigation med Global Positioning System. I forbindelse med navigation til søs i kystnært farvand efterlyste Hans Ebert viden om systemets nøjagtighed. Han var i tvivl om, hvor stor nøjagtighed systemet egentlig gav. Ved sejlads i kystnært farvand er behovet for troværdige positionsdata stort, da en afvigelse på få meter vil kunne resultere i grundstødning. Det er således vigtigt at vide i hvilken grad, man kan stole på GPS-udstyret.

Vi bestemte os derfor for at **undersøge nøjagtigheden af GPS**. Herudfra vurderes desuden, hvorvidt SA bliver effektueret. Vi vil desuden **undersøge mulighederne for en forbedring af systemet** ved enten en fjernelse eller omgåelse af SA.

Rapporten er delt op i en problemanalyse, der behandler GPS' baggrund, virkemåde og problemerne hermed, og en problemløsning, der indeholder, dels en undersøgelse af nøjagtigheden af GPS, og dels de mulige forbedringer, der kan opnåes, teknisk som politisk.

En nærmere afgrænsning af problemløsningen vil blive behandlet i afsnit 3.

## 2. Problemanalyse

### 2.1 Fra landbaseret radionavigationen til satellitnavigation

Siden GPS blev operationelt har stadig flere forladt de gamle radionavigationssystemer for at gå over til navigation ved GPS. Desuden har GPS' overlegenhed på en række felter åbnet for en lang række af nye anvendelsesområder.

De gamle navigationssystemer, såsom LORAN C, Decca og OMEGA, hvoraf det ældste, Decca, blev udviklet kort efter 2. verdenskrig [Toft, s. 92], var alle baserede på udsendelse af signaler fra antenner på jordens overflade. To beslægtede hovedproblemer har besværliggjort anvendelsen af disse: nøjagtighed og dækning. Et kort beskrivelse af de nævnte systemer og problemerne herved er her beskrevet.

#### 2.1.1 De landbaserede radionavigationssystemer

	Decca	LORAN C	Omega
Dækning	N-Europa, Sydafrika, Indien, Persiske Golf, Japan, NV-Australien og Øst-Canada	N-Atlanten, Middelhavet, Dele af Stillehavet, Japan, Persiske Golf og USA's kyst.	Global
Nøjagtighed ( $2\sigma$ )	500 m	500 m	4-8 km
Kontinuert dækning	Ja	Ja	Ja

Figur 2.1: De landbaserede radionavigationssystemers nøjagtighed og dækning [Toft, s. 106].

Sammenlignes Decca- og Omegasystemerne ses, at hvis høje nøjagtigheder er påkrævet kompromitteres dækningen. Dækningen bliver bekostelig i kystnære farvande og umulig på oceanerne. Og omvendt: Skabes global dækning forringes nøjagtigheden.

#### 2.1.2 Fordelene ved satellitnavigation

Ved satellitnavigation placeres et antal satellitter omkring jorden således, at de er i stand til at dække hele jorden med deres signaler. Navigationssatellitterne anvender høje frekvenser, som er i stand til at gennembryde troposfæren og ionosfæren, og på den måde sendes signaler direkte fra satellit til modtager. Dette gør, at man får en utrolig god præcision.

Satellitnavigation er dermed en fordel frem for landbaseret navigation, da det giver både præcision og 100% dækning - i modsætning til landbaseret navigation, hvor den ene udelukker den anden.

### **2.1.3 Forstadiet til GPS - Transit-satellitterne**

Man fik den grundlæggende idé til satellitnavigation i 1957, da den første satellit - Sputnik - blev opsendt. Forskere fra The Applied Physics Laboratory of Johns Hopkins University udviklede en metode til at bestemme Sputniks bane ved at beregne dobbelreffekten af det radiosignal, som satellitten udsendte. Man fik derefter den idé, at det måtte være muligt, at bestemme én's position på jorden, hvis man kendte satellittens nøjagtige position i rummet [Beadles].

Forskerne ved Johns Hopkins University arbejdede videre med idéen om positionsbestemmelse v.h.a. satellitter og udviklede i samarbejde med den amerikanske marine (U. S. Navy) TRANSIT.

Det var oprindeligt meningen, at TRANSIT kun skulle bruges til at navigere ubåde med, men det viste sig, at systemet også meget vel kunne bruges til at navigere skibe. TRANSIT blev taget i brug i 1964 af den amerikanske flåde og i 1967 blev systemet frigivet til civil brug [Toft, s. 41]. Det har siden været i brug til d. 31. december 1996, hvor det blev taget ud af brug.

TRANSIT var et system bestående af 4 satellitter, hvor man kunne bestemme sin position ved at måle dobbelreffekten af det radiosignal, som satellitterne udsendte. Herved kunne man få nøjagtigheder inden for nogle få hundrede meter, hvis man kendte én's højde over havoverfladen og satellittens position.

Systemet havde flere ulemper. For det første var systemet todimensionelt. For det andet skulle brugeren af systemet kende sin højde over havoverfladen. For det tredje bevirkede gensidig interferens, at man højst kunne få målinger fra fem satellitter. Endvidere ville satellitterne kun kunne "ses" (og positionsmålinger foretages) hvert fyrretyvende minut [Navsys]. Desuden kunne brugeren ikke flytte sig mens han modtog data. Alt i alt gjorde dette, at man ikke kunne bruge TRANSIT til at bestemme position på land og i luften, da man oftest har brug for at få løbende, præcise målinger. Systemet var altså ubrugeligt i mange henseender, og man gik derfor i gang med at udvikle et nyt system til positionsbestemmelse.



#### **2.1.4 Udviklingen af GPS**

I 1973 indledte det amerikanske luftvåben, flåden, hæren, marinekorpset og forsvarrets kortinstitut et samarbejde om udvikling af et højpræcisions rumbaseret navigationssystem, som skulle være baseret på de bedste ting fra de to projekter. Projektet blev kaldt for Defence Navigation Satellite System (DNSS). Det var således oprindeligt et navigationssystem, som kun skulle være til militært brug. Der var imidlertid et problem: Kongressen skulle godkende projektet for at militæret kunne få bevilliget pengene til at udvikle systemet. De blev derfor nødt til at ændre projektet således, at det både kunne bruges af civile og militæret. Dette "nye" projekt blev døbt Global Positioning System (GPS). Militæret ville ikke lade uautoriserede brugere få adgang til nøjagtige data, da disse kunne bruges af fjendtlige magter til at skade USA. De ændrede derfor signalerne således, at der var en lille fejl på de positioner, som man fik (selective availability SA). (Denne blev dog først påført engang midt i firserne som et resultat af den stigende civile brug af GPS)

GPS sender den nøjagtige tid, som signalet er sendt fra satellitten. GPS er tredimensionalt. En vigtig fordel ved det nye system var, at det kunne anvendes af ting, som bevæger sig med stor hastighed (f.eks. jagerfly).

## **2.2 GPS' anvendelsesmuligheder**

GPS er pga. dets gode globale nøjagtighed et godt alternativ til de traditionelle radionavigationssystemer. Det giver ikke blot mere præcise positioner end de landbaserede radionavigationssystemer, der udelukkende blev brugt til maritimt brug. Det åbner desuden for en række anvendelsesmuligheder, perspektiver om man vil, til søs, til lands og i luften.

### **2.2.1 Maritimt**

Ved brug af GPS kan skibe sejle den direkte vej til deres bestemmelsessted uden at komme ud af kurs. Dette effektiviserer transporten og minimerer brændstofforbruget, hvilket betyder store besparelser for bl.a. rederierne. Nøjagtig navigation er således vigtig på åbent hav ud fra en økonomisk synsvinkel.

Ligeledes er nøjagtig navigation vigtig i tæt trafikerede kystområder, hvor der ofte bruges præcisionsforbedrende teknikker (f.eks. DGPS, se afsnit 5.2 og 5.3). Derved er GPS i stand til at forhindre grundstødning ved sejlads i kystnære farvande, hvor landkending hidtil har været anvendt. Faren for kollision kan nedsættes væsentligt, hvis skibene udstyres med en sender, som transmitterer det pågældende skibs position til en overvågningsstation. Herved kan de andre skibe, hvis de har det rette udstyr, se skibets position i alt slags vejr, og således er de i stand til at afværge en eventuel kollision. Disse signaler med oplysninger om skibenes positioner kan desuden bruges til overvågning af skibstrafikken [Kaplan, s. 9].

GPS kan endvidere bruges til havneanløb, og andre situationer, hvor lodser tidligere er blevet benyttet.

Olieeftersøgning til havs ved hjælp af GPS er også en mulighed. GPS er i stand til at give nøjagtige positioner under søgningen efter olie, hvorved man er i stand til at finde tilbage til stederne, hvor de senere analyserede data stammer fra. Derefter kan GPS bruges til nøjagtig placering af en eventuel boreplatform og udlægning af rørledninger.

GPS er desuden effektivt ved opmåling af søkort (havbundsopmåling) pga. dets nøjagtighed.

### **2.2.2 På land**

GPS giver store muligheder for land-navigation og positionering.

Land-navigation i biler kan foregå ved, at man kobler en GPS navigator og et elektronisk kort-display sammen. Ved yderligere at bruge et specielt program vil det elektroniske kort være i stand til at finde den nærmeste eller bedste vej til et forud bestemt sted [Kaplan, s. 9]. Dette system bruges i dag få steder i verden, men det vil højst sandsynligt ikke vare længe, inden det er standard i alle biler.

GPS kan bruges til at forhindre biltyveri, hvis der i bilen – foruden en GPS modtager – er en sender, som sender bilens position. Man vil dermed være i stand til at lokalisere bilen og evt. biltyven, hvis man er hurtig. Sikkerheden for taxachaufførerne kan øges ved at bruge et system magen til. Hvis en taxachauffør således trykker på ”panikknappen”, kan der hurtigt sendes hjælp.

Effektivisering af udrykninger af enten redningskøretøjer eller politi kan ske ved brug af systemet, da redningscentralen således kan dirigere udrykningsfartøjet uden om eventuelle køer mm.

I busser kan systemet anvendes ved at vise bussens position på et elektronisk kort. Herved kan pasagererne se, hvor langt de er fra deres bestemmelsessted. Herved øges brugervenligheden – specielt for pasagerer, som ikke er vant til at bruge bussen.

GPS giver mulighed for præcisionsmålinger af punkter på jorden vha. specielle teknikker. Det er således muligt at foretage målinger, som kan bruges til nye præcise kortlægninger. Ved at bruge de samme metoder er det muligt at overvåge jordskorpernes forskydning, og GPS kan dermed bruges til at forudsige jordskælv. Endvidere kan positionering vha. GPS bruges af bl.a. landmålere. [Toft, s. 38]

### **2.2.3 I luften**

Navigation vha. GPS giver fly de samme fordele, som skibe har på åbent hav. De er således i stand til at flyve direkte til deres bestemmelsessted, hvorved de sparer brændstof. Rute-fly, som anvender GPS, udsender deres position til nogle jordantenner, hvorfra positionerne sendes til en kontrolstation (air traffic control), som bruger informationerne til at dirigere flyene. En fuldstændig overgang til GPS vil overflødiggøre radarsystemerne (for civile), som bliver brugt til at overvåge luftrummet med.

En fuld udnyttelse af GPS til luftfart vil desuden give mulighed for at erstatte de nuværende indflyvnings- og landingsnavigationssystemer med nogle GPS baserede. Idet man kun får ét system, som skal vedligeholdes, får man en besparelse i forhold til tidligere systemer.

Udover at bruge GPS til navigation af fly i luften, kan det også bruges af rumfærger. Således har NASA brugt/testet GPS på flere af deres ture. Fra 1998 er det meningen, at der skal bruges GPS til at navigere NASA' rumfærge(R) under hele turen.

GPS' anvendelsesmuligheder er utallige, og GPS vil kunne erstatte næsten alle de eksisterende radionavigationssystemer.

## 2.3 Opbygning af GPS

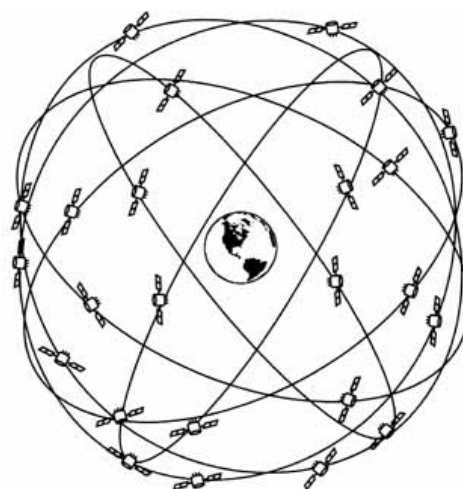
Satellitnavigationssystemet GPS består af tre hoveddele:

- Satellitsegmentet
- Kontrolsegmentet
- Brugersegmentet

### 2.3.1 Satellitsegmentet

Satellitsegmentet består af 24 satellitter ( 21 aktive og 3 reserver ), som kredser om jorden i seks baner i ca. 20.200 kilometers højde. Satellitbanerne ligger forskudt med en vinkel på 60 grader i forhold til hinanden i ækvatorplanen, og de har alle en vinkel på 55 grader i forhold til ækvatorialplanen. Satellitterne har en omløbstid på 11 timer, 57 minutter og 58,3 sekunder.

Satellitterne er fordelt i deres baner, således at de ligger forskudt i forhold til satellitterne i banerne ved siden af. Denne fordeling af satellitterne sikrer, at man hele døgnet over hele jorden er i stand til at modtage signaler fra mindst 4 satellitter, som ligger mindst 5 grader over horisonten. De er dermed egnede til positionsbestemmelse. Hvis en af satellitterne svigter, kan man aktivere en af reserverne og flytte på satellitterne i deres baner, således at man stadig har fuld



Figur 2.2: Satellitsegmentet [Kaplan, s. 60].

dækning.

Satellitsegmentets opgave er at sende navigationsdata, dvs. signaler som indeholder data om udsendelsessted og tidspunkt. Da det er vigtigt at kende det nøjagtige udsendelsestidspunkt for signalerne, er satellitterne udstyret med 4 atomure (2 cæsium og 2 rubidium), som går med utrolig nøjagtighed. Satellitsegmentet udsender desuden en almanak, som indeholder de sidste nye oplysninger om de øvrige GPS satellitters tilstande og positioner.

### **2.3.2 Kontrolsegmentet**

Kontrolsegmentet består af 5 kontrolstationer, som ligger på Hawaii, Ascension Island, Diego Gargia, Kwajalein og Colorado Springs i Florida. I Colorado Springs ligger desuden hovedkontrolstationen, som bearbejder de informationer angående satellitterne, som kontrolstationerne indsender. Desuden er der tre antenner beliggende på Ascension Island, Diego Gargia og Kwajalein, som bruges til at sende opdateringer til satellitterne med.

Kontrolsegmentets hovedfunktion er at sørge for, at satellitterne hele tiden udsender deres rigtige position og tid. De fem kontrolstationer modtager således signaler fra GPS satellitterne og videresender dem til hovedkontrolstationen i Colorado Springs. Her udregnes satellitternes positioner og atomurenes nøjagtighed. Hvis disse ikke stemmer overens med de data, som satellitterne udsender, sendes korektioner til satellitterne via en af antennerne. Desuden beregner hovedkontrolstationen en nøjagtig beskrivelse af satellitternes positioner, som funktion af tiden ( almanakken ), som sendes sammen med korektionerne til satellitterne. Disse korektioner foretages 2-3 gange dagligt.

### **2.3.3 Brugersegmentet**

Brugersegmentet består af tre dele: En antenne, processorenheden og et kontroldisplay. Antennen modtager signaler fra satellitterne, som sendes til processorenheden. Denne udregner brugerens position, som derefter (typisk) vises på et display.

Der findes to modtagertyper:

- Modtagere til uautoriserede brugere
- Modtagere til autoriserede brugere, typisk U.S og allieret militær

De autoriserede brugeres modtagere har adgang til flere signaler end de uautoriserede, hvilket gør at de kan opnå en større nøjagtighed.

De uautoriserede bruger ofte softwareløsninger til at forbedre deres nøjagtighed.

## 2.4 Signalerne

### 2.4.1 PRN-kode

Alle satellitterne i GPS sender på to forskellige bærebølger i L-båndet (1..2 GHz), kaldet L1 og L2:

- L1=1575,42 MHz
- L2=1227,6 MHz

Disse moduleres med navigationsdata og PRN-koder, Pseudo Random Noise-koder (pseudo-tilfældig støj), pseudo fordi de er matematisk fremstillede [Klaus Jensen, B6, ii].

En PRN-kode er karakteristisk for den satellit, de er udsendt af, og således kan en satellit identificeres herudfra. Koden består af binære cifre.

To forskellige PRN-koder forekommer:

- P, der anvendes ved PPS (Precise Positioning Service)
- C/A, der anvendes ved SPS (Standard Positioning Service)

L1-bærebølgen moduleres foruden navigationsdata med både P- og C/A-koden, mens L2 kun med P-koden og navigationsdata.

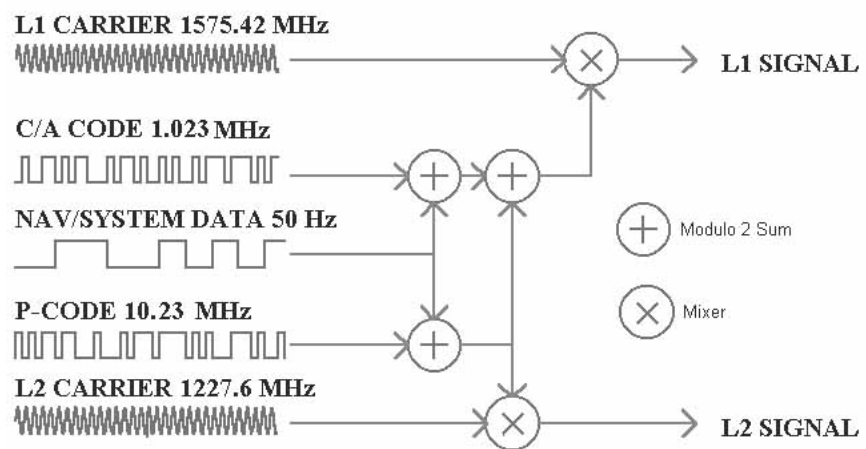
Moduleringen af PRN-koderne og navigationsdataene foregår ved Modulo 2 addition (en XOR-gate) [Kaplan, s. 84]. De enkelte bit i koderne adderes efter principperne:  $0+0=0$ ,  $1+0=1$ ,  $0+1=1$ ,  $1+1=0$ , altså uden mente [Fraleigh, s. 116]. Omvendt kan navigationsdataene i modtageren så skilles fra koden, når PRN-koderne kendes:

Dataene, der skal moduleres på L1 (her kun C/A) i satellitten:	C / A – kode	100111
	Navigationsdata	110101
	XOR	<u>010010</u>
Navigationdataene afkodes i modtageren:	XOR	010010
	C / A – kode	100111
	Navigationdata	<u>110101</u>

PRN-koderne udsendes i henhold til satellittiden, som opretholdes af kontrolsegmentet indenfor 0,976 ms i forhold til GPS-systemets tid [Toft, s. 52].

Alle udsendte signaler styres af atomurene i de enkelte satellitter, der arbejder ud fra grundfrekvensen 10,23 MHz. Alle frekvenserne i system er således bestemt herudfra, f.eks.  $L1 = 154 \cdot 10,23\text{MHz} = 1575,42\text{MHz}$ .

Afstanden fra satellitten til modtageren bestemmes ud fra PRN-koderne. Desuden tjener de det formål at lade modtageren læse sig fast til satellitten.



Figur 2.3: Modulering af de to satellit-signaler [Dana, /gif/signals.gif]

At C/A- og P-koden og navigationsmeddelelsen, der jo udsendes samtidig, ikke interfererer skyldes den anvendte modulationsteknik, spredt-spektrum-modulation, der blandt andet faseforskyder C/A- og P-koden 90° i forhold til hinanden [Toft, s. 60].

At de forskellige satellitters signaler kan adskilles i modtagerne skyldes en teknik kaldet CDMA, Code Division Multiple Access [Kaplan, s. 83].

### 2.4.2 Standard Positioning Service

C/A-koden (Coarse/Acquisition - Grov/Adgang) benyttes ved SPS (Standard Positioning Service), som er en offentlig tilgængelig service, med andre ord: for uautoriserede brugere.

C/A-koden er på 1023 bit, og tidsmæssigt har den en længde (periode) på 1 ms, altså sendes den med en klokfrekvens på 1023 KHz. [Kaplan, s. 84].

En SPS-modtager modtager i reglen kun L1-frekvensen [Kaplan, s. 69].

Bærebølge	L1 = 1575,42 MHz ~ 19,05 cm
Periode	1 ms
Bølgelængde	293,1 m
Frekvens/hastighed	1023 KHz (Kbps)

Figur 2.4: C/A-kodens karakteristika

### 2.4.3 Precise Positioning Service

Foruden C/A-koden anvendes også P-koden ved PPS (Precise Positioning Service), der er tiltænkt autoriseret brug, f.eks. amerikansk og allieret militær.

Normalt benyttes både L1 og L2 [Kaplan, s. 69].

I modsætning til C/A-koden er P-koden meget lang. De enkelte satellitter udsender kun et udsnit svarende til 7 dage, det vil sige, at koden gentages hver uge. P-koden har en længde på  $6,05 \cdot 10^{12}$  bit og udsendes med en klokfrekvens på 10,23 MHz, altså 10 gange hurtigere end C/A-koden [Kaplan, s. 84].

Alle satellitter er udstyret med ens P-kode generatorer, men de tildeles kun et bestemt udsnit hver, således at et givet udsnit kun forekommer en gang per uge. Koderne udelukker hinanden, og dermed undgås interferens mellem satelliternes koder.

P-koden indledes midnat hver lørdag. Fra samme tidspunkt regnes GPS-systemets tid. Grundet P-kodens længde udsender satellitterne hvert 6. sekund informationer om, hvor i koden de befinder sig.



Kodens længde og hastighed gør, at P-kode-modtagere benytter C/A-koden til at låse sig fast til de enkelte satellitter.

P-koden nægter SPS-brugere (uautoriserede-) adgang gennem AS, Anti-Spoofing (Anti-Snyderi). Anordningen krypterer P-koden til det, der kaldes Y-kode, således at kun autoriserede, PPS-, brugere med specielle P(Y)-kode-modtagere kan dekryptere den. Uden at kende krypteringsnøglen kan navigationsdataene ikke afkodes L2, og TOA-bestemmelse (se afsnit 2.5.1) ikke foretages på P-koden på L2. Da man ud fra P-koden ikke kan genskabe Y-koden, forhindrer AS også jamming af GPS-signalerne [Kaplan, s. 69].

At positionsbestemmelse ved PPS er mere nøjagtig end SPS skyldes, at man som nævnt benytter både L1- og L2-båndene. Dette tillader eliminering af ionosfæriske forstyrrelser, afbøjning, (se Figur 2.8 og Figur 2.9) idet disse afhænger af bølgernes frekvenser [Toft, s. 28]. Desuden kan PPS-modtagere korrigere for SA (Selective Availability - omtales senere) [Kaplan, s. 84].

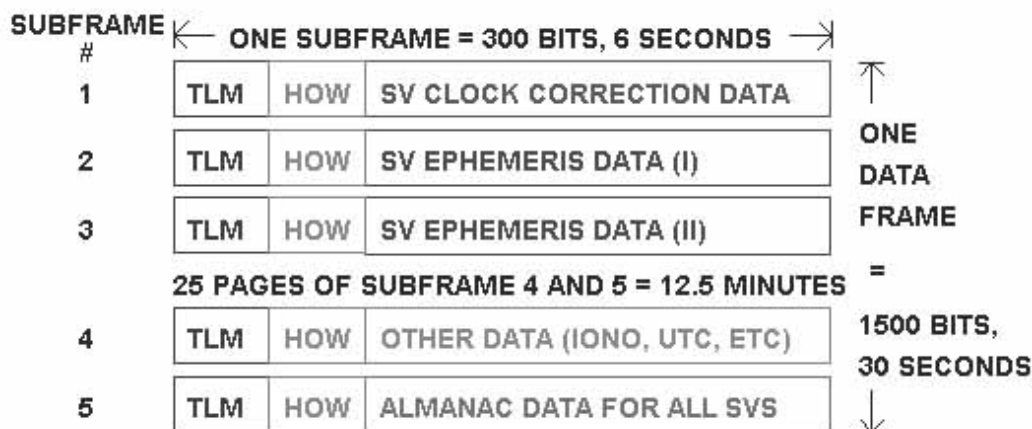
Bærebølger	L1 = 1575,42 MHz ~ 19,05 cm L2 = 1227,60 MHz ~ 24,45 cm
Periode	udsnit på 7 af kode på 267 dage.
Bølgelængde	29,31 m
Frekvens/hastighed	10,23 MHz (Mbps)

Figur 2.5: P(Y)-kodens karakteristika

#### 2.4.4 Navigationsdataene

De navigationsdata, satellitterne udsender, moduleres som nævnt på både L1 og L2. Disse data består af angivelse af satellittens nøjagtige position og forudsigelser med hensyn til fremtidige baneparametre, GPS-systemets tid, tidskorrekationer fra kontrolsegmenterne, korrekationer for forsinkelse og afbøjning af signalerne i ionosfæren, samt en almanak, der indeholder en række informationer om samtlige satellitter i systemet, mere nøjagtigt: Omtrentlige position, tilstand mv. Herved kan modtageren efter at have fået kontakt med en satellit hurtigere finde det påkrævede antal satellitter [Toft, s. 18].

Dataene udsendes kontinuert med en hastighed på 50 bps. Selve meddelelsen er opbygget over en dataramme (frame) på 1500 bit. Denne består af fem underrammer (subframes) hver med en længde på 300 bit. Disse er så igen delt op i 10 ord med længden 30 bit.



Figur 2.6: Datarammernes opbygning [Dana, /gifs/databits.gif].

Underrammerne startes alle med ordene TLM (Telemetric Message) og HOW (Handover Word). Begge dannes i modsætning til resten af ordene, der dannes af kontrolsegmentet, i de enkelte satellitter.

TLM-ordet er data tiltænkt kontrolsegmentet med de kan anvendes af alle. Med disse holder kontrolsegmenterne øje med opdateringsprocesser, der er foretaget, samt rulninger, satellitten må have undergået, hvilket kan forårsage unøjagtigheder i satellittens bane.

HOW-ordet benyttes af P-kode-modtagere til at synkronisere sig med og låse sig på P-koden. [Toft, s. 56]

Selve navigationsmeddelelsen ligger i de resterende ord i underrammerne 2, 3 (se Figur 2.6), alt imens underramme 1 indeholder tidskorrektioner med hensyn til atomurene i satellitten og forsinkelser i forbindelse med signalernes vej igennem atmosfæren, og 4'eren særlige meddelelser. 5'eren indeholder en del af almanakken, der sendes over 25 rammer [Toft, s. 59].

Hastighed	50 bps
Periode	30 s.

Figur 2.7: Navigationsdataenes karakteristika

### 2.4.5 Fejlkilder

Kvaliteten af en positionsangivelse afhænger af to faktorer:

1. Antallet af satellitter i sigte og deres fordeling i rummet i forhold til brugeren
2. Kvaliteten af pseudoafstands målingerne

Den første faktor karakteriseres ved hjælp af en parameter, der kaldes “dilution of precision” (DOP). Man kan forestille sig værdien af DOP som værende omvendt proportional med volumen af et polyede, hvor satellitterne definerer grundfladen og brugerpositionen befinder sig på spidsen. Den bedst mulige DOP værdi får man hvis linjerne mellem satellitterne og brugeren skærer hinanden i en vinkel på 90 grader.

Der er adskillige fejlkilder der påvirker afstandsmålingerne:

- Fejl i de data satellitten udsender
- Manglende stabilitet i systemets ure
- Uforudsigelige ionosfæriske og troposfæriske forstyrrelser
- Forstyrrelse på grund af lokale refleksioner af signalerne (multipathing)
- Støj i modtageren

Den kollektive effekt af disse fejlkilder kaldes for URE (user range error) og dennes RMS-værdi (se afsnit 4.2.1) skrives som  $\sigma_{URE}$ . Produktet af DOP og  $\sigma_{URE}$  kaldes i den amerikanske litteratur RMS position error, altså har vi følgende ligning:

$$\text{RMS position error} = \text{DOP} \cdot \sigma_{URE}$$

Den største fejlkilde er SA, der praktiseres ved at data om satellittens position og signalets udsendelsestidspunkt fra satellitten bevidst ændres. Derved påvirkes værdien af URE med en faktor på fire eller mere. Værdien af  $\sigma_{URE}$  er blevet målt til at være 25 til 40 m, med SA aktiveret mod 8 m uden. [Misra]

Følgende skema viser en oversigt over de estimerede fejl i de tre segmenter ved SPS:

Segment	Fejlkilde	Fejl med SA( $\sigma$ )/m	Fejl uden SA( $\sigma$ )/m
Rum	Satellitur	3,0	3,0
	Forstyrrelser	1,0	1,0
	SA	32,3	0
	Andre (f.eks. varmemstråling)	0,5	0,5
Kontrol	Forudsigelse i efemeris	4,2	4,2
	Andre	0,9	0,9
Bruger	Ionosfæriske forsinkelse	5,0	5,0
	Troposfæriske forsinkelse	1,5	1,5
	Støj i og kvalitet af modtager	1,5	1,5
	Reflekterede signaler	2,5	2,5
	Andre	0,5	0,5
Total URE		<b>33,3</b>	<b>8,0</b>

Figur 2.8: Fejlkilder ved SPS [Kaplan, s. 262].

Følgende skema viser så tilsvarende ved PPS:

Segment	Fejlkilde	Fejl ( $\sigma$ )/m
Rum	Satellitur	3,0
	Forstyrrelser	1,0
	Andre (f.eks. varmemstråling)	0,5
Kontrol	Forudsigelse i efemeris	4,2
	Andre	0,9
Bruger	Ionosfæriske forsinkelse	2,3
	Troposfæriske forsinkelse	2,0
	Støj i og kvalitet af modtager	1,5
	Reflekterede signaler	1,2
	Andre	0,5
Total URE		<b>6,6</b>

Figur 2.9: Fejlkilder ved PPS [Kaplan, s. 261].

## 2.5 Positionsbestemmelsen

### 2.5.1 Princippet i positionsbestemmelsen

Dette kapitel vil gøre rede for principperne ved positionsbestemmelsen i GPS.

Ved at måle tidsforskydningen mellem den indkomne PRN-kode og den i modtageren genererede (se Figur 2.10) kan man bestemme afstanden fra modtageren til satellitten ud fra:

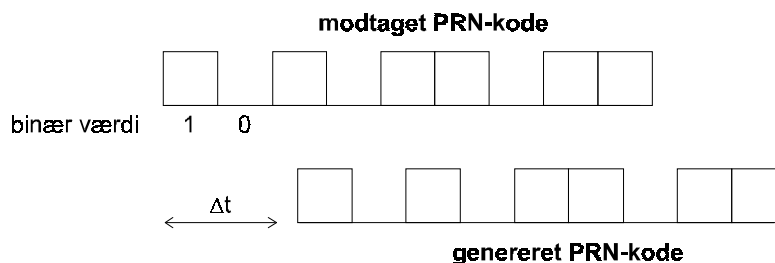
$$\Delta t = n \cdot \frac{1}{\gamma}, \text{ hvor } \Delta t \text{ er tidsforskydningen, } n \text{ antal enheder (bit), koderne er forskudt, og } \gamma$$

kodefrequensen på C/A- eller P-koden.

$$r_i = \Delta t \cdot c, \text{ hvor } r_i \text{ er afstanden til den } i\text{'te satellit, og } c \text{ lysets hastighed, ca. } 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

$$\text{Eks: } \Delta t = \frac{20.200\text{km}}{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 67,3\text{ms}$$

Denne metode til bestemmelse af afstande kaldes TOA, time-of-arrival. Metodens nøjagtighed afhænger af, at urene i satellitten og i modtageren er synkron.



Figur 2.10: Afstandsbestemmelse ud fra tidsforskydningen mellem den modtagede og genererede PRN-kode

Ud fra de modtagne data (satellittens position) og den beregnede afstand, kan følgende ligning sættes op:

$$r_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}, \text{ hvor } r_i \text{ er afstanden fra modtageren fra satellitten til modtageren, } (x_i, y_i, z_i) \text{ den } i\text{'te satellits position, og } (x, y, z) \text{ modtagerens position.}$$

Dette er ligningen for en kugle med centrum i satellittens position og den beregnede afstand som radius. Modtageren befinder sig altså et sted på kugleskallen.

Ligningen har tre ubekendte,  $x$ ,  $y$  og  $z$ . For at finde modtagerens position i rummet skal man altså have tre ligninger, tre datasæt, med andre ord: kontakt med tre satellitter.

Princippet kan illustreres som bestemmelse af skæringspunktet mellem tre kuglerskaller med centrum i satellitterne og med de målte afstande som radier. Dog eksisterer også et spejlpunkt.

Ved navigation til søs kan positionen i princippet bestemmes ud fra to satellitter, idet  $z$  da er kendt (dvs. positionsbestemmelse i to dimensioner).

Da normale modtagere af økonomiske årsager ikke er forsynet med atomure, vil den bestemte afstand,  $r_i$ , være behæftet med fejl. Denne kaldes herfor pseudoafstanden. Korrigeres for denne ur-fejl i modtageren, fås:

$r_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} + t_{ur} \cdot c$ , hvor  $t_{ur}$  er fejlen i modtagerens ur i forhold til systemtiden.

Ligningen har nu fire ubekendte, og data fra fire satellitter er således påkrævet (tre ved navigation til søs). Således reduceres også antallet af skæringspunkter til et.

Atomurene i satellitterne er heller ikke fri for fejl. Korrektioner, foretaget af kontrolsegmenterne, modtages igennem dataene fra satellitten.

### **2.5.2 Modtageren**

Dette afsnit har til formål at indføre læseren i processerne i modtageren og dens udformning og opgaver.

GPS-modtageren skal kunne følgende:

- Udvalgte egnede satellitter ud fra almanakken
- Modtage signalerne på pågældende frekvenser fra de udvalgte satellitter
- Foretage TOA-måling på C/A-koden
- Udskille navigationsdataene
- Beregne positionen og tiden

En modtager, der har været slukket, har ingen almanak. Denne skal derfor fremskaffes inden signaler fra det påkrævede antal satellitter kan findes, modtages og positionsbestemmelse foretages. Da modtageren ikke kender positionen på nogen satellitter må en sådan findes ved

systematisk afsøgning af himmelhvelvingen og almanakken kan modtages. Opstartstiden for modtagere er herfor som regel rimelig lang (op til timer).

Signalerne fra satellitterne modtages med en speciel antenne. Den skal kunne modtage signaler fra alle synlige (mindst 5° over horisonten) satellitter, hvilket opnåes ved at anbringe antennen, så den har frit udsyn til hele himlen.

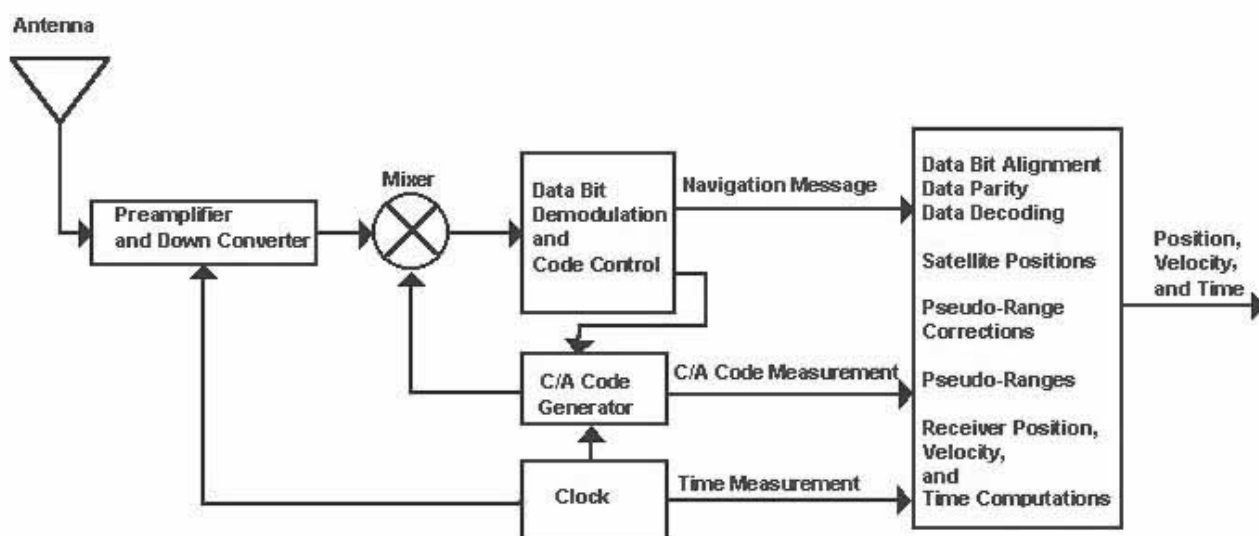
Modtageren skal mindst have en kanal til modtagelse af et C/A-kodet signal.

For at bestemme afstanden til satellitten ved TOA og udskille navigationsdataen skal modtageren kunne generere en kopi af den udvalgte satellits PRN-kode. Denne forskydes så indtil den indkomne og den genererede PRN-kode falder sammen (se Figur 2.10).

Da PRN-koden genereres ud fra modtagerens ur, og afstande ud fra denne, afhænger systemets nøjagtighed af urets. Atomurene, som benyttes i satellitterne, er ekstremt dyre at fremstille, så økonomiske kompromisser benyttes i almindelige modtagere [Kaplan, s. 41].

Udskillelse af navigationsdataene fra L1 og L2 signalerne foregår ved demodulering, modsvarende den oprindelige modulering.

Processerne i modtageren, her en SPS-, er illustreret i følgende diagram:



Figur 2.11: Signalernes vej fra antennen til displayet i en SPS(C/A-kode)-modtager [Dana, /gif/receiver.gif].

Tre forskellige hovedtyper af GPS-modtagere forkommer:

1. Sekventielmodtagere modtager kun signaler fra en satellit af gangen. Denne følges så over en længere periode, normalt mellem 1,2 - 1,8 s. Positionen bestemmes så ud fra modtagne signaler og 2-3 (alt efter anvendelsesområdet) signaler estimeret ud fra tidligere målinger. Grundet opdatering af almanakken må modtageren følge en enkelt satellit over en længere periode (12,5 minut).
2. Multikanalmodtagere er modtagere, der har mindst fire adskilte kanaler. Hver af disse følger så en satellit. Modtagere af denne type har så data og målinger til positionsbestemmelse kontinuert. Desuden kan den modtage opdaterede almanakker uden at afbryde positionsbestemmelsen. Dog er denne modtagertype den dyreste.
3. Multiplexmodtagere har ligesom sekventielmodtagere kun en kanal, men denne kan skifte meget hurtigt mellem satellitterne og vende tilbage til de foregående uden først at skulle søge efter dem. Det vil sige, at den faktisk som multikanalmodtagere kan låse sig fast på et antal (4-5) satellitter inden for 1 s, og positionsbestemmelsen bliver derfor ikke baseret på "forældede" data. Ligesom multikanalmodtagere kan multiplexmodtagere opdatere almanakken uden at afbryde positionsbestemmelsen. En ulempe ved denne type modtagere er, at noget af signalets energi tapes, idet satellitterne kun følges kort, hvilket medfører, at modtagere, der accelereres kraftigt, har svært ved at låse sig fast på satellitterne. [Toft, s. 22]

Disse tre typer er så igen inddelt i en- og tofrekvensmodtagertyper, til henholdsvis SPS og PPS. En PPS-modtager (P-kode-) er langt mere kompleks end en SPS, grundet den høje hastighed, hvormed P-koden sendes. Dette kræver et high-speed digitalt kredsløb [Toft, s. 20].

### **2.5.3 Matematikken bag positionsbestemmelsen**

Vi har følgende fire ligninger:



$$r_1 = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} + t_{ur} \cdot c$$

$$r_2 = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} + t_{ur} \cdot c$$

$$r_3 = \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2} + t_{ur} \cdot c$$

$$r_4 = \sqrt{(x_4 - x)^2 + (y_4 - y)^2 + (z_4 - z)^2} + t_{ur} \cdot c$$

Med modtagne positioner fra fire satellitter,  $(x_i, y_i, z_i)$  og pseudoafstandene bestemt ved  $r_i = \Delta t \cdot c$ . Ligningerne har altså fire ubekendte  $x, y, z$  og  $t_{ur}$ . Disse er ikke umiddelbart til at finde. Følgende omskrivelser vil føre til fire lineære udtryk, der forholdsvis nemt kan løses.

Vi har en estimeret position, et gæt (på en modtager indtastet af brugeren som start-/udgangsposition), og urfejl  $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}, \hat{t}_{ur})$ , der afviger  $(\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta t_{ur})$  fra den faktiske, altså  $(x, y, z, t_{ur}) = (\hat{x} + \Delta x, \hat{y} + \Delta y, \hat{z} + \Delta z, \hat{t}_{ur} + \Delta t_{ur})$ .

Lad pseudoafstandene være udtrykt ved:

$$f(x, y, z, t_{ur}) = r_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} + t_{ur} \cdot c$$

Den estimerede position bliver da:

$$f(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}, \hat{t}_{ur}) = \hat{r}_i = \sqrt{(x_i - \hat{x})^2 + (y_i - \hat{y})^2 + (z_i - \hat{z})^2} + \hat{t}_{ur} \cdot c$$

Ved lineær approximation kan positionen udtrykkes som:

$$f(x, y, z, t_{ur}) = f(\hat{x} + \Delta x, \hat{y} + \Delta y, \hat{z} + \Delta z, \hat{t}_{ur} + \Delta t_{ur}) =$$

$$f(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}, \hat{t}_{ur}) + \frac{\partial f(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}, \hat{t}_{ur})}{\partial \hat{x}} \cdot \Delta x + \frac{\partial f(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}, \hat{t}_{ur})}{\partial \hat{y}} \cdot \Delta y + \frac{\partial f(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}, \hat{t}_{ur})}{\partial \hat{z}} \cdot \Delta z + \frac{\partial f(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}, \hat{t}_{ur})}{\partial \hat{t}_{ur}} \cdot \Delta t_{ur}$$

De partielle afledede bliver:

$$\frac{\partial f(x, y, z, t_{ur})}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial u} \cdot \frac{\partial u}{\partial x}; u = (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2$$

$$\frac{\partial f}{\partial u} = \frac{1}{2\sqrt{u}}; \frac{\partial u}{\partial x} = ((x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2)'(x) = (x_i^2 + x^2 - 2x_i x)'(x) = 2x - 2x_i = -2(x_i - x)$$

$$\frac{\partial f(x, y, z, t_{ur})}{\partial x} = -\frac{2(x_i - x)}{2\sqrt{u}} = -\frac{x_i - x}{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}}$$

Med analoge beregninger fås:

$$\frac{\partial f(x, y, z, t_{ur})}{\partial y} = -\frac{y_i - y}{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}},$$

$$\frac{\partial f(x, y, z, t_{ur})}{\partial z} = -\frac{z_i - z}{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}} \text{ og for: } \frac{\partial f(x, y, z, t_{ur})}{\partial t_{ur}} = c$$

Således bliver den approximerede position:

$$f(x, y, z, t_{ur}) = f(x, y, z, t_{ur}) - \frac{x_i - x}{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}} \Delta x - \frac{y_i - y}{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}} \cdot \Delta y - \frac{z_i - z}{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}} \cdot \Delta z + c \cdot \Delta t_{ur}$$

For at simplificere udtrykket sættes:

$$dr_i = \hat{t}_i - r_i = f(x, y, z, t_{ur}) - f(x, y, z, t_{ur})$$

$$a_{xi} = \frac{x_i - x}{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}}$$

$$a_{yi} = \frac{y_i - y}{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}}$$

$$a_{zi} = \frac{z_i - z}{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}}$$

Alle disse størrelser er kendte størrelser.

Dette giver disse lineære udtryk, hvor  $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta t_{ur}$  er de ubekendte:

$$dr_1 = a_{x1}\Delta x + a_{y1}\Delta y + a_{z1}\Delta z - c\Delta t_{ur}$$

$$dr_2 = a_{x2}\Delta x + a_{y2}\Delta y + a_{z2}\Delta z - c\Delta t_{ur}$$

$$dr_3 = a_{x3}\Delta x + a_{y3}\Delta y + a_{z3}\Delta z - c\Delta t_{ur}$$

$$dr_4 = a_{x4}\Delta x + a_{y4}\Delta y + a_{z4}\Delta z - c\Delta t_{ur}$$

Omskrevet til matricer:

$$dr = \begin{bmatrix} dr_1 \\ dr_2 \\ dr_3 \\ dr_4 \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} a_{x1} & a_{y1} & a_{z1} & 1 \\ a_{x2} & a_{y2} & a_{z2} & 1 \\ a_{x3} & a_{y3} & a_{z3} & 1 \\ a_{x4} & a_{y4} & a_{z4} & 1 \end{bmatrix} \quad \Delta s = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ -c\Delta t_{ur} \end{bmatrix}$$

Med følgende sammenhæng kan positionskorrektionerne så beregnes:

$$dr = H\Delta s \Leftrightarrow \underline{H^{-1}dr = \Delta s}$$

Og endelig, positionerne og tiden:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \\ t_{ur} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ -c\Delta t_{ur} \end{bmatrix}$$

Nøjagtigheden af den bestemte position afhænger af den estimerede. Jo nærmere den estimerede er den faktiske, jo mere præcis vil bestemmelsen blive. Hvis afvigelsen overstiger det acceptable, kan processen gennemføres atter engang, denne gang med den bestemte position som den estimerede.

Tidskorrektionen gør desuden en GPS-modtager til et meget præcist ur.

## 2.6 Referencesystemer

I alle former for positionsbestemmelse har man brug for et referencesystem, der definerer en bestemt position. I et satellitnavigationssystem er det endvidere nødvendigt at dette referencesystem er globalt.

### **2.6.1 Omdrejningsellipsoiden**

Et eksempel på et globalt referencesystem er en omdrejningsellipsoide. En omdrejningsellipsoide beskrives ved drejning af en ellipse om dennes lilleakse. For at fastlægge et punkt på omdrejningsellipsoiden benytter man en række parametre, hvor de vigtigste er geografisk bredde og geografisk længde. Disse størrelser er defineret som vinkler.

Et punkts bredde er den vinkel som punktets fladenormal danner med ækvatorplanet. Forbinder man alle punkter med samme bredde på ellipsoideoverfladen med en lukket kurve, da fremkommer en parameterkurve, der kaldes en parallel.

Længden er den vinkel som punktets meridianplan danner med en konventionelt fastlagt udgangsmeridian (f. eks. Greenwich-meridianen). Forbindes alle punkter med samme længde, beskriver disse en meridian.

Ellipsoidens paralleler og meridianer udgør tilsammen det geografiske net, og meridianerne er ellipser mens pallelerne er cirkler.

Udover at være bestemt ved længde og bredde kan et punkt også være bestemt ved en højde. Denne er bestemt ved afstanden til ellipsoidens overflade.

Omdrejningsellipsoiden er beskrevet ved en række parametre. Eksempler på sådanne er:

- Et udtryk for forholdet mellem ellipsens halvaksler (fladtrykning  $f$  - eller excentricitet  $e$ )
- Produktet af den universelle tyngdekonstant og jordens masse
- Jordens vinkelhastighed

### **2.6.2 Omregning**

Et punkt kan også bestemmes i forhold til et cartesisk  $x,y,z$ -koordinatsystem. Dette kan f. eks. have sit origo i centrum af en defineret ellipsoide, og vil så være et globalt referencesystem parallelt med det ovennævnte. Efterfølgende vil det så være muligt at omregne en position fra det ene system til det andet. En sådan omregning foregår på følgende måde.

Lad Origo være centrum af omdrejningsellipsoiden og lad z-aksen gå gennem de geografiske poler.

Ved a,b forstås hhv. Den halve stor- og den halve lilleakse for ellipsen der frembringer omdrejningsellipsoiden ved at dreje denne omkring z-aksen.

Vinklen  $\lambda$  betegner længdegraden og  $\phi$  breddegraden for et givet punkt  $(\lambda, \phi)$  på jorden.

N er den vinkelrette afstand fra punktet  $(\lambda, \phi)$  til skæring med z-aksen, og N er givet ved:

$$N = \frac{a^2}{\sqrt{a^2 \cos^2(\lambda) + b^2 \sin^2(\lambda)}}$$

hvor  $b = a(1-f)$

Følgende omregningsformler fra de geografiske koordinater  $(\lambda, \phi)$  til de kartesiske koordinater  $(x, y, z)$  kan nu opstilles

$$x = N \cos(\phi) \cos(\lambda)$$

$$y = N \cos(\phi) \sin(\lambda)$$

$$z = N \frac{a^2}{b^2} \cdot \sin(\phi)$$

[Borre, s. 35]

### **2.6.3 WGS 1984**

Det referencesystem man bruger i forbindelse med GPS kaldes WGS-84 (World Geodetic System 1984), og det kan opfattes både som et cartesisk koordinatsystem og en omdrejningsellipsoide. Det er et konventionelt geocentrisk system, d.v.s. det er udformet i henhold til internationale aftaler om hvilke standarder der bør være gældende i systemet. Koordinataksene har deres origo i jordens massemidtpunkt og er defineret således:

Z-aksen har samme retning som IERS' (the International Earth Rotation Service) reference

pol, sådan som den er fastlagt af samme i 1984.

X-aksen har retning efter IERS' reference meridian og planen gennem origo, der har z-aksen som normal.

Y-aksen fuldender et højrehånds- cartesisk- retvinklet- geocentrisk koordinatsystem.

[Interope]

WGS 84 omdrejningsellipsoiden er defineret ved 4 parametre:

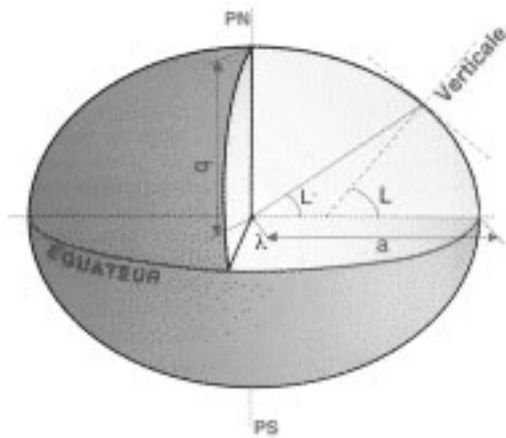
- Den halve storakse  $a = 6378137$  m
- jordens tyngdekonstant, inklusiv massen af jordens atmosfære ( $398600,5 \text{ km}^3 \text{ s}^{-2}$ )
- den normerede 2. grads zonale tyngdekoefficient
- jordens vinkelhastighed ( $7,292115 \times 10^{-11} \text{ rad/s}$ )

[Borre, s. 43]

Fladtrykningen,  $f$ , er i WGS 84 bestemt til at være  $1/298,2572$ . Ved hjælp af ligningen  $b = a(1 - f)$  kan den halve lilleakse,  $b$ , så udregnes til at være  $6356752$  m.

Omdrejningsellipsoidens centrum falder sammen med origo i koordinatsystemet og ellipsoidens lille halvakse falder sammen med z-aksen, der er den akse hvorom ellipsoiden roterer. X-aksen falder sammen med ellipsoidens store halvakse.

Denne referenceramme er defineret af en række globalt fordelte positioner, hvis koordinater oprindeligt blev fastlagt ved hjælp af Doppler målinger fra Transit satellite [Interope].



Figur 2.12: Omdrejningsellipsoide.

## 2.7 Selective Availability

Dette kapitel vil vise, at GPS ikke blot rummer store perspektiver i vor globaliserede verden, men også store problemer.

### 2.7.1 Baggrund

Da det amerikanske militær i begyndelsen af 1970'erne lagde planer om et nyt satellitbaseret navigationssystem, var det ikke meningen, at systemet skulle kunne bruges af civile. De måtte imidlertid acceptere dette, hvis de skulle have mulighed for at få pengene til udviklingen af GPS - I bund og grund blev GPS jo betalt med skattepenge, betalt af borgerne, altså uautoriserede potentielle brugere. GPS blev dermed et to-brugersystem, hvor der var uoverensstemmelse mellem militære og civile interesser mht. nøjagtigheden af systemet.

Militæret ville kontrollere adgangen til GPS-systemet, så fjendtlige magter ikke kunne misbruge systemets utrolige nøjagtighed til krigsførelse mod USA og dets allierede. Samtidig skulle det amerikanske forsvar og dets allierede kunne bruge systemet uden problemer. Dette ønske blev til politikken Selective Availability (valgt tilgængelighed), SA.

### 2.7.2 Midlet

Den måde, hvorpå Selective Availability føres ud i livet, er gennem en degradering af nøjagtigheden af positionsbestemmelse ved SPS, altså uautoriseret brug af GPS. Dette gøres

dels ved at behæfte de efemeriske data og almanakdataene med tilfældige fejl, og dels ved fasemodulering af PRN-koderne, hvilket vil medføre fejl i pseudoafstandsbestemmelserne (se afsnit 2.4.1 og 2.5). Både L1 og L2 bærebølgerne får denne fejl påhæftet. PPS-modtagere kan korrigere herfor. Adgang til L2 forhindres ved kryptering af P-koden, hvorved TOA-bestemmelse ikke kan foretages og navigationsdataene ikke afkodes. Dette princip kaldes, som nævnt, for Anti-Spoofing. [Kaplan, s. 84]

### **2.7.3 Militære interesser**

Det amerikanske forsvar var ikke bange for misbrug af systemet til atomvåben, da disse ikke behøver den nøjagtighed, som GPS har potentiale til at give. Konventionelle GPS styrede misiler bliver derimod anset for at være en trussel imod det amerikanske forsvar [MR]. Disse er i stand til flyve via en prædefineret rute i meget lav højde (ca. 30 meter) [Logsdon2, s.203], hvorved de kan snige sig forbi USA's og dets allieredes forsvar, da de ikke kan ses af radar. Sådanne misiler vil kunne bære biologiske eller kemiske våben [MR], som kan være rettet mod den amerikanske befolkning. Endelig vil GPS uden SA kunne udnyttes af fjendtlige magter i regulær kamp (til præcisionsbombning).

Det er denne angst for misbrug af GPS, som danner baggrund for det amerikanske militærs SA-politik.

### **2.7.4 Civile interesser**

En lang række af potentielle brugere af GPS forekommer. I forhold til de traditionelle radionavigationssystemer åbner GPS for en lang række af nye anvendelsesområder (se afsnit 2.2).

Civile brugere af GPS er selvsagt interesseret i at få de bedst mulige positioner ved GPS. Med SA er uautoriserede brugere være i stand til at bruge GPS til mange ting, ifald SA blev opgivet, ville GPS systemet kunne udnyttes fuldt ud civilt.

Eksempelvis vil flyvemaskiner kunne navigere vha. GPS. Uden SA åbnes helt nye muligheder for bl.a. flys udnyttelse af GPS systemet. Det ville således være muligt at erstatte eksisterende landingssystemer med et GPS baseret system, hvorved sparer flyindustrien mange penge.

SA udelukker mange nyttige anvendelsesmuligheder, hvilket gør, at uautoriserede brugere er imod SA-politikken og kræver den opgivet.



### **2.7.5 Udarbejdningen af SPS**

Militæret var nød til at acceptere, de civile brugeres krav angående nøjagtigheden af GPS, og udarbejdningen af SA-politikken blev således en balancegang mellem militære og civile interesser.

I de indledende faser af projektet, hvor militæret udviklede og testede GPS satellitter, havde civile interesseorganisationer ikke ret stor indflydelse på projektet. I 1983 blev et koreansk rutefly skudt ned i russisk luftrum, da den kom ud af kurs. Efterfølgende gav den amerikanske præsident Ronald Reagan ordre om, at GPS skulle gøres tilgængeligt for civile brugere [Nav], så man i fremtiden kunne undgå lignende situationer. Herefter indledte DoD (det amerikanske forsvarsministerium) og DoT (det amerikanske trafikministerium) et samarbejde, som skulle integrere GPS med flynavigation.

Allerede samme år var der forhandlinger om, hvor gode positionsbestemmelser civile brugere skulle kunne modtage. Militæret ønskede oprindeligt, at civile brugere skulle have en fejl i deres positioner på 500 meter. Federal Aviation Administration argumenterede dog kraftigt for, at fejlen skulle sættes ned til 100 meter, så flytrafikken kunne mere gøre effektivt brug af GPS (bl.a. udføre ikke præcisions landingsmanøvrer). Efter nogle møder blev den nedsatte komite, som undersøgte, i hvilken grad civile skulle have nøjagtige positioner, enig om at anbefale, at civile maksimalt skulle have en horisontal fejl på 100 meter for 95 % af målingerne [Logsdon2, s. 167].

Som følge af denne anbefaling ændrede DoD d. 28. juni 1983 sin politik mht. autoriseret brug af GPS (fuld adgang blev det ikke, men større nøjagtighed) [Beadles].

Ifølge den nye politik fra DoD, skulle den civile kode (SPS) have en maksimal horisontal fejl på 100 meter for 95 % af målingerne. Efter denne overenskomst begyndte man at arbejde imod en iværksættelse af SA i navigationssystemet vha. BlockII satellitterne. Således blev SA implementeret i 1990 [Beadles], og degraderingen af præcision har været gældende siden med få undtagelser. Udviklingen af GPS har således været styret af DoD med små tilføjelser fra civile interesseorganisationer.

### 3. Problemafgrænsning

Vi har i dette projekt først og fremmest undersøgt hvorledes SA-politikken påvirker og begrænser nøjagtigheden i positionsbestemmelsen. SA-politikken er den største negative faktor ved GPS-systemet, men der findes andre. Disse inkluderer:

- Ustabilitet i satellitkonstellationen
- Varmestråling
- Ionosfæriske forstyrrelser
- Troposfæriske forstyrrelser
- Støj i modtageren
- Multipathing

Disse områder har vi valgt ikke at behandle særlig udførligt.

De behandlede forbedringsmuligheder, GLONASS og DGPS, er ikke behandlet i så detaljeret grad som GPS. GLONASS har mange ligheder med GPS, og DGPS er endnu ikke nogen global løsning.

Udeladte forbedringsmuligheder inkluderer SA-korrektionsmodeller og Kalmanfilteret.

Hvad angår teknisk/naturvidenskabelig dybde har vi forholdsvis holdt os inden for rammerne af vore studieenheder (SE). Således behandles eksempelvis positionsbestemmelsen kun rent matematisk - de elektroniske enheder behandles ikke.

## **4. Undersøgelse af GPS' nøjagtighed**

### **4.1 Dataopsamling**

#### **4.1.1 Forsøgsopstilling**

For at bestemme nøjagtigheden af en typisk GPS-modtager, skal en mængde data/målinger fra en modtager analyseres. Til dette formål har vi lånt modtageren SHIPMATE RS5800, som bl.a. har følgende specifikationer:

- Positionsbestemmelse med op til 5 satelliter ad gangen (5-kanals multikanalsmodtager)
- Enfrekvens SPS, dvs. C/A-kode
- 8 trin kalmanfilter
- NMEA 0183 interface

[SHIPM, S. 54]

Forsøgsopstillingen består af GPS-modtageren tilkoblet en PC og en antenne, som sidder på taget af AAU's bygning på Badehusvej 13 i 15 meters højde. Modtageren tilkobles PC'en via serielporten med et specielt stik. Data overføres i overensstemmelse med NMEA-standard, der er en standard for kommunikation mellem forskelligt maritimt, elektronisk udstyr.

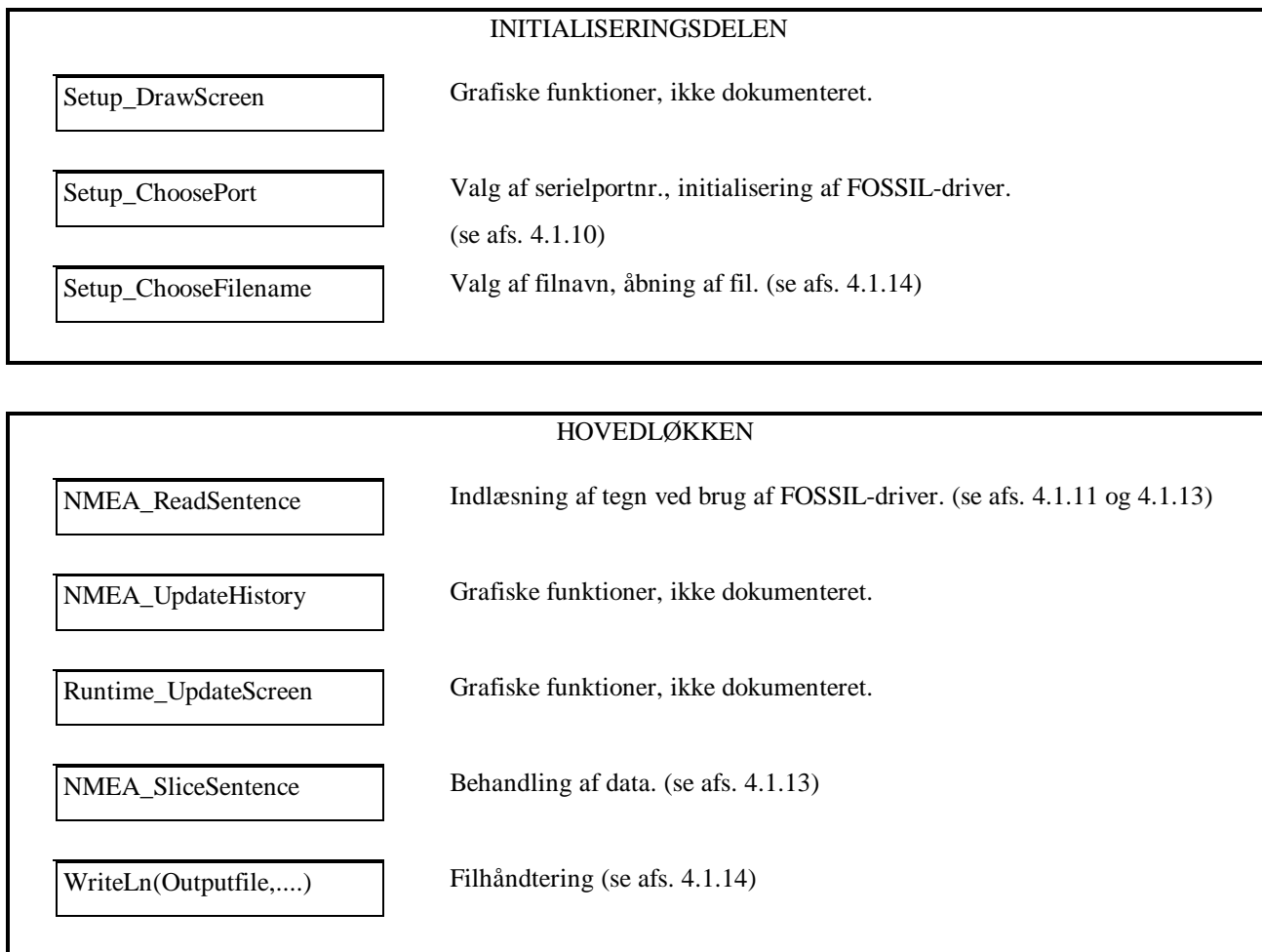
#### **4.1.2 Dataopsamlingen**

Antallet af data, der skal analyseres ved nøjagtighedsbestemmelsen, skal være stort. En manuel aflæsning af data i GPS-modtagerens display vil derfor være praktisk umulig. I stedet for kan oplysninger fra modtageren opsamles på en PC, da de fleste GPS-modtagere er i stand til at kommunikere med andet udstyr, som f.eks. navigationsudstyr, radar eller en PC. Opsamlingen af data fra modtageren gøres nemmest ved at skrive et program, som udfører nogle bestemte funktioner.

#### **4.1.3 Programmet og dokumentationen**

Programmet er skrevet i Turbo Pascal 7.0. For at gøre programmet mere overskueligt, er det blevet opdelt i følgende moduler (UNIT's):

Hovedprogrammet hedder GpsRead. For bedst at kunne følge programmet rundt, har vi valgt at se på hovedprogrammet først. Figur 4.1 viser hovedprogrammets funktions- og procedurekald, og viser i hvilke afsnit af denne programbeskrivelse man kan finde de enkelte funktioner:



Figur 4.1: Hovedprogrammet

Funktionerne og procedurerne i modulerne har fået tildelt navne, som starter med modulets navn, så man lettere kan se hvilket modul de er i.

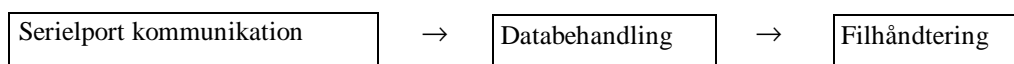
Programmet har udover de allerede beskrevne funktioner en række smarte og praktiske ting, som f.eks. en pæn grafisk brugerflade, der bl.a. viser hvilke oplysninger der kommer ind fra

GPS-modtageren. Disse dele af programmet er bl.a. samlet i modulerne: Gfx, Nmea (Forklares senere), Runtime, Setup og Tools, og vil ikke blive beskrevet nærmere.

#### **4.1.4 Problemformulering**

Da GPS-modtageren forbindes med PC'en gennem serielporten, skal programmet kunne kommunikere via denne port. GPS-modtageren kan sende mange forskellige oplysninger, men vi ønsker kun at bruge oplysninger, som vedrører positionen. Oplysninger som for os er unyttige, f.eks. navigationsoplysninger, skal frasorteres af vores program. Programmet skal også kunne gemme de indsamlede oplysninger til efterbehandling. Da efterbehandlingen sker i et regnark, skal der gemmes i et specielt format, som regnarket kan forstå.

Programmets tre hovedfunktioner ses på følgende figur:



*Figur 4.2: De tre hovedfunktioner.*

#### **4.1.5 Problemanalyse**

For at kende programmets egentlige funktion, skal vi først præcisere programmets inddata og uddata.

- Inddata: Forskellige GPS-data fra serielporten.
- Uddata: Udvalgte GPS-data i et specielt format til harddisken.

Det, der sker fra inddataen indhentes i programmet til uddataen forlader programmet, er normalt det man beskriver som processen. Vores problem ligger dog langt mere i at få fat i selve inddataen, da aflæsning af serielporten ikke er en integreret del af Pascal.

#### **4.1.6 Problemanalyse - Serielport kommunikation**

At aflæse serielporten på en PC, er normalt en meget besværlig procedure. Der er mange ting man selv skal have styr på i sit program: Man skal vide, hvordan UART-chippen ISN8250 (universal asynchronous receiver transmitter) fungerer, og kende chippens registre. Man skal

opsætte egne interrupt vektorer, og selv opbygge nogle interrupts som kan kommunikere med UART-chippen og gemme modtagne data i en buffer.

Vi har derfor i stedet for valgt at benytte os af en såkaldt FOSSIL driver. FOSSIL står for "Fido/Opus/SEAdog Standard Interface Layer", og er et lille program, der lægges i computerens hukommelse (memory resident program) og kan benyttes af andre programmer. FOSSIL driveren sørger for alle de besværlige ting ved serielportkommunikation, og det eneste vi i vores program skal gøre for at modtage data fra serielporten er at kalde nogle af FOSSIL-driverens funktioner.

Benyttelsen af en FOSSIL driver bygger på PC'ens såkaldte "software interrupts".

#### **4.1.6.1 Interrupts**

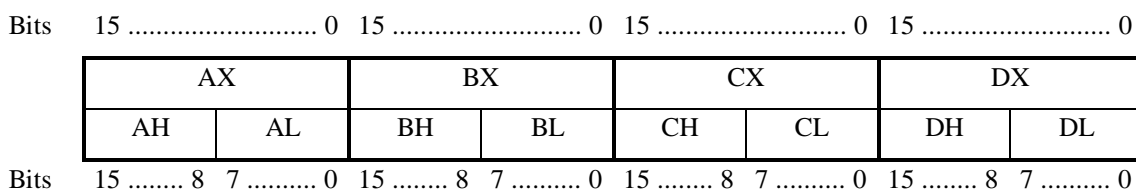
Et interrupt er en afbrydelse. Et interrupt kan sammenlignes med en telefon, der ringer. Telefonen afbryder det man er i gang med, man tager røret, snakker, lægger på og fortsætter med det man var i gang med. På samme måde afbryder et interrupt det, computeren er i gang med, får computeren til at udføre et andet, meget lille program og computeren fortsætter igen med det, den var i gang med før afbrydelsen.

Interrupts er specielt nyttige i forbindelse med computerens hardware. De såkaldte "hardware interrupts" er afbrydelser, som computerens hardware kan lave. F.eks. udføres et interrupt hver gang man trykker på tastaturet, og tastaturet aflæses gennem interruptet. På den måde skal computeren ikke hele tiden checke om der er blevet trykket på tastaturet - tastaturet fortæller det selv, og bliver kun aflæst når det er nødvendigt.

"Software interrupts" er næsten identiske med hardware interrupts, den eneste forskel er, at hvor hardware interrupts bliver startet af hardwaren, bliver software interrupts startet af selve softwaren. Software interrupts kan altså bruges som en slags funktionskald, og de anvendes mest til at kalde nogle af de i PC'ens BIOS (Basic Input/Output System) indbyggede funktioner. Men de kan også bruges til at kalde andre, små programmer i hukommelsen (memory resident programs), f.eks. en FOSSIL driver.

#### 4.1.6.2 FOSSIL-driveren

FOSSIL-driveren benytter interrupt 14h. Driverens funktioner kaldes altså ved at lave et software interrupt 14h. Men da FOSSIL-driveren har mere end kun een funktion skal den have nogle parametre gennem nogle af processorens registre (interne variable i processoren). 80x86 processoren har fire 16-bits dataregistre: AX, BX, CX og DX. Hvert af disse registre er inddelt i to 8-bits dele. I AX-registrets tilfælde, kaldes de to 8-bits registre for AH og AL, hvilket står for A High og A Low. Navngivningen er tilsvarende for opdelingen af registrene BX, CX og DX.



Figur 4.3: Dataregistrenes opdeling i en 80x86 processor.

I 8-bits registret AH skal driveren ved alle kald have et nummer, som siger hvilken funktion fossildriveren skal udføre. De enkelte funktioner kræver desuden yderligere nogle parametre gennem nogle af processorens andre registre og nogle funktioner returnerer også oplysninger gennem registrene. [FOSSIL, Afs. C-4]

#### 4.1.7 Problemanalyse - Databehandling

Med brugen af en FOSSIL-driver er det for os muligt at indlæse et tegn ad gangen fra serielporten. Men da en GPS-modtager sender strenge efter NMEA-standard og en sådan streng består af maksimum 82 tegn, skal start og slut på strengen lokaliseres, og de mellemliggende tegn samles til en streng i programmet.

For at kunne gøre dette, skal formatet på en NMEA streng kendes. Vi har valgt at benytte strengen "GGA - Global Positioning System Fix Data", da den er understøttet af den GPS-modtager vi bruger [SHIPM, S.45] og da den foruden positionen giver os oplysninger om tiden, antallet af satellitter i brug og HDOP-værdien. Denne NMEA streng har følgende form:

```
$GPGGA,TTMMSS.SS,BBBB.BBB,n,LLLLL.LLL,e,x,NN,D.D,x,x,x,x,x,x,x,xxxx,*hh<CR><LF>
```

\$GPGGA	= Strengens navn
TTMMSS.SS	= UTC tiden
BBBB.BBB	= Breddegrad
LLLLL.LLL	= Længdegrad
NN	= Antal satelliter i brug (fra 00 til 12)
D.D	= HDOP-værdien
n	= North/South (N eller S), bruges ikke i vores program.
e	= East/West (E eller W), bruges ikke i vores program.
x	= Bl.a. DGPS data, bruges ikke i vores program.
*hh	= Checksum, bruges ikke i vores program, da den ikke understøttes af modtageren.

[NMEA, S.26]

NMEA standarden siger dog, at ikke alle af disse oplysninger behøver at være inkluderet i strengen. Oplysningerne vil dog altid blive sepereret med det samme antal kommaer, og derfor skal oplysningerne i strengen findes ud fra kommaene, og ikke tegnenes placering i strengen.

[NMEA, S.9]

Fra den samlede streng skal nu de rigtige oplysninger tages ud. De oplysninger, vi ønsker at gemme er: Tiden, breddegrad, længdegrad og HDOP-værdien.

#### **4.1.8 Problemanalyse - Filhåndtering**

Da de indsamlede data bl.a. skal behandles i et regnark, er det nødvendigt at gemme i et format, som regnarket kan forstå. Vi benytter os af regnearket Excel 8.0, som kan læse tabulatorseparerede tekster. I dette format sepereres data med tegnet <TAB>, og der bruges linjeskift til separation af sæt af data. Et sæt data består af: Tiden, breddegrad, længdegrad og HDOP-værdien, og antal satellitter.

#### **4.1.9 Løsningsmetode - Serielport kommunikation**

Selvom FOSSIL driveren understøtter mange funktioner, herunder modemfunktioner, tastaturaflesegningsfunktioner samt skærm- og markørfunktioner, bruger vi kun seks af driverens funktioner. Oversigt over de brugte FOSSIL-funktioner og funktionernes parametre:



"Set baud rate", AH = 00h

Parametre:

Ind:	AL = Bitmaske for baudrate DX = Port nummer
Ud:	AX = Port status (Ikke brugt i vores program)

Bitmasken er en 8-bits værdi, hvis øverste 3 bits bestemmer baud raten:

Bits 7-5:

010 = 300 baud, 011 = 600 baud, 100 = 1200 baud, 101 = 2400 baud, 110 = 4800 baud, 111 = 9600 baud, 000 = 19200 baud, 001 = 38400 baud

De nederste 5 bits bruges til at bestemme antal data bits, stop bits og pariteten. Bitkombinationen 00011 vælger 8 data bits, 1 stop bit og ingen paritet, hvilket vi skal bruge ifølge NMEA-standarden.

"Receive character with wait", AH = 02h

Parametre:

Ind:	DX = Port nummer
Ud:	AH = 00h AL = Tegn fra bufferen

Hvis ikke der er kommet data ind i modtagebufferen, vil FOSSIL-driveren vente indtil der kommer data ind. Er der et tegn i bufferen, vil tegnet blive slettet fra bufferen og bliver returneret gennem AL.

"Initialize driver", AH = 04h

Parametre:

Ind:	DX = Port nummer
Ud:	AX = 1954h hvis initialiseringen er lykkedes BL = Det maksimale funktionsnummer der er understøttet BH = Den udgave af FOSSIL dokumentationen der er understøttet

Denne funktion bruges til at fortælle FOSSIL-driveren, at den skal bruges med den ønskede serielport, samt for at checke om FOSSIL-driveren er initialiseret rigtigt og om den understøtter de funktioner, der skal bruges.

"Deinitialize driver", AH = 05h

Parametre:

Ind:	DX = Port nummer
Ud:	Ingen

Denne funktion fortæller FOSSIL-driveren, at man ikke ønsker at foretage flere operationer på den angivne serielport.

"Non-destructive read-ahead", AH = 0Ch	
Parametre:	
Ind:	DX = Port nummer
Ud:	AH = 00h
	AL = Næste tegn fra bufferen
	AX = FFFFh - Hvis ingen tegn i bufferen

I denne funktion kan man nøjes med at bruge AL-delen af AX registret, hvis man ved, at der ikke vil komme et tegn med værdien FFh ind ad serielporten. Er bufferen tom, vil AL nemlig indeholde denne værdi. Ifølge NMEA-standarden vil der ikke blive sendt tegn med værdien FFh, derfor bruger vi i programmet kun registret AL. [NMEA, S.15]

"Enable or disable flow control", AH = 0Fh	
Parametre:	
Ind:	AL = Bit maske
	DX = Port nummer
Ud:	Ingen
Bitmaske:	
Bit 0 = 1	"Xon/Xoff on transmit"
Bit 1 = 1	"CTS/RTS (CTS on transmit, RTS on receive)"
Bit 2	Reserveret
Bit 3 = 1	"Xon/Xoff on Receive"

Med denne funktion angives, om der bruges "hardware flowcontrol" og indstillingerne for flowcontrol. NMEA standarden angiver ingen brug af flowcontrol, derfor skal bitmasken have værdien 0. [FOSSIL, Afs. D]

Da hvert af disse FOSSIL-driver kald fylder flere linier i et pascalprogram, har vi samlet alle kaldene i procedurer og funktioner i modulet Fossil. Desuden defineres en global variabel, port, der er lig portnummeret. De ovenover beskrevne FOSSIL-funktioner kaldes med følgende procedurer og funktioner:

```

FUNCTION Fossil_SetBaudRate(bitmask: byte): word;
FUNCTION Fossil_GetCharWait: char;
FUNCTION Fossil_Init: boolean;
PROCEDURE Fossil_Deinit;
FUNCTION Fossil_ReadAhead: char;
PROCEDURE Fossil_SetFlowControl(bitmask: byte);

```

Disse procedurer og funktioner er skrevet i pascals indbyggede assembler, da dette giver os muligheden for at skive direkte til processorens registre på en simpel måde.

Vi har kun benyttet os af to assemblerkommandoer, "mov" og "int". Kommandoen "mov b,a" flytter indeholdet fra a til b. I pascal kan dette gøres mellem pascals variable og processorens registre, hvilket vi udnytter. Kommandoen "int x" fremkalder et softwareinterrupt nummer x, og da FOSSIL-driveren benytter interrupt 14h, bruges kommandoen udelukkende på formen "int 14h".

Eksempel fra modulet Fossil:

```

FUNCTION Fossil_GetCharWait: char; ASSEMBLER;
    ASM          {ASSEMBLER => ASM..END erstatter BEGIN..END}
    mov ah, 02h  {Flyt tallet 02h over i registret ah}
    mov dx, port {Flyt tallet fra variabelen port over i registret dx}
    int 14h     {Lav et softwareinterrupt nr 14h}
    END;       {Fossil_GetCharWait = resultatet i al}

```

Et assemblerprogram i et pascalprogram indledes altid med kommandoen "ASM" og afsluttes med "END". Vi har også benyttet os af kommandoen "ASSEMBLER" ved nogle af procedurerne og funktionerne. Denne kommando er især nyttig i funktionerne, hvor den gør, at funktionen får returnerer den værdi der under funktionens afslutning ligger i processorens register al eller ax (afhængigt af funktionens type; 8 eller 16 bits). Mange af FOSSIL-driverens funktioner returnerer netop data i disse registre. Ved brug af kommandoen "ASSEMBLER" erstattes "BEGIN..END" med "ASM..END".

Selve FOSSIL-funktionerne bruges til 3 ting:

#### **4.1.10 Initialisering:**

For at benytte FOSSIL-driveren til kommunikation, skal den første funktion, der kaldes, være "Initialize driver". Herefter kaldes funktionerne "Set Baud Rate" og "Enable/Disable Flow Control", som sætter serielporten op til den rigtige hastighed (baudrate) samt vælger det rigtige antal databits, paritet, stopbits og flowcontrol. En GPS-modtager fungerende efter NMEA-standard kommunikerer med en baudrate på 4800 bits/sek, 8 databits, ingen paritet 1 stopbit og udnytter ikke flow control. [NMEA, S.7] I starten af UNITen setup, er denne opsætning givet i to konstanter, som bruges i funktionerne Fossil\_SetBaudRate og Fossil\_SetFlowControl. I programmet kaldes disse funktioner fra proceduren Setup\_ChoosePort.

#### **4.1.11 Hente tegn fra serielporten:**

Tegn kan med funktionen "Receive char with wait" indhentes et ad gangen. Hvis FOSSIL-driverens tegnbuffer er tom, venter funktionen til der kommer et tegn ind. Dette er uønskeligt, da det ville blokere programmet hvis der ikke kommer tegn ind. Derfor checkes først med funktionen "Non-destructive read-ahead" om der er tegn i bufferen.

I funktionen NMEA\_ReadSentence bruges funktionerne "Non-destructive read-ahead" og "Receive character with wait" til at indlæse en mulig NMEA streng. Først checkes med funktionen Fossil\_ReadAhead om der er kommet data ind i FOSSIL-driverens buffer. Er der kommet data ind, indlæser funktionen Fossil\_GetCharWait et tegn ad gangen, og forsøger at samle en brugbar NMEA streng [se afsnit 4.1.13].

#### **4.1.12 Deinitialisering:**

Deinitialisering af FOSSIL-driveren gøres med funktionen "Deinitialize driver", når programmet afsluttes.

Da programmet i uniten Runtime stoppes med kommandoen "halt", har vi lavet en exitprocedure, som altid startes automatisk, når pascalprogrammet afsluttes. Pascals egen exitprocedure startes efter vores exitprocedure. På den måde kan man ikke komme til at "glemme" at deinitialisere FOSSIL-driveren eller gemme de indsamlede data. Selve exitproceduren kalder proceduren Fossil\_DeInit, lukker outputfilen og slettes skærmen.

#### **4.1.13 Løsningsmetode - Databehandling**

En NMEA streng starter altid med et "\$", og slutter altid med <LF> (Line Feed). Vi ved desuden, at en NMEA streng maksimum er 82 tegn lang. [NMEA, S.11] Dette bruger vi i funktionen NMEA\_ReadSentence til at finde en mulig NMEA streng.

funktionen NMEA\_SliceSentence "skærer" alle tegn, der ligger før et komma, ud af strengen. Dette er meget praktisk, da oplysningerne i en NMEA streng altid er adskilt med samme antal kommaer. I hovedprogrammet bruges NMEA\_SliceSentence først for at afgøre om den indkomne streng er af den rigtige type, ved at se om strengen begynder med "\$GPGGA". Er strengen af den rigtige type, "skæres" nu følgende oplysninger ud af strengen: tiden, breddegrad, længdegrad, antal satellitter og HDOP-værdien. Oplysningen om nord/syd og øst/vest bliver ikke brugt, da vi kender disse oplysninger og ved at de ikke vil ændre sig.

Disse oplysninger bliver gennem proceduren Runtime\_UpdateScreen skrevet på skærmen, programmet mangler nu bare at gemme oplysningerne på harddisken i det rigtige format.

#### **4.1.14 Løsningsmetode - Filhåndtering**

Oplysningerne skal gemmes som tabulatorsepareret tekst, som er et meget simpelt format og et sæt indsamlet data kan gemmes med en enkelt kommando:

```
WriteLn(outputfile,tiden,tab,breddegrad,tab,længdegrad,tab,HDOP);
```

Dette ville dog normalt resultere i, at der ville skrives til harddisken meget tit, da der kommer nye oplysninger fra GPS-modtageren med to sekunders mellemrum. Dette er ikke særlig godt, da det slider på harddisken samt misbruger computerens ressourcer, da harddisken er et langsomt medie.

Pascal har dog en buffer, som gør, at harddisken ikke skal gemme nær så tit. Denne buffers størrelse er normalt sat til 128 bytes eller, hvilket jo ikke er meget, da et sæt GPS-data fylder ca. 35 bytes. Bufferen kan forøges med kommandoen SetTextBuf(outputfile,filebuffer), hvor filebuffer er et array af typen char og med den ønskede størrelse. [TP7, s.190] Dette gøres i

proceduren Setup\_ChoseFileName, hvor outputfilen også åbnes med kommandoerne assign og append/rewrite.

#### **4.1.15 Afprøvning**

Indledningsvis blev programmet testet ved opkobling mod en anden PC, der sendte NMEA-strengene svarende til de data, en modtager ville sende. Sidenhen er programmet blevet brugt sammen med GPS modtageren RS5800 i op til flere døgn ad gangen uden nogen former for fejl.

#### **4.1.16 Brugervejledning**

For at kunne bruge programmet skal en GPS-modtager, der understøtter NMEA sætningen "GPGGA", være tilsluttet PC'ens serielport.

Desuden skal en FOSSIL-driver, som understøtter op til funktion \$1B (max function number supported  $\geq$  \$1B), og understøtter minimum udgave 5 af FOSSIL dokumentationen (rev of FOSSIL doc supported  $\geq$  5), være installeret på maskinen.

Programmet startes fra MS-DOS med filen "GpsRead.exe"

I Programmet vælges nu den COM-port, som modtageren er tilsluttet, samt det filnavn, som GPS-data skal gemmes under. Eksisterer filen i forvejen, vil filen ikke overskrives, men data vil blive tilføjet filen.

Programmet viser nu alle NMEA-strengene kommende fra serielporten på skærmen. Data fra "GPGGA" strenge vil gemmes i filen.

For at afslutte programmet trykkes på <ESC>-tasten.

## **4.2 Statistisk metode**

### **4.2.1 Grundlæggende begreber**

For at kunne lave en statistisk behandling af de indsamlede data, er det nødvendigt først at definere nogle størrelser indenfor statistik og beskrive teorien bag disse størrelser.

Den første størrelse, vi indfører, er *det forventede gennemsnit* eller *middelværdien*. Denne størrelse er nødvendig at finde, idet vi ønsker at se på variationen af den målte position, og derfor må vi have et midtpunkt som man derefter kan benytte til at definere afvigelserne i forhold til.

Gennemsnittet betegnes  $E(z)$  eller  $\mu$ , hvor  $z$  er en stokastisk variabel, og beregnes på følgende måde:

$$E(z) = \frac{\sum_{i=1}^N L(i)}{N}$$

Hvor  $L(i)$  = værdien af den  $i$ 'te måling og  $N$  = antal målinger.

Den næste størrelse, vi indfører, beskriver afvigelsen af målingerne i forhold til middelværdien. Denne størrelse kaldes for *variansen*.

Variansen betegnes med  $\text{var}(z)$ , og beregnes på følgende måde:

$$\text{var}(z) = \frac{\sum_{i=1}^N (L(i) - E(z))^2}{N} = E\left((z - E(z))^2\right)$$

Som det bemærkes kvadreres differensen  $z - E(z)$ . Grunden til dette er at  $E(z - E(z))$  altid vil give 0, idet gennemsnittet af differenserne jo netop ophæver hinanden. (jævnfør definition på  $E(z)$ ).

En anden mulig løsning var at benytte den absolutte værdi  $|z - E(z)|$  (hvilket kaldes Laplace's mål), men der viser sig at den ovennævnte metode har nogle behagelige matematiske egenskaber, og derfor vil vi i det efterfølgende kun koncentrere os om denne.

Standardafvigelsen betegnes  $SD(z)$  eller  $\sigma$ , og er definet som:

$$SD(z) = \sqrt{\text{var}(z)}$$

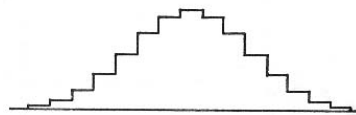
Denne betegnes også, specielt i forbindelse med radionavigation, rms (Root Mean Square).

$d_{\text{rms}}$  (distance rms) benyttes til at beregne standardafvigelsen, når der er tale om mere end én dimension.  $d_{\text{rms}}$  er defineret som længden af vektorsummen af standardafvigelserne. Eksempelvis ved 3 dimensioner:  $d_{\text{rms}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}$ . Denne størrelse vil betegne en kugle med radius  $d_{\text{rms}}$ , hvilken indeholder 68,3% af dataene.

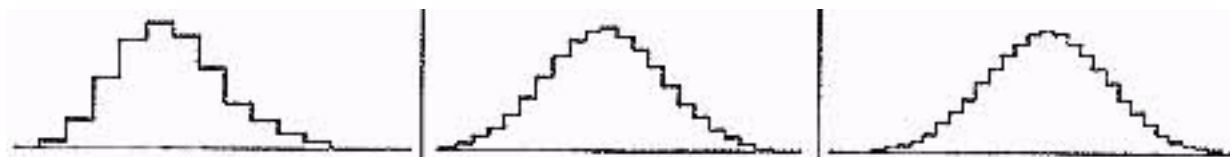
## 4.2.2 Normalfordelingskurver

For at få et grafisk overblik over målingernes spredning definerer vi en grafisk afbildning som kaldes et *histogram*. Histogrammet viser antallet af målinger i et given interval i forhold til det totale antal målinger. Dette betegnes *sandsynligheden* (P) for at et antal målinger befinder sig i intervallet. Sandsynligheden kan så aflæses som arealet under kurven i pågældende interval.

Ved at benytte specielle standardenheder på histogrammets akser vil histogrammerne fra at stort antal forskellige fordelinger være næsten ens. Man siger, at histogrammet går mod den normale kurve, når antallet af målinger går mod  $\infty$ . Denne egenskab kan udnyttes til at udregne tilnærmede værdier for sandsynligheder.



Figur 4.4: Histogram [Lehmann, s. 202].



Figur 4.5: Histogrammets tilnærmelse til normalfordelingskurve [Lehmann, s. 202].

For at konvertere til disse standardenheder plottes variabelen  $z^*$  istedet for  $z$ .

Sammenhængen mellem disse to variabler er som følgende:



$$z^* = \frac{z - E(z)}{SD(z)}$$

Dette kaldes at reducere  $z$  til standardenhederne. Denne reducere medfører følgende:

$$E(z^*) = \frac{E(z - E(z))}{SD(z)} = \frac{0}{SD(z)} = 0$$

$$\text{var}(z^*) = \text{var}\left(\frac{z - E(z)}{SD(z)}\right) = \text{var}(z - E(z)) \cdot \frac{1}{SD(z)^2} = \frac{\text{var}(z - E(z))}{SD(z)^2} = \frac{\text{var}(z)}{\text{var}(z)} = 1$$

I ovennævnte udregninger har vi benyttet følgende regneregler for variansen:

$$\begin{aligned} \text{var}(z - E(z)) &= \text{var}(z) \\ \text{var}(c \cdot z) &= c^2 \text{var}(z) \end{aligned} \quad (\text{hvor } c \text{ er en konstant})$$

Ved at betragte  $E(z^*)$  og  $\text{var}(z^*)$  ses det, at variabelen  $z^*$  vil blive fordelt omkring 0 med en varians på 1.

Ligesom i histogrammet er højden et mål for sandsynligheden. Forskellen er blot at intervallets størrelse er defineret som  $1/SD(z)$ .

Under forudsætning af at histogrammet nærmer sig normalfordelingskurven for  $N$  gående mod  $\infty$ , kan arealet under den normale kurve benyttes som en tilnærmelse til det tilsvarende areal på histogrammet (og dermed sandsynlighed).



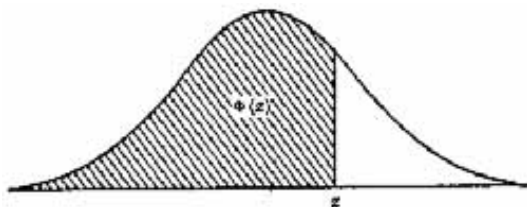
Figur 4.6: Den normale kurve [Lehmann, s. 201].

Den normale kurve har følgende egenskaber:

Arealet under kurven er 1. Dette kommer af at kurven er grænseværdien af histogrammer, som alle har det samlede areal = 1.

Kurven er symmetrisk omkring 0, hvilket kan ses af transformationen af  $z$  til  $z^*$ .

Arealet under den normale kurve betegnes med  $\Phi$ , og den kan findes ved tabelopslag.

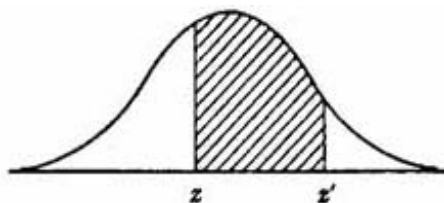


Figur 4.7: Arealet under den normale kurve [Lehmann, s. 203].

Som følge af disse egenskaber følger der at  $\Phi(-z) = 1 - \Phi(z)$

For at finde arealet mellem 2 vertikale linjer finder man differensen mellem arealerne.

Dvs. arealet mellem linjerne  $z$  og  $z' = |\Phi(z') - \Phi(z)|$



Figur 4.8: Areal mellem  $z'$  og  $z$  [Lehmann, s. 204].

### 4.2.3 Nøjagtigheden

Disse egenskaber udnyttes til at bestemme sandsynligheden for at en måling ligger indenfor en given nøjagtigheden af et estimat:

Hvis histogrammet approksimerer den normale kurve på tilfredsstillende vis, vil sandsynligheden for at  $z$  ligger indenfor en afstand  $d$  fra  $E(z)$  være lig:

$$\pi = P(-d < z - E(z) < d)$$

Dette udtryk kan omskrives til: (jævnfør reduktionen af  $z$  til standardenheder)

$$\pi = P\left(\frac{-d}{SD(z)} < z^* < \frac{d}{SD(z)}\right)$$

Idet den normale tilnærmelse kan anvendes i relation til  $z^*$ , er sandsynligheden tilnærmelsesvis lig:

$$\pi \approx \Phi\left(\frac{d}{SD(z)}\right) - \Phi\left(\frac{-d}{SD(z)}\right) = \Phi\left(\frac{d}{SD(z)}\right) - \left(1 - \Phi\left(\frac{d}{SD(z)}\right)\right) = 2\Phi\left(\frac{d}{SD(z)}\right) - 1$$

Dette vil sige at sandsynligheden  $\pi$  for at estimatet  $z$  ligger inden for afstanden  $d$  fra  $E(z)$  er forbundet med forholdet  $d/SD(z)$

Hvis man i stedet ønsker at aflæse, hvilken afstand en given sandsynlighed er lig med, bliver formlen:

$$\Phi\left(\frac{d}{SD(z)}\right) = \frac{\pi + 1}{2}$$

Når man beregner nøjagtigheden arbejder man ofte med nogle standardforhold mellem  $d$  og  $SD(z)$ .

$d/SD(z)$	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
$\pi$	0.683	0.866	0.954	0.988	0.997

Figur 4.9: Standardværdier for  $d/SD(z)$  og deres tilsvarende sandsynlighed [Lehmann, s. 277]

## 4.3 Databehandling

### 4.3.1 Implementation

Først og fremmest skal de opsamlede koordinater konverteres fra længde- og breddegrader til kartetiske koordinater, idet vi ønsker de beregnede værdier (standardafvigelse, nøjagtighed m.m.) udlæst i meter, istedet for længde- og breddegrader. Dette vil foregå efter de i afsnit 2.6 beskrevne formler.

Dernæst skal gennemsnit, varians og standardafvigelse beregnes. Disse størrelser skal benyttes til de videre beregninger (normalfordelingskurver, nøjagtighedsbestemmelse m.m.).

Hvis man desuden kender GPS-modtagerens faktiske position, kan middelværdien af målingerne give et fingerpej om kvaliteten af målingerne, idet det ville være en fornuftig tese at gennemsnittet vil gå mod den faktiske position for  $N$  (antal målinger) gående mod  $\infty$ .

Vi har valgt at fremstille normalfordelingskurver for hver af koordinater ( $x,y,z$ ). Disse kurver er konstrueret for at eftervise normalfordeling af de opsamlede data. Kurverne er ikke standardnormalfordelingskurver, da man ikke på disse kan aflæse afvigelserne i meter. Istedet kan afvigelserne fra middelværdierne aflæses på 1.aksen og den procentvise andel af de opsamlede data på 2.aksen.

For at observere ændring fra måling til måling af positionsangivelsen, har vi desuden valgt at fremstille et positionsplot.

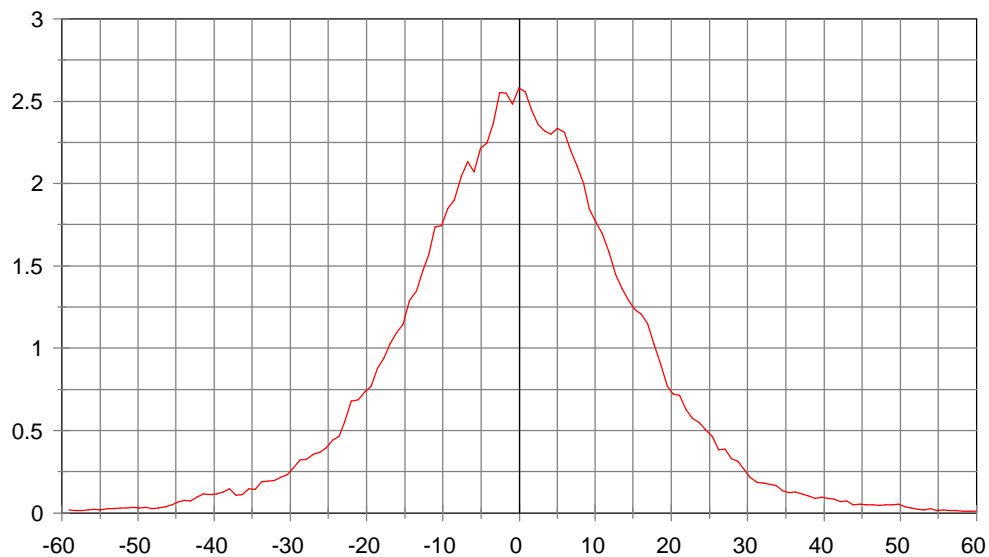
Positionsplottet er foretaget ud fra bredde- og længdegrader. Dette skyldes, at en omregning til angivelse af de horizontale afvigelser i meter vil kræve projektion af de kartesiske koordinater på tangentplanen i middelværdien. Disse udledninger og beregninger er forholdvist komplicerede og fyldige.

Undervejs i databehandlingen stødte vi på problemer vedrørende kapaciteten af det planlagte værktøj, regnearket Quattro pro. Følgelig har vi istedet fremstillet et program til databehandling. Dette program er ikke dokumenteret men vedlagt på disketten. Kun den grafiske afbildning er foretaget i Quattro Pro.

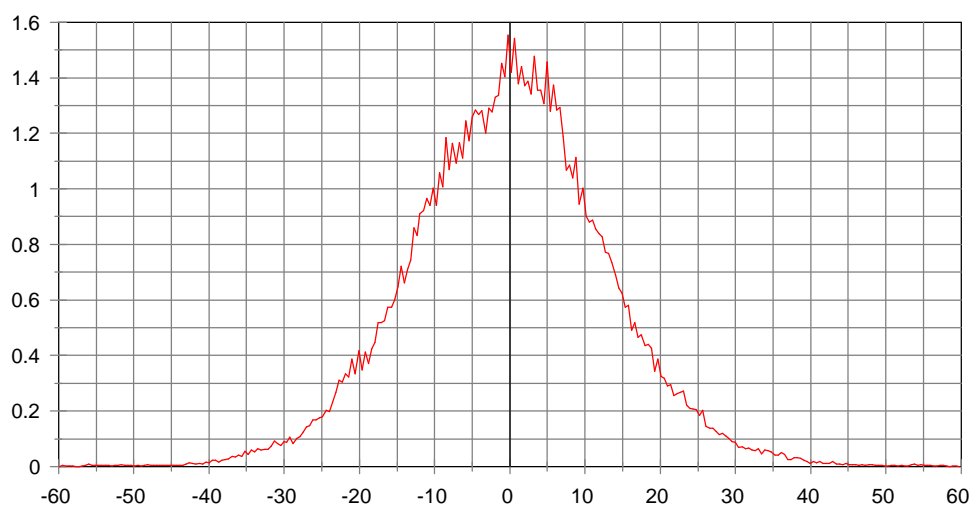
Det bemærkes, at nøjagtigheden, vi finder, nødvendigvis må være nøjagtigheden af GPS med netop den modtager, vi har benyttet.

### 4.3.2 Resultater

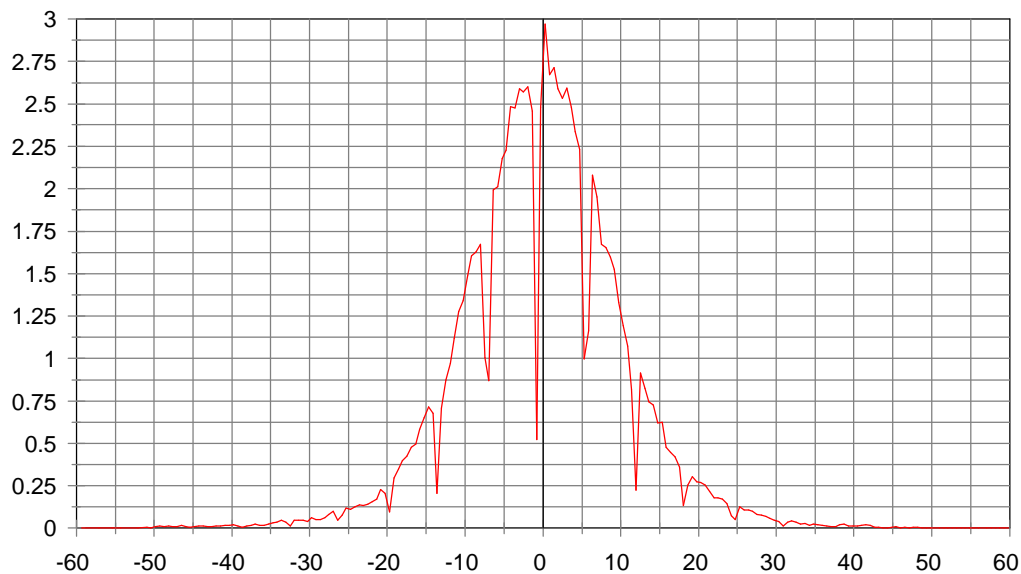
Herunder følger resultaterne fra databehandling af 330.041 datasæt opsamlet mellem 1.12.97-8.12.97:



Figur 4.10: Normalfordelingskurve for X-koordinat (1.-akse i meter og 2.-akse i %)



Figur 4.11: Normalfordelingskurve for Y-koordinat (1.-akse i meter og 2.-akse i %).



Figur 4.12: Normalfordelingskurve for Z-koordinat (1.-akse i meter og 2.-akse i %).

Histogrammerne for dataene langs henholdsvis x,y - og z-aksen viser, på trods af “støj” langs y- og z-aksenen, en normalfordelig af dataene.

Z-aksens støj-signaler er klart de mest fremtrædende, og de er bemærkelsesværdigt nok periodiske med en periode på ca. 7 meter. Årsagen til denne periodiske afvigelse fra normalfordelingen har det ikke været muligt at finde svar på, men den kan måske have en sammenhæng med omskrivningen af positionen fra længde- og breddegrader til kartetiske koordinater (x,y,z).

Ud fra de indsamlede data er følgende statistiske størrelser beregnet:

	X-koordinat:	Y-koordinat:	Z-koordinat:
Middelværdi:( $\mu$ )	3423060.752 m	575706.161 m	5387641.222 m
Varians:( $\sigma^2$ )	282.252 m	178.436 m	120.480 m
Standardafvigelse:( $\sigma$ )	16.800 m	13.358 m	10.976 m

Figur 4.13: Beregnede statistiske størrelser (de kartesiske koordinater er udregnet efter WGS-84).

Den fundne middelværdi i kartesiske koordinater svarer til følgende længde- og breddegrader (x,y,z)=(3424060.752m , 575706.161m , 5387641.222m)  $\sim$ ( $\lambda,\phi$ )=(9.547/ Ø, 57.032/ N)

Som beskrevet i afsnit implementationen kunne man, hvis man kendte GPS-modtagerens faktiske position, have benyttet middelværdien af målingerne som mål for om de beregnede værdier er udført på et tilstrækkeligt stort antal målinger til at give en fornuftig indikation af GPS-modtagerens faktiske karakteristika.

Dette har dog ikke været muligt at realisere, idet vi ikke har været i stand til at fremskaffe præcis positionsangivelse ad anden vej til sammenligning.

Efter at have bekræftet vores formodning om at positionsdataene er normalfordelte, kan vi approksimere nøjagtigheden efter den i afsnit 4.2.3 beskrevne formel.

De beregnede nøjagtigheder bliver derefter:

	X	Y	Z
1 $\sigma$ (68,3%)	16,800 m	13,358 m	10,976 m
2 $\sigma$ (95,4%)	33,600 m	26,716 m	21,952 m

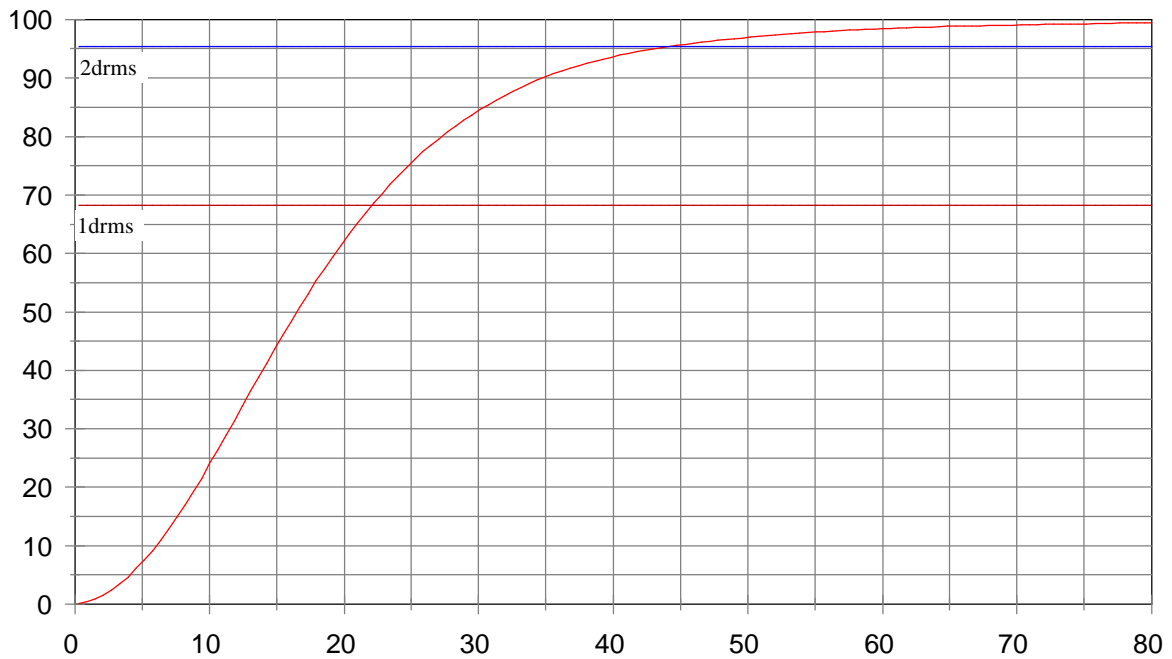
Figur 4.14: Nøjagtighed i X,Y- og Z.

Afvigelserne fra middelværdien er i tre dimensioner. Den samlede rumlige nøjagtighed ( $d_{rms}$ ) er lig:

1drms:	2drms:
24.107 m	48.215 m

Figur 4.15: Nøjagtighed i drms.

Herunder er antallet af målinger som ligger inden for en given afstand fra middelværdien plottet:



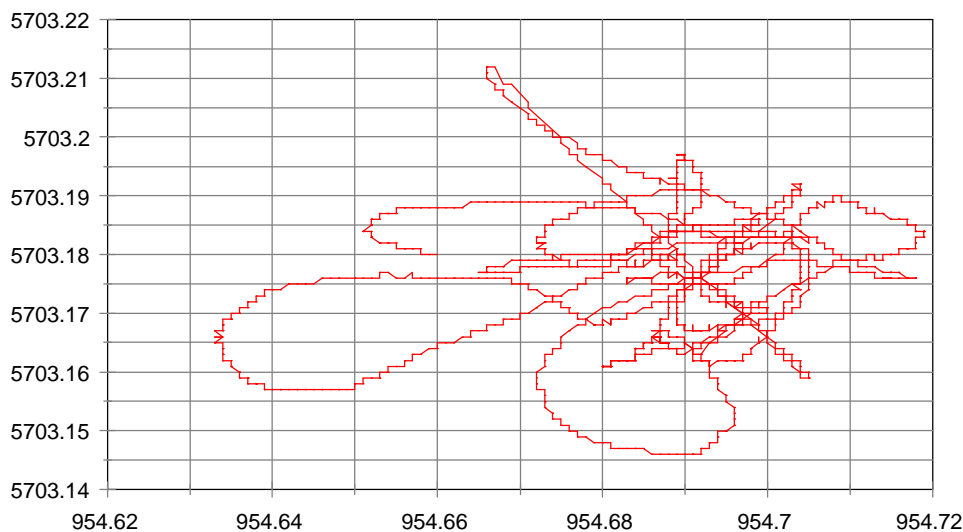
Figur 4.16: kurve over de enkelte målingers afstand fra middelværdi. (1-akse: rumlig fejl i meter og 2-akse: procentdel af målingerne).

Angivelse af positionen som  $\mu \pm 2\sigma$  vil rumme 95,4% af målingerne. Dette vil således være en rimelig angivelse af den fundne position og nøjagtigheden heraf:

Sammenlignet med afvigelserne i afsnit 2.4.5 forekommer disse værdier ganske rimelige. Ved opmærksom på at værdierne i forvnte afsnit skal multipliceres med PDOP (Position Dilution Of Precision) for at være tilsvarende vores.



### 4.3.2.1 Positionsplottet



Figur 4.17: Positionsplot af periode på 3 timer (3600 målinger, 1.- og 2.-akse i hundrededele af en grad). Nordlig breddegrad og østlig længde-.

Af ovenstående positionsplot kan man se en koncentration af dataene omkring positionen  $9,5469^\circ \text{ Ø}$ ,  $57,03175^\circ \text{ N}$ , hvilket svarer ganske godt til den beregnede middelværdi ( $9.547/ \text{Ø}$ ,  $57.032/ \text{N}$ ). Samtidigt kan man se enkelte bemærkelsesværdige udsving fra denne værdi. Disse afvigelser må være forårsaget af de senere nævnte fejlkilder.

Rumsegmentet:

Af fejlkilder i rumsegmentet er SA klart den mest fremtrædende og mest sandsynlige, idet fejl i satellituret, baneforstyrrelser m.m. sandsynligvis ikke vil ændre sig nævneværdigt over den korte periode (3 timer).

Kontrolsegmentet:

Ligesom fejlen i satellituret og baneforstyrrelserne, er det ikke sandsynligt at fejl i kontrolsegmentet vil have nævneværdig indflydelse på positionsplottet.

Brugersegmentet:

Forsinkelser i atmosfæren (ion- og troposfæren) vil højst sandsynligt ændre sig i løbet af måleperioden, idet satellitterne bevæger sig ca.  $90^\circ$  ( $3/12 \cdot 360^\circ$ ) i løbet af 3 timer. Dog kan man af figur Figur 2.8, se at fejlen forårsaget af disse forstyrrelser er relativt lille sammenlignet med fejlen forårsaget af SA.

Det samme gælder for fejl introduceret af reflekterede signaler, hvorimod fejl på grund af støj i modtageren sandsynligvis ikke vil ændre sig gennem måleperioden.

Alt i alt må man konkludere, at den altoverskyggende årsag til udsvingene, må være forårsaget af SA, dog viser grafen ikke den fulde effekt af SA, idet den benyttede GPS-modtager anvender et såkaldt kalmanfilter (se nedenfor).

### **4.3.3 Fejkilder**

Vi har observeret en række forhold, der kan have influeret på vores positionsbestemmelse.

- Antennen var placeret på toppen af en bygning midt i byen. Der er således udpræget mulighed for at en del af signalerne er blevet reflekteret i forskellige overflader, såkaldt “multipath”-fejl, såsom bygninger.
- En enorm byggekran blev brugt i umiddelbart nærhed - Ifølge brugervejledning til modtageren, kan sådanne metalkonstruktioner forstyrre udsynet. [SHIPM, s. 49]
- Modtageren benytter et 8-trins-kalmanfilter [SHIPM, s. 54]. Et sådant filter vægter de enkelte målinger ud fra størrelsen på ændring fra de sidste målinger. Pludselige store spring i positionen vægtes mindre [Toft, s. 22]. Dette vil forårsage, at en del ekstreme afvigelse fra middelværdien vil være blevet frasortet (se Figur 4.17). Vores beregnede standardafvigelse kan derfor være mindre end ellers. Dette forklarer udmærket vores lave spredning (samlignet med tabelværdier).
- En nok mindre betydende fejlkilde er, at hvis kun 3 satellitter er synlige, benyttes en af brugeren indtastet værdi for højden over jordoverfladen. Ifald den indtastede værdi er forkert vil dette medføre fejl i positionsbestemmelsen.

## 5. Forbedringer af GPS

Dette kapitel vil behandle mulighederne for fjernelse, opgivelse, eller omgåelse af Selective Availability.

### 5.1 Mod opgivelse af SA?

#### 5.1.1 Problemer i 90'erne

I midten af 1990'erne blev den amerikanske regering opmærksom på, at SA var en hindring for den økonomiske og teknologiske udvikling.

Efter uautoriserede brugere begyndte at kunne bruge GPS, er USA blevet førende inden for udviklingen og salg af GPS udstyr [Factsheet]. Der er således opstået en helt ny industri i USA, som årligt omsætter for 1 mia. \$. I midten af 90'erne var udviklingen imidlertid gået i stå p.g.a., at SA hindrede den fulde udnyttelse af systemet til civilt brug. Den amerikanske GPS industri pressede derfor på, da en opgivelse af SA eller et løfte derom vil medføre yderligere fremgang for GPS industrien. Den amerikanske regering var ligeledes interesseret i dette, da det ville medføre en markant forøgelse af arbejdspladser inden for industrien.

I midten af 90'erne var det desuden i USA's interesse, at der blev ændret på SA politikken, da Japan havde planer om at lave deres eget satellitnavigationssystem [Spacenet]. Det var meningen, at dette skulle give de præcise positioner til uautoriserede brugere, som SA forhindrer ved GPS systemet. Der ville således opstå endnu et satellitnavigationssystem, som USA ikke har kontrol over. En frigivelse systemet eller lovning derom, vil kunne løse problemet, da der dermed ikke er brug for et nyt satellitnavigationssystem.

#### 5.1.2 Rapporterne

Resultatet af disse problemer blev, at præsidenten d. 2. juni 1995 bad Office of Science and Technology Policy (OSTP) og National Security Council (NSC) om at undersøge mulighederne for en ændring af USA's SA-politik [PRD3]. Disse organisationer rådgiver kongressen ang. videnskab, teknologi og sikkerhed.

RAND er en offentlig støttet undersøgelsesorganisation, som udfører undersøgelser for staten om, hvordan denne kan imødegå både nationale og militære interesser. OSTP fik RAND

Critical Technologies Institute til at udarbejde en rapport [PDD], hvori de giver deres vurdering af, hvordan USA mest effektivt ballancerer sine kommercielle interesser med national sikkerhed. En del af denne rapport omhandler SA-problematikken.

Rapporten fastslår, at det ikke vil være en god ide at indstille SA i fredstid og implementere den i krigstid, som mange har foreslået. De uautoriserede brugere vil i så tilfælde blive afhængige af den præcision, som GPS giver uden SA og måske have skiftet hele systemer ud. Det vil således være svært for det amerikanske forsvar at få reaktiveret SA i tilfælde af konflikter eller krig.

RAND anbefaler derfor, at SA skal blive som en militær sikkerhed, og at politikken ikke skal opgives foreløbigt, da der endnu ikke er udviklet mulige metoder til at forhindre misbrug af systemet i krigstilfælde.

Det bliver i rapporten anbefalet, at DoD skal arbejde med udviklingen af andre teknikker til udførelse af, eksempelvis jamming af GPS, DGPS og GLONASS. En beslutning om, hvorvidt degraderingen af præcisionen skal opgives, bør ifølge rapporten således først tages, når disse muligheder eksisterer. SA-politikken eksisterer altså i princippet, og spørgsmålet er blot, med hvilket middel, den forsat skal føres i fremtiden.

Kongressen bad National Academy of Public Administration (NAPA) og the National Research Council (NRC) om at lave nogle tilsvarende undersøgelser [Policy].

NAPA er en uafhængig, upartisk organisation hyret af kongressen, som yder praktisk assistance med undersøgelser, som fokuserer på, hvordan den amerikanske regering kan varetage alle interesser omkring civile formål og institutioners roller og ansvar gennem politiske indgreb [Policy]. NRC rådgiver den amerikanske regering om videnskabelige emner.

Både NAPA og NRC misbilliger degraderingen af præcision, dog anbefaler NAPA, at andre metoder, som er i stand til at forhindre misbrug af GPS, bør findes. Altså, i princippet opretholdelse af SA-politikken.

### **5.1.3 Dekretet**

På baggrund af anbefalinger fra OSTP, NSC og militære rådgivere udsendte den amerikanske præsident d. 29 marts 1996 et dekret, som indeholder nogle politiske retningslinier for den fremtidige udvikling af GPS. Mange havde forventet en politisk beslutning om afskaffelse af SA. En sådanne løsning er imidlertid ikke mulig i dette tilfælde, da der skal tages hensyn til

sikkerheden. Dette er grunden til, at præsidenten ikke lavede konkrete lovændringer, men i stedet angiver retningslinier.

Ifølge præsidentens dekret skal der arbejdes hen imod en afskaffelse af degraderingen af præcisionen inden for et årti. Herved får militæret tid til at udvikle den nødvendige teknologi, som sætter dem i stand til at forhindre militær udnyttelse af GPS. En beslutning om egentlig afvikling af SA skal således først tages inden for de næste ti år, når militæret har udviklet denne teknologi.

Præsidentens dekret er meget vigtigt, da det er en garanti for, at civile, uautoriserede brugere inden for de næste ti år vil få adgang til GPS, uden SA vil påvirke dem. GPS-industrien kan således begynde at udvikle nyt GPS udstyr til civile brugere.

#### **5.1.4 Fremtiden**

Det amerikanske forsvarsministerium (DoD) har valgt ikke blot accepteret præsidentens direktiv, men er gået et skridt videre: DoD og det amerikanske trafikministerium (DoT) udsendte d. 27. februar 1997 en pressemeddelelse [DoT], hvori de erklærede, at enighed var blevet opnået om, at de nuværende uautoriserede brugere skal have fuld adgang til L2 frekvensen (når andre midler til begrænsning af adgangen er udviklet), som på dette tidspunkt er forbeholdt de autoriserede brugere. Dette vil kun blive en midlertidig løsning, da der er planer om, at de uautoriserede brugere skal have endnu en frekvens, kaldet L5. Der er således lavet foranstaltninger, som gør at L5 kan blive påført de kommende Block IIF satellitter. Ligeledes har militæret planer om en ny frekvens udelukkende til militært brug.

Med denne aftale vil uautoriserede brugere i fremtiden ikke blot få fjernet fejlen påført SPS. De vil desuden være istand til at korrigere for ionsfæriske fejl vha. den ekstra frekvens.

#### **5.1.5 Konklusion**

En løsning på problemet med SA, som blev frembragt ad politisk vej er altså forestående, men det vil tage nogle år endnu, før den vil blive effektiviseret. I mellemtiden må uautoriserede brugere se sig nødsaget til at bruge DGPS eller lignende metoder, hvis de vil have bedre positioner end GPS, i sin nuværende form, giver uautoriserede brugere.

## 5.2 GLONASS

Det russiske satellitnavigationssystem, Global Navigation Satellite System (GLONASS), har meget til fælles med GPS-systemet. Dette gør det aktuelt at tale om GLONASS som et muligt alternativ til GPS. Endvidere kan man undersøge om det er muligt at integrere de to systemer.

Begge systemer ejes og opereres af de to landes forsvarsdepartementer, og begge systemer tilbyder kontinuerligt præcise data til positionsbestemmelse over hele jordkloden, ved hjælp af et spectrum af signaler, der transmitteres i L-båndet.

Både den amerikanske og den russiske regering har lovet at vedligeholde deres systemer og lade dem være åbne for civilt brug uden nogen brugeravgift i en periode på henholdsvis 10 og 15 år fra datoerne for fuld operationalitet.

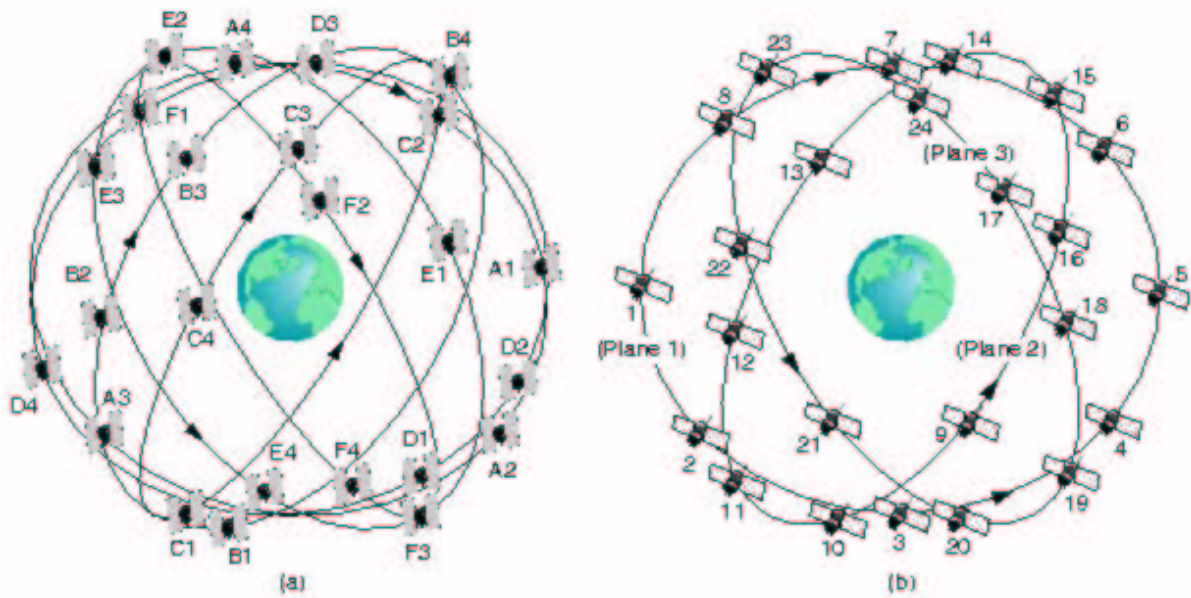
Ligesom GPS har GLONASS to standarder af service. The Channel of Standard Accuracy (CSA), der er tilgængelig for civile brugere, giver en afvigelse på 60 m horisontalt og 75 m vertikalt med 99,7 procent sandsynlighed ( $3\sigma$  - se afsnit 4.2.1). The Channel of High accuracy (CHA) er kun tilgængelig for autoriserede brugere.

Der er også visse forskelle på de to systemer.

### 5.2.1 Forskelle på GPS og GLONASS

Hvor satellitterne i GPS-systemet kredser om jorden i 6 baner med en hældning på 55 grader i forhold til ækvatorialplanen bevæger GLONASS-satellitterne sig i 3 baner med en hældning på 65,8 grader. Det bevirker bl. a. at GLONASS har en bedre dækningsgrad i polarområderne.

GPS-satellitter transmitterer signaler på samme bæreølgefrekvens og bruger forskellige koder. GLONASS-satellitter transmitterer den samme kode, men på forskellige frekvenser.



Figur 5.1: Konstellationerne af navigationssatelliter i (a) GPS og (b) GLONASS. Hvert system er planlagt til at have en 24-satellit-konstellation. GPS har satelliter i 6 baner og GLONASS har satelliter i 3 baner [Misra].

Som nævnt ovenfor bruger GLONASS en række frekvenser i L-båndet. L1 bærefrekvensen til civil brug bruger  $1602 + 16/9 * n$  MHz, hvor  $n = 0, 1, 2, \dots, 24$ . Dette medfører en vis risiko for interferens med nogle bestemte transmissioner i forbindelse med radioastronomi og satellitstyring. Af den grund bliver nogle af de 24 kanaler ikke brugt. Den russiske regering har derfor offentliggjort et dokument der bebuder en ændring i fordelingen af frekvenser fra 1998 - 2005. L2 bærefrekvensen bruger  $1246 + 7/16 * n$  MHz [Performance].

I GLONASS-systemet forekommer der ikke nogen tilsigtet degradering af signalerne, der skal forringe nøjagtigheden i positionsbestemmelsen for ikke-autoriserede brugere [Misra].

### 5.2.2 PZ 90

GLONASS bruger et andet referencesystem end GPS. GPS bruger (som beskrevet i afsnit 2.6) WGS 84, og GLONASS har siden august 1993 brugt PZ 90. Ligesom WGS 84 er PZ 90 et konventionelt geocentrisk referencesystem, der kan opfattes både som et kartesisk koordinatsystem og en ellipsoide, og er beskrevet ved en række internationalt anerkendte parametre.

Koordinatsystemet har sin Z-akse i retning af nordpolen, sådan som den ved en middelværdi er beskrevet af IAU (International Astronomical Union) og IAG (International Association of Geodesy) i epoch 1900-1905. X-aksen ligger i ækvatorplanet for epoch 1900-1905, og det positive X-Z plan definerer den primære meridian i retningen parallelt med Greenwich-meridianen. Y-aksen kompletterer et retvinklet højrehånds koordinatsystem. Koordinatsystemet er realiseret ved hjælp af koordinater fra 30 stationer i området for det tidligere USSR. Koordinaterne blev afledt fra observationer af en bestemt geodætisk satellit, Geo-IK, og er rapporteret til at have en nøjagtighed på 1-2 meter.

Parametrene for ellipsoiden er de på tilblivelsestidspunktet bedst mulige, sådan som de er anbefalet af IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics). Eksempler på disse er:

- jordens vinkelhastighed
- produktet af den universelle tyngdekonstant og jordens masse
- tyngdekonstanten for atmosfæren
- lysets hastighed
- tyngdeaccelerationen ved ækvator

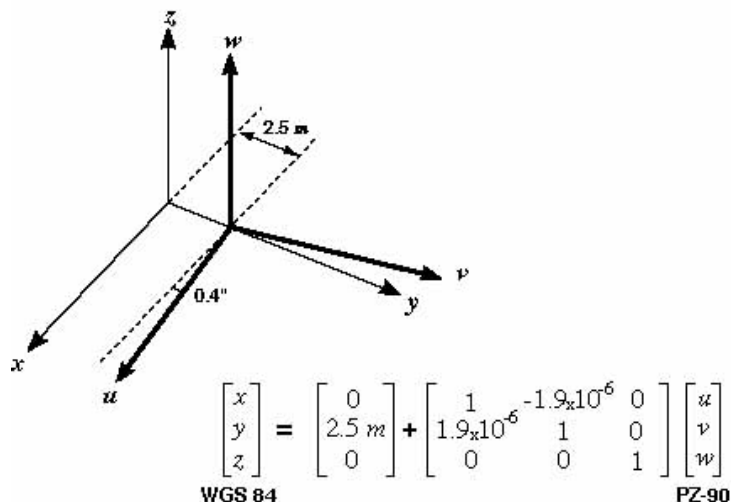
[Interope].

### **5.2.3 PZ 90 og WGS 84**

På baggrund af et begrænset antal data er forskelle mellem punkter på jorden målt i WGS 84 og PZ 90, udregnet til at være mindre end 15 meter (i gennemsnit 5 meter). De to koordinatsystemer kan ifølge disse beregninger stort set bringes til sammenfald ved en lille rotation (0,4") om Z-aksen af et af systemerne. En lille reduktion i afvigelse er endvidere konstateret ved en forskydning af origo 2,5 m i y-aksens retning.



En arbejdsgruppe i USA har med deltagelse af producenter af modtagere, repræsentanter fra forskningsinstitutioner, universiteter og regeringsorganisationer forsøgt at indkredse, hvilke problemer der er, for at man kan gennemføre en transformation mellem WGS84 og PZ90, der kan fungere globalt, og man nåede frem til at formulere at bl.a. følgende problemer skal løses:



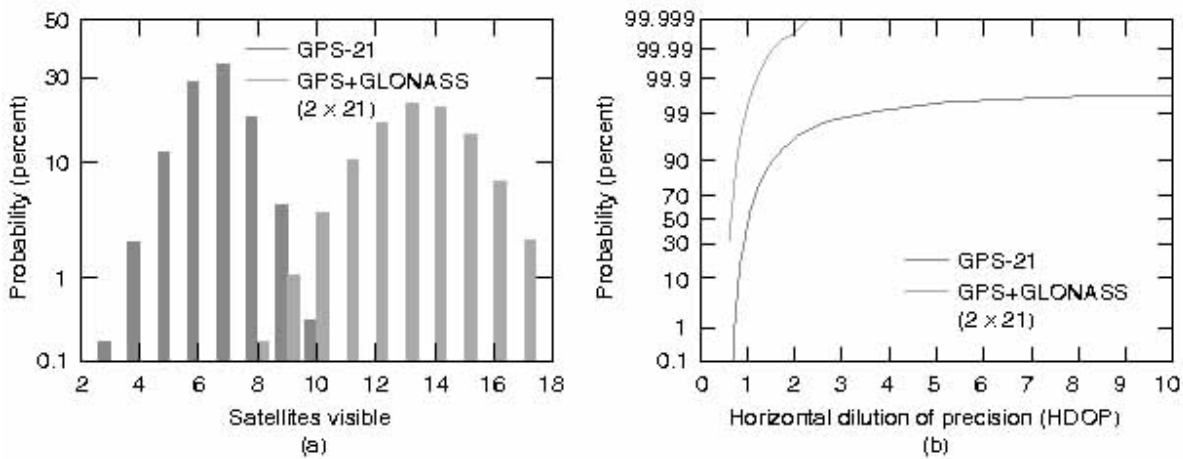
Figur 5.2: PZ-90 - WGS 84 transformation [PZ90-WGS84].

- Manglen på bærbare kvalitets-GLONASSmodtagere
  - Manglen på præcise ephemerider for GLONASS satelliterne
  - Begrænset udbud af software der kan omregne ephemeriderne fra GLONASS satelliterne til geodætiske positioner
  - Begrænset mængde data om GLONASS satelliternes positioner
  - Manglende viden om PZ 90
  - Manglen på fælles formater for udveksling af data
- [Interope].

#### 5.2.4 Tidsskala

De to systemer bruger desuden deres nationale tidsskalaer som reference. Forskellen mellem disse to tidsskalaer er velkendte. Bl. a. har The University of Leeds målt disse forskelle siden 1990. Denne forskel udgør ikke noget stort problem med hensyn til integrationen af de to systemer..[Interope].

I værste tilfælde kan problemet løses ved at ofre målingerne fra en af satelliterne til udregning af den øjeblikkelige tidsforskel, men da en GPS/GLONASS-modtager, der laver beregninger med data fra begge systemer, altid har mindst otte satelliter i sigte, i 99 % af tiden mindst 10, og halvdelen af tiden mindst 14, er der nok at tage af.



Figur 5.3: (a) viser den procentdel af brugerne, der på et tilfældigt tidspunkt ser et givet antal satellitter. En lille procentdel (0,4 %) af brugere af GPS-systemet ser færre end 4 satellitter. Med et integreret GPS+GLONASS system ville alle brugere have mindst 8 satellitter i sigte. (b) viser fordelingen af HDOP for henholdsvis GPS og GPS+GLONASS systemerne [Misra].

De russiske myndigheder overvejer endvidere at sende data om afvigelsen mellem de to scalaer som en del af det samlede navigationsbudskab [Interope].

### 5.2.5 1996

Januar 1996 blev skelsættende for GLONASS-systemet. I denne måned opnåede man for første gang at have 24 arbejdende satellitter. Siden da har systemet bevaret en konstellation med 21-22 arbejdende satellitter. Kvaliteten af positionsberegninger ved hjælp af GLONASS er således sammenlignelige med beregninger med GPS uden SA aktiveret.

Som en blåstempling af kvaliteten af systemet accepterede den internationale civile luftfartsorganisation (ICAO) i juli 1996 formelt det russiske tilbud om brug af systemet i 15 år uden brugerbetaling. Desuden har der siden 1996 været en vækst i udbuddet af kommercielle GLONASS-modtagere. Endvidere er det nu muligt at købe GPS/GLONASS-modtagere, der laver beregninger på baggrund af data fra begge systemer.

Den russiske økonomi har dog i en længere periode været ustabil. Dette har bl.a. betydet dårlig vedligeholdelse af russiske rumprojekter (f.eks. rumstationen MIR). Den russiske økonomi udgør således en fare for vedligeholdelsen af systemet.

### **5.2.6 GLONASS-M**

Tests med en ny serie satelliter, GLONASS-M, er påbegyndt i 1996. Hovedelementerne i GLONASS-M er:

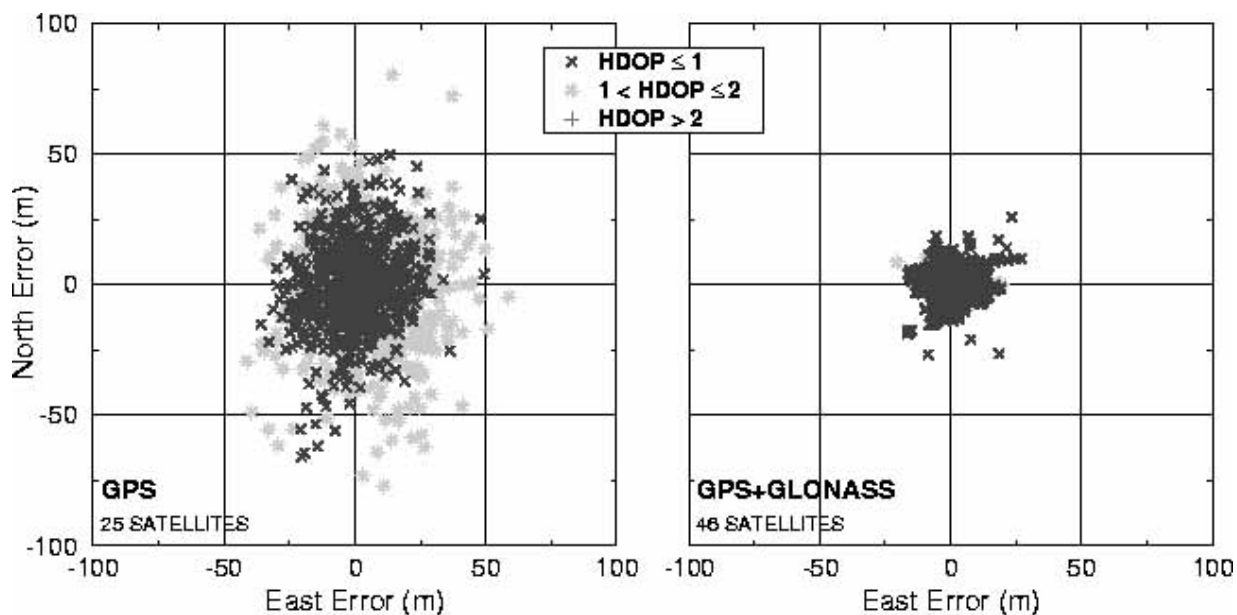
- Forbedret levetid for satellitterne: 5 år (versus 3 år nu)
- Udsendelse af C/A koden på L2-frekvenserne til civil brug
- Forbedret stabilitet af satellitturene
- Forbedring i nøjagtigheden i efemeris
- En mulighed for fra kontrolsegmentet at korrigere fejl i satellitten indenfor 10 s
- Udsendelse af data om den øjeblikkelige afvigelse fra GPS tidsskalaen
- Op til seks reservesatellitter (to i hvert kredsløb) for at mindske tiden for udskiftning af satelliter med fejl
- Reduktion af rms URE fejlen til 5 m (mod 8-10 m nu)

[Performance].

### **5.2.7 Konklusion**

Tilsyneladende er GLONASS på vej til at blive et godt alternativ til GPS systemet for civile brugere. GLONASS er ved at have en solid satellitkonstellation, der vedvarende udsender pålidelige data. Der er vækst i udbuddet af kommercielle modtagere, omend dette endnu er mangelfuldt. Den russiske regering er, hvis man skal tro de dekretter, den udsender om emnet, tilsyneladende indstillet på at stille systemet til rådighed for civile brugere uden degraderende foranstaltninger.

Den største fordel frembyder systemet dog, hvis man på tilfredsstillende vis kan integrere det med GPS systemet. For det første kan man bruge GLONASS satellitterne til at korrigere for den af SA påførte usikkerhed. For det andet giver et system, hvor en bruger altid har mindst otte satelliter i sigte, mulighed for mere nøjagtig positionsbestemmelser end hvert af systemerne alene.



Figur 5.4: Horizontal positionsfejl i positioner bestemt ved hjælp af GPS og GPS+GLONASS (1-minut samples over 24 timer)[Sept].

### 5.3 Differentiel GPS

Ideen bag DGPS (Differential GPS) er ikke ny, men har været anvendt på andre navigationssystemer i fortiden. Den bygger på den antagelse, at bestemte typer fejl, der forringer nøjagtigheden af systemet, er fælles for alle brugere inden for et bestemt område. Hvis disse fejl kan beregnes ved hjælp af en modtager på en kendt position, kan man anvende disse beregninger til at korrigere andre modtageres målinger. Under forudsætning af, at disse korrektioner anvendes et kort tidsrum efter, de er lavet, vil fejlene kunne reduceres eller eventuelt fjernes helt.

De fejl, der er indbygget i GPS-systemet, kendes normalt kun af brugeren som usikkerhed i positionsbestemmelsen. Hvis positionen er kendt kan man altså kvantificere disse fejl. DGPS er baseret på at man på kendte positioner i et område har placeret en række referencestationer, der, ved hjælp af en GPS-modtager og en computer, modtager signaler fra GPS-satellitterne og dernæst beregner den øjeblikkelige fejl, hvorefter disse data lynhurtigt udsendes i det område som referencestationens sendefaciliteter tillader.

### 5.3.1 Korrektionsteori

Givet at en satellit,  $i$ , på et bestemt tidspunkt er rapporteret til at befinde sig på positionen  $(x_i, y_i, z_i)$  og referencestationens position har koordinaterne  $(x_m, y_m, z_m)$ , så er den geometriske afstand,  $R_m^i$ , bestemt ved følgende ligning:

$$R_m^i = \sqrt{(x_i - x_m)^2 + (y_i - y_m)^2 + (z_i - z_m)^2}$$

Referencestationen laver så en pseudoafstands måling. Denne måling  $\rho_m^i$ , har denne form:

$$\rho_m^i = R_m^i + \varepsilon_{m,rum} + \varepsilon_{m,kontrol} + \varepsilon_{m,bruger} + c \cdot \delta t_m$$

hvor  $\varepsilon_{m,rum}$ ,  $\varepsilon_{m,kontrol}$  og  $\varepsilon_{m,bruger}$  er rum-, bruger- og kontrolsegmenternes fejl i pseudoafstandsmålingerne, og  $\delta t_m$  repræsenterer forskellen mellem satellitens og referencestationens måling af tiden.

Referencestationen udregner differencen mellem pseudoafstandsmålingen og den geometriske afstand:

$$\Delta \rho_m^i = \rho_m^i - R_m^i = \varepsilon_{m,rum} + \varepsilon_{m,kontrol} + \varepsilon_{m,bruger} + c \cdot \delta t_m$$

Denne korrektion sendes til brugerens modtager,  $b$ , der udregner differencen mellem denne og brugerens egen pseudoafstandsmåling til samme satellit:

$$\rho_b^i - \Delta \rho_m^i = R_b^i + \varepsilon_{b,rum} + \varepsilon_{b,kontrol} + \varepsilon_{b,bruger} + c \cdot \delta t_b - (\varepsilon_{b,rum} + \varepsilon_{b,kontrol} + \varepsilon_{b,bruger} + c \cdot \delta t_m)$$

Denne ligning bygger på den antagelse, at brugerens afvigelse i pseudo afstandsmålingen er lig med referencestationens. Dette vil ofte være tilfældet, hvis man ser bort fra multipathing og modtagerstøj. Den korrigerede pseudoafstand kan udtrykkes som:

$$\rho_{b,korr.}^i = R_b^i + \varepsilon_b' + c \cdot \delta t_{kombineret}$$

hvor  $\varepsilon'_b$  er fejlen i brugersegmentet (multipathing etc.) og  $\delta t_{\text{kombineret}}$  er den kombinerede afvigelse i tidsangivelsen.

I cartesiske koordinater ser det således ud:

$$\rho_{b,\text{korr.}}^i = \sqrt{(x_i - x_b)^2 + (y_i - y_b)^2 + (z_i - z_b)^2} + \varepsilon'_b + c \cdot \delta t_{\text{kombineret}}$$

Ved at lave pseudoafstands målinger til fire eller flere satelliter kan brugeren beregne en position ved hjælp af den teknik, der er beskrevet i afsnittet om GPS-systemets virkemåde.

For at disse beregninger kan være korrekte er det selvfølgelig nødvendigt, at referencestationens position er bestemt i samme referencesystem, som satellitterne anvender. Endvidere er det, hvis korrektionerne skal være anvendelige, nødvendigt, at modtageren modtager dataene så hurtigt som muligt, idet nøjagtigheden af disse aftager som en funktion af tiden.

### 5.3.2 Fejlkilder

DGPS fejlbudget under "selective availability":

Segment	Fejlkilde	GPS Fejl SA ( $\sigma$ )/m	LADGPS ( $\sigma$ )/m
Rum	Satellit	3,0	0
	Forstyrrelser	1,0	0
	SA	32,3	0
	Andre (f.eks. varmemstråling)	0,5	0
Kontrol	Forudsigelse i efemeris	4,2	0
	Andre	0,9	0
Bruger	Ionosfæriske forsinkelse	5,0	0
	Troposfæriske forsinkelse	1,5	0
	Støj i og kvalitet af modtager	1,5	2,1
	Reflekterede signaler	2,5	2,5
	Andre	0,5	0,5
Total URE		<b>33,3</b>	<b>3,3</b>

Figur 5.5: Fejlkilder ved SPS og Local-Area DGPS (op til 400 km) [Kaplan, s. 325].

Ovenstående tabel giver et indtryk af størrelsen af fejl i beregningen af afstanden til en satellit.

Fejlen påført af “selective availability” findes i sin nuværende udformning i rumsegmentet, og er begrænset til urkomponenten og ephemerisfejlen. Denne påførte fejl varierer, og er ikke altid identisk med den i tabellen anførte.

Man vil lægge mærke til at DGPS fuldstændigt eliminerer fejlene i rumsegmentet. Hvad angår usikkerheden forårsaget af ionosfæriske og troposfæriske forstyrrelser, vil disse reduceres kraftigt. Denne reduktion kan variere lidt, specielt hvad angår troposfæriske forstyrrelser. Der er ved DGPS en svag forøgelse i mængden af modtagerstøj, da støjen når den blandes fra to modtagere bliver større.

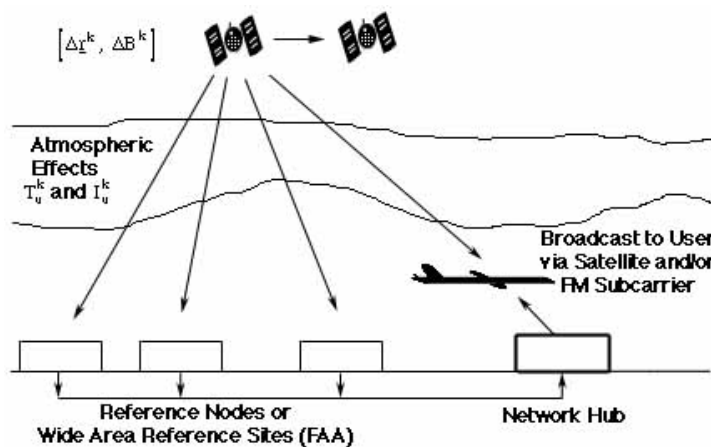
### 5.3.3 Wide-Area DGPS

En forbedring af DGPS er under udvikling, og er blevet kendt som WIDE-AREA DGPS. Denne metode bygger på det faktum, at der kunne kompenseres for mange afvigelse, hvis man har modeller, der bygger på data fra en række stationer, der er forbundet i et netværk, spredt ud over et stort område . Den geografiske adskillelse af disse stationer vil bevirke at afvigelser

i satelliternes kredsløb og ionosfæriske og troposfæriske forstyrrelser vil kunne identificeres empirisk.

Ved at opbygge denne information, og udsende den sammen med de øvrige data, vil man kunne kompensere yderligere for disse

fejkilder. I teorien vil fem referencestationer placeret de rigtige steder være nok til at forsyne Europa med de nødvendige data for hele området. Datamængden fra disse stationer vil ikke være meget større end den fra en konventionel referencestation, men den vil have en indbygget integritet ved at være baseret på flere stationer. Et sådant system vil gøre mere effektivt brug af båndbredden, hvilket er vigtigt i et system, hvor dataoverførselskapaciteten pr. tidsenhed er en betydende faktor.



Figur 5.6: WA-DGPS

### **5.3.4 Pseudolitter**

Udviklingen af pseudolitter er et andet interessant tiltag, i forbindelse med udviklingen af DGPS-teknologien. Termen pseudolit refererer til brugen af jordbaserede sendere, der udsender nøjagtig samme signal karakteristiker som GPS-satteliterne. Disse vil kunne virke som en udvidelse af GPS-systemet, og vil f. eks. være meget anvendelige ved navigation i luften. De vil endvidere kunne virke som DGPS-referencestationer, hvorfor korrektioner af fejl vil kunne indbygges i de GPS-lignende signaler. Så vidt vi ved virker denne del af GPS/DGPS-teknologien endnu kun på eksperimentiel basis.

### **5.3.5 Konklusion**

De steder på Jorden, hvor DGPS er tilgængeligt, har det sin store fordel i, at præcisionen er langt større end ved GPS og GPS/GLONASS. DGPS er endnu ikke et globalt alternativ system, og er derfor ikke et reelt alternativ til GPS, men på længere sigt er der ingen tvivl om, at kombinerede jord- og rumbaserede positioneringssystemer vil give den mest nøjagtige positionsbestemmelse, og med den begyndende implementering af wide-area DGPS, er de første skridt mod etableringen af et sådant system taget.



## 6. Konklusion

### 6.1 Nøjagtigheden

Ud fra de opsamlede data bestemte vi standardafvigelsen ved Standard Positioning Service til 48.215 m for 95% ( $2\sigma$ ) af målingerne. Dette er mindre end tabelværdien for denne, nemlig 66,6 m ( $2\sigma$ ), vel at mærke under Selective Availability. Den pæne værdi kan forklares med modtagerens anvendelse af Kalmanfilteret.

Det er rimeligt at konkludere, at SA på nuværende tidspunkt effektueres. Uden SA vil SPS have en standardafvigelse ( $2\sigma$ ) på 16,0 m, og denne afviger stort fra vores målte.

### 6.2 Forbedringer

En fremtidig fjernelse af SA er blevet vedtaget og en forbedring af GPS systemet er således forestående. Fjernelsen af SA og indførslen af den ekstra frekvens, L5, vil give den ønskede forbedring af systemet. Det vil tage en del år på grund af., at det amerikanske militær først skal udvikle militære sikkerhedsforanstaltninger.

Ind til den fulde udnyttelse af GPS bliver opnået, bliver brugere, som kræver bedre nøjagtigheder end GPS er i stand til at give med SA, nød til at bruge andre systemer, som er i stand til at omgå SA. Differential GPS og en kombinationen af GPS og GLONASS er således gode fremtidige alternativer.

Med eller uden SA vil DGPS, i hvert fald lokalt, medføre overordentlig høj nøjagtighed - 6,6 m ( $2\sigma$ ) mod eksempelvis PPS' 13,2 m ( $2\sigma$ ).

## 7. Perspektivering

Vi vil afslutte denne rapport med at overveje, hvilke forudsætninger der skal opfyldes for, at det bliver muligt at fjerne den hindring som SA-politikken udgør i forhold til de anvendelsesmuligheder, som GPS-systemet rummer, og vi vil med baggrund i den viden, vi har tilegnet os gennem projektet, gøre os nogle tanker om, hvilke tiltag der kan forbedre systemet.

### 7.1 Viden

Vil man fjerne den hindring som SA-politikken udgør, er manglen på viden ikke noget problem. Det er alment kendt hvordan man kan korrigere for de fejl SA påfører systemet, sådan som SA praktiseres nu. Denne viden kan imidlertid ikke løse problemet.

En af de måder man kan forbedre systemet på, er ved at integrere det med GLONASS. For at denne integration kan lykkes kræves der som nævnt i afsnittet om GLONASS en del viden om GLONASS-systemet. Specielt kræver det en større viden om referencesystemet PZ 90, og der er behov for flere præcise data om GLONASS' satellitkonstellation (efemeris).

### 7.2 Organisation

Vil man forøge anvendeligheden af GPS-systemet for civile brugere må man fjerne SA. Vil man fjerne SA eller lignende foranstaltninger, skal der skabes så fredelige tilstande på jorden, både militært og civilt (økonomisk), at sådanne foranstaltninger overflødiggøres. Vi vil ikke forholde os til om denne løsning er realistisk, men blot konstatere, at så længe sådanne fredelige tilstande ikke er gældende, vil der eksistere en modsætning mellem autoriserede og uautoriserede brugere. Et positioneringssystem må, hvis det skal kunne udnyttes fuldt ud, have integritet, men tiltag som SA rammer netop systemet på dette ømme punkt.

### 7.3 Teknik

Teknisk set er der flere muligheder for at forbedre SA-systemet. Vi har især bemærket hvordan et kombineret jord- og rumbaseret positioneringssystem vil bevirke en effektiv forbedring af GPS. Med et sådant globalt system baseret på teknikker som WIDE-AREA-DGPS og

pseudolitter vil det være mulig at bestemme sin position et hvilket som helst sted på jorden med med meget stor nøjagtighed.

## **7.4 Produkt**

GPS-systemet blev først og fremmest udviklet til militært brug. For at retfærdiggøre brugen af de enorme summer, som udviklingen af et sådant system kræver, måtte man, muligvis nødtvungent, åbne op for civilt brug af systemet. Dette har givet civile brugere det bedste globale positioneringssystem, verden endnu har set. Men det har samtidig givet de civile brugere smag for mere, og der er ingen tvivl om, at samtidig med at man finder stadig flere anvendelsesmuligheder for GPS-systemet, vil man også opleve en stadigt stigende efterspørgsel efter et globalt positioneringssystem med en høj grad af integritet, der til enhver tid tilbyder de bedst mulige positionsbestemmelser til en vifte af civile brugere.

## 8. Litteraturliste

Litteraturlisten er sorteret i alfabetisk rækkefølge efter forkortelserne.

- **Borre:** Kai Borre, "GPS i landmålingen", udgivet 1995.
- **Bøgh:** J. U. Bøgh, A. Nordseth og J. Wittrup, "Navigation III", 2. udgave udgivet 1993 af Iver C. Weilbach & Co. A/S.
- **Jensen:** Klaus Støttrup Jensen, "Dynamisk måling ved brug af GPS og Kalmanfiltrering - Bilag", udgivet 1994.
- **Kanplan:** Elliot D. Kaplan, "Understanding GPS - Principles and applications", udgivet 1996 af Artech House.
- **Lehman:** J. L. Hodges, Jr. og E. L. Lehmann, "Grundbegreber i sandsynlighedsregning og statistik", udgivet 1975 af Nyt Nordisk Forlag.
- **Logsdon:** Tom Logsdon, "Understanding the NAVSTAR GPS, GIS, and IVHS", 2. udgave udgivet 1995 af Van Nostrand Reinhold.
- **Logsdon2:** Tom Logsdon, "The NAVSTAR Global Positioning System", udgivet 1992 af Van Nostrand Reinhold.
- **Lorimer:** Neil Ackroyd & Robert Lorimer, "Global Navigation - A GPS user's guide", 2. udgave udgivet 1994 af Lloyds of London Press, ltd.
- **Toft:** Hans Toft, "Satellit Navigation - Nye perspektiver for nøjagtig navigation", udgivet 1987 af Shipmate.
- **TP7:** Stephen K. O'Brien & Steve Nameroff "Turbo Pascal 7: The Complete Reference", udgivet 1993 af Osborne McGraw-Hill.

## 9. Kildeliste

Kilderne er sorteret i alfabetisk rækkefølge efter forkortelserne.

- **Beadles:** [http://galaxy.einet.net:8000/editors/john-4beadles/sum\\_his.htm](http://galaxy.einet.net:8000/editors/john-4beadles/sum_his.htm)
- **Dana:** <http://wwwhost.cc.utexas.edu/ftp/pub/grg/gcraft/notes/gps/gps.html>
- **DoT:** <http://www.dot.gov/affairs/dot2197.htm>
- **Factsheet:** <http://www.whitehouse.gov/WH/EOP/OSTP/html/gps-factsheet.html>
- **FOSSIL:** Rick Moore "Fundamentals of FOSSIL implementation and use", Version 5, February 11, 1988, Solar Wind Computing.
- **Interope:** <http://www.ion.org/workgroupmin.html>
- **Lroc:** <http://www.localnet.com.au/~lroc/gps.htm>
- **Misra:** <http://satnav.atc.ll.mit.edu/papers/LLjournal/Misra.html>
- **MR:** <http://www.rand.org/publications/MR/MR614>
- **Nav:** <http://www.fas.org/spp/military/program/nav/tf-rtp.htm>
- **Navsys:** <http://www.navsys.com/gps.htm>
- **NMEA:** "STANDARD FOR INTERFACING MARINE ELECTRONIC DEVICES - NMEA 0183 Version 2.00".
- **PDD:** <http://www.trimble.com/home/pdd.htm>
- **Performance:** <http://satnav.atc.ll.mit.edu/papers/GLO-96/glonass-96.html>
- **Policy:** <http://www.redsword.com/GPS/apps/general/policy.htm>
- **PRD3:** <http://www.whitehouse.gov/WH/EOP/OSTP/NSTC/html/PRD3.html>
- **PZ90-WGS84:** <http://www.satnav.atc.ll.mit.edu/papers/PZ90-WGS84.html>
- **Sept:** <http://www.satnav.atc.ll.mit.edu/papers/timesept97/sept97tim.html>
- **SHIPM:** "SHIPMATE GPS Navigator RS5800/C", Brugervejledning udgivet af SHIPMATE.
- **Spacenet:** <http://www.spacer.com/spacenet/text/gps-a.html>