

RTK-tjenester i Danmark

- en anvendelsesorienteret undersøgelse

Line Andkjær

Henrik Plenge Jensen

Martin Møller Sørensen

**Afgangprojekt 2004
Landinspektøruddannelsen
Aalborg Universitet**

Titel	RTK-tjenester i Danmark - en anvendelsesorienteret undersøgelse
Projektperiode	1. februar 2004 - 10. juni 2004
Gruppemedlemmer	Line Andkjær Henrik Plenge Jensen Martin Møller Sørensen
Hovedvejleder	Peter Cederholm
Bivejleder	Karsten Jensen
Sideantal	138, samt 47 i bilag og appendiks
Appendiks	1 stk.
Bilagsantal	10 stk., herunder er vedlagt en CD
Forsideillustration	Udsigt fra postament ved Barløse på Vestfyn
Oplagstal	9 stk.

Projektet må citeres med tydelig kildeangivelse

Synopsis

Dette afgangsprøjsjekt tager udgangspunkt i brugen af RTK-tjenester. Gennem kontakt til privat praktiserende landinspektører samt udbydere af de to RTK-tjenester i Danmark belyses, hvorledes disse anvendes. Gennem interviewene fremkommer desuden tvivl samt uafklarede forhold omkring brugen af RTK-tjenesterne.

På baggrund af de gennemførte interview opstilles en række test, som skal forsøge at klarlægge noget af denne tvivl og nogle af de uafklarede forhold. Testene spænder vidt, men de omhandler overordnet absolut nøjagtighed, præcision, nabonøjagtighed mellem to punkter samt initialiseringstid ved RTK-tjenesterne. Endvidere undersøges det, om afstanden til referencestationen har indflydelse på disse fire forhold.

Efterfølgende analyseres, i hvor høj grad der er korrelation mellem GPS-målinger. Endvidere testes, om nøjagtigheden af RTK-tjenesterne afhænger af det anvendte GPS-udstyr. Omregnings- og transformationsrutiner i GPS-udstyret kontrolleres, og endelig undersøges, om måden en afsætning foregår på, har indflydelse på nøjagtigheden.

Slutteligt samles der i konklusionen op på de behandlede emner, og i en perspektivering reflekteres der over fremtidsudsigterne for satellitbaserede navigationssystemer.

Abstract

This master thesis is based on the use of RTK-services. Through interviews with chartered surveyors and the providers of the two RTK-services in Denmark it is elucidated how the RTK-services are used today. Furthermore the interviews contribute with doubts and unclear aspects about the use of the RTK-services.

Based on these interviews a list of tests is made. The meaning of these tests is to clarify some of the doubts and unclear aspects. The tests are wide-ranging, but overall they concern absolute accuracy, precision, accuracy between two points and initialization times for the RTK-services. Furthermore it is tested whether the distance to the reference station has an influence on these four aspects.

Afterwards the correlation between GPS-measurements is analysed. It is also tested whether the accuracy of the RTK-services depend on the equipment. Then the conversion and transformation routines in the GPS-equipment are checked. Finally it is tested whether four different ways of carrying out a stake out has an impact on the accuracy.

Finally in this master thesis a conclusion gather the results of the report. Furthermore the future of navigation systems based on satellites is put into perspective.

Aalborg Universitet

Institut for samfundsudvikling og planlægning
Landinspektøruddannelsen
Fibigerstræde 11
9220 Aalborg Øst

Forord

Dette afgangprojekt er udarbejdet på landinspektøruddannelsens 10. semester på Aalborg Universitet. Temaet for afgangprojektet er Geoinformatik. Der er herunder valgt at foretage en anvendelsesorienteret undersøgelse af RTK-tjenesterne i Danmark. Rapporten henvender sig primært til vejledere og censorer, men den kan læses af alle med interesse for opmåling og afsætning med RTK-tjenesterne.

Projektgruppen vil gerne takke Mads Møller Madsen, Landinspektørgruppen, Mads Hvolby og Bent Jeppesen, Nelleman & Bjørnkjær, Søren Ellegaard og Henrik Lennartz-Johansen, Trimble Center Danmark, Niels Henrik Vad, Vejdirektoratet, Kurt Mølsted Madsen, Ole Eiersted og Sigvard Stampe Villadsen, KMS samt Brian Hansen, Leica Geosystems A/S. I løbet af afgangprojektet har ovenstående personer bidraget med oplysninger samt besvarelse af spørgsmål. Yderligere vil projektgruppen gerne takke Nellemann & Bjørnkjær for at have stillet en Trimble 5800 GPS-modtager til rådighed for projektgruppen.

Figurer er nummereret fortløbende i hvert kapitel, og kildehenvisninger til bøger og rapporter er angivet som [Efternavn, udgivelsesår, side]. Henvisninger til web-adresser er angivet ved adressen. Kildehenvisninger refererer til foranstående sætning ved placering før det afsluttende punktum. Der refereres til det foregående afsnit, hvis kildehenvisningen er placeret umiddelbart efter det afsluttende punktum. Kildehenvisninger på selvstændig linie refererer til afsnittende under overskriften. Bagerst i rapporten findes appendiks samt bilag. Henvisninger hertil sker ved at angive appendiks eller bilagsnummer. Endelig gøres der opmærksom på, at bilag 10 er en CD, hvorpå udvalgt litteratur og data kan findes.

Topografiske kort er gengivet i overensstemmelse med Aalborg Universitets aftale med KMS om copyright på topografiske kort: G24-98.

Aalborg, juni 2004

Line Andkjær

Henrik Plenge Jensen

Martin Møller Sørensen

Indholdsfortegnelse

1	Indledning	1
1.1	Global Positioning System	1
1.2	Landsdækkende RTK-tjenester	2
1.3	Initierende problemstilling.....	3
2	Projektbygning	5
2.1	Projektets hovedelementer.....	5
2.2	Projektbygning	6
2.3	Vidensindsamling	8
3	Real-Time Kinematic	9
3.1	Grundlæggende GPS	9
3.1.1	Overordnede former for GPS-måling.....	10
3.1.2	Fejlkilder ved GPS-måling	11
3.1.3	GPS-måling på fasen	12
3.2	RTK-målemetoder.....	15
3.2.1	Grundlæggende RTK.....	15
3.2.2	Traditionel RTK	15
3.2.3	Enkeltstations-RTK.....	16
3.2.4	Netværks-RTK	17
3.3	RTK-tjenester	20
3.3.1	RTK-tjenester i verden.....	20
3.3.2	GPS-Referencen.....	22
3.3.3	GPSnet.....	24
4	Referencesystemer	27
4.1	Grundlæggende begreber	27
4.2	Eksisterende referencesystemer	28
4.2.1	System 34	28
4.2.2	UTM/ED50.....	29
4.2.3	Dansk Normal Nul	31
4.3	Fremtidige referencesystemer	32
4.3.1	To nye kortprojektioner	32
4.3.2	Dansk Vertikal Reference 1990.....	34
4.3.3	3D-fikspunktsnet.....	35
4.3.4	Tilpasning af geoide til DVR90	36
4.3.5	Ny forbedret transformation til/fra nye og gamle systemer.....	36
5	Interview	37
5.1	Interviewafgrænsning.....	37
5.2	Interviewmetode.....	38
5.3	Resultater af interview.....	38
5.3.1	GPSnet.....	39

5.3.2	GPS-Referencen.....	40
5.3.3	Egen reference	40
5.3.4	Kontrolmåling	41
6	Problemformulering	43
6.1	Opsamling på den indledende analyse	43
6.1.1	Opgavetyper.....	44
6.1.2	Problemstillinger	44
6.2	Afgrænsning	45
6.3	Problemformulering	46
6.3.1	Uddybende spørgsmål.....	46
6.3.2	Definitioner	47
7	Præsentation af test	49
7.1	Tidligere test af RTK-tjenesterne	49
7.1.1	Test udført af KMS	49
7.1.2	Afgangsprojekt 2001	53
7.1.3	8. semesterprojekt 2001	54
7.2	Formulering af test.....	54
7.2.1	Test udledt af spørgsmål A.....	54
7.2.2	Test udledt af spørgsmål B.....	55
7.2.3	Test udledt af spørgsmål C.....	55
7.2.4	Test udledt af spørgsmål D	55
7.2.5	Test udledt af spørgsmål E.....	55
7.2.6	Oversigt over planlagte test	55
8	Rammer for test	57
8.1	Opdeling af testene	57
8.1.1	Regionalt testområde	57
8.1.2	Lokalt testområde	58
8.2	Udstyr samt software.....	58
8.2.1	Modtager	58
8.2.2	Terminal.....	59
8.2.3	Modem	59
8.2.4	Antenne	59
8.2.5	Konfigurationer	59
8.2.6	Verifikation af udstyr	60
8.2.7	Opstilling af GPS-antenne	60
8.2.8	Software	61
8.3	Pålidelighed af testene.....	61
8.4	Dokumentation af testene.....	62
9	Regional test.....	63
9.1	Planlægning af testfelt.....	63
9.1.1	Valg af koordinatsystem	63
9.1.2	Planlægning af testfelt	64

9.1.3	Opmåling af testfelt	67
9.2	Test 1 - Absolut nøjagtighed.....	68
9.2.1	Teori	68
9.2.2	Udførelse	70
9.2.3	Databearbejdning	72
9.2.4	Vurdering	79
9.3	Test 2 - Præcision.....	80
9.3.1	Teori	80
9.3.2	Udførelse	81
9.3.3	Databearbejdning	81
9.3.4	Vurdering	84
9.4	Test 3 - Nabonøjagtighed.....	84
9.4.1	Teori	85
9.4.2	Udførelse	87
9.4.3	Databearbejdning	88
9.4.4	Vurdering	91
9.5	Test 4 - Initialiseringstid.....	91
9.5.1	Teori	91
9.5.2	Udførelse	92
9.5.3	Databearbejdning	92
9.5.4	Vurdering	93
9.6	Sammenfatning på regional test.....	94
10	Lokal test.....	97
10.1	Planlægning af testfelt.....	97
10.2	Test 5 - Korrelation.....	98
10.2.1	Teori	98
10.2.2	Udførelse.....	99
10.2.3	Databearbejdning	100
10.2.4	Vurdering	100
10.3	Test 6 - Udstyrsafhængighed.....	101
10.3.1	Teori	101
10.3.2	Udførelse.....	101
10.3.3	Databearbejdning	103
10.3.4	Vurdering	104
10.4	Test 7 - Omregning og transformation	105
10.4.1	Omregning til System 34	105
10.4.2	Transformation.....	109
10.5	Test 8 - Afsætning.....	112
10.5.1	Teori	112
10.5.2	Udførelse.....	113
10.5.3	Databearbejdning	117
10.5.4	Vurdering	119
11	Praktiske erfaringer	121
11.1	Opmåling i marken.....	121

11.1.1 Brug af RTK-tjenesterne	121
11.1.2 Erfaringer med GPS-udstyr	122
11.1.3 Konfigurationer	122
11.2 Generelle erfaringer.....	123
11.2.1 GPS-Referencens hjemmeside.....	123
11.2.2 Erfaringer med SKI-Pro.....	123
11.2.3 Erfaringer med brug af 10-km nettet	124
12 Konklusion	125
12.1 Besvarelse af spørgsmål	126
12.1.1 Spørgsmål A	126
12.1.2 Spørgsmål B	128
12.1.3 Spørgsmål C	129
12.1.4 Spørgsmål D.....	129
12.1.5 Spørgsmål E	130
12.2 Afsluttende bemærkninger	130
13 Perspektivering.....	131
Litteraturliste	135

Appendiks

A: Real-Time Kinematic

Bilag

- 1: Interview ved Nellemann & Bjørnkjær
- 2: Interview ved Landinspektørgruppen
- 3: Interview ved Trimble Center Danmark
- 4: Punktnummerstrategi
- 5: Observationsark
- 6: Input- og outputfil til KmsTrans
- 7: R95-værdier for nøjagtighed og præcision
- 8: Matlab-scripter
- 9: Konfidensintervaller for nabonøjagtighed
- 10: Projekt CD

1

Indledning

1.1 Global Positioning System

Det verdensomspændende system til stedbestemmelse ved hjælp af satellitter Global Positioning System, herefter kaldet GPS, har nu været fuldt operationelt i godt 10 år. Systemet er udviklet og drives af det amerikanske forsvarsministerium. Systemet benytter knap 30 satellitter til at udsende signaler, som anvendes til stedbestemmelse. Med det rette udstyr gør GPS-systemet det muligt at bestemme positioner ned til blandt andet centimeterniveau.

Siden GPS-systemet blev erklæret fuldt operationelt i 1993, er flere og flere faggrupper med behov for nøjagtig stedbestemmelse begyndt at anvende systemet. Prisen på GPS-modtagere, der er en forudsætning for at anvende

GPS-systemet, er også faldet. For landinspektørfaget har dette betydet, at hovedparten af de praktiserende landinspektører i dag er i besiddelse af en GPS-modtager. Måling med GPS er interessant for landinspektører, da det som nævnt er muligt at bestemme en position på centimeterniveau. Denne nøjagtighed har gjort GPS til et anvendeligt instrument indenfor landmålingsbranchen.

For blot få år siden var udbredelsen og anvendelsen af GPS-modtagere begrænset blandt privat praktiserende landinspektører. I et afgangprojekt fra landinspektørstudiet i 1998 blev der gennemført en landsdækkende undersøgelse blandt de privat praktiserende landinspektører vedrørende besiddelse og brug

af GPS-udstyr. I undersøgelsen, som foregik ved hjælp af telefoninterview, indgik 123 landinspektørfirmaer. Undersøgelsen viste, at 28 % af landinspektørfirmaerne var i besiddelse af GPS-modtagere. Nogle af disse firmaer havde indgået samarbejdsaftaler, hvor de skiftedes til at benytte GPS-udstyret. Andre firmaer lejede udstyr, når de skulle foretage opmåling med GPS. Denne gruppe udgjorde 26 %. Endelig var der 46 %, som ikke havde eller brugte GPS. En afgørende faktor for disse firmaer var, at det ikke kunne betale sig at investere i GPS-udstyr, eller at de ikke havde opgavetyper, hvor GPS med fordel kunne anvendes. [Christiansen, 1998, s. 7-9]

Ud af de 34 firmaer, der var i besiddelse af GPS-udstyr, var der 10 firmaer, som kun havde udstyr til statisk måling. De resterende 24 firmaer havde GPS-udstyr, der også kunne måle Real-Time Kinematic, herefter kaldet RTK.

I midten af 1990'erne var anskaffelse af udstyr til GPS-måling en bekostelig affære. For at være i stand til at måle med nøjagtigheder ned til minimum centimeterniveau har det været nødvendigt med investering i to GPS-modtagere. GPS-modtagerne skal være fase-modtagere, hvilket vil sige, at de kan måle direkte på bærebølgerne, som GPS-satellitterne udsender. Dette gør dem blot endnu dyrere. Ved at måle differentielt mellem de to modtagere kan væsentlige fejlbidrag, som signaler fra satellitterne bliver påvirket af på deres vej mod jorden, minimeres, og en position med centimeter nøjagtighed kan opnås. To dobbeltfrekvente GPS-modtagere til landmåling, der er i stand til at måle på begge bærebølger, kostede i 1995 op mod 600.000 kr. Dette betød selvsagt, at det kun var firmaer med stort behov for GPS-måling, der investerede i modtagerne. [Hvolby, den 06.02.2004]

Der findes forskellige målemetoder i forbin-

delse med GPS-systemet. Når der måles på fasen tales normalt om enten statisk måling eller RTK. Begge metoder kræver minimum to GPS-modtagere, hvor den ene fungerer som reference og opstilles i et egnet punkt, mens den anden er rover og flyttes rundt til de punkter, der skal indmåles. En af de grundlæggende forskelle mellem de to målemetoder er, at ved statisk måling kan koordinaterne først bestemmes ved efterprocessering på kontoret, mens RTK leverer koordinaterne direkte i marken. RTK-målemetoden indebærer, at der anvendes et radiolink mellem reference og rover, så informationer fra referencen løbende kan overføres til roveren, som derefter kan bestemme en præcis koordinat til det målte punkt. Ved begge målemetoder er det nødvendigt først at stille en reference op i et punkt, hvor der er frit udsyn til himlen. Først herefter kan selve opmålingen med roveren påbegyndes.

RTK-målemetoden er den mest benyttede metode og kan levere nøjagtigheder på centimeterniveau. Metoden er oplagt i forbindelse med matrikulære sager. Hvis der er behov for nøjagtigheder under centimeterniveau, skal statisk måling anvendes. Det er i dag imidlertid sjældent, at landinspektører har behov for sådanne nøjagtigheder. Kun i meget få sager af teknisk karakter eller ved etablering af fikspunkter er der behov for sådanne nøjagtigheder, og i øvrigt er det efterhånden sjældent, at nye fikspunkter etableres i forbindelse med matrikulære sager. Dette skyldes blandt andet, at det nu er muligt at foretage fikspunktstilknytning med GPS, og behovet for fikspunkter i nærområdet er derfor ved at forsvinde.

1.2 Landsdækkende RTK-tjenester

I 2001 lanceredes to landsdækkende RTK-tjenester; GPS-Referencen og GPSnet. Disse to systemer består af et antal faste

referencestationer, som kan kontaktes via et mobilmodem. Yderligere er det muligt at kontakte GPS-Referencens referencestationer via et radiolink. RTK-tjenesterne betyder, at det nu kun er nødvendigt for de privat praktiserende landinspektører at investere i en enkelt GPS-modtager, der fungerer som rover. Imens er priserne på GPS-modtagere faldet, så det bliver en udgift i størrelsesordenen 150.000 kr. for anskaffelse af udstyr til GPS-måling. Dette betyder, at flere landinspektører har fået råd til en GPS-modtager.

I begyndelsen af 2004 er hovedparten af de privat praktiserende landinspektører i besiddelse af GPS-modtagere. Der er ikke gennemført undersøgelser på området, men Trimble Center Danmark og Leica Geosystems A/S, som er de to største distributører af GPS-udstyr til landmåling i Danmark, vurderer, at ca. 2/3 af landinspektørfirmaerne har GPS. Endvidere anvender landinspektørerne GPS i stadig større omfang. De typiske opmålingsopgaver, hvor GPS benyttes, er i forbindelse med systemtilknytning ved matrikulære sager. Her er RTK-målemetoden glimrende, da metoden leverer en koordinat direkte i marken, hvorved efterprocessering på kontoret ikke er

nødvendigt. I marken slipper landinspektøren for at foretage de lange træk med totalstation ud til eksisterende fikspunkter. Nu kan landinspektøren blot indmåle totalstationens opstillingspunkter med GPS og derefter måle to eller flere fikspunkter med GPS. Figur 1.1 illustrerer en sådan situation. En anden mulighed er at lave en fri opstilling, hvorfra der måles til hjælp punkter, som er indmålt med GPS. Derefter er systemtilknytningen af den matrikulære måling på plads.

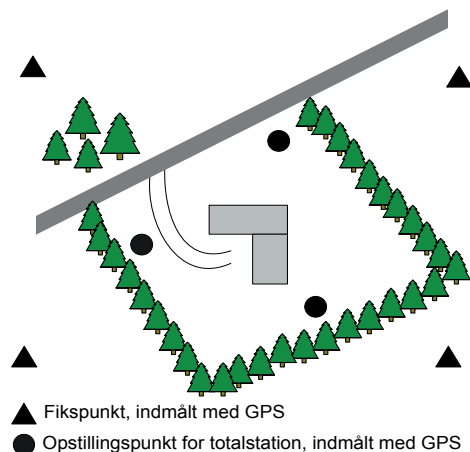
I større matrikulære sager, som for eksempel landbrugssager, er brugen af GPS også en klar fordel. Ofte er udsynet til himlen god, og de store afstande gør GPS-måling oplagt. Et typisk krav til nøjagtigheden i denne type sager er ca. 5 cm, hvilket sagtens kan overholdes ved brug af RTK-tjenesterne.

GPS bruges også i forbindelse med afsætningsopgaver. RTK-målemetoden kan anvendes til afsætning, da der som tidligere nævnt leveres en koordinat i sand tid. Afsætning med RTK anvendes i forbindelse med afsætningsopgaver, hvor en nøjagtighed på 2-5 cm er tilstrækkelig.

Afsætning med RTK anvendes imidlertid i begrænset omfang i forhold til opmåling. En af grundene til dette kan være, at brugerne ikke føler sig helt sikre på kvaliteten af de afsatte punkter. Det kan også skyldes, at afsætning ikke er så let med en 2 meter høj antenne.

1.3 Initierende problemstilling

I lyset af, at flere og flere privat praktiserende landinspektørfirmaer har anskaffet sig GPS-modtagere, synes det interessant at undersøge, i hvilket omfang RTK-målemetoden og især RTK-tjenesterne anvendes til opmåling og afsætning. Derudover er det spændende at se på, hvilke problemer der opstår i forbindelse



Figur 1.1: Systemtilknytning ved brug af GPS.

hermed. Det initierende problem lyder derfor således:

„I hvilket omfang anvendes RTK-målemetoden og især RTK-tjenesterne, samt hvilke problemer er der i forbindelse hermed?“

Fokus rettes i den forbindelse specielt imod afsætning, idet brugen af RTK til denne type opgaver stadig er begrænset. RTK-måling er ellers

oplagt i forbindelse med afsætning på grund af den øjeblikkelige positionsbestemmelse i marken. I undersøgelsen fokuseres både på brugen af RTK-tjenesterne samt egen referencestation i forbindelse med afsætning.

Før at besvare det initierende problem gennemføres en indledende analyse. Før denne er der udarbejdet et kapitel, som beskriver den anvendte metode for afgangprojektet.

2

Projektopbygning

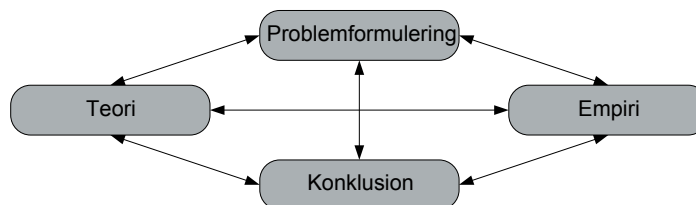
Forud for besvarelsen af det initierende problem redegøres der i dette kapitel for den videnskabelige arbejdsmetode, som anvendes i dette projekt. Kapitlet har til formål at formidle det metodiske grundlag, der er anvendt. Yderligere præsenteres den overordnede projektstruktur. Endelig beskrives vidensindsamlingen i forbindelse med projektet.

2.1 Projektets hovedelementer

I det problemorienterede projektarbejde er det problemløsning, der er fokus på. Da ikke alle problemer kan løses på samme måde, er det selve problemet bag et projekt - altså problemformuleringen, der bliver af afgørende betydning for, hvilke elementer der skal inddrages i et projekt. Det er ikke muligt at sige nøjagtigt

hvilke elementer, der konkret bør indgå i projektarbejdet, men det er dog muligt at pege på fire hovedelementer, der bør indgå. Disse fire hovedelementer er illustreret på figur 2.1. Sammenhængene mellem hovedelementerne er illustreret ved hjælp af pile, som henviser til forskellige former for analyser, der foretages i projektarbejdet for at knytte hovedelementerne sammen. Rækkefølgen af elementerne vil afhænge af det projekt, der er under udarbejdelse. Endvidere er projektarbejdet en iterativ proces, hvorfor teori og empiri som oftest indgår flere gange, da ny viden kan medføre inddragelse af nye teorier.

Indholdet af de fire hovedelementer, som benyttes i dette projekt, er forklaret herunder:



Figur 2.1: Videnskabsprocessens hovedelementer og arbejdsgang. [Andersen, 1997, s. 30]

- Problemformuleringen er en kort fremstilling af det problem, der gennem projektarbejdet ønskes en løsning på.
- Teori er litteratur, som anvendes til at opnå indsigt i et emneområde.
- Empiri indeholder dataindsamling og -bearbejdning med det formål at opnå større kendskab til et emneområde.
- Konklusionen er selve svaret på problemformuleringens spørgsmål, som skal afspejle den erkendelse og nye viden, som er opnået gennem projektarbejdet.

Dette projekt omhandler en undersøgelse af RTK-tjenesterne i Danmark. Opbygningen af projektet kan ses på figur 2.2. Ud fra denne figur er det muligt at få et indtryk af strukturen i projektarbejdet og inddragelsen af de fire hovedelementer. Teori og empiri er løbende inddraget i udarbejdelsen af den indledende analyse samt i de enkelte test.

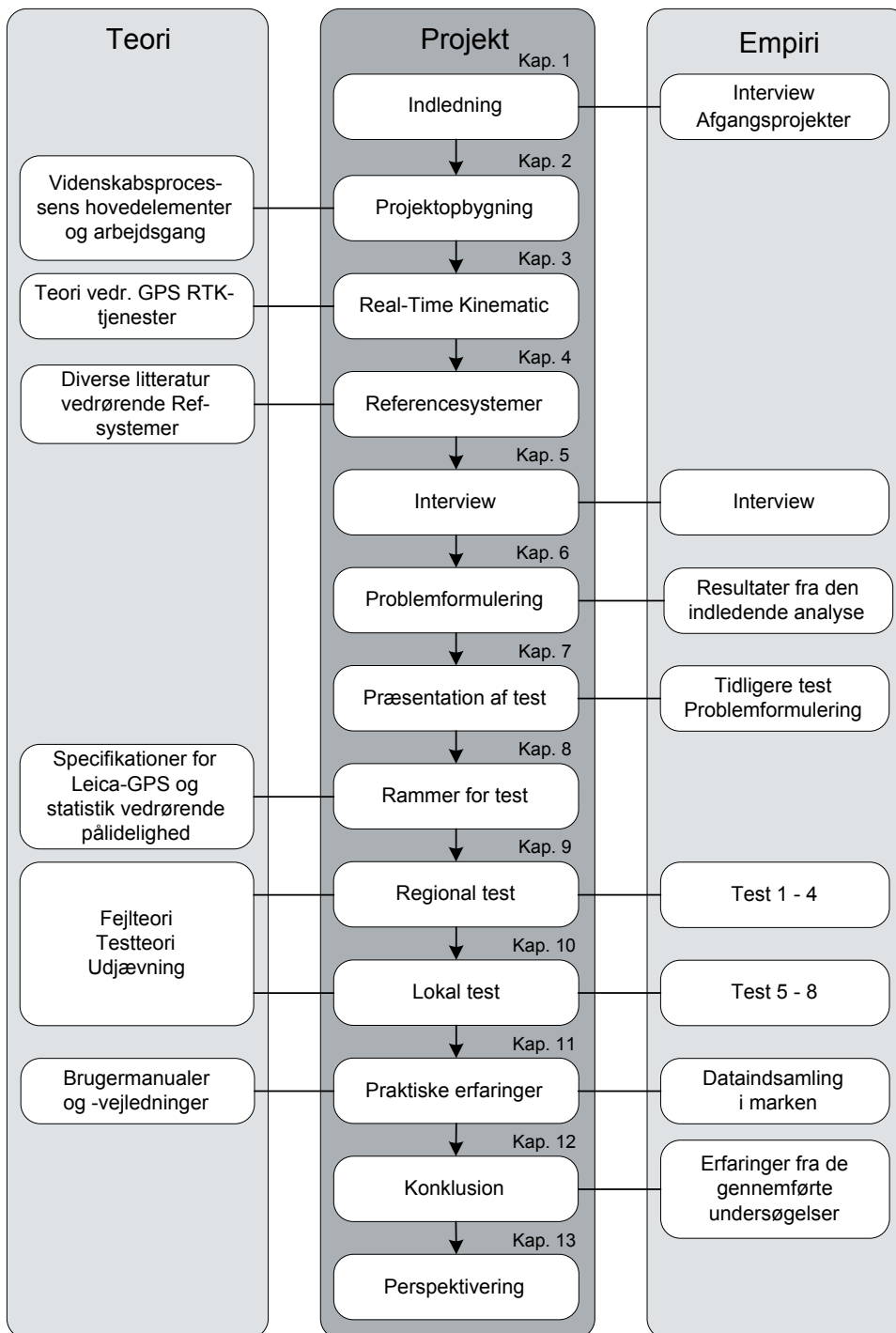
2.2 Projektbygning

Udgangspunktet for dette projekt er opmåling og afsætning med RTK med fokus på RTK-tjenesterne. Indenfor dette emne opstilles en række problemstillinger, der udspringer af den tvivl, som praktiserende landinspektører oplever i forbindelse med opmåling og afsætning med RTK. Kernen i afgangprojektet er en række af test, som er opstillet på baggrund af de problemstillinger, der er identificeret. Ved

opmåling og afsætning med RTK benytter langt størstedelen af de praktiserende landinspektører en af de to RTK-tjenester GPS-Referencen og GPSnet. Derfor er hovedparten af testene opbygget omkring brugen af disse.

Første fase er den indledende analyse. Analysen består af tre kapitler. Disse kapitler er *3 Real-Time Kinematic*, *4 Reference-systemer* og *5 Interview*. I kapitel 3 beskrives den grundlæggende teori vedrørende RTK-målemetoden, endvidere præsenteres de to RTK-tjenester. Kapitel 4 omhandler referencesystemer, og endelig beskriver kapitel 5 resultaterne af en række interview. Derefter præsenteres den endelige problemformulering for projektet i kapitel 6, og i den forbindelse formuleres en række spørgsmål.

Anden fase indeholder hovedanalysen i projektet og består af fire kapitler. Første kapitel er *7 Præsentation af test*, som beskriver tidligere udførte test af RTK-tjenesterne. Endvidere redegøres for, hvorledes de formulerede spørgsmål i problemformuleringen leder over til de test, som udføres. Derefter følger *8 Rammer for test*, som indeholder nogle overordnede emner, der gør sig gældende for de otte test. Derefter følger kapitel 9 og 10, som indeholder henholdsvis den regionale test og den lokale test. I *9 Regional test* gennemgås fire test, som er gennemført på Fyn. Resultater på tværs af de fire test er sammenfattet i et afsnit sidst i kapitlet. I *10 Lokal test* gennemgås fire test, som er gennemført i Aalborg.



Figur 2.2: Illustration af projektopbygning. Inddragelse af teori og empiri fremgår af de ydre søjler.

Tredje fase omfatter tre kapitler. I kapitel 11 redegøres for praktiske erfaringer med GPS-udstyret og brug af RTK-tjenesterne i forbindelse med dataindsamlingen. Kapitel 12 indeholder konklusionen. Her sammenholdes resultaterne fra de regionale og lokale test, og de væsentligste resultater uddrages. På baggrund af resultaterne er det muligt at besvare problemformuleringen og de uddybende spørgsmål, som stilles i forbindelse med denne. I kapitel 13 perspektiveres der over en række emner, der alle er af betydning for opmåling og afsætning med RTK.

2.3 Vidensindsamling

For at opnå indsigt i emneområdet er der søgt informationer i forskellig litteratur. Denne litteratur omfatter bøger og hjemmesider omhandlende GPS. Derudover er afgangsprojekter fra tidligere år omhandlende GPS og forskellige undersøgelsesrapporter gennemlæst for at se, hvilke resultater der her er nået frem til.

I forbindelse med den indledende analyse er der gennemført en række interview. Der er taget kontakt til personer, der til daglig arbejder med RTK-måling. På baggrund af disse kontakter er der gennemført interview med personer fra to forskellige privat praktiserende landinspektørfirmaer. Dette er gjort for at klarlægge, i hvilket omfang RTK-målemetoden anvendes til opmåling og især afsætning. I den forbindelse er brugen og erfaringerne med de to RTK-tjenester blevet undersøgt. Undersøgelsen skal klarlægge eventuelle ønsker til forbedringer og tvivl i forbindelse med brugen. Hvis det er muligt, skal relevante problemer fra praksis inddrages i de test af RTK-tjenesterne, som planlægges gennemført.

Der er yderligere gennemført et interview med Trimble Center Danmark. Leica Geosystems A/S er kontaktet pr. telefon og mail. Disse to firmaer står for driften af henholdsvis GPSnet og GPS-Referencen.

3

Real-Time Kinematic

Dette kapitel udgør den første del af den indledende analyse. Formålet med kapitlet er at redegøre for en række emner, som er af grundlæggende betydning for forståelsen af RTK. Emnerne er som følger:

- Grundlæggende GPS
- RTK-målemetoder
- RTK-tjenester

Indledningsvis forklares en række grundlæggende begreber inden for GPS-måling. Begreberne skal danne grundlag for beskrivelsen af tre forskellige RTK-målemetoder. To af disse målemetoder indebærer, at der eksisterer en RTK-tjeneste i det område, hvor der måles,

hvorfor en række af disse tjenester behandles herefter. Løbende gennem kapitlet vil der blive henvist til Appendiks A, som indeholder en mere dybdegående behandling af RTK-emnet.

3.1 Grundlæggende GPS

GPS baserer sig grundlæggende på afstandsmåling til en række kendte punkter, som udgøres af satellitter. Afstanden udregnes på baggrund af den tid, signalerne har været undervejs fra satellit til modtager. Selve målingen er dog behæftet med en række fejl, der alt efter en ønsket grad af nøjagtighed, kan reduceres ved hjælp af forskellige former for udstyr og metoder.

Et efterhånden stort antal udtryk og definitioner på GPS-området gør emnet svært at overskue. Overskueligheden besværliggøres yderligere af, at anvendelsen af udtrykkene og definitionerne i dele af litteraturen ikke er stringent. I det følgende skelnes der derfor først mellem nogle overordnede former for GPS-måling. Herefter bliver der gået i dybden med to generelle emner inden for GPS-området, som spiller en væsentlig rolle i forbindelse med RTK. Det drejer sig først og fremmest om fejlkilder ved GPS-måling. Derudover redegøres for GPS-måling på faser, idet fasemåling er kendetegnende for RTK og den nøjagtighed, som metoden kan levere.

3.1.1 Overordnede former for GPS-måling

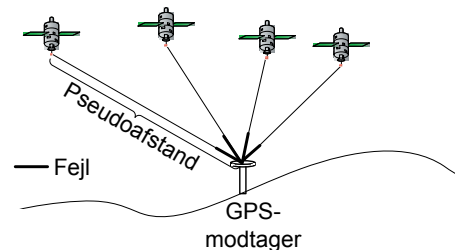
Alt afhængig af definitioner og detaljeringsgrad kan der tales om forskellige former for GPS-måling. I det følgende defineres tre overordnede former. Skelnen mellem formerne giver en god forståelse for den resterende del af kapitlet. De tre overordnede former for GPS-måling er:

- Absolut måling
- Differentiel måling
- Relativ måling

[Hofmann, 2001, s. 134]

Absolut måling

Denne form for GPS-måling foretages altid ved brug af en enkelt modtager. Som regel

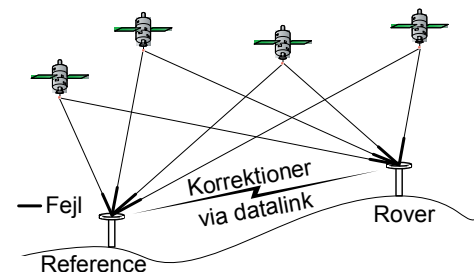


Figur 3.1: Princippet ved absolut GPS-måling.

måles der ved hjælp af koden pseudoafstande til minimum fire satellitter, hvorved positionen kan bestemmes. Afstandene kaldes pseudoafstande, idet de er behæftet med en række fejl, jf. figur 3.1. Disse fejl betyder, at positionen kun kan bestemmes med meters nøjagtighed. Fejlkilderne beskrives i 3.1.2 *Fejlkilder ved GPS-måling*. [Hofmann, 2001, s. 134-136]

Differentiel måling

I modsætning til absolut måling foretages denne form for GPS-måling altid ved brug af minimum to modtagere, der måler pseudoafstande til minimum fire redundante satellitter. At satellitterne er redundante vil sige, at modtagerne har målinger til disse satellitter til fælles. Modtagerne skal under målingen ved hjælp af et datalink være i kontakt med hinanden, jf. figur 3.2. Den ene modtager, kaldet referencen, er placeret i et kendt punkt, hvorved den er i stand til at beregne korrektioner til de fejlbehæftede målinger. Det er disse korrektioner, som sendes til den anden modtager, kaldet roveren, hvorfor roveren ved brug af korrektionerne er i stand til at minimere fejlkildernes indflydelse. Positionen bestemmes derved med højere nøjagtighed end den absolutte måling. [Hofmann, 2001, s. 134-136]

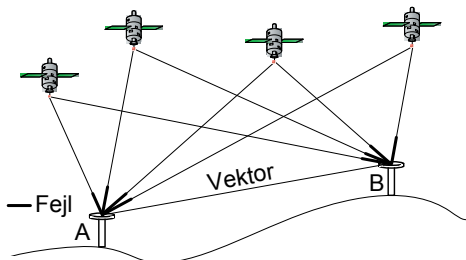


Figur 3.2: Princippet ved differentiel GPS-måling.

Relativ måling

Som det er tilfældet med differentiel måling, foretages denne form for GPS-måling altid ved brug af minimum to modtagere. Der er

dog i modsætning til den differentielle måling ikke krav om kontakt mellem modtagerne. Ved denne form for GPS-måling kombineres observationer til redundante satellitter fra forskellige modtagere ved eksempelvis at danne enkelt-, dobbelt- og tripeldifferenser. Dette bevirker, at de fejl, som observationerne er behæftet med, minimeres eller sågar elimineres, jf. Appendiks A, s. 9. På baggrund af målingerne og differenserne beregnes vektoren mellem modtagerne eller positionen for B, jf. figur 3.3. [Hofmann, 2001, s. 134, 141]



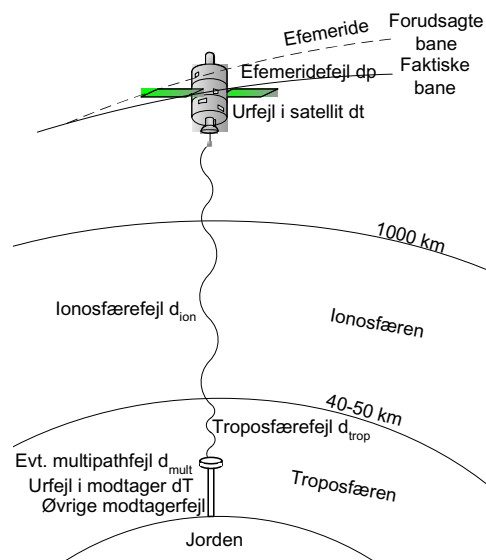
Figur 3.3: Princippet ved relativ GPS-måling.

3.1.2 Fejkilder ved GPS-måling

Som tidligere nævnt påvirkes GPS-målinger af en række fejkilder, der er af afgørende betydning for nøjagtigheden af målingen og dermed positionsbestemmelsen. Fejkilderne og deres karakteristika beskrives hver især herunder i den rækkefølge, som de har indflydelse på afstandsmålingen mellem satellitten og modtageren, jf. figur 3.4.

- Efeemeridefejl
- Urfejl i satellitter
- Ionosfærefejl
- Troposfærefejl
- Multipathfejl
- Urfejl i modtager
- Øvrige modtagerfejl

Mange af fejlene kan reduceres ved hjælp af modellering eller dannelse af differenser. Undervejs i gennemgangen af fejkilderne beskrives, hvorledes fejlene kan reduceres. Sa-



Figur 3.4: Generelle fejkilder ved GPS-måling.

tellitternes geometri under målingen betragtes ikke som en fejkilde, men spiller også en rolle i forbindelse med kvaliteten af positionsbestemmelsen, hvorfor denne faktor også beskrives i dette afsnit. For en uddybende beskrivelse af de generelle fejkilder ved GPS-måling henvises til Appendiks A, s. 2.

Efeemeridefejl

Efeemeridefejl opstår, idet satellitternes faktiske baner langsomt afviger fra de forudsagte. Efeemeriderne, der indgår i navigationsmeddelelsen, beregnes og leveres til satellitterne af kontrolsegmentet på jorden, hvorefter satellitten videre sender disse til modtageren. [Hofmann, 2001, s. 65-70], [Borre, 1995, s. 45-47], [Dueholm, 2002, s. 29-30]

Urfejl i satellitter

På trods af meget nøjagtige atomure er tidsmålingen i satellitten behæftet med fejl, hvilket er af betydning for afstandsmålingen. Kontrolsegmentet på jorden sørger dog løbende for at kontrollere urene og beskrive fejlen. Beskrivelsen af fejlen indgår herefter i navigationsmed-

delelsen. [Hofmann, 2001, s. 19-20], [Dueholm, 2002, s. 39]

Ionosfærefejl

GPS-signalerne behæftes på deres vej gennem ionosfæren med fejl. Fejlen skyldes elektroner i ionosfæren, der påvirker signalernes udbredelseshastighed. Fejlen varierer med tidspunktet på dagen, årstiden samt solpletaktiviteten over en årrække. Fejlen kan reduceres med ca. det halve gennem en tilnærmet modellering af ionosfærefejlen. Koefficienterne til modelleringen, der eksempelvis omfatter elektrondensiteten, indgår blandt andet i navigationsmeddelelsen. Fejlen kan også reduceres ved relativ måling og dannelse af differenser. Endvidere kan fejlen i kraft af, at den afhænger af GPS-signalernes frekvens stort set elimineres ved dobbeltfrekvent måling. [Hofmann, 2001, s. 99-106], [Borre, 1995, s. 101-102], [Dueholm, 2002, s. 40-42]

Troposfærefejl

Ligesom ionosfæren bidrager troposfæren også med fejl. Fejlen afhænger af temperatur, tryk samt luftfugtighed. Dette betyder, at troposfærefejlen ændres i takt med vejrets skiften. Fejlen kan delvist korrigeres ved hjælp af en tilnærmet matematisk model af troposfæren og kan desuden reduceres ved relativ måling og dannelse af differenser. [Hofmann, 2001, s. 106-107], [Borre, 1995, s. 101], [Dueholm, 2002, s. 42-43]

Multipathfejls

Multipathfejl skiller sig ud fra de andre fejlkilder, idet den er uforudsigelig, og til tider slet ikke optræder. Fejlen skyldes, at GPS-signalerne reflekteres fra overflader i nærheden af modtageren. Fejlens natur gør den svær at reducere, men risikoen for fejl kan reduceres ved at frasortere satellitter og signaler, der befinder sig tæt på horisonten. Ligeledes er der udviklet specielle antenner, der minimerer risikoen for,

at målingerne påvirkes af multipath. [Hofmann, 2001, s. 125-126], [Borre, 1995, s. 103-104], [Dueholm, 2002, s. 43-44]

Urfejl i modtager

Uret i modtageren er langt fra lige så nøjagtigt som satellitterne. Urfejlen i modtageren kan fastlægges og elimineres ved eksempelvis absolut GPS-måling ved at lade den optræde som ubekendt i ligningerne for positionsbestemmelsen. Ligeledes kan urfejlen i modtager elimineres ved relativ måling og dannelse af differenser. [Collier, 2003, s. 5.5], [Dueholm, 2002, s. 39]

Øvrige modtagerfejls

Disse fejl dækker blandt andet over signalstøj, fasecenterforskydning i antennen, korrelationsfejl og manglende beregningsnøjagtighed i modtageren. Størrelsesordenen af fejlene kan blandt andet afhænge af, om der er tale om en dyr eller en billig modtager. Efterhånden som modtagere forbedres minimeres disse fejl. [Hofmann, 2001, s. 78-81], [Borre, 1995, s. 103]

Satellitternes geometri

Satellitternes indbyrdes geometri under målingen betragtes ikke som en fejlkilde. Geometrien spiller dog en rolle i forbindelse kvaliteten af en måling. Et mål for denne kvalitet er Position Dilution of Precision, som forkortes PDOP. Generelt gælder det, at jo tættere satellitterne befinder sig på hinanden, jo dårligere er opmålingsgeometrien. En dårlig geometri resulterer i en høj PDOP-værdi og en dårlig kvalitet af positionsbestemmelsen. [Dueholm, 2002, s. 44-46]

3.1.3 GPS-måling på fasen

Som tidligere nævnt spiller GPS-måling på fasen i højere grad end kodemåling en væsentlig rolle i forbindelse med RTK og den nøjagtighed, som

metoden kan levere. Ønskes den højeste grad af nøjagtighed er det nødvendigt at måle med to modtagere, der begge er i stand til at måle på fasen. Ved fasemåling måles der direkte på den ene eller begge bærebølger. Som følge af bærebølgernes forholdsvis korte bølgelængder på cirka 19 og 24 cm er det muligt at måle pseudoafstanden med millimeters nøjagtighed. Den høje nøjagtighed er resultatet af en kompliceret beregningsgang. I det følgende gennemgås en række aspekter af betydning for fasemåling og dermed RTK. Aspekterne er:

- Opstilling af observationsligningen
- Bestemmelse af periodekonstanterne
- Periodetab
- Dobbeltfrekvent måling

Opstilling af observationsligningen

I det øjeblik en modtager, der kan måle på fasen, tændes, begynder den at registrere faseforskelle mellem bærebølgen fra satellitten og en kopi af bærebølgen genereret i modtageren. Disse positive såvel som negative faseforskelle summeres efterhånden, som tiden går. Ubekendt i den henseende er det antal af hele bølgelængder, der er mellem satellit og modtager i det øjeblik, modtageren tændes. Observationsligningen for en fasemåling kan derfor opstilles som:

$$\phi(t) = \rho(t) - \lambda \cdot N(t_0) - c(dT - dt) - d_{ion} + d_{trop}$$

hvor:

- $\phi(t)$: Længden af den modtagne bølge til tiden t
- $\rho(t)$: Den geometriske afstand mellem satellit og modtager til tiden t
- λ : Bærebølgens bølgelængde
- $N(t_0)$: Antallet af hele bølgelængder til tiden t_0
- c : Lysets hastighed i vakuum
- dT : Modtagerens urfejl

dt : Satellittens urfejl

d_{ion} : Ionosfærefejlen

d_{trop} : Troposfærefejlen

[Hofmann, 2001, s. 207], [Dueholm, 2002, s. 66]

Som det ses af formlen optræder nogle af de tidligere beskrevne fejlkilder i ligningen, jf. figur 3.4. I formlen er de tilfældige fejlkilder udeladt, hvilket efterlader de systematiske fejlkilder i ligningen.

Antallet af hele bølgelængder kaldes også periodekonstanten og betegnes ofte N . Med en kombination af målingerne fra to eller flere modtagere kan periodekonstanten eksempelvis bestemmes ved udjævning. Bestemmelse af periodekonstanterne kaldes også for initialisering og er essentiel for fasemåling.

Bestemmelse af periodekonstanterne

Bestemmelse af periodekonstanterne i forbindelse med en fasemåling kræver som regel, at der er tale om en relativ måling. Det er dog også muligt at bestemme dem med en enkelt modtager, hvilket i givet fald vil kræve statistisk måling over flere epoker. Denne metode benyttes dog ikke i forbindelse med RTK. Som tidligere nævnt kan der ved relativ måling med fordel dannes differenser mellem forskellige observationer. Resultatet af en dobbeltdifferens er observationer, der er rensset for den væsentligste del af iono- og troposfærefejlen, samt urfejl i satellitter og modtagere. Tilbage er udover en kombination af de geometriske afstande mellem satellitter og modtagere også en kombination af periodekonstanterne, jf. Appendix A, s. 9.

Med udgangspunkt i sådanne kombinationer af

periodekonstanter kan bestemmelsen af periodekonstanterne inddeles i tre trin. Følgende metode er en generel metode.

Trin 1

Først genereres et sæt foreløbige heltalskombinationer. Dette kan eksempelvis gøres ved først at foretage en udjævning, hvor periodekonstanterne hver især indgår som reelle tal. Alt afhængig af resultatet af udjævningen genereres herefter kombinationer af de nærmeste heltal eller alle heltal inden for grovfejlsgrænserne. Antallet af kombinationer er af betydning for antallet af heltalsudjævninger og dermed beregningstiden.

Trin 2

Dernæst udføres det pågældende antal heltalsudjævninger, hvorefter heltalskombinationen, som giver det bedste udjævningsresultat, vælges som løsning. Som regel benyttes mindste kvadraters princip ud fra betragtningen om, at den heltalskombination, som afviger mindst fra de indsamlede data, formodentlig er den rigtige løsning.

Trin 3

Sidste led i bestemmelsen af periodekonstanterne indebærer, at den udvalgte heltalskombination efterprøves. Dette kan blandt andet gøres ved at vurdere den valgte løsning ud fra resultatet af udjævningen og ved at sammenholde resultatet med resultatet af andre løsninger.

Ovenstående fremgangsmåde er simplificeret og gælder især relativ statisk måling, hvor modtagerne ikke er i bevægelse. Alt afhængig af udstyr og den konkrete målemetode benyttes eventuelt mere avancerede regneteknikker og metoder.

I den forbindelse bør LAMBDA-metoden

nævnes som en af de fremherskende metoder til en hurtigere og mere effektiv bestemmelse af periodekonstanterne. Grundlæggende bestemmes periodekonstanterne på samme måde som beskrevet ovenfor. Ulempen ved den generelle metode er dog, at kombinationen af periodekonstanterne som følge af differensdannelsen er upræcis og præget af en stor korrelation. Dette råder LAMBDA-metoden bod på ved forud for bestemmelsen at transformere kombinationen af periodekonstanter til en mere præcis og ukorreleret kombination. Som følge heraf nedbringes initialiseringstiden væsentligt.

[Hofmann, 2001, s. 183-185 og 213-215], [Teunissen, 1997, s. 589 og 601]

Periodetab

Periodetab kaldes også for cycle-slips og defineres som øjeblikke, hvor modtageren af forskellige årsager ikke er i stand til at måle faseforskellene på signalerne fra en satellit. Årsagerne kan være fysiske obstruktioner som for eksempel træer, bygninger eller for meget signalstøj eksempelvis som følge af atmosfæriske forstyrrelser eller multipath. Signalbruddet kan også skyldes fejl i modtager-softwaren.

Periodetab kan eksempelvis detekteres ved dannelse af tripeldifferenser og kan repareres ved brug af interpolation eller et Kalman-filter. Større periodetab kan dog medføre, at der skal initialiseres på ny.

[Hofmann, 2001, s. 205-212]

Dobbeltfrekvent måling

Satellitterne udsender hver især to bæreølger med hver deres frekvens. I tilfælde hvor modtageren er i stand til at måle fasen på begge bæreølger, er det muligt at udnytte forskellen på signalernes frekvens til at fjerne hovedparten af

ionosfærefejlen. Dette er muligt, idet ionosfærefejlen er omvendt proportional med kvadratet på frekvensen. Ligeledes anvendes forskellen på signalernes frekvens i forbindelse med specielle teknikker kaldet wide lane og narrow lane, jf. Appendiks A, s. 7. Førstnævnte teknik anvendes blandt andet til at nedsætte initialiseringstiden. [Hofmann, 2001, s. 104-106 og 216-217], [Dueholm, 2002, s. 41-42 og 73-75]

3.2 RTK-målemetoder

RTK står for Real-Time Kinematic. Som navnet antyder, er det ved denne form for GPS-måling muligt at bestemme en position i sand tid under bevægelse. Der eksisterer i dag forskellige former for RTK-måling. Disse former er:

- Traditionel RTK
- Enkeltstations-RTK
- Netværks-RTK

Forud for en gennemgang af disse RTK-målemetoder behandles først en række grundlæggende RTK-emner, som spiller en rolle i forhold til alle tre metoder.

3.2.1 Grundlæggende RTK

Ovenstående RTK-målemetoder indebærer alle samtidig måling med minimum to modtagere, der er i stand til at måle på fasen. Derudover indebærer målemetoderne, at der løbende under målingen ved hjælp af et datalink er forbindelse mellem modtagerne. Forbindelsen sørger for, at det er muligt at initialisere.

Forbindelsen mellem modtagerne kan etableres ved hjælp af enten et radio- eller mobillink. Med hensyn til et radiolink, skal der minimum være tale om en UHF-forbindelse, idet denne opfylder de krav, som RTK-målemetoden stiller til dataoverførselshastighed og støj på forbin-

delsen. Generelt betyder de tildelte frekvenser og tilladte sendeeffekter dog, at rækkevidden ofte eventuelt som følge af obstruktioner begrænses sig til under 15 km. Datamobilforbindelser er i den forbindelse et mere stabilt og længerevarende alternativ.

Selve dataoverførslen kan foregå på flere måder. En af de mest udbredte er, at data overføres ved hjælp af RTCM-formatet. RTCM-formatet er et uafhængigt standardformat til overførsel af blandt andet GPS-data. Formatet er defineret af The Radio Technical Commission for Maritime Services, Special Committee 104, og bestod i 1998 af 64 forskellige beskedstyper. Beskedstypen er afgørende for, hvilken slags data, der overføres. Eksempelvis er det ved hjælp af beskedstype 18 muligt at overføre rå faseobservationer, jf. Appendiks A, s. 11. Udover RTCM-formatet findes også en række formater tilvejebragt af diverse GPS-producenter.

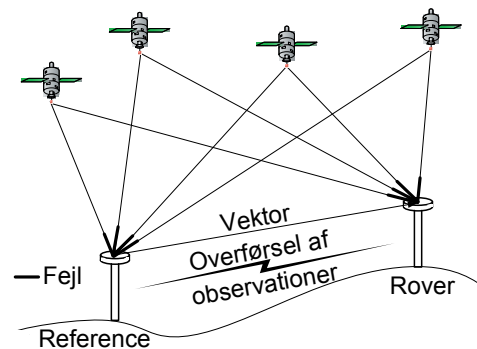
[Hofmann, 2001, s. 138-139], [Dueholm, 2002, s. 87-88]

3.2.2 Traditionel RTK

Med traditionel RTK menes RTK i metodens oprindelige forstand, hvilket vil sige, at en bruger råder over to GPS-modtagere, hvoraf den ene anvendes som referencestation og den anden som rover. For traditionel RTK gælder det, at rå observationer fra referencestationen eksempelvis via RTCM-formatet sendes til roveren. Roveren anvender herefter de beregningsrutiner, der benyttes i forbindelse med relativ GPS-måling, til at bestemme positionen, hvorfor traditionel RTK må betegnes som relativ GPS-måling. Beregningsrutinerne omfatter enkelt-, dobbelt- og i nogle tilfælde tripeldifferenser. Beregning af tripeldifferenser kræver dog, at der måles i det samme punkt

over to epoker. På baggrund af beregningerne opnås således en øjeblikkelig positionsbestemmelse i marken.

I forbindelse med traditionel RTK spiller afstanden mellem referencestationen og roveren en væsentlig rolle, da det forudsættes, at blandt andet de atmosfæriske forhold stort set er ens ved referencestationen og roveren. Jo mindre afstanden er mellem referencestation og rover, jo større ensartethed i fejlbidraget fra disse fejlkilder, hvorfor disse fejlbidrag kan reduceres i beregningen af periodekonstanterne og positionen. Herved er det muligt at måle med centimeters nøjagtighed. Ved afstande over 20 km vil det i nogle tilfælde ikke kunne lade sig gøre at bestemme periodekonstanterne. Desuden ville nøjagtigheden af en positionsbestemmelse i tilfælde af en initialisering være dårlig som følge af den store afstand. På figur 3.5 er det muligt



Figur 3.5: Princippet bag traditionel RTK.

at se princippet bag traditionel RTK. Idet roveren under initialisering til tider er i bevægelse benyttes en række specielle on-the-fly-teknikker. Disse teknikker kræver måling til minimum fem redundante satellitter. Når først periodekonstanterne er bestemt, behøves der for at bestemme en position kun fire redundante satellitter, jf. Appendiks A, s. 11.

[Hofmann, 2001, s. 142, 189, 201 og 213],
[Dueholm, 2002, s. 87-88]

3.2.3 Enkeltstations-RTK

Ideen med enkeltstations-RTK bygger på traditionel RTK, men i stedet for at en bruger selv skal stille en referencestation op, er der ved enkeltstations-RTK opstillet en række permanente referencestationer. Det er således muligt som bruger at modtage rå faseobservationer fra en af disse permanente referencestationer. Dette gøres ved hjælp af et radiolink. Når dette ikke er muligt på grund af obstruktioner eller for stor afstand, anvendes i stedet et mobil-link. Observationerne afsendes, modtages og behandles på samme måde som nævnt i 3.2.2 *Traditionel RTK*. Enkeltstations-RTK er derfor også et eksempel på relativ GPS-måling.

Som det var tilfældet med traditionel RTK, gør det ved enkeltstations-RTK sig især gældende, at nøjagtigheden er afhængig af afstanden til den valgte referencestation. Det drejer sig derfor om ved opbygningen af et system til enkeltstations-RTK at sikre, at den krævede nøjagtighed kan opnås, når afstanden til den nærmeste referencestation er maksimal.

En RTK-tjeneste baseret på enkeltstations-RTK vil yde brugerne en række fordele. Det vil være muligt at udføre RTK-positionsbestemmelse ved hjælp af blot en enkelt GPS-modtager. Herved er det ikke nødvendigt at bekymre sig om egen referencestation, hvorved brugeren sparer penge. Endvidere sparer brugeren tid ved ikke selv at skulle stille referencestationen op. Positioner på centimeterniveau bliver således lettere tilgængelige, og det må formodes, at der herved åbnes op for nye anvendelsesområder for GPS.

Enkeltstations-RTK er implementeret i Danmark i form af GPS-Referencen, jf. 3.3.1 *GPS-Referencen*.

[www.referencenet.dk], [www.referencen.dk]

3.2.4 Netværks-RTK

Som tidligere beskrevet bygger traditionel RTK på, at der kun anvendes en enkelt referencestation. Hvis i stedet et net af referencestationer anvendes, er det muligt at drage nytte af de fordele, der er ved at have observationer til de samme satellitter fra flere referencestationer på samme tid. Det er herved muligt på bedre vis at tage højde for de tidligere omtalte fejlkilder, der opstår som følge af blandt andet den atmosfæriske påvirkning af signalerne samt unøjagtigheden i efemeriderne.

Princippet bag netværks-RTK er, at der indsamles GPS-kode og fasedata i flere referencestationer. Disse data sendes løbende til en central beregningsenhed, som på baggrund af målingerne kortlægger fejlbidragene i netværket og genererer data, der kan anvendes til positionsbestemmelse i roveren. Data genereres enten som observationer eller korrektioner og overføres til roveren via et radio- eller mobil-link. I tilfælde af at der overføres observationer, er der tale om relativ GPS-måling, og roveren vil kunne benytte de samme beregningsrutiner som ved traditionel RTK. Er der derimod tale om overførsel af korrektioner karakteriseres RTK-målingen som differentiell GPS-måling, jf. 3.1.1 *Overordnede former for GPS-måling*. Roveren vil i dette tilfælde kunne korrigere observationerne løbende og herigennem bestemme positionen.

Fordelen ved netværks-RTK er, at det i kraft af kendskab til fejlbidragene, er muligt at arbejde over større afstande mellem rover og referencestationerne i netværket. Derudover er fordelene de samme som ved enkeltstations-RTK med hensyn til, at det kun er nødvendigt med én modtager, og at brugeren ikke selv behøver at bruge tid på at stille en referencestation op.

Et centralt aspekt i forbindelse med netværks-RTK er genereringen og distributionen af de data, der i roveren anvendes til positionsbestemmelsen. I det følgende beskrives to forskellige metoder. Det drejer sig om en metode, der baserer sig på oprettelsen af en virtuel referencestation, og en metode der baserer sig på beregning af korrektionsparametre for et afgrænset område.

Virtuel Reference Station

Konceptet bag Virtuel Reference Station, herefter kaldet VRS, er baseret på, at et netværk af permanente GPS referencestationer konstant er i kontakt med en central beregningsenhed. Afstandene mellem referencestationerne kan være helt op til 100 km. Der transmitteres således løbende rå GPS-data fra de permanente referencestationer til den centrale beregningsenhed. På baggrund af de rå data kortlægger beregningsenheden ved hjælp af forskellige former for interpolation og mindste kvadraters udjævning blandt andet de fejlbidrag, som skyldes de atmosfæriske forhold. Oplysningerne lagres i en dynamisk database og gælder for den region, som netværket dækker.

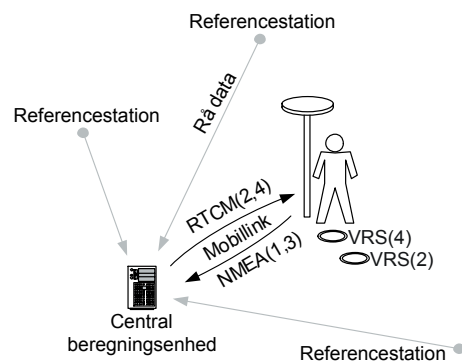
Opstartsproceduren for en opmåling, som foretages ved hjælp af netværks-RTK og VRS, kan inddeles i fire trin. De fire trin fremgår af figur 3.6.

Trin 1

Brugeren opretter ved hjælp af et mobil-link forbindelse til den centrale beregningsenhed, hvorefter roveren ved hjælp af en NMEA-streng sender sin position til beregningsenheden.

Trin 2

På baggrund af positionen, der er bestemt ved absolut måling med en nøjagtighed på meterni-



Figur 3.6: Princippet bag VRS. Tallet i parentes angiver, hvilket trin i opstartsprocessen der er tale om.

veau, oprettes en midlertidig virtuel referencestation. Beregningsenheden genererer herefter korrektionsdata, som den sender til roveren ved hjælp af RTCM-formatet.

Trin 3

På baggrund af korrektionsdata beregnes en mere nøjagtig DGPS-position i roveren, som efterfølgende sendes til beregningsenheden, hvorved den virtuelle referencestations position opdateres.

Trin 4

Beregningsenheden beregner herefter, blandt andet på baggrund af den førnævnte dynamiske database, referencedata for den virtuelle referencestation. Disse data sendes til roveren ved hjælp af RTCM-formatet.

Afstanden mellem referencestationen og roveren, der som tidligere nævnt spiller en afgørende rolle i forbindelse med RTK-metoden, reduceres ved ovenstående metode til et minimum. Ulemperne omkring løsning af periodekonstanterne og den afstandsafhængige nøjagtighed ved RTK-metoden ser derved i teorien ud til at kunne minimeres, og det er denne ide VRS-konceptet bygger på. Nøjagtigheden er imidlertid i stedet afhængighed af afstanden til referencestationerne i netværket, idet der i for-

bindelse med beregningen af virtuel reference-data opstår en interpolationsfejl, jf. Appendiks A, s. 14. Denne fejl er dog blevet mindre med tiden, hvorfor nøjagtigheden i VRS-systemet opfattes som stort set uafhængig af afstanden til referencestationerne i netværket.

Referencedata kan udformes som rå observationer eller som korrektioner til observationer. I fald der er tale om rå observationer, benytter roveren sig af de samme beregningsrutiner som ved traditionel RTK, og der vil derfor ikke være behov for specielt software i roveren, hvilket er tilfældet, når der er tale om korrektioner.

I beregningen af referencedata til VRS'en benyttes oprindeligt data fra de tre nærmeste permanente referencestationer. Efterhånden som VRS-systemet har udviklet sig, og metoden er blevet forfinet, inddrages der nu data fra helt op til seks stationer, hvorved der opnås en mere nøjagtig og konstant positionsbestemmelse.

Det er også muligt at måle, hvis roveren befinder sig udenfor netværkets område. I forbindelse med dette ekstrapoleres fejlbidragene. Dette kan lade sig gøre op til 15 km uden for netværkets dækningsområde, uden at nøjagtigheden bliver dårligere end inden for netværkets dækningsområde.

For at beregne en VRS skal der være kontakt til minimum fem redundante satellitter. Disse fem satellitter skal være synlige for både roveren, men også for de referencestationer, som indgår i beregningerne. Dette betyder i nogle tilfælde, at roveren til trods for, at den modtager signaler fra eksempelvis 10 satellitter, kun benytter sig af 7 satellitter i bestemmelsen af positionen.

VRS-systemet arbejder med en elevationsvinkel på 10° , hvilket vil sige, at satellitter under denne vinkel ikke medtages i beregningerne. Dog ob-

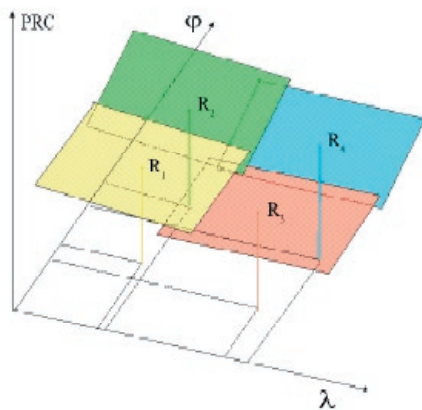
serverer systemet til satellitter, der ligger 5° over horisonten. Dette gøres for at sikre, at eventuelt syge satellitter ikke medtages i beregningerne, når de når højere op end elevationsvinklen.

Netværks-RTK baseret på VRS-princippet er implementeret i Danmark i form af GPSnet, jf. 3.3.2 *GPSnet*.

[Landau, 2002, s. 1-3], [Vollath, 2002, s. 1-2], [www.gpsnet.dk]

Flächen Korrektur Parameter

Flächen Korrektur Parameter forkortes FKP. Oversat til dansk betyder det noget i retning af områdekorrektionsparametre. FKP-meddelelserne indeholder information om en række af de fejl, som påvirker GPS-signalerne indenfor et givent område, jf. figur 3.7.



Figur 3.7: FKP-flader for fire referencestationer. [Wübbena, 2001, s. 6]

Som det er kendetegnende for netværks-RTK, kortlægges fejlbidragene for en række af de fejlkilder, der påvirker en GPS-måling. Dette lader sig gøre ved interpolation og mindste kvadraters udjævning af rå data fra netværket af referencestationer. Blandt andet fastlægges de fejl, som GPS-signalerne påføres i ionos- og troposfæren. Kendskabet til fejlbidragene kan efterfølgende udnyttes i forbindelse med posi-

tionbestemmelsen i roveren. Dette indebærer dog, at informationerne omkring fejlbidragene overføres til roveren, hvilket sker ved anvendelse af RTCM-formatet.

Desværre var der ikke i RTCM-formatet ved FKP-systemets tilblivelse taget højde for overførsel af informationer af denne type. Det var derfor nødvendigt at udvikle en ny form for RTCM-besked. Denne fik nummeret 59 og kaldes for FKP-AdV. FKP-systemet genererer typisk disse FKP-beske der hvert tiende sekund.

FKP-systemet blev oprindeligt udviklet således, at det kunne fungere på baggrund af envejskommunikation ved brug af radiolink. I mellemtiden er det dog blevet videreudviklet således, at systemet nu også åbner op for muligheden for tovejskommunikation. Fordelen ved førstnævnte metode er, at systemet er i stand til at betjene langt flere brugere samtidig. Ulempen ved envejskommunikation er dog, at den stiller større krav til roveren med hensyn til soft- og hardware end tovejskommunikationsløsningen gør.

I tilfælde af en FKP-løsning, der baserer sig på envejskommunikation, modtager roveren på traditionel vis data fra den nærmeste referencestation med en regelmæssig opdateringsfrekvens på mellem et eller to sekunder. Data overføres som korrektioner via RTCM-beske derne 20 og 21. Udover disse data modtager roveren en FKP-besked fra netværket hvert tiende sekund. Roveren benytter FKP-beske den til at korrigere de data, som den modtager fra referencestationen. På denne måde minimeres fejlbidragene, og positionen bestemmes med en højere nøjagtighed.

En FKP-løsning, der baserer sig på tovejskommunikation, minder i princippet om VRS-syste-

met, idet hovedparten af beregningerne foretages af en central beregningsenhed, hvorefter de beregnede data sendes til roveren.

FKP-systemet bliver på sigt formodentlig også indført i Danmark, jf. 3.3.1 *GPS-Referencen*.

[Keenan, 2003, 1-2], [Wübbena, 2001, s. 1-6], [Wübbena, 2002, s. 1-7]

3.3 RTK-tjenester

Omkring år 2000 begyndte udviklingen af landsdækkende RTK-løsninger. I forskellige lande etableredes RTK-tjenester, hvor permanente referencestationer blev opstillet.

3.3.1 RTK-tjenester i verden

Rundt omkring i verden er der siden etableret adskillige RTK-tjenester. Nedenstående liste viser, hvor det er muligt at finde RTK-tjenester:

- Tyskland
- Schweiz
- Østrig
- Danmark
- Belgien

- Sverige
- Finland
- Norge
- Tjekkiet
- Kina
- Japan
- USA
- Australien
- New Zealand

I det følgende vil nogle af disse RTK-tjenester blive gennemgået, og slutteligt i dette afsnit vil RTK-tjenesterne i Danmark blive omtalt.

Schweiz

I Schweiz er der etableret et RTK-netværk, som kaldes "Automatische GPS-Netz Schweiz", herefter forkortet AGNES. AGNES, som blev etableret i 1999, er opbygget med Trimble referencestationer samt Trimble softwaret GPSnet. Netværket består af 29 permanente referencestationer, der dækker hele landet, jf. figur 3.8. [www.swisstopo.ch]

Tyskland

I Tyskland er der to store udbydere af netværks-



Figur 3.8: RTK-netværk i Schweiz. Systemet kaldes AGNES. [www.swisstopo.ch]

RTK. Landets 16 delstater driver den landsdækkende Satelliten Positionierungsdienst, herefter kaldet SAPOS. SAPOS er det RTK-netværk, der dækker det største areal ved brug af Trimbles VRS-teknik. Det er yderligere i forbindelse med SAPOS muligt med det rette udstyr at tilknytte FKP. [www.sapos.de]

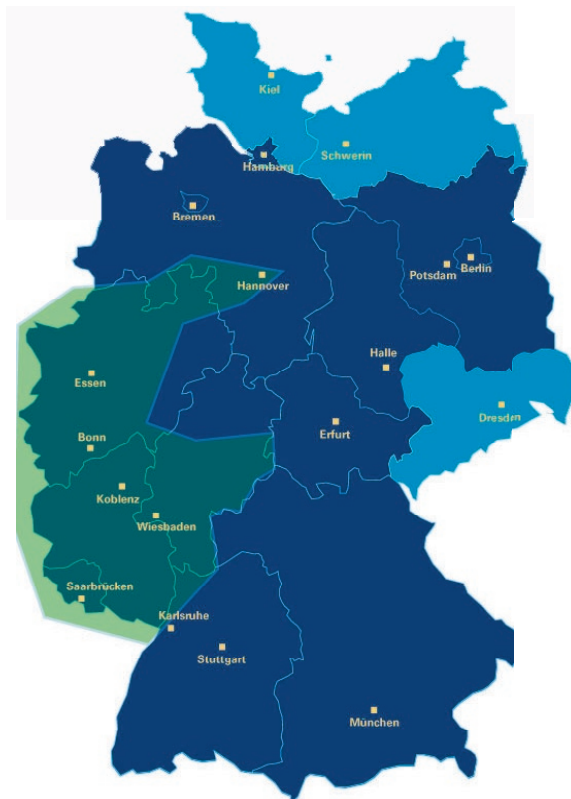
Den anden udbyder er det private firma ASCOS, som ejes af det tyske gasselskab Ruhrgas AG. ASCOS' RTK-netværk skal på sigt være landsdækkende og dækker 13 af Tysklands 16 delstater, jf. figur 3.9. ASCOS anvender også Trimbles VRS-teknik og er planlagt således, at der kan være op til 100 kilometer mellem referencestationerne. Endvidere er området dækket

med grønt inddraget til forsøg i forbindelse med GPS og GLONASS. [ascos.ruhrgas.de]

Japan

I Japan drives et RTK-netværk med 200 referencestationer. Dette system anvender også Trimbles VRS-teknologi. Det er Japanese Geographical Survey Institute, som driver de 200 referencestationer, og sikrer at data er tilgængelig.

Japanese Geographical Survey Institute udbyder endnu et netværk med 200 andre referencestationer, som ligeledes anvender VRS-teknologien. Dette net benyttes primært af private organisationer. [Landau, 2002, s. 141-142]



Figur 3.9: Dækningskort for RTK-netværkssystemet ASCOS. [ascos.ruhrgas.de]

Danmark

I Danmark udbydes to RTK-tjenester. De to tjenester, som kaldes GPSnet og GPS-Referencen, er opbygget over to forskellige principper teknisk såvel som organisatorisk. Begge tjenester muliggør GPS-måling overalt i landet med få centimeters nøjagtighed. GPS-Referencen er udbydes af Andelsforeningen GPS-Referencen, mens GPSnet drives af Trimble Center Danmark.

3.3.2 GPS-Referencen

Formålet med dette afsnit er at beskrive GPS-Referencen. Dette vil blive gjort ud fra udbyderens synspunkter. Synspunkterne er der fundet frem til ved hjælp af GPS-Referencens

hjemmeside, interview med udbyderen samt e-mails.

GPS-Referencen er etableret af brugerne i en andelsforening og administreres af Leica Geosystems A/S. Tjenesten fungerer således, at de enkelte andelshavere i foreningen stiller referencestationer til rådighed for de øvrige andelshavere samt betalende brugere af tjenesten. Det vil med andre ord sige, at andelshaverne ikke skal betale abonnement for at benytte sig af tjenesten. Der er i øjeblikket 58 referencestationer fordelt over Danmark. Placeringen af de enkelte referencestationer er foretaget således, at GPS-Referencen stort set er landsdækkende, jf. figur 3.10.



Figur 3.10: Dækningskort for GPS-Referencen. Cirklerne har en radius på 25 km. [www.gps-referencen.dk]

Formålsparagraffen i "Vedtægter for Andels-selskabet GPS-Referencen A.m.b.a." lyder som følger:

"Formålet med andelselskabet er at lette andelshavers brug af cm nøjagtigt GPS (Global Positioning System) til landmåling, samt at kunne tilbyde et landsdækkende referencenet til alle interesserede i Danmark."

For at det kan lade sig gøre at blive andelshaver, er det nødvendigt at bidrage med mindst én referencestation, som skal opstilles samt vedligeholdes efter de af foreningen fremsatte krav. Det koster 180.000 kr. at blive andelshaver i GPS-Referencen. I øjeblikket er der 34 andelshavere, som udgøres af landinspektørfirmaer, amter, kommuner, en række energi- og naturgasselskaber samt andre ledningsejere etc.

Teknikken bag GPS-Referencen

GPS-Referencen bygger på enkeltstations-RTK, hvilket vil sige, at en bruger frem for selv at skulle opstille en referencestation, blot kobler sig på en af GPS-Referencens permanent opstillede referencestationer, jf. 3.2.2 *Enkeltstations-RTK*. På figur 3.10 er det muligt at se placeringen af disse referencestationer. Anvendes mobillink vurderes GPS-Referencen, at kunne anvendes ud i en afstand af 25 km fra den nærmeste referencestation.

Som det ses på figuren, er der ofte et overlap mellem de forskellige referencestationers rækkevidde. Dette betyder, at det ofte er muligt for brugeren at foretage en uafhængig overbestemmelse ved opkald til en af de øvrige referencestationer, der befinder sig i området.

Referencestationer

Referencestationerne er opstillet således, at de så vidt muligt dækker hele landet. Der er

udarbejdet retningslinier for etablering af en referencestation. I disse fremgår det eksempelvis, hvorledes en GPS-antenne skal placeres. En gang om året beregnes koordinaterne til GPS-Referencens referencestationer af KMS. Herved sikres det, at koordinaterne til referencestationerne er koordineret i det danske referencenet REFDDK.

Levering af observationer

Observationer tilbydes på to forskellige måder. Forskellen mellem de to former for observationer ligger i, at den ene anvendes i marken i forbindelse med måling i sand tid, mens den anden anvendes til efterprocessing. Til direkte måling i marken, hvor faseobservationer overføres, anvendes RTCM-formatet, mens RINEX anvendes til levering af rå data til efterprocessing.

Nøjagtighed

Ifølge GPS-Referencen ligger opmålingsnøjagtigheden i planen på 2 - 3 cm i en radius af ca. 25 km fra referencestationen. I forbindelse med nøjagtigheden i højden oplyser Brian Hansen, der er kundekonsulent for Leica Geosystems A/S i Danmark, at denne er 1,5 gang dårligere end den plane nøjagtighed. Dette medfører, at nøjagtigheden i højden for GPS-Referencen er 3 - 4,5 cm. Nøjagtighederne defineres som 68% konfidens og er defineret på baggrund af formel 9.1 og 9.2, jf. 9.2.1 *Teori*.

I 7.1.1 *Test udført af KMS* er det muligt at se, hvilke nøjagtigheder KMS tidligere har beregnet i forbindelse med GPS-Referencen.

Priser

De følgende priser for måling med GPS-Referencen er hentet fra Andelsforeningen GPS-Referencens hjemmeside den 04.06.2004:

GPS-Referencens abonnement:

Årligt landsdækkende abonnement:	12.000 kr.
Årligt GSM abonnement:	304 kr.
GSM minutpris:	0,6 kr.
GSM opkaldsafgift:	0,2 kr.

Fremtiden

I december 2003 offentliggjorde Leica Geosystems A/S deres planer om at indføre netværks-RTK. I fremtiden vil GPS-Referencen således både tilbyde enkeltstations-RTK samt netværks-RTK. Metoden, systemet skal bygge på, bliver FKP, jf. 3.2.3 *Netværks-RTK*.

Ifølge tidsplanen for indførelse af netværks-RTK i GPS-Referencen er de første test med FKP påbegyndt i midten af marts. Testen

gennemføres på Sjælland og inddrager ti referencestationer. Ved andelshavernes generalforsamling i juni, skal det vedtages, hvorledes de fremtidige planer for indførelse af systemet skal se ud. Herunder skal det vedtages, om samtlige referencestationer skal indgå i netværket, eller om det kun bliver en del af dem. Brian Hansen regner med, at netværks-RTK med FKP bliver indført i slutningen af 2004.

[www.referencen.dk], [www.gps-referencen.dk], [Hansen, den 17.02.2004], [Hansen, den 17.03.2004], [Hofmann, 2001, s. 142]

3.3.3 GPSnet

Formålet med dette afsnit er at beskrive GPS-net. Dette vil blive gjort ud fra udbydernes syns-



Figur 3.11: Dækningskort for GPSnet. [www.gpsnet.dk]

punkter. Synspunkterne er der fundet frem til ved hjælp af GPSnets hjemmeside, interview med udbyderne samt gennem e-mails.

I foråret 2001 blev GPSnet etableret, som den første landsdækkende RTK-tjeneste i Danmark. GPSnet administreres af Trimble Center Danmark, men udover Trimble Center Danmark er også en række andre organisationer involveret i GPSnet. Disse partnere er Vejdirektoratet, Kampsax, Dansk Total Opmåling samt Danmarks Tekniske Universitet. GPSnet består af 26 faste stationer, jf. figur 3.11. Endvidere lover GPSnet, at der er dækning indtil 100 kilometer fra nærmeste referencestation.

Teknikken bag GPSnet

Teknologien bag GPSnet bygger på princippet om VRS og muliggør opmåling med en ensartet nøjagtighed i hele landet. Det vil altså sige, at nøjagtigheden ikke påvirkes af afstanden til den nærmeste referencestation i netværket.

Referencestationer

KMS beregner koordinater til referencestationerne i GPSnet hver anden måned. Koordinaterne til referencestationerne koordineres i forhold til det danske referencenet REFDC.

Levering af observationer

Observationer tilbydes på to forskellige måder. Forskellen mellem de to former for observationer ligger i, at den ene anvendes i marken til sand tid, mens den anden anvendes til efterprocessering. Til direkte måling i marken, hvor faseobservationer overføres, anvendes RTCM-formatet, mens RINEX-formatet anvendes til levering af rå data til efterprocesseringen.

Nøjagtighed

Ifølge GPSnet er den horisontale positions middelfejl 1 centimeter, mens den vertikale middelfejl er bedre end 2 centimeter. GPSnet taler i den forbindelse om 68% konfidens. Nøjagtighederne er defineret på baggrund af formel 9.1 og 9.2, jf. 9.2.1 *Teori*.

I 7.1.1 *Test udført af KMS* er det muligt at se, hvilke nøjagtigheder KMS tidligere har beregnet i forbindelse med GPSnet.

Priser

De følgende priser for måling med GPSnet er hentet på GPSnets hjemmeside den 04.06.2004:

GPSnets abonnement:

Årligt abonnement:	12.850 kr.
Opkaldsafgift:	0,25 kr.
Minuttakst:	1,29 kr.
Minuttakst efter 2 timer:	0,67 kr.
Minuttakst efter 3 timer:	0,50 kr.

Ovenstående priser baserer sig på, et GSM GPSnet.dk abonnementet, hvor TDC Mobil er GSM leverandør. Har brugeren i forvejen et GSM abonnement, anbefaler GPSnet, at der benyttes et mobilselskab, som anvender TDC Mobilnet, da dette vurderes til at have den bedste dækning i det åbne land.

Ud over ovenstående abonnement er der også mulighed for at tegne andre former for abonnementer. Disse er blandt andet RTK samt DGPS via Internettet.

[www.gpsnet.dk], [Ellegård, den 16.02.2004]

4

Referencesystemer

Formålet med dette kapitel er at beskrive de eksisterende og fremtidige referencesystemer i Danmark. Den stadig større anvendelse af GPS har nødvendiggjort, at referencesystemer og referencenet både internationaliseres samt moderniseres. Først beskrives de grundlæggende begreber vedrørende referencesystemer og referencenet. Derefter følger to afsnit som beskriver de eksisterende og fremtidige referencesystemer i Danmark. I hvert afsnit fokuseres der på, hvorfor de fremtidige referencesystemer er mere egnede i forbindelse med GPS-måling end de eksisterende referencesystemer.

4.1 Grundlæggende begreber

Jordens form kan tilnærmelsesvis betragtes som en ellipsoide, og der er således tale om en dob-

beltkrum flade. I forbindelse med landmåling er der behov for kendskab til jordens form for det område, der opmåles. Formen defineres ved hjælp af et geodætisk datum, der består af en række matematiske parametre. Til et datum er yderligere tilknyttet en specifik ellipsoide. Der findes både regionale og globale datum, hvor forskellen blandt andet ligger i udstrækningen af det område, det enkelte datum dækker, ligesom ellipsoideparametrene er forskellige.

Realiseringen af et datum for et givent område kaldes en referenceramme, og beskriver koordinaterne til en række fundamentalstationer til et givent tidspunkt. De fleste datum, der anvendes i dag, er realiseret gennem referencerammer, der er fastlagt i forhold til fundamentalstationer.

Opmålinger på den dobbeltkrumme jord skal ofte præsenteres på et plant kort. Til dette bruges en kortprojektion med et tilknyttet datum, som tilsammen udgør en matematisk afbildning, der overfører punkter mellem den krumme jord og planen. Afbildningen sker imidlertid ikke uden forvanskning af enten arealer, vinkler eller afstande. Til landmåling anvendes ofte vinkeltro, også kaldet konforme kortprojektioner, hvor der er tilknyttet et koordinatsystem. Kortprojektioner kaldes også for referencesystemer, og vil i resten af dette projekt blive benævnt således.

Realiseringen af referencerammer og referencesystemer sker ved hjælp af et referencenet. Et referencenet består af et antal fikspunkter, som er etableret i landskabet med tilhørende koordinater. Ved at måle til fikspunkterne kan opmåling foretages direkte i referencerammen eller i referencesystemet.

[www.kms.dk], [Madsen, 2001, s. 132-133]

4.2 Eksisterende referencesystemer

De mest udbredte referencesystemer i Danmark er System 34/45 samt UTM/ED50. I dette projekt bruges betegnelsen System 34 for System 34/45. I afsnittet beskrives begge systemer. Yderligere analyseres fordele og ulemper ved systemerne. Det er vigtigt at understrege, at de to nævnte systemer er plane referencesystemer, hvorfor Dansk Normal Nul, herefter benævnt DNN, anvendes i højden. Dette system vil efterfølgende blive gennemgået.

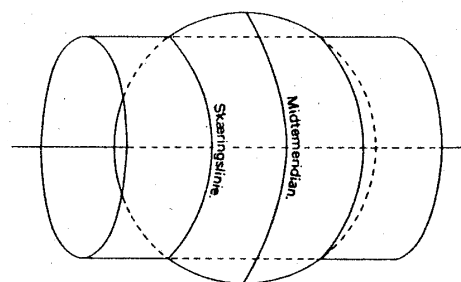
4.2.1 System 34

I begyndelsen af 1930'erne endes det daværende Matrikeldirektorat samt Geodætisk Institut om at indføre et nyt referencesystem til erstatning for Generalstabens system, kaldet System GS. System GS havde store og vari-

erende afstandskorrekationer og var uegnet til matrikulær måling.

System 34 er defineret som en "skæv" cylinderprojektion, og er baseret på Hayford ellipsoiden fra 1924. Grunden til, at System 34 ikke helt kan betegnes som en transversal cylinderprojektion, skyldes, at orienteringen af System 34 tog udgangspunkt i den forrige triangulation, som stammer fra System GS. Der blev taget udgangspunkt i en retningsvinkel mellem to af førsteordenspunkterne. Dette har betydet, at det ikke umiddelbart er muligt at foretage transformationer mellem System 34 og andre referencesystemer ved brug af matematisk veldefinerede formler. I stedet skal der anvendes polynomier af højere grad, som fastlægges af KMS. Disse forhold betyder, at System 34 har et indbygget datum, og det giver således ikke mening at snakke om andre datum i forbindelse med System 34.

Egenskaberne for en transversal cylinderprojektion er, at vinkler afbildes korrekt, mens der ved afstande og arealer sker en forvanskning. Cylinderaksen er placeret i ækvatorplanet så cylinderen krummer i retningen nord-syd. Cylinderen er gjort lidt mindre end ellipsoiden og skærer således denne i to linier. På disse skæringslinier er målforholdet 1, og der er hermed ingen afstandskorrektion, jf. figur 4.1. Afstandskorrektionen stiger således fra skæringslinierne



Figur 4.1: Cylinderens skæring med jorden. [Geodætisk Institut, 1981, s. 6]

og ind mod samt væk fra midtermeridianen, hvor afstandskorrektionen er størst.

System 34 blev opdelt i tre zoner for at minimere afstandskorrektionerne. Disse zoner er System 34 Jylland/Fyn, som dækker Jylland og Fyn, System 34 Sjælland, som dækker Sjælland og Øerne, og endelig System 45, som dækker Bornholm. Ved at opdele referencesystemet i tre zoner, sikredes det, at målforholdet ingen steder i landet afviger mere end ± 5 centimeter pr. kilometer. Begrundelsen for at acceptere en afvigelse på ± 5 centimeter pr. kilometer skyldes de nøjagtigheder, som datidens måleinstrumenter muliggjorde.

Til trods for at der er tale om tre forskellige zoner, arbejdes der med et fælles koordinatsystem, hvor Agri Bavnehøj på Mols i alle zoner har koordinaterne (200,200) km. Derved sikres det, at der ikke opstår negative koordinater.

System 34 er realiseret på grundlag af et referencenet, kaldet GI-fikspunktsnettet, som udgøres af ca. 22.000 punkter med en indbyrdes afstand på ca. 2 km. KMS oplyser, at nabonøjagtigheden for disse punkter er 1-2 cm. Yderligere findes MV-nettet, som består af cirka 300.000 punkter, med en punktspredning på 5-10 cm. Disse punkter er også koordineret i System 34 og er hovedsagligt etableret af landinspektører i forbindelse med matrikulære sager. Når en opmåling skal tilknyttes System 34, sker dette således til enten GI-fikspunkterne, eller MV-punkterne.

I dag anvendes System 34 hovedsagelig i forbindelse med matrikulære arbejder. Endvidere anvendes systemet også ved fremstilling af tekniske kort. På trods af det faktum, at System 34 er meget anvendt, er systemet forbundet med en række problemstillinger i forhold til anvendelse af nyt opmålingsudstyr samt nye

opmålingsmetoder. Nedenstående er et eksempel på en af disse problemstillinger.

Den stigende brug af GPS i forbindelse med opmåling har afsløret forholdsvis store netspændinger i GI-fikspunktsnettet. Det har vist sig, at nabonøjagtigheden ofte ikke stemmer overens med de postulerede 1-2 cm. Dette betyder, at de gode GPS-målinger for at kunne passe ind i System 34 skal transformeres, hvilket i realiteten forringer GPS-målingernes nøjagtighed.

Omregning af koordinater til System 34 er behæftet med en middelfejl på 1,7 cm for Jylland/Fyn, 1,3 cm for Sjælland samt 1,4 cm for Bornholm. Dette illustrerer yderligere nødvendigheden af, at et veldefineret referencesystem introduceres, således at omregninger mellem koordinatsystemerne kan foregå uden tilførelse af fejl.

System 34 er som tidligere nævnt et plant referencesystem. I forbindelse med fremstillingen af kort er der ofte behov for angivelse af højder. System 34 anvendes derfor ofte i kombination med højdesystemet DNN.

[Aarestrup, 1994, s. 31-36], [Jensen, 2001, s. 137-139], [Bahl, 2001, s. 142], [Borre, 1992, s. 300]

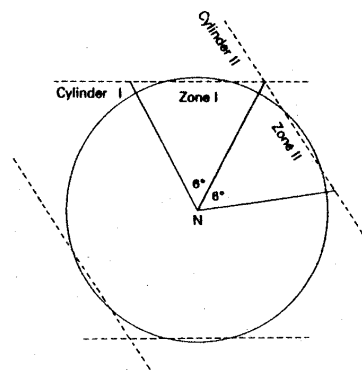
4.2.2 UTM/ED50

Universal Transverse Mercator, som herefter forkortes UTM, har vundet stor udbredelse i Danmark. Referencesystemet er et universalt system, som dækker hovedparten af jorden. Projektionen er en transversal cylinderprojektion. I Danmark anvendes det europæiske datum ED50 ofte i forbindelse med UTM.

I UTM-projektionen afbildes vinkler korrekt, mens afstande skal korrigeres. Målforholdet

langs midtermeridianen er 0,9996, hvilket svarer til en afstandskorrektion på 40 centimeter pr. kilometer.

For at gøre projektionen universal samt undgå store forvanskninger, er den inddelt i 60 zoner, som alle har en udstrækning på seks længdegrader, jf. figur 4.2.

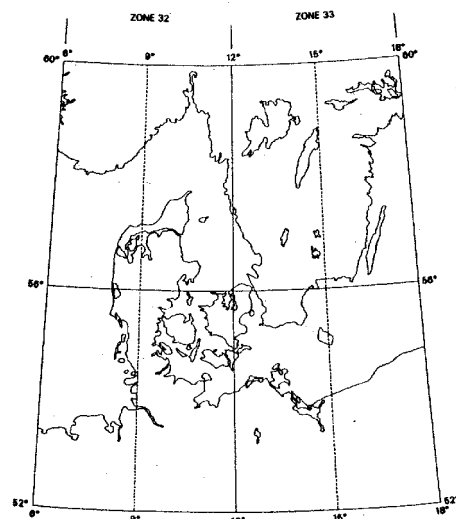


Figur 4.2: Princippet bag zoneinddelingen i de 60 zoner. [Geodætisk Institut, 1981, s. 7]

UTM-projektionen er baseret på, at der placeres 30 cylindre, som hver især er drejet seks grader i forhold til nabocylinderen. Danmark dækkes af zone 32 samt 33, hvor midtermeridianerne er henholdsvis 9° og 15° , jf. figur 4.3.

UTM/ED50 anvender som nævnt European Datum 1950. ED50 er en regional referenceramme, der ved kombination af astronomiske observationer samt retnings- og afstandsobserverationer til fundamentalstationer i Europa er tilpasset jordens form i Europa i 1950. ED50 er således ikke defineret uden for Europa. Ellipsoiden som knytter sig til ED50, er den internationale Hayford ellipsoide, som blev defineret i 1924.

I hver UTM-zone er der etableret et todimensionalt koordinatsystem. Dette indeholder to akser, E-aksen, som står for Easting, og N-ak-



Figur 4.3: Danmarks placering i UTM. [Geodætisk Institut, 1981, s. 8]

sen, som står for Northing. Koordinatsystemet er defineret med N-aksen stigende mod nord og E-aksen stigende mod øst. E-aksen er sammenfaldende med Ækvator, mens N-aksen er placeret 500 km vest for den enkelte zones midtermeridian. Dette betyder, at der kun arbejdes med positive koordinater i hver zone. Nulpunktet for koordinatsystemet i hver zone er således placeret ved Ækvator og 500 km vest for midtermeridianen. I Danmark betyder det, at Northing-værdierne antager værdier over 6.000 km. På den sydlige halvkugle ligger E-aksen 10.000 km syd for ækvator, for derigennem at sikre positive koordinater.

Når geografiske koordinater fra en GPS-måling skal omregnes til Northing- og Easting-koordinater i UTM/ED50, forekommer en middelfejl på 1,6 centimeter. Denne middelfejl skyldes uoverensstemmelser mellem det datum, som GPS-systemet anvender, og ED50.

[Geodætisk Institut, 1981], [Jensen, 2001, s. 136-139]

4.2.3 Dansk Normal Nul

Da både System 34 og UTM/ED50 er to-dimensionale referencesystemer, må et tredje referencesystem inddrages for at bidrage med oplysninger om højden. Til dette formål anvendes ofte DNN, som er et landsdækkende højdesystem. Højderne er bestemt som koten over middelvandstanden, jf. figur 4.4.

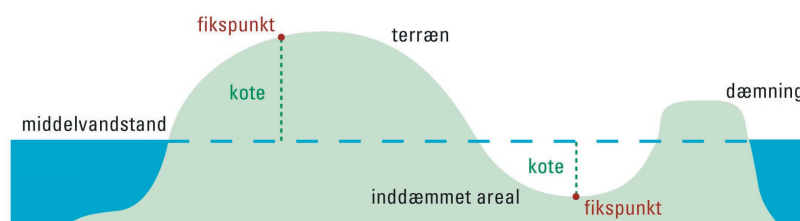
I perioden 1884-1898 gennemførtes det første landsdækkende præcisionsnivellement. Præcisionsnivellementet blev udført i erkendelse af, at Danmark havde brug for et samlet ensartet højdeniveau. Præcisionsnivellementet danner i dag grundlag for DNN system GM1891, som anvendes i Jylland og på Fyn. Københavns Kommune begyndte allerede i 1850'erne på systematiske nivellementer, hvis resultater blev angivet i Københavns Nul, også kaldet KN. KN ligger 5 centimeter over DNN/GM1891 og anvendes stadig i dag.

I den resterende del af Danmark blev der som stabilt grundlag for 1. præcisionsnivellement og samtlige senere nivellementer etableret underjordiske nivellements punkter for hver 2 kilometer langs hovedlandevejene. Der blev i alt etableret cirka 950 punkter. På samme tid blev på knap 350 af landets kirker etableret nivellements bolte. Endvidere blev der i Århus Domkirke i en granitsten etableret en lodret sølvtoemmestok. Højden til denne toemmestok blev fundet ud fra et nulniveau bestemt ved et vægtet middeltal af middelvandstandene i ti danske havne. Fastlæggelsen af niveauet med-

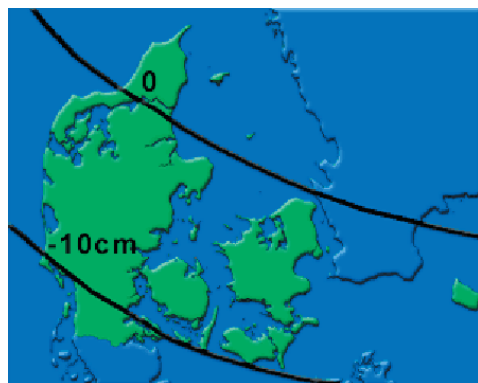
førte, at højden for punktet i Århus Domkirke blev beregnet til 5,615 meter.

Midt i 1930'erne blev det indset, at højdefikspunkterne ikke var stabile over længere tid, og forberedelserne til et 2. præcisionsnivellement påbegyndtes. I perioden 1938-1953 blev 2. præcisionsnivellement gennemført. I dag benyttes dette på Sjælland og benævnes DNN system GI1944. I forbindelse med dette præcisionsnivellement blev nye, mere stabile samt mere kontrollerbare underjordiske præcisionsnivellements punkter etableret. Endvidere blev der også etableret nye overjordiske punkter, da mange af de gamle var forsvundet. Endelig blev tilknytningen af Sjælland til henholdsvis Fyn samt Sverige foretaget ved hydrostatisk nivellement. Nulniveauet for dette 2. præcisionsnivellement blev defineret til det samme som 1. præcisionsnivellement, nemlig 5,615 meter, idet middelvandstanden i de danske havne ikke blev målt i denne omgang.

Resultatet af disse to præcisionsnivellementer viste, at der var lokale forskydninger mellem højdefikspunkterne fra den ene måling til den anden. Endvidere viste målingerne også, at Danmark vipper, hvilket skyldes isens tilbagetrækning efter sidste istid for cirka 10.000 år siden. Denne vipning sker over en linie fra Hirtshals til Nordsjælland, jf. figur 4.5. Dette betyder, at Sønderjylland sænker sig, mens Skagen hæver sig. Højdeforskellen mellem Sønderjylland og Skagen vokser med knap 2 millimeter pr. år.



Figur 4.4: Koter beregnes ud fra middelvandstanden. [www.kms.dk]



Figur 4.5: Danmarks vipning. [www.dmi.dk]

[Villadsen, 2001, s. 144-146]

4.3 Fremtidige referencesystemer

Efter at have gennemgået de eksisterende referencesystemer er der flere ting, som indikerer, at det er nødvendigt at etablere et nyt og veldefineret referencesystem, som tilgodeser det voksende brug af GPS i Danmark. I denne sammenhæng er der brug for et referencesystem, der i modsætning til System 34, er matematisk veldefineret. Herved vil fremtidige omregninger af GPS-målinger til de nye referencesystemer blive entydige, og vil kunne foretages uden forringelse af nøjagtigheden.

Dette har medført introduktionen af System 2000 i Danmark, der er KMS' betegnelse for det nye referencesystem med følgende indhold:

- To kortprojektioner:
 - UTM/EUREF89
 - Kp2000
- Højdesystemet, DVR90
- Etablering af 3D-fikspunktsnet
- Tilpasning af geoiden til DVR90
- Ny forbedret transformation til/fra nye og gamle systemer

I det følgende vil indholdet af de enkelte punkter blive nærmere beskrevet.

4.3.1 To nye kortprojektioner

GPS-systemet benytter World Geodetic System 1984, også kaldet WGS84, som datum. WGS84 er et globalt datum, som blev defineret i 1984. WGS84 er allerede to gange blevet realiseret gennem målinger til globale fundamentalstationer og udgør således også en global referenceramme. I Europa var der behov for en fast referenceramme, hvor koordinaterne til fundamentalstationerne lå fast. Til kortlægningsformål er det nemlig uhensigtsmæssigt, at koordinater er en funktion af tiden. Den 1. januar 1989 blev en sådan referenceramme fastlagt. Referencerammen er den europæiske realisering af WGS84 og benævnes EUREF89. Fordelen ved omlægning til en fælles referenceramme i Europa er, at data umiddelbart kan sammenstilles, uanset hvor de er fremstillet. Dette kan lade sig gøre, da referencestationerne på den euroasiatiske kontinentalplade ikke anses for at forskyde sig relativt. Af KMS anses EUREF89 og WGS84 for at være identiske i Europa.

I Danmark foregår GPS-målinger i EUREF89, hvorefter de målte koordinater skal transformeres til System 34 for blandt andet at kunne benyttes i det digitale matrikelkort eller i tekniske kort. Den optimale løsning er imidlertid, at koordinatdata indsamles, præsenteres og udveksles i samme referenceramme uden først at skulle igennem en transformation. Derfor introduceres EUREF89 i Danmark i form af to kortprojektioner:

- UTM/EUREF89
- Kp2000

UTM/EUREF89 indføres som den primære kortprojektion, mens Kp2000 er den sekundære kortprojektion.

[www.kms.dk], [Madsen, 2001, s. 132-133]

UTM/EUREF89

UTM/EUREF89 er en standard UTM-projektion repræsenterende EUREF89. Kortprojektionen er således en transversal cylinderprojektion. Zoneinddelingen afviger lidt i forhold til UTM/ED50, da zone 32 ofte "strækkes" så hele Sjælland dækkes for at gøre databehandlingen lettere.

Centralmeridianerne samt E- og N-akserne er de samme som i UTM/ED50. I UTM/EUREF89 varierer afstandskorrektionen ligeledes til maksimalt 40 centimeter pr. kilometer ved centralmeridianerne, jf. figur 4.6.

KMS anbefaler UTM/EUREF89 som den primære kortprojektion i Danmark. UTM/EUREF89 skal fremover anvendes til lagrings-, bearbejdnings- og udvekslingsformål.

Pr. 1. januar 2005 forventer KMS, at alle amter og kommuner har omlagt kort og geodata til UTM/EUREF89, og at alt udveksling af geodata fremover foregår i denne projektion. Matrikelkortet omlægges ligeledes til UTM/EUREF89 i 2006.

På grund af den forholdsvis store og varie-

rende afstandskorrekktion i UTM/EUREF89, introduceres en dansk tilpasset kortprojektion, Kp2000, som kan anvendes til landmåling.

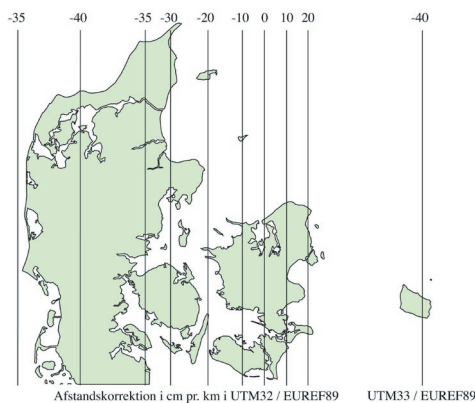
[www.referencenet.dk], [Bahl, 2001, s. 153-155], [www.kms.dk]

Kp2000

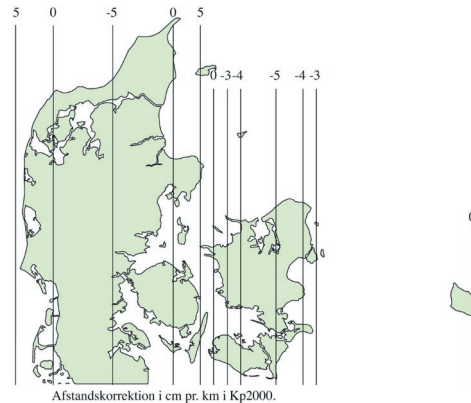
Den sekundære kortprojektion i Danmark bliver Kp2000, der ligeledes er en transversal cylinderprojektion. Kp2000 kan bruges internt i organisationer, hvor der er behov for både at arbejde i marken og på kontoret. Kp2000 er opdelt i tre afsnit, Jylland/Fyn, Sjælland samt Bornholm.

I Kp2000 er afstandskorrekktionen maksimalt 5 centimeter pr. kilometer, hvilket svarer til et målforhold 0,99995, jf. figur 4.7. Dette gør Kp2000 velegnet til landmåling. Den væsentligste forskel mellem UTM/EUREF89 og Kp2000 er således afstandskorrekktionen.

I forhold til UTM/EUREF89 er centralmeridianen for Kp2000 Jylland/Fyn forskudt en halv grad mod øst, hvilket medfører, at afsnittet dækker hele Jylland/Fyn. Endvidere har de tre midtermeridianer fået tildelt forskel-



Figur 4.6: Afstandskorrekktioner for UTM/EUREF89. [www.kms.dk]



Figur 4.7: Afstandskorrekktioner for Kp2000. [www.kms.dk]

lige Easting-værdier, som skal sikre, at der ikke sker forvekslinger af koordinater mellem de tre afsnit.

Omregningen imellem UTM/EUREF89 og Kp2000 sker uden tab af nøjagtighed, idet begge kortprojektioner er matematisk veldefinerede. Omregningen forløber på samme måde som ved en omregning mellem to UTM-zoner.

[www.kms.dk], [Bahl, 2001, s. 154-155], [Madsen, 1999, s. 64]

4.3.2 Dansk Vertikal Reference 1990

I maj 2002 afløste Dansk Vertikal Reference 1990, kaldet DVR90, de gamle DNN systemer, der er omtalt i 4.2.3 *Dansk Normal Nul*. Formålet med at indføre et nyt højdesystem er en bedre gengivelse af de reelle fysiske højdeforskelle i Danmark. I slutningen af 1970'erne påbegyndte Geodætisk Institut planlægningen af et 3. præcisionsnivellement.

Som fysisk ramme for det 3. præcisionsnivellement var det nødvendigt med blandt andet en brøndlægning af cirka 300 eksisterende nivellements punkter, der på grund af den øgede trafikmængde var blevet dækket med asfalt. Endvidere etableredes ca. 200 nye punkter.

Selve opmålingerne skete ved hjælp af motoriserede nivellementer. Dette blev gjort for at øge effektiviteten samt mindske omkostningerne. Et motoriseret nivellement foregår fra køretøjer, hvorpå instrumenter er monteret. Ved at arbejde med denne metode, er produktiviteten forøget med ca. 2,5 - 3 gange i forhold til et traditionelt præcisionsnivellement.

I forbindelse med dette nivellement er der sket

tilknytning til Sveriges og Tysklands højdenet. Dette er gjort for at få kendskab til Danmarks bevægelser i højden i forhold til disse lande.

Opmålingerne blev gennemført i perioden 1982-1994, og disse fulgte stort set nivellementslinierne fra de to foregående præcisionsnivellementer, jf. figur 4.8. Herved vil det senere være muligt at bestemme de enkelte punkters bevægelser.



Figur 4.8: Linieføringen i 3. præcisionsnivellement, 1986-1992. [Borre, 1992, s. 309]

For at undgå de gamle højdesystemers fejl, som for eksempel forskydninger mellem punkter samt Danmarks landhævning og -sænkning, er der foretaget nye vandstandsmålinger i de samme stationer, som anvendtes under 1. præcisionsnivellement. Disse observationer indgår i beregningen samt udjævningen af hele nivellementsnettet. Resultatet af disse beregninger er, at fundamentalpunktet i Århus Domkirke ligger ca. 5 cm lavere end i DNN. Hermed bliver den nye værdi for punktet i Århus Domkirke 5,570 meter. Det skal dog her understreges, at der ikke blot er tale om en parallelforskydning.

Der er således regionale forskelle på op mod 20 centimeter, hvilket blandt andet afhænger af placeringen i forhold til vipningslinien.

KMS har valgt at omregne samtlige højdefikspunkterne til koter i DVR90. Dansk Meteorologisk Institut, Farvandsvæsenet samt Kystinspektoratet har omlagt alle tidevandsoplysninger samt informationer til sikring mod stormflod til DVR90. Således vil der være DVR90 højdefikspunkter i alle større danske havne.

Øvrige myndigheder træffer selv beslutning om, hvornår data skal omlægges til DVR90. KMS foreslår dog, at omlægningen til DVR90 foretages koordineret og i regioner. Det ser ud til, at alle amter og kommuner vil omlægge til DVR90 inden 1. januar 2005.

[www.kms.dk], [Bahl, 2001, s. 142-143], [Viladsen, 2001, s. 146-151], [Madsen, 1999, s. 65-66]

4.3.3 3D-fikspunktsnet

KMS er ved at opbygge et nyt referencenet kaldet 10-km nettet. 10 km-nettet er et 3D-fikspunktsnet, som er koordineret i EUREF89. Fikspunktsnettet er velegnet til GPS-målinger, og punkterne har en indbyrdes afstand på cirka 10 km. Det var meningen, at 10-km nettet skulle opbygges, indmåles samt beregnes i årene 2000-2003, men i 2004 er beregningerne stadig ikke færdige. KMS forventer at have nettet færdigt i løbet af et til to år. Etableringen af punkterne i marken er færdiggjort, men den endelige udjævning, samt selve nivellementet af punkterne i Nord- og Midtjylland er ikke færdig. I den resterende del af landet er 10-km nettet etableret og klar til brug.

10-km nettet er en fortætning af det danske referencenet, kaldet REFDFK-nettet, der med ca.



Figur 4.9: REFDFK-nettet i Danmark. De store punkter illustrerer de seks internationale EUREF89 stationer.

100 stationer definerer EUREF89 i Danmark. REFDFK-nettet er yderligere en fortætning af de seks internationale EUREF89 stationer, der er placeret i Danmark, og som er med til at definere EUREF89 i Europa, jf. figur 4.9. Når 10-km nettet er færdigetableret, vil det bestå af ca. 700 punkter.

10-km nettet er opbygget med stabile punkt-afmærkninger, typisk en 1½ meter lang skruepløk placeret i en brønd 60 cm under terræn, jf. figur 4.10.



Figur 4.10: Eksempel på et 10-km punkt. Bemærk punktets placering i bunden af brønden.

Fra punkterne er der frit udsyn til himlen, og punkterne er let tilgængelige. Koordinaterne til punkterne kan enten fås som geografiske koordinater i EUREF89 eller som UTM/EUREF89. Højden angives som ellipsoidehøjde samt ortometrisk højde i DVR90.

Med basis i et 10-km punkt kan der måles direkte i EUREF89 eller en af kortprojektionerne UTM/EUREF89 eller Kp2000. 10-km punkterne forventes at have samme nøjagtighed som REFDK-punkterne på 5 mm i planen og 10 mm i højden.

[www.kms.dk], [Bahl, 2001, s. 142], [Madsen, den 03.03.2004]

4.3.4 Tilpasning af geoide til DVR90

Når opmåling foretages med GPS, så bestem-

mes højder som højden over ellipsoiden. For at finde frem til højden over middelvandstanden, som angives i DVR90, skal der anvendes en geoidmodel, som angiver sammenhængen mellem ellipsoiden og højden over DVR90. Geoiden er tilpasset DVR90, således at højdebestemmelse med GPS er muligt med en nøjagtighed på 1-2 centimeter. [Bahl, 2001, s. 143]

4.3.5 Ny forbedret transformation til/fra nye og gamle systemer

I beskrivelserne af System 2000 omtaler KMS ikke, hvad det konkrete indhold af dette punkt er. Titlen antyder, at KMS i forbindelse med indførelsen af System 2000 formodentlig har bestemt nogle nye transformationsrutiner til omregning mellem de nye og gamle koordinatsystemer.

5

Interview

Gennem en række interview ønskes det afdækket, i hvilket omfang RTK og specielt RTK-tjenesterne anvendes. Yderligere ønskes også belyst, hvorledes diverse former for opgaver udføres, samt hvilke problemstillinger og tvivl der kan opstå i forbindelse med brugen af RTK-tjenesterne. Fokus rettes især mod afsætning, idet afsætning med RTK ikke anvendes i samme omfang som opmåling. Hvorvidt dette skyldes manglende erfaring, eller tvivlsspørgsmål i forhold til afsætning ønskes afklaret. Interviewene foretages med parter, der beskæftiger sig med RTK-måling i det daglige.

Først i kapitlet beskrives hvorfra og hvordan, oplysningerne er indhentet. Dernæst gennemgås de opgaver, problemstillinger samt

tvivlsspørgsmål, der er i forbindelse opmåling og afsætning med RTK. Endvidere beskrives, hvorledes kontrolmåling af en afsætning foretaget med RTK udføres.

5.1 Interviewafgrænsning

Rækken af parter, der beskæftiger sig med RTK i det daglige, er efterhånden omfattende. Det kan eksempelvis være:

- Staten
- Amter
- Kommuner
- Entreprenørfirmaer
- Ingeniørfirmaer
- Landinspektørfirmaer
- Ledningsejere

Frem for at kontakte alle parter med henblik på interview, hvilket vil kræve uforbeholden meget tid, rettes fokus mod en enkelt part, der beskæftiger sig med et alsidigt og varieret udpluk af opgaver med RTK. Denne part er landinspektørerne. Specielt i forbindelse med afsætningsopgaver må landinspektørfirmaer formodes at have en erfaring, som enten er på niveau eller overstiger de andre parter.

Som tidligere nævnt er der i Danmark mulighed for at benytte sig af to RTK-tjenester, der grundlæggende er forskellige, jf. 3.3.2 *GPS-Referencen* samt 3.3.3 *GPSnet*. Da det ønskes at afdække erfaringer ved brug af begge tjenester, er der udover landinspektørfirmaet Nellemann & Bjørnkjær i Aalborg også taget kontakt til firmaet Landinspektørgruppen i Hillerød. Firmaerne benytter sig henholdsvis af GPSnet og GPS-Referencen. Der er i kontakten til firmaerne lagt vægt på at komme til at tale med de personer, der i det daglige arbejde beskæftiger sig med opmåling og afsætning med RTK. Interviewene fremgår henholdsvis af bilag 1 og 2.

Derudover er der, i overbevisning om at mange brugererfaringer og -problemer indrapporteres til udbyderne af de to tjenester, taget kontakt til Trimble Center Danmark, der står for driften af GPSnet, og Leica Geosystems A/S, som står for driften af GPS-Referencen. Trimble Center Danmark, der i det følgende benævnes TCD, mener godt at kunne bidrage med erfaringer og problemer, hvorimod Leica Geosystems A/S er af den opfattelse, at henvendelser rettet til dem er af teknisk karakter mere end af anvendelsesmæssig. Interviewet med TCD er vedlagt i bilag 3.

Endelig er vejlederne en kilde til erfaringer og problemer omkring opmåling og afsætning med

RTK, hvorfor disse også har bidraget med interessante aspekter.

5.2 Interviewmetode

Interviewene er gennemført som samtaler. Samtalerne er blevet båndet, hvilket har den fordel, at interviewerens frem for at skulle koncentrere sig om at tage notater, kan fokusere på, hvad den interviewede fortæller. Dermed kan samtalen hele tiden følges i den retning, den tager. Interview gennemført som samtaler virker mere naturlige og flydende, end interview der gennemføres med en række konkrete spørgsmål efterfulgt af svar. Ligeledes berøres mange emner, der ikke nødvendigvis begrænses af de emner, som spørgsmålene berører. Efterfølgende er samtalerne lyttet igennem og konkrete oplysninger noteret ned. Ulempen ved denne form for interviewteknik er, at interviewet til tider kan virke ustruktureret, hvorfor mere eller mindre unødvendige emner berøres. Derudover er det til sidst nødvendigt at sikre sig, at alle nødvendige emner er blevet berørt.

5.3 Resultater af interview

Dette afsnit bygger på resultaterne af de gennemførte interview. Det er i Danmark i dag muligt at gennemføre opmåling og afsætning med RTK ved hjælp af:

- GPSnet
- GPS-Referencen
- Egen reference

I det følgende gennemgås disse metoder med hensyn til de opgaver, hvor de adspurgte firmaer finder metoden relevant. Som nævnt er interviewene gennemført med fokus på afsætning. Derudover belyses problemstillinger og tvivlsspørgsmål i forbindelse med den enkelte metode. Generelt retter en del af tvivlen hos landinspektørerne sig mod en

eventuel kontrolmåling af en afsætning, hvorfor dette emne efterfølgende behandles på et overordnet niveau.

5.3.1 GPSnet

Nogle af de afsætningsopgaver, som Nellemann & Bjørnkjær vælger at løse ved hjælp af GPSnet, er afsætning af punkter til boreprøver til eksempelvis geologiske undersøgelser. Nøjagtighedskravet er i den forbindelse 20-30 cm i planen, hvilket GPSnet sagtens kan overholde. Derudover benyttes GPSnet i forbindelse med afsætninger af vandledninger og veje, hvor nøjagtighedskravet er 5 cm. Med hensyn til afsætninger, der relaterer sig til højden, benytter firmaet sig stort set ikke af GPSnet. I en anderledes form for afsætning benyttes GPSnet også i nogle tilfælde til fikspunktssøgning.

Afsætningsopgaverne udføres som regel af to personer. Den ene går med GPS-udstyret og finder punkterne, mens den anden bærer på træpæle og markerer punkterne. Med hensyn til de afsætningsfunktioner, der er indeholdt i GPS-softwaren benyttes som oftest punktafsætningsfunktionen. Derudover benyttes afsætning af punkter i forhold til en linie. Som eksempel på dette kan nævnes afsætning af en fladenivellementsline på en strand.

Endelig skal der her gøres opmærksom på, at Nellemann & Bjørnkjær i forbindelse med opmålinger, som skal ligge i System 34, altid sikrer nettilknytning ved at indmåle de nærmeste fikspunkter med GPS. Foretages en afsætning med RTK i System 34, transformeres punkterne i marken ved hjælp af de nærmeste fikspunkter.

Nellemann & Bjørnkjær vurderer nøjagtigheden ved brug af GPSnet til at være 2-3 cm i planen alt afhængig af, i hvilken afstand brugeren

befinder sig fra en referencestation. Hvorvidt afstanden til den virtuelle referencestation er af betydning, er ikke blevet undersøgt. Som regel opmåles eller afsættes der ikke i større afstand end 500 meter fra stedet, hvor initialiseringen er foretaget. Nøjagtigheden i højden er firmaet i højere grad i tvivl om, hvorfor de sjældent bruger RTK til afsætning i højden. Med hensyn til korrelation mellem GPS-målinger, mener Nellemann & Bjørnkjær, at målinger formodentlig er korrelerede indenfor ca. en time, men firmaet har svært ved at se denne viden anvendt i praksis. Blandt andet er der i en sag sjældent økonomi til at vente en time på at kunne gentage GPS-målingerne.

TCD mener ikke, at afstanden til den nærmeste referencestation er afgørende for nøjagtigheden, der over hele landet bør kunne holde sig under 1 cm i planen. Hvorvidt afstanden til VRS er af betydning, er der taget højde for i det omfang, at afstanden overstiger 10 km. I den situation flyttes VRS automatisk. Afstanden på de 10 km er fastlagt i samarbejde med Vejdirektoratet.

I højden er den vejledende spredning 2 cm, og TCD er gentagne gange fra kunders side blevet konfronteret med målinger, der ikke holder sig inden for denne grænse. TCD henviser dog til, at denne grænse både er teoretisk og empirisk fastlagt i forhold til en række forudsætninger, der formodentlig ikke har været opfyldt i de konkrete målesituationer. Eksempelvis kan målinger under træer eller i nærheden af bygninger fører til et dårligt resultat. Ønskes et bedre resultat, bør disse forudsætninger tages i betragtning. En anden løsning er at nedsætte den maksimale PDOP- eller RMS-værdi for herigennem at opnå et bedre resultat. Et tredje forslag drejer sig om at øge antallet af målte epoker.

TCD mener i øvrigt ikke, at et dårligere resultat end forventet kan skyldes, at GPSnet benyttes sammen med andet udstyr end Trimble, og henviser i den forbindelse til en endnu ikke offentliggjort undersøgelse foretaget af Vejdirektoratet. I undersøgelsen benyttes forskellige modtagere i kombination med GPSnet. Heller ikke omregningen fra EUREF89 til System 34 eller til DVR90 med hensyn til højden burde være den udslagsgivende faktor i tilfælde af et dårligere resultat end forventet.

5.3.2 GPS-Referencen

En stor del af de afsætningsopgaver, som Landinspektørgruppen løser ved hjælp af GPS-Referencen, er byggemodningsopgaver, hvor der blandt andet skal afsættes veje og kloakker i planen. I det hele taget benyttes GPS meget til de indledende arbejder i forbindelse med byggeri. Afsætning af punkter til boreprøver er et andet godt eksempel på opgaver, hvor nøjagtigheden for afsætning med RTK er tilstrækkelig. Med hensyn til koten foretager Landinspektørgruppen kun afsætninger med GPS i tilfælde, hvor afsætningen kan nøjes med at være meget grov.

Ulempen for GPS-Referencen er, at det nøjagtighedsmæssigt ikke er forsvarligt og nogle gange umuligt at opmåle og afsætte, hvis afstanden til referencestationen bliver for stor. Til de tilfælde har firmaet anskaffet sig en ekstra GPS, der kan anvendes som reference.

Afsætningsopgaver hos Landinspektørgruppen foretages som hos Nellemann & Bjørnkjær af to personer. En person koncentrerer sig om at finde frem til punktet, mens den anden person markerer punktet. Den funktion i GPS-softwaret, der hyppigst anvendes i forbindelse med afsætningsopgaver, er funktionen, der gør det muligt at afsætte parallelt med en anden linie. En tilsvarende funktion benyttes i forbindelse

med fladeniveauet, for derigennem at sikre et systematisk net. Derudover benyttes den gængse punktafsætningsfunktion, mens det en sjælden gang imellem udnyttes, at GPS-softwaret kan transformere lokale koordinater over i eksempelvis System 34.

I forbindelse med en opmåling, der skal foretages i System 34, sikrer Landinspektørgruppen altid nettilknytning ved at indmåle de nærmeste fikspunkter. Endvidere foretages der, når der skal afsættes i System 34, en transformation i marken. Transformationen tager udgangspunkt i en opmåling af de nærmeste fikspunkter.

Landinspektørgruppen vurderer, at nøjagtigheden i planen for GPS-Referencen er god indenfor en afstand af 5-10 km fra referencestationen, men nævner ingen værdi. Erfaringer viser, at nøjagtigheden i højden er ca. 2 cm indenfor en afstand af 2-3 km fra referencestationen. Landinspektørgruppen synes, at det kunne være interessant at holde den absolutte nøjagtighed op imod nabo nøjagtigheden punkter imellem. Derudover kunne det være interessant at undersøge nøjagtigheden over tid, idet det er af væsentlig betydning at kunne afsætte punkter, der relativt passer sammen med punkter afsat uger eller måneder forinden. I øvrigt efterlyser firmaet nogle anbefalinger i forbindelse med opmåling og afsætning med RTK.

5.3.3 Egen reference

Nellemann & Bjørnkjær benytter sig specielt af egen reference til afsætningsopgaver, hvor koten er af betydning. Er koten af væsentlig betydning benyttes dog aldrig GPS.

Landinspektørgruppen benytter sig af egen reference i de tilfælde, hvor afstanden til referencestationen er for stor. Ligesom Nellemann & Bjørnkjær sætter Landinspektørgruppen ikke kotemæssigt af med GPS, hvis koten er

af væsentlig betydning. Landinspektørgruppen efterlyser generelt anbefalinger omkring håndteringen af opmålings- og afsætningsopgaver.

5.3.4 Kontrolmåling

Hos Nellemann & Bjørnkjær udføres kontrol af afsætninger foretaget med GPS enten ved efterfølgende at måle de afsatte punkter ind med GPS eller ved at tvangsinitialisere i forbindelse med afsætningen. Punkterne måles ind umiddelbart efter, at de er afsat.

Landinspektørgruppen foretager en gang imellem en stikprøvekontrol ved hjælp af en totalstation, men kontrollerer ellers ikke afsætningerne. I fald afsætningen skal kontrolleres i forhold til forsikringsbestemmelser foregår det ved hjælp af totalstation. Landinspektørgruppen mener ikke, at målingerne bliver væsentlig bedre af at ringe op til en anden referencestation.

6

Problemformulering

Formålet med dette kapitel er at præsentere problemformuleringen, som skal danne udgangspunkt for hovedanalysen i projektet. Først samles der op på de væsentligste punkter fra den indledende analyse. Herefter foretages en afgrænsning af emner ud fra overvejelser omkring relevans og tilgang til emnerne. Endelig følger problemformuleringen, som uddybes i form af en række konkrete spørgsmål og problemstillinger.

6.1 Opsamling på den indledende analyse

Den initierende problemstilling lyder som følger:

„I hvilket omfang anvendes RTK-målemetoden og især RTK-tjenesterne, samt hvilke problemer er der i forbindelse hermed?“

Førend ovenstående spørgsmål er besvaret i den indledende analyse, er der gjort rede for en række grundlæggende begreber. Disse er alle af betydning for på et teoretisk og i nogle sammenhænge praktisk plan at kunne beskæftige sig med opmåling og afsætning med RTK. Herefter er den initierende problemstilling besvaret ved at lade brugere og udbydere af RTK-tjenesterne redegøre for deres erfaringer og problemer. Interviewene er gennemført med fokus på afsætning, idet brugen af RTK

til dette formål endnu ikke er så udbredt. Den begrænsede anvendelse kan eventuelt skyldes tvivl eller uafklarede forhold. Interviewene viser imidlertid, at tvivlen og de uafklarede forhold i lige så høj grad drejer sig om opmåling. Fokus i projektet er derfor udvidet til at omhandle både opmåling og afsætning med RTK-tjenesterne.

For at kunne opstille problemformuleringen er det vigtigt at få præciseret, til hvilke opgavetyper de privat praktiserende landinspektører anvender RTK-tjenesterne. Yderligere anses det også som væsentligt at opsummere, hvilke problemstillinger de privat praktiserende landinspektører står overfor i forbindelse med opmåling og afsætning med RTK-tjenesterne. I det følgende gennemgås derfor:

- Opgavetyper
- Problemstillinger

6.1.1 Opgavetyper

Hovedparten af de opgaver, hvor de interviewede personer bruger RTK-tjenesterne, er i forbindelse med systemtilknytning. Ved indmåling af fikspunkter i eksempelvis en matrikulær sag, oplever brugerne, at det er en klar fordel at benytte RTK-tjenesterne. Dette er tidsbesparende, ligesom den påkrævede nøjagtighed formodentlig overholdes ved brug af RTK-tjenesterne.

Opmåling med RTK anvendes også i forbindelse med fladenivellementer og udarbejdelse af situationsplaner. Til disse opgaver benyttes i nogle tilfælde RTK-tjenesterne og i andre tilfælde egen referencestation.

Det viser sig, at afsætning med RTK hovedsageligt anvendes til opgavetyper, hvor nøjagtighedskravet i planen samt højden ikke er af afgørende betydning. Disse opgavetyper kan for eksempel være afsætning i forbindelse med af-

gravning af jord og afsætning af boreprøver, hvor nøjagtighedskravet er lavt. Yderligere vil eventuelle grove fejl ikke være bekostelige i modsætning til opgaver i forbindelse med byggeri, hvor grove fejl kan beløbe sig til store summer.

Måden, hvorpå afsætningsopgaverne gribes an og gennemføres, er forskellig blandt de adspurgte. Forskellen skal formodentlig i højere grad tilskrives en tvivl omkring afsætning med RTK end forskellen på RTK-tjenesterne. Eksempelvis gennemføres kontrollen, hvis den udføres, nogle gange med RTK, mens der andre gange benyttes totalstation.

6.1.2 Problemstillinger

Opmålings- og afsætningsopgaver og den måde, de foretages på, er et udtryk for de problemstillinger, brugerne af RTK-tjenesterne oplever. Problemstillingerne omhandler følgende emner:

- Nøjagtighed
- Afstand til referencestation
- Afsætningsmetoden
- Initialisering samt epoker
- Råd og vejledning
- Udstyr

Ovenstående emner gennemgås i det følgende.

Nøjagtighed

Brugerne er generelt meget i tvivl om nøjagtigheden af RTK-tjenesterne. Dette drejer sig både om den absolutte nøjagtighed af de enkelte punkter, men også præcisionen af de enkelte punkter.

I forbindelse med den absolutte nøjagtighed kan der være tale om nøjagtigheden i System 34 eller nøjagtigheden i UTM/EUREF89.

Brugerne er også i tvivl om nabonøjagtigheden af punkter indmålt med GPS. Med nabonøjagtighed menes nøjagtigheden mellem to punkter. Dimensionen mellem to punkter skal således stemme overens med den planlagte dimension. Yderligere spiller korrelationen mellem GPS-målinger formodentlig en rolle ved nabonøjagtigheden.

Afstand til referencestation

Der er delte meninger blandt de interviewede parter om, hvorvidt de ovenstående punkter afhænger af afstanden til nærmeste referencestation.

Yderligere er der i forbindelse med opgaver udført ved brug af GPSnet tvivl om, hvilken indflydelse afstanden til den virtuelle referencestation har på nøjagtigheden.

Initialisering samt epoker

Afstanden til nærmeste referencestation har yderligere indflydelse på tiden, som GPS-udstyret er om at initialisere.

Hvorvidt nøjagtigheden kan forbedres ved at øge antallet af epoker, der måles, er der ligeledes tvivl om. En anden måde at forbedre nøjagtigheden eller kontrollere målingen på er at initialisere en ekstra gang. Endvidere er brugerne i tvivl om, hvorvidt opmålingen og afsætningen kan gentages med det samme resultat efter en kortere eller længere periode.

Afsætningsmetoden

Afgørende for nøjagtigheden af en afsætning er også måden afsætningen foretages på. Der kan anvendes flere forskellige afsætningsmetoder. Eksempelvis kan afsætningen foretages med eller uden brug af støttestokke.

Råd og vejledning

I det hele taget savner brugerne nogle sikre

retningslinier og anbefalinger i forbindelse med opmåling og afsætning med RTK-tjenesterne. Specielt hvilke forbehold, der skal tages i forbindelse med opmåling i nærheden af træer eller bygninger. Vil en ændring af maksimal PDOP- eller RMS-værdi kunne afhjælpe eventuelle problemer og sikre en bedre nøjagtighed ved opmålingen? Endvidere efterlyser brugerne sikre måder at kontrollere opmålings- og afsætningsopgaver på.

Udstyr

Derudover er der tvivl om, hvorvidt nøjagtigheden af RTK-tjenesterne er afhængig af, hvilket udstyr, der benyttes i kombination med tjenesterne. Hjælpefunktionerne til afsætning afhænger af udstyret, men benyttes kun, formodentlig som følge af manglende erfaring med disse, i begrænset omfang.

Ovenstående emner spænder vidt indenfor opmåling og afsætning med RTK-tjenesterne. Alt imens nogle af emnerne går fint i spænd skiller andre sig ud. I det følgende foretages en afgrænsning i forhold til emnerne.

6.2 Afgrænsning

Afgrænsningen foretages ud fra en vurdering af problemstillingens relevans. Endvidere sorteres visse af problemstillingerne fra, da disse er forholdsvis komplekse, og i sig selv indeholder stof til et helt projekt.

Ud fra ovenstående betragtninger vurderes en undersøgelse af afstanden til den virtuelle referencestation ikke at være relevant for nøjagtigheden. Årsagen hertil er, at det som regel ikke er problematisk at foretage en ny initialisering i tilfælde af, at den oprindelige initialisering er foretaget langt væk fra stedet, hvor punkterne skal opmåles eller afsættes.

Endvidere vurderes en undersøgelse af den

maksimale PDOP- eller RMS-værdis betydning for nøjagtigheden i tilfælde af opmåling i nærheden af træer eller bygninger at være problematisk at sætte op. Dette skyldes, at resultatet af undersøgelsen i alle tilfælde konkret vil knytte sig til et specifikt område med en specifik kombination af træer og bygninger.

Der gennemføres ikke en undersøgelse af reinitialisering som kontrol af en måling. I forbindelse med projektet vil denne procedure blot blive brugt for at sikre det bedste datagrundlag ved dataindsamlingerne.

Betydningen af antallet af epoker for nøjagtigheden undersøges heller ikke. Tidligere forsøg har vist, at antallet af epoker ikke er afgørende for nøjagtigheden, når blot antallet overstiger 10 epoker, jf. 7.1.3 8. semesterprojekt 2001.

Endelig behandles hjælpefunktionerne i GPS-modtageren i forbindelse med afsætning ikke. Det er vanskeligt at konstruere en test af sådanne funktioner, da de let bliver en subjektiv bedømmelse af de enkelte funktioners anvendelsemuligheder. Endvidere rådes der kun over en Leica SR530 GPS-modtager på AAU, hvorved en sådan undersøgelse vil blive meget specifik og kun omhandle en type GPS-modtager.

6.3 Problemformulering

På baggrund af den indledende analyse og ovenstående afgrænsning kan problemformuleringen formuleres som følger:

"Hvilke problemer samt uafklarede forhold er der omkring opmåling og afsætning med RTK-tjenesterne, og hvordan skal brugeren forholde sig til disse i forbindelse med procedurer og kontrol?"

Det undersøges, hvorledes problemer samt uafklarede forhold identificeret gennem den indledende analyse, har betydning for opmåling og afsætning med RTK-tjenesterne. Undersøgelserne vil efterfølgende resultere i en række anbefalinger og retningslinier, der relaterer sig til procedurer og kontrol i forbindelse med brugen af RTK-tjenesterne og RTK-måling i al almindelighed.

6.3.1 Uddybende spørgsmål

I forlængelse af problemformuleringen og den indledende analyse kan der formuleres en række uddybende spørgsmål:

A. Hvad betyder afstanden til referencestationen for nøjagtigheden af en opmåling samt initialiseringstiden ved brug af RTK-tjenesterne?

Tidligere test har vist, at afstanden til referencestationen spiller en rolle i forbindelse med nøjagtigheden af en opmåling. Hvilken indflydelse har afstanden til referencestationen på:

- den absolutte nøjagtighed
- præcisionen
- nabonøjagtigheden
- initialiseringstiden

B. Hvilken betydning har GPS-udstyrets omregnings- og transformationsrutiner for nøjagtigheden af en opmåling eller afsætning?

I mange tilfælde er de punkter, der skal opmåles og afsættes, koordineret i System 34. I disse tilfælde kan GPS-udstyrets omregningsrutiner spille en rolle, idet omregningen til System 34 ikke kan foregå uden, at der sker en forvanskning. I andre tilfælde foretages en transformation af GPS-målingerne. Hvilken betydning får ovenstående forhold for nøjagtigheden af opmålingen og afsætningen?

C. I hvilket omfang er punkter indmålt med RTK korrelerede?

I forbindelse med GPS-måling tales der om tidsafhængig korrelation af målinger. I hvor høj grad er målingerne dette, og indenfor hvor stort et tidsinterval er de det?

D. Hvordan opnås rent praktisk det bedste resultat i forbindelse med afsætning?

En afsætning med RTK kan foretages af en eller flere personer ved hjælp af forskellige teknikker. Med hvilke teknikker opnås det bedste resultat, og hvilken rolle spiller teknikken i forbindelse med nøjagtigheden af afsætningen?

E. Er RTK-tjenesterne udstyrsafhængige?

Er nøjagtigheden af målinger foretaget med RTK-tjenesterne påvirket af, hvilket GPS-udstyr der anvendes i kombination med den enkelte RTK-tjeneste.

6.3.2 Definitioner

På baggrund af ovenstående spørgsmål er der opstået et behov for at præcisere definitionen af en række centrale begreber, som vil blive anvendt i dette projekt. De centrale begreber er:

- Absolut nøjagtighed
- Præcision
- Nabonøjagtighed

Begreberne vil blive anvendt løbende i den resterende del af projektet, og de er derfor vigtige at få præciseret.

Absolut nøjagtighed

Den absolutte nøjagtighed defineres i dette projekt som spredningen af et antal målinger i forhold til en sand koordinat. Den absolutte nøjagtighed er således et udtryk for den gennemsnitlige afvigelse af et antal målinger fra en sand koordinat. Begrebet vil blandt andet blive brugt i forbindelse med beregning af nøjagtigheden for de to RTK-tjenester. I tilfælde hvor ikke andet er angivet, er der 68% sandsynlighed for, at målingerne ligger inden for denne spredning.

Præcision

Præcisionen defineres i dette projekt som den gennemsnitlige afvigelse for et antal målinger i forhold til middelværdien af målingerne. Præcisionen er således et udtryk for, hvor godt et antal målinger indbyrdes stemmer overens. I tilfælde hvor ikke andet er angivet, er der 68% sandsynlighed for, at målingerne ligger inden for denne spredning.

Nabonøjagtighed

Nabonøjagtigheden defineres i dette projekt som nøjagtigheden af dimensionen mellem to punkter. Ud fra to koordinater kan dimensionen mellem disse bestemmes, og spredningen for denne dimension er udtryk for nabonøjagtigheden.

7

Præsentation af test

Formålet med dette kapitel er at præsentere de planlagte test. Testene er formuleret ud fra spørgsmålene i problemformuleringen og skal belyse disse. Yderligere beskrives tidligere test af RTK-tjenesterne. Kapitlet indeholder to afsnit:

- Tidligere test af RTK-tjenesterne
- Formulering af test

Først gennemgås tre tidligere gennemførte test af de to RTK-tjenester, hvor de væsentligste resultater præsenteres. Derefter beskrives, hvorledes spørgsmålene fra problemformuleringen har ført til de planlagte test. Endelig sammenfattes samtlige test i et skema, der fungerer som oversigt over de planlagte test.

7.1 Tidligere test af RTK-tjenesterne

RTK-tjenesterne i Danmark er gennem tiden blevet testet flere gange. I 2001 blev der gennemført en række test af RTK-tjenesterne. Tre af disse undersøges i det følgende. KMS stod bag den ene test, mens to projektgrupper på henholdsvis landinspektøruddannelsens 8. og 10. semester gennemførte de andre. KMS har efterfølgende fulgt op på sin test i 2002, hvor yderligere målinger er foretaget. De tre test indeholder undersøgelser af nøjagtigheden ved de to RTK-tjenester.

7.1.1 Test udført af KMS

I efteråret 2000 og sommeren 2001 udførte KMS i samarbejde med Rådet for Danmarks

Geografiske Referencenet en række forsøg med RTK-tjenesterne. Formålet med forsøgene var at undersøge tjenesterne og deres nøjagtighed. Yderligere var det planen at kunne rådgive brugerne af RTK-tjenesterne ud fra resultaterne af testen.

Testen blev gennemført i et område mellem Århus og Randers, hvor KMS havde etableret et testfelt med optimale forhold for opmåling med GPS. I 2002 blev testen suppleret med nye målinger. Testfeltet bestod af 12 punkter, som var bestemt i EUREF89, og indmålt med statisk måling. Punkterne var godt funderede og placeret, så måling til fri horisont var mulig. Testen var opbygget således, at det var muligt at undersøge nøjagtigheden for hver RTK-tjeneste ved forskellige afstande til referencestationerne. Det var således muligt at undersøge, om nøjagtigheden ved RTK-tjenesterne afhang af afstanden til referencestationerne. Afstandene til referencestationerne varierede fra 3-30 km for GPSnet og 3-24 km for GPS-Referencen.

[Madsen, 2003, s. 1-3]

Måleprocedure

Hvert af de 12 punkter blev besøgt 15 gange. For at sikre så uafhængige målinger som muligt, blev der kørt i runder. Ved kørsel i runder besøges alle 12 punkter én gang i løbet af én runde, og der blev således kørt 15 runder. Kørsel i runder betød yderligere, at punkterne blev besøgt på forskellige tidspunkter.

Opmålingsproceduren for de to RTK-tjenester var ikke helt ens for alle 12 punkter. I forbindelse med GPSnet blev samtlige punkter opmålt. Ved opmåling med GPS-Referencen blev opmåling til nærmeste referencestation foretaget i otte af punkterne. I fire af disse punkter blev der yderligere ringet op til en anden referencestation, for at få målinger på

forskellige afstande til referencestationen. Dette betød, at de resterende fire punkter kun blev opmålt med GPSnet.

Til opstilling af GPS-antennen i punkter nær jorden blev der anvendt en to-meter stok med snapstativ, jf. figur 7.1. Ved postamenter blev der anvendt malkeskammel. KMS skønnede, at centreringen var bedre end 5 mm i planen og bedre end 2 mm i højden.



Figur 7.1: Opstilling af GPS-antenne med snapstativ. [Madsen, 2003, s. 1]

GPSnet

Ved opmåling med GPSnet blev der anvendt en Trimble 5700 GPS-modtager. Modtageren var konfigureret til at lagre observationer, hvor PDOP var under 6, den plane nøjagtighed under 1,5 cm og højden under 2 cm. Yderligere var elevationsmasken sat til 13 grader. Registreringstiden i forbindelse med en opmåling var minimum 5 sekunder.

Absolut nøjagtighed - 1σ

Resultatet viste en absolut nøjagtighed i planen på 20 mm og 27 mm i højden, jf. figur 7.2. Den absolutte nøjagtighed samt præcisionen er udregnet ved hjælp af de angivne formler i 9.2.1 Teori. Begge værdier er angivet som 1σ , hvilket svarer til 68% konfidens.

GPSnet	Plan	Højde
1·σ	[mm]	[mm]
Præcision	17	23
Abs. nøjagtighed	20	27

Figur 7.2: Præcision og absolut nøjagtighed opnået med GPSnet.

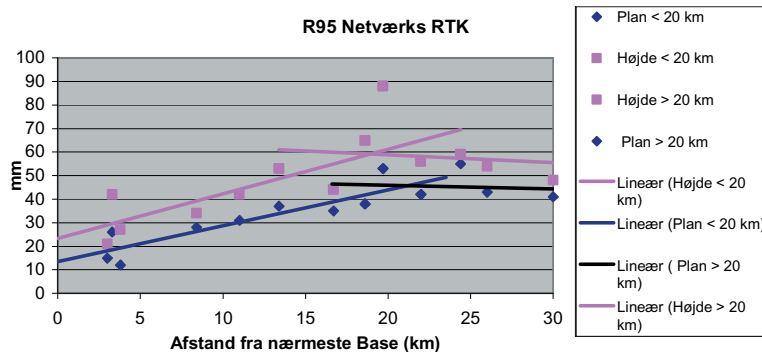
Absolut nøjagtighed - R95

Der er også lavet en analyse af data ved hjælp af R95-værdier. R95-værdierne er beregnet ved hjælp af formel 9.4 og 9.5, jf. 9.2.1 Teori. De centrale værdier fremgår af figur 7.3.

R-95 værdier	0 - 20 km		> 20 km
	Grundfejl [mm]	Afstandsafhængig fejl [ppm]	
Plan	13	1,5	ca. 45
Højde	23	1,9	ca. 57

Figur 7.3: Afstandsafhængig fejl ved GPSnet angivet med R95-værdier.

Det fremgår, at grundfejlen ved GPSnet var 13 mm i planen og 23 mm i højden. Dette betyder, at de absolutte nøjagtigheder forringes som følge af en forøgelse af afstanden til referencestationen. Dette skyldes, at der i forbindelse med VRS-teknikken sker en interpolationsfejl, som stiger med afstanden til nærmeste referencestation, jf. Appendiks A, s. 14. Af figur 7.4 fremgår det, at nøjagtigheden forringes lineært indtil en afstand af ca. 20 km fra referencestationen. Herefter forbliver den tilnærmelsesvis konstant. Af figuren fremgår yderligere, at højden var dårligere bestemt end planen.



Figur 7.4: Afstandsafhængig fejl ved GPSnet angivet med R95-værdier.

Ud fra de indsamlede data var det ikke muligt at konstatere nogen sammenhæng mellem nøjagtighed, kvalitet samt antallet af satellitter. Gennemsnittet af initialiseringstiden var 50 sekunder. Initialiseringstiden blev defineret, som tiden fra GPS-modtageren blev tændt, til opmålingen kunne påbegyndes.

[Madsen, 2003, s. 6-7, 19]

GPS-Referencen

Ved opmåling med GPS-Referencen blev data indsamlet med en Leica SR530 GPS-modtager. Modtageren var konfigureret til kun at lagre positioner, når 3D-præcisionen var bedre end 3 cm. Elevationsmasken var sat til 10 grader og registreringstiden for en opmåling var minimum 5 sekunder.

Absolut nøjagtighed - 1·σ

Resultatet viste, at den absolutte nøjagtighed i planen var 21 mm og 29 mm i højden, jf. figur 7.5.

GPS-Referencen	Plan	Højde
1·σ	[mm]	[mm]
Præcision	20	28
Abs. nøjagtighed	21	29

Figur 7.5: Præcision og absolut nøjagtighed opnået med GPS-Referencen.

Værdierne er angivet som 1·σ, hvilket svarer til 68% konfidens. Værdierne er beregnet ved hjælp af formlerne i 9.2.1 Teori.

Absolut nøjagtighed - R95

Ud fra data fra GPS-Referencen blev der også bestemt R-95 værdier. De centrale værdier er angivet i figur 7.6.

R-95 værdier	0 - 15 km		> 15 km
	Grundfejl [mm]	Afstandsafhængig fejl [ppm]	[mm]
Plan	14	2,9	ca. 45
Højde	11	4,0	ca. 75

Figur 7.6: Afstandsafhængig fejl ved GPS-Referencen angivet med R95-værdier.

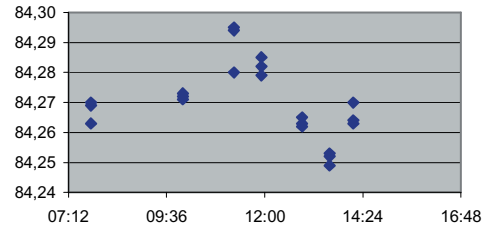
Grundfejlen i planen var 14 mm, og grundfejlen i højden var 11 mm. I forbindelse med GPS-Referencen var der også tale om en afstandsafhængig fejl. Det fremgår af figur 7.7, at der var en lineær sammenhæng for målingerne ud til 15 km. For målinger over 15 km var der yderligere en lineær tendens. Det fremgår også af figur 7.7, at højden er dårligere bestemt end planen. Endelig blev den gennemsnitlige initialiseringstid bestemt til 47 sekunder.

[Madsen, 2003, s. 11-12, 20]

Gentagelsestest

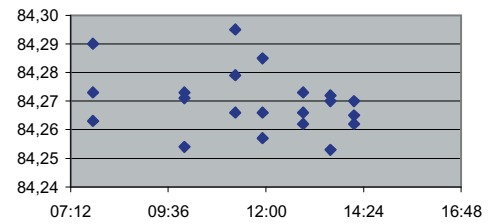
Ved hjælp af en af RTK-tjenesterne testede KMS også, om GPS-målinger foretaget lige efter hinanden var korrelerede i højden. Der blev målt tre gange i ét punkt med 20 sekunders interval med samme initialisering. Punktet blev opmålt med denne procedure i alt syv gange i løbet af en dag. Testen viste, at punkterne var

stærkt korrelerede. Figur 7.8 illustrerer korrelationen i højden ved hver af de syv målinger.



Figur 7.8: Tre målinger udført efter hinanden med samme initialisering.

Derefter blev punktet målt tre gange efter hinanden med reinitialisering mellem hver måling. Denne test viste, at disse punkter stadig var korrelerede men ikke i samme grad, jf. figur 7.9. [Madsen, 2003, s. 16]

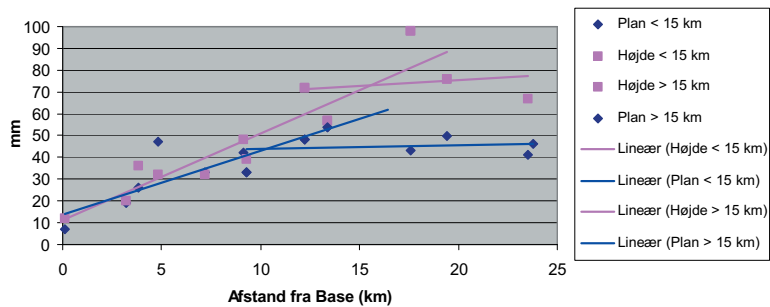


Figur 7.9: Tre målinger udført efter hinanden med forskellig initialisering.

Generelle bemærkninger

Resultatet for GPSnet er ikke længere retvisende, da softwaren på den centrale computer er blevet opdateret flere gange siden, hvilket ifølge udbyderne har forbedret nøjagtigheden væsentligt.

R95 - Enkeltstations RTK



Figur 7.7: Afstandsafhængig fejl ved GPS-Referencen angivet som R95-værdier.

I forbindelse med beregningerne viste der sig en tendens til systematiske forskydninger i testfeltet ved Århus. Middeltallet for målingerne med begge RTK-tjenester lå placeret samme sted og var forskudt 7-10 mm fra de officielle koordinater. Denne forskydning kunne skyldes kvaliteten af REFDC-nettet omkring Århus. [Madsen, 2003, s. 1 og 17]

7.1.2 Afgangprojekt 2001

I et afgangprojekt fra 2001 gennemførte en projektgruppe en test af de to RTK-tjenester. Formålet med testen var at undersøge den afstandsafhængige fejl, den absolutte nøjagtighed, gentagelsesnøjagtigheden samt initialiseringstiden for de to RTK-tjenester. Testen blev delt op i to testfelter; et regionalt og et lokalt.

Regionalt testfelt

Det regionale testfelt skulle undersøge den afstandsafhængige fejl og den absolutte nøjagtighed ved de to RTK-tjenester. Testfeltet bestod af REFDC- og GI-punkter beliggende nord for Aalborg. REFDC-punkterne var tidligere 1. ordens punkter og var således både koordineret i System 34 og EUREF89. GI-punkterne blev opmålt ved hjælp af statisk måling. Derefter blev de koordineret i System 34 i forhold til REFDC-punkterne med en nøjagtighed på subcentimeter niveau. Der var således ikke registerkoordinaterne for GI-punkterne, der blev anvendt, idet disse ikke besad den påkrævede nøjagtighed. [Andersen, 2001, s. 45-46]

Punkterne lå langs hovedvejen til Hjørring i en afstand af 5-40 km fra GPS-Referencens referencestation i Aalborg. Intervallet mellem punkterne var 5-10 km.

I punkterne blev der målt i 10 sekunder med et epokeinterval på ét sekund. Ved centrering over punkterne anvendtes stativ samt fodstykke for derved at minimere centreringsspredningen.

Der blev målt fem uafhængige målinger til hvert punkt med hver RTK-tjeneste. Mellem målingerne blev der foretaget reinitialisering.

Den absolutte nøjagtighed for GPSnet blev bestemt til 2 cm i planen, mens den for højden var 4 cm, jf. figur 7.10. For GPS-Referencen blev der opnået samme resultater indenfor en afstand af 10 km. På de længere afstande havde den afstandsafhængige fejl stor indflydelse, og nøjagtigheden var noget dårligere.

Absolut nøjagtighed	Plan [mm]	Højde [mm]
GPSnet	20	40
GPS-Referencen 0 - 10 km	20	40

Figur 7.10: Absolut nøjagtighed opnået ved begge tjenester. For GPS-Referencen gælder værdierne i intervallet 0-10 km.

Resultaterne ligner meget dem, som KMS også er nået frem til. Den plane nøjagtighed er den samme, mens KMS fik en nøjagtighed i højden på ca. 30 mm ved begge RTK-tjenester, hvilket er 10 mm bedre end ovenstående resultat.

Ved undersøgelse af den afstandsafhængige fejl for GPS-Referencen viste der sig at være afvigelser i planen og i højden på henholdsvis 12 cm og 18 cm for punkter over 30 km fra referencestationen.

[Andersen, 2001, s. 66-67]

Lokalt testfelt

Formålet med det lokale testfelt var at undersøge initialiseringstiden samt gentagelsesnøjagtigheden for de to RTK-tjenester. Gentagelsesnøjagtigheden kan sidestilles med præcisionen. Testfeltet var placeret ved Aalborg Universitet og bestod af 24 veldefinerede punkter i form af brønddæksler. Hvert punkt blev opmålt med ni uafhængige målinger for hver RTK-tjeneste. Ud fra en midling af de gennemførte målinger

blev der dannet en sand koordinat. [Andersen, 2001, s. 53]

Gentagelsesnøjagtigheden i planen for GPSnet var 22 mm, mens den for GPS-Referencen var 13 mm, jf. figur 7.11. I højden var gentagelsesnøjagtigheden 61 mm og 17 mm for henholdsvis GPSnet og GPS-Referencen.

Gentagelsesnøjagtighed	Plan [mm]	Højde [mm]
GPSnet	22	61
GPS-Referencen	13	17

Figur 7.11: *Gentagelsesnøjagtigheder opnået i det lokale testfelt.*

Resultaterne afviger lidt fra KMS' resultater. KMS' fik 17 mm og 23 mm i henholdsvis plan og højde ved GPSnet og 20 mm samt 28 mm ved GPS-Referencen. I det lokale testfelt lå hovedparten af initialiseringstiderne på under 60 sekunder for GPSnet. For GPS-Referencen lå initialiseringstiderne på 40-50 sekunder. Disse resultater stemmer overens med KMS' resultater. [Andersen, 2001, s. 65, 70]

Generelle bemærkninger

Der var en del problemer med GPSnet, som skyldtes, at systemet var i en etableringsfase. En del af de fejl er forlængst blevet rettet, og ny software er installeret på den centrale computer. Testen giver således ikke længere et retvisende billede af nøjagtigheden ved GPSnet.

7.1.3 8. semesterprojekt 2001

Ud over afgangprojektet fra 2001 blev der også gennemført en test af de to RTK-tjenester af en gruppe på 8. semester i 2001. Denne test blev gennemført i samme regionale testfelt, som anvendtes i afgangprojektet, idet projektgrupperne samarbejdede om opmålingen af dette.

Projektet omfattede en række forskellige test. Det blev blandt andet undersøgt om antallet

af epoker var afgørende for nøjagtigheden ved måling med begge RTK-tjenester. Der blev foretaget målinger med epokeintervaller fra 10 til 75. Undersøgelsen viste, at antallet af epoker ikke er afgørende for nøjagtigheden.

Derudover blev der foretaget en test, hvor nøjagtigheden ved begge RTK-tjenester blev undersøgt om dagen og om natten. Denne test viste, at nøjagtigheden ved begge RTK-tjenester var bedst om natten. Dette skyldtes, at målingerne i dagtimerne var påvirket af forholdene i ionosfæren.

[Slot, 2001, s. 10-11, 32-34]

7.2 Formulering af test

Ud fra de udarbejdede spørgsmål i problemformuleringen og de tidligere gennemførte test af de to RTK-tjenester er der formuleret otte test.

7.2.1 Test udledt af spørgsmål A

Ud fra spørgsmål A, som omhandler nøjagtighed og afstand til referencestation, er der udledt en række test.

Første test indeholder bestemmelse af den absolutte nøjagtighed for begge RTK-tjenester ved forskellige afstande til de fysiske referencestationer. I anden test fastlægges den tilsvarende præcision af RTK-tjenesterne. I de to test beregnes spredningerne i planen og i højden. Spredningerne er opdelt i planen og højden af flere årsager. Først og fremmest er højden som regel noget dårligere bestemt end planen, og ønskes derfor behandlet isoleret. Yderligere er der i tidligere test på området, ligeledes foretaget en opdeling i plan og højde.

Tredie test undersøger nabonøjagtigheden af punkter indmålt på samme initialisering,

og endelig beregnes den gennemsnitlige initialiserings- og fastsættelsestid for begge RTK-tjenester i en fjerde test.

7.2.2 Test udledt af spørgsmål B

Spørgsmål B omhandler opmåling og afsætning i forhold til fikspunkter i System 34. I nogle tilfælde sker opmåling og afsætning direkte i System 34 i forhold til referencestationerne og andre gange i forhold til fikspunkter i nærområdet. Ved opmåling og afsætning i forhold til referencestationen foretager GPS-modtageren omregning fra EUREF89 til System 34. Ved opmåling og afsætning i forhold til fikspunkter i nærområdet foretager GPS-modtageren en transformation mellem de to koordinatsystemer. På baggrund af spørgsmål B er der udarbejdet en test, der dels undersøger GPS-modtagerens omregningsrutiner mellem EUREF89 og System 34 og dels undersøger GPS-modtagerens transformationsrutiner ved opmåling og afsætning.

7.2.3 Test udledt af spørgsmål C

I spørgsmål C sættes der spørgsmålstegn ved, om der er korrelation ved punkter opmålt eller afsat efter hinanden med GPS. Der er planlagt en test, som skal undersøge, om der er korrelation og i givet fald fastlægge over hvor lang tid, der er tale om denne korrelation.

7.2.4 Test udledt af spørgsmål D

Spørgsmål D omhandler, hvor godt der kan afsættes med GPS ved at ændre på omhyggeligheden af afsætningen. Ud fra dette spørgsmål er der opbygget en test, hvor punkter afsættes med forskellige teknikker for at fastsætte nøjagtigheden ved forskellige afsætningsmetoder.

7.2.5 Test udledt af spørgsmål E

Spørgsmål E lyder, "Er RTK-tjenesterne udstyrsafhængige?". Er der forskel på en opmåling foretaget med en Leica GPS ved brug af GPS-Referencen og en opmåling foretaget med Trimble GPS ved brug af GPS-Referencen? Der er planlagt en test, som skal undersøge, om der er tale om en udstyrsafhængighed ved måling med en tjeneste. Testen gennemføres for både GPS-Referencen og GPSnet med Leica og Trimble modtagere. Nøjagtigheden af et indmålt punkt sammenlignes, og det kan konkluderes, om der er udstyrsafhængighed.

7.2.6 Oversigt over planlagte test

På baggrund af de fem spørgsmål er der i alt planlagt otte test. Figur 7.12 er en oversigt over de otte test. For en mere uddybende forklaring af de otte test henvises til de enkelte afsnit i kapitel 9 samt kapitel 10. Inden behandlingen af testene påbegyndes, behandles generelle emner af relevans for samtlige test i næste kapitel.

	Indhold af test
Test 1	Absolut nøjagtighed og indflydelsen af afstanden til referencestationen på denne.
Test 2	Præcisionen og indflydelsen af afstanden til referencestationen på denne.
Test 3	Nabonøjagtighed og indflydelsen af afstanden til referencestationen på denne.
Test 4	Initialiserings- og fastsættelsestid og indflydelsen af afstanden til referencestationen på denne.
Test 5	Undersøgelse af korrelation ved RTK-måling.
Test 6	Undersøgelse af udstyrsafhængighed ved RTK-tjenesterne.
Test 7	Nøjagtigheden af GPS-udstyrets omregnings- samt transformationsrutiner.
Test 8	Fastsættelse af fejlbidrag som følge af måden der afsættes på.

Figur 7.12: Oversigt over rækken af test som gennemføres.

8

Rammer for test

I dette kapitel vil diverse generelle temaer af relevans for testene blive gennemgået. Disse generelle temaer er:

- Opdeling af testene
- Udstyr samt software
- Pålidelighed af testene
- Dokumentation af test

Først gennemgås en opdeling af testene i et regionalt samt et lokalt testområde. Efterfølgende beskrives det udstyr samt software, som anvendes gennem alle testene. Herefter vil et afsnit omkring testteori omhandle pålidelighed af testene. Pålidelighed er i den forbindelse et spørgsmål om antallet af overbestemmelser i de

enkelte test. Slutteligt opstilles en standard for, opbygningen af de enkelte testafsnit.

8.1 Opdeling af testene

Testenes forskellige karakter medfører, at det er nødvendigt at udføre dem to geografisk forskellige steder. Testene opdeles derfor i et regionalt samt et lokalt testområde.

8.1.1 Regionalt testområde

I forbindelse med Test 1, 2, 3 samt 4 undersøges indflydelsen af afstanden til referencestationen i forbindelse med absolut nøjagtighed, præcision, nabonøjagtighed samt initialiseringstid. Denne indflydelse skal undersøges i forskellige afstande til referencestationen. Det er derfor

nødvendigt at lokalisere et testområde, som sikrer en tilfredsstillende fordeling af de indmålte punkter i forhold til referencestationen. Da Test 1, 2, 3 samt 4 udføres for begge RTK-tjenester, skal der udvælges en referencestation for GPS-Referencen samt en referencestation for GPSnet. Da GPSnet består af et net af referencestationer, kan der ikke direkte vælges en referencestation. Det, som beteges den udvalgte referencestation, er den nærmeste referencestation i forbindelse med måling. Det er til disse referencestationer indflydelsen af afstanden skal undersøges.

Endvidere skal Test 1 gennemføres i et landsdækkende koordinatsystem, idet den absolutte nøjagtighed ønskes undersøgt. Ved at gennemføre testen i et landsdækkende koordinatsystem kan koordinaterne til de indmålte punkter sammenholdes med de officielle koordinater. I 9 *Regional test* kommer en uddybende forklaring af, hvilket landsdækkende koordinatsystem der anvendes.

Testene 1, 2, 3 samt 4 skal således udføres på det samme geografiske sted. I 9 *Regional test* gennemgås det regionale testområde yderligere.

8.1.2 Lokalt testområde

I Test 5, 7 samt 8 undersøges henholdsvis korrelation, omregnings- og transformationsrutiner samt forskellige afsætningsmetoder. Disse test kan praktisk taget udføres overalt, hvor der er gode forhold for GPS-måling. Det er ikke nødvendigt at kende til de sande værdier i form af officielle koordinater. Af praktiske årsager er det derfor valgt at udføre disse test i området omkring Aalborg Universitet.

I forbindelse med Test 6, som omhandler udstyrsafhængighed, er det nødvendigt at anvende et fikspunkt, som er koordineret i et

landsdækkende koordinatsystem. Herved vil det være muligt at sammenholde koordinaterne fra de indmålte punkter med den officielle koordinat. I 10 *Lokal test* gennemgås det lokale testområde yderligere.

8.2 Udstyr samt software

I forbindelse med udførelsen af testene er der anvendt GPS-udstyr fra Leica Geosystems. De anvendte GPS-modtagere er af mærket SR530, mens det anvendte software er programmet SKI-Pro version 3.0. Alle informationer i dette afsnit er hentet fra en brochure på Leicas hjemmeside [Leica, 2001].

På figur 8.1 er det muligt at se de enkelte dele, som samlet udgør hovedkomponenterne i det anvendte GPS-udstyr.



Figur 8.1: Hovedkomponenterne i System 500. Mobilmodemet Siemens TC35 mangler dog..

8.2.1 Modtager

Leica SR530 er en 24-kanals dobbeltfrekvent GPS-modtager. SR530 er ikke længere den nyeste type GPS, som forhandles af Leica Geosystems, men er formodentlig stadig den mest udbredte af Leicas GPS-modtagere blandt de privat praktiserende landinspektører i Danmark. På figur 8.2 er det muligt at iagt-

Målemetode	Specifikationer SR530
Statisk	3 mm + 0,5 ppm
Hurtig statisk	5 mm + 0,5 ppm
RTK	10 mm + 1,0 ppm

Figur 8.2: Nøjagtigheder med SR530 GPS-modtager efter initialisering..

tage, hvilke nøjagtigheder der kan forventes ved RTK-måling med Leica's GPS-udstyr.

8.2.2 Terminal

Sammen med SR530 modtageren anvendes en terminal. Denne terminal, som kaldes SR500, indeholder både display samt tastatur. Selve modtageren styres ved hjælp af denne terminal. Endvidere er det også muligt fra terminalen at overvåge målingen. Det vil sige, at det på displayet under en måling blandt andet er muligt at se, hvilke satellitter der måles til samt batteristatus. Endelig er det også i terminalen, at blandt andet punktnummer og antennehøjde indtastes, inden målingen påbegyndes.

Terminalen kan sættes direkte på modtageren. Det er dog også muligt at forbinde modtager og terminal ved hjælp af et kabel. Dette muliggør måling, hvor terminalen holdes i hånden samt måling, hvor terminalen sættes fast på to-meter stokken.

8.2.3 Modem

Det er muligt både at forbinde et radiomodem samt et GSM mobilmodem til SR530. Når et mobilmodem tilknyttes anvendes normalt et modem af mærket Siemens M20T. På Aalborg Universitet anvendes dog et modem af mærket Siemens TC35.

8.2.4 Antenne

Den anvendte antenne er en AT502 antenne, som er standard antenne til SR530. Selve designet af antennen er udført således, at fasevandringer er minimal, hvilket medfører, at en horisontal orientering af antennen ikke er nødvendig.

8.2.5 Konfigurationer

Det anvendte SIM-kort er både tilmeldt GPS-Referencen og GPSnet. Der kan således etableres forbindelse til begge RTK-tjenester uden, at

det er nødvendigt at skifte SIM-kort. I testene vil der kun blive anvendt mobilmodem. Det vil sige, at GPS-Referencen ikke testes i forbindelse med anvendelse af radiomodem.

I GPS-modtageren skal der yderligere udfærdiges konfigurationer for måling med hver RTK-tjeneste. Disse konfigurationer skal indeholde oplysninger, som passer til henholdsvis GPS-Referencen samt GPSnet. I den forbindelse skal følgende parametre undersøges eller overvejes:

- Dataformat
- Antennetype i referencestation
- Telefonnummer
- Referenceservice

I dataformat indtastes, hvilken meddelelsestype, der anvendes. Ved både GPS-Referencen samt GPSnet indtastes RTCM 18,19, jf. Appendiks A, s. 11. Da der ingen fysisk referencestation findes i forbindelse med måling i GPSnet, er det ligegyldigt, hvilken antenntype som indtastes her. For GPS-Referencen er der forskellige antenntyper. Derfor er det vigtigt at være opmærksom på, hvilken antenntype den pågældende referencestation anvender og angive denne i konfigurationerne. Med telefonnummer menes, at det rigtige telefonnummer skal indtastes i konfigurationerne. I GPSnet er der kun tale om et telefonnummer, men for GPS-Referencen er der fire telefonnumre pr. referencestation. Grunden til, at der er fire telefonnumre pr. referencestation, skyldes, at der kun kan være ti brugere på et telefonnummer. Ved at have fire numre, kan der således være 40 brugere koblet på en referencestation ad gangen. Ved referenceservice indtastes for GPSnet *VRS*, mens der for GPS-Referencen indtastes *Ingen*. Havde FKP allerede været implementeret i GPS-Referencen, kunne *FKP* have været indtastet her i stedet.

Yderligere indtastes diverse ens parametre i konfigurationerne. Dette gøres for at kunne sammenligne de opnåede resultater. Disse parametre er:

- Elevationsvinkel
- Observationshastighed
- Antal epoker
- Antennetype i GPS-modtager
- Koordinatsystem
- 3D-kvalitet

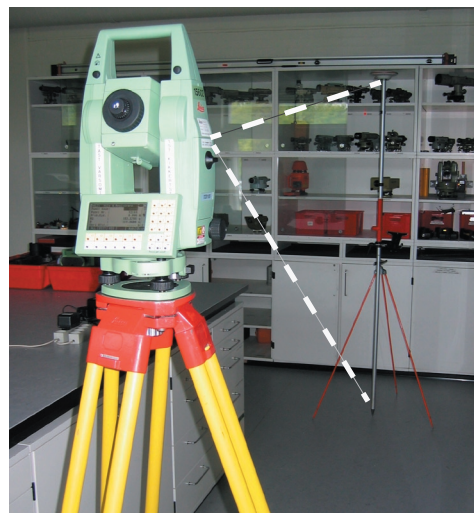
Elevationsvinklen sættes til 10° , hvilket ofte gøres i forbindelse med GPS-måling. Endvidere er der i KMS' test også anvendt en elevationsvinkel på 10° i forbindelse med måling på GPS-Referencen. Observationshastigheden sættes til 1 sekund, mens antallet af epoker pr. måling sættes til 10. Dette gøres, da der i tidligere projekter er fundet frem til, at nøjagtigheden ikke forbedres væsentligt ved anvendelse af mere end 10 epoker. Endvidere sættes antenntypen i GPS-modtager til pole, da to-meter stokken anvendes. Herved er antennehøjden automatisk 2 meter i forbindelse med måling. Koordinatsystemet sættes til WGS84, jf. 9.1.1 *Valg af koordinatsystem*. 3D-kvaliteten sættes til 0,05 m. Dette gøres, da nøjagtigheden i langt de fleste tilfælde bør kunne holde sig under denne grænse.

8.2.6 Verifikation af udstyr

Til opstilling af GPS-antennen i punkterne anvendes en to-meter stok samt en malkeskammel. Disse er verificeret inden opmålingen påbegyndes.

Verifikation af to-meter stokken er forløbet på følgende måde. To-meter stokken stilles op ved hjælp af treben, og libellen bringes til at spille ind. I en afstand af ca. 3 meter fra to-meter stokken opstilles en totalstation. Denne stilles ind nederst på to-meter stokken, og en

aflæsning af horisontalvinklen foretages, jf. figur 8.3.



Figur 8.3: Verifikation af to-meter stok.

Herefter foretages en aflæsning af horisontalvinklen, hvor totalstationen er stillet ind øverst på stokken. Ved hjælp af Pythagoras udregnes hældningen af stokken. Efterfølgende drejes to-meter stokken 90° , hvorefter der aflæses vinkler øverst og nederst på stokken igen. Denne hældning udregnes også. Testen er udført gentagne gange, og på intet tidspunkt oversteg hældningen 1 mm. For løbende under opmålingerne at kunne føre kontrol med den fastmonterede libelle på to-meter stokken placeres yderligere to stokkelibeller på stokken.

8.2.7 Opstilling af GPS-antenne

Når GPS-antennen centrerer over et punkt ved hjælp af en to-meter stok vurderes det, at dette kan gøres med en plan spredning på 1 mm. Denne vurdering er foretaget på baggrund af verificeringen af to-meter stokken. Det er i 9 regional test muligt at læse, hvilke punkter der skal centrerer over. Det vurderes endvidere i forbindelse med anvendelse af en to-meter stok, at bestemmelse af GPS-antennens højde kan ske uden tilføjelse af fejl. Dette skyldes, at to-meter stokken konstant er to meter.

Ved opstilling af GPS-antennen med malke-skammel skal højden bestemmes med tom-mestok. Det vurderes, at denne højde kan bestemmes indenfor én millimeter.

8.2.8 Software

I forbindelse med behandling af data indsamlet ved hjælp af Leica GPS System 500, anvendes programmet SKI-Pro. Ved forudgående planlægning af GPS-målinger er det muligt at anvende programmet Satellite Availability. Begge programmer er udviklet af Leica Geosystems og beskrives i det følgende.

SKI-Pro

SKI-Pro er et program til behandling af GPS-målinger, som indeholder mange funktioner. Behandlingen inkluderer efterprocessering samt understøttelse af real-time målinger. I selve programmet er følgende funktionaliteter samlet:

- Data importering
- Data styring
- Data processering
- Netværksudjævning
- Datumtransformation
- Data eksportering

I dette projekt anvendes SKI-Pro i forbindelse med RTK-målinger og således ikke til efterprocessering af data. Da der arbejdes med RTK-målinger reduceres kontorarbejdet til importering af rå data, eventuel kontrol af resultaterne og efterfølgende eksportering af de målte koordinater. Eksporteringen af data sker til ASCII-format, som er et tekstformat.

Satellite Availability

Satellite Availability er et program, som er en del af SKI-Pro programpakken. Satellite Availability hjælper til med at planlægge markarbejdet, idet programmet tilfører grafisk samt numerisk

information omkring satellitkonstellationen for ethvert punkt til et givet tidspunkt. Med dette menes, at det med Satellite Availability er muligt at undersøge, hvorledes satellitterne står på et givet tidspunkt i et bestemt punkt. Endvidere er det også muligt at indhente oplysninger om, hvor mange satellitter det kan forventes at måle til. For at disse oplysninger kan indhentes, skal der i programmet først hentes en almanac. Derefter skal omtrentlige koordinater for det punkt, som påtænkes indmålt, indtastes. Slutteligt skal også tidspunktet for opmålingen angives.

For at opnå det mest præcise resultat med Satellite Availability, kan der tegnes en skitse over obstruktioner i det punkt, som påtænkes indmålt. Denne skitse skal således vise, hvor høj elevation en obstruktion har, samt hvor denne obstruktion er placeret. Efterfølgende indtegnes disse obstruktioner i Satellite Availability, hvorefter programmet medtager disse obstruktioner i beregningerne.

8.3 Pålidelighed af testene

Ofte, når et resultat vurderes, betragtes blot spredningen. I den forbindelse vil det være interessant at overveje, hvor pålidelig den fremkomne spredning i virkeligheden er. På baggrund af statistiske betragtninger vil der derfor i dette afsnit komme et bud på, hvor mange overbestemmelser, der skal til for, at et pålideligt resultat opnås. I forbindelse med testafsnittene vil dette anvendes som dokumentation for, hvor pålidelige de enkelte test er.

Når der er tale om pålidelighed, er det størrelsen af spredningen på σ , der ønskes fundet. I stedet for at angive spredningen på spredningen, angives den approksimative relative nøjagtighed eller varianskoefficienten ρ , der er givet ved:

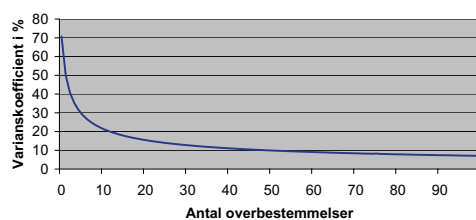
$$\rho = \frac{1}{\sqrt{2d}} \quad d > 0$$

hvor:

d: er antallet af overbestemmelser

p: angives i procent

På figur 8.4 er det muligt at se sammenhængen mellem varianskoefficienten samt antallet af overbestemmelser. Det er tydeligt, at få overbestemmelser medfører en høj varianskoefficient, mens varianskoefficienten aftager jo flere overbestemmelser, der medtages. I forbindelse med testafsnittene medfører et dårligt bedømmelsesgrundlag altså en høj varianskoefficient og dermed en lav pålidelighed. Det omvendte vil gøre sig gældende for et godt bedømmelsesgrundlag.



Figur 8.4: Varianskoefficient som funktion af antal overbestemmelser.

Varianskoefficienten er lig $1 \cdot \sigma$. For at få en varianskoefficient på 25 %, skal der være 8 overbestemmelser. At varianskoefficienten er 25 % betyder, at spredningen på spredningen er 25 % af den estimerede værdi. Et konkret eksempel på ovenstående kan være en spredning på 4 mm med en varianskoefficient på 25 %. Dette svarer til, at spredningen er bestemt inden for ± 1 mm. Spredningen vil derfor med approksimativt 68 % sandsynlighed ligge i intervallet 3-5 mm.

I dette projekt anvendes varianskoefficienten som dokumentation for, hvor pålidelige de en-

kelte test er. Det skal i den forbindelse tilføjes, at beregning af varianskoefficienter forudsætter, at målingerne er uafhængige og normalfordelte. GPS-målingerne er som følge af flere forhold, som eksempelvis obstruktioner, formodentlig ikke 100% uafhængige og normalfordelte. Alligevel er det fundet relevant at anvende varianskoefficienten som et vejledende estimat for testenes pålidelighed.

[Lauritzen, 2003, s. 1-2]

8.4 Dokumentation af testene

Selve dokumentationen af testene vil som tidligere nævnt ske gennem 9 *Regional test* samt 10 *Lokal test*. For at skabe en ensartethed gennem disse to kapitler opdeles de enkelte testafsnit efter følgende fremgangsmåde:

- Formål
- Teori
- Udførelse
- Databearbejdning
- Vurdering

Hvert afsnit starter med en præsentation af formålet med testen. Efterfølgende forklares teorien bag testen. I dette afsnit opstilles det teoretiske grundlag eller hypotese for testen. Udførelse indeholder en beskrivelse af, hvorledes dataindsamlingen er forløbet. Herunder omtales eventuelle problemer under udførelsen. I afsnittet omhandlende databearbejdning, forklares beregningsforløbet frem til resultaterne. Endvidere præsenteres resultaterne også i dette afsnit. Slutteligt i hvert testafsnit kommer en vurdering af det fremkomne resultat.

9

Regional test

I dette kapitel beskrives den regionale test. Formålet med kapitlet er at redegøre for planlægningen og gennemførelsen af de fire test, der indgår i den regionale test. Kapitlet indeholder følgende seks afsnit:

- Planlægning af testfelt
- Test 1 - Absolut nøjagtighed
- Test 2 - Præcision
- Test 3 - Nabonøjagtighed
- Test 4 - Initialiseringstid
- Sammenfatning på regional test

Først beskrives planlægningen af den regionale test. Derefter følger fire afsnit, der hver især indeholder én test. I hvert af disse afsnit gennemgås testene, og resultaterne præsenteres.

Slutteligt drages der konklusioner på tværs af de fire test i en sammenfatning.

9.1 Planlægning af testfelt

Dette afsnit redegør for planlægningen af det regionale testfelt, herunder gennemgås valg af koordinatsystem samt udvælgelse af område og fikspunkter. Endelig beskrives opmålingen af testfeltet.

9.1.1 Valg af koordinatsystem

Inden påbegyndelsen af de enkelte test kan finde sted, er det nødvendigt at fastsætte, hvilket koordinatsystem der skal anvendes. Det valgte koordinatsystem er afgørende for valg af fikspunkter, nøjagtigheden samt beregningsgangen. I Danmark er der i dag flere koordinatsystemer,

jf. 4.2 Eksisterende referencesystemer. Traditionelt set anvendes System 34 i forbindelse med landmåling, men som beskrevet i 4.2.1 System 34 er System 34 ikke velegnet i forbindelse med GPS-måling. De forholdsvis nøjagtige koordinater i EUREF89 påføres en fejl i størrelsesordenen ca. 1,5 cm, hvis de skal transformeres til System 34, jf. 4.2.1 System 34. Yderligere kan der være forholdsvis store regionale netspændinger i GIfikspunktsnettet. For at undgå disse fejlbidrag gennemføres den regionale test i EUREF89 ved anvendelse af det nye 3D-fikspunktsnet, kaldet 10-km nettet. Højderne bestemmes som ellipsoidehøjder for at undgå omregning til DVR90. En eventuel omregning vil tilføre en fejl i størrelsesordenen 1-2 cm, hvilket er nøjagtigheden i geoidmodellen, jf. 4.3.4 Tilpasning af geoiden til DVR90. Nøjagtigheden af fikspunkterne i 10-km nettet forventes at være på 5 mm i planen og 10 mm i højden, jf. 4.3.3 3D-fikspunktsnet, hvilket er tilfredsstillende i forbindelse med de planlagte test.

I stedet for at anvende officielle fikspunkter i det regionale testfelt, kan der etableres egne fikspunkter, som indmåles og udjævnes. Dette er fravalgt af både tids- og nøjagtighedsmæssige årsager. Selve opmålingen og udjævningen af et sådan testfelt vil kræve yderligere målinger, ligesom nøjagtigheden af fikspunkterne i testfeltet næppe vil blive bedre end nøjagtigheden i 10-km nettet.

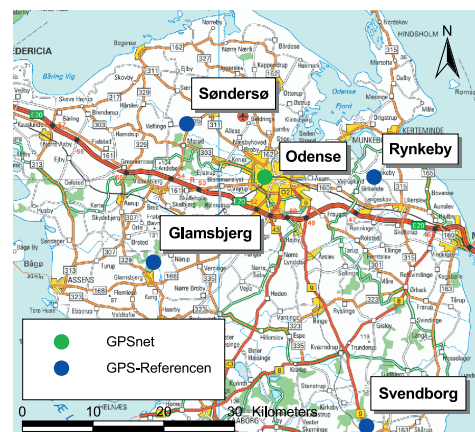
I forbindelse med Test 1 og Test 2 skal der som nævnt i kapitel 7, beregnes afvigelser i planen samt i højden. Derfor skal de tredimensionale koordinater i EUREF89 transformeres til to-dimensionale koordinater. Koordinaterne i EUREF89 transformeres således til UTM32/EUREF89. Denne transformation kan gennemføres uden forringelse af nøjagtigheden. I Valdemar er samtlige 10-km punkter, ud over

at være registreret med en geografisk koordinat i EUREF89, ligeledes registreret med en UTM-koordinat. Der er udført en test med KmsTrans, som undersøger, om transformationen af de geografiske koordinater til UTM-koordinater resulterer i de registrerede UTM-koordinater. Denne undersøgelse er vigtig, idet koordinaterne i Test 1 transformeres til UTM32/EUREF89 ved hjælp af KmsTrans og sammenlignes med UTM-koordinaterne fra Valdemar. Undersøgelsen viser, at der anvendes samme transformationsparametre.

Dele af 10-km nettet er stadig i etableringsfasen, hvilket betyder, at fikspunkterne ikke er endeligt udjævnet i Nord- og Midtjylland, jf. 4.3.3 3D-fikspunktsnet. Det er derfor nødvendigt at gennemføre den regionale test et andet sted. Valget er faldet på Fyn, hvor både GPS-Referencen og GPSnet har referencestationer.

9.1.2 Planlægning af testfelt

Første trin i planlægningen af testfeltet er at fastlægge, i nærheden af hvilke referencestationer dette skal placeres. Referencestationernes placeringer på Fyn fremgår af figur 9.1.



Figur 9.1: Placering af referencestationer på Fyn.

GPSnet har kun én referencestation på Fyn, som er placeret i Odense, og valget giver således

sig selv. GPS-Referencen har fire referencestationer på Fyn, og der skal derfor en nærmere undersøgelse til for at finde den bedst egnede.

Forskellen mellem de to RTK-metoder, som RTK-tjenesterne anvender, kan give anledning til misforståelser. Det skal derfor understreges, at når der i forbindelse med GPSnet tales om afstanden til referencestationen, så menes der afstanden til den nærmeste referencestation i RTK-netværket. I forbindelse med GPS-Referencen tales der om afstanden til den valgte referencestation, altså den der ringes op til, jf. 3.2 RTK-målemetoder.

Kriterier for udvælgelse af punkter

Da det ønskes at undersøge RTK-tjenesterne afstandsafhængige nøjagtighed, er der flere parametre, som skal tages i betragtning i forbindelse med valget af referencestation for GPS-Referencen. Ved udvælgelsen er det således også nødvendigt at tage 10-km punkterne i betragtning og vælge disse i samme ombæring. Der er tre overordnede kriterier, som er angivet i prioriteret rækkefølge:

- Minimere antallet af 10-km punkter
- Intervallet mellem 10-km punkternes afstand til referencestationen
- 10-km punkternes geografiske placeringer

Det primære mål er at minimere antallet af 10-km punkter og derved anvende de samme 10-km punkter for begge RTK-tjenester. Ved at anvende de samme punkter vil eventuelle deformerede punkter give udslag ved begge RTK-tjenester, og fejlagtige konklusioner kan undgås. Der er ikke krav om, at et punkt skal ligge i samme afstand fra begge referencestationer. Dette kan ikke lade sig gøre, da 10-km punkterne ligger for spredt.

Næste kriterie er, at 10-km punkternes afstande til referencestationen for hver RTK-tjeneste skal være jævnt fordelt. Der skal bruges fem 10-km punkter pr. RTK-tjeneste. Antallet af punkter er fastsat ud fra en tidsmæssig afgrænsning. Punkterne skal ligge jævnt fordelt i en afstand af 0-5, 5-10, 10-15, 15-20 samt 20-25 km fra referencestationerne. Nøjagtigheden af RTK-tjenesterne undersøges således ud til 25 km. Denne grænse er fastsat ud fra GPS-Referencen, som angiver denne afstand som dækningsgrænse for RTK-tjenesten. GPSnet dækker ud over denne afstand til referencestationerne, men da et af formålene med testene er at sammenligne RTK-tjenesterne, benyttes 25 km som grænse.

Den optimale løsning vil være at opnå de samme afstande til referencestationerne ved begge RTK-tjenester. Dette er imidlertid svært, så hvis blot punkterne ligger jævnt fordelt i forhold til den enkelte referencestation, er dette acceptabelt.

Det tredje kriterie er den geografiske placering af de valgte 10-km punkter. Punkterne skal helst ligge nogenlunde samlet for at minimere længden af den rute, der skal køres i forbindelse med opmålingen af punkterne.

Valg af punkter i testfelt

Ovenstående kriterier har indgået i udvælgelsen af referencestationerne såvel som 10-km punkterne. GPSnets referencestation i Odense er på forhånd valgt, og GPS-Referencens referencestation i Sønder sø er efterfølgende valgt, da denne sammen med referencestationen i Odense opfylder ovenstående kriterier bedst. Referencestationen i Svendborg er for langt væk fra Odense, stationen i Glamsbjerg har ikke noget 10-km punkt inden for 5 km, og endelig er Rynkeby fravalgt på grund af dårligere fordeling af 10-km punkter i forhold til Sønder sø.

Ud fra de to valgte referencestationer i Odense og Sønderø er der lokaliseret fire 10-km punkter og et REFDFK-punkt, som ligger tilfredsstillende med hensyn til afstande til begge referencestationer. REFDFK-punktet er 39-02-00002, og det vil i den resterende del af projektet blive behandlet på lige fod med 10-km punkterne. Afstandene fra de fem punkter til referencestationerne fremgår af figur 9.2.

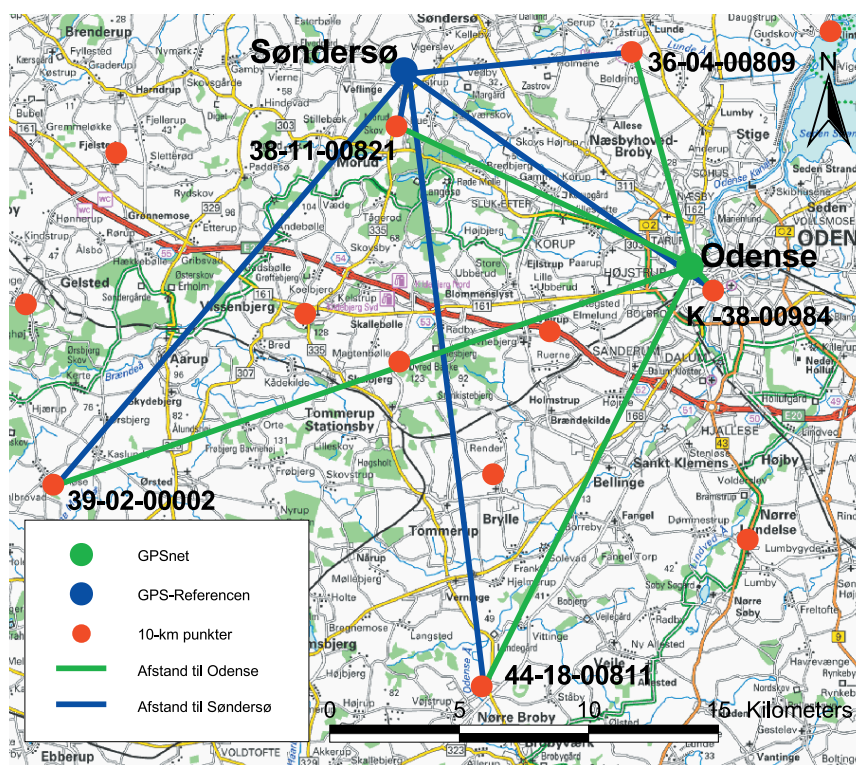
Punktnummer	GPS-Ref [km]	GPSnet [km]
38-11-00821	2,151	12,567
36-04-00809	8,567	8,824
K-38-00984	14,640	1,304
39-02-00002	20,943	26,010
44-18-00811	23,938	18,112

Figur 9.2: Afstand fra 10-km punkter til referencestationerne.

Punkternes afstand til referencestationerne er jævnt fordelt, og afstandene holder sig nogen-

lunde indenfor de definerede intervaller. Punkt 36-04-00809 er det eneste punkt, hvor afstanden til begge referencestationer er næsten ens. Endelig ligger de valgte fikspunkter nogenlunde samlet indenfor et geografisk område, således at transporttiden minimeres mest muligt. Testfeltets geografiske udstrækning fremgår af figur 9.3. På figuren er afstandsvektorerne for GPS-Referencen vist med blå, mens afstandsvektorerne for GPSnet er angivet med grøn. Alle 10-km punkterne i området fremgår af figuren, men det er kun de fem benyttede punkter, der er angivet med punktnummer. Forud for det endelige valg af punkter er der foretaget en rekognoscering, som har vist, at alle punkter, er egnede til testfeltet.

Udover de fire 10-km punkter og REFDFK-punktet består testfeltet yderligere af 20 jern-



Figur 9.3: Kort over testfelt på Fyn. Ikke anvendte 10-km punkter fremgår også af kortet.

rør, som er placeret i tilknytning til hvert af de fem fikspunkter. Der er således placeret fire jernrør ved hvert fikspunkt. Jernrørene indgår i Test 3, og vil blive nærmere omtalt i *9.4 Test 3 - Nabonøjagtighed*.

For at lette overblikket i de kommende test, reduceres punktnumrene, således at kun de tre sidste cifre anvendes. Punkterne benævnes fremover som angivet i figur 9.4.

Punktnummer	Nyt punktnummer
38-11-00821	821
36-04-00809	809
K-38-00984	984
39-02-00002	002
44-18-00811	811

Figur 9.4: Punktnumre anvendt i den resterende del.

9.1.3 Opmåling af testfelt

Inden opmålingen af testfeltet kan foretages, skal det planlægges, hvorledes punkterne skal indmåles. Yderligere skal antallet af overbestemmelser fastsættes, så der sikres et pålideligt bedømmelsesgrundlag. Derefter kan opmålingen gennemføres.

Planlægning af opmåling

Opmålingen af testfeltet kan ske efter to forskellige metoder. Enten kan punkterne opmåles ved, at der køres i runder, eller opmålingen kan foregå stationært ved, at der besøges ét punkt pr. dag. Alt afhængig af antallet af overbestemmelser kan det selvfølgelig blive nødvendigt at bruge mere end én dag på at opmåle et punkt. Valget af metode afhænger af flere faktorer. De væsentligste faktorer er:

- Forholdene i atmosfæren
- Satellitgeometri
- Tidsforbrug

Det overordnede mål er opnåelse af så uafhængige målinger som muligt. Da GPS-målinger

foretaget umiddelbart efter hinanden er korrelerede, er det nødvendigt at vente et stykke tid inden næste måling foretages.

Der er fordele og ulemper ved begge metoder. Ved den stationære metode kan målingerne til et punkt fordeles jævnt ud over hele dagen ved blot at måle med et fast interval. Yderligere minimeres transporttiden, og der spares penge i kørt kilometer. Til gengæld vil atmosfæreforholdene den pågældende dag skabe en systematisk påvirkning af målingerne. Den følgende dag vil forholdene formodentlig være anderledes og skabe en ny systematik. Det er derfor muligt at tale om en korrelation blandt målingerne til de enkelte punkter, hvis disse opmåles med den stationære metode. Ligeledes vil alle målinger i det enkelte punkt skulle udelukkes, hvis det viser sig, at RTK-tjenesterne den pågældende dag ikke fungerer optimalt.

Ved at køre i runder undgås, at der opstår korrelation som følge af forholdene i atmosfæren, da punkterne besøges over flere dage. Til gengæld vil målingerne til punkterne ikke blive fordelt lige så jævnt som ved den stationære metode, ligesom transporttiden og udgifter til kørsel vil stige betydeligt.

Efter at have konsulteret vejlederne, Keld Dueholm, DTU, samt Kurt Madsen, KMS, er det besluttet at køre i runder. Det primære mål er at undgå korrelation som følge af forholdene i atmosfæren. Ved KMS' test i 2001 og 2002 blev der ligeledes kørt i runder.

Antallet af runder skal også fastsættes. Dette afhænger af den afsatte tid samt den ønskede pålidelighed af testene. Der er afsat fem dage til opmålingen af testfeltet, hvilket er helt afgørende for antallet af runder. På baggrund af den beregnede længde af en kørt runde på ca. 95 km, er der planlagt tolv runder. Ved at køre tolv

runder opnås der en tilstrækkelig pålidelighed i testene. Denne vil blive nærmere behandlet i forbindelse med de enkelte test.

Opmåling af testfelt

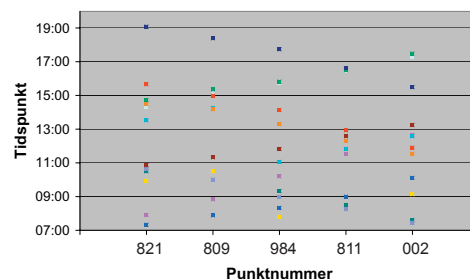
Opmålingen af testfeltet er foretaget i perioden fra den 28.3 til 1.4.2004. Vejret var noget nær perfekt til opmåling med GPS. Hovedparten af dagene var det let overskyet, så libellerne ikke blev forstyrret af sollyset. Yderligere var der ikke meget vind, så opstillingerne af GPS-antennerne var stabile.

Alle tolv runder blev nået, men ikke uden problemer. I forbindelse med punkt 984, som er placeret i Ansgar Anlæg i Odense Centrum, var der ved begge tjenester periodiske problemer med initialiseringen, når antallet af satellitter var lavt. På grund af obstruktioner omkring punktet havde GPS-antennen svært ved at modtage signaler fra enkelte af satellitterne, jf. 9.2 Test 1 - Absolut nøjagtighed.

I punkt 811, som er placeret på en kirkegård ca. 24 km fra GPS-Referencens referencestation i Sønderlø, havde GPS-Referencen periodiske problemer med initialiseringen, når antallet af satellitter var lavt. Det samme gjorde sig gældende for begge tjenester i punkt 002, hvor udsynet til himlen ellers er frit. Bortset fra ovenstående problemer er opmålingen ellers forløbet planmæssigt.

For at sikre en tidsmæssig fordeling af målingerne til hvert enkelt punkt blev ruten kørt begge veje. Den ene dag blev der startet midt på ruten for at få en tidlig måling til dette punkt. Figur 9.5 viser den tidsmæssige fordeling af besøgene i punkterne.

Hver prik angiver ét besøg i ét punkt. Prikker med samme farve udgør én runde. Der er foretaget differentiering i farverne, for at det



Figur 9.5: Besøg i 10-km punkterne fordelt over tid.

er muligt at identificere de enkelte runder. Den tidsmæssige fordeling af besøgene i punkterne varierer mellem hvert punkt. Ved punkt 984 ses den bredeste fordeling. I punkt 811 er fordelingen af besøgene dårligst. Da besøgene er fordelt over flere dage, er korrelationen ikke så udtalt, da forholdene i atmosfæren ændres fra dag til dag.

9.2 Test 1 - Absolut nøjagtighed

Formålet med denne test er at undersøge, hvilken absolut nøjagtighed de to RTK-tjenester besidder i plan samt højde. Endvidere analyseres det, om afstanden fra et indmålt punkt til referencestationen har indflydelse på den absolutte nøjagtighed i punktet, som indmåles.

9.2.1 Teori

Det ønskes at sammenligne resultaterne fra denne test med specifikationerne oplyst af udbyderne af RTK-tjenesterne samt resultaterne fra KMS' test. KMS har anvendt udbydernes definitionsmetoder til udregning af resultater. På den måde kan KMS' resultater direkte sammenlignes med specifikationerne oplyst af udbyderne. Da det samme er ønsket for Test 1, udføres beregningerne på samme måde. Beregningsgangen for denne test er derfor fremkommet gennem KMS' rapport. I tilfælde af tvivl omkring beregningsgangen er der taget kontakt til KMS for en uddybende forklaring.

Hvor det er muligt, vil resultaterne i Test 1 sammenlignes med oplysninger givet af udbyderne af RTK-tjenesterne eller beregninger foretaget af KMS.

Absolut nøjagtighed - $1 \cdot \sigma$

Da formålet med denne test er at finde den absolutte nøjagtighed, skal koordinaterne til de indmålte punkter sammenlignes med de officielle koordinater i UTM32/EUREF89. På baggrund af dette kan nøjagtigheden udregnes ud fra afvigelser fra den sande koordinat.

Formel 9.1 viser, hvorledes nøjagtigheden i Easting udregnes:

$$\sigma_E = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - X)^2} \quad (9.1)$$

hvor:

- x_i : er den indmålte Easting koordinat
- X : er den officielle koordinat i UTM32/EUREF89
- n : er antallet af observationer

Spredningen, der er lig $1 \cdot \sigma$, udregnes efter samme princip for Northing samt Height.

Udbyderne af RTK-tjenesterne opgiver de specificerede nøjagtigheder som horisontale samt vertikale spredninger. På baggrund af dette skal spredningerne i Northing samt Easting omregnes til en horisontal spredning. Dette gøres af udbyderne af RTK-tjenesterne samt KMS med formel 9.2:

$$\sigma_{plan} = \sqrt{\sigma_E^2 + \sigma_N^2} \quad (9.2)$$

hvor:

- σ_E : er spredningen beregnet ud fra samtlige Easting-koordinater
- σ_N : er spredningen beregnet ud fra samtlige Northing-koordinater

Den vertikale spredning er lig spredningen i højden.

Afstandsafhængig fejl - $1 \cdot \sigma$

Nøjagtigheder i plan samt højde for hvert 10-km punkt udregnes med formel 9.1 samt 9.2. Disse plottes, og på baggrund af dette udføres lineær regression samt konfidensintervaller for hver RTK-tjeneste. Lineær regression benævnes herefter tendenslinie. Konfidensintervallerne anvendes her til understøttelse af, om det er rimeligt at tale om tendenslinier. I det følgende forklares derfor, hvorledes disse konfidensintervaller udregnes.

Da den estimerede spredning ikke altid er det korrekte bud på den sande spredning, bestemmes et konfidensinterval for spredningen. Et konfidensinterval viser indenfor hvilket område, den sande værdi kan forventes at ligge. Ved et stort konfidensinterval er usikkerheden på den estimerede spredning stor, mens et lille konfidensinterval viser, at usikkerheden på den estimerede spredning er lille. I formel 9.3 ses, hvorledes den øvre og nedre grænse for et konfidensinterval kan udregnes:

$$c_1 = \sqrt{\left(\frac{d}{\chi^2(d)_{1-\alpha/2}}\right)} \cdot \sigma, c_2 = \sqrt{\left(\frac{d}{\chi^2(d)_{\alpha/2}}\right)} \cdot \sigma \quad (9.3)$$

hvor:

- c_1 : er nedre grænse for konfidensinterval
- c_2 : er øvre grænse for konfidensinterval
- d : er antal overbestemmelser
- α : er signifikansniveau
- σ : er den estimerede spredning

Konfidensintervallet udregnes for en bestemt konfidensgrad, som betegnes γ . Konfidensgraden er $\gamma = 1 - \alpha$, hvor α er signifikansniveauet. Endvidere er konfidensgraden, som opgives i

procent, et udtryk for, hvor stor sandsynligheden er for, at den sande spredning ligger inden for intervallet. Normalt opgives konfidensgraden i landmåling til 95%. Det vil sige, at der er 95% sandsynlighed for, at den sande værdi ligger indenfor det beregnede interval. Opgives konfidensgraden til 95%, medfører det et signifikansniveau på 5%, hvilket anvendes i Test 1.

Ud fra formel 9.3 kan det siges, at usikkerheden på en spredning stiger, når antallet af overbestemmelser falder.

[Lauritzen, 2003, s. 19-22]

De plottede nøjagtigheder i plan og højde for det enkelte 10-km punkt illustrerer endvidere, om der er en eventuel sammenhæng mellem afstanden fra referencestationen til de indmålte punkter og nøjagtigheden. Denne sammenhæng illustreres, som tidligere nævnt, i form af tendenslinier. Hvis tendenslinien har en skrå hældning vil nøjagtigheden for denne RTK-tjeneste afhænge af afstanden til referencestationen. Hvis tendenslinien derimod er vandret, afhænger nøjagtigheden ikke af afstanden til referencestationen.

Afstandsafhængig fejl - R95

I KMS' test er den afstandsafhængige fejl påvist gennem R95-værdier. Disse R95-værdier er plottet, hvorefter grundfejl samt afstandsafhængig fejl er fundet på baggrund af tendenslinier. Da der ønskes et direkte sammenligningsgrundlag med KMS' test, udregnes R95-værdier for hvert af de indmålte 10-km punkter. Disse værdier plottes, og en tendenslinie indlægges. På baggrund af denne findes konstantleddet og hældningen for linien, som svarer til henholdsvis grundfejlen og den afstandsafhængige fejl for RTK-tjenesten. Disse

værdier sammenlignes efterfølgende med KMS' resultater. R95-værdierne i planen udregnes på baggrund af formel 9.4:

$$R95_{plan} = 1,96 \sqrt{\sigma_E^2 + \sigma_N^2} \quad (9.4)$$

R95-værdierne i højden udregnes på baggrund af formel 9.5:

$$R95_{højde} = 1,96 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_i - H)^2} \quad (9.5)$$

R95 svarer til radius i en cirkel med den sande værdi som centrum. 95% af alle målingerne vil således ligge inden for denne cirkel.

9.2.2 Udførelse

Inden påbegyndelse af dataindsamlingen udarbejdes et observationsark for hvert 10-km punkt til hver runde. Disse observationsark er udarbejdet for at sikre en ensartet indmåling af punkterne. Observationsarket for punkt 809 på runde 1 fremgår af bilag 5.



Figur 9.6: Opstilling i punkt 811 med to-meter stok ved hjælp af stativben.

Som det fremgår af figur 9.6, stilles der op i hvert af 10-km punkterne med to-meter stok. Denne centrerer over punktet ved hjælp af stativben og tre libeller. Centreringsen i 10-km punkterne er dog lidt kompliceret, idet selve punktet er en lille fordybning i en skruepløk, som illustreret på figur 9.7. Denne lille fordybning kan forekomme svær at lokalisere. Endvidere befinder punkterne sig ofte ca. 60 cm under jordoverfladen, hvilket yderligere besværliggør centreringsen.



Figur 9.7: Et 10-km punkt i form af en skruepløk placeret ca. 60 cm under terræn. Fordybningen er markeret med en grå ring på billedet.

Punkt 002 er et postament, hvorfor indmålingen af dette foregår med malleskammel. Ved hjælp af malleskammelen centrerer GPS-antennen over punktet, jf. figur 9.8.

Fremgangsmåden i samtlige 10-km punkter er, at der centrerer over punktet, hvorefter der ringes op til GPS-Referencen. Punktet indmåles samt registreres, og forbindelsen afbrydes. Efterfølgende ringes der op til GPSnet. Her indmåles og registreres punktet også, og forbindelsen afbrydes atter. Der centrerer således ikke på ny over punktet mellem de to målinger. Dette skyldes, at hvis der er fejl ved centreringsen, vil denne få indflydelse ved begge RTK-tjenester. Herefter centrerer der over punktet på ny, og punktet registreres for henholdsvis GPS-Referencen samt GPSnet efter ovenstående frem-



Figur 9.8: Centreringsen over punktet på postamentet ved hjælp af malleskammel.

gangsmåde. Denne procedure gentages endnu engang, således at der i alt er tre registreringer af 10-km punktet for hver RTK-tjeneste pr. runde. Der køres efterfølgende videre til det næste punkt, som også indmåles efter ovenstående fremgangsmåde. Da der køres 12 runder, resulterer det i 36 målinger af hvert punkt med hver RTK-tjeneste. Målingerne hænger således sammen tre og tre. Selve opstillingerne er uafhængige, da der mellem hver måling stilles op på ny. Spørgsmålet er dog, om satellitgeometrien samt atmosfæreforholdene medfører korrelation af disse punkter. Svaret herpå fås gennem Test 5.

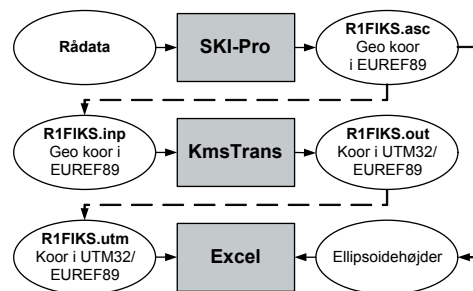
Selve punktnummerstrategien, som fremgår af bilag 4, er som følger. I forbindelse med første indmåling af for eksempel punktet 809, som foregår med GPS-Referencen, kaldes punktet 809001. Næste måling, der er med GPSnet, registreres som 809002. Tredie måling, der også er med GPS-Referencen, kaldes 809003. Det vil sige, at målinger registreret med GPS-Referencen bliver ulige numre, mens målinger registreret med GPSnet bliver lige numre.

Denne strategi er valgt, da GPS-modtageren automatisk skifter til næste nummer. På denne måde er det ikke nødvendigt hver gang at skulle indtaste punktnummer, hvilket reducerer risikoen for fejl.

Som tidligere nævnt var det i forbindelse med selve indmålingerne ofte svært at opnå initialisering i punkt 811 med GPS-Referencen. På observationsrunde 4 observeredes punktet kun to gange med GPS-Referencen, da det ikke lod sig gøre at opnå initialisering til den sidste måling.

9.2.3 Databearbejdning

Efter dataindsamlingen følger bearbejdningen af de rå data. På figur 9.9 ses forløbet af databearbejdningen for runde 1. Firkantede kasser repræsenterer programmer, mens ovale figurer repræsenterer filer. Bearbejdningen af de øvrige runder er forgået efter samme princip. Det skal dog her tilføjes, at højder bevares som ellipsoidehøjder, hvorfor de allerede kan anvendes efter eksportering fra SKI-Pro. I det følgende gennemgås databearbejdningen.



Figur 9.9: Forløbet af databehandlingen for runde 1.

Det ses på figur 9.9, at de rå observationer fra GPS-modtageren er importeret i SKI-Pro. Som beskrevet i 8.2.8 *Software* er målingerne efter import i SKI-Pro eksporteret til en tekstfil. Tekstfilen benævnes *R1FIKS.asc*, og filen indeholder samtlige koordinater indmålt på runde

1. Koordinaterne er geografiske koordinater i EUREF89.

Da koordinaterne ønskes i UTM32/EUREF89, foretages en transformation ved hjælp af KmsTrans. En inputfil til KmsTrans fremstilles ved at ændre på opsætningen af data i *R1FIKS.asc*. Denne inputfil kaldes *R1FIKS.inp*. Resultatet af transformationen er en tekstfil, som kaldes *R1FIKS.out*, indeholdende koordinaterne til de indmålte punkter i UTM32/EUREF89. I bilag 6 kan eksempler på en input- samt outputfil til KmsTrans iagttages. Endvidere findes også en vejledning til KmsTrans i bilag 10 : \Format_KmsTrans. Den anvendte version af KmsTrans er version: November 2, 2002.

Herefter er der editeret i *R1FIKS.out*, således observationer foretaget med GPS-Referencen findes øverst i filen, mens observationer foretaget med GPSnet findes nederst. Den editerede fil kaldes *R1FIKS.utm*.

Den resterende del af databearbejdningen er for overskuelighedens skyld opdelt i GPS-Referencen og GPSnet. Således udføres analyserne først på GPS-Referencen, hvorefter de samme analyser foretages på GPSnet.

GPS-Referencen

Inden selve analyserne starter er det vigtigt at få sorteret grove fejl fra. Dette gøres ved hjælp af formel 9.1, hvor der for hvert punkt beregnes spredninger i henholdsvis Northing, Easting og Height. Hver spredning baseres på 36 målinger, idet hvert enkelt punkt er målt 36 gange. Den udregnede spredning for eksempelvis Northing-koordinaten i punkt 811 multipliceres med 3 for derved at udregne grovfejlgrænsen. Herefter sammenholdes denne grovfejlgrænse med samtlige afvigelse mellem de indmålte Northing-koordinater og den

officielle Northing-koordinat. Overstiger nogle af disse forskelle grovfejlsgrænsen, fjernes hele koordinatsættet fra datasættet. I alt fjernes ét koordinatsæt fra det datasæt, som stammer fra punkt 809. Herefter anvendes det samlede datasæt i forbindelse med diverse analyser.

Absolut nøjagtighed - $1\cdot\sigma$

For at analysere om GPS-Referencen overholder den nøjagtighed, som udbyderne oplyser, skal der udregnes absolutte nøjagtigheder i planen samt højden. Dette gøres ved at betragte samtlige 180 målinger som værende uafhængige. De 180 målinger fremkommer ved, at der til hvert af de fem 10-km punkter er 36 målinger. Som følge af en grov fejl er der fjernet et koordinatsæt, hvilket betyder, at der er 179 uafhængige målinger tilbage. De udregnede absolutte nøjagtigheder sammenlignes efterfølgende med spredninger opgivet af udbyderne, jf. 3.3.2 *GPS-Referencen*. Alle koordinater til de fem punkter er hentet ind i Excel, hvor den absolutte nøjagtighed i planen samt højden er beregnet på baggrund af formel 9.1 og 9.2. Resultaterne kan ses på figur 9.10.

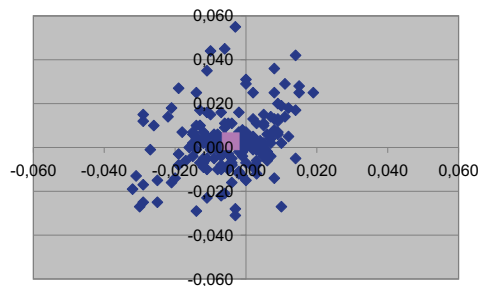
Abs. nøjagtighed $1\cdot\sigma$	Plan [mm]	Højde [mm]
Test 1	18	45
Specifikation	20 - 30	30 - 45
KMS' test 2002	21	29

Figur 9.10: Absolut nøjagtighed opnået med GPS-Referencen for Test 1 samt KMS' test i 2002. Endvidere ses også specifikationer oplyst af udbyderne.

Sammenlignes disse absolutte nøjagtigheder med nøjagtighederne opgivet af udbyderne af GPS-Referencen, viser det sig, at specifikationerne overholdes. I den forbindelse bør det dog nævnes, at GPS-Referencen lover en absolut nøjagtighed i planen på 2 - 3 cm og ikke 20 - 30 mm. Endvidere loves en absolut nøjagtighed i planen på 3 - 4,5 cm og ikke 30 -

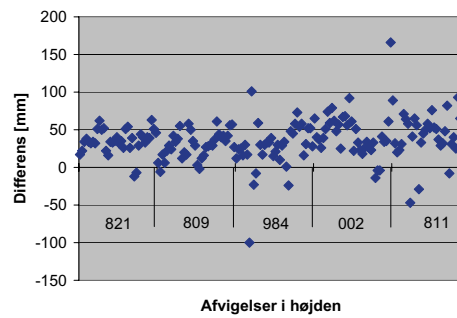
45 mm. Dette giver udbyderne et vist spillerum i form af eventuelle afrundinger. Den opnåede absolutte nøjagtighed på 45 mm i højden holder sig lige inden for det lovede. Det er endvidere også muligt at sammenligne med resultaterne fra KMS' undersøgelse. KMS opnåede en nøjagtighed på 21 mm i planen og 29 mm i højden. I forhold til de udregnede værdier i dette projekt, ses det, at den absolutte nøjagtighed i planen er af samme størrelsesorden, mens den absolutte nøjagtighed i højden er væsentligt dårligere end ved KMS' test.

Det er muligt at plote samtlige målinger i planen som afvigelser i forhold til den sande værdi. Dette giver et billede af, at systemets plane nøjagtighed påvirkes af en systematisk fejl. På figur 9.11 ses det, at målingerne for GPS-Referencen er trukket en smule mod nordvest. Denne tendens er dog ikke særlig udtalt, hvis middelværdien i planen, der er markeret med den store signatur, betragtes.



Figur 9.11: Den plane nøjagtighed for GPS-Referencen. Middelen er markeret med den store signatur, og værdierne er angivet i meter.

Højden kan ligeledes vurderes på denne måde, for at undersøge om systematiske fejl påvirker resultatet. Koordinatdifferencerne fremkommer ved, at den sande værdi er fratrukket samtlige målinger. Det ses på figur 9.12, at der er en klar tendens til, at koordinatdifferencerne i højden er positive. Middeldifferencen er beregnet til 36 mm.



Figur 9.12: Nøjagtighed i højden for GPS-Referencen illustreret ved hjælp af koordinatdifferencer.

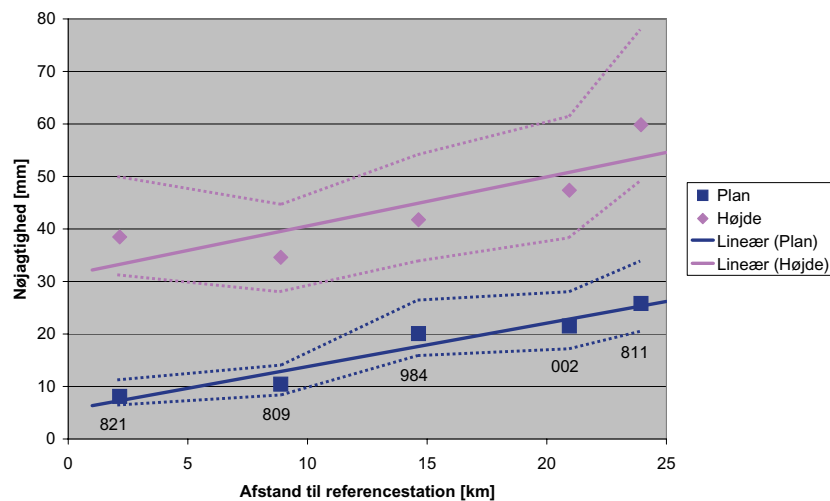
Den samme undersøgelse er udført for GPSnet og kan ses på figur 9.18. Her ses det, at punkterne ligger jævnt fordelt omkring nul, hvorved det kan konstateres, at den forskydning, som ses ved GPS-Referencen ikke kan skyldes en forskydning af koordinaterne i højden i samtlige 10-km punkter. Derfor undersøges det, om referencestationen i Sønder sø anvender den korrekte ellipsoidehøjde. Den transmitterede ellipsoidehøjde sammenlignes derfor med stationsdata fra GPS-Referencens hjemmeside. Der er imidlertid overensstemmelse mellem ellipsoidehøjderne, så dette kan ikke være årsagen. En anden årsag til forskydningen af højden kan være en deformation af GPS-antennen i

Sønder sø. Imidlertid er deformationen positiv, hvilket vil sige, at GPS-antennen er blevet højere. Dette virker ikke realistisk, men ved at betragte den seneste kontrolberegning af koordinaterne til GPS-Referencens stationer, er det alligevel muligt at finde en eventuel årsag.

Som omtalt i 3.3.2 *GPS-Referencen* genberegner KMS en gang om året koordinaterne til GPS-Referencens referencestationer. Målingerne til den sidste kampagne blev udført i juni 2003, jf. bilag 10, : \Kontrolberegning_gpsref. Genberegningen viser, at referencestationen i Sønder sø er øget med 1 cm i højden fra juni 2002 til juni 2003. Da det nu er være et år siden målingerne er foretaget, er det ikke utænkeligt, at den samme tendens gør sig gældende igen. Nemlig at koordinaten i højden for GPS-antennen i Sønder sø skal øges med nogle centimeter.

Afstandsafhængig fejl - $1 \cdot \sigma$

Nøjagtigheden i hvert 10-km punkt er plottet på figur 9.13. For at undersøge om det er rimeligt at tale om en lineær tendens i forbindelse med nøjagtigheden af GPS-Referencen, er der indlagt tendenslinier. Endvidere er konfidensintervaller også indlagt. Disse konfidensintervaller er be-



Figur 9.13: Den afstandsafhængige fejl illustreret med tendenslinier i både plan samt højde. De stiplede streger viser konfidensintervallerne.

regnet med formel 9.3. Idet tendenslinien ikke overskrider konfidensintervallet, er det rimeligt at tale om lineær tendens for GPS-Referencen. Endvidere fremgår det, at konfidensintervallet for højden er bredere end konfidensintervallet for planen, hvilket også stemmer overens med GPS-teorien.

Det ses endvidere på figur 9.13, at højden er dårligere bestemt end planen. Det fremgår også, at der både i planen samt højden er en forringelse af nøjagtigheden, jo længere væk fra referencestationen der måles. Med andre ord er nøjagtigheden af GPS-Referencen afhængig af afstanden fra det indmålte punkt til referencestationen. Yderligere ses, at punkterne i planen ligger tættere på tendenslinien end punkterne i højden.

Nøjagtigheden i højden i punkt 821 er dårligere end nøjagtigheden i højden i punkt 809. Dette bør ikke være tilfældet, hvorfor det undersøges, om resultatet kan skyldes fysiske obstruktioner i punkt 821. Øst for punktet er en række træer. På figur 9.14 ses disse træers placering i forhold til punktet. Det kan dog ikke siges med sikkerhed, at disse obstruktioner er skyld i den dårlige bestemmelse af højden i punktet.

Afstandsafhængig fejl - R95

KMS har ved hjælp af R95-værdier vist, at nøjagtigheden af GPS-Referencen afhænger af

afstanden til referencestationen. For at kunne sammenligne disse værdier med værdierne fra KMS' test beregnes R95-værdierne for hvert 10-km punkt. Disse beregnes ved hjælp af formel 9.4 samt 9.5.

R95-værdierne plottes, og tendenslinier indtegnes i henholdsvis plan samt højde. Disse plot kan ses i bilag 7. På baggrund af en tendenslinie findes grundfejlen samt den afstandsafhængige fejl. Resultaterne fremgår af figur 9.15.

R95 værdier		Grundfejl [mm]	Afstandsafhængig fejl [ppm]
Test 1	Plan	11	1,6
	Højde	61	1,8
KMS' test 2002	Plan	14	2,9
	Højde	11	4,0

Figur 9.15: Grundfejl og afstandsafhængig fejl ved GPS-Referencen på baggrund af R95-værdier.

Det ses her, at grundfejlen i planen er 11 mm, mens den i højden er 61 mm. Grundfejl samt afstandsafhængig fejl fundet af KMS gælder ud til 15 km. Herefter er der ikke længere afstandsafhængig fejl, og grundfejlen i planen er 45 mm samt 75 mm i højden.

Sammenholdes de beregnede grundfejl samt afstandsafhængige fejl i planen og højden med de samme værdier fundet af KMS, ses der en stor forskel i højden. KMS opnåede en grundfejl i højden på 11 mm samt en afstandsafhængig



Figur 9.14: Obstruktionerne i punkt 821. Punktet ses i forgrunden.

fejl på 4,0 ppm. Der er tidligere fundet frem til, at der muligvis er en forskydning i højden på GPS-Referencens referencestation i Sønder sø på ca. 3 cm. Er dette tilfældet, påvirker denne fejl grundfejlen i højden, således denne bliver 61 mm. Hvis forskydningen fjernes, vil grundfejlen i højden blive ca. 3 cm. I forbindelse med ovenstående bør det understreges, at der i virkeligheden ikke er tale om fejl men om nøjagtigheder.

GPSnet

Inden analyserne påbegyndes er grove fejl fra-sorteret datasættet. Dette foregår på sammen måde som beskrevet under *GPS-Referencen*. Der findes grove fejl på i alt fire koordinatsæt, som efterfølgende fjernes fra datasættet. Punkterne, hvorfra der fjernes koordinatsæt, er 984, 821 samt 002. Ved sidstnævnte punkt fjernes der to koordinatsæt.

Absolut nøjagtighed - $1\cdot\sigma$

For at analysere om GPSnet overholder den nøjagtighed, der oplyses af udbyderne, udregnes den absolutte nøjagtighed i planen samt højden. Udregningerne baseres på de 176 uafhængige indmålinger af 10-km punkterne. De udregnede absolutte nøjagtigheder sammenlignes efterfølgende med de officielle spredninger, jf. 3.3.3 *GPSnet*. Alle koordinater til de fem punkter hentes ind i Excel, hvor den absolutte nøjagtighed i plan samt højde beregnes på baggrund af formel 9.1 og 9.2.

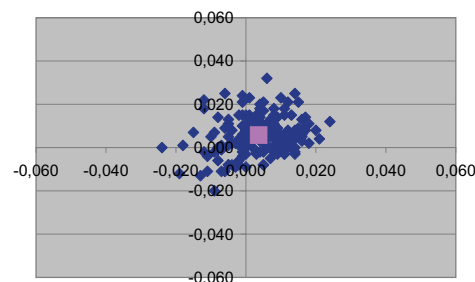
Abs. nøjagtighed $1\cdot\sigma$	Plan [mm]	Højde [mm]
Test 1	14	20
Specifikation	10	20
KMS' test 2002	20	27

Figur 9.16: Absolut nøjagtighed opnået med GPSnet for Test 1 og KMS test 2002. Endvidere ses også specifikationer oplyst af udbyderne.

Resultaterne af disse beregninger fremgår af figur 9.16.

Ved at sammenligne de beregnede absolutte nøjagtigheder med nøjagtighederne opgivet af GPSnet viser det sig, at den absolutte nøjagtighed i planen ikke overholder den specificerede nøjagtighed på 1 cm. Den absolutte nøjagtighed i højden bliver 20 mm, hvilket stemmer overens med det specificerede. Resultaterne fra KMS' undersøgelse har vist en absolut nøjagtighed i planen på 20 mm og 27 mm i højden. På baggrund af dette må det siges, at nøjagtigheden af GPSnet er forbedret væsentligt indenfor de sidste par år. I den forbindelse bør det bemærkes, at GPSnet oplyser nøjagtigheden i planen til 1 cm og ikke 10 mm, mens nøjagtigheden i højden er opgivet til 2 cm og ikke 20 mm. Dette giver udbyderne et vist spillerum i forbindelse med eventuelle afrundinger.

Det er også for GPSnet muligt at udføre et plot af samtlige målinger i planen. Dette viser, om en systematisk fejl spiller ind på resultatet af den plane nøjagtighed. På figur 9.17 ses det, at målingerne for GPSnet er trukket en smule mod nordøst.

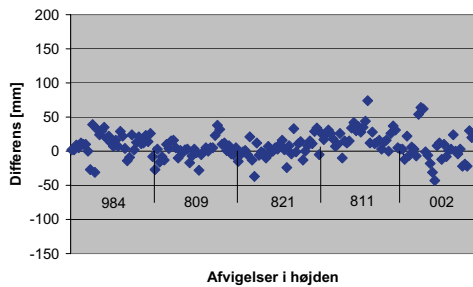


Figur 9.17: Den plane nøjagtighed for GPSnet. Mid-del er markeret med den store signatur, og værdierne er opgivet i meter.

Denne tendens er dog ikke særlig udtalt, hvis middelværdien betragtes. Sammenholdes denne figur med figur 9.11 ses det endvidere, at målingerne til hver RTK-tjeneste ikke viser

tendenser til en systematisk forskydning af 10-km punkterne i planen. Dog ligger målingerne for begge RTK-tjenester en smule mod nord. Der er dog tale om meget små afvigelser.

Det er også udført et plot med koordinatdifferencer for højden. Det ses på figur 9.18, at koordinatdifferencerne ligger jævnt fordelt omkring nul. Herved kan det konstateres, at der ikke eksisterer en forskydning af højden i 10-km punkterne.



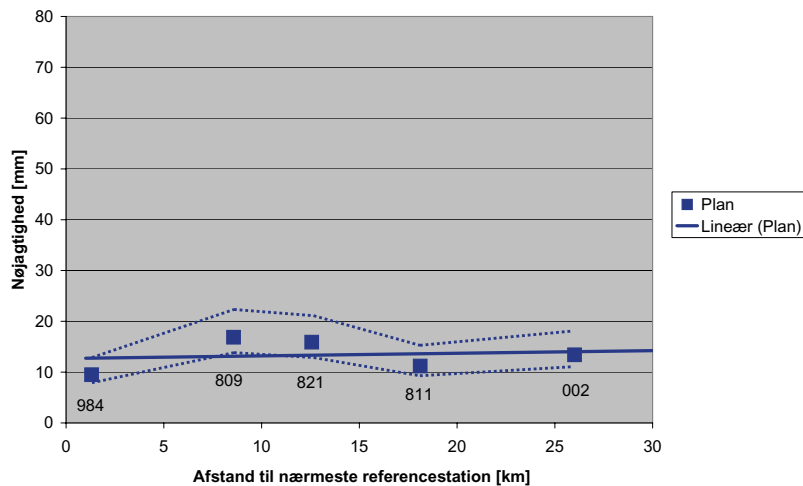
Figur 9.18: Nøjagtighed i højden for GPSnet illustreret ved hjælp af koordinatdifferencer.

Afstandsafhængig fejl - 1σ

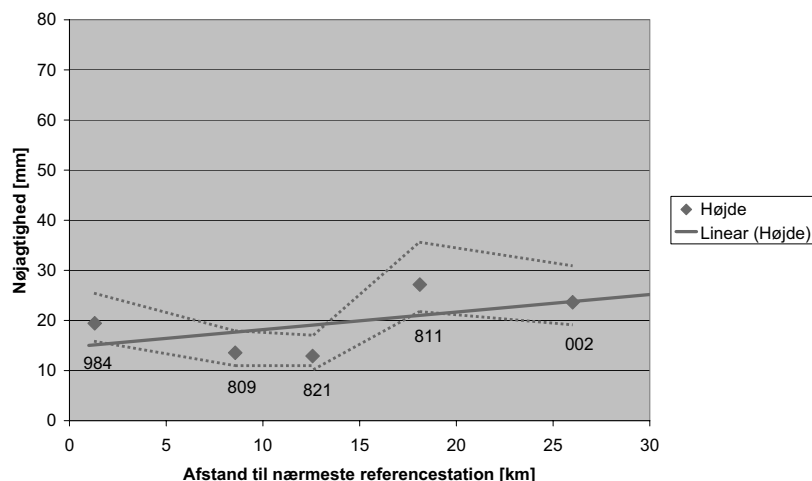
Endelig er nøjagtigheden i planen af hvert 10-km punkt plottet på figur 9.19, mens nøjagtigheden i højden af hvert 10-km punkt er

plottet på figur 9.20. For at undersøge, om det er rimeligt at tale om en lineær tendens i forbindelse med nøjagtigheden af GPSnet, er der indlagt tendenslinier i de to figurer. Endvidere er konfidensintervaller også indlagt. Disse konfidensintervaller er beregnet med formel 9.3. Det ses tydeligt, at konfidensintervallerne er smalle for både planen samt højden. Dette viser, at bestemmelsen af den enkelte nøjagtighed er god. Dog er konfidensintervallet bredere i højden end i planen, hvilket stemmer overens med GPS-teorien. Idet tendenslinierne flere steder overskrider konfidensintervallerne, kan det diskuteres, om det er rimeligt at indtegne tendenslinier. Denne diskussion fortsættes i 9.6 *Sammenfatning på regional test*. Der arbejdes dog alligevel i det følgende videre med tendenslinier for GPSnet. Dette gøres for at påvise, om nøjagtigheden af GPSnet afhænger af afstanden til den nærmeste referencestation.

Det fremgår af figur 9.19 og 9.20, at højden er dårligere bestemt end planen. Der er dog en svag tendens til, at nøjagtigheden i højden forringes som følge af, at afstanden til referencestationen bliver større. Forringelsen skyldes formodentlig en interpolationsfejl, som opstår i



Figur 9.19: Den afstandsafhængige fejl i planen for GPSnet illustreret ved en tendenslinie. De stiplede streger viser konfidensintervallet.



Figur 9.20: Den afstandsafhængige fejl i højden for GPSnet illustreret ved en tendenslinje. De stiplede streger viser konfidensintervallet.

RTK-netværket, jf. Appendiks A, s. 14. I planen derimod må det konstateres, at nøjagtigheden ikke påvirkes af, at afstanden til den nærmeste referencestation bliver større.

En yderst bemærkelsesværdig detalje ved de to figurer er, at ved punkt 809 og 821 er nøjagtigheden lavere i højden end i planen. Grunden hertil er, at nøjagtigheden i enten Northing- eller Easting-koordinaten har været dårlig, hvilket medfører, at nøjagtigheden i planen bliver lav. Endvidere er nøjagtigheden i højden i disse to punkter meget god. Kombinationen af disse to ting medfører, at nøjagtigheden af disse



Figur 9.21: Obstruktion i punktet 811. Billedet er taget i punktet.

punkter i højden er bedre end nøjagtigheden i planen. Hvis punkterne for planen i stedet havde en bedre nøjagtighed end punkterne i højden, ville tendenslinjen have været mere vandret. Betragtes punkt 811 på figur 9.20, ses det, at dette punkt har den laveste nøjagtighed i højden. På figur 9.21 ses en af de fysiske obstruktioner ved punktet.

Kirken ved punkt 811 afskærer således et frit udsyn til horisonten ved måling i punktet. Om dette kan have haft betydning for den ringere bestemmelse af højden i punktet er svært at svare på. Hvis dette er tilfældet, vil det resulterer i, at nøjagtigheden i højden bliver bedre, hvormed tendenslinjen vil blive mere vandret. Der eksisterer også en anden mulig årsag til den ringere bestemmelse af højden i dette punkt. Når der måles ved hjælp af GPSnet hændes det ofte, at der på GPS-terminalen vises, at der modtages signal fra eksempelvis ti satellitter. Betragtes efterfølgende, hvor mange satellitter der måles til, er dette tal ofte én til tre satellitter lavere. Grunden hertil er, at de seks nærmeste referencestationer anvendes til interpolation af VRS'en. I forbindelse med interpolation anvendes udelukkende redundante satellitter.

Afstanden mellem de anvendte referencestationer medfører, at satellitter, som kan ses ved den ene referencestation, ikke kan ses ved den anden referencestation. I marken måles der også kun til de redundante satellitter. Dette resulterer ofte i, at der i et punkt måles på færre satellitter, end der er kontakt til.

Afstandsafhængig fejl - R95

I forbindelse med GPSnet er der ligeledes udregnet R95-værdier for at kunne sammenligne med KMS' test. Beregninger følger fremgangsmåden beskrevet under *GPS-Referencen*, og udføres ved hjælp af formel 9.3 samt 9.4.

Disse R95-værdier plottes for både plan samt højde og kan ses af bilag 7. Ved hjælp af tendenslinier findes grundfejl samt den afstandsafhængige fejl i henholdsvis plan samt højde. Resultaterne fremgår af figur 9.22.

R95 værdier		Grundfejl [mm]	Afstandsafhængig fejl [ppm]
Test 1	Plan	25	0,1
	Højde	29	0,7
KMS' test 2002	Plan	13	1,5
	Højde	23	1,9

Figur 9.22: Grundfejl og afstandsafhængig fejl ved GPSnet på baggrund af R95-værdier.

Det ses, at grundfejlen i planen er 25 mm, mens den i højden er 29 mm. Sammenholdes de beregnede grundfejl samt afstandsafhængige fejl i planen og højden med de samme værdier beregnet af KMS, ses der klart en forskel i planen. KMS har opnået en grundfejl på 13 mm i planen, men har samtidig opnået en afstandsafhængig fejl i planen på 1,5 ppm. Forskellen disse resultater imellem kan skyldes, at der er installeret nyt software i den centrale beregningsenhed i GPSnet siden KMS' test. Dette software medfører muligvis, at nøjagtigheden ikke forringes væsentligt som følge af, at afstanden til den nærmeste referencestation bliver

større, jf. 3.3.3 *GPSnet*. Det skal dog her tilføjes, at grundfejlen samt den afstandsafhængige fejl, som KMS har beregnet gælder ud til 20 km. Herefter eksisterer kun en grundfejl, som er 45 mm i planen og 57 mm i højden.

9.2.4 Vurdering

Sammenfattende er det nu muligt at sige, at udbyderne af GPS-Referencen lever op til de nøjagtigheder, der loves. GPSnet lever op til den lovede nøjagtighed i højden. I planen ender den absolutte nøjagtighed på 14 mm i forhold til den lovede nøjagtighed på 1 cm.

Ved sammenligning mellem de absolutte nøjagtigheder fra Test 1 og KMS' test skal det dog bemærkes, at KMS' resultater er påvirket af en systematisk fejl på 7-10 mm i punkterne i testområdet, jf. 7.1.1 *Test udført af KMS*.

Det er derfor undersøgt, om der eksisterer en systematisk forskydning af de anvendte 10-km punkter i denne test. I forbindelse med GPS-referencen har der vist sig en positiv forskydning af koordinaterne i højden målt med GPS-Referencen. Ved GPSnet derimod, har det vist sig, at der ikke eksisterer en forskydning af de anvendte 10-km punkter. I stedet er der fundet frem til, at forskydningen ved GPS-Referencen muligvis kan skyldes, at højden på referencestationen i Sønder sø ikke er korrekt. I den forbindelse skal det tilføjes, at der burde have været målt til mere end en referencestation for GPS-Referencen. Herved vil en sådan fejl kunne have været undgået. Dette ville dog have krævet en endnu grundigere planlægning samt udførelse.

I forbindelse med undersøgelsen af om afstanden til den anvendte referencestation har indflydelse på nøjagtigheden, kan det konkluderes, at dette er tilfældet i forbindelse med GPS-Referencen. Det forholder sig dog ander-

ledes med GPSnet, da det tydeligvis ses, at der i planen ikke er en tendens til, at nøjagtigheden stiger som følge af, at afstanden til den nærmeste referencestation øges. I forbindelse med højden forringes nøjagtigheden dog en smule, efterhånden som afstanden stiger. Hvorvidt det er rimeligt at udarbejde tendenslinier er undersøgt ved hjælp af konfidensintervaller. For GPS-Referencen synes det rimeligt at plote tendenslinier, men for GPSnet er det sværere at give et entydigt svar. I 9.6 *Sammenfatning på regional test* diskuteres dette yderligere.

Når resultaterne i Test 1 sammenlignes med resultaterne af KMS' test, skal det bemærkes, at KMS' første punkt lå ca. 60 m fra referencestationen. Endvidere lå der tre punkter inden for de første 10 km. Dette har muligvis bevirket, at KMS' grundfejl er mindre end de i Test 1 beregnede grundfejl. Endvidere var KMS' afstandsafhængige fejl større, end de afstandsafhængige fejl fundet i Test 1.

Der er ikke er taget højde for centreringsspredningen samt nøjagtigheden af 10-km punkterne i forbindelse med beregningerne af den absolutte nøjagtighed samt R95-værdierne. Centreringsspredningen er vurderet til at være 1 mm, mens nøjagtigheden af 10-km punkterne i planen af KMS er opgivet til 5 mm. Disse spredninger er dog så små, at de ikke vil få indflydelse på resultaterne.

Endvidere skal der også gøres opmærksom på, at den trekant, som GPSnet er testet i, ikke er den største trekant i nettet. I forbindelse med målinger i en større trekant, hvor det er muligt at måle længere væk end 26 km fra nærmeste referencestation i netværket, kan der muligvis frembringes andre resultater, end der her er kommet frem til. Dette kan i teorien ligeledes gøre sig gældende, hvis testen udføres andre

steder end i området på Fyn. Resultaterne vurderes dog som værende et fornuftigt bud på nøjagtigheden af RTK-tjenesterne.

Beregningerne af den absolutte nøjagtighed for henholdsvis GPS-Referencen og GPSnet er foretaget på baggrund af de 175 overbestemmelser til hver RTK-tjeneste. Dette medfører en varianskoeficient på ca. 5%, hvormed resultatet må siges at være yderst pålideligt. Dette konkluderes, da varianskoeficienten er så lille, og der samtidig er tale om nøjagtigheder på centimeterniveau.

I forbindelse med beregningerne af indflydelsen af afstanden til referencestationen fra det indmålte punkt, er der 35 overbestemmelser for begge RTK-tjenester til hvert punkt. Dette medfører en varianskoeficient på ca. 12%. Igen må resultatet siges at være pålideligt. Dette konkluderes på baggrund af en lille varianskoeficient samt nøjagtigheder på centimeterniveau.

9.3 Test 2 - Præcision

Formålet med denne test er at undersøge, hvilken præcision de to RTK-tjenester besidder i planen samt højden. Endvidere analyseres, om afstanden til referencestationen har indflydelse på præcisionen af punktet i planen samt højden.

9.3.1 Teori

Resultaterne af denne test skal sammenlignes med KMS' test. Derfor er nogle af beregningsgangene for denne test fremkommet gennem KMS' rapport.

Præcision - $1 \cdot \sigma$

Da formålet med denne test er at undersøge, hvilken præcision de to RTK-tjenester besidder, anvendes middel af de indmålte punkter til udregning af præcisionen. Herefter findes

afvigelsen på det enkelt punkt ved at trække middel fra hver enkelt koordinat. Præcision findes ved hjælp af formel 9.6

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad (9.6)$$

hvor:

- x_i : er den målte Easting koordinat
- μ : er middel af samtlige Easting koordinater
- n : er antallet af observationer

Spredningen i Northing samt Height udregnes efter samme princip.

Præcisionen ønskes imidlertid bestemt i planen samt højden for at kunne sammenligne med resultaterne fra KMS' test. Derfor udregnes den plane præcision på baggrund af formel 9.2.

Afstandsafhængig fejl - $1 \cdot \sigma$

Præcisionen af de enkelte punkter i plan samt højde plottes, og en tendenslinie indlægges. For at undersøge om det er rimeligt at indlægge tendenslinier plottes også konfidensintervaller. Konfidensintervaller beregnes med formel 9.3.

Efterfølgende vurderes det ud fra de plottede præcisioner og tendenslinier i plan samt højde, om der er en eventuel sammenhæng mellem afstanden fra referencestationen til de indmålte punkter og præcisionen.

9.3.2 Udførelse

Data til denne test er det samme data som anvendes i Test 1. Det er således muligt under 9.2.2 *Udførelse* at læse, hvorledes dataindsamlingen har fundet sted.

9.3.3 Databearbejdning

Databearbejdningen er forløbet som i Test 1

indtil de transformerede koordinater ligger i UTM32/EUREF89. Højder kan anvendes allerede efter eksportering fra SKI-Pro, da der arbejdes med ellipsoidehøjder.

For overskuelighedens skyld deles den resterende del af databearbejdningen op, således analyserne først udføres på GPS-Referencen og derefter på GPSnet.

GPS-Referencen

Inden selve analyserne påbegyndes, er grove fejl sorteret fra datasættet. Dette gøres på samme måde, som beskrevet i 9.2 *Test 1 - Absolut nøjagtighed*. I alt fjernes fire koordinatsæt; to for punkt 984 og to for punkt 811.

Præcision - $1 \cdot \sigma$

GPS-Referencens præcision i planen samt højden udregnes ved hjælp af formel 9.2 samt 9.6. I udregningerne indgår alle 176 målinger. Resultaterne af beregningerne fremgår af figur 9.23.

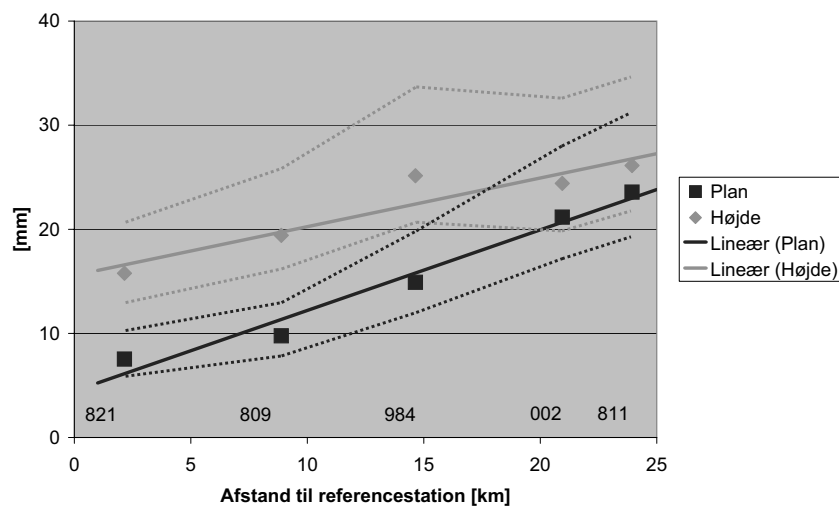
Præcision	Plan [mm]	Højde [mm]
Test 2	16	22
KMS' test 2002	20	28

Figur 9.23: Præcision opnået med GPS-Referencen for Test 2 samt KMS' test i 2002.

Præcisionen af GPS-Referencen i planen er 16 mm, mens præcisionen i højden er 22 mm. Disse spredninger ligger begge i nærheden af de spredninger KMS er kommet frem til.

Afstandsafhængig fejl - $1 \cdot \sigma$

Herefter undersøges det, om det i forbindelse med præcisionen af GPS-Referencen er rimeligt at tale om lineær tendens. Derfor udarbejdes figur 9.24, som viser tendenslinier samt konfidensintervaller for plan og højde. Da tendenslinierne holder sig indenfor kon-



Figur 9.24: Præcisionen af GPS-Referencen i plan samt højde illustreret ved tendenslinier. De stiplede streger viser konfidensintervallerne.

fidensintervallerne, konkluderes det, at det for præcisionen af GPS-Referencen er i orden at udarbejde lineære tendenser.

Plottet viser, at præcisionen for GPS-Referencen helt klart afhænger af afstanden til referencestationen. Jo tættere der måles på referencestationen, jo højere præcision opnås.

Det er bemærkelsesværdigt, at punkt 984 har en lav præcision i højden i forhold til de øvrige punkter. Dette punkt ligger i Ansgar Anlæg i

Odense Centrum. I Ansgar Anlæg er en del høje obstruktioner i form af Ansgar Kirke samt diverse træer. Obstruktionerne, som kan ses på figur 9.25, blokerer for frit udsyn mod nordvest. Denne tendens gør sig faktisk gældende 360° rundt i punktet. Det er måske disse obstruktioner, der er skyld i den dårlige præcision i højden i dette punkt.

GPSnet

Ved hjælp af fremgangsmåden beskrevet under 9.2 Test 1 - Absolut nøjagtighed sorteres grove fejl



Figur 9.25: Obstruktionerne i punkt 984, som er beliggende i Ansgar Anlæg i Odense. Punktet ses i forgrunden.

fra datasættet. I alt frasorteres seks koordinatsæt. Disse stammer fra punkterne 984, 809, 821 samt 811. Endvidere fjernes to koordinatsæt fra bestemmelsen af punktet 002.

Præcision - $1\cdot\sigma$

GPSnets præcision i planen samt højden beregnes ved hjælp af formel 9.2 og 9.6. Bestemmelsen af præcisionen af GPSnet baseres på samtlige 174 målinger af punkterne. Præcisionen af GPSnet fremgår af figur 9.26.

Præcision	Plan [mm]	Højde [mm]
Test 2	9	16
KMS' test 2002	17	23

Figur 9.26: Præcision opnået med GPSnet samt KMS' test 2002.

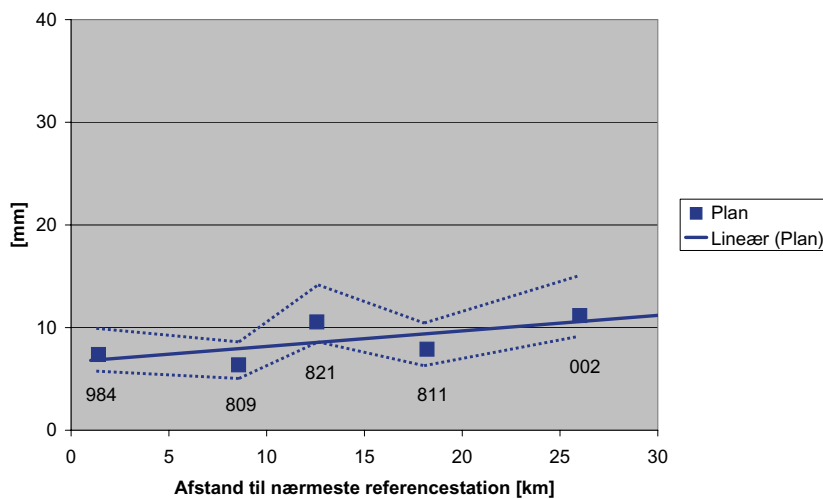
Præcisionen af GPSnet i planen er 9 mm, mens præcisionen i højden er 16 mm. Disse spredninger er begge lavere, end de spredninger KMS er kommet frem til. Dette skyldes muligvis, at der er installeret nyt software i den centrale beregningsenhed i GPSnet, siden KMS foretog testen.

Afstandsafhængig fejl - $1\cdot\sigma$

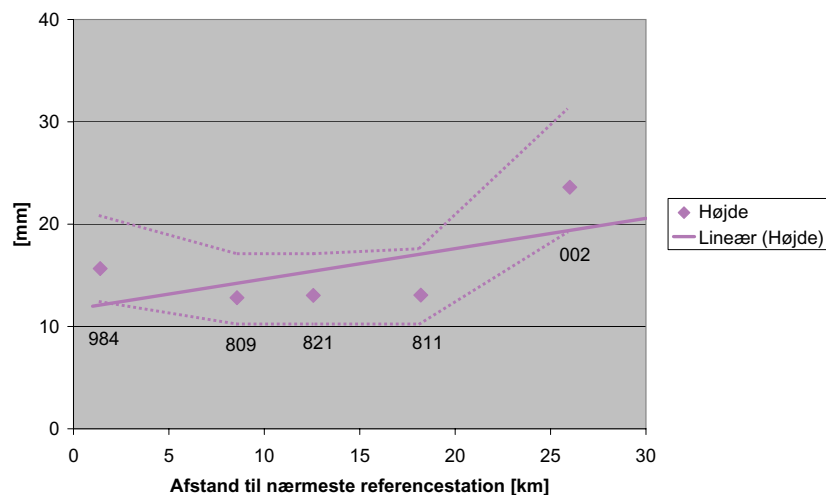
Det undersøges atter ved hjælp af konfidensintervaller samt tendenslinier, om det er rimeligt at udarbejde lineære tendenser i forbindelse med præcisionen af GPSnet. Dette fremgår af figurerne 9.27 og 9.28. I den forbindelse stilles der spørgsmål ved, om det er rimeligt at udføre tendenslinier på præcisionen af GPSnet. Dette skyldes, at tendenslinierne overskrider konfidensintervallerne. Denne diskussion tages yderligere op i 9.6 *Sammenfatning på regional test*.

Figurerne viser umiddelbart, at afstanden til den nærmeste referencestation har indflydelse på præcisionen, der er dog kun tale om en lille indflydelse. Denne skyldes som tidligere nævnt sandsynligvis interpolationsfejlen, jf. 3.2.4 *Netværks-RTK*.

Det fremgår endvidere, at punktet tættest på referencestationen har en lav præcision i højden i forhold til de næste par punkter, jf. figur 9.28. Der er her tale om punktet 984. Samme tendens viste sig i forbindelse med plottet af



Figur 9.27: Den afstandsafhængige fejl for præcisionen i planen ved GPSnet illustreret ved en tendenslinie. De stiplede streger viser konfidensintervallet.



Figur 9.28: Den afstandsafhængige fejl for præcisionen i højden ved GPSnet illustreret ved en tendenslinje. De stiplede streger viser konfidensintervallet.

præcisionen for GPS-Referencen. Det kan således tyde på, at forholdene for GPS-måling i dette punkt ikke er optimale. Dette kan måske skyldes de obstruktioner, der er illustreret på figur 9.25. Yderligere ses det også, at punkt 002 har lav præcision i højden. Punktet 002 er et postament. En af årsagerne til den dårlige bestemmelse af højden kan være, at antennehøjden blev målt ved hver måling, hvorefter målingen indtastedes i GPS-modtageren. Muligvis har målingerne af antennehøjderne i dette punkt ikke været gode nok. En anden mulighed kan være, at antennehøjderne ikke er indtastet korrekt i GPS-modtageren. Hvis ovenstående forhold skal være relevante, vil de også have indflydelse på GPS-Referencen, hvilket ikke synes at være tilfældet.

9.3.4 Vurdering

Holdes de udregnede præcisioner op mod præcisionerne fået af KMS ses en væsentlig forbedring ved GPSnet. I både højde samt plan er spredningerne faldet med 6 mm. Som tidligere omtalt skyldes dette antageligt, at der er installeret nyt software i GPSnets centrale beregningsenhed, siden KMS udførte testen.

På baggrund af undersøgelsen af, om præcisionen afhænger af afstanden til den nærmeste referencestation, kan det siges, at der ses en tendens til, at punkt 984 ikke har været egnet i forbindelse med Test 1 og Test 2. Forholdene for GPS-måling i dette punkt er nemlig ikke optimale.

Varianskoefficienterne i denne test er de samme, som fundet i Test 1. Det vil sige, at undersøgelsen af præcisionen af GPS-Referencen og GPSnet er yderst pålideligt. Dette konkluderes, da varianskoefficienten i disse tilfælde er ca. 5%. I forbindelse med undersøgelsen af indflydelsen af afstanden fra referencestationen til det indmålte punkt, ender varianskoefficienten på ca. 12%. Dette resultat må også siges at være pålideligt. At resultaterne er pålidelige, kan konkluderes, idet varianskoefficienter af denne størrelse sammen med præcisioner på centimeterniveau ikke vil påvirke resultaterne.

9.4 Test 3 - Nabonøjagtighed

Formålet med denne test er at undersøge nabonøjagtigheden imellem punkter. Nabonøjagtighed er et udtryk for, hvor godt punkter

passer sammen indbyrdes. I denne test defineres nabonøjagtighed som nøjagtigheden af de dimensioner og højdeforskelle, der kan beregnes på baggrund af GPS-målinger. Idet GPS-målinger blandt andet som følge af satellitkonstellationen er korreleret over tid, jf. 10.2 *Test 5 - Korrelation*, kan den indbyrdes nabonøjagtighed mellem punkter være god, til trods for at den absolutte nøjagtighed på de enkelte punkter er dårlig. I øvrigt undersøges det, om nabonøjagtigheden afhænger af afstanden til referencestationen. Ud over nabonøjagtigheden undersøges også nabopræcisionen, der svarer til præcisionen af de beregnede dimensioner og højdeforskelle. Undersøgelsen gennemføres både i planen og i højden.

9.4.1 Teori

Den teori, der ligger til grund for Test 3, omhandler i første omgang teori omkring transformation af GPS-koordinater til koordinater i et lokalt system. I teori afsnittet forklares endvidere, hvordan værdierne for nabopræcision og nabonøjagtighed er udregnet.

Transformation til lokale koordinater

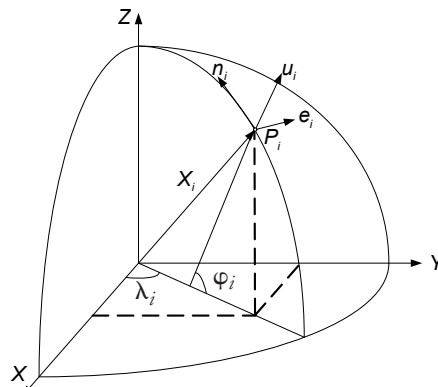
De målte GPS-koordinater er tredimensionale og ligger i et geocentrisk koordinatsystem. For at kunne holde GPS-koordinaterne til de indmålte punkter op imod dimensioner og højdeforskelle målt i marken skal GPS-koordinaterne omregnes til dimensioner i planen og højdeforskelle. Dette gøres i et topocentrisk koordinatsystem. I den forbindelse er det en fordel at benytte sig af et lokalt koordinatsystem, da der i et lokalt koordinatsystem ikke skal tages forbehold for, hvor punkterne befinder sig i dette. Eksempelvis vil en omregning til UTM-koordinater i teorien betyde, at der eventuelt skal tages forbehold for en målestoksændring i beregningen af dimensionerne.

Udgangspunktet for transformationen er kartesiske koordinater i EUREF89. Disse geocentriske koordinater skal som nævnt omregnes til koordinater i et lokalt topocentrisk koordinatsystem.

Akserne i det lokale koordinatsystem, n_i , e_i , og u_i defineres i det globale koordinatsystem som værende:

$$n_i = \begin{bmatrix} -\sin \varphi_i \cos \lambda_i \\ -\sin \varphi_i \sin \lambda_i \\ \cos \varphi_i \end{bmatrix}, e_i = \begin{bmatrix} -\sin \lambda_i \\ \cos \lambda_i \\ 0 \end{bmatrix}, u_i = \begin{bmatrix} \cos \varphi_i \cos \lambda_i \\ \cos \varphi_i \sin \lambda_i \\ \sin \varphi_i \end{bmatrix}$$

hvor φ_i og λ_i er geografiske koordinater til det punkt i det globale koordinatsystem, der ønskes som origo i det lokale koordinatsystem, jf. figur 9.29.

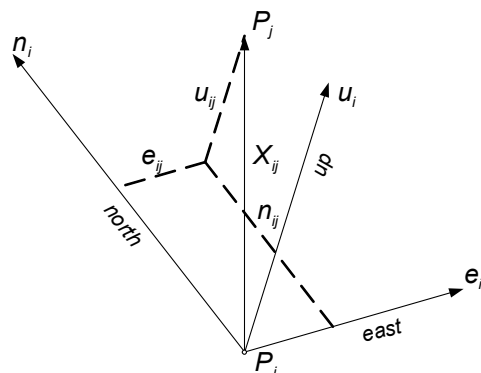


Figur 9.29: Det globale og lokale koordinatsystem. [Hofmann, 2001, s. 283]

Vektorerne n_i og e_i udspænder tangentplanen til kuglen i punktet P_i , der er origo i det lokale system. Den tredje vektor, u_i , står vinkelret på tangentplanen og ellipsoiden i punktet P_i .

De lokale koordinater for et givent punkt P_j bestemmes efterfølgende ved at projicere den globale stedvektor X_{ij} mellem origo P_i og punktet P_j ind på de planer, der defineres af de lokale akser, jf. figur 9.30:

$$x_{ij} = \begin{bmatrix} n_{ij} \\ e_{ij} \\ u_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_i \cdot X_{ij} \\ e_i \cdot X_{ij} \\ u_i \cdot X_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N \\ E \\ U \end{bmatrix}$$



Figur 9.30: Projiceringen af den globale stedvektor ind på de lokale planer. [Hofmann, 2001, s. 284]

Resultatet af projiceringen er koordinaterne N , E og U , der er defineret i det lokale koordinatsystem. Ovenstående teori er anvendt i praksis i det udarbejdede Matlab-script *dimensionsprogram.m*, jf. bilag 8.

[Hofmann, 2001, s. 282-284]

Nabopræcisionen

Præcisionsudtrykket tager som nævnt i Test 2 udgangspunkt i det beregnede gennemsnit af et antal målinger og beregnes ved:

$$\sigma_{naboprae} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{nabo(i)} - \mu_{nabo})^2}$$

hvor:

- $\sigma_{naboprae}$: nabopræcisionen
- n : antal målinger
- $x_{nabo(i)}$: dimension eller højdeforskel beregnet ud fra RTK-måling.
- μ_{nabo} : gennemsnittet af de beregnede dimensioner eller højdeforskelle.

Nabonøjagtigheden

Nøjagtighedsudtrykket tager i modsætning til præcisionen udgangspunkt i den værdi, der er udregnet som den sande. De sande værdier er fundet gennem kontrolmålinger. Nabonøjagtigheden beregnes med følgende formel:

$$\sigma_{nabonoej} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{nabo(i)} - X_{nabo})^2}$$

hvor:

- $\sigma_{nabonoej}$: nabonøjagtigheden
- n : antal målinger
- $x_{nabo(i)}$: dimension eller højdeforskel beregnet ud fra RTK-måling
- X_{nabo} : dimension eller højdeforskel fundet gennem båndmål eller nivellement. Disse betragtes som de sande værdier

Hvorvidt nabonøjagtigheden kan fastlægges ved blot at måle et enkelt punkt ind flere gange kan diskuteres. Den sande afstand mellem målingerne sættes i det tilfælde til 0, hvorefter det er muligt at holde afvigelseerne op imod den sande værdi. Udførelsen og databearbejdningen virker for denne metodes vedkommende enkel og overskuelig. Data fra Test 5 opfylder i øvrigt datakravene til denne metode. Ulempen ved metoden er imidlertid, at den eksempelvis i forhold til fysiske dimensioner målt i marken, er meget abstrakt og derfor svær at forholde sig til rent praktisk som bruger af RTK-tjenesterne.

En anden mulighed er at benytte den beregnede præcision af RTK-tjenesterne i Test 2 til beregning af nabonøjagtigheden, idet en dimension defineres af to indmålte punkter. Ud fra præcisionen på to indmålte punkter opstilles der ved brug af denne metode et fejlteoretisk udtryk for præcisionen af dimensionen mellem punkterne. For denne metode gælder dog det samme som for den første metode. Metoden

og resultatet af den er det rent praktisk svært at forholde sig til som bruger.

Nabonøjagtigheden er derfor fastlagt på en tredje måde, der formodentlig er lettere at forholde sig til som bruger. Denne metode beskrives i det følgende.

9.4.2 Udførelse

Dataindsamlingen foretages sideløbende med de andre test på Fyn. Forud for dataindsamlingen skal der dog etableres fem testbaner. Dataindsamlingen består i at opmåle disse testbaner ved brug af RTK-tjenesterne. Undervejs kontrolleres og bestemmes testbanerne ved brug af mere nøjagtige målemetoder.

Etablering af testbaner

Forud for målingerne etableres der ved hvert af de fem 10-km punkter en testbane til test af nabonøjagtighed. Testbanen består af fire jernrør, der så vidt muligt er placeret, så de udgør hjørnerne i et rektangel, jf. figur 9.31.



Figur 9.31: De fire jernrør inden de bliver banket ned i jordhøjde ved punkt 809.

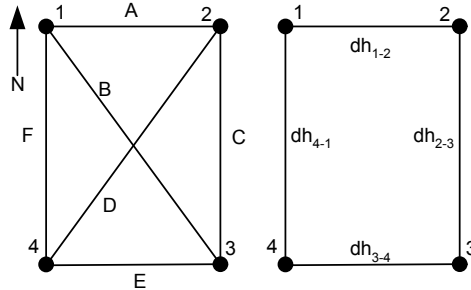
I midten af de enkelte jernrør er der placeret noget træ og en skrue, jf. figur 9.32, hvilket



Figur 9.32: Det specialfremstillede jernrør med træ og en skrue i midten.

udover at sikre en bedre definition af punkterne også gør dem lette at stille op i med en to-meter stok og nivellere til med et stadie.

Punkterne i de fem rektangler nummereres som vist på figur 9.33. Endvidere fremgår også dimensionernes og højdeforskellenes navne af figuren.



Figur 9.33: Nummering af punkterne samt dimensionernes og højdeforskellenes navne.

Opmåling af testbaner med RTK

De fem testbaner opmåles med RTK efterhånden som 10-km punkterne besøges på de tolv runder. Opmålingen foretages som regel af to personer. Den ene person styrer målingen og GPS-modtageren, mens den anden person fungerer som medhjælper, jf. figur 9.34. Medhjælperens opgave er at stille to-meter stokken op i punkterne ved brug af stativben og sørge for at få libellerne på to-meter stokken til at spille ind.



Figur 9.34: Opmålingen af testbanen foretages af to personer.

Alt imens to-meter stokken placeres i det første punkt ringes der op til GPS-Referencen. Når to-meter stokken er centreret, registreres punktet, hvorefter medhjælperen flytter stokken til det næste punkt. Forbindelsen til GPS-Referencen og initialiseringen opretholdes undervejs i registreringen af de fire punkter, der udgør testbanen. I tilfælde af problemer omkring forbindelse eller initialisering startes der forfra. Efter registrering af fjerde og sidste punkt afbrydes forbindelsen til GPS-Referencen. En sådan runde tager ca. 6-7 minutter. Herefter gentages proceduren ved brug af GPSnet.

De fem testbaner er således hver især indmålt 12 gange ved brug af GPS-Referencen og 12 gange ved brug af GPSnet.

Kontrolmåling af testbaner

For at kunne holde GPS-målingerne op imod nogle sande værdier og for løbende at kontrollere, at jernrørene ikke har sat sig, kontrolmåles testbanerne i forbindelse med første, femte og tiende runde. Kontrolmålingen udføres ved brug af stålband, nivellerinstrument og stadie, jf. figur 9.35. I forbindelse med dimensionsmålingen noteres temperaturen.



Figur 9.35: Nivellement i forbindelse med kontrolmålingen af testbanerne.

For at undgå grove fejl udføres dimensionsmålingen og nivellementet hver især med én overbestemmelse. Figur 9.33 angiver, hvorledes dimensionerne i planen og højdeforskellene

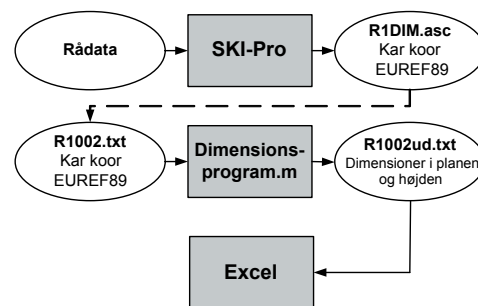
punkterne imellem er navngivet. Overbestemmelsen gør det desuden muligt at kontrollere målingerne i marken. I forbindelse med nivellementet beregnes eksempelvis en lukkesum. Frem for at også at kontrollere dimensionerne ved hjælp af overbestemmelsen udføres kontrolmålingen dobbelt hver gang, hvorefter resultatet af de to målinger sammenholdes i marken.

9.4.3 Databearbejdning

Databearbejdningen i forbindelse med Test 3 er opdelt i et afsnit omhandlende omregning af GPS-kordinater til dimensioner, et afsnit omhandlende udjævning af kontrolmålingen samt et afsnit omhandlende det endelige resultat af Test 3.

Omregning af GPS-kordinater til dimensioner

Da der i denne test tages udgangspunkt i dimensionerne mellem de opmålte punkter og ikke de enkelte kordinater, skal de fire punkters kordinatsæt omregnes til dimensioner, jf. figur 9.36. Frem for selv at omregne de opmålte punkter til kartesiske kordinater i EUREF89 hentes punkterne ud som sådanne kordinater ved hjælp af SKI-Pro. Kartesiske kordinater er i forhold til geografiske kordinater nemmere at stille op i en tekstfil og håndtere datamæssigt. Kordinaterne omregnes efterfølgende ved



Figur 9.36: Dataflowet for omregningen af fire GPS-kordinater til dimensioner i planen og højden.

hjælp af Matlab-scriptet *dimensionsprogram.m* til koordinater i et lokalt koordinatsystem, og derpå beregnes dimensioner i planen og højdeforskelle.

Udjævning af kontrolmålinger

På baggrund af de fire punkter, som den enkelte testbane udgøres af, bestemmes som tidligere nævnt seks dimensioner i planen og fire højdeforskelle. Dimensionerne skal som følge af den ene overbestemmelse udjævnes. Denne udjævning er foretaget med udjævningsprogrammet Turbonet, hvor dimensionsmålene optræder som observationer. For en nærmere beskrivelse af Turbonet henvises til 10.5 Test 8 - Afsætning. Til hver testbane knytter der sig tre dobbeltmålinger af de seks dimensioner, hvilket i alt giver 36 dimensionsmål. Dimensionsmålene er hver især blevet tildelt en spredning på 1 mm. Eneste undtagelse er dimensionsmålene foretaget ved punkt 002, idet grantræer og ujævnt terræn besværliggjorde dimensionsmålingen her. Disse dimensionsmål er blevet tildelt en spredning på 2 mm. Resultatet af de fem udjævninger i form af spredning på vægtenheden og værdier for den globale test fremgår af figur 9.37. Som det fremgår af figuren er ingen af udjævningerne blevet afvist i den globale test. Der er ingen grove fejl, hvilket også ville have været konstateret ved kontrollen i marken.

Punkt	Spredn. på vægtenhed	Chi ² nedre grænse	Chi ² øvre grænse	Chi ² test
821	1,075	17,5	48,2	35,9
809	0,885	17,5	48,2	24,3
984	1,079	17,5	48,2	36,1
811	0,927	17,5	48,2	26,6
002	1,026	17,5	48,2	32,6

Figur 9.37: Resultatet af de fem udjævninger af dimensionsmålene.

Højdeforskellene bør også udjævnes, men da der i forbindelse med lukkesumsberegningerne kun er konstateret afvigelse på 1 mm, beregnes

blot gennemsnittet af de seks gange, højdeforskellene er blevet målt.

Resultat af Test 3

Dimensionerne fra GPS-målingerne kan nu sammenholdes med dimensionerne fra stålbandmålingen, ligesom højdeforskellene fra nivellelementet sammenlignes med GPS-målingerne. Dette gøres i et Excel-ark, hvor nabopræcisionen og -nøjagtigheden for de to RTK-tjenester udregnes for de enkelte punkter og samlet for alle punkter, jf. figur 9.38 og 9.39.

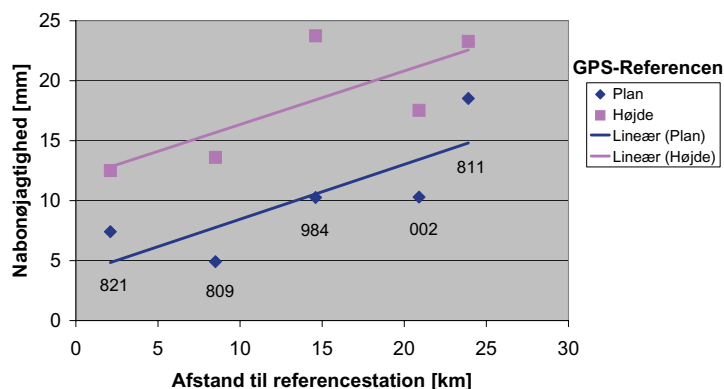
GPS-Ref Punkt	Afstand til ref.st. [km]	Præc. i planen [mm]	Nøj. i planen [mm]	Præc. i højden [mm]	Nøj. i højden [mm]
821	2,1	7	7	12	13
809	8,5	5	5	14	14
984	14,6	10	10	25	24
002	20,9	9	10	18	18
811	23,9	12	19	23	23
Middelspredning:		9	10	18	18

Figur 9.38: Nabopræcision og -nøjagtighed i planen og højden for GPS-Referencen.

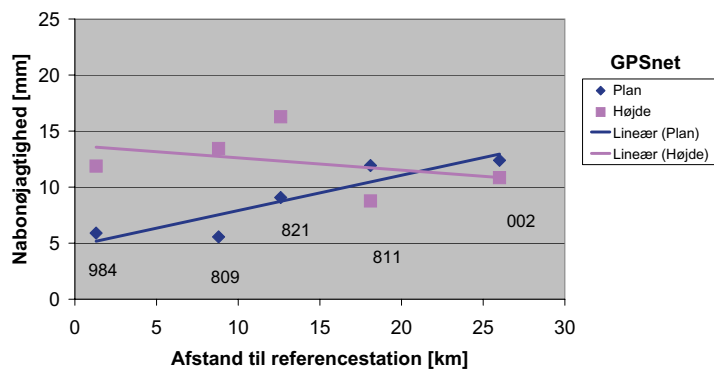
GPSnet Punkt	Afstand til ref.st. [km]	Præc. i planen [mm]	Nøj. i planen [mm]	Præc. i højden [mm]	Nøj. i højden [mm]
984	1,3	5	6	12	12
809	8,8	6	6	13	13
821	12,6	9	9	16	16
811	18,1	5	12	8	9
002	26,0	9	12	10	11
Middelspredning:		7	9	12	12

Figur 9.39: Nabopræcision og -nøjagtighed i planen og højden for GPSnet.

I forbindelse med beregningerne er der sorteret en enkelt af opmålingerne foretaget med GPS-Referencen fra. Det drejer sig om en opmåling foretaget ved punkt 984 i Odense. Som nævnt i Test 2 kan obstruktioner i nærheden af dette punkt formodentlig være årsag til dårlige målinger. Medtages målingen bliver nabopræcisionen og -nøjagtigheden for dette punkt ca. 2 cm. dårligere. En nærmere undersøgelse viser, at 3D-kvaliteten af målingen i et



Figur 9.40: Nabonøjagtigheden i planen og højden for GPS-Referencen som funktion af afstanden til referencestationen.



Figur 9.41: Nabonøjagtigheden i planen og højden for GPSnet som funktion af afstanden til referencestationen.

enkelt tilfælde er oppe på 6,5 cm, hvilket også er højt i forhold til de andre målinger ved dette punkt. 3D-kvaliteten for disse målinger ligger generelt på omkring 2 cm. Udover dette er der ved at holde de enkelte målinger op imod en grovfejlsgrense, der defineres af 3 gange spredningen på målingerne, ikke konstateret nogen grove fejl.

Af tabellerne fremgår det, at GPSnet generelt giver et bedre resultat end GPS-Referencen. Resultatet af beregningerne af nabonøjagtigheden er også illustreret grafisk, jf. figur 9.40 og 9.41. Forudsættes en lineær tendens, viser figur 9.40 en svag tendens til, at nabonøjagtigheden for GPS-Referencen forringes, efterhånden som afstanden til referencestationen

vokser. Det samme synes at være tilfældet med hensyn til GPSnet i planen, jf. figur 9.41. Dog er tendensen her svagere. Med hensyn til nabonøjagtigheden i højden er tendensen modsatrettet, hvilket virker ulogisk. Afvigelsen fra normen skal formodentlig tilskrives forskelle i opmålingsomgivelser, og at linien kun baserer sig på fem punkter. Ligeledes er tendensen meget svag og ikke særlig lineær. Med andre ord vil selv små ændringer i observationerne kunne ændre udfaldet og vise ingen eller en modsatrettet tendens. Hvorvidt det er rimeligt at tale om lineære tendenser diskuteres generelt i 9.6 *Sammenfatning på regional test*. I bilag 9 er det muligt at se ovenstående grafer i kombination med konfidensintervaller. Størrelsesordenen af de lineære tendenser fremgår af figur 9.42.

Nabonøjagtighed 1- σ	Grundfejl [mm]	Afstandsfhængig fejl [ppm]
GPS-Referencen i planen	4	0,5
GPS-Referencen i højden	12	0,4
GPSnet i planen	5	0,3
GPSnet i højden	14	-0,1

Figur 9.42: Størrelsesordenen af de lineære tendenser for nabonøjagtigheden.

9.4.4 Vurdering

Karakteristisk for resultatet er, at nabopræcisionen og nabonøjagtigheden stort set er ens. Dette er tegn på, at middelværdien for GPS-målingerne ligger tæt op ad den sande værdi. Der ser derfor ikke ud til at være nogle systematiske fejl i forbindelse med RTK-målingerne, båndmålene eller nivellementet.

Indmålingen af de fire punkter ved hver runde tog i gennemsnit 6-7 minutter. Dette betyder, at der sandsynligvis er korrelation mellem de fire punkter. Det kunne have været interessant at indmåle de fire punkter gentagne gange i løbet af eksempelvis en time, og se hvordan dette ville have påvirket resultaterne. Dette har af tidsmæssige årsager ikke været muligt.

Variationskoefficienten og dermed pålideligheden af de beregnede spredninger i Test 3 fastlægges på baggrund af antallet af overbestemmelser. Med hensyn til nabopræcisionen og -nøjagtigheden i planen drejer det sig om 6 dimensioner på hver af de 5 testbaner på de 12 runder, hvilket i alt giver 360 målinger. På trods af at målingerne ikke er uafhængige betragtes de i databehandlingen som sådan. Idet kun 6 dimensioner er sorteret fra, er der derfor tale om 353 overbestemmelser, hvilket giver en variationskoefficient på ca. 4%. Spredningerne i planen er således fastlagt inden for et interval på $\pm 1/2$ mm.

Med hensyn til højderne er der tale om fire højdeforskelle på hver af de fem testbaner på de tolv runder, hvilket i alt giver 240 målinger. Idet fire af målingerne er sorteret fra, er der

tale om 235 overbestemmelser, hvilket giver en variationskoefficient på ca. 5 %. Dette betyder, at spredningerne i højden er fastlagt inden for ± 1 mm.

Variationskoefficienterne for de lineære tendenser og størrelsesordenen af tendenserne er ikke nær så god, idet der for et enkelt punkts vedkommende er tale om 66 og 44 overbestemmelser i henholdsvis planen og højden. Dette giver henholdsvis en variationskoefficient på ca. 9% og 11%. Punkterne på grafen kan altså eksempelvis for spredninger i højden variere med op til ca. ± 2 mm, hvilket i yderste konsekvens vil betyde en anden hældning og et andet resultat.

9.5 Test 4 - Initialiseringstid

Denne test omhandler en undersøgelse af initialiseringstiden ved de to RTK-tjenester. Formålet med testen er at undersøge om initialiseringstiden øges som følge af afstanden til referencestationen. Yderligere bestemmes den gennemsnitlige initialiseringstid for begge RTK-tjenester, og det undersøges, om disse overholder de oplyste værdier jævnfør specifikationerne for de to tjenester.

9.5.1 Teori

De to RTK-tjenester bygger, som tidligere beskrevet, på to forskellige RTK-målemetoder. Det formodes derfor, at initialiseringstiden som følge af afstanden til referencestationerne vil være forskellig.

GPS-Referencen

I forbindelse med enkeltstations-RTK, hvor der anvendes én referencestation og én rover, kan periodekonstanten løses ved afstande op til 20 km, og initialiseringen kan gennemføres. Ved større afstande kan fejlbidragene fra atmosfæren ikke længere elimineres som følge af mindre ensartethed, jf. 3.2.2 *Traditionel RTK*. Dette betyder, at initialiseringen besværliggøres,

ligesom nøjagtigheden af en positionsbestemmelse bliver dårligere. Ved GPS-Referencen vil initialiseringstiden således øges i takt med, at afstanden til referencestationen øges.

GPS-Referencen lover, at initialiseringen kan gennemføres ud til 25 km inden for ca. 30 sekunder. GPS-Referencen definerer i denne sammenhæng initialiseringstiden som tiden, der går fra påbegyndelse af opkald til referencestationen, og til at måling med centimeters nøjagtighed kan iværksættes.

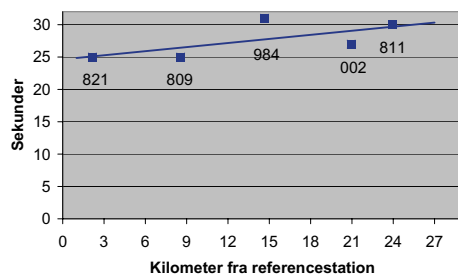
GPSnet

I forbindelse med netværks-RTK gælder ikke de samme afstands begrænsninger i forbindelse med initialiseringen, idet VRS'en sender observationerne, som om den er placeret umiddelbart ved siden af roveren. Det er således muligt at initialisere så længe, at der opmåles inden for det område, som dækkes af RTK-netværket. Ved GPSnet bør initialiseringstiderne derfor antage nogenlunde samme værdi på trods af den øgede afstand til referencestationen.

GPSnet lover, at det gennemsnitligt er muligt at initialisere inden for ca. 60 sekunder. GPSnet definerer initialiseringstiden, som tiden der går fra koldstart af GPS-modtageren, og til opmåling på centimeterniveau kan påbegyndes.

9.5.2 Udførelse

I denne test defineres initialiseringstiden, som



Figur 9.43: Gennemsnit af initialiseringstid fordelt på afstande ved GPS-Referencen.

den tid der går, fra forbindelsen til referencestationen er opnået, og til opmåling med centimeter nøjagtighed kan påbegyndes. Inden opkaldet til referencestationen foretages, skal GPS-modtageren have forbindelse til de synlige satellitter på både L1 og L2.

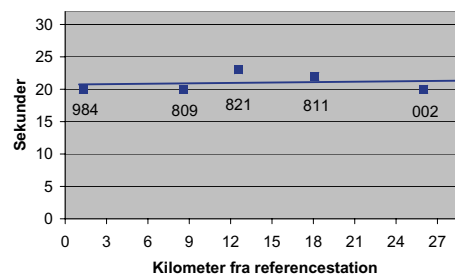
Definitionen adskiller sig fra de tidligere nævnte, idet tiden først registreres fra det tidspunkt, hvor roveren begynder at modtage faseobservationer fra referencestationen.

I forbindelse med opmålingen af det regionale testfelt er initialiseringstiderne for RTK-tjenesterne registreret og anført i et observations-skema, jf. bilag 5. I de tilfælde hvor initialiseringen ikke er opnået inden for to minutter, er ny initialisering påbegyndt. Denne grænse er blevet fastsat af tidsmæssige årsager. Der var flere gange i løbet af opmålingen, hvor initialiseringen blev afbrudt og genstartet.

Dataindsamlingen har givet fire initialiseringstider for hver RTK-tjeneste pr. runde til hvert 10-km punkt. Initialiseringstiderne er registreret i forbindelse med Test 1, 2 samt 3. Der er til hvert 10-km punkt registreret 48 initialiseringstider for hver RTK-tjeneste, hvilket i alt giver 240 initialiseringstider til hver RTK-tjeneste.

9.5.3 Databearbejdning

Databearbejdningen resulterer i en gennemsnitlig initialiseringstid for begge RTK-tjenester til



Figur 9.44: Gennemsnit af initialiseringstid fordelt på afstande ved GPSnet.

hvert 10 km-punkt. De 48 initialiseringstider til hvert 10-km punkt midles, og resultatet er angivet i de to diagrammer, som fremgår af figur 9.43 samt 9.44.

GPS-Referencen

På figur 9.43 ses en svag tendens til stigende initialiseringstid efterhånden som afstanden til referencestationen øges. Under 10 km ligger initialiseringstiderne gennemsnitligt på 25 sekunder, mens de ved 24 km ligger på ca. 30 sekunder. Initialiseringstiden ved 14 km er imidlertid 31 sekunder, og er dermed den højeste. Dette skyldes formodentlig, at forholdene ved dette punkt ikke er optimale for måling med GPS. Som tidligere nævnt under Test 2 er der obstruktioner, hvilket betyder, at GPS-antennen modtager signaler fra færre satellitter, og GPS-modtageren har således svært ved at initialisere, i de tilfælde hvor antallet af satellitter i forvejen er lavt.

Den gennemsnitlige initialiseringstid for GPS-Referencen er 27 sekunder, hvilket umiddelbart overholder specifikationerne på ca. 30 sekunder. Det er imidlertid ikke muligt umiddelbart at sammenligne disse tal. Initialiseringstiden er her defineret anderledes end GPS-Referencens definition af initialiseringstiden. Tiden, der går med at opnå forbindelse til referencestationen, er ikke medregnet i de 27 sekunder, som det er tilfældet i GPS-Referencens definition. Der er efterfølgende lavet et forsøg, som viser, at denne proces tager ca. 14 sekunder, hvilket betyder, at GPS-Referencen ikke overholder de angivne 30 sekunder. Den gennemsnitlige initialiseringstid er snarere ca. 41 sekunder.

GPSnet

Initialiseringstiderne for GPSnet ligger nogenlunde jævnt fordelt, jf. figur 9.44. Initialiseringstiderne ligger mellem 20 og 23 sekunder, og der ses ingen tendens til en stigning som følge af

afstanden til referencestationen. Den høje værdi ved punkt 821 skyldes blandt andet to store initialiseringstider på 74 og 108 sekunder i forbindelse med runde tre. De resterende to tider ved runde tre er 16 og 19 sekunder, så det har ikke været muligt at fastslå årsagen til de længere initialiseringstider. Forholdene i punktet er gode med hensyn til udsynet til himlen.

Initialiseringstiderne viser ikke nogen afhængighed af afstanden til referencestationen. Gennemsnittet for initialiseringstiderne ved GPSnet er 21 sekunder, hvilket er meget tilfredsstillende. Der er ingen problemer med at overholde de anførte specifikationer på trods af, at resultaterne heller ikke direkte kan sammenlignes. Efterfølgende forsøg har vist, at det tidsbidrag, som opkaldet til referencestationen vil bidrage med, er ca. 5 sekunder. Den gennemsnitlige initialiseringstid er derfor ca. 26 sekunder, hvilket er væsentligt under de angivne 60 sekunder.

Resultater fra tidligere test

Initialiseringstiderne ved de to RTK-tjenester er tidligere blevet testet, jf. 7.1 *Tidligere test af RTK-tjenesterne*. Den gennemsnitlige initialiseringstid for GPS-Referencen blev bestemt til ca. 45 sekunder, hvilket stemmer overens med resultatet på 41 sekunder i denne test. I forbindelse med GPSnet blev den gennemsnitlige initialiseringstid bestemt til ca. 50 sekunder, hvilket er langt højere end de ca. 26 sekunder, som er resultatet i denne test. Noget tyder på, at de softwareopdateringer, der er foretaget i GPSnet, har forbedret initialiseringstiden væsentligt.

9.5.4 Vurdering

På baggrund af denne test kan det konkluderes, at både GPS-Referencen og GPSnet har korte initialiseringstider på henholdsvis 41 og 26 sekunder. I forhold til de angivne specifi-

kationer overholder GPS-Referencen ikke helt den angivne værdi på 30 sekunder. GPSnet overholder de angivne specifikationer, men det er heller ikke svært, da de 60 sekunder er højt sat. Testen vurderes til at være ret pålidelig, da de 240 registreringer af initialiseringstiden for hver RTK-tjeneste betyder, at varianskoeficienten bliver ca. 5 %.

Endelig ses der en svag tendens til stigende initialiseringstider ved GPS-Referencen som følge af afstanden til referencestationen stiger. Ved GPSnet er der en stabil initialiseringstid, og der er ingen afstandsafhængighed. Ovenstående stemmer overens med teorien bag RTK-målemetoderne.

9.6 Sammenfatning på regional test

I dette afsnit sammenfattes de opnåede resultater i den regionale test. Dette gøres ved at drage konklusioner på tværs af de enkelte testafsnit.

Præcisionen af GPS-Referencen i planen ligger i nærheden af de tilsvarende opnåede absolutte nøjagtigheder. Dette konkluderes, da den absolutte nøjagtighed for GPS-Referencen i planen er 18 mm, mens præcisionen er 16 mm. For GPSnet er der en forskel mellem den absolutte nøjagtighed samt præcisionen på omkring 5 mm i både plan samt højde. Årsagen til forskellen mellem disse resultater er formodentlig, at præcisionen ikke påvirkes af nøjagtigheden af 10-km punkterne. KMS opgiver disse til 5 mm i planen samt 10 mm i højden.

Præcisionen af højden i GPS-Referencen er 22 mm, hvorimod den tilsvarende absolutte nøjagtighed er 45 mm. Her ses det tydeligt, at en systematisk fejl influerer på resultatet af den absolutte nøjagtighed. Det er derfor undersøgt, om dette skyldes en forskydning, hvilket formodentlig er tilfældet. Den systematiske fejl

skyldes muligvis en forskydning af antennen ved referencestationen i Søndersø.

Overordnet er der fundet, at middelspredningen for nabonøjagtigheden er bedre end den absolutte nøjagtighed, som er fundet gennem Test 1. Dette viser blandt andet, at en dimension kan bestemmes mere nøjagtigt end et enkelt punkt. I forbindelse med opmålings- og afsætningsopgaver er brugerne ofte i højere grad interesseret i at kende den indbyrdes nøjagtighed imellem punkter end den absolutte nøjagtighed eller præcisionen af punkterne. I tilfælde hvor dette ønskes, kan brugerne med fordel benytte de beregnede værdier for nabonøjagtigheden i stedet. Forskellen mellem præcisionen og nabonøjagtigheden skyldes, at nabonøjagtigheden udregnes på baggrund af korrelerede målinger foretaget inden for 6-7 minutter, mens præcisionen bestemmes ud fra uafhængige målinger indsamlet over flere dage. Korrelationen i forbindelse med nabonøjagtigheden resulterer i den lavere spredning.

Det er endvidere værd at bemærke, at nabonøjagtigheden for højden ved brug af GPSnet er 12 mm. Med udgangspunkt i en kendt kote kan højdebestemmelsen ved hjælp af GPSnet inden for et lokalt område og et afgrænset tidsrum altså forbedres med 8 mm. Dette ses, da den absolutte nøjagtighed i højden for GPSnet har vist et resultat på 20 mm. Betragtes de tilsvarende værdier for højden fundet med GPS-Referencen, ses det, at højdebestemmelsen ved hjælp af GPS-Referencen kan forbedres med 27 mm. Tages der højde for den systematiske fejl på ca. 30 mm, som omtales i 9.2 Test 1 - *Absolut nøjagtighed*, er der ikke tale om nogen forbedring.

Der er endvidere gennem de fire test, som udgør den regionale test, anvendt tendenslinier. Der er flere gange i disse afsnit sat spørgs-

målstegn ved, om det er rimeligt at anvende disse tendenslinier. Spørgsmålet er stillet på den baggrund, at tendenslinierne flere gange overskrider konfidensintervallerne. Som et eksempel på dette kan nævnes plottet af konfidensinterval og tendenslinie i forbindelse med den absolutte nøjagtighed i højden ved GPSnet, jf. figur 9.20. Tendensliniens overskridelse af konfidensintervallerne har imidlertid ikke den store betydning. Allerede inden dataindsamlingen kan det besluttes at arbejde med tendenslinier til at undersøge, om nøjagtigheden afhænger af afstanden til referencestationen. Hvis resulta-

tet efterfølgende tydeligt viser, at eksempelvis en parabel i stedet beskriver den afstandsaafhængige fejl, anvendes denne derefter til at udtrykke den afstandsaafhængige fejl [Dethlefsen, den 27.05.2004]. Endvidere arbejdes med tendenslinier, da dette er den letteste måde at forholde sig til, om eksempelvis nøjagtigheden afhænger af afstanden til referencestationen. KMS arbejder også med tendenslinier, og da de opnåede resultater ønskes sammenlignet med resultaterne fra KMS' test, udføres databehandlingen samt præsentationen på samme måde som i KMS' test.

10

Lokal test

I dette kapitel behandles den lokale test. Formålet med kapitlet er at redegøre for planlægningen og gennemførelsen af de fire test, der indgår i den lokale test. Kapitlet indeholder følgende fem afsnit:

- Planlægning af testfelt
- Test 5 - Korrelation
- Test 6 - Udstyrsafhængighed
- Test 7 - Omregning og transformation
- Test 8 - Afsætning

Først beskrives planlægningen af de lokale test. Derefter følger fire afsnit, der hver især indeholder én test. I hvert af disse afsnit gennemgås testene, og resultaterne præsenteres. Der er ikke

udarbejdet en sammenfatning på de lokale test, idet de konklusioner, der kan drages på tværs af testene i lige så høj grad involverer nogle af de regionale test. Disse konklusioner behandles derfor først i *12 Konklusion*.

10.1 Planlægning af testfelt

Opmålingerne i forbindelse med de lokale test er foretaget i den sidste halvdel af april umiddelbart efter opmålingen af det regionale testfelt. Der har ikke været behov for en overordnet planlægning på grund af testenes vidt forskellige karakter.

Opmålingerne i forbindelse med den lokale test er gennemført forskellige steder i Aalborg. Dataindsamlingen til Test 5 er foretaget i de

faste punkter på taget af Aalborg Universitet. Målingerne til Test 6 er gennemført i REFDDK-punktet på Lindholm Høje, mens opmålingerne i forbindelse med Test 7 og 8 er foregået på en græsplæne ved Aalborg Universitet.

10.2 Test 5 - Korrelation

Formålet med denne test er at undersøge i hvor høj grad, der er tale om korrelation mellem positioner, der er bestemt ved hjælp af GPS. Testen skal med andre ord fastslå varigheden af denne korrelation. Tidsafhængig korrelation er et problem i de tilfælde, hvor et punkt skal indmåles med uafhængige overbestemmelser. For at opnå uafhængige målinger kan den anden måling af punktet først gennemføres, når korrelationen er aftaget.

10.2.1 Teori

GPS-målinger betragtes som fysisk korrelerede, hvis de påvirkes af de samme ydre forhold. Med andre ord er målinger foretaget det samme sted og på samme tid fysisk korrelerede, idet målingerne blandt andet påvirkes af de samme atmosfæriske forhold og den samme satellitkonstellation. En del af korrelationen og disse ydre forhold er det muligt at tage forbehold for i beregningerne og positionsbestemmelsen, men GPS-målinger er stadig fysisk korrelerede. Den fysiske korrelation kan både være af stedbestemt eller tidsmæssig karakter. Denne test tager fokus på den tidsmæssige korrelation.

KMS' test fra 2002 viste, at tre målinger til ét punkt, foretaget med 20 sekunders interval på samme initialisering var stærkt korrelerede. Ved reinitialisering mellem hver af de tre målinger, var korrelationen ikke nær så udtalt, jf. 7.1.1 *Test udført af KMS*. I øvrigt omtaler KMS i en tidligere rapport omhandlende RTK-tjenesterne, at australske forsøg indikerer, at positioner bestemt ved hjælp af GPS er korrelerede indenfor ca. 40 minutter [Villadsen, 2002, s. 8].

Formålet med denne test er ikke blot at påvise korrelation, men også at fastlægge varigheden af den. I forbindelse med Test 5 er der indsamlet data, der kan anvendes til fastsættelse af korrelationstiden. Der findes flere metoder til beregning af korrelationstiden for disse data. Data kan eksempelvis analyseres ved hjælp af Box-Jenkins-metoden, der baserer sig på følgende formel:

$$r_j = \frac{\sum_{t=j+1}^T (y_t - \bar{y})(y_{t-j} - \bar{y})}{\sum_{t=1}^T (y_t - \bar{y})^2}$$

hvor:

- r_j: korrelationskoefficienten for en variabel y_t og en variabel y_{t-j}
- T: antallet af observationer

og

$$\bar{y} = \frac{\sum_{t=1}^T y_t}{T}$$

Ovenstående form for korrelation, som udregnes på baggrund af en enkelt variabel, der blot forskubbes med hensyn til tiden, kaldes også for autokorrelation. Formlerne er implementeret i Matlab-funktionen *autocorr.m*, der er en standardfunktion i Matlab.

Korrelationskoefficienten kan antage værdier fra -1 til +1. Der er tale om høj korrelation, hvis værdierne er tæt på ± 1 . Ved værdier omkring 0 er der ingen korrelation. Plottes disse korrelationskoefficienter ud som funktion af tidsintervallet mellem observationer, kaldes grafen for et korrelogram.

I forbindelse med Box-Jenkins-metoden sammenlignes korrelogrammet med nogle teoretiske modeller for at fastslå, hvilken form for korrelation, der er tale om. En af disse modeller kaldes Moving Average-modellen og kan blandt

anvendes, hvis det ønskes at påvise korrelation inden for et givent tidsrum.

I følge den teoretiske model skal korrelationskoefficienten falde til nul i løbet af det tidsinterval, som det formodes, at observationerne er korreleret. Efterfølgende skal korrelationskoefficienten forblive nul. Idet observationerne er behæftet med tilfældige fejl er de beregnede korrelationskoefficienter ikke eksakt nul. I stedet befinder de sig indenfor en øvre og nedre grænseværdi, der fastsættes ud fra følgende formel:

$$\pm \frac{2}{\sqrt{T}}$$

hvor:

T: antallet af observationer.

I ovenstående formel befinder 95 % af observationerne sig indenfor disse grænser.

[Hildebrand, 1987, s. 637-647]

10.2.2 Udførelse

Dataindsamlingen sker ved brug af egen reference og radiolink. Den krævede observationstid er ret omfattende, hvilket betyder, at RTK-tjenesterne er for dyre at anvende, og disse er derfor fravalgt.

Der er ikke behov for, at målingerne i Test 5 er koordineret i et landdækkende koordinatsystem, da det ikke er den absolutte nøjagtighed, der undersøges. Det er således ikke nødvendigt at foretage testen i officielle fikspunkter.

I forbindelse med testen er der anvendt tre Leica SR530 GPS-modtagere. GPS-antennerne er monteret i tre stabile punkter på taget af Aalborg Universitet. Referencen er opstillet i det ene punkt, mens de to rovere er opstillet i de andre punkter, jf. figur 10.1 og 10.2. Der anvendes to rovere for at udvide datagrundlaget. Fra



Figur 10.1: Opstilling af reference på taget af Fibigerstræde 11.



Figur 10.2: Opstilling af rover på taget af Fibigerstræde 11 i det ene af de to punkter, som er indmålt.

punkterne på taget er der frit udsyn til himlen, og risikoen for multipath er minimal.

GPS-modtagerne er konfigureret til at registrere koordinater hvert sekund. De to rovere indsamler data i to timer, hvorefter der foretages reinitialisering. Perioden på to timer er fastsat ud fra en indledende antagelse om, at korrelationen ophører indenfor dette tidsrum. Der er i alt indsamlet data i seks timer for hver rover. Datasættene fra den ene rover kaldes 51, 53 og 55, mens datasættene fra den anden kaldes 52, 54 og 56.

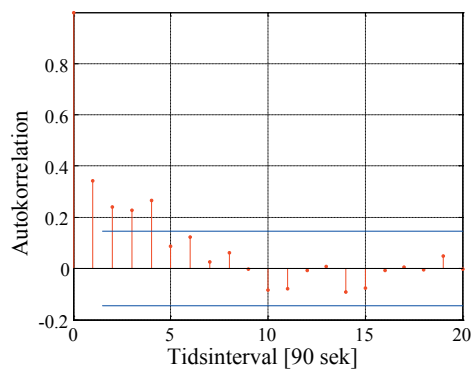
Koordinaterne til punkterne lagres som geografiske koordinater i EUREF89 og ellipsoidehøjder.

10.2.3 Databearbejdning

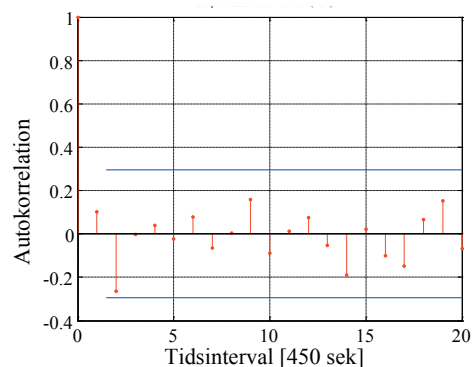
I forbindelse med databearbejdningen er det mest belejligt, at koordinaterne angives i meter. Derfor transformeres de tredimensionale geografiske koordinater i EUREF89 til plane koordinater i UTM32/EUREF89. Højden bibeholdes som ellipsoidehøjder. Transformationen til de plane koordinater sker ved hjælp af KmsTrans efter samme procedure som i Test 1.

Der tages i første omgang udgangspunkt i de målte ellipsoidehøjder. Ved hjælp af det udviklede Matlab-script *autokorrelation.m* er det muligt at beregne autokorrelationen med hensyn til forskellige tidsintervaller, jf. bilag 8. Scriptet resulterer i en række autokorrelationsgrafer, hvorudfra det er muligt at skønne, hvilket tidsinterval der bedst stemmer overens med teorien. Som nævnt skal korrelationskoefficienten falde til nul inden for tidsintervallet og efterfølgende forblive nul inden for de fastsatte grænser. Som det fremgår af figur 10.3 opfylder et tidsinterval på 90 sekunder ikke betingelserne, hvilket et tidsinterval på 450 sekunder derimod ser ud til, jf. figur 10.4.

I beregningerne er de tre datasæt 51, 53 og 55 sammensat til 6 timers måling af ellipsoide-



Figur 10.3: Autokorrelationsplot med et tidsinterval på 90 sekunder. Enkelte af korrelationskoefficienterne overskrider grænserne.



Figur 10.4: Autokorrelationsplot med et tidsinterval på 450 sekunder. Ingen korrelationskoefficienter overskrider grænserne.

højden, Northing og Easting, idet tidsserien og de tidsintervaller, der arbejdes med, på den måde kan gøres større. Med et tidsinterval på eksempelvis 510 sekunder vil der for to timers måling kun være tale om 14 observationer. Som følge heraf vil intervallet mellem den øvre og nedre grænse blive stort, hvilket gør det sværere at vurdere grafen.

Ved at skønne, hvilket tidsinterval der bedst opfylder de teoretiske betingelser, er der fundet frem til korrelationstider for de i alt seks datasæt, jf. figur 10.5

Korrelationstid	Højden [min]	Northing [min]	Easting [min]
Test 5.135	8	8	8
Test 5.246	9	9	9

Figur 10.5: Korrelationstiderne for de seks datasæt.

10.2.4 Vurdering

Det fremgår af figur 10.5, at de fastsatte korrelationstider ligger omkring 8-9 minutter. Test 5 viser, at brugeren for at kunne foretage en uafhængig måling i højden såvel som i planen skal vente ca. 9 minutter før der måles på ny. Dette tidsinterval er ikke nær så stort, som det tidsinterval på 40 minutter, der omtales i en af KMS' tidligere undersøgelser af RTK-tjenesterne. Et tidsinterval på 9 minutter er formodentlig ikke

svært at implementere i eventuelle opmålings- og afsætningsopgaver, hvor der er behov for en uafhængig overbestemmelse eller kontrol.

10.3 Test 6 - Udstyrsafhængighed

Formålet med denne test er at undersøge, om de to RTK-tjenester er udstyrsafhængige. Med dette menes, om RTK-tjenesterne fungerer bedre med én type udstyr frem for et andet.

Det formodes, at de to mest anvendte GPS-modtagere i Danmark kommer fra Leica Geosystems A/S samt Trimble. Derfor anvendes til denne test en Leica SR530 samt en Trimble 5800. Da Trimble 5800 ikke er til rådighed på Aalborg Universitet, er denne lånt hos Nellemann & Bjørnkjær.

Trimble 5800 er en to-frekvent GPS-modtager. Modtageren og antennen er samlet i en enhed. Enheden betjenes ved hjælp af Trimbles Attachable Computer Unit, som i daglig tale blot kaldes ACU. Kommunikationen mellem enhederne foregår via bluetooth-teknologien.

10.3.1 Teori

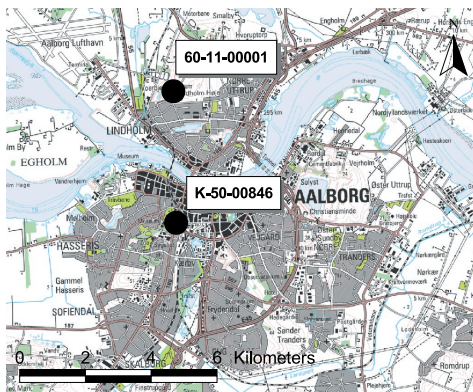
For at finde frem til om de to RTK-tjenester er udstyrsafhængige, udregnes en nøjagtighed i planen samt højden for hver kombinationsmulighed. Der findes fire kombinationsmuligheder, og disse er:

- Leica SR530 - GPS-Referencen
- Leica SR530 - GPSnet
- Trimble 5800 - GPS-Referencen
- Trimble 5800 - GPSnet

Nøjagtigheden i planen samt højden for de fire kombinationsmuligheder udregnes på baggrund af de indmålte koordinater samt koordinaten til et fikspunkt. Dette gøres ved hjælp af formlerne i 9.2 Test 1 - Absolut nøjagtighed.

10.3.2 Udførelse

Testen udføres i et fikspunkt, som besidder en overlegen nøjagtighed i forhold til RTK-måling. På baggrund af betragtningerne omkring valg af koordinatsystem i den regionale test, anvendes et REFDK-punkt eller 10-km punkt. Da testen ønskes udført i Aalborg eller omegn, betrages de to REFDK-punkter, som er beliggende her. Disse er punkterne 60-11-00001 og K-50-00846, som begge kan ses på figur 10.6.



Figur 10.6: Placeringen af 60-11-00001 i Nørresundby og K-50-00846 i Aalborg.

REFDK-punktet 60-11-00001 er et postament beliggende ved Lindholm Høje i Nørresundby. Der er fra punktet frit udsyn til himlen.

REFDK-punktet K-50-00846 er beliggende på toppen af Hotel Hvide Hus i Aalborg. Punktet er dog ikke optimalt i forbindelse med denne test. Dette skyldes, at det ofte er forholdsvist blæsende på toppen af hotellet, hvilket medfører en upræcis indmåling af punktet, når to-meter stok benyttes. Endvidere er belægningen omkring punktet ustabile træbjælker. Placeres stativ- eller treben på disse træbjælker resulterer det også i en ustabil indmåling af punktet. På figur 10.7 ses punktet og træbjælkerne.

Det sidste problem i forbindelse med måling i dette punkt er, at ca. 3 m fra punktet, ligger overbygningen på hotellet. Dette medfører,



Figur 10.7: Punkt K-50-00846 på toppen af Hotel Hvide Hus i Aalborg.

at der ikke er frit udsyn til horisonten i sydlig retning.

På baggrund af disse betragtninger anvendes punkt 60-11-00001 ved Lindholm Høje til denne test. På figur 10.8 er det muligt at se postamentet.



Figur 10.8: Opstilling i punkt 60-11-00001 med Trimble 5800.

Selve dataindsamlingen forløber på følgende måde. Leica antennen placeres i malkeskamlen, som centrerer over REFDK-punktet. Antennehøjde måles, indtastes samt noteres. Herefter ringes der op til GPS-Referencen, og punktet måles. Der foretages reinitialisering, og GPS-antennen centrerer på ny, hvorefter punktet måles igen. I alt registreres punktet tre gange med GPS-Referencen, hvor der reinitialiseres og centrerer på ny mellem hver måling. Efterfølgende centrerer Trimble antennen over punktet, og ovenstående procedure gentages atter, således der også er tre målinger for GPS-Referencen med Trimble udstyret. Herefter ringes op til GPSnet, hvor også tre målinger registreres. Igen skiftes til Leica antennen, og punktet indmåles tre gange med GPSnet. Det forventes, at de i alt fire kombinationsmuligheder med hver tre målinger bør kunne gennemføres indenfor ca. 45 minutter. Af figur 10.9 fremgår proceduren for indmåling af REFDK-punktet.

Udstyr	RTK-tjeneste
Leica SR530	GPS-Referencen
Trimble 5800	GPS-Referencen
Trimble 5800	GPSnet
Leica SR530	GPSnet

Figur 10.9: Procedure for indmåling af punkt 60-11-00001.

Ovenstående procedure for både Leica og Trimble udstyret gentages 10 gange. Dette antal afhænger af den periode, som Trimble udstyret har været til rådighed. Udstyret var til rådighed i weekenden 24. - 25. april 2004. Indenfor disse to dage skal der findes perioder á ca. 45 minutters varighed, hvor antallet af satellitter og PDOP-værdi er nogenlunde stabilt. Grunden hertil er, at der skal måles til nogenlunde den samme satellitkonstellation med begge typer modtagere. På denne måde opnås det bedste sammenligningsgrundlag. For at finde disse tidsperioder anvendes programmet Satellite Availability. For at resultaterne fra programmet skal være pålidelige, udfærdiges først en skitse,

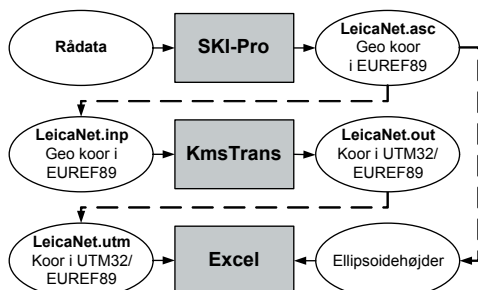
som viser obstruktionerne i punktet. Disse obstruktioner indtastet i Satellite Availability sammen med dato for den planlagte indmåling samt koordinaten for 60-11-00001.

Af bilag 10 : \Satellite Availability fremgår oversigterne over antallet af satellitter de pågældende dage. På baggrund af oversigterne er der valgt at udføre målingerne fire gange den 24. april 2004, mens det er besluttet af udføre målingerne seks gange den 25. april 2004.

Da proceduren gennemføres ti gange, og der til hver kombinationsmulighed er tre målinger pr. procedure, medfører det i alt 30 målinger for hver af de fire kombinationsmuligheder.

10.3.3 Databearbejdning

Efter dataindsamlingen følger bearbejdningen af de rå data. På figur 10.10 er det muligt at se forløbet af databearbejdningen for kombinationen Leica - GPSnet, mens det på figur 10.11 er muligt at se forløbet af databehandlingen for kombinationen Trimble - GPSnet. Forløbet af de to øvrige kombinationsmuligheder er foregået på tilsvarende vis. Det skal her tilføjes, at højden bevares som ellipsoidehøjder, hvorfor de allerede kan anvendes efter eksportering fra SKI-Pro og TGO.

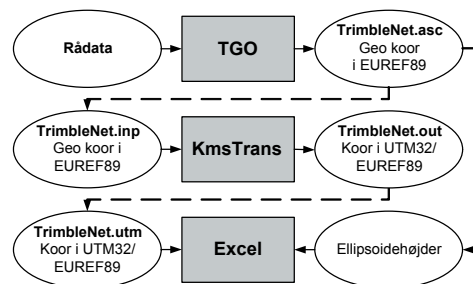


Figur 10.10: Forløbet af behandlingen af Leica-data.

Det ses på figur 10.10, at de rå observationer fra Leica SR530 er importeret i SKI-Pro. Fra SKI-Pro er målingerne eksporteret til en

tekstfil. Denne tekstfil benævnes *LeicaNet.asc*. Navnet viser, hvilken kombination af udstyr og RTK-tjenester, der arbejdes med. *LeicaNet.asc* indeholder samtlige målinger af punkt 60-11-00001 for førnævnte kombinationsmulighed. Koordinaterne er geografiske koordinater i EUREF89. Da koordinaterne ønskes i UTM32/EUREF89, foretages en transformation ved hjælp af KmsTrans. Ved at ændre på opsætningen af *LeicaNet.asc* fremstilles en inputfil til KmsTrans. Denne inputfil benævnes *LeicaNet.inp*. Resultatet af transformationen er en tekstfil indeholdende koordinater til de indmålte punkt i UTM32/EUREF89. Denne tekstfil kaldes *LeicaNet.out*. Herefter sættes data op, således at det er klar til databehandling i Excel. Denne fil kaldes *LeicaNet.utm*.

På figur 10.11 ses det, at forløbet af databehandlingen for Trimble udstyret næsten svarer til ovenstående forløb. Den eneste forskel er, at de rå data importeres i Trimble Geomatics Office, hvorefter data eksporteres til en tekstfil. Trimble Geomatics Office betegnes TGO i figuren. På Aalborg Universitet er TGO ikke til rådighed, hvorfor Nellemann & Bjørnkjær har udført denne del af databearbejdningen.



Figur 10.11: Forløbet af behandlingen af Trimble-data.

Inden analysen af data påbegyndes, er grove fejl sorteret fra de fire datasæt. Dette gøres som beskrevet i 9.2 Test 1 - Absolut nøjagtighed. Der fjernes dog ikke nogle koordinatsæt fra de fire datasæt, da ingen afvigelse overstiger grovfejlsgrænsen.

Før at undersøge om en RTK-tjeneste fungerer bedre med en type udstyr frem for et andet, deles databehandlingen op. Først analyseres GPS-Referencen, hvorefter de samme analyser udføres på GPSnet.

GPS-Referencen

Der udregnes absolutte nøjagtigheder i planen samt højden for Leica og Trimble udstyret. På figur 10.12 ses de udregnede absolutte nøjagtigheder opnået ved brug af GPS-Referencen i kombination med Leica samt Trimble udstyr.

Nøjagtighed GPS-Referencen $1\cdot\sigma$	Plan [mm]	Højde [mm]
Leica SR530	13	13
Trimble 5800	12	32

Figur 10.12: Absolutte nøjagtigheder opnået på GPS-Referencen ved brug af henholdsvis Leica og Trimble udstyr.

Det fremgår af figuren, at de to typer udstyr leverer omtrent den samme absolutte nøjagtighed i planen. I højden derimod er der stor forskel. Den dårlige absolutte nøjagtighed med Trimble udstyret skyldes formodentlig, at da konfigurationerne på Trimble udstyret skulle sættes op til GPS-Referencen, var det ikke muligt at vælge den antenntype, der benyttes som referencestationen i Aalborg. Derfor valgtes antenntypen *Ukendt*. Dette har medført, at alle afvigelseerne i højden er positive. Grunden hertil er, at der ikke er anvendt de rigtige off-set for L1 og L2 med hensyn til referencestationens antenne. Ved at studere specifikationerne for den omtalte antenntype ses det, at der i L1 er et vertikalt off-set på 0,1100 m, mens det vertikale off-set på L2 er 0,1280 m. Disse værdier skulle have været indtastet i konfigurationerne, inden målingen påbegyndtes for at opnå rigtige resultater.

I stedet findes middelfvigelsen i højden, og denne fratrækkes samtlige afvigelser i højden. Dette resulterer i, at nøjagtigheden i højden

med Trimble udstyret er 14 mm. Herved kan det på baggrund af de absolutte nøjagtigheder i plan samt højde konkluderes, at begge typer udstyr fungerer stort set lige godt med GPS-Referencen.

GPSnet

I figur 10.13 ses de absolutte nøjagtigheder for GPSnet med de to typer udstyr. Det ses på figuren, at der er en forskel i den absolutte nøjagtighed i planen. I højden derimod ligger de to typer udstyr meget tæt.

Nøjagtighed GPSnet $1\cdot\sigma$	Plan [mm]	Højde [mm]
Leica SR530	19	29
Trimble 5800	12	27

Figur 10.13: Absolutte nøjagtigheder opnået for GPSnet ved brug af henholdsvis Leica og Trimble udstyr.

På baggrund af forskellen i nøjagtighed i planen udregnes konfidensintervaller. Konfidensintervallet for nøjagtigheden opnået med Leica udstyret er 15 mm til 26 mm, mens konfidensintervallet for Trimble udstyret er 10 mm til 16 mm. Konfidensintervallet fortæller indenfor hvilket område, den sande værdi kan forventes at ligge. Den nedre grænse for Leica udstyret er 15 mm, mens den øvre grænse for Trimble udstyret er 16 mm. Dette betyder, at nøjagtighederne i teorien kan antage samme værdi. På baggrund af nøjagtighederne i figur 10.13 kan det således ikke konkluderes, at nøjagtigheden i planen af GPSnet afhænger af det anvendte udstyr. Med hensyn til højden ser det ud til, at GPSnet er udstyrsuafhængig.

10.3.4 Vurdering

Overordnet konkluderes det, at både GPS-Referencen og GPSnet er udstyrsuafhængig i plan samt højde. For GPS-Referencen konkluderes dette på trods af, at den rigtige antenne for referencestationen ikke er valgt i konfigurationerne på Trimble udstyret. Mens det for GPSnet kon-

kluderes på trods af forskellen i nøjagtighed i planen mellem Leica og Trimble udstyret.

Ovenstående resultater er ikke entydige og skal tolkes med visse forbehold. Først og fremmest er der forbehold omkring sammenligningen, idet satellitkonstellationen ikke er den samme under hele målingen med begge typer af udstyr. Ved brug af et enkelt punkt er det for denne test ikke muligt at måle synkront. Ved at anvende en antennesplitter kan signalet dog splittes. Herved kan der måles med to GPS-modtagere i et punkt på samme tid. Dette forhold hjælper dog ikke i denne test, da GPS-antennen er indbygget i Trimble modtageren. Leica modtageren kan således ikke tilsluttes antennen og modtage de samme signaler. At der ikke kan måles synkront i denne test, er der dog forsøgt at råde bod på ved hjælp af en grundig planlægning.

Det overordnede resultat med hensyn til, hvilken kombination der er bedst, gælder formodentlig over hele Danmark. Forskellen på kombinationerne i millimeter afhænger muligvis af flere forhold, som testen ikke omfatter. Eksempelvis kan det måske have betydning ved enkeltstations-RTK, om der anvendes samme type GPS-modtager i referencestation og rover.

Til beregningerne af om de to RTK-tjenester er udstyrsafhængige, er der 29 overbestemmelser til hver kombinationsmulighed. Dette medfører en varianskoefficient på ca. 13%. Dette er et pålideligt resultat, da de absolutte nøjagtigheder maksimalt varierer ± 3 mm.

10.4 Test 7 - Omregning og transformation

Formålet med denne test er at bestemme nøjagtigheden af GPS-udstyrets omregnings- og transformationsrutiner, idet disse spiller en

rolle i forbindelse med langt de fleste opmålings- og afsætningsituationer. Testen er for overskuelighedens skyld delt op i to. Første del af testen omfatter en undersøgelse af GPS-udstyrets omregningsrutiner fra EUREF89 til System 34. Anden del af testen omhandler GPS-udstyrets generelle transformationsrutiner og nøjagtigheden af disse.

10.4.1 Omregning til System 34

GPS-udstyrets omregningsrutiner fra EUREF89 til System 34 er af betydning for nøjagtigheden i opgaver, hvor der opmåles eller afsættes direkte i System 34. Derfor undersøges nøjagtigheden af GPS-udstyrets omregningsrutiner ved at holde dem op imod omregninger foretaget med KmsTrans.

Teori

Det er KMS, der står for administrationen og vedligeholdelsen af System 34, og KMS har i den forbindelse udarbejdet nogle rutiner til omregningen af koordinater fra EUREF89 til System 34. På grund af spændinger i System 34 er omregningerne blandt andet behæftet med en vis unøjagtighed. Endvidere står KMS også bag administrationen og vedligeholdelsen af en geoidmodel for Danmark. Geoidmodellen anvendes til at omregne ellipsoidehøjder til ortometriske højder. Denne omregning er ligeledes implementeret i KmsTrans og er i øvrigt også forbundet med en vis unøjagtighed.

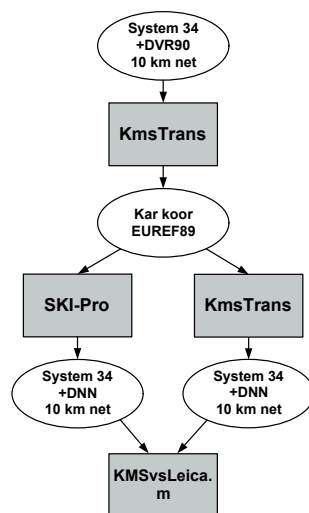
[Jensen, 2001, s. 137-139]

Den matematiske kerne til KmsTrans kan hentes gratis på KMS' hjemmeside i form af programmet GD Trans. Hvorvidt dette program implementeres i GPS-modtagerne er op til producenten, der også kan vælge at udvikle deres egne omregningsrutiner, som formodentlig ikke er nær så nøjagtige som GD Trans.

I forbindelse med udregningen af nøjagtigheden af omregningsrutinerne anvendes samme formler vedrørende nøjagtighed som i Test 1.

Udførelse og databearbejdning

Figur 10.13 illustrerer databearbejdningen for omregningen fra EUREF89 til System 34. Forud for testen konstrueres en række koordinatsæt i System 34 og DVR90 fordelt over Jylland, Fyn og Sjælland i et kvadratnet med 10 km mellem punkterne, jf. figur 10.14. Koordinatsættene for Jylland/Fyn og Sjælland bearbejdes i den efterfølgende databearbejdning særskilt. Koordinatsættene omregnes, som det fremgår af figuren, i første omgang ved hjælp af KmsTrans til kartesiske koordinater i EUREF89. I forbindelse med denne omregning sorteres alle de punkter, der falder uden for KmsTrans' dækningsområde fra, idet KmsTrans i de tilfælde kommer med en fejlmelding.



Figur 10.14: Dataflow for omregningsdelen af Test 7.

Derefter foretages en omregning af koordinatsættene fra EUREF89 til System 34 og ortometriske højder ved hjælp af SKI-Pro version 3.0. Et forsøg med 20 jævnt fordelte punkter

har vist, at omregningsrutinerne i SKI-Pro er de samme, som GPS-udstyret anvender.

De omregnede koordinater i System 34 sammenholdes herefter med en omregning af koordinaterne i EUREF89 til System 34 foretaget med KmsTrans ved hjælp af Matlab-scriptet *KMSvsLeica.m*, jf. figur 10.14. *KMSvsLeica.m* fremgår af bilag 8. På baggrund af de to sæt koordinater beregner *KMSvsLeica.m* afvigelser i Y- og X-retningen og en samlet afvigelse i planen. I den forbindelse frasorteres alle punkter, der afviger mere end 5 cm i en eller begge retninger i forhold til KmsTrans. Dette forbehold er taget, idet det konstruerede kvadratnet formodentlig omfatter koordinatsæt, som ligger uden for det område, som Leica's omregningsrutiner er designet til at dække. For at undgå at store afvigelser i disse punkter kommer til at spille en rolle i beregningen af en samlet spredning er punkterne sorteret fra. De 5 cm er fastsat ud fra afvigelserne i en række punkter langs kysterne, der formodentlig danner den naturlige grænse for Leica's omregningsrutiner. Inde i landet overstiges denne fejlgrænse kun i meget få punkter. Alternativt kan kvadratnettet fra start konstrueres således, at det udelukkende omfatter punkter, som ligger inden for landets kyster, men dette er en omfattende opgave.

SKI-Pro og dermed GPS-udstyret har vist sig kun at være i stand til at omregne de kartesiske koordinater til højder i DNN. Idet KmsTrans i forbindelse med GPS-koordinater udelukkende, når der er tale om ortometriske højder, omregner til DVR90, er disse højder ved hjælp af en ekstrafunktion i KmsTrans efterfølgende omregnet til DNN. Herpå er afvigelsen mellem SKI-Pro's DNN-højde og KmsTrans' højde i DNN beregnet ved hjælp af Matlab-scriptet *KMSvsLeica.m*.

Beregningerne foretages som nævnt både med punkter i System 34 Jylland/Fyn og System 34 Sjælland. På baggrund af samtlige punkter kan der beregnes en spredning for omregningen for Jylland/Fyn og Sjælland, jf. figur 10.15.

Samlet spredning (σ)	Y-koor. [mm]	X-koor. [mm]	Planen [mm]	Højden [mm]
Jylland/Fyn	17	19	25	13
Sjælland	20	19	27	16

Figur 10.15: Spredninger for GPS-udstyrets omregningsrutiner, når de sammenholdes med KmsTrans.

I beregningen af spredningerne svarer afvigelser mellem GPS-udstyrets og KmsTrans' omregningsrutiner til observationer, mens den sande værdi sættes til værdien 0 i formel 9.1. De beregnede afvigelser er blot et samlet udtryk for afvigelserne mellem GPS-udstyret og KmsTrans. Idet omregningsrutinen i KmsTrans på grund af spændingerne i System 34 også er forbundet med en unøjagtighed er den reelle spredning ved brug af GPS-udstyrets omregningsrutiner formodentlig større. Værdierne i figur 10.15 giver kun et generelt billede af omregningsrutinen i GPS-modtageren i forhold til KmsTrans. Der tales om et tilsvarende billede, når KMS oplyser, at KmsTrans kan omregne til System 34 Jylland med en nøjagtighed på ca. 1,7 cm.

I en konkret opgave har brugerne behov for at kende nøjagtigheden af omregningsrutinen i nærområdet. Afvigelserne for en række forskellige steder i Danmark er derfor anført i figur 10.16. Generelt vil omregningsrutinerne passe eksakt og afvigelsen være 0 cm enkelte steder i landet, mens den enkelte steder langs kysterne og inde i landet kan komme op på 7 cm.

Den modsatte omregning fra System 34 til EUREF89 er også blevet undersøgt. Her er afvigelserne de samme, hvilket vil sige, at GPS-udstyret når frem til den oprindelige koordinat efter at have regnet frem og tilbage. Der er altså

Afsnit Jylland/Fyn	Afvigelse Y-koor. [mm]	Afvigelse X-koor. [mm]	Afvigelse i planen [mm]	Afvigelse i højden [mm]
Skagen	-4	35	35	0
Lindholm Høje	13	-10	16	-2
Hanstholm	27	-31	41	0
Viborg	-1	-13	13	11
Agri Bavnehøj	-13	-44	45	3
Ikast	14	21	25	33
Ringkøbing	-8	40	41	7
Grindsted	12	-15	19	19
Kolding Havn	-29	6	30	-11
Tønder	6	-16	17	4
Aabenraa	-5	18	19	2
Odense	-9	15	17	17
Rudkøbing	-32	1	32	-2
Sjælland				
Kalundborg	-27	-34	43	-4
Helsingør	16	-13	20	-23
Køge	19	-15	24	5
Kørsør	-20	2	20	-13
Nakskov	-44	-38	58	-2
Møn	-41	-5	41	5
Ringsted	-12	-15	19	2

Figur 10.16: Afvigelser mellem en Leica modtager og KmsTrans forskellige steder i landet.

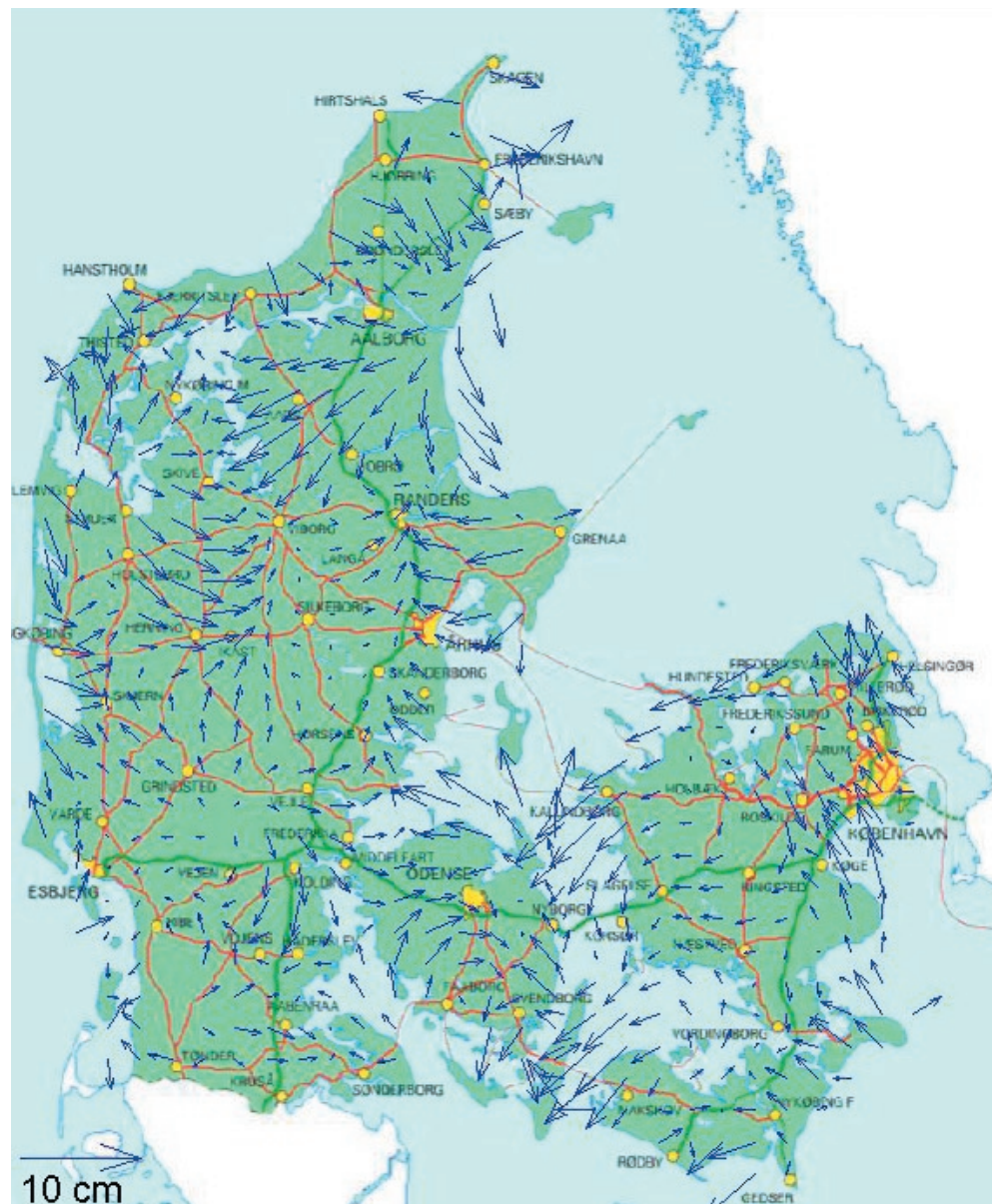
konsistens i GPS-udstyrets omregninger, og nøjagtigheden af en omregning fra System 34 til EUREF89 er dermed den samme.

Der ser ikke ud til at være nogen landsdækkende systematik i fordelingen af afvigelser, udover at afvigelserne er ens inden for et lokalt område og varierer mest ved kysterne, jf. figur 10.17. Figuren er dannet af Matlab-scriptet *KMSvsLeica.m*, der plotter afvigelserne i planen ud som vektorer det pågældende sted i Danmark.

Med hensyn til omregningen af højden har det som nævnt vist sig, at GPS-udstyret omregner højden til DNN i stedet for DVR90. Ved henvendelse til Leica er det dog muligt at få modtageren opdateret til også at kunne håndtere DVR90.

Vurdering

Afvigelserne er et udtryk for fejlbidraget fra GPS-udstyrets omregningsrutiner i forhold til KmsTrans. Omregningsrutinerne i KmsTrans er også forbundet med en spredning, der blandt andet skyldes lokale spændinger i System 34.



Figur 10.17: Afvigelser i planen mellem KmsTrans og GPS-udstyret forskellige steder i landet.

Som det fremgår af figur 10.16 bidrager alene GPS-udstyret i nogle tilfælde med fejl på op imod 60 mm i planen. Dette bør brugeren være opmærksom på, hvis det ved brug af omregningsrutinerne ønskes at opmåle eller afsætte direkte i System 34 i forhold til RTK-tjenesterne. De opmålte eller afsatte punkter

vil i de tilfælde godt nok stemme overens indbyrdes, men vil ikke stemme overens med de øvrige System 34 punkter i området. Det vil de heller ikke, hvis GPS-udstyrets omregningsrutiner stemmer overens med KmsTrans', på grund af de lokale spændinger i System 34, men omregningsfejlen vil i det tilfælde være

mindre. Unøjagtigheden i forbindelse med omregningsrutinen er et godt bud på, hvilken betydning en direkte opmåling i System 34 og DNN ved brug af Leica's omregningsrutiner vil få på den absolutte nøjagtighed, som er bestemt i 9.2 Test 1 - Absolut nøjagtighed.

Afvigelsen mellem GPS-udstyret og KmsTrans i højden er nogle steder op imod 30 mm, hvilket lyder af meget i forhold til, at opmåling og afsætning som regel ikke foretages i ellipsoidehøjder, men som oftest direkte i ortometriske højder ved hjælp af omregningsrutinerne, hvad enten der så er tale om højder i DVR90 eller DNN. Omregningsrutinerne dårlige nøjagtighed får på den måde indflydelse på nøjagtigheden af opmålingen og afsætningen i højden.

Frem for at opmåle eller afsætte direkte i System 34 bør brugeren knytte sine målinger til System 34 punkter i det område, hvor opmålingen eller afsætningen skal foregå. Med udgangspunkt i disse er GPS-modtageren efterfølgende i stand til at beregne nogle lokale transformationsparametre frem for at skulle anvende omregningsrutinerne. Nøjagtigheden af disse transformationsrutiner undersøges i det følgende.

10.4.2 Transformation

Som regel opmåles eller afsættes der ikke direkte i System 34. I stedet transformeres der forud for en opmåling eller afsætning over nogle lokale punkter, hvorfor det også er interessant at undersøge GPS-udstyrets generelle transformationsrutiner med hensyn til mulige transformationer og nøjagtighed.

Teori

GPS-udstyret opererer hovedsagelig med tre forskellige former for transformationer, når

koordinaterne skal transformeres til et lokalt system. I den forbindelse opfattes System 34 også som et lokalt system. Disse tre former er:

- One Step
- Two Step
- Classical 3D

Formerne beskrives hver især herunder. Beskrivelserne baserer sig på oplysninger hentet gennem hjælpefunktionen i SKI-Pro.

One Step

Ved denne transformationstype holdes beregninger i planen og højden adskilt. Fordelen ved denne form for transformation er, at unøjagtigheder i målingen af højden ikke får indflydelse på den plane position. Ligeledes er det muligt at beregne en transformation i planen uden kendskab til det lokale højdesystem. Derudover behøver fællespunkterne for transformationen i planen og højden ikke være de samme. I øvrigt er der ikke i forbindelse med transformationen behov for eksterne oplysninger i form af for eksempel en lokal kortprojektion eller geoidemodell.

Omvendt er ulempen, at de fremkomne transformationsparametre udelukkende gælder for det lokale område, som de er bestemt i. I forbindelse med transformationen af højden bør det nævnes, at GPS-udstyret i tilfælde af mere end 3 fællespunkter bestemmer bedste rette plan, hvorefter der foretages en 1D-translation. Én dårlig måling eller én forkert koteangivelse vil i den forbindelse eventuelt kunne medføre en vipning af planen. Denne fejlagtige vipning får indflydelse på samtlige punkter. Hvis der i stedet tages udgangspunkt i et gennemsnit af højdeforskellene for fællespunkterne, vil en dårlig måling få knap så stor betydning.

Two Step

Denne transformationstype holder ligeledes beregningerne i planen og højden adskilt, hvilket giver de samme fordele som One Step-transformationen. Two Step-transformationen inddrager dog i modsætning til en One Step-transformation lokale kortprojektioner og geoidmodeller i beregningerne og kan derfor anvendes i et større område. Dette forudsætter dog, at det lokale system er homogent. Ulempen ved denne transformationstype er, at GPS-udstyret skal være i besiddelse af oplysninger om de lokale kortprojektioner og geoidmodeller for overhovedet at kunne gennemføre transformationen. I øvrigt er der samme risiko for fejl i forbindelse med bestemmelse af bedste rette plan som ved en One Step-transformation.

Classical 3D

Den tredje og sidste transformationstype er en Classical 3D-transformation. Fordelen ved en Classical 3D-transformation er, at GPS-kordinaternes nøjagtighed bevares, så længe de koordinater, der transformeres over, er nøjagtige. Med hensyn til de andre transformationstyper forringes nøjagtigheden en smule som følge af opdelingen af plan og højde i beregningerne. Ulempen ved en Classical 3D-transformation er, at det, som i tilfældet med Two Step-transformationen, er nødvendigt at kende den lokale kortprojektion og geoidmodel, hvis der skal transformeres til et foruddefineret lokalt system som for eksempel System 34 og DVR90. En anden ulempe er, at hvis de indmålte fællepunkter er unøjagtige, vil GPS-koordinaterne efter transformation ikke passe ind i det lokale system. Dette gælder i øvrigt også de andre transformationstyper.

Nøjagtighed af transformationsrutine

I forbindelse med udregningen af nøjagtigheden af transformationsrutinerne anvendes

samme formler vedrørende nøjagtighed som i 9.2 Test 1 - *Absolut nøjagtighed*.

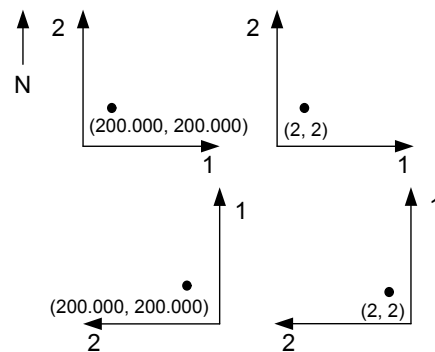
Udførelse og databearbejdning

I afsnittet undersøges i første omgang, hvilke transformationer der er mulige med GPS-udstyret. Derudover undersøges nøjagtigheden af en One Step-transformation ved at sammenligne resultatet af GPS-udstyrets transformation med transformationsresultater fra andre transformationsprogrammer.

Mulige transformationer

System 34 skiller sig ud fra andre kortprojektioner som for eksempel UTM i kraft af, at x-aksen er orienteret mod vest. Dette kan i nogle tilfælde komplicere en given transformation. Da System 34 til stadighed anvendes, er det fundet relevant at undersøge, hvilke kombinationer af koordinatsystemer GPS-udstyret er i stand til at håndtere i forbindelse med de forskellige typer af transformationer.

Undersøgelsen er af praktisk karakter og baserer sig på et sæt koordinater i EUREF89 og fire sæt lokale koordinater. To af de lokale koordinatsæt har 1. akse orienteret mod øst og 2. akse mod nord, mens de to andre har 1. akse orienteret mod nord og 2. akse mod



Figur 10.18: Aksernes orientering og koordinatværdierne størrelse for de fire lokale koordinatsæt.

vest. Derudover adskiller koordinatsættene sig fra hinanden ved, at de hver især består af store eller små koordinatværdier. 200.000 er et eksempel på en stor koordinatværdi, mens 2 er et eksempel på en lille, jf. figur 10.18.

Resultatet af de praktiske forsøg fremgår af figur 10.19. Et plus indikerer, at transformationen er forløbet uden problemer og resulterer i små residualer. Et minus indikerer derimod, at transformationen har været problemfyldt, hvorfor residualerne er store.

Transformations- onstype	1. akse øst store koor	1. akse øst små koor	2. akse vest store koor	2. akse vest små koor
One Step	+	+	-	-
Two Step	+	+	+	+
Classical 3D	+	+	+	-

Figur 10.19: Mulige transformationer med GPS-udstyret.

Undersøgelsen viser, at alle transformationer, som involverer koordinatsystemer, hvor 1. akse er orienteret mod øst, forløber uden problemer. Med hensyn til koordinatsystemer, hvor 2. akse er orienteret mod vest er billedet dog mere broget. One Step-transformationen kan ikke håndtere disse, hverken med store eller små koordinatværdier. Med en Two Step-transformation forløber transformationerne uden problemer, mens en Classical 3D-transformation kun er mulig, hvis koordinatværdierne er store. På baggrund af resultatet kan det konkluderes, at orienteringen af 1. og 2. akse bør koordineres med valget af transformationstype.

Nøjagtighed af One Step-transformationen

Med udgangspunkt i en GPS-måling og en One Step-transformation fra Test 8, holdes GPS-udstyrets generelle transformationsrutiner op imod transformationer foretaget med andet software. Dette software udgøres af transformationsprogrammet Kontra og Matlab-scriptet Trans3D. Kontra er udviklet af Karsten Jensen, mens Trans3D er udviklet af

Peter Cederholm. Der er udelukkende foretaget en One Step-transformation, da det ikke er muligt at inddrage oplysninger om kortprojektion og geoidmodel i Kontra og Trans3D. I Test 8 udføres en One Step-transformation. Denne transformation dækker et område på ca. 6 gange 7 m. Endvidere er de lokale koordinatværdier små, og 1. akse er orienteret mod øst.

På baggrund af de tre forskellige transformationer, kan der genereres nogle transformerede punkter. Det er disse punkter, der sammenholdes, jf. figur 10.20.

Transformations- program og punktnummer	X-koor [m]	Y-koor [m]	Højde kar [m]	Højde ellip [m]
Leica One-Step 1	0,004	16,040	-4,001	-4,001
Kontra 1	0,004	16,040	-3,985	-3,998
Trans3d.m 1	0,004	16,040	-3,985	
Leica One-Step 2	-0,004	10,001	-3,936	-3,936
Kontra 2	-0,004	10,001	-3,952	-3,935
Trans3d.m 2	-0,004	10,001	-3,952	
Leica One-Step 3	7,178	9,757	-3,899	-3,899
Kontra 3	7,178	9,757	-3,884	-3,902
Trans3d.m 3	7,178	9,757	-3,884	
Leica One-Step 4	7,374	16,067	-3,934	-3,934
Kontra 4	7,375	16,067	-3,949	-3,934
Trans3d.m 4	7,375	16,067	-3,949	
Spredning (σ)	0,000	0,000	0,032	0,004

Figur 10.20: Forskellige transformationsprogrammers bud på fire lokale koordinater.

Afviselser mellem GPS-udstyret og de andre transformationsrutiner svarer til observationerne, mens den sande værdi sættes til værdien 0 i formlen til beregning af spredningen. Som det fremgår af figuren adskiller punkterne sig ikke nævneværdigt fra hinanden i planen, og spredningen med hensyn til X- og Y-koordinaten er beregnet til 0. Transformationen af højden giver derimod en spredning på 0,032 m. Dette kan skyldes, at transformationerne foretaget med Kontra og Trans3D er 3D-transformationer med 7 parametre, hvorimod Leica i forbindelse med en One Step-transformation beregner planen og højden særskilt.

Som sammenligningsgrundlag anvendes i

stedet en 1D-translation af ellipsoidehøjderne fra GPS-målingen. Denne translation foretages med Kontra. Som det fremgår af figur 10.20 reduceres spredningen for de to beregninger på denne måde til 4 mm. Forskellen skyldes formodentlig, at GPS-udstyret finder bedste rette plan, mens programmerne foretager 1D-translationen på baggrund af en beregning af gennemsnittet af højdeforskellen mellem fællespunkterne. Transformationsrutinerne i GPS-udstyret anses på baggrund af sammenligningen derfor for at være korrekte.

Vurdering

På baggrund af undersøgelsen af hvilke kombinationer af koordinatsystemer GPS-udstyrets transformationsrutiner kan håndtere, anbefales brugeren at orientere 1. aksens i de lokale systemer mod øst. I det tilfælde kan brugeren frit vælge, hvilken transformationstype der anvendes. Hvis dette ikke er muligt skal brugeren enten anvende en Two Step-transformation eller en Classical 3D-transformation. Anvendelse af den sidstnævnte type indebærer dog, at koordinatværdierne er store, hvilket eksempelvis vil sige på størrelse med koordinater i System 34.

GPS-udstyrets transformationsrutiner anses for at være korrekte og spiller derfor ingen rolle i fastlæggelsen af nøjagtigheden af en opmåling eller afsætning. Matematikken bag transformationerne er anerkendt, så sandsynligheden for, at GPS-udstyret skulle bidrage med fejl var i forvejen meget lille.

Fejl i forbindelse med transformation af GPS-koordinater til eksempelvis koordinater i System 34 kan i højere grad tilskrives kvaliteten af koordinaterne til punkterne i nærområdet. Er der unøjagtigheder eller fejl i forbindelse med disse, smitter det af på kvaliteten af transformationen. Er antallet af punkter tilstræk-

keligt, vil fejlene formodentlig kunne aflæses i residualerne.

Valg af transformationstype afhænger af de lokale forhold. Ønsker brugeren at bevare GPS-koordinaternes nøjagtighed og er oplysninger om den lokale kortprojektion samt geoidmodel nøjagtige og kendt af GPS-udstyret, anbefaler Leica en Classical 3D-transformation. Er der tvivl om enten kortprojektion eller geoidmodel, bør Two Step-transformationen vælges. Er der tvivl om dem begge, eller er GPS-udstyret ikke bekendt med dem, er eneste mulighed One Step-transformationen.

10.5 Test 8 - Afsætning

Formålet med denne test er at undersøge nøjagtigheden af afsætning med RTK. Der gennemføres en række forsøg, hvor afsætning af punkter gennemføres ved anvendelse af forskellige metoder. Der etableres fire punkter, som afsættes med forskellig omhyggelighed og teknik, og det undersøges, hvorledes dette har indvirkning på nøjagtigheden af de afsatte punkter.

Testen skal også undersøge forskellen i nøjagtighed mellem opmåling og afsætning. Resultaterne af de øvrige test kan på denne måde i teorien overføres til en afsætningssituation. Formålet med undersøgelsen er med andre ord at finde frem til det fejlbidrag, der opstår, som følge af at brugeren selv skal vurdere, hvornår centreringen over punktet er på plads ud fra GPS-modtagerens display.

Testen gennemføres kun i planen. Højden behandles således ikke i denne test.

10.5.1 Teori

Den initierende betragtning er, at det ikke er muligt at afsætte med samme nøjagtighed som

i forbindelse med opmåling med RTK. Dette skyldes, at der ved afsætning opstår et fejlbidrag som følge af ovennævnte forhold ved centrerings af GPS-antennen. På GPS-modtagerens display opdateres positionen med en høj frekvens, ligesom positionen varierer konstant. Yderligere skal to-meter stokken holdes i lod, hvilket kan være vanskeligt at styre samtidigt. Dette betyder, at det er svært at afsætte med samme nøjagtighed som ved opmåling.

Yderligere bør nøjagtigheden af en afsætning forbedres som følge af større omhyggelighed.

I forbindelse med udregningen af opmålings- og afsætningsnøjagtigheden anvendes samme formler vedrørende nøjagtighed, som angivet i Test 1.

10.5.2 Udførelse

Testen gennemføres i en lokal etableret testbane, som er placeret på en græsplæne ved Aalborg Universitet. Der er etableret fire fikspunkter med samme type jernrør, som anvendes i Test 3, jf. 9.4.2 Udførelse. Fikspunkterne placeres, så de danner en firkant, hvor siderne er orienteret i forhold til nord. Inde i firkanten er der etableret fire punkter i form af træpæle. Ved hjælp af fire søm er der afmærket



Figur 10.21: Testbanen ved Aalborg Universitet.

et punkt i hver af træpælene. Disse søm udgør de fire detailpunkter, som senere skal afsættes i testen. Testbanen, bestående af de i alt otte punkter, fremgår af figur 10.21. Billedet er taget umiddelbart før, at jernrørene og træpælene er banket ned i jordhøjde.

Jernrøret og træpælen nederst i højre hjørne benævnes henholdsvis punkt 1 og punkt 5. De resterende punkter er nummereret fortløbende i urets retning. Banens dimensioner er ca. 6 gange 7 meter.

Indmåling af testbane

Første opgave er at indmåle punkterne i testbanen for at koordinere disse i et lokalt koordinatsystem. Punkterne skal indmåles med en overlegen nøjagtighed i forhold til RTK. Dette betyder, at nøjagtigheden af punkterne skal være omkring 2-3 mm. Testbanen er indmålt med en Leica TCA1800 totalstation, som er en motoriseret totalstation med automatisk indstilling på prismet. Der anvendes miniprisme i forbindelse med opmålingen for at minimere centreringsspredningen, jf. figur 10.22.



Figur 10.22: Centrerings af miniprisme over søm.

Testbanen er indmålt fra fire uafhængige opstillinger, hvor der i hver opstilling er målt én sats. Opstillingerne er placeret 30-50 meter fra testbanen for at minimere spredningen på vinkelmålingen.

Udjævning af testbane

Observationerne fra de fire opstillinger er efterfølgende udjævnet i Turbonet for at fastlægge de endelige koordinater til punkterne i testbanen. Turbonet er kun i stand til at udjævne i koordinatsystemer, som allerede er defineret i programmet. Punkt 1 tildeles derfor en koordinat i System 34. Punktet tildeles koordinaten (200.000,000; 201.133,000). Ved at vælge 201.133,000 m som x-koordinat undgås, at der skal tages højde for målestoksfaktoren, da denne tilnærmelsesvis er nul ved 201.133,000 m. Målestokskorrekturen ville i værste fald være 2,5 mm på afstande ved opstilling 50 m væk, hvis opmålingen foregik på midtermeridianen. Punkt 2 tildeles samme y-koordinat som punkt 1, hvilket således definerer x-aksen i koordinatsystemet. De resterende punkter får efterfølgende tildelt koordinater på baggrund af udjævningen.

Turbonet er et gammelt DOS-program, som kræver opsætning af en række filer for at være i stand til at udjævne. De overordnede parametre samt koordinaterne til punkt 1 og 2 er angivet i en fil kaldet *master.dat*. I en fil kaldet *land-filen* indtastes samtlige observationer. I denne fil angives også spredningerne til de enkelte observationer. Disse er beregnet ved hjælp af en række Matlab-scripts på baggrund af afstandene fra opstillingerne til de indmålte punkter samt instrumentspecifikationerne. Derefter kan udjævningen iværksættes. Udjævningen gennemføres et antal gange, hvor grove fejl løbende sorteres fra. Det endelige resultat af udjævningen er angivet i figur 10.23.

Figuren viser de centrale værdier vedrørende udjævningsresultatet. Det fremgår, at spredningen på vægtenheden er 0,243, hvilket er meget lavt. Spredningen på vægtenheden skal helst antage en værdi omkring 1. En værdi på omkring

Adjustment Summary

A-posteriori standard deviation of unit weight SQRT[VtPV/df]	=	.243
Number of measurements used	=	89
Number measurements rejected	=	0
Total number of measurements	=	89
Degrees of freedom(df)	=	57
Number of singularities	=	0
Chi-Square test prob (alpha)	=	.050
Weighted sum of squares	=	3.4
Lower limit Chi-Square test	=	38.0
Upper limit Chi-Square test	=	79.8

Figur 10.23: Resultatfil fra første udjævning.

1 betyder, at observationerne er vægtet korrekt. Ved en værdi under 1 er a priori spredningerne for store, og disse skal gøres mindre for at få et bedre og mere pålideligt udjævningsresultat.

Først undersøges, om retningsspredningerne er for store. Der er gennemført en horisontudjævning med totalstationen, for at undersøge om de specificerede værdier er korrekte [Jacobi, 1998, s. 134-135]. Ud fra en fri opstilling måles retningerne til de fire fikspunkter med otte satser. Observationerne udjævnes efterfølgende i Matlab. Undersøgelsen har resulteret i en retningsspredning på 0,25 mgon. Dette stemmer godt overens med de specificerede 0,3 mgon for TCA1800. Undersøgelsen giver således ingen forklaring på den lave spredning på vægtenheden. Der er ikke gennemført nogen test af den afstandsafhængige fejl.

Udjævningen er efterfølgende gennemført et antal gange, hvor a priori spredningerne løbende er gjort mindre. I det endelige resultat af udjævningen er spredningen på vægtenheden tæt på 1. Resultatet fremgår af figur 10.24. Resultatet er fremkommet ved at reducere a priori spredningerne væsentligt.

Ved at betragte de enkelte koordinater til de otte punkter fra begge udjævninger fremgår det, at disse maksimalt varierer i størrelsesordenen

Adjustment Summary

```

-----
A-posteriori standard deviation of unit weight
SQRT[VtPV/df] = 1.012

Number of measurements used = 88
Number measurements rejected = 0
Total number of measurements = 88
Degrees of freedom(df) = 56
Number of singularities = 0

Chi-Square test prob (alpha) = .050
Weighted sum of squares = 57.3
Lower limit Chi-Square test = 37.2
Upper limit Chi-Square test = 78.6

```

Figur 10.24: Resultatfil fra anden udjævning.

én millimeter. I dette tilfælde er det altså ikke afgørende for koordinaterne, at spredningen på vægtenheden er meget lav.

Koordinaterne til de otte punkter skal efterfølgende indføres i en tekstfil, som overføres til GPS-modtageren. I GPS-modtageren gennemføres transformationen som en One Step-transformation, jf. 10.4.2 *Transformation*. Koordinaterne reduceres først til lokale koordinater og orienteres med 1. akse positiv mod øst. GPS-modtageren er ikke i stand til at transformere ved hjælp af en One Step-transformation mellem EUREF89 og et lokalt koordinatsystem, hvor 2. akse er orienteret mod vest. Orienteringen betyder, at punkt 1 tildeles koordinaten (16,042; 0,000).

Opmåling af punkter med RTK

I testen anvendes radiolink mellem referencestation og rover for at minimere den afstandsafhængige fejl. Yderligere anvendes radiolink som følge af økonomiske årsager. Referencestationen opstilles i umiddelbar tilknytning til testbanen. Først indmåles de fire fikspunkter. Herefter er fikspunkterne transformeret over de lokale koordinater. Denne transformation resulterer i residualer i størrelsesordenen 0-4 mm, hvilket må siges at være yderst tilfredsstillende. Efter at transformationen er godkendt, lagres parametrene til det lokale koordinatsystem i GPS-modtageren. Herefter er sømmene

i de fire træpæle indmålt i det lokale koordinatsystem for senere at kunne sammenligne disse koordinater med de sande værdier. I forbindelse med opstilling af GPS-antennen i fiks- og detailpunkterne anvendes stativben til centrering. Nu er GPS-modtageren klar til at påbegynde afsætningen.

Afsætning af punkter ved hjælp af RTK

Afsætningen af de fire detailpunkter gennemføres med fire forskellige afsætningsmetoder. Inden afsætningen påbegyndes er træpælene afdækket med tape, så de enkelte søm ikke kan ses, jf. figur 10.25. Dette skal minimere indflydelsen på afsætningen og undgå at observatøren lader sig styre af sømmene. Sømmene er placeret forskellige steder i træpælene for, at det ikke skal være muligt at huske, hvor det korrekte punkt er placeret.



Figur 10.25: Afdækning af træpæl med tape.

Afsætningsmetode 1

Første afsætning foretages af én person. Der benyttes ingen hjælpemidler som eksempelvis støttestokke eller andet. Der bruges så at sige normal teknik.

Afsætningsmetode 2

Derefter foretages afsætningen af én person, hvor der bruges hjælpemidler i form af stokke til at støtte GPS-antennen med ved centreringen.

Afsætningsmetode 3

Ved afsætningsmetode 3 foretages afsætningen af to personer. Den ene person styrer foden af GPS-antennen, mens den anden styrer libelle og display, jf. figur 10.26.



Figur 10.26: Eksempel på afsætningsmetode 3.

På baggrund af kommandoer fra den ene person flytter den anden person foden i GPS-antennen i en given retning.

Afsætningsmetode 4

I fjerde afsætningsituation er længden af GPS-antennen reduceret til 1 m. Afsætningen foretages stadig af to personer efter foregående teknik, jf. figur 10.27. Bemærk den noget akavede arbejdsstilling. Den ene person sidder med ryggen til detailpunktet for ikke at blive påvirket af træpælen. Den anden person flytter igen GPS-antennen på kommando.



Figur 10.27: Eksempel på afsætningsmetode 4.

Generelle bemærkninger

Ved hver afsætning er der oprettet en logfil. Ud fra logfilen er det blandt andet muligt at se tidsforbruget ved hver afsætning. En afsætning af de fire punkter tager i gennemsnit 10 minutter uafhængig af den anvendte metode. Dette betyder, at de fire afsætninger er gennemført inden for en time. Det formodes, at de anvendte transformationsparametre er gældende inden for denne periode.

For at opnå et pålideligt datagrundlag gennemføres ovenstående procedure med indmåling af fikspunkter, transformation, indmåling af detailpunkter og de fire forskellige former for afsætninger fem gange. Der skiftes observatør mellem afsætningerne for at få et bedre bedømmelsesgrundlag.

Kontrol af afsætningerne

Afsætningen af detailpunkterne skal kontrolleres for at fastlægge afvigelserne fra de sande koordinater i planen. Afvigelserne skal bestemmes med høj nøjagtighed, hvilket betyder, at totalstation eller tommestok skal anvendes. Da der er tale om bestemmelse af plane afvigelser inden for få centimeter, er tommestok den mest præcise metode. For at lette kontrolmålingen bruges skydelære i stedet for tommestok.



Figur 10.28: Måling af afvigelse med skydelære.

Selve kontrolmålingen foregår ved, at den direkte afstand mellem det afsatte søm og det "rigtige" søm måles med skydelære og noteres, jf. figur 10.28.

Afvigelserne måles i akseretningerne, som tilnærmelsesvis er sammenfaldende med Easting- og Northing-akserne. Akseretningerne defineres af siderne af træpælene, som er placeret i forhold til nord. Afvigelse kan således måles direkte i akseretningerne. Ved at notere afvigelse i akseretningerne kan en eventuel systematik i afsætningen efterfølgende identificeres. Denne systematik kan opstå på grund af en eventuel fejl i transformationen, som foretages i GPS-modtageren. Yderligere kan initialiseringen, satellitkonstellationen samt atmosfæreforholdene bidrage til en systematisk fejl.

10.5.3 Databearbejdning

I forbindelse med databearbejdningen skal opmåling- og afsætningsnøjagtigheden først beregnes. Beregningerne er opdelt i to afsnit.

Opmålingsnøjagtigheden

Den gennemsnitlige opmålingsnøjagtighed beregnes ud fra de i alt fem opmålinger af de fire detailpunkter. Nøjagtigheden bestemmes ved at beregne afvigelse fra de sande koordinater til hvert detailpunkt og efterfølgende omregne disse afvigelser til en samlet spredning. Udregningerne er gennemført i Excel. De sande koordinater stammer fra udjævningen, mens de opmålte koordinater i det lokale koordinatsystem er hentet i SKI-Pro.

Opmålingsnøjagtigheden er beregnet til 7 mm i planen. Der er imidlertid kun anvendt målinger fra de fire første opmålinger, hvilket giver i alt 16 målinger. Koordinaterne fra den femte opmåling er af uforklarlige årsager ikke lagret i det lokale koordinatsystem og kan således

ikke anvendes til beregningen af opmålingsnøjagtigheden.

Nøjagtigheden ved afsætning med RTK

De målte afvigelser fra afsætningerne er indført i Excel. Ud fra afvigelse er der beregnet en middelspredning for hver af de fire afsætningsmetoder på baggrund af de fem gange, proceduren er gennemført. De fire nøjagtigheder fremgår af figur 10.29.

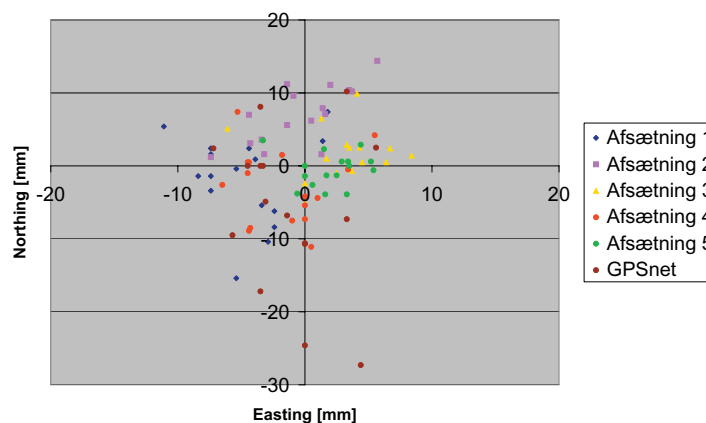
Afsætningsmetode	Nøjagtighed [mm]
1	7
2	6
3	8
4	7

Figur 10.29: Nøjagtigheder ved de fire afsætningsmetoder.

Det fremgår af figuren, at der ikke er ret store forskelle i nøjagtighederne mellem de fire afsætningsmetoder. Der ses en forbedring på én mm fra metode 1 og til metode 2, hvor der anvendes støttestokke. Dette er dog en meget lille forbedring, og det fremgår yderligere, at ved afsætningsmetode 3 bliver nøjagtigheden lidt ringere på trods af, at støttestokke stadig anvendes. Alt i alt viser resultatet, at der ikke er væsentlige forskelle i nøjagtigheden, som følge af at afsætningsmetoden bliver mere omhyggelig. Dette er et meget overraskende resultat. Dette skyldes formodentlig, at det fejlbidrag, der opstår som følge af centreringen, er ubetydeligt i forhold til den nøjagtighed, der kan opnås med RTK-måling.

Undersøgelse af systematik i afsætningerne

Der er foretaget en undersøgelse af, om der er systematik i afvigelse i de enkelte afsætningsrunder. På figur 10.30 er de fem afsætningsrunder plottet. Endvidere er afsætningerne udført med GPSnet også plottet. Resultaterne fra denne undersøgelse gennemgås senere. De



Figur 10.30: Plot af de afsatte punkter, som afvigelser fra de sande koordinater. Farverne markerer de enkelte afsætningsrunder.

afsatte punkter er plottet som afvigelser fra de sande koordinater. Hver afsætningsrunde, som indeholder de fire afsætningsmetoder, er markeret med en farve. Det fremgår af figuren, at der er systematik i afsætningerne, idet punkter afsat ved samme afsætningsrunde ligger placeret samlet. Systematikken skyldes, at punkter afsat på samme initialisering er korrelerede, ligesom de benyttede transformationsparametre skaber korrelation. Der beregnes som tidligere nævnt nye transformationsparametre ved hver opmåling.

Fastsættelse af fejlbidrag ved afsætning med RTK

For at beregne det gennemsnitlige fejlbidrag i forbindelse med afsætning skal nøjagtigheden for opmåling samt afsætning betragtes. Opmålingsnøjagtigheden er beregnet til 7 mm, mens afsætningsnøjagtigheden er beregnet til ca. 6-8 mm. I afsætningsnøjagtigheden er opmålingsnøjagtigheden skjult, da det i teorien er muligt at afsætte med præcis samme nøjagtighed som ved opmåling. Hvis fejlbidraget skal isoleres, er det nødvendigt at fjerne opmålingsnøjagtigheden fra afsætningsnøjagtigheden. Der er imidlertid ingen forskel imellem de to nøjagtigheder, hvilket viser, at det rent faktisk er muligt at afsætte

med samme nøjagtighed som ved opmåling ved brug af RTK. Der opstår således ikke noget fejlbidrag som følge af afsætning med RTK, hvilket er et meget interessant resultat.

Afsætning med GPSnet

Som et lille forsøg er de fire afsætningsmetoder gennemført én gang ved brug af GPSnet. Forsøget er gennemført for at undersøge, om der ses samme tendenser som i forbindelse med afsætning med radiolink. Det er vigtigt at understrege, at forsøget kun er gennemført én gang. Det er derfor vigtigt at betragte resultaterne med forbehold. Opmålingsnøjagtigheden er beregnet til 12 mm, hvilket stemmer godt overens med resultaterne fra Test 1.

Nøjagtigheden ved afsætningsmetode 1-3 er beregnet til ca. 8-9 mm, mens den ved afsætningsmetode 4 er 21 mm, jf. figur 10.31.

Afsætningsmetode	Nøjagtighed [mm]
1	8
2	8
3	9
4	21

Figur 10.31: Nøjagtigheder ved de fire afsætningsmetoder ved brug af GPSnet

Ifølge de indledende antagelser burde det ellers være metode 4, som er mest nøjagtig. Grunden til, at dette ikke er tilfældet, er, at under afsætningen med metode 4 opstod der pludselig en systematisk fejl. De tre første punkter blev af uforklarlige årsager forskubbet ca. 2 cm i sydlig retning. Punkterne ses som de tre brune punkter i bunden af figur 10.30. Forskydningen må siges at være ret farlig, da den ikke umiddelbart kan afsløres under afsætningen. Der var ingen indikationer på, at nøjagtigheden pludselig var dårlig. Forsøget viser, at det er yderst vigtigt at foretage kontrolmåling i forbindelse med afsætning. Det er nemlig ikke muligt at identificere fejlene ved at betragte log-filen fra afsætningen. Afvigelse mellem designkoordinaterne og de afsatte koordinater viser ingen tegn på fejl.

Hvis der ses bort fra afsætningsmetode 4, er afsætningsnøjagtigheden på 8-9 mm, hvilket er bedre end opmålingsnøjagtigheden på 12 mm. Dette tyder på, at nøjagtigheden ved GPSnet betyder, at centreringsbidraget ved afsætning er ubetydeligt.

Yderligere fremgår det af figur 10.30, at de afsatte punkter med GPSnet ligger mere spredt end punkterne fra de foregående afsætninger. Dette skyldes formentlig den lidt dårligere nøjagtighed ved GPSnet set i forhold til nøjagtigheden ved anvendelse af radiolink over korte afstande.

Undersøgelsen giver således et lille praj om, at det ved brug af RTK-tjenesterne er muligt at afsætte med samme nøjagtighed som ved opmåling. Hvis dette skal slås endeligt fast, bør en større undersøgelse gennemføres, men denne test viser et interessant resultat.

10.5.4 Vurdering

Det kan være svært at foretage en videnskabelig test, hvor der indgår omhyggelighed. Resultatet

vil kun blive et udtryk for, hvor omhyggelige personer i denne test har været. Andre personer vil sandsynligvis nå frem til andre resultater, hvis samme afsætning gennemføres. For at gøre testen så pålidelig som mulig, har alle tre gruppe-medlemmer foretaget afsætninger i testen.

Testen viser, at nøjagtigheden ved afsætning med RTK ikke afhænger af omhyggelighed og teknik. Der ses ikke en væsentlig forbedring af nøjagtigheden, som følge af at der blandt andet bruges støttestokke.

Et andet bemærkelsesværdigt resultat viser sig ved, at der ikke er væsentlig forskel på opmålings- og afsætningsnøjagtigheden. Opmålingsnøjagtigheden er 7 mm, mens afsætningsnøjagtigheden er ca. 6-8 mm. Dette betyder, at det er muligt at afsætte med samme nøjagtighed som ved opmåling med RTK. Dette er et interessant resultat, der betyder, at det er muligt at afsætte med RTK-tjenesterne med den nøjagtighed, som tjenesterne besidder, jf. 9.2 Test 1 - Absolut nøjagtighed.

Der er ikke foretaget en undersøgelse af, hvor længe et sæt transformationesparametre er gældende. De gennemførte afsætninger er afviklet inden for en time, hvilket har resulteret i gode nøjagtigheder. Det må formodes, at hvis en afsætning forløber over længere tid, vil det være nødvendigt at foretage transformationen flere gange. Dette skyldes, at forholdene i atmosfæren og satellitkonstellationen ændres over tid.

Udførelsen af selve testen kan diskuteres. Som tidligere nævnt er træpælene dækket med tape for at skjule detailpunkterne for på denne måde at undgå, at disse påvirker observatøren. Træpælene vil imidlertid også påvirke observatøren og lede denne i retningen af detailpunktet. Hvis testen skal være så objektiv som mulig, bør der ikke være markeringer der, hvor detailpunk-

terne afsættes. Dette vil imidlertid gøre testen noget mere vanskelig og tidskrævende, idet der for hvert afsat punkt skal etableres en træpæl. Yderligere vil kontrolmålingen også blive omfattende, da denne skal fortages med totalstation. På baggrund af disse overvejelser er Test 8 gennemført som tidligere beskrevet.

Testen vurderes alt i alt til at være pålidelig. Varianskoefficienten for bestemmelse af op-

målingsnøjagtigheden er 18 %, og i forbindelse med nøjagtigheden ved hver af afsætningsmetoderne er den 16 %. Da begge nøjagtigheder ligger på millimeterniveau, vil varianskoefficienter på 16-18 % antage en ubetydelig værdi. I forbindelse med opmåling og afsætning med GPSnet er resultatet ikke nær så pålideligt, da testen kun er gennemført en gang. Varianskoefficienten er således 41 %.

11

Praktiske erfaringer

Projektarbejdet har resulteret i en lang række praktiske erfaringer. Formålet med dette kapitel er at præsentere de væsentligste erfaringer vedrørende brugen af RTK-tjenesterne og RTK-måling generelt.

Der behandles en række emner, som synes for konkrete at behandle i konklusionen. Erfaringerne i dette kapitel kan med fordel læses som et supplement til resultaterne i konklusionen.

Kapitlet består af et afsnit omhandlende erfaringer vedrørende selve opmålingen i marken og et afsnit omhandlende mere generelle erfaringer.

11.1 Opmåling i marken

Dataindsamlingen i forbindelse med de otte test har resulteret i en række erfaringer vedrørende brug af RTK-tjenesterne, GPS-udstyret og opsætningen af dette. De væsentligste erfaringer er sammenfattet her.

11.1.1 Brug af RTK-tjenesterne

RTK-tjenesterne er et utroligt effektivt værktøj i forbindelse med opmåling og afsætning. Begge RTK-tjenester er meget pålidelige, og tidsbesparelsen er stor, da der ikke skal opstilles en referencestation.

RTK-tjenesterne er, som tidligere beskrevet,

baseret på to vidt forskellige teknologier. Dette betyder blandt andet, at det ofte i forbindelse med opmålinger hænder, at GPSnet måler på færre satellitter. Dette skyldes formodentlig, at afskærmningen i de enkelte punkter har større betydning, da modtageren skal have redundante satellitter med seks referencestationer i netværket, hvilket udelukker nogle satellitter. Tilsyneladende har dette ingen betydning for nøjagtigheden, da denne generelt er udmærket. I forbindelse med GPS-Referencen skal modtageren kun have redundante satellitter med én referencestation.

11.1.2 Erfaringer med GPS-udstyr

I hovedparten af testene er opmålingen foretaget med Leica SR530. I en enkelt test er der yderligere anvendt Trimble 5800.

Leica SR530

Leica SR530 er et brugervenligt og stabilt GPS-system. Der har ikke været nævneværdige problemer med udstyret. Når først konfigurationerne er oprettet korrekt til begge RTK-tjenester, forløber opmålingerne fint. Ledningerne mellem rygsæk og GPS-modtager kan dog til tider være et irritationsmoment. GPS-modtageren kan også monteres direkte på to-meter stokken, men det har ikke været anvendt i forbindelse med dette projekt.

I forbindelse med transformation til lokale koordinatsystemer med Leica SR530 er der nogle begrænsninger. Det er ikke muligt at transformere mellem EUREF89 og et lokalt koordinatsystem med 2. akse orienteret mod vest, uden at der i modtageren er oplysninger om den lokale geoidemodel samt projektionsparametre. Der skal dog her gøres opmærksom på, at den anvendte modtager indeholder disse oplysninger i forbindelse med måling i System 34 og DNN.

Erfaringer med Trimble 5800

I Test 6 er Trimble 5800 anvendt i forbindelse med opmåling af et REFEDK-punkt. Der opstod en del problemer med opstarten af GPS-modtageren. I cirka halvdelen af tilfældene var der problemer med at opnå forbindelse mellem mobiltelefonen og GPS-modtageren på trods af, at disse var forbundet med et kabel. Når først forbindelsen blev opnået, fungerede udstyret glimrende. Udstyret er yderst brugervenligt, og windowsbrugerfladen gør det yderligere let at betjene udstyret. Kommunikation mellem GPS-modtageren og ACU'en foregår via Bluetooth teknologien, hvilket betyder, at kablerne kan undværes. Det har ikke været muligt at finde en forklaring på opstartsproblemet, men dette er højest sandsynligt et enkeltstående tilfælde.

11.1.3 Konfigurationer

Konfiguration af GPS-modtageren er yderst vigtig i forbindelse med RTK-måling. Vigtigheden opstår som følge af, at koordinaterne beregnes direkte i marken, hvilket betyder, at det ikke er muligt at foretage en genberegning af positionerne. En eventuel fejl i bestemmelse af antennehøjden vil dog kunne rettes. På grund af forskellene mellem RTK-tjenesterne behandles disse hver for sig.

GPS-Referencen

Ved måling med GPS-Referencen er de væsentligste konfigurationer korrekt valg af referencestation, antenntype ved referencestation samt RTCM-beskedtype. En forkert valgt referencestation vil højest sandsynlig ligge længere væk, hvilket betyder at målingerne enten bliver dårligere eller umuliggøres. Ved forkert indtastning af antenntype ved referencestationen, bliver målingerne i værste fald forskudt på grund af forskydning i antennens fasecenter. Denne fejl kan ikke rettes, da beregningerne og positionsbestemmelsen sker direkte i marken. Endelig

skal RTCM-beskedtype 18 og 19 vælges, da det er disse typer af beskeder, som referencestationen udsender. Beskedtyperne rummer kode- og faseobservationer.

GPSnet

Ved måling med GPSnet gælder lidt andre forhold i forbindelse med konfigurationerne. Der skal ikke vælges referencestation, da ét centralt telefonnummer dækker hele landet. Den valgte antenntype for referencestationen har ikke betydning for GPSnet, da referencestationen er virtuel, hvilket betyder at faseobservationerne sendes fra den centrale computer. Med hensyn til RTCM-beskedtype skal disse ligeledes sættes til 18 og 19. I den forbindelse er det dog vigtigt også at definere, hvilken type netværks-RTK der er tale om. Med hensyn til GPSnet er der tale om et VRS-system.

11.2 Generelle erfaringer

I dette afsnit beskrives nogle generelle erfaringer, som knytter sig til GPS-Referencens hjemmeside, SKI-Pro samt brugen af 10-km nettet.

11.2.1 GPS-Referencens hjemmeside

På GPS-Referencens hjemmeside er det muligt at se oplysninger vedrørende de enkelte referencestationer. Det har vist sig, at nogle af oplysningerne på GPS-Referencens hjemmeside ikke er opdaterede. Eksempelvis stemmer koordinaterne til referencestationen i Aalborg ikke overens med de nuværende. Siden KMS i 2003 foretog beregning af referencestationen i Aalborg, er denne blevet flyttet. Dette har ikke betydning for positionsbestemmelsen, da de korrekte koordinater indgår i de data, roveren modtager fra stationen. Det er derimod et problem, hvis koordinaterne hentes direkte fra

hjemmesiden og efterfølgende anvendes. Dette vil resultere i fejl i forbindelse med efterprocessing af statiske målinger.

Da stadig flere højder opgives i DVR90 er det meget uhensigtsmæssigt, at referencestationernes højder på hjemmesiden er opgivet uden bemærkning om højdesystem, som i dette tilfælde er DNN. Der kan opstå fejl i størrelsesordenen 10 cm, hvis et forkert kotesystem anvendes.

11.2.2 Erfaringer med SKI-Pro

På Aalborg Universitet anvendes SKI-Pro, som er Leicas program til behandling af GPS-observationer. Ved RTK-måling begrænser efterbehandlingen sig til indlæsning af rådatafiler fra GPS-modtageren samt konvertering af koordinater til en tekstfil.

Når et job oprettes i GPS-modtageren lagres jobbet automatisk i en bestemt mappe på modtagerens flashkort kaldet GEODB. Denne mappe overføres fra flashkortet til en computer. Eksisterer der flere job i denne mappe, er det ikke muligt at identificere det enkelte job. Det er først ved import af rådata i SKI-Pro, at det er muligt at skelne jobbene fra hinanden. Dette er ret uhensigtsmæssigt og betyder, at der er "slæbes" rundt på mange filer, når antallet af job er stort.

Ændring af antennehøjder

Det er ikke muligt at ændre i antennehøjden i SKI-Pro, hvis denne er forkert. Dette kan først gøres, når koordinaterne er eksporteret til eksempelvis en ASCII-fil. Det er imidlertid ikke muligt at aflæse de indtastede antennehøjder i filerne fra Leica SR530. Små aflæsnings- eller indtastningsfejl vil således ikke kunne identificeres. Det er kun muligt at identificere grove fejl, hvorfor det er vigtigt at notere de målte

antennehøjder i en målebog. Risikoen for at begå sådan en fejl er dog lav, da der oftest anvendes to-meter stok.

11.2.3 Erfaringer med brug af 10-km nettet

10-km punkterne er let tilgængelige og lette at lokalisere. Punkterne er imidlertid placeret under jorden og er dækket af brønddæksler. I visse tilfælde er brønddækslerne allerede blevet dækket af jord og græs. Dette besværliggør lokaliseringen af punkterne, og det er derfor en god ide at medbringe stålband og spade, når et 10-km punkt skal findes. En anden mulighed er også at anvende en GPS i forbindelse med lokaliseringen af et 10-km punkt.

I punkt 984, som er placeret i Ansgar Anlæg i Odense Centrum, kan det i perioder med få

satellitter være svært at måle i punktet. Da punktet ligger 60 cm under jorden, når GPS-antennen kun 1,4 m over jorden. Dette betyder, at indvirkningen af de omkringliggende træer får ekstra betydning.

Resultaterne fra Test 1 viser, at 10-km punkterne besidder en god nøjagtighed og tilsyneladende overholder de postulerede 5 mm i planen og 10 mm i højden. Centreringsen over punkterne er imidlertid lidt vanskelig. Punktet er en lille fordybning i toppen af en skruepløk. Det er vanskeligt at stå med en to-meter stok og ramme et så lille punkt 60 cm under jorden. I nogle tilfælde er det nødvendigt at bruge hånden til at føre bunden af to-meter stokken ned i punktet. Når først selve punktet er fundet, står GPS-antennen imidlertid stabilt i punktet.

12

Konklusion

Dette projekt er udarbejdet på landinspektør-uddannelsen under temaet Geoinformatik. Projektet beskæftiger sig med problemstillinger indenfor fagområdet GPS, hvor der er valgt en anvendelsesorienteret indgangsvinkel til en undersøgelse af de to landsdækkende RTK-tjenester i Danmark. Disse administreres af henholdsvis Leica Geosystems A/S samt Trimble Center Danmark.

Projektet tager udgangspunkt i to interview med landinspektørfirmaer, der har erfaring med brug af RTK-tjenesterne. Yderligere er der gennemført et interview med en af udbyderne, som ligger inde med viden på området. Målet med interviewene er at klarlægge brugen af RTK-tjenesterne og finde frem til problem-

stillinger samt tvivl i forbindelse med brugen af disse. I interviewene er der lagt fokus på i hvor høj grad, der afsættes ved brug af RTK-tjenesterne. Det har vist sig, at afsætning med RTK anvendes i et meget begrænset omfang. RTK-tjenesterne anvendes således primært til opmålingsopgaver. I problemformuleringen er der derfor fokus på både opmåling og afsætning med RTK-tjenesterne. Problemformuleringen lyder således:

"Hvilke problemer samt uafklarede forhold er der omkring opmåling og afsætning med RTK-tjenesterne, og hvordan skal brugeren forholde sig til disse i forbindelse med procedurer og kontrol?"

Ud fra problemformuleringen og de gennemførte interview er der formuleret fem uddybede spørgsmål, som indeholder en række vigtige forhold vedrørende RTK-målemetoden samt brugen af RTK-tjenesterne. Spørgsmålene danner sammen med problemformuleringen udgangspunkt for den resterende del af projektet. Ud fra spørgsmålene er der formuleret otte test, som skal belyse de vidt forskellige problemstillinger, som spørgsmålene omhandler. På grund af testenes forskellige karakter er der benyttet to testområder.

De fire første test er gennemført i et regionalt testfelt på Fyn. Her er den absolutte nøjagtighed, præcisionen, nabonøjagtigheden samt initialiseringstiden blevet undersøgt. Med udgangspunkt i RTK-tjenesternes referencestationer i henholdsvis Odense og Sønderø er der udvalgt fem fikspunkter i forskellige afstande til disse. Den mindste afstand er ca. 1 km, mens den største er ca. 26 km. Ved hjælp af de fem fikspunkter er det muligt at undersøge, om nøjagtigheden af RTK-tjenesterne er afstandsafhængige. Testene gennemføres i UTM32/EUREF89, og der anvendes fire 10-km punkter og ét REFDK-punkt, som alle er koordineret i dette koordinatsystem. Testene er gennemført på Fyn, idet 10-km nettet i Nord- og Midtjylland ikke er endeligt udjævnet.

De resterende fire test er gennemført i Aalborg, og testenes forskellige karakter betyder, at det ikke er muligt at gennemføre disse i samme testfelt.

De to RTK-tjenester er vidt forskellige. Den RTK-tjeneste, som Leica administrerer, kaldes GPS-Referencen og baserer sig på et net af referencestationer bestående af i alt 58 stationer. Systemet fungerer som ved traditionel RTK. Det er imidlertid muligt både at modtage data fra referencestationen via radio- og mo-

billink. Nøjagtigheden ved GPS-Referencen afhænger af afstanden til den anvendte referencestation.

Trimbles RTK-tjeneste kaldes GPSnet og er baseret på netværks-RTK i form af Virtual Reference Station teknologien. Netværket består af 26 referencestationer, som alle sender observationer til en central computer. I forbindelse med en opmåling ringes der op til den centrale computer, som danner en virtuel referencestation i nærheden af roveren og beregner virtuelle referenceobservationer. Disse virtuelle referenceobservationer sendes derefter til roveren. Teknikken gør det muligt at foretage RTK-måling i hele landet med en ensartet nøjagtighed.

12.1 Besvarelse af spørgsmål

I problemformuleringen er der formuleret en række spørgsmål. Svarene på disse spørgsmål foreligger som resultaterne af de otte test. I dette afsnit gengives spørgsmålene enkeltvis, hvorefter de besvares.

12.1.1 Spørgsmål A

Hvad betyder afstanden til referencestationen for nøjagtigheden af en opmåling samt initialiseringstiden ved brug af RTK-tjenesterne?

Absolut nøjagtighed

I forbindelse med landmålingsopgaver eksisterer der ofte et krav om nøjagtighed. Den påkrævede nøjagtighed afhænger af opgavetypen og varierer derfor. I Test 1 er den absolutte nøjagtighed for GPS-Referencen og GPSnet bestemt. Testen viser, at nøjagtigheden ved GPS-Referencen afhænger af afstanden til referencestationen. GPSnet har derimod en ensartet nøjagtighed, der ikke er afstandsafhængig. Der er udarbejdet en tabel, hvor nøjagtigheden i planen og højden for RTK-tjenesterne er angivet for hver hele kilometer, jf. figur 12.1.

Afstand [km]	GPS-Referencen		GPSnet	
	Plan [mm]	Højde [mm]	Plan [mm]	Højde [mm]
1	6	32	14	20
2	7	33		
3	8	34		
4	9	35		
5	10	36		
6	10	37		
7	11	38		
8	12	39		
9	13	40		
10	14	41		
11	15	42		
12	15	42		
13	16	43		
14	17	44		
15	18	45		
16	19	46		
17	20	47		
18	20	48		
19	21	49		
20	22	50		
21	23	51		
22	24	52		
23	25	53		
24	25	54		

Figur 12.1: Absolut nøjagtighed for RTK-tjenesterne ved afstande ud til 24 km.

Nøjagtigheden er angivet som spredninger med ca. 68% konfidens. Ved 10 km til referencestationen er nøjagtigheden 14 mm i planen for både GPS-Referencen og GPSnet. På de kortere afstande er nøjagtigheden i planen for GPS-Referencen bedre end GPSnet, mens det modsatte gør sig gældende ved afstande fra 11-24 km fra referencestationen. Det skal dog bemærkes, at nøjagtigheden i højden er 20 mm for GPSnet, mens den for GPS-Referencen ligger mellem 32 og 54 mm. Disse nøjagtigheder formodes dog at være påvirket af en deformation i højden af GPS-Referencens referencestation i Sønderø. Der er i Test 1 fundet frem til, at den systematiske forskydning er ca. 3 cm, jf. 9.2.3 *Databearbejdning*. Fjernes den systematiske fejl fra nøjagtigheden af GPS-Referencen i højden på figur 12.1 opnås andre resultater.

Tabellen kan bruges til opslag i forbindelse

med opmålingsopgaver for at undersøge, om den påkrævede nøjagtighed kan opnås med den anvendte RTK-tjeneste. Det er vigtigt at understrege, at nøjagtighederne kun gælder i punkter, hvor forholdene er velegnede til måling med GPS. I punkter, hvor der ikke er frit udsyn til himlen, må der forventes en lavere nøjagtighed, hvilket gør sig gældende for begge RTK-tjenester.

Præcision

I forbindelse med fastlæggelsen af den absolute nøjagtighed spiller de anvendte fikspunkter en afgørende rolle. Er disse behæftet med fejl, får de en negativ indvirkning på resultatet. I Test 2, hvor præcisionen for de to RTK-tjenester undersøges, er sådanne mulige fejlbidrag sorteret fra. Testen viser, at præcisionen af GPS-Referencen afhænger af afstanden til

Afstand [km]	GPS-Referencen		GPSnet	
	Plan [mm]	Højde [mm]	Plan [mm]	Højde [mm]
1	5	16	9	16
2	6	17		
3	7	17		
4	8	17		
5	8	18		
6	9	18		
7	10	19		
8	11	19		
9	11	20		
10	12	20		
11	13	21		
12	14	21		
13	15	22		
14	15	22		
15	16	23		
16	17	23		
17	18	24		
18	18	24		
19	19	24		
20	20	25		
21	21	25		
22	21	26		
23	22	26		
24	23	27		

Figur 12.2: Præcision ved GPS-Referencen samt GPSnet ved afstande ud til 24 km.

referencestationen. GPSnet derimod har tilnærmevis en ensartet præcision, hvorfor det konkluderes, at der ikke er en afstandsafhængig fejl. På baggrund af dette er der udarbejdet en figur, hvor præcisionen i højden samt planen for GPS-Referencen og GPSnet er angivet for hver hele kilometer, jf. figur 12.2.

Præcisionen er angivet som spredninger med 68% konfidens. I en afstand af 6 km fra referencestationen er præcisionen 9 mm i planen for både GPS-Referencen og GPSnet. Ved 1 km fra referencestationen er præcisionen 16 mm i højden for både GPS-Referencen og GPSnet. Det ses endvidere, at præcisionen i planen på de korte afstande er bedst ved GPS-Referencen, mens det modsatte gør sig gældende ved afstande fra 7-24 km fra referencestationen. Med hensyn til højden er præcisionen bedst ved GPSnet ved alle afstande over 1 km.

Nabonøjagtighed

I forbindelse med opgaver, hvor den absolutte nøjagtighed af punkterne ikke er så afgørende, er det interessant at undersøge nabonøjagtigheden ved RTK-tjenesterne. Ved undersøgelsen af nabonøjagtigheden indmåles fire punkter på samme initialisering i løbet af 6-7 minutter, hvilket medfører, at målingerne er korrelerede. Resultaterne fra Test 3 viser, at nabonøjagtigheden for RTK-tjenester i planen er ca. 10 mm, jf. figur 12.3.

Nabonøjagtigheden i højden er 18 mm ved GPS-Referencen og 12 mm ved GPSnet. Ved at sammenligne nabonøjagtigheden med den absolutte nøjagtighed for hver RTK-tjeneste fremgår det, at nabonøjagtigheden er noget bedre. Dette skyldes korrelation, da punkterne i nabonøjagtighed er indmålt hurtigt efter hinanden på samme initialisering. Da det yderligere er muligt at afsætte med samme nøjagtighed som

Nabonøjagtighed	Plan [mm]	Højde [mm]
1- σ		
GPS-Referencen	10	18
GPSnet	9	12

Figur 12.3: Nabonøjagtighed ved de to RTK-tjenester.

ved opmåling, kan et antal punkter afsættes med en indbyrdes nøjagtighed i planen på ca. 10 mm. Dette forudsætter dog, at afsætningen udføres inden for et lille tidsrum. I forbindelse med opmålings- og afsætningsopgaver er brugerne oftest interesseret i at opnå en høj nabonøjagtighed mellem punkterne. Det skal understreges, at nabonøjagtigheden ved GPS-Referencen er påvirket af en lille afstandsafhængig fejl, hvorfor afstanden til referencestationen skal betragtes for at vurdere nabonøjagtigheden.

På trods af den høje nabonøjagtighed er RTK-tjenesterne stadig ikke velegnede til eksempelvis bygningsafsætning. Nøjagtighedskravet ved bygningsafsætning er stadig for højt til, at RTK-teknikken kan anvendes. Det er imidlertid muligt at anvende RTK-tjenesterne ved opgaver, hvor nabonøjagtighedskravet er ca. 2 cm.

Initialiseringstid

Initialiseringstiden for RTK-tjenesterne er analyseret. Undersøgelsen viser, at den gennemsnitlige initialiseringstid for henholdsvis GPS-Referencen og GPSnet ligger på 41 og 26 sekunder. Generelt er initialiseringen forløbet uden problemer. I perioder med få satellitter lykkedes initialiseringen ikke altid indenfor de første to minutter, hvorefter forbindelsen blev afbrudt. Efterfølgende blev der ringet op igen, og ofte blev der herefter initialiseret indenfor ét minut.

12.1.2 Spørgsmål B

Hvilken betydning har GPS-udstyrets omregnings- og transformationsrutiner for nøjagtigheden af en opmåling eller afsætning?

Omregning til System 34

Ved opmåling direkte i System 34 anvender GPS-modtageren en omregningsrutine, der på grund af de komplekse forhold i forbindelse med System 34, er behæftet med fejl i forhold til KmsTrans. Fejlene varierer alt afhængig af, hvor i landet der opmåles. Opmåles eller afsættes der direkte i System 34 ved brug af RTK-tjenesterne sker der således generelt en forringelse af nøjagtigheden i størrelsesordenen 0 - 7 cm i forhold til KmsTrans.

Der er flere måder at undgå denne omregningsfejl på. I forbindelse med opmåling i marken kan denne foregå i EUREF89. Koordinaterne kan efterfølgende omregnes til System 34 ved hjælp af KmsTrans. Det skal dog præciseres, at det ved denne metode kun er omregningsfejlen i GPS-udstyret i forhold til KmsTrans, som undgås. Omregningen ved hjælp af KmsTrans til System 34 resulterer stadig i en fejl, som afhænger af, hvor i landet der opmåles.

Efterfølgende ønskes de indmålte punkter ofte koordineret i forhold til indmålte fikspunkter i nærområdet, hvilket kan gennemføres med en transformation i et transformationsprogram.

Med hensyn til opmåling af højden foregår den ved brug af RTK-tjenesterne i ellipsoidehøjder. Ønskes i stedet ortometriske højder, forringes nøjagtigheden på grund af den geoidemodel, som GPS-udstyret benytter sig af. Sammenholdt med KMS' geoidemodel er der tale om afvigelser på mellem 0 og 3 cm.

Transformation

Hvis de indmålte eller afsatte punkter skal koordineres direkte i forhold til fikspunkter i nærområdet, kan der i marken foretages en transformation i GPS-modtageren. Ved at lade GPS-modtageren transformere kan målingerne

tilpasses fikspunkterne i nærområdet med en nøjagtighed svarende til den præcision, den anvendte RTK-tjenester besidder. Dette forudsætter selvfølgelig, at fikspunkterne indbyrdes stemmer overens.

12.1.3 Spørgsmål C

I hvilket omfang er punkter indmålt med RTK korrelerede?

Korrelation

Der har været tvivl om graden af korrelation mellem GPS-positioner. Derfor er det analyseret, hvor lang tid korrelationen strækker sig over. GPS-målinger foretaget umiddelbart efter hinanden er stærkt korrelerede som følge af blandt andet forholdene i atmosfæren og satellitkonstellationen. I Test 5 er varigheden af denne korrelation undersøgt for at fastsætte, hvor lang tid der skal gå, for at uafhængige målinger til et punkt kan opnås. Testen viser, at GPS-målinger er korrelerede inden for ca. 9 minutter. Dette betyder, at der eksempelvis i forbindelse med indmåling af fikspunkter minimum skal gå 9 minutter mellem målingerne for at opnå uafhængighed.

12.1.4 Spørgsmål D

Hvordan opnås rent praktisk det bedste resultat i forbindelse med afsætning?

Afsætning

I Test 8 er nøjagtigheden af afsætning med RTK undersøgt. Fire punkter er afsat med fire metoder, hvor omhyggelighed og teknik er forskellig. Testen viser, at nøjagtigheden ikke afhænger af metoden, der afsættes med. Yderligere er opmålingsnøjagtigheden for de fire punkter beregnet, og det viser sig, at det er muligt at afsætte med samme nøjagtighed, som det er muligt at opmåle med. Fejlbidraget fra centreringen af GPS-antennen i forbin-

delse med afsætning har ikke indvirkning på nøjagtigheden. Resultatet viser således, at den forventede afsætningsnøjagtighed med RTK-tjenesterne kan bestemmes ved blot at betragte nøjagtigheden ved den enkelte RTK-tjeneste. Det betyder for GPSnet, at det er muligt at afsætte med en nøjagtighed på ca. 14 mm i planen og ca. 20 mm i højden, mens værdierne for GPS-Referencen afhænger af afstanden til referencestationen, jf. figur 12.1.

Kontrolmåling af afsætning med RTK

Det er vigtigt at foretage en uafhængig kontrolmåling af de afsatte punkter. Uafhængighed kan i den forbindelse opnås enten ved at anvende totalstation, eller vente ca. 9 minutter før kontrolmålingen med RTK foretages. I forbindelse med kontrolmåling med RTK, skal denne gennemføres ved en ny initialisering og eventuelt en ny transformation. Dette skal sikre, at målingerne ikke er afhængige. Hvis der opstår afhængighed mellem RTK-målingerne, opnås ikke en uafhængig kontrolmåling, hvilket i værste fald kan resultere i, at en systematisk fejl ikke identificeres.

Når en afsætning udføres med GPS, gemmes de afsatte punkter i en log-fil. Denne log-fil kan dog ikke anvendes som kontrol af de afsatte punkter i forhold til designkoordinaterne. Eksempelvis betød nogle unøjagtige målinger i forbindelse med Test 8, at de afsatte punkter blev forskubbet 2 cm i sydlig retning. Afvigelserne i log-filen mellem designkoordinaterne og de afsatte koordinater er imidlertid små og vidner ikke om nogen fejl. Hvis log-filen skal kunne anvendes som kontrol, bør afvigelser på ca. 2 cm fremkomme. Fejl kan således kun opdages ved at gennemføre en uafhængig kontrolmåling efter, at punkterne er afsat.

12.1.5 Spørgsmål E

Er RTK-tjenesterne udstyrsafhængige?

Udstyrsafhængighed

Det er blevet undersøgt, om der er udstyrsafhængighed i forbindelse med de to RTK-tjenester. Resultaterne fra Test 6 viser, at GPS-Referencen er udstyrsafhængig. I forbindelse med GPSnet er der en tendens til, at der opnås lidt bedre resultater i planen med Trimble udstyr. For at kunne be- eller afkræfte dette, skal der yderligere undersøgelser til. På baggrund af Test 6 vurderes det dog, at både Leica- og Trimble udstyr kan anvendes i forbindelse med begge RTK-tjenester.

Det kan ikke udelukkes, at der i nogle tilfælde kan være tale om en svag afhængighed. Komponenter i GPS-modtagere fra forskellige leverandører er ikke de samme, hvilket formodentlig betyder, at der vil være en lille forskel i beregningerne i modtagerne. Dette kan måske have en negativ indvirkning på resultatet, når GPS-modtagere af forskellig type anvendes i referencestation og rover.

12.2 Afsluttende bemærkninger

Der er ingen tvivl om, at RTK-tjenesterne de seneste år har gjort livet meget lettere for brugerne i forbindelse med RTK-måling. Det er imidlertid vigtigt at understrege, at der ikke kan stoles blindt på de koordinater, som GPS-modtageren beregner. En bruger skal således være kritisk i bedømmelsen og gå ind og undersøge kvaliteten af målingerne. Det er også vigtigt at være kritisk vedrørende forholdene omkring indmålingen af hvert enkelt punkt. Hvis forholdene er dårlige, vil nøjagtigheden af målingerne ligeledes blive dårlig.

13

Perspektivering

Generelt er udviklingen inden for GPS gået meget stærkt. Målemetoderne forbedres løbende, hvormed nøjagtighed, hastighed samt pålidelighed forbedres. Endvidere udvikles konstant bedre og bedre udstyr. I denne perspektivering undersøges derfor fremtidsperspektivet for, om udviklingen inden for GNSS kan fortsætte. GNSS er en forkortelse for Global Navigation Satellite System. I kapitlet diskuteres først forhold, som ses i den nærmeste fremtid, mens den sidste del af kapitlet omhandler mere fremtidsorienterede perspektiver.

I dag eksisterer der krav om tilknytning af matrikulære målinger til System 34. Da System 34 er behæftet med netspændinger, forringes gode GPS-målinger, da disses nøjagtighed ofte

er fikspunkterne overlegne. Endvidere veksler nøjagtigheden en hel del i matrikelkortet i dag på grund af gamle unøjagtige målinger. For at kunne drage nytte af de nøjagtigheder, som opnås med GPS, er System 2000 indført i Danmark. Målet for de fremtidige matrikulære målinger er derfor at bibeholde nøjagtigheden, som GPS-målinger leverer. Dette sker ved omlægning af matrikelkortet til System 2000. Dermed vil matrikelkortet på sigt opnå en mere ensartet nøjagtighed end i dag. KMS arbejder derfor i øjeblikket på at få udviklet et regelsæt omhandlende anvendelsen af GPS i forbindelse med matrikulære sager. Dette regelsæt er desværre endnu ikke offentliggjort [Sibbesen, den 09.02.2004]. Havde regelsættet været offentliggjort, kunne det have været interessant

at sammenholde de opnåede resultater af de udførte test med dette.

Resultaterne af de udførte test har vist, at GPSnet besidder en bedre nøjagtighed end GPS-Referencen. I den forbindelse skal det dog bemærkes, at GPS-Referencen udfører en test af FKP på Sjælland. FKP er en form for netværks-RTK, jf. *3 Real-Time Kinematic*. Viser disse test tilfredsstillende resultater, implementeres FKP-konceptet i GPS-Referencen. Herved kan GPS-Referencen både tilbyde enkeltstations-RTK samt netværks-RTK. Resultatet bliver således, at i fremtiden kan begge RTK-tjenester tilbyde ensartet nøjagtighed i hele Danmark. Ud til ca. 10 km fra referencestationen vil nøjagtigheden i planen af enkeltstations-RTK dog være bedre end netværks-RTK. En bruger af GPS-Referencen har således den fordel, at der i den enkelte situation kan tages stilling til, hvilken type RTK der er mest fordelagtig. Endvidere har en bruger af GPS-Referencen den fordel, at alle vektorer i forbindelse med en måling har et fælles knudepunkt, hvormed vektorerne kan udjævnes. Ved måling med GPSnet har RTK-vektorerne ikke et fælles knudepunkt, hvis flere VRS'er er etableret i forbindelse med en måling, hvorfor udjævning ikke er muligt.

Generelt forventes det, at RTK-måling i fremtiden forbedres. GALILEO planlægges klar til brug i 2008. Hvis det teknisk kan lade sig gøre at forene GALILEO og GPS, vil det medføre dobbelt så mange satellitter. Hermed vil brugere over hele verden opnå fordele som øget nøjagtighed samt pålidelighed. En anden fordel er, at hvis det ene system bryder sammen, så kan det andet system overtage uden større forstyrrelser for brugeren. Det er dog svært at svare på, hvor forbedret nøjagtigheden af RTK vil blive. Det vil dog være interessant, hvis det i fremtiden kan lade sig gøre at udføre bygningsafsætning med RTK. [GPS World, 2004]

Der er endvidere også en stor udvikling i gang inden for GPS-systemet i disse tider. I 2004 og frem til 2010 er det planlagt at opsende moderniserede satellitter. Disse satellitter er opgraderet til at sende tre nye koder. Det er dog kun den ene kode, der er til civil brug. Denne gør, at nøjagtigheden af positionsbestemmelse på koden forbedres væsentligt. Endvidere indledes efter planen opsendelsen af satellitter med en ekstra bærebølge i 2005. Denne nye frekvens vil også bære et civilt signal. I 2015 forventes fuld dækning af denne satellittype. Udviklingen af GALILEO har givetvis medført øget konkurrence på GNSS-området. Det formodes således, at denne øgede konkurrence har medvirket til opgraderingen af GPS-systemet. Det må således forventes, at tilstedeværelsen af GALILEO vil medføre en konkurrence mellem systemerne, hvilket helt klart vil være til fordel for den civile bruger. [gps.losangeles.af.mil], [Dueholm, 2002, s. 51-54]

Endvidere ses et andet spændende fremtidsperspektiv i EGNOS, som står for European Geostationary Navigation Overlay System. EGNOS er et supplement til GNSS-systemerne. Det består af en række landbaserede stationer, som arbejder sammen med et system af satellitter. Formålet med systemet er at få nøjagtigheden på koden ned på 2–5 meter i 95 % af tilfældene. Under gunstige forhold er det dog lykket at få nøjagtigheden ned under 1 m. Udover en højere nøjagtighed betyder EGNOS også en højere grad af sikkerhed i forbindelse med brug af GNSS-systemerne, idet EGNOS-signalerne indeholder information om validiteten af signalerne fra de forskellige systemer. I USA, hvor systemet kaldes WAAS, er det fuldt operationelt, mens det i Europa er ved at blive opbygget, men forventes at køre inden for de næste år. WAAS står for Wide Area Augmentation System. EGNOS er gratis at benytte, og det eneste, der kræves, er, at modtageren

er konfigureret til dette. Yderligere forventes modtagerne at være i stand til at kombinere GALILEO og EGNOS signalerne.

Et andet interessant aspekt er, at der i øjeblikket forskes i at gøre modtagerne i stand til at foretage absolut positionering på fassen med

centimeters nøjagtighed. Dette skal ske ved hjælp af et korrektionssignal indeholdende modelleringer af atmosfæreforhold. I forbindelse med dette forventes det af nogle, at RTK-tjenesterne inden for de næste 5-10 år bliver udkonkurreret. [Borre, den 28.05.2004]

Litteraturliste

Faglitteratur

- [Andersen, 2001]
Jesper Nørgård Andersen & Claus Andersen
RTK-tjenester i Danmark
Aalborg Universitet, 2001
- [Andersen, 1997]
Ib Andersen
Den skinbarlige virkelighed - om valg af samfundsvidenskabelige metoder
Samfundslitteratur, 1997
- [Bahl, 2001]
Lolita Bahl
Nye kortprojektioner til EUREF89
Landinspektøren, 2001
- [Borre, 1995]
Kai Borre
GPS i landmålingen
Central-Trykkeriet Nykøbing F., 1995
- [Borre, 1992]
Kai Borre
Landmåling
Central-Trykkeriet Nykøbing F., 1992
- [Christiansen, 1998]
Karina Christiansen, Allan Wittorff & Kasper Wohler
Afsætning med RTK - Afgangprojekt
Aalborg Universitet, 1998
- [Collier, 2003]
Philip Collier
Satellite Positioning and Geodesy
University of Melbourne, 2003
- [Dueholm, 2002]
Keld Dueholm & Mikkel Laurentzius
GPS
Ingeniøren | bøger, 2002
- [Geodætisk Institut, 1981]
Geodætisk Institut
UTM-nettet
Geodætisk Institut, 1981
- [GPS World, 2004]
GPS World
Global View
GALILEO Talks Colser to Accord
GPS World, 2004
- [Hildebrand, 1987]
David K. Hildebrand og Lyman Ott
Statistical Thinking for Managers
Duxbury Press, Boston, 1987
- [Hofmann, 2001]
B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger & J. Collins
GPS - Theory and Practice
Springer Wien New York, 2001
- [Jacobi, 1998]
Ole Jacobi
Landmåling - Instrumenter og metoder
Danmarks Tekniske Universitet, 1998
- [Jensen, 2003]
Karsten Jensen
Landmåling i teori og praksis
Aalborg Universitet 2003

- [Jensen, 2001]
 Anna B. O. Jensen & Karsten Engsgaard
 GPS og koordinattransformationer II
 Landinspektøren, 2001
- [Keenan, 2003]
 Ryan Keenan
 GPS Newsletter - General
 Leica Geosystems, 2003
- [Landau, 2002]
 Herbert Landau, Ulrich Vollath & Xiaoming Chen
 Virtual Reference Station Systems
 Journal of Global Positioning Systems, 2002
- [Lauritzen, 2003]
 Steffen Lauritzen & Poul S. Eriksen
 Teknisk måling - Statistik
 Aalborg Universitet, 2003
- [Leica, 2001]
 Leica Geosystems A/S
 Leica SR530 Geodetic RTK Receiver
 Leica Geosystems A/S, 2001
- [Madsen, 2003]
 Kurt Madsen & Sigvard Stampe Villadsen
 Test af Netværks- og Enkelstations RTK
 KMS, 2003
- [Madsen, 2001]
 Finn Bo Madsen
 REFDK - fremtidens referencenet i Danmark
 Landinspektøren, 2001
- [Madsen, 1999]
 Finn Bo Madsen & Anna B. O. Jensen
 Nye koordinatsystemer i Danmark
 Artikel i GIS i Danmark II
 Teknisk Forlag, 1999
- [Roland, 2001]
 Anna B. O. Jensen & Harald Roland
 Anvendelse af permanente GPS-referencestationer
 Landinspektøren, 2001
- [Slot, 2001]
 Kenneth Slot, Michael Petersen, Peder Daniel Kristensen & Rasmus Jacobsen
 Test af RTK-tjenester
 Aalborg Universitet, 2001
- [Teunissen, 1997]
 P. J. G. Teunissen, P. J. de Jonge & C. C. J. M. Tiberius
 The least-squares ambiguity decorrelation adjustment
 Journal of Geodesy, 1997
- [Villadsen, 2002]
 Sigvard Stampe Villadsen & Kurt M. Madsen
 RTK test udført ved Kort og Matrikelstyrelsen
 Kort og Matrikelstyrelsen, 2002
- [Villadsen, 2001]
 Sigvard Stampe Villadsen & Klaus Schmidt
 Nyt højdeniveau i Danmark - Dansk Vertikal Reference 90
 Landinspektøren, 2001
- [Vollath, 2000]
 Ulrich Vollath, Alois Buecherl, Herbert Landau, Christian Pagels & Bernhard Wagner
 Multi-Base RTK Positioning Using Virtual Reference Stations
 Spectra Precision Terrasat GmbH, 2000
- [Vollath, 2002]
 Ulrich Vollath, Herbert Landau & Xiaoming Chen
 Network RTK - Concept and Performance
 Proceedings of the GNSS Symposium, 2002

- [Wübbena, 2001]
Gerhard Wübbena, Andreas Bagge & Martin Schmitz
Network-Based Techniques for RTK Applications
GPS JIN, 2001
- [Wübbena., 2002]
Gerhard Wübbena & Andreas Bagge
RTCM Message Type 59-FKP for transmission of FKP
Geo++ White Paper, 2002
- [Aarestrup, 1994]
Michael Aarestrup & Sigvard Stampe Villadsen
Koordinatsystemer i Danmark
Artikel i GIS i Danmark I
Teknisk Forlag, 1994
- Elektroniske publikationer**
- [ascos.ruhrgas.de]
Tysklands største gasleverandør
Besøgt den 02.03.2004
<http://ascos.ruhrgas.de>
- [www.dmi.dk]
DMI's hjemmeside
Besøgt den 05.03.2004
<http://servlet.dmi.dk/vejr/vandstand/DVR90.html>
- [gps.losangeles.af.mil]
NAVSTAR hjemmeside
Besøgt den 27.05.2004
<http://gps.losangeles.af.mil/jpo/gpsoverview.htm>
- [www.gpsnet.dk]
GPSnets hjemmeside
Besøgt løbende gennem projektperioden
<http://www.gpsnet.dk/>
- [www.gps-referencen.dk]
GPS-Referencens gamle hjemmeside
Besøgt den 10.03.2004
<http://www.gps-referencen.dk>
- [igsb.jpl.nasa.gov]
IGS' hjemmeside
Besøgt den 13.05.2004
<http://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>
- [www.kms.dk]
KMS' hjemmeside
Besøgt løbende gennem projektperioden
<http://www.kms.dk/>
- [www.referencen.dk]
GPS-Referencens hjemmeside
Besøgt løbende gennem projektperioden
<http://www.referencen.dk/>
- [www.referencenet.dk]
Rådet For Danmarks Geografiske Referencenets hjemmeside
Besøgt den 10.03.2004
<http://www.referencenet.dk/>
- [www.rtcn.org]
The Radio Technical Commission for Maritime Services' hjemmeside.
<http://www.rtcn.org/delivery/086-2004-SC104-PR%20-%20DGNSS%20Press%20Release.pdf>
- [www.sapos.de]
RTK-netværk som udbydes i Tyskland
Besøgt den 02.03.2004
<http://www.sapos.de>
- [www.swisstopo.ch]
Swisstopo's hjemmeside
Besøgt den 10.03.2004
<http://www.swisstopo.ch/>

Interview, samtaler og e-mail

[Borre, den 28.05.2004]

Kai Borre

Professor i landmåling

Samtale den 28.05.2004

[Dethlefsen, den 27.05.2004]

Claus Dethlefsen

Adjunkt ved Institut for Matematiske Fag

Aalborg Universitet

Samtale den 27.05.2004

[Ellegård, den 16.02.2004]

Søren Ellegård

Direktør for Trimble Center Danmark

Interview den 16.02.2004

[Hansen, den 17.02.2004]

Brian Hansen

Kundekonsulent ved Leica Geosystems A/S

Samtale ved Leica Roadshow den 17.02.2004

[Hansen, den 17.03.2004]

Brian Hansen

Kundekonsulent ved Leica Geosystems A/S

E-mail den 17.02.2004

[Hvolby, den 06.02.2004]

Mads Hvolby og Bent Jeppesen

Landinspektørfirmaet Nellemann & Bjørnkjær

Interview den 06.02.2004

[Madsen, den 03.03.2004]

Kurt Mølsted Madsen

Opmålingsleder KMS

Telefonsamtale den 03.03.2004

[Sibbesen, den 09.02.2004]

Christian Sibbesen

KMS/Matrikelområdet

E-mail den 09.02.2004

A

Real-Time Kinematic

Dette appendiks fungerer som et supplement til GPS-teorien i projektet. Appendikset er struktureret på en sådan måde, at det kan benyttes som opslagsværk, men kan også med fordel læses igennem i sammenhæng for en dybere forståelse af den GPS-teori, der ligger til grund for RTK. Enkelte passager vil kunne genkendes fra *3 Real-Time Kinematic*. Dog vil der i appendikset blive gået yderligere i detaljer og føjet nye oplysninger til.

Appendikset er inddelt i følgende overordnede afsnit:

- GPS generelt
- RTK-metoden

Forud for en gennemgang af teorien bag dele af RTK-metoden behandles en række emner, der er væsentlige for forståelsen af teorien og GPS generelt.

A.1 GPS generelt

Lige siden de første tiltag til GPS i begyndelsen af 1970'erne har diverse udstyrsproducenter og GPS-udviklere været travlt optaget af at drage mest mulig nytte af systemet og gøre det tilgængeligt for så mange mennesker som muligt. Gennem årene er det blevet til et utal af ideer og teorier til gavn for et voksende antal af brugere med et stadig mere forskelligartet behov. I det følgende beskrives enkelte af disse ideer og teorier. I den forbindelse forklares endvidere

nogle grundlæggende begreber inden for GPS. Forud for dette forklares dog, hvorfor tiltagene, eksempelvis som følge af fejlkilder, har været nødvendige.

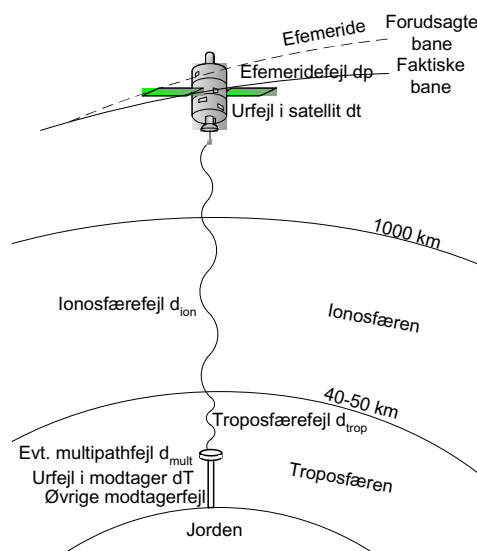
A.1.1 Fejlkilder i forbindelse med GPS

Grundlæggende bygger positionsbestemmelse ved hjælp af GPS på rumlig indbinding, hvilket vil sige, at en position bestemmes ud fra afstandsmåling til kendte punkter i form af satellitter. Afstandsmålingen baserer sig på den tid, GPS-signalerne er om at tilbagelægge vejen fra satellitten til modtageren. Satellittens position og signalernes rejsetid er behæftet med fejl, hvorfor den målte afstand kaldes en pseudoafstand. Fejlene og deres karakteristika beskrives hver især herunder i den rækkefølge, hvormed de har indflydelse på afstandsmålingen. Fejlene er som følger, jf. figur A.1:

- Efemeridefejl
- Urfejl i satellitter
- Ionosfærefejl
- Troposfærefejl
- Multipathfejl
- Urfejl i modtager
- Øvrige modtagerfejl

Efemeridefejl

Ordet efemeride stammer fra græsk og var oprindeligt en tabel over et himmellegemes bane. Tilsvarende beskriver efemeriderne i GPS-systemet satellitternes baner og derved satellitternes position til et givent tidspunkt. Efemeridefejl opstår som følge af, at banerne beregnes på grundlag af en umiddelbar forudgående del af banen, hvorfor der er tale om en ekstrapolation af banen ud i fremtiden. Med andre ord er der i forbindelse med afstandsmålingen forskel på den oplyste og den virkelige position af satellitten. Fejlen vokser med tiden fra satellittens sidste kontakt med kontrolseg-



Figur A.1: Generelle fejlkilder ved GPS-måling.

mentet på jorden, idet satellitterne over tid glider væk fra de forudbestemte baner.

Udover de efemerider, som indgår i navigationsmeddelelsen fra satellitterne, er det i forbindelse med specielt efterprocessing muligt at benytte mere nøjagtige efemerider, der blandt andet kan hentes over internettet. Udover såkaldte ultrahurtige efemerider, der kan erhverves fra International GPS Geodynamic Service to gange dagligt, er det også muligt at hente såkaldte hurtige efemerider inden for et døgn hos en række udbydere. Ønskes en højere nøjagtighed er udbyderne i stand til at leverer præcise efemeriderne inden for en til to uger, jf. figur A.2.

Efemerider	Nøjagtighed (σ) [cm]	Beregningstid	Opdateringsrate
Broadcast	< 200	0 min	0 min
Ultra Rapid (predicted)	< 10	0 min	2xdaglig
Ultra Rapid (observed)	< 5	3 timer	2xdaglig
Rapid	< 5	17 timer	daglig
Final	< 5	13 dage	ugentlig

Figur A.2: Forskellige former for efemerider og deres nøjagtighed. [www.igsb.jpl.nasa.gov]

[Hofmann, 2001, s. 65-70], [Borre, 1995, s. 45-47], [Dueholm, 2002, s. 29-30]

Urfejl i satellitter

På trods af at der i satellitterne er monteret nogle meget præcise atomure er det nødvendigt at holde styr på urfejlen i satellitterne, da en fejl på eksempelvis 10^{-9} sekund i tidsmålingen medfører en fejl på 0,3 meter i pseudoafstanden. Kontrolsegmentet på jorden beregner derfor løbende urfejlen i forhold til den gældende GPS-tid, hvorefter størrelsen af urfejlen indgår i navigationsmeddelelsen. Navigationsmeddelelsen opdateres som regel en eller to gange dagligt.

[Hofmann, 2001, s. 19-20], [Dueholm, 2002, s. 39]

Ionosfærefejl

Ionosfæren er den del af atmosfæren, som ligger ca. 50 km fra jordens overflade og fortsætter op til magnetosfæren ca. 1.000 km oppe. Solens ultraviolet stråling i denne del af atmosfæren forårsager, at luftens molekyler spaltes i ioner samt elektroner. Antallet af de frie elektroner varierer med tidspunktet på dagen, årstiden samt solpletaktiviteten over en årrække. Disse frie elektroner interagerer med GPS-signalet og medfører signalforringelse. Bærebølgenes udbredelsehastighed forøges, mens udbredelsehastigheden for de påmodulerede koder sænkes. Størrelsen af fejlen er den samme, hvad enten der er tale om forøgelse eller forsinkelse. Resultatet af dette bliver, at pseudoafstande målt på koden bliver for lange, mens pseudoafstande målt på fasen bliver for korte.

Ionosfærefejlen kan med en vis tilnærmelse modelleres ved hjælp af en korrektion Δc til lysets hastighed i vakuum:

$$\Delta c = 40,3 \cdot c \cdot \frac{N_e}{f^2}$$

hvor:

c : Lysets hastighed

N_e : Elektrondensiteten

f : Frekvensen på bærebølgen

Af formelen ses det, at ionosfærefejlen er omvendt proportional med kvadratet på frekvensen, hvilket betyder, at ionosfærefejlen bliver mindre, efterhånden som frekvensen forøges. Dette faktum udnyttes blandt andet, hvis modtageren er i stand til at måle fasen på begge bærebølger, jf. *Dobbeltfrekvent måling*.

Det anbefales at måle om natten, da ionosfæren på dette tidspunkt ikke i samme grad påvirkes af solen. Ionosfærefejlen er den største GPS-fejlkilde. Udover modelleringen er det muligt at reducere den ved hjælp af dobbeltfrekvent måling eller ved relativ måling og dannelse af differenser, jf. *Relativ måling*.

[Hofmann, 2001, s. 99-106], [Borre, 1995, s. 101-102], [Dueholm, 2002, s. 40-42]

Troposfærefejl

Troposfæren dækker i denne forbindelse også over stratosfæren, og befinder sig under ionosfæren, hvilket vil sige fra jordens overflade og ca. 50 km op. Ligesom ionosfæren bidrager troposfæren også med fejl i form af signalforsinkelse. Forsinkelsen af signalet i troposfæren afhænger dog ikke af signalets frekvens, men af temperatur, tryk samt luftfugtighed langs signalets udbredelsesvej. Derfor må denne fejl korrigeres ved hjælp af en tilnærmet matematisk model. Den troposfæriske refraktion N_T kan eksempelvis bestemmes ved hjælp af følgende formel:

$$N_T = (77,624 \cdot \frac{p}{T} - 12,92 \cdot \frac{e}{T} + 371900 \cdot \frac{e}{T^2}) \cdot 10^{-6}$$

hvor:

p : Trykket i millibar (mb)

T : Temperaturen i Kelvin (K)

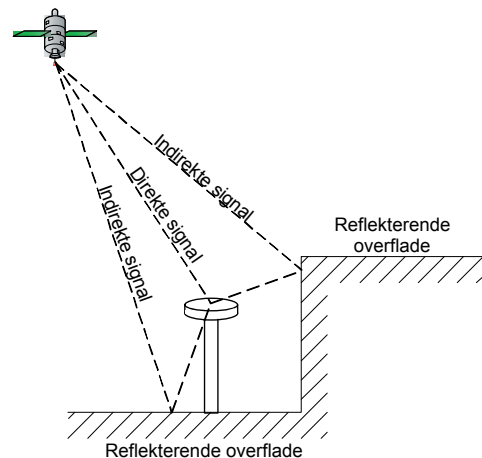
e : Luftfugtighedstryk i millibar (mb)

Som regel benyttes der standardværdier til udregning af troposfærefejlen. Jo kortere vej gennem troposfæren, jo mindre fejl og bedre bestemmelse af fejlen. Derfor bør der ikke observeres til satellitter, hvor elevationsvinklen er lav, hvilket vil sige under $10\text{-}15^\circ$ over horisonten. Troposfærefejlen betyder på denne måde både dårlig bestemmelse og dårlig geometri for bestemmelsen af højden ved en GPS-måling. Fejlkilden kan i tilfælde af relativ måling reduceres ved dannelse af differenser, jf. *Relativ GPS-måling*.

[Hofmann, 2001, s. 106-107], [Borre, 1995, s. 101], [Dueholm, 2002, s. 42-43]

Multipathfejl

Multipathfejlen skiller sig ud fra de andre fejlkilder, idet den er uforudsigelig. I tilfælde af GPS-målinger i nærheden af reflekterende overflader kan multipath være en væsentlig fejlkilde. Multipath opstår ved, at signalet ankommer til modtageren via refleksioner fra genstande i nærheden, jf. figur A.3. Disse signaler, som ankommer senere, vil dermed få en større rejselængde. Multipathfejlen kan i tilfælde, hvor den optræder, være svær at minimere. Refleksionsfladerne varierer ofte fra måling til



Figur A.3: Illustration af multipath. [Hofmann, 2001, s. 126]

måling, hvorfor der ikke kan opstilles nogen generel metode til reduktion af fejlbidraget. Yderligere varierer multipath også over tid, da satellitterne flytter sig. For at undgå multipath kan alle satellitter samt signaler, der befinder sig tæt på horisonten, sorteres fra.

For at mindske effekten af multipath er det vigtigt at være opmærksom på de omgivelser, en antenne sættes op i. Yderligere findes der specielle antenner, der reducerer risikoen for multipath.

Det skal dog nævnes her, at multipath gentager sig dag for dag i stationære omgivelser, når satellitterne efter et døgn står på samme måde som dagen før. Herved er det muligt at fjerne multipath i de stationære stationer.

[Hofmann, 2001, s. 125-126], [Borre, 1995, s. 103-104], [Dueholm, 2002, s. 43-44]

Urfejl i modtager

I modtagerne anvendes Quartz-ure, der langt fra er lige så præcise som de meget dyre atomure i satellitterne. Urfejlen spiller også en rolle i forhold til afstandsbestemmelsen. Modtagerens urfejl kan, hvis der måles med en modtager, beregnes og elimineres ved at lade den indgå som ubekendt i beregningerne og observere til minimum fire satellitter. Efterfølgende kan modtagerens ur korrigeres inden for 1 mikrosekunds nøjagtighed. Desuden kan urfejlen i modtageren elimineres ved relativ måling og dannelse af differenser, jf. *Relativ GPS-måling*. [Collier, 2003, s. 5.5], [Dueholm, 2002, s. 39]

Øvrige modtagerfejl

Disse fejl omfatter blandt andet korrelationsfejl som følge af støj i modtageren, manglende nøjagtighed i bærebølgekopien eller manglende beregningsnøjagtighed. Derudover kan der i nogle situationer være tale om en fasecen-

terforskydning i antennen. Efterhånden som modtageren forbedres, minimeres denne fejl. [Hofmann, 2001, s. 78-81]

Satelliternes geometri

De synlige satellitters konstellation er vigtig i forbindelse med positionsbestemmelsen. En god geometri er en forudsætning, hvis der skal opnås en nøjagtig position. Geometrien ændres i takt med, at satellitterne bevæger sig over himlen. Satelliternes geometri kan udtrykkes ved hjælp af Dilution Of Precision, som betyder forringelse af præcisionen, og i daglig tale blot kaldes for DOP.

DOP beregnes ud fra kovariansmatricen for elementerne i udjævningen af pseudoafstandsobservationerne, eller bestemmes forud for målingen ud fra en opdateret almanac, der beskriver satellitkonstellationen. Kovariansmatricen indeholder varianserne for de fire elementer fra løsningsvektoren, X-, Y-, Z-koordinaten samt GPS-modtagerens urfejl. Kovariansmatricen bestemmes som:

$$Q_x = (A^T A)^{-1}$$

hvor Q_x er kovariansmatricen og A er designmatricen. Det fremgår af formlen, at observationerne tildeles vægten 1, da vægtmatricen ikke indgår. Kovariansmatricen er en 4x4 matrix, hvor varianserne til de fire elementer står på diagonalen.

Ved at kombinere de fire varianser kan der opstilles forskellige udtryk for positionens præcision. Eksempelvis beskriver VDOP og HDOP henholdsvis den vertikale og horisontale præcision. Et andet af udtrykkene, Position Dilution of Precision, der forkortes PDOP, anvendes til at fastlægge spredningen i den tredimensionale position. PDOP-værdien fastlægges ud fra følgende formel:

$$PDOP = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}$$

PDOP skal helst være under fem, hvilket ofte ikke er noget problem, hvis der er frit udsyn til himlen. Hvis der derimod er obstruktioner i modtagerens omgivelser, vokser PDOP. PDOP-værdien kan sammen med spredningen på afstandsmålingen anvendes til at danne forskellige udtryk for nøjagtigheden af den aktuelle position.

[Hofmann, 2003, s. 271-275], [Jensen, 2003, s. 206-208], [Ducholm, 2002, s. 44-46]

A.1.2 Ideer, teorier og grundbegreber

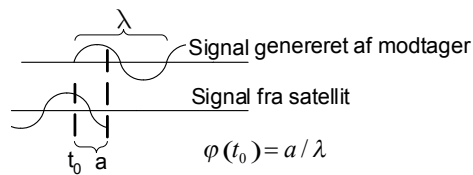
Allerede i slutningen af 1970'erne, samtidig med at de første GPS-satellitter sendes i kredsløb, står det klart, at de tidligere beskrevne fejkilders indflydelse på GPS-målingen kan begrænses væsentligt ved samtidig måling med minimum to modtagere. Endvidere viser det sig, at GPS-målingen kan foretages på millimeterniveau i fald modtagerne er i stand til at måle på fasen. Disse grundlæggende principper er sidenhen blevet anvendt flittigt til stor fordel for brugere af GPS.

I det følgende forklares, hvordan der generelt i forbindelse med GPS-måling måles på fasen, idet fasemåling i højere grad end kodemåling er kendetegnende for RTK og den nøjagtighed, som metoden kan levere. Dernæst beskrives to grundlæggende principper for GPS-målinger foretaget med minimum to modtagere. I GPS-litteraturen benævnes disse principper som oftest differentiel og relativ GPS-måling.

Fasemåling

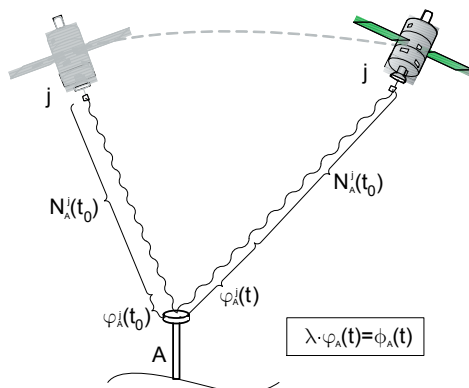
Når en modtager, der kan måle på fasen, tændes, begynder den at registrere faseforskelle mellem bæreølgen fra satellitten og en kopi

af bæreboigen genereret af modtageren, jf. figur A.4.



Figur A.4: Registrering af faseforskel. [Dueholm, 2002, s. 63]

Disse faseforskelles summeres efterhånden som tiden går. Ubekendt i den henseende er det antal af hele bølgelængder, der er mellem satellit og modtager i det øjeblik, modtageren bliver tændt, jf. figur A.5.



Figur A.5: Faseobservation til samme satellit på forskellige tidspunkter. [Dueholm, 2002, s. 65]

Antallet af hele bølgelængder kaldes ofte også periodekonstanten og forkortes N . Er modtageren dobbeltfrekvent er der tale om to N 'er til hver satellit. Faseforskellen og periodekonstanten kan ved hjælp af GPS-signalets bølgelængde omregnes til en afstand. Afstanden er behæftet med de fejl, der knytter sig til GPS-måling, kaldes således en pseudoafstand. Observationsligningen for en fasemåling er som følger:

$$\phi_A^j(t) = \rho_A^j(t) - \lambda \cdot N_A^j(t_0) - c \cdot dT_A + c \cdot dt^j - d_{ion} + d_{trop}$$

hvor:

$\phi_A^j(t)$: Den samlede længde af fase-

forskellene mellem satellit j og modtager A til tiden t

$\rho_A^j(t)$: Den geometriske afstand mellem satellit j og modtager A til tiden t

λ : Bæreboigenes bølgelængde

$N_A^j(t_0)$: Antallet af hele bølgelængder mellem satellit j og modtager A til tiden t_0

c : Lysets hastighed i vakuum

dT_A : Modtagerens urfejl

dt^j : Satellittens urfejl

d_{ion} : Ionosfærefejlen

d_{trop} : Troposfærefejlen

Periodekonstanterne kan med den rette kombination af målinger fra to eller flere modtagere bestemmes ved udjævning. Når først periodekonstanterne er bestemt, siges modtageren at være initialiseret.

[Hofmann, 2001, s. 88-90]

Bestemmelse af periodekonstanterne

Bestemmelse af periodekonstanterne i forbindelse med en fasemåling kræver, at der er tale om en relativ GPS-måling, hvor der kan dannes differenser mellem forskellige observationer. Eksempelvis resulterer en dobbeltdifferens i observationer, der er renset for den væsentligste del af iono- og troposfærefejlen, samt urfejl i satellitter og modtagere, jf. *Relativ GPS-måling*. Tilbage er udover en kombination af de geometriske afstande mellem satellitter og modtagere også en kombination af periodekonstanterne, jf. *Dobeltdifferens*. Bestemmelsen af periodekonstanterne kan overordnet inddeles i tre trin.

Trin 1

Først genereres et sæt foreløbige heltalskombinationer. Dette kan eksempelvis gøres ved først at foretage en udjævning, hvor periode-

konstanterne hver især indgår som reelle tal. Alt afhængig af resultatet af udjævningen genereres herefter kombinationer af de nærmeste heltal eller alle heltal inden for grovfejlsgrænserne. Antallet af kombinationer er af betydning for antallet af heltalsudjævninger og dermed beregningstiden.

Trin 2

Dernæst udføres det pågældende antal heltalsudjævninger, hvorefter heltalskombinationen, som giver det bedste udjævningsresultat, vælges som løsning. Som regel benyttes mindste kvadraters princip ud fra betragtningen om, at den heltalskombination, som afviger mindst fra de indsamlede data, formodentlig er den rigtige løsning.

Trin 3

Sidste led i bestemmelsen af periodekonstanterne indebærer, at den udvalgte heltalskombination efterprøves. Dette kan blandt andet gøres ved at vurdere den valgte løsning ud fra resultatet af udjævningen og ved at sammenholde resultatet med resultatet af andre løsninger.

Ovenstående fremgangsmåde er simplificeret og gælder især relativ statisk måling, hvor modtagerne ikke er i bevægelse. Alt afhængig af udstyr og den konkrete målemetode benyttes eventuelt mere avancerede regneteknikker og metoder, jf. *RTK-initialisering*.

I øvrigt bør LAMBDA-metoden nævnes som en af de fremherskende metoder til en hurtigere og mere effektiv bestemmelse af periodekonstanterne. Grundlæggende bestemmes periodekonstanterne på samme måde som beskrevet ovenfor. Ulempen ved den generelle metode er dog, at kombinationen af periodekonstanterne som følge af differensdannelsen er upræcis og præget af en stor korrelation. Dette råder

LAMBDA-metoden bød på ved forud for bestemmelsen at transformere kombinationen af periodekonstanter til en mere præcis og ukorreleret kombination. Som følge heraf nedbringes initialiseringstiden væsentligt.

[Hofmann, 2001, s. 213-215], [Teunissen, 1997, s. 589-591, 601]

Periodetab

Nogle gange hænder det, at modtageren under en måling ikke er i stand til at modtage signalet fra satellitten. Hvad enten det skyldes, at signalet rent fysisk blokeres eller for meget baggrundsstøj, kan modtageren ikke længere holde styr på faseforskellene, hvorfor modtageren i værste fald må initialisere på ny. Disse brud i målingen kaldes for cycleslips eller periodetab. Korte brud kan repareres ved hjælp af interpolation, mens det i forbindelse med længere brud i nogle tilfælde er nødvendigt at initialisere på ny. [Hofmann, 2001, s. 205-212]

Dobbeltfrekvent måling

Satellitterne udsender hver især to bærebølger med hver deres frekvens. I tilfælde hvor modtageren er i stand til at måle fasen på begge bærebølger, er det muligt at udnytte forskellen på signalernes frekvens og fjerne hovedparten af ionosfærefejlen, eksempelvis ved hjælp af følgende formel:

$$d_{L1} = (r_{L1} - r_{L2}) \cdot \frac{f_{L2}^2}{f_{L2}^2 - f_{L1}^2}$$

hvor:

- d_{L1} : Afstandskorrektion på bærebølgen L1
- r_{L1}, r_{L2} : Pseudoafstandene fundet ved henholdsvis L1- og L2-bølgerne
- f_{L1}, f_{L2} : Frekvenserne på henholdsvis L1 og L2

Dette lader sig gøre i kraft af, at ionosfærefejlen er omvendt proportional med frekvensen.

Ligeledes anvendes forskellen på signalernes frekvens i forbindelse med specielle teknikker kaldet wide lane og narrow lane. Eksempelvis kan der ved at trække fasemålingerne på de to signaler fra hinanden dannes et kombinations-signal med en længere bølgelængde. Denne teknik kaldes wide lane:

$$\begin{aligned}\varphi(t) &= f \cdot t = \frac{c \cdot t}{\lambda} \\ \varphi_{L1-L2}(t) &= \varphi_{L1}(t) - \varphi_{L2}(t) \Leftrightarrow \\ f_{L1} \cdot t - f_{L2} \cdot t &= f_{L1-L2} \cdot t \Leftrightarrow \\ \frac{c \cdot t}{\lambda_{L1-L2}} &= \frac{c \cdot t}{\lambda_{L1}} - \frac{c \cdot t}{\lambda_{L2}} \Rightarrow \\ \frac{1}{\lambda_{L1-L2}} &= \frac{1}{\lambda_{L1}} - \frac{1}{\lambda_{L2}} \Rightarrow \\ \lambda_{L1-L2} &= \left(\frac{1}{0,1905m} - \frac{1}{0,2445m} \right)^{-1} \Rightarrow \\ \lambda_{L1-L2} &= 0,8625m\end{aligned}$$

hvor:

- $\varphi(t)$: Fasemålingen til tiden t. Den sænkede tekst angiver om der er tale om L1- eller L2-bærebølgen
- f : Bølgens frekvens
- c : Lysets hastighed i vakuum
- λ : Bølgens bølgelængde
- t : tiden i sekunder

Som det fremgår af ovenstående ligninger, er dette konstruerede signals bølgelængde cirka fire gange længere end GPS-signalernes bølgelængde. Dette faktum udnyttes blandt andet i forbindelse med bestemmelse af periodekonstanterne, hvor den længere bølgelængde letter beregningerne i form af færre heltalskombinationer og mere signifikante udjævningsresultater. Initialiseringstiden kan som følge heraf nedsættes væsentligt.

På tilsvarende vis kan der ved at lægge målingerne sammen dannes en kombination, der kal-

des narrow lane og har en kortere bølgelængde end de oprindelige signaler.

[Hofmann, 2001, s. 104-106 og 216-217],
[Dueholm, 2002, s. 41-42 og 73-75]

Differentiel GPS-måling

Det differentielle princip indebærer, at minimum to kode- eller fasemodtagere er i forbindelse med hinanden under målingen. Forbindelsen kan eventuelt opretholdes ved hjælp af et radiolink. Den ene modtager, referencestationen, er som oftest placeret i et kendt punkt, mens den anden modtager, roveren, bevæges frit omkring. Under målingen sammenholdes de fejlbehæftede observationer, som foretages i referencestationen, løbende med den kendte position, hvorved der kan beregnes korrektioner. Det er disse korrektioner, der sendes til roveren, hvorfor roveren øjeblikkeligt kan beregne en position, der er mere nøjagtig, end hvis der udelukkende blev anvendt en enkelt modtager. Korrektionerne kan overføres ved brug af forskellige formater. Roveren sørger for at benytte sig af de korrektioner, der knytter sig til de satellitter, som roveren modtager signaler fra.

Relativ GPS-måling

Det relative princip indebærer, som det også er tilfældet med det differentielle, at der indenfor samme tidsrum er foretaget målinger til de samme satellitter fra minimum to modtagere. Der er i modsætning til det differentielle princip intet krav om, at modtagerne skal være i forbindelse med hinanden. Som følge af de samtidige målinger er det muligt at kombinere datasættene og danne forskellige differenser mellem målingerne. Alt afhængig af hvilken slags differens, der dannes, kan mange af de fejl, observationerne er behæftet med, minimeres eller elimineres.

Enkeltdifferens

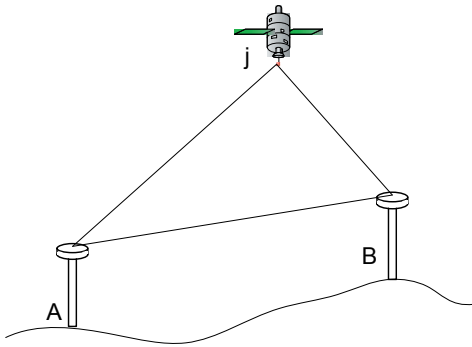
En enkeltdifferens fremkommer ved at sammenholde samtidige observationer til samme satellit fra to modtagere, jf. figur A.6 og følgende formel:

$$\begin{aligned} \phi_{AB}^j(t) &= \phi_B^j(t) - \phi_A^j(t) \Rightarrow \\ \phi_{AB}^j(t) &= \rho_B^j(t) - \rho_A^j(t) - \lambda \cdot (N_B^j(t_0) - N_A^j(t_0)) \\ &\quad - c \cdot (dT_B - dT_A) \end{aligned}$$

hvor:

- $\phi_{AB}^j(t)$: Enkeltdifferensen mellem fase-målingen fra modtager A og B til satellitten j til tiden t
- $\phi_A^j(t)$: Den samlede længde af faseforskellene mellem satellit j og modtager A til tiden t
- $\rho_A^j(t)$: Den geometriske afstand mellem satellitten j og modtager A til tiden t
- λ : Bærebølgens bølgelængde
- $N_A^j(t_0)$: Antallet af hele bølgelængder fra satellit j til modtager A til tiden t_0
- c : Lysets hastighed i vakuum
- dT_A : Modtager A's urfejl

Som det ses af ovenstående ligning elimineres på denne måde den fejl, som skyldes satellittens ur. Forudsat ensartede atmosfæriske forhold for de to målinger reduceres ionosfære- og tropo-



Figur A.6: Princippet ved dannelse af enkeltdifferens. [Dueholm, 2002, s. 67]

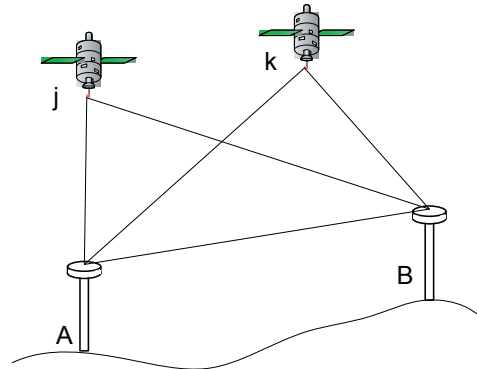
sfærefejlen ligeledes væsentligt. Der kan også dannes enkeltdifferenser ved at sammenholde observationer til to satellitter fra en enkelt modtager, men der er i det tilfælde ikke tale om en relativ GPS-måling.

Dobbeltdifferens

En dobbeltdifferens defineres som differencen mellem to enkeltdifferenser, jf. figur A.7 og følgende formel:

$$\begin{aligned} \phi_{AB}^{jk}(t) &= \phi_{AB}^k(t) - \phi_{AB}^j(t) \Rightarrow \\ \phi_{AB}^{jk}(t) &= \rho_B^k(t) - \rho_A^k(t) - \rho_B^j(t) + \rho_A^j(t) \\ &\quad - \lambda \cdot (N_B^k(t_0) - N_A^k(t_0) - N_B^j(t_0) + N_A^j(t_0)) \\ &\quad - c \cdot (dT_B - dT_A - dT_B + dT_A) \end{aligned}$$

Som det ses af formlen elimineres på denne måde urfejlen i begge modtagere.



Figur A.7: Princippet ved dannelse af dobbeltdifferens. [Dueholm, 2002, s. 68]

Tripeldifferens

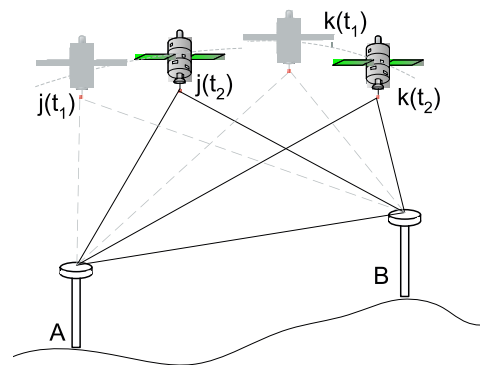
En tripeldifferens involverer to epoker og defineres som differensen mellem to dobbeltdifferenser, jf. figur A.8 og følgende formel:

$$\begin{aligned} \phi_{AB}^{jk}(t_1, t_2) &= \phi_{AB}^{jk}(t_2) - \phi_{AB}^{jk}(t_1) \Rightarrow \\ \phi_{AB}^{jk}(t_1, t_2) &= \rho_{AB}^{jk}(t_2) - \rho_{AB}^{jk}(t_1) \\ &\quad - \lambda \cdot (N_{AB}^{jk}(t_0) - N_{AB}^{jk}(t_0)) \end{aligned}$$

Som det ses af formlen elimineres periodekonstanterne, der jo er konstante over tiden.

Tripeldifferensen kan anvendes til at detektere og i nogle tilfælde reparere periodetab.

[Hofmann, s. 190-192], [Dueholm, s. 66-69]



Figur A.8: Princippet ved dannelse af tripeldifferens. [Dueholm, 2002, s. 69]

A.2 RTK-metoden

RTK står for Real-Time Kinematic. Som navnet antyder, er det ved denne form for GPS-måling muligt at bestemme en position i sand tid under bevægelse.

Der eksisterer i dag tre forskellige former for RTK-måling. Det drejer sig om traditionel RTK, enkeltstations-RTK samt netværks-RTK. For en generel forklaring af metoderne henvises til forklaringerne i 3.2 RTK-målemetoder.

I det følgende uddybes først tre emner, der knytter sig til RTK-måling. Dernæst beskrives som et supplement til forklaringen af netværks-RTK i 3.2.4 Netværks-RTK to kommercielle netværks-RTK systemer.

A.2.1 RTK generelt

Et efterhånden varieret udbud af RTK-metoder betyder, at metoden ikke længere er let at beskrive generelt. Enkelte emner går dog igen med hensyn til samtlige metoder. Disse emner er det datalink, der skal sørge for kontakten til

roveren, RTCM-formatet, der er en standard i forbindelse med overførslen af data, og RTK-initialisering, der skiller sig lidt ud fra den gængse GPS-initialisering.

Datalink

RTK indebærer, at der løbende under målingen ved hjælp af et datalink er forbindelse mellem modtagerne. Forbindelsen sørger for, at det er muligt at initialisere. RTK kræver afhængig af opdateringsfrekvensen, at data minimum kan overføres med 2.400 bps. Er opdateringsfrekvensen høj kræves en overførselshastighed på helt op til 19.200 bps.

Forbindelsen mellem modtagerne kan etableres ved hjælp af enten et radio- eller et mobilnet. Med hensyn til et radiolink, skal der minimum være tale om en UHF-forbindelse, idet denne opfylder de krav, som RTK-systemerne stiller til dataoverførselshastighed og støj på forbindelsen. Generelt betyder de tildelte frekvenser og tilladte sendeeffekter dog, at rækkevidden ofte eventuelt som følge af obstruktioner begrænses sig til 5-15 km. Et bud på den maksimale rækkevidde d er givet ved:

$$d = 3,57 \cdot \sqrt{k} \cdot (\sqrt{h_a} + \sqrt{h_m})$$

hvor:

- k : Faktor, der afhænger af refraction. Varierer fra omkring 1,2-1,6
- h_a : Radioantennens højde i meter over gennemsnitsterræn
- h_m : Radiomodtagerens højde i meter over gennemsnitsterræn

Obstruktioner og lokale forhold kan dog betyde, at den faktiske rækkevidde afviger fra ovenstående bud. Datamobilforbindelser er i den forbindelse et mere stabilt og længerevarende alternativ.

[Hofmann, 2001, s. 138-139], [Dueholm, 2002, s. 87-88]

RTCM-formatet

Selve dataoverførslen kan foregå på flere måder. En af de mest udbredte er, at data overføres ved hjælp af RTCM-formatet. RTCM-formatet er et uafhængigt standardformat til overførsel af blandt andet GPS-data. Formatet er defineret af The Radio Technical Commission for Maritime Services, Special Committee 104, og bestod i version 2.2 i 1998 af 64 forskellige beskedtyper. Figur A.9 er en oversigt over nogle af de mest almindelige beskedtyper. Beskedtypen er afgørende for, hvilken slags data, der overføres.

Type	Indhold
1	Differentielle GPS-kodekorrektioner
3	Referencestationsparametre
18	Rå faseobservationer
19	Rå kodeobservationer
20	Fasekorrektioner
21	Kodekorrektioner

Figur A.9: Nogle af beskedtyperne i RTCM-formatet. [Hofmann, 2001, s. 140]

De væsentligste beskedtyper i forbindelse med RTK er typerne 18-21. Beskedtype 18 og 19 indeholder henholdsvis rå fase- og kodeobservationer og benyttes til relativ GPS-måling. Beskedtype 20 og 21 indeholder henholdsvis fase- og kodekorrektioner, hvorfor de benyttes til differential GPS-måling.

The Radio Technical Commission for Maritime Services lancerede i april 2004 RTCM version 3.0. Denne version skulle udover at være i stand til det samme som de forrige versioner, være et mere effektivt og sikkert format. Desuden skulle det være nemmere at arbejde med og implementere. Når det nye format anvendes i forbindelse med RTK er datamængden reduceret med over halvdelen i forhold til det gamle format. Desuden er der kommet en række nye

beskedtyper til, som der blandt andet kan drages nytte af i forbindelse med netværks-RTK.

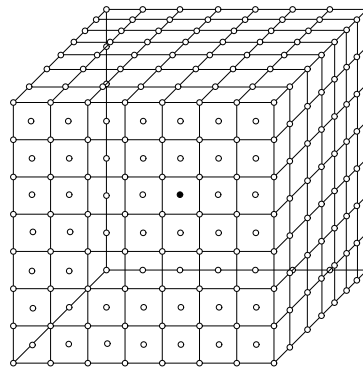
Udover RTCM-formatet findes også en række formater tilvejebragt af diverse GPS-producenter.

[Hofmann, 2001, s. 138-141], [www.rtc.org]

RTK-initialisering

Med hensyn til RTK-metoden anvendes der i forbindelse med initialiseringen en række specielle teknikker, idet roveren som regel er i bevægelse under initialiseringen. Samlet kaldes disse teknikker og denne form for initialisering ofte for OTF, der står for On-The-Fly.

Generelt for teknikkerne gælder det, at roverens position i første omgang estimeres ved hjælp af kodemåling, ligesom spredningen på positionen benyttes til at definere, i hvor stort et område det forsøges at opnå en bestemmelse af periodekonstanterne, jf. figur A.10. Nøjagtigheden af den estimerede position er afgørende for antallet af mulige løsninger, hvorfor en høj nøjagtighed nedsætter beregningstiden. Derudover benytter teknikkerne sig almindeligvis af den tidligere omtalte wide-lane-teknik til at reducere antallet af mulige løsninger. I det føl-



Figur A.10: Med udgangspunkt i positionen og nøjagtigheden defineres et søgefelt. [Hofmann, 2001, s. 231]

gende gennemgås principperne bag et udpluk af On-The-Fly-teknikkerne.

[Hofmann, 2001, s. 226-229]

Periodekonstantfunktionsmetoden

Periodekonstantfunktionsmetoden tager udgangspunkt i en funktion, hvis værdi skal holdes op imod en teoretisk maksimumværdi. Fysisk kan metoden forklares ved, at der med udgangspunkt i en estimeret position og kvaliteten af den dannes et tredimensionalt net i form af en kube, jf. figur A.10. Herefter undersøges netpunkterne hver især ved hjælp af funktionen. Det punkt, som kommer tættest på det teoretiske maksimum, vælges som løsning, hvorefter det er muligt at bestemme periodekonstanterne. Løsningen kan eventuelt efterfølgende verificeres ved hjælp af en udjævning. [Hofmann, 2001, s. 229-232]

Mindste kvadraters periodekonstantmetode

Med udgangspunkt i alle positioner inden for $3 \cdot \sigma$ af en estimeret position og fire satellitter, der giver en god PDOP, bestemmes ved denne metode først et sæt mulige løsninger. Dernæst benyttes de resterende satellitter og mindste kvadraters udjævning til at sortere og vurdere de mulige løsninger i forkerte, mindre gode og gode løsninger. I den ideelle situation vil én løsning skille sig ud fra mængden. Er dette ikke tilfældet benyttes spredningen på vægtenheden til at vurdere løsningerne og holde dem op imod hinanden. [Hofmann, 2001, s. 232]

Hurtig periodekonstant-bestemmelse

Denne metode er karakteriseret ved en statistisk tilgang til bestemmelsen af periodekonstanterne. Med udgangspunkt i reelle periodekonstantværdier bestemt ved udjævning og statistik findes en række mulige løsninger. Herefter foretages en mindste kvadraters udjævning af hver af de mulige løsninger. Løsningen

med den mindste a posteriori varians holdes efterfølgende op imod de reelle periodekonstantværdier og testes statistisk.

Ovenstående er blot et udpluk af mange mere eller mindre komplicerede metoder, men giver et billede af opfindsomheden og alsidigheden i forbindelse med bestemmelsen af periodekonstanterne.

[Hofmann, 2001, s. 233-235]

A.2.2 Netværks-RTK

Traditionelt anvendes der i forbindelse med RTK-metoden kun en enkelt referencestation. Hvis i stedet et net af referencestationer anvendes, er det muligt at drage nytte af de fordele, der er ved at have observationer til de samme satellitter fra flere referencestationer på samme tid. Det er herved muligt på bedre vis at tage højde for de tidligere omtalte fejlbidrag, der opstår som følge af den atmosfæriske påvirkning af signaler samt unøjagtigheden i efemeriderne.

Netværks-RTK er tidligere beskrevet i 3.2.4 *Netværks-RTK*. Som et supplement til beskrivelsen tages der i det følgende udgangspunkt i to kommercielle systemer, RTKnet fra Trimble og GNSMART fra Geo++. Det danske GPSnet.dk er i øvrigt bygget op omkring Trimble's RTKnet og GPS-Referencen overvejer efter en testperiode i foråret 2004 at implementere GNSMART. Beskrivelserne af de to systemer er baseret på to artikler, der er skrevet af mændene bag systemerne. Artiklerne er vedlagt på den medfølgende CD-ROM, jf. bilag 10 : \Artikler_netværksRTK.

RTKnet fra Trimble

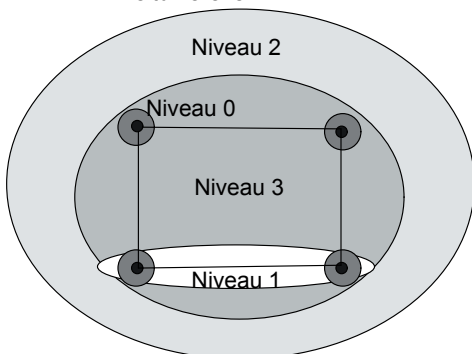
RTKnet bygger på data fra et netværk af referencestationer. Disse stationer sender løbende kode- samt faseobservationer til en

central beregningsenhed. Udfra den store mængde data er beregningsenheden i stand til at generere data, som det ville tage sig ud, hvis det kom fra en referencestation et hvilket som helst sted i netværket. Ideen eller konceptet kaldes for Virtual Reference Station og forkortes VRS.

Grundlaget for generering af virtuel referencestationensdata er etableringen og driften af et netværk af referencestationer. Undersøgelser har vist, at afstandene mellem referencestationerne, alt afhængig af den ønskede nøjagtighed for RTK-måling i netværket, kan være helt op til 100 km. Når først referencestationerne er etableret har Trimble inddelt driften af netværket i fire niveauer, jf. figur A.11.

- Niveau 0: Station Data Integrity
- Niveau 1: Differential Integrity
- Niveau 2: Modeling the Errors
- Niveau 3: Virtual Reference Stations

- Referencestation
- Niveau 0
- Niveau 1
- Niveau 2
- Niveau 3
- Enkeltdifferens



Figur A.11: Niveauer i driften af Trimbles netværk. [Vollath, 2000, s. 2]

Niveau 0

Dette niveau kaldes for *Station Data Integrity*. På dette niveau analyseres kode- såvel som fastedata fra hver enkelt referencestation isoleret

for at detektere målinger af ringe kvalitet eller eventuelle fejl. Data analyseres blandt andet ved hjælp af Kalman Filtre, der skal afsløre uregelmæssigheder i målingerne. Fejlene kan blandt andet skyldes periodetab, som efterfølgende repareres.

Niveau 1

På *Differential Integrity*-niveauet dannes der parvist enkeltdifferenser mellem referencestationerne, hvorved store dele af fejlbidragene fjernes. Herefter kontrolleres data igen for eventuelle uregelmæssigheder eller fejl. Derudover kontrolleres målingerne endnu engang for periodetab ved hjælp af tripeldifferencer.

Niveau 2

På dette niveau, som kaldes *Modeling the Errors*, modelleres den del af de enkelte fejlbidrag, som ikke ændrer sig væsentligt over tid og ikke er af lokal karakter. Det drejer sig blandt andet om dele af det atmosfæriske fejlbidrag og efermeridefejl. Eventuelle multipathfejl ved den enkelte referencestation reduceres forinden ud fra kortlægninger af multipathfejlen for den enkelte referencestation. Korrektionsmodellerne benyttes blandt andet til beregning af korrektioner til brugere, hvor nøjagtighedskravet er på meter- eller decimeterniveau. Ligeledes betyder modelleringen på niveau 2, at målingerne bliver lettere at håndtere på niveau 3.

Niveau 3

Det tredje og sidste niveau kaldes for *Virtual Reference Stations*. På dette niveau genereres de virtuelle referencedata, som bruges til RTK og nøjagtigheder på centimeterniveau. Processen, der ligger til grund for genereringen er som følger:

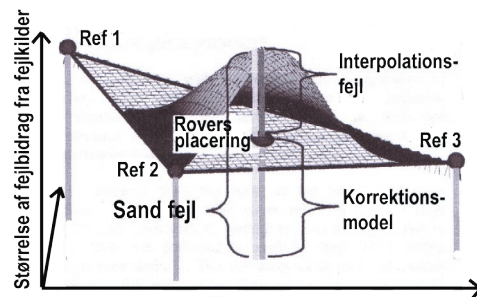
- Bestemmelse af periodekonstanter
- Flytning af referencedata
- Interpolation af fejlbidrag

Trin 1: Første opgave er at bestemme periodekonstanterne til alle de referencestationer, der figurerer i netværket. Dette gøres ud fra dobbeltdifferenser og den viden om fejlbidragenes indflydelse på konstanterne, som der er fundet frem til på niveau 2. Når først periodekonstanterne er bestemt er det muligt også at kortlægge de dele af fejlbidragene, der er af mere kortvarig og lokal karakter end det var tilfældet på niveau 2. Herved kan fejlbidragenes indflydelse på målingerne forskellige steder i netværket fastlægges med centimeters nøjagtighed.

Trin 2: Anden opgave er at få målingerne fra en af de virkelige referencestationer i netværket til at tage sig ud, som om de kom fra det sted, hvor den virtuelle referencestation skal oprettes. Målingerne, der som regel hentes fra den nærmeste referencestation, skal med andre ord flyttes geometrisk. Dette gøres ved at ændre den del af observationsligningen, som har med den geometriske afstand at gøre, så den i stedet udtrykker afstanden mellem den virtuelle referencestation og satellitten. På baggrund af dette er det muligt at flytte observationerne, så de tager sig ud, som om de kom fra den virtuelle referencestation.

Trin 3: Tredie og sidste opgave er at interpolere de fejlbidrag, som blev fastlagt i trin 1, så de stemmer overens med den virtuelle referencestations placering. Ved interpolationen tog RTKnet i nogle af de første versioner udgangspunkt i fejlbidragene ved de tre nærmeste referencestationer, men interpolationsområdet er nu udvidet til at omfatte de seks nærmeste. I øvrigt er det udover at interpolere ved hjælp af den samme teknik også muligt at ekstrapolere inden for en vis afstand af netværkets dækningsområde uden, at det af den grund går ud over den nøjagtighed, som der kan opmåles med. Som følge af interpolationen opstår der en mindre fejl af betydning for nøjagtigheden. Figur A.12

viser, hvordan denne interpolationsfejl vokser som funktion af afstanden til den nærmeste referencestation. Konceptet bag den virtuelle referencestation bygger dog på, at denne fejl er langt mindre end den afstandsafhængige fejl ved traditionel RTK.

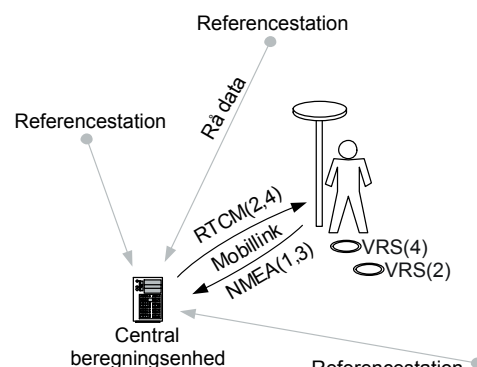


Figur A.12: Illustration af interpolation og interpolationsfejl. [Vollath, 2000, s. 7]

Opstartprocedure

Opstartproceduren for en RTK-måling, der foretages ved hjælp af RTKnet, kan inddeles i fire trin. De enkelte trin fremgår af figur A.13.

Trin 1: Brugeren opretter ved hjælp af et mobilink forbindelse til den centrale beregningsenhed, hvorefter roveren ved hjælp af en NMEA-streng sender sin position til beregningsenheden.



Figur A.13: Opstartsprocedure for RTKnet. Tallet i parentes angiver, hvilket trin i opstartsproceduren, der er tale om.

Trin 2: På baggrund af positionen, der er bestemt ved absolut måling med en nøjagtighed på meterniveau, oprettes en midlertidig virtuel referencestation. Beregningsenheden genererer herefter korrektionsdata, som den sender til roveren ved hjælp af RTCM-formatet.

Trin 3: På baggrund af korrektionsdata beregnes en mere nøjagtig DGPS-position i roveren, som efterfølgende sendes til beregningsenheden, hvorved den virtuelle referencestations position opdateres.

Trin 4: Beregningsenheden beregner herefter, blandt andet på baggrund af den førnævnte dynamiske database, referencedata for den virtuelle referencestation. Disse data sendes til roveren ved hjælp af RTCM-formatet.

I tilfælde af at udbyderen eller brugeren ikke ønsker at benytte sig af mobillink kan det lade sig gøre at sende data via radiolink. Data vil i disse tilfælde omfatte referencedata fra nogle af referencestationerne og korrektionsparametre. På baggrund af data og specialudviklet software vil roveren i givet fald selv være i stand til at beregne virtuel referencedata.

[Vollath, 2000, s. 1-8]

GNSMART fra Geo++

Som det var tilfældet med RTKnet bygger GNSMART også på data fra et netværk af referencestationer. Tilsvarende sendes kode- og faseobservationer fra disse stationer til en central beregningsenhed, der på baggrund af data bestemmer fejlbidragene fra nogle af de fejlkilder, som påvirker GPS-målingerne. Geo++'s tilgang til problemet omkring fejlbidragene og minimeringen af dem adskiller sig dog en smule fra Trimble's.

Frem for at danne diverse differenser mellem

observationer fra flere stationer for at estimere fejlbidragene og behandle dem samlet benytter Geo++ sig af rå observationer og estimerer fejlbidragene enkeltvist. Dette gøres ud fra den betragtning, at dannelse af differenser udover at skabe korrelation mellem ellers uafhængige observationer også betyder, at værdifuld information om de enkelte fejlbidrag går tabt. Disse oplysninger er eksempelvis nødvendige, hvis brugeren udelukkende er i stand til at måle på koden eller ønsker at bestemme sin position uden selv at skulle danne differenser.

Tilstandsprincippet

Geo++ arbejder ud fra et tilstandsprincip, hvor alle dele eller tilstande, der er af betydning for en GPS-måling, behandles på individuel basis. Fordelen ved at dele GPS-systemet op i sådanne dele eller tilstande er i følge Geo++, at detaljeringsgraden i beregningerne af det samlede fejlbidrag kan forøges, hvilket vil føre til et bedre resultat. Eksempelvis kan der i teorien inddrages oplysninger om den enkelte antennes fasecenterforskydning. Ligeledes kan der med hensyn til fastlæggelsen af troposfærefejlen inddrages eksterne oplysninger om de meteorologiske forhold. I den videre beregning af troposfærefejlen udføres den geografiske interpolation ud fra lovmæssigheder, som udelukkende knytter sig til troposfæren, i stedet for en simpel lineær interpolation af alle fejlbidrag på en gang.

Mængden af data, som det er nødvendigt at transmittere, reduceres i forhold til traditionel RTK, idet det ikke længere er nødvendigt at overføre rå observationer. Oplysninger om de enkelte fejlkilders tilstande opdateres blot i det omfang, de ændrer sig.

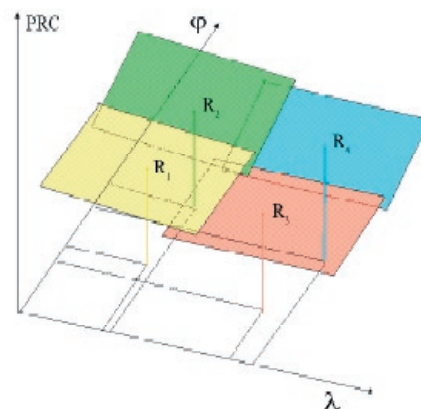
Ovenstående beskriver en ideel situation en gang i fremtiden. Blandt andet understøtter nutidige standardformater til overførsel af

data, som for eksempel RTCM version 3.0, langt fra alle de tilstande, der kan komme på tale. Ligeledes er mange GPS-modtagere ikke i stand til at behandle fejlbidragene separat som tilstande, men udelukkende samlet i form af korrigerede observationer. Dette betyder dog ikke, at GNSMART ikke kan benyttes, idet systemet og tilstandsprincippet også understøtter nutidigt software og udstyr. De forskellige tilstande omregnes alt afhængig af, hvilken form for korrektionsservice, der er tale om, blot til den slags data, som disse services benytter sig af. Systemet er på denne måde fleksibelt og omfattende i antallet af anvendelsesmuligheder.

FKP

Geo++ står selv bag den såkaldte FKP-service. FKP står på Flächen Korrektur Parameter, som betyder noget i retning af områdekorrektionsparametre. En af fordelene ved servicen i forhold til eksempelvis RTKnet er, at den baserer sig på envejskommunikation, hvilket eventuelt i kraft af kommunikation ved hjælp af et radiolink gør servicen enklere og billigere. På den anden side stiller envejskommunikationen og FKP større krav til roveren, hvad angår software og beregningskraft. FKP'erne er opbygget som polynomier, der beskriver de afstandafhængige fejl i et område omkring en referencestation, jf. figur A.14. Ud fra oplysninger om blandt andet roverens position er det ud fra FKP'erne muligt at beregne den afstandafhængige fejl netop der, hvor roveren befinder sig. Denne oplysning kombineres med målingerne fra referencestationen og roveren, hvorefter det er muligt at bestemme positionen med centimeters nøjagtighed.

FKP'erne kan i øvrigt, hvis det ønskes, uden problemer i roveren omregnes til en virtuel referencestation svarende til det koncept,



Figur A.14: FKP-fladekorrektioner for fire referencestationer. [Wübbena, 2001, s. 6]

som Trimble har bygget deres RTKnet op omkring.

[Wübbena, 2001, s. 1-9]

A.2.3 Afrunding

Der er ingen tvivl om, at netværks-RTK er kommet for at blive. De visioner, som specielt Geo++ lægger for dagen vidner om, at denne RTK-metode i fremtiden endda kan blive mere nøjagtig end den er i dag. Flyttes fokus for appendikset fra udelukkende at omhandle GPS, betyder inddragelsen af GLONASS- og på sigt GALILEO-data i RTK-netværkene og positionsbestemmelsen yderligere forbedringer. Den ihærdighed og opfindsomhed, der har været udvist siden specielt begyndelsen af 1970'erne i forhold til positionsbestemmelse ved hjælp af satellitsystemer, har blandt andet herigennem fået ny næring. Altimens sørger amerikanerne for at videreudvikle GPS-systemet, hvorfor der fremover også som følge heraf kan tænkes i nye og anderledes baner. Alt dette bevirker formodentlig, at endnu flere i fremtiden kan få glæde og drage nytte af teknologien.

Bilag 1

Interview ved Nellemann & Bjørnkjær

Interviewet fandt sted i Aalborg den 06.02.04 og blev blandt andet foretaget for at undersøge erfaringer i forbindelse med opmåling og afsætning med RTK og brug af RTK-tjenesten, GPSnet. Til stede under interviewet var udover projektgruppen, landinspektørerne Mads Hvolby og Bent Jepsen.

Til hvilke type opgaver anvender I RTK?

Opmålingsmæssigt anvendes det ofte i forbindelse med systemtilknytning og fladenivellement. Frem for at skulle lave lange polygontræk med totalstation er det en fordel i matrikulære og tekniske sager at kunne systemtilknytte målinger ved hjælp af RTK. Afsætningsmæssigt anvendes det specielt i forbindelse med afsætning af boreprøver, hvor nøjagtigheden ikke behøver at være bedre end 20-30 cm. Andre anvendelsesområder er afsætning af vandledninger eller veje, hvor nøjagtighedskravet er under 5 cm. En gang imellem benyttes udstyret også til egentlig fikspunktssøgning.

Hvilken nøjagtighed vurderer I, at GPSnet har?

I planen ligger nøjagtigheden på 2-3 cm alt afhængig af afstanden til den nærmeste referencestation. Højden er værre, hvorfor den i sjældnere grad benyttes. I forbindelse med fladenivellementer benyttes i nogle tilfælde i stedet egen referencestation. Afsætning af kote foretages stort set aldrig ved hjælp af RTK.

Har afstanden til den virtuelle referencestation indvirkning på nøjagtigheden?

Afstanden til den virtuelle referencestations indflydelse på nøjagtigheden er ikke blevet un-

dersøgt. Dog opmåles eller afsættes der sjældent længere væk end ca. 500 m fra den oprindelige initialisering.

Hvordan udføres opgaverne rent praktisk?

Opmålingsopgaver udføres oftest af en mand, der inden opmålingen sørger for at besøge en række kendte punkter for på den måde at kontrollere målingen. Efterfølgende skal der alligevel i nogle tilfælde transformeres over de kendte punkter. Afsætningsopgaver udføres som regel af to mand, hvor den ene koncentrerer sig om at sætte af, mens den anden sørger for at markere afsætningen. Kontrol af opmåling og afsætning kan enten gennemføres ved hjælp af ny initialisering, dobbeltmåling af punkter eller eventuelt ved brug af totalstation i tilfælde, hvor forsikringen kræver det. I forbindelse med ny initialisering og dobbeltmåling er det svært at anvende viden om korrelation mellem målinger i praksis, idet der ofte ikke er økonomi i at skulle vente en time mellem, at målingerne foretages.

Hvordan udnytter I de ekstrafunktioner, som GPS-udstyret indeholder?

Ekstrafunktionerne benyttes som oftest i forbindelse med afsætning. Den almindelige punktafsætningsfunktion er uundværlig, og i nogle tilfælde anvendes også funktionen, der gør det muligt at sætte af i forhold til en linie. Helt konkret blev funktionen blandt andet benyttet i forbindelse med et fladenivellement på en strand, idet nivellementet skulle kobles sammen med nogle søopmålingslinier.

Bilag 2

Interview ved Landinspektørgruppen

Interviewet fandt sted i Hillerød den 16.02.04 og blev blandt andet foretaget for at undersøge erfaringer i forbindelse med opmåling og afsætning med RTK og brug af RTK-tjenesten, GPS-Referencen. Til stede under interviewet var udover projektgruppen, landinspektør Mads Møller Madsen.

Hvad ved I som andelshavere om ændringen af GPS-Referencen?

Leica oplyste på et kursus i 2001, at de ikke ønskede at anvende netværks-RTK, men formodentlig har et kundepres betydet, at de ifølge et nyhedsbrev indleder en testfase med netværks-RTK på Sjælland i marts 2004. Kundepresset skyldes, at der, når afstanden til basen er for stor, er problemer med nøjagtigheden. Landinspektørgruppen har som følge heraf indkøbt en ekstra GPS, der kan bruges som master i forbindelse med opgaver, hvor afstanden til referencestationen er for stor.

Til hvilke typer opgaver anvender I RTK?

Opmålingsmæssigt benyttes RTK ofte i forbindelse med udarbejdelsen af situationsplaner og til systemtilknytning i forbindelse med matrikulære sager. Derudover benyttes det i forbindelse med fladenivellementer. Afsætningsmæssigt benyttes RTK meget til byggemodning, eksempelvis til veje og kloakker i planen, så længe afstanden til basen ikke er for stor. Boreprøver er et andet eksempel på en afsætningsopgave, der kan udføres ved hjælp af RTK. Kotemæssigt afsættes der kun med RTK i forbindelse med opgaver, hvor nøjagtighedskravet er meget groft, hvilket vil sige omkring 10 cm, og i de tilfælde kontrolleres nogle af punkterne for en sikkerheds skyld med nivellerinstrument.

Hvordan fordeler brugen af radiolink og mobilink sig i forbindelse med disse opgaver?

Tæt på basen anvendes oftest radiolink, da det er mest stabilt og i øvrigt også gratis. Bliver afstanden til basen større anvendes mobilink. Forbruget fordeler sig omtrent ligeligt mellem det ene og det andet.

Hvordan vurderer I nøjagtigheden af GPS-Referencen?

Hvis afstanden til basen er 20 km bør kun den plane koordinat anvendes. Indenfor 5-10 km er den rigtig god. Koden er i tilfældet med de 20 km uinteressant. Koden bruges, hvis firmaet er tæt på referencestationen. Eksempelvis lå nøjagtigheden på koden i forbindelse med en opgave på 1-2 cm indenfor en afstand af 2-3 km til basen.

Hvordan udføres opgaverne rent praktisk?

Afsætningsopgaverne udføres af to mand. Den ene sørger for at styre GPS-modtageren hen til det punkt, der skal afsættes, mens den anden sørger for at markere punktet. Skelafsætninger kontrolleres sjældent, men opmåles efterfølgende og transformeres over fikspunkter i nærheden. Afsætningerne, der ifølge forsikringsbestemmelserne skal kontrolmåles, måles ofte ind ved brug af totalstation.

Hvordan udnytter I de ekstrafunktioner, som GPS-udstyret indeholder?

Naturligvis udnyttes den normale punktafsætningsfunktion, men derudover anvendes også funktionen, der gør det muligt at sætte af parallelt med en anden linie. Eksempelvis til afsætning af skel parallelt med brugsgrænse eller til opbygning af systematisk kvadratnet i

forbindelse med et fladenivellement. Derudover udnyttes det en gang imellem, at GPS-udstyret er i stand til at transformere lokale koordinater over i et givent koordinatsystem.

Hvad synes I kunne være interessant at undersøge i forbindelse med afsætning med RTK?

Det kunne være interessant at holde den absolute nøjagtighed op imod den relative. I et forsøg med fire punkter afsat med GPS, der

efterfølgende blev målt op med totalstation, viste den relative nøjagtighed sig at være bedre en 1 cm. Derudover er det nødvendigt at kende lidt til gentagelsesnøjagtigheden, hvilket vil sige nøjagtigheden over tid. I det hele taget er det vigtigt at kunne gentage og dokumentere sine målinger. Der er behov for nogle sikre rutiner i forbindelse med GPS-afsætninger og efterfølgende kontrol.

Bilag 3

Interview ved Trimble Center Danmark

Interviewet fandt sted i Ballerup den 16.02.04 og blev blandt andet foretaget for at indhente oplysninger omkring brugen af RTK-tjenesten, GPSnet. Til stede under interviewet var udover projektgruppen, landinspektør Søren Ellegaard. Derudover deltog landinspektør Henrik Lenartz-Johansen i en del af interviewet.

Hvilken nøjagtighed vurderer TCD, at GPSnet har?
Nøjagtigheden i systemet er på en god dag på millimeterniveau. Generelt leverer GPSnet dog den nøjagtighed, der annonceres med, hvilket vil sige 1 cm i planen og 2 cm i højden. Værdien svarer til en gange spredningen, hvorfor ca. 68% af målingerne falder inden for denne værdi. Nøjagtigheden afhænger dog i høj grad af, hvilke forhold, der måles under. Blandt andet kan målinger under træer og i nærheden af bygninger vise sig ikke at overholde nøjagtigheden, idet forholdene for målingen i disse tilfælde ikke er optimale. Et dårligt resultat vil i øvrigt i marken fremgå af displayet i form af en høj RMS-værdi. RMS-værdien er et udtryk for den relative nøjagtighed af målingen. Er værdien over 70 er modtageren programmeret til ikke at kunne registrere målingen, og TCD rådgiver brugerne til, at de mindst bør stræbe efter en værdi under 30, hvis en god nøjagtighed ønskes. Beregningen af RMS-værdien er forklaret i manualen til GPS-udstyret.

Er afstanden til den nærmeste referencestation af betydning for nøjagtigheden?
TCD har selv gennemført en række undersøgelser af nøjagtigheden. Afstanden til den nærmeste referencestation spiller ingen rolle i resultaterne af disse undersøgelser. I øvrigt får brugeren beregningsdata fra de seks nærmeste

referencestationer. Undersøgelser af et lignende RTK-system i Sverige har ligeledes vist, at der ikke figurerer nogen afstandsafhængig fejl. Hvorfor det skulle være anderledes i Danmark, sådan som KMS er nået frem til i deres undersøgelse af RTK-tjenester, har TCD ikke noget bud på.

Er afstanden til den virtuelle referencestation af betydning for nøjagtigheden?
Afstanden til den virtuelle referencestation er i modsætning til afstanden til den nærmeste referencestation af betydning for nøjagtigheden. TCD har ikke kendskab til nogen undersøgelse af, hvad afstanden til VRS betyder for nøjagtigheden, men i Danmark initialiserer GPS-modtageren automatisk på ny, hvis afstanden til VRS bliver over 10 km. Denne afstand er fastlagt i samarbejde med Vejdirektoratet, idet Vejdirektoratet ofte benytter GPSnet til mobile opmålinger. Generelt vil brugere af GPSnet ikke bevæge sig over så store afstande, men hvis afstanden til VRS bliver stor bør brugerne ringe op igen og initialisere på ny. På denne måde opnås et bedre resultat. Afstanden til VRS registreres i øvrigt i datafilen.

Hvor stor en rolle spiller korrelationen mellem målingerne?
Der er ingen tvivl om, at korrelationen spiller en rolle. En løsning ville være at få lidt tidshorisont på sine målinger. TCD er blandt andet i besiddelse af en tysk rapport, der fastslår, at der er korrelation. TCD mener kun, at rapporten fastslår, at problemet kan løses ved at måle over en længere periode. Dog nævnes geninitialisering som en mulig løsning, men KMS' test viser jo, at GPS-modtageren på trods af en

geninitialisering, leverer en position, der ligger meget tæt på den forrige. Den vigtigste faktor for nøjagtigheden af en position er geometrien på den anvendte konstellation af satellitter. Antallet af satellitter har i sig selv ikke større betydning for nøjagtigheden af en position. I øvrigt er det en dårlig ide at geninitialisere ved at vippe antennen, idet antennen påbegynder målingen inden den igen er lodret. Initialiseringen bliver på den måde ikke er nær så god, som hvis brugeren blot trykker på den knap, der er designet til formålet. Under initialiseringen bør brugeren også så vidt muligt opholde sig et sted, hvor der er frit udsyn til himlen.

Har I haft nogen henvendelser omkring usikkerhed med hensyn til procedurer og kontrol i forbindelse med en afsætning med RTK?

Generelt oplever TCD ikke i dagligdagen, at brugerne henvender sig omkring procedurer og kontrol af afsætning. Der har i højere grad været tvivl om eksempelvis KMS' krav til indmåling af skel. TCD rådgiver dog førstegangsbrugere af udstyret i forbindelse med salg af udstyr. Før i tiden var der ofte tale om parkeringspladsdemonstrationer, men TCD ønsker i højere grad nu at følge brugerne i marken under målingen, hvorefter data bearbejdes hjemme på kontoret. Ofte forløb demonstrationerne på parkeringspladsen uden problemer, hvorefter brugerne stod tilbage med alle spørgsmålene, når de første gang selv skulle bruge udstyret i marken. Nogen decideret procedure i forbindelse med afsætning ligger TCD ikke inde med, men før i tiden rådede de brugerne til at gøre sig det til

en vane inden måling at afsætte et i forvejen kendt og afmærket punkt på det pågældende firmas parkeringsplads. På den måde kontrolleredes initialiseringen, samtidig med at brugeren sikrede sig, at alle nødvendige kabler, batterier og så videre kom med i marken. I tilfælde af problemer og tvivl kunne brugerne kontakte TCD. I dag er der ikke længere så mange ting at holde styr på og sjældent noget galt med initialiseringen. TCD's egen erfaring er, at geninitialisering er en god og hurtig kontrol af en hvilken som helst RTK-måling. I teorien bør der dog gå ca. 45 minutter mellem målingerne på grund af korrelationen.

I hvor høj grad er GPSnet udstyrsafhængig?

Grundlæggende er VRS-teknologien udviklet til at være udstyrsafhængig, idet referencestationerne blot fungerer som modtagere af rå GPS-signaler. I den forbindelse kan det nævnes, at udviklingen af VRS-teknologien blev gennemført med GPS-udstyr fra Ashtech. Endvidere etableres i øjeblikket et VRS-net i Finland. Til opbygningen af dette net anvendes i høj grad GPS-modtagere, som allerede er opstillet lokalt. Nettet kommer således til at indeholde flere forskellige typer af GPS-modtagere. På verdensplan er langt de fleste referencestationer i et VRS GPS-netværk dog Trimble GPS-modtagere.

Det skal dog nævnes, at der i praksis er fundet små forskelle i nøjagtigheden af GPSnet, når forskelligt GPS-udstyr anvendes i kombination med denne.

Bilag 4

Punktnummerstrategi

Test 1, 2 og 4:

Jobnavn: Nyt jobnavn ved hver runde, hvilket vil sige:
- R1fiks – R12fiks

Punktnumre:

10 km punkt	GPS-Referencen	GPSnet
39-02-00002	002001, 002003 og 002005	002002, 002004 og 002006
44-18-00811	811001, 811003 og 811005	811002, 811004 og 811006
K-38-00984	984001, 984003 og 984005	984002, 984004 og 984006
36-04-00809	809001, 809003 og 809005	809002, 809004 og 809006
38-11-00821	821001, 821003 og 821005	821002, 821004 og 821006

Test 3 og 4:

Jobnavn: Nyt jobnavn ved hver runde, hvilket vil sige:
- R1dim – R12dim

Punktnumre:

Ved 10 km punkt	Punktnummer	GPS-Referencen	GPSnet
39-02-00002	1	002101	002105
	2	002102	002106
	3	002103	002107
	4	002104	002108
44-18-00811	1	811101	811105
	2	811102	811106
	3	811103	811107
	4	811104	811108
K-38-00984	1	984101	984105
	2	984102	984106
	3	984103	984107
	4	984104	984108
36-04-00809	1	809101	809105
	2	809102	809106
	3	809103	809107
	4	809104	809108
38-11-00821	1	821101	821105
	2	821102	821106
	3	821103	821107
	4	821104	821108

Figur 4.1: Punktnummerstrategi for den regionale test.

Bilag 5

Observationsark

Punktnummer: 36-04-00809 Observationsrunde: 1 Tidspunkt: _____

Test 1, 2 og 4:

- **Centrer GPS over punkt**
- Opret forbindelse til GPS-Referencen
- Registrer tid for initialisering: _____ sekunder
- Registrer punkt 809001
- Afbryd forbindelse til GPS-Referencen

- Opret forbindelse til GPSnet
- Registrer tid for initialisering: _____ sekunder
- Registrer punkt 809002
- Afbryd forbindelse til GPSnet

- **Centrer GPS over punkt igen**
- Opret forbindelse til GPS-Referencen
- Registrer tid for initialisering: _____ sekunder
- Registrer punkt 809003
- Afbryd forbindelse til GPS-Referencen

- Opret forbindelse til GPSnet
- Registrer tid for initialisering: _____ sekunder
- Registrer punkt 809004
- Afbryd forbindelse til GPSnet

- **Centrer GPS over punkt igen**
- Opret forbindelse til GPS-Referencen
- Registrer tid for initialisering: _____ sekunder
- Registrer punkt 809005
- Afbryd forbindelse til GPS-Referencen

- Opret forbindelse til GPSnet
- Registrer tid for initialisering: _____ sekunder
- Registrer punkt 809006
- Afbryd forbindelse til GPSnet

Figur 5.1: Observationsark for punkt 809 til runde 1.

Bilag 6

Input- og outputfil til KmsTrans

Inputfil til KmsTrans

Input KmsTrans R1FIKS

#geoEuref89

002001	55 19 38.459115	09 58 26.614137	97.9753
002002	55 19 38.459571	09 58 26.615124	97.9278
002003	55 19 38.460414	09 58 26.615703	97.9513
002004	55 19 38.460075	09 58 26.615194	97.9258
002005	55 19 38.459427	09 58 26.614374	97.9880
002006	55 19 38.460737	09 58 26.615445	97.9255
809001	55 28 26.730766	10 19 52.516713	54.6553
809002	55 28 26.731285	10 19 52.517315	54.6408
809003	55 28 26.730357	10 19 52.516653	54.6280
809004	55 28 26.731189	10 19 52.517026	54.6220
809005	55 28 26.730671	10 19 52.516486	54.6426
809006	55 28 26.731350	10 19 52.517108	54.6517
811001	55 15 18.133751	10 13 57.847318	64.9056
811002	55 15 18.133864	10 13 57.848529	64.8742
811003	55 15 18.134006	10 13 57.848642	65.0107
811004	55 15 18.134262	10 13 57.848230	64.8790
811005	55 15 18.134764	10 13 57.848772	64.9338
811006	55 15 18.134216	10 13 57.848374	64.8395
821001	55 26 59.224301	10 11 11.766674	66.3135
821002	55 26 59.224792	10 11 11.767568	66.3016
821003	55 26 59.224443	10 11 11.767116	66.3185
821004	55 26 59.224314	10 11 11.767092	66.2820
821005	55 26 59.224301	10 11 11.767091	66.3309
821006	55 26 59.224753	10 11 11.767345	66.2924
984001	55 23 26.597951	10 22 41.019316	49.6471
984002	55 23 26.597950	10 22 41.020308	49.6222
984003	55 23 26.597679	10 22 41.020108	49.6324
984004	55 23 26.597934	10 22 41.020477	49.6222
984005	55 23 26.597568	10 22 41.019312	49.6442
984006	55 23 26.598076	10 22 41.020202	49.6293

-1z

Outputfil fra KmsTrans

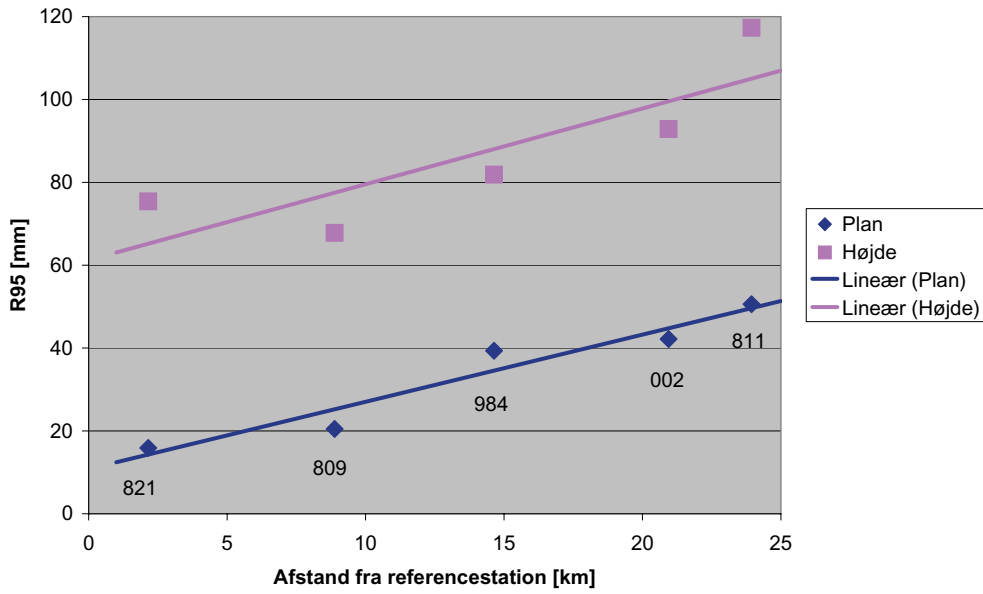
#utm32Euref89

002 001	6 131 651.604	561 799.795	97.975
002 002	6 131 651.618	561 799.813	97.928
002 003	6 131 651.645	561 799.822	97.951
002 004	6 131 651.634	561 799.814	97.926
002 005	6 131 651.614	561 799.799	97.988
002 006	6 131 651.654	561 799.818	97.926
809 001	6 148 355.421	584 148.661	54.655
809 002	6 148 355.437	584 148.672	54.641
809 003	6 148 355.408	584 148.661	54.628
809 004	6 148 355.434	584 148.667	54.622
809 005	6 148 355.418	584 148.658	54.643
809 006	6 148 355.439	584 148.668	54.652
811 001	6 123 864.948	578 353.186	64.906
811 002	6 123 864.952	578 353.208	64.874
811 003	6 123 864.956	578 353.210	65.011
811 004	6 123 864.964	578 353.202	64.879
811 005	6 123 864.979	578 353.211	64.934
811 006	6 123 864.962	578 353.205	64.840
821 001	6 145 484.986	575 051.800	66.314
821 002	6 145 485.002	575 051.815	66.302
821 003	6 145 484.991	575 051.807	66.319
821 004	6 145 484.987	575 051.807	66.282
821 005	6 145 484.987	575 051.807	66.331
821 006	6 145 485.001	575 051.811	66.292
984 001	6 139 135.996	587 290.861	49.647
984 002	6 139 135.996	587 290.878	49.622
984 003	6 139 135.988	587 290.875	49.632
984 004	6 139 135.996	587 290.881	49.622
984 005	6 139 135.984	587 290.861	49.644
984 006	6 139 136.000	587 290.876	49.629

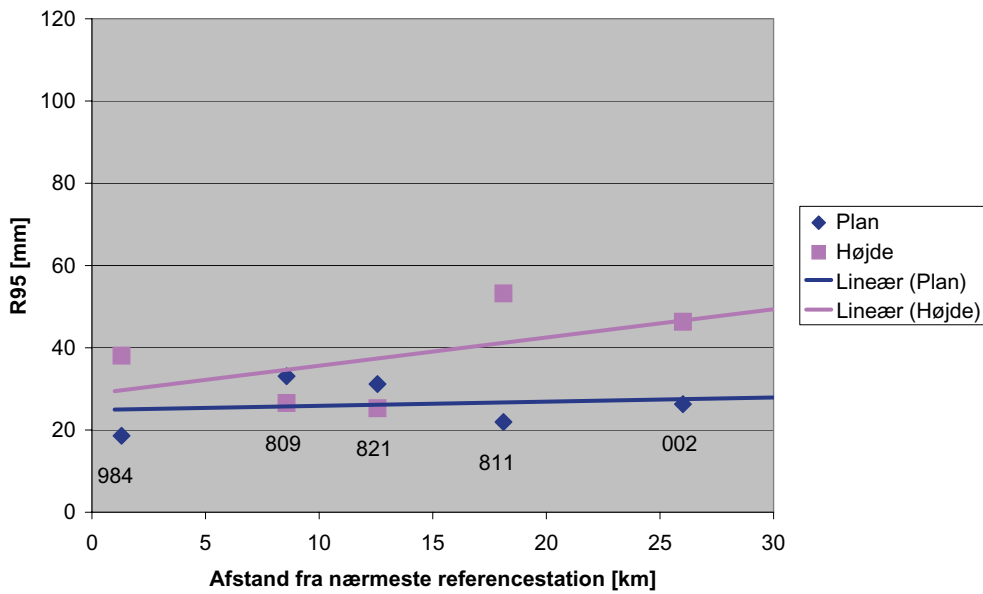
-1z

Bilag 7

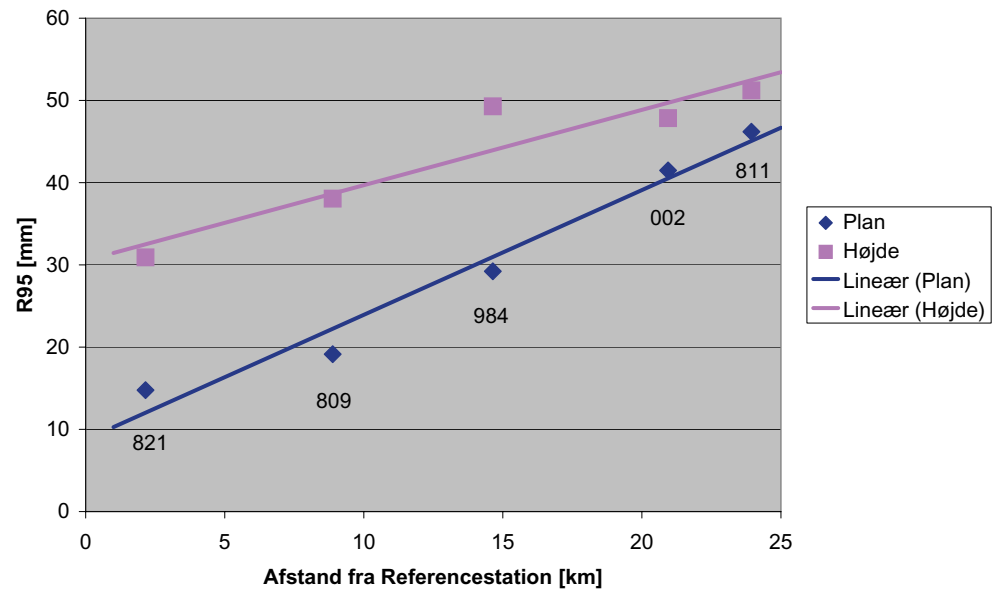
R95-værdier for nøjagtighed og præcision



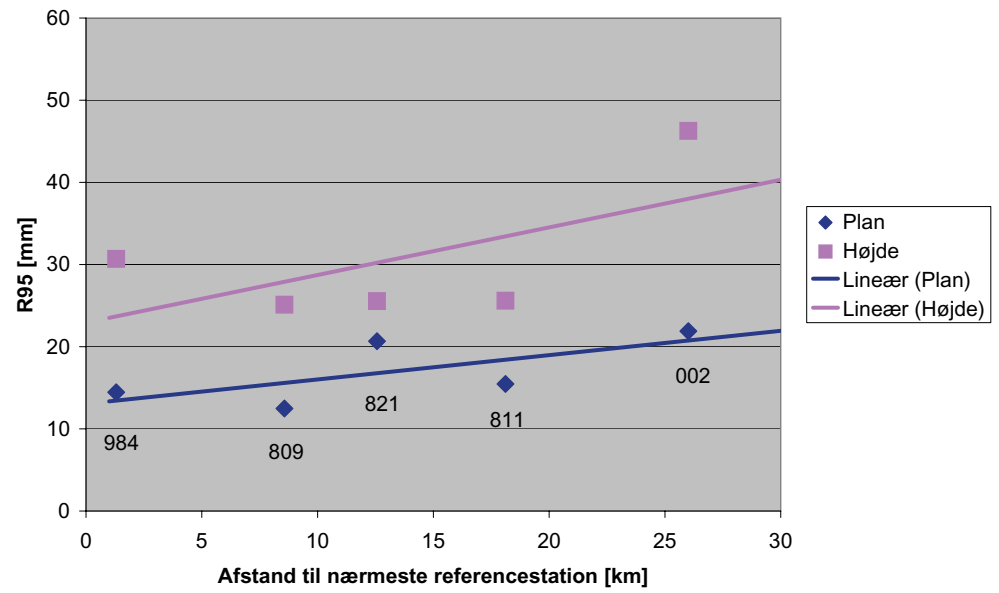
Figur 7.1: R95 plot for nøjagtigheden af GPS-Referencen.



Figur 7.2: R95 plot for nøjagtigheden af GPSnet.



Figur 7.3: R95 plot for præcisionen af GPS-Referencen.



Figur 7.4: R95 plot for præcisionen af GPSnet.

Bilag 8

Matlab-scripter

Dimensionsprogram.m:	s. 15
KMSvsLeica.m:	s. 24
Autokorr.m:	s. 27

Dimensionsprogram.m

```
function varargout = dimensionsprogram(varargin)
% DIMENSIONSPROGRAM M-file for dimensionsprogram.fig
%   DIMENSIONSPROGRAM, by itself, creates a new DIMENSIONSPROGRAM or raises the
%   existing singleton*.
%
%   H = DIMENSIONSPROGRAM returns the handle to a new DIMENSIONSPROGRAM or the
%   handle to the existing singleton*.
%
%   DIMENSIONSPROGRAM('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in DIMENSIONSPROGRAM.M with the given input arguments.
%
%   DIMENSIONSPROGRAM('Property','Value',...) creates a new DIMENSIONSPROGRAM or
%   raises the existing singleton*. Starting from the left, property value pairs
%   are applied to the GUI before dimensionsprogram_OpeningFunction gets called.
%   An unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to dimensionsprogram_OpeningFcn via varargin.
%
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help dimensionsprogram

% Last Modified by GUIDE v2.5 01-May-2004 22:35:47

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @dimensionsprogram_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @dimensionsprogram_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin & isstr(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before dimensionsprogram is made visible.
function dimensionsprogram_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to dimensionsprogram (see VARARGIN)
```

```

% Choose default command line output for dimensionsprogram
handles.output = hObject;
handles.Dimension_Ar=0;
handles.Dimension_Br=0;
handles.Dimension_Cr=0;
handles.Dimension_Dr=0;
handles.Dimension_Er=0;
handles.Dimension_Fr=0;
handles.Dimension_An=0;
handles.Dimension_Bn=0;
handles.Dimension_Cn=0;
handles.Dimension_Dn=0;
handles.Dimension_En=0;
handles.Dimension_Fn=0;
handles.Hojdeforskel_1_2r=0;
handles.Hojdeforskel_2_3r=0;
handles.Hojdeforskel_3_4r=0;
handles.Hojdeforskel_4_1r=0;
handles.Hojdeforskel_1_2n=0;
handles.Hojdeforskel_2_3n=0;
handles.Hojdeforskel_3_4n=0;
handles.Hojdeforskel_4_1n=0;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% This sets up the initial plot - only do when we are invisible
% so window can get raised using dimensionsprogram.
if strcmp(get(hObject,'Visible'),'off')
%set(gca,'Xlabel',text('String','E','FontSize',14));
%set(gca,'Ylabel',text('String','N','FontSize',14));
%set(gca,'XLim',[-1 10]);
%set(gca,'YLim',[-10 1]);
% plot(rand(5));
end

% UIWAIT makes dimensionsprogram wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = dimensionsprogram_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
axes(handles.axes1);
cla;

popup_sel_index = get(handles.popupmenu1, 'Value');
switch popup_sel_index
case 1
Dimensioneriplanen;
case 2
Hojdeforskelle;
end
end

```

```

% -----
function FileMenu_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to FileMenu (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% -----
function OpenMenuItem_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to OpenMenuItem (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
[filename, pathname] = uigetfile( ...
{'*.asc;*.txt','Tekstfiler (*.asc;*.txt)', 'Vælg koordinatfil'});
%if ~isequal(file, 0)
%    open(file);
%end
data=load([pathname '\ ' filename]);

X=data(:,1);
Y=data(:,2);
Z=data(:,3);

%Figurer renses
cla (handles.axes7)
cla (handles.axes8)

% Beregning af dimensioner målt vha. GPS-Referencen (Hofmann s. 282-284)

% Origo for det lokale koordinatsystem fastlægges vha. det første punkt
% indmålt med GPS-Referencen
[result] = kar2geo([6378137;6356752.31414],[X(1);Y(1);Z(1)]);

lat=result(1);
lon=result(2);
h=result(3);

% Akserne i det lokale system defineres i det globale system som værende:
ni=[(-sin (lat)*cos(lon));(-sin (lat)*sin(lon));cos(lat)];
ei=[(-sin(lon));(cos(lon));0];
ui=[(cos(lat)*cos(lon));(cos(lat)*sin(lon));(sin(lat))];

%for t = 1: 2: 8, ..., end
%De lokale koordinater bestemmes ved at projicere stedvektoren mellem et
%vilkaarligt punkt og origo ind på de lokale planer, der defineres af de lokale akser.
for t = 1: 4, ..., end
Xij=[(X(t)-X(1));(Y(t)-Y(1));(Z(t)-Z(1))];
t
%E(((t+1)/2),1)=transpose(ei)*Xij;
%N(((t+1)/2),1)=transpose(ni)*Xij;
%U(((t+1)/2),1)=transpose(ui)*Xij;
E(t,1)=transpose(ei)*Xij;
N(t,1)=transpose(ni)*Xij;
U(t,1)=transpose(ui)*Xij;
end

Dimension_Ar = sqrt((E(1)-E(2))^2+(N(1)-N(2))^2);
Dimension_Br = sqrt((E(1)-E(3))^2+(N(1)-N(3))^2);
Dimension_Cr = sqrt((E(2)-E(3))^2+(N(2)-N(3))^2);
Dimension_Dr = sqrt((E(2)-E(4))^2+(N(2)-N(4))^2);
Dimension_Er = sqrt((E(3)-E(4))^2+(N(3)-N(4))^2);

```

```

Dimension_Fr = sqrt((E(1)-E(4))^2+(N(1)-N(4))^2);

handles.Dimension_Ar=Dimension_Ar;
handles.Dimension_Br =Dimension_Br;
handles.Dimension_Cr = Dimension_Cr;
handles.Dimension_Dr = Dimension_Dr;
handles.Dimension_Er = Dimension_Er;
handles.Dimension_Fr = Dimension_Fr;

dimstrA = num2str(Dimension_Ar,4);
dimstrB = num2str(Dimension_Br,4);
dimstrC = num2str(Dimension_Cr,4);
dimstrD = num2str(Dimension_Dr,4);
dimstrE = num2str(Dimension_Er,4);
dimstrF = num2str(Dimension_Fr,4);

handles.Hojdeforskel_1_2r = U(1)-U(2);
handles.Hojdeforskel_2_3r = U(2)-U(3);
handles.Hojdeforskel_3_4r = U(3)-U(4);
handles.Hojdeforskel_4_1r = U(4)-U(1);
hojde1=num2str(handles.Hojdeforskel_1_2r,4);
hojde2=num2str(handles.Hojdeforskel_2_3r,4);
hojde3=num2str(handles.Hojdeforskel_3_4r,4);
hojde4=num2str(handles.Hojdeforskel_4_1r,4);

axes(handles.axes7);
plot(E,N,'g.','MarkerSize',10);
set(gca,'FontSize',12);
set(gca,'XLim',[-8 10]);
set(gca,'YLim',[-10 2]);
set(gca,'XTick',[-8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'YTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2]);
set(gca,'Xlabel',text('String','meter','FontSize',12));
set(gca,'Ylabel',text('String','meter','FontSize',12));

hold on
pause(0.2)
plot([E(1),E(2)], [N(1),N(2)], '--');
text(E(1)+Dimension_Ar/2,N(2)+0.3,dimstrA,'HorizontalAlignment','center')
pause(0.2)
plot([E(1),E(3)], [N(1),N(3)], '--');
text(E(1)+Dimension_Ar/2+0.6,N(1)-Dimension_Cr/2-0.4,dimstrB,'HorizontalAlignment',
'left')
pause(0.2)
plot([E(3),E(2)], [N(3),N(2)], '--');
text(E(2)+0.1,N(2)-Dimension_Cr/2,dimstrC,'HorizontalAlignment','left')
pause(0.2)
plot([E(4),E(2)], [N(4),N(2)], '--');
text(E(1)+Dimension_Ar/2-0.6,N(1)-Dimension_Cr/2-0.2,dimstrD,'HorizontalAlignment',
'right')
pause(0.2)
plot([E(3),E(4)], [N(3),N(4)], '--');
text(E(4)+Dimension_Er/2,N(4),dimstrE,'HorizontalAlignment','center','Vertical-
Alignment','Bottom')
pause(0.2)
plot([E(1),E(4)], [N(1),N(4)], '--');
text(E(1),N(1)-Dimension_Fr/2,dimstrF,'HorizontalAlignment','left')
pause(1)
text(0,-8,['dh 1-2 = ' hojde1 ' meter'])
text(0,-8.5,['dh 2-3 = ' hojde2 ' meter'])

```

```

text(0,-9,['dh 3-4 = ' hojde3 ' meter'])
text(0,-9.5,['dh 4-1 = ' hojde4 ' meter'])
hold on

% Beregning af dimensioner målt vha. GPSnet

%Origo for det lokale koordinatsystem fastlægges vha. det første GPSnet-punkt
[result] = kar2geo([6378137;6356752.31414],[X(5);Y(5);Z(5)]);

lat=result(1);
lon=result(2);
h=result(3);

ni=[(-sin(lat)*cos(lon));(-sin(lat)*sin(lon));cos(lat)];
ei=[(-sin(lon));(cos(lon));0];
ui=[(cos(lat)*cos(lon));(cos(lat)*sin(lon));(sin(lat))];

for t = 5: 8, ..., end
Xij=[(X(t)-X(5));(Y(t)-Y(5));(Z(t)-Z(5))];
E((t-4),1)=transpose(ei)*Xij;
N((t-4),1)=transpose(ni)*Xij;
U((t-4),1)=transpose(ui)*Xij;
end

Dimension_An = sqrt((E(1)-E(2))^2+(N(1)-N(2))^2);
Dimension_Bn = sqrt((E(1)-E(3))^2+(N(1)-N(3))^2);
Dimension_Cn = sqrt((E(2)-E(3))^2+(N(2)-N(3))^2);
Dimension_Dn = sqrt((E(2)-E(4))^2+(N(2)-N(4))^2);
Dimension_En = sqrt((E(3)-E(4))^2+(N(3)-N(4))^2);
Dimension_Fn = sqrt((E(1)-E(4))^2+(N(1)-N(4))^2);

handles.Dimension_An = Dimension_An;
handles.Dimension_Bn = Dimension_Bn;
handles.Dimension_Cn = Dimension_Cn;
handles.Dimension_Dn = Dimension_Dn;
handles.Dimension_En = Dimension_En;
handles.Dimension_Fn = Dimension_Fn;

dimstrA = num2str(Dimension_An,4);
dimstrB = num2str(Dimension_Bn,4);
dimstrC = num2str(Dimension_Cn,4);
dimstrD = num2str(Dimension_Dn,4);
dimstrE = num2str(Dimension_En,4);
dimstrF = num2str(Dimension_Fn,4);

handles.Hojdeforskel_1_2n = U(1)-U(2);
handles.Hojdeforskel_2_3n = U(2)-U(3);
handles.Hojdeforskel_3_4n = U(3)-U(4);
handles.Hojdeforskel_4_1n = U(4)-U(1);

guidata(hObject, handles);

axes(handles.axes8);
%f2 = figure;
plot(E,N,'g.','MarkerSize',10);
%plot3(E,N,U,'g.','MarkerSize',10);
%grid on

set(gca,'FontSize',12);
%title('Nabonøjagtighed GPSnet')

```

```

set(gca,'XLim',[-8 10]);
set(gca,'YLim',[-10 2]);
set(gca,'XTick',[-8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'YTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2]);
set(gca,'XLabel',text('String','meter','FontSize',12));
set(gca,'YLabel',text('String','meter','FontSize',12));

hold on
pause(0.2)
plot([E(1),E(2)], [N(1),N(2)], '--');
text(E(1)+Dimension_An/2,N(2)+0.3,dimstrA,'HorizontalAlignment','center')
pause(0.2)
plot([E(1),E(3)], [N(1),N(3)], '--');
text(E(1)+Dimension_An/2+0.6,N(1)-Dimension_Cn/2-0.4,dimstrB,'HorizontalAlignment',
'left')
pause(0.2)
plot([E(3),E(2)], [N(3),N(2)], '--');
text(E(2)+0.1,N(2)-Dimension_Cn/2,dimstrC,'HorizontalAlignment','left')
pause(0.2)
plot([E(4),E(2)], [N(4),N(2)], '--');
text(E(1)+Dimension_An/2-0.6,N(1)-Dimension_Cn/2-0.2,dimstrD,'HorizontalAlignment',
'right')
pause(0.2)
plot([E(3),E(4)], [N(3),N(4)], '--');
text(E(4)+Dimension_En/2,N(4),dimstrE,'HorizontalAlignment','center','Vertical-
Alignment','Bottom')
pause(0.2)
plot([E(1),E(4)], [N(1),N(4)], '--');
text(E(1),N(1)-Dimension_Fn/2,dimstrF,'HorizontalAlignment','left')
pause(0.2)
text(0,-8,['dh 1-2 = ' num2str(handles.Hojdeforskel_1_2n,4) ' meter'])
text(0,-8.5,['dh 2-3 = ' num2str(handles.Hojdeforskel_2_3n,4) ' meter'])
text(0,-9,['dh 3-4 = ' num2str(handles.Hojdeforskel_3_4n,4) ' meter'])
text(0,-9.5,['dh 4-1 = ' num2str(handles.Hojdeforskel_4_1n,4) ' meter'])

%!!!!OBS Automatisk dannelse af resultatfil!!!!
%!!!!Resultatfil

[pathstr,name,ext,versn] = fileparts([pathname '\' filename])

%res_fil=fopen([pathname '\' name 'ud.txt'],'w');

%!!!!Header:
fprintf(res_fil,'Dimensioner \n');
fprintf(res_fil,'\n');
%!!!!GPS-Referencen
fprintf(res_fil, 'Dimensioner målt vha GPS-Referencen:\n');

fprintf(res_fil,'\n');
fprintf(res_fil,'Dimension A:          %10.10f\n',handles.Dimension_Ar);
fprintf(res_fil,'Dimension B:          %10.10f\n',handles.Dimension_Br);
fprintf(res_fil,'Dimension C:          %10.10f\n',handles.Dimension_Cr);
fprintf(res_fil,'Dimension D:          %10.10f\n',handles.Dimension_Dr);
fprintf(res_fil,'Dimension E:          %10.10f\n',handles.Dimension_Er);
fprintf(res_fil,'Dimension F:          %10.10f\n',handles.Dimension_Fr);
fprintf(res_fil,'Højdeforskel 1 til 2: %10.10f\n',handles.Hojdeforskel_1_2r);
fprintf(res_fil,'Højdeforskel 2 til 3: %10.10f\n',handles.Hojdeforskel_2_3r);

```



```

fprintf(res_fil,'Højdeforskel 3 til 4: %10.10f\n',handles.Hojdeforskel_3_4r);
fprintf(res_fil,'Højdeforskel 4 til 1: %10.10f\n',handles.Hojdeforskel_4_1r);
fprintf(res_fil,'\n');
fprintf(res_fil,'\n');

% GPSnet
fprintf(res_fil, 'Dimensioner målt vha GPSnet:\n');

fprintf(res_fil,'\n');
fprintf(res_fil,'Dimension A: %10.10f\n',handles.Dimension_An);
fprintf(res_fil,'Dimension B: %10.10f\n',handles.Dimension_Bn);
fprintf(res_fil,'Dimension C: %10.10f\n',handles.Dimension_Cn);
fprintf(res_fil,'Dimension D: %10.10f\n',handles.Dimension_Dn);
fprintf(res_fil,'Dimension E: %10.10f\n',handles.Dimension_En);
fprintf(res_fil,'Dimension F: %10.10f\n',handles.Dimension_Fn);
fprintf(res_fil,'Højdeforskel 1 til 2: %10.10f\n',handles.Hojdeforskel_1_2n);
fprintf(res_fil,'Højdeforskel 2 til 3: %10.10f\n',handles.Hojdeforskel_2_3n);
fprintf(res_fil,'Højdeforskel 3 til 4: %10.10f\n',handles.Hojdeforskel_3_4n);
fprintf(res_fil,'Højdeforskel 4 til 1: %10.10f\n',handles.Hojdeforskel_4_1n);
fclose(res_fil);

% -----
function SaveMenuItem_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to SaveMenuItem (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
[filename, pathname, filterindex] = uiputfile( ...
{'*.txt', 'Tekstfil (*.txt)'}, ...
'Gem som');

% Resultatfil
res_fil=fopen([pathname '\' filename '.txt'],'w');

% Header:
fprintf(res_fil,'Dimensioner \n');
fprintf(res_fil,'\n');
% GPS-Referencen
fprintf(res_fil, 'Dimensioner målt vha GPS-Referencen:\n');

fprintf(res_fil,'\n');
fprintf(res_fil,'Dimension A: %10.10f\n',handles.Dimension_Ar);
fprintf(res_fil,'Dimension B: %10.10f\n',handles.Dimension_Br);
fprintf(res_fil,'Dimension C: %10.10f\n',handles.Dimension_Cr);
fprintf(res_fil,'Dimension D: %10.10f\n',handles.Dimension_Dr);
fprintf(res_fil,'Dimension E: %10.10f\n',handles.Dimension_Er);
fprintf(res_fil,'Dimension F: %10.10f\n',handles.Dimension_Fr);
fprintf(res_fil,'\n');
fprintf(res_fil,'Højdeforskel 1 til 2: %10.10f\n',handles.Hojdeforskel_1_2r);
fprintf(res_fil,'Højdeforskel 2 til 3: %10.10f\n',handles.Hojdeforskel_2_3r);
fprintf(res_fil,'Højdeforskel 3 til 4: %10.10f\n',handles.Hojdeforskel_3_4r);
fprintf(res_fil,'Højdeforskel 4 til 1: %10.10f\n',handles.Hojdeforskel_4_1r);
fprintf(res_fil,'\n');
fprintf(res_fil,'\n');

% GPSnet
fprintf(res_fil, 'Dimensioner målt vha GPSnet:\n');

```

```

fprintf(res_fil,'\n');
fprintf(res_fil,'Dimension A: %10.10f\n',handles.Dimension_An);
fprintf(res_fil,'Dimension B: %10.10f\n',handles.Dimension_Bn);
fprintf(res_fil,'Dimension C: %10.10f\n',handles.Dimension_Cn);
fprintf(res_fil,'Dimension D: %10.10f\n',handles.Dimension_Dn);
fprintf(res_fil,'Dimension E: %10.10f\n',handles.Dimension_En);
fprintf(res_fil,'Dimension F: %10.10f\n',handles.Dimension_Fn);
fprintf(res_fil,'\n');
fprintf(res_fil,'Højdeforskel 1 til 2: %10.10f\n',handles.Hojdeforskel_1_2n);
fprintf(res_fil,'Højdeforskel 2 til 3: %10.10f\n',handles.Hojdeforskel_2_3n);
fprintf(res_fil,'Højdeforskel 3 til 4: %10.10f\n',handles.Hojdeforskel_3_4n);
fprintf(res_fil,'Højdeforskel 4 til 1: %10.10f\n',handles.Hojdeforskel_4_1n);
fclose(res_fil);

% -----
function PrintMenuItem_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to PrintMenuItem (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
set(gcf, 'PaperOrientation', 'landscape');
set(gcf, 'PaperPosition', [2 1 25 10]);
%printpreview(gcf)
%printpreview(handles.axes7)
printdlg(gcf)
%printdlg(handles.figure1)
%printdlg(handles.axes7)

% -----
function CloseMenuItem_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to CloseMenuItem (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
selection = questdlg(['Vil du lukke programmet?'],...
                    ['Dimensionsprogram afsluttes...'],...
                    'Ja','Nej','Ja');
if strcmp(selection,'Nej')
    return;
end

selection = questdlg(['Er du hundrede procent sikker på, at du vil lukke programmet?'],
                    ...
                    ['Dimensionsprogram afsluttes...'],...
                    'Ja','Nej','Ja');
if strcmp(selection,'Nej')
    return;
end

selection = questdlg(['Hvis du trykker Ja nu, så lukker programmet altså!'],...
                    ['Dimensionsprogram afsluttes...'],...
                    'Ja','Nej','Ja');
if strcmp(selection,'Nej')
    return;
end

delete(handles.figure1)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function popupmenu1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to popupmenu3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

```
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

set(hObject, 'String', {'Dimensioner i planen', 'Højdeforskelle'});

% --- Executes on selection change in popupmenu3.
function popupmenu1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to popupmenu3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: contents = get(hObject,'String') returns popupmenu3 contents as cell array
%       contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from
%       popupmenu3

% --- Executes on button press in togglebutton1.
function togglebutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to togglebutton1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of togglebutton1
```

KMSvsLeica.m

```
clear all
close all
clc

% Indlæser fil med data

[filename, pathname] = uigetfile( ...
{'*.asc;*.txt','Tekstfiler (*.asc;*.txt)', 'Vælg koordinatfil'});
data=load([pathname '\' filename]);

Ykms=data(:,1);
Xkms=data(:,2);
hkms=data(:,3);
Yleica=data(:,4);
Xleica=data(:,5);
hleica=data(:,6);

% x-aksen vendes
[n,m]=size(Ykms);
for t = 1:n
    Xkmsneg(t)=Xkms(t)*-1;
end

Ykmsopr=Ykms;
Xkmsnegopr=Xkmsneg;

% Beregning af afvigelser
% Alle afvigelser over 5 cm i enten Y eller X sorteres fra

for t = 1:n
    afv_Ys=(Yleica(t)-Ykms(t))^2;
    afv_Xs=(Xleica(t)-Xkms(t))^2;
    if afv_Ys > 0.0025 | afv_Xs > 0.0025
        Ykms(t) = 0;
        Xkmsneg(t) = 0;
        afv_Y(t,1) = 0;
        afv_X(t,1) = 0;
        afv_plan(t,1) = 0;
    else
        afv_Y(t,1) = (Yleica(t)-Ykms(t));
        afv_X(t,1) = (Xleica(t)-Xkms(t));
        afv_plan(t,1) = sqrt(afv_Y(t,1)^2+afv_X(t,1)^2);
    end
end

afv_Y;
afv_X;
afv_plan;

obs = 0;
ysum = 0;
xsum = 0;
plansum = 0;

for t = 1:n
    if afv_Y(t,1) ~ 0;
        obs = obs+1;
        ysum = ysum + afv_Y(t,1)^2;
        xsum = xsum + afv_X(t,1)^2;
        plansum = plansum + afv_plan(t,1)^2;
    end
end

end

24
```

```

Yspred = sqrt(ysum/obs)
Xspred = sqrt(xsum/obs)
Planspred = sqrt(plansum/obs)

%Afvigelserne i højden beregnes
%Alle afvigelser, der overskrider 3 cm sorteres fra

for t = 1:n
    afv_hs=(hleica(t)-hkms(t))^2;
    if afv_hs > 0.03
        Ykmsopr(t) = 0;
        Xkmsnegopr(t) = 0;
        afv_h0(t,1) = 0;
        afv_h(t,1) = 0;
    else
        afv_h0(t,1)=0;
        afv_h(t,1)=(hleica(t)-hkms(t));
    end
end

afv_h;
obsh = 0;
hsum = 0;

for t = 1:n
    if afv_h(t,1) ~ 0;
        obsh = obsh+1;
        hsum = hsum + afv_h(t,1)^2;
    end
end

hspred = sqrt(hsum/obsh)

%Afvigelserne i planen og højden plottes

f1 = figure;
set(f1,'Position',[100, 100, 500, 500],'Name','Afvigelser i planen');
Ykms(n+1)=25000;
Xkmsneg(n+1)=-350000;
afv_Y(n+1,1)=0;
afv_X(n+1,1)=0.1;
set(gca,'XLim',[-400000 0]);
set(gca,'YLim',[0 400000]);
axis equal
hold on
A = imread('dk.tif','tif');
x=[-375000 120000];
y=[390000 0];
imagesc(x,y,A);
hold on
quiver(Xkmsneg,Ykms,afv_X,afv_Y,2);
hold on
%plot(-191319,58709,'b. ');
%plot(-313667,299973,'b. ');
text(-350000,15000,'10 cm','FontSize',10)

f2 = figure;
set(f2,'Position',[400, 50, 500, 500],'Name','Afvigelser i højden');

```

```
Ykmsopr(n+1)=25000;
Xkmsnegopr(n+1)=-350000;
afv_h0(n+1,1)=0;
afv_h(n+1,1)=0.05;
set(gca,'XLim',[-400000 0]);
set(gca,'YLim',[0 400000]);
axis equal
hold on
A = imread('dk.tif','tif');
x=[-375000 120000];
y=[390000 0];
imagesc(x,y,A);
hold on
plot(Xkmsnegopr,Ykmsopr,'b.','markersize',4);
hold on
quiver(Xkmsnegopr,Ykmsopr,afv_h0,afv_h,2);
hold on
%plot(-191319,58709,'b. ');
%plot(-313667,299973,'b. ');
text(-345000,30000,'5 cm','FontSize',10)
```

Autokorr.m

```

clear all
close all
clc

% Indlæser fil med data

[filename, pathname] = uigetfile( ...
{'*.asc;*.txt','Tekstfiler (*.asc;*.txt)'}, 'Vælg koordinatfil');
file=load([pathname '\ ' filename]);
dataind=file(:,1);
datatal = length(dataind);

%Korrelationstiden beregnes for tidsintervallerne 1 til 10 minutter
for interval=60: 60: 600;
t = 1;
d = 0;
xvektor=0;
nulvektor=0;
ACF=0;
Lags=0;
data=0;

%data sorteres i de forskellige intervaller
while t < datatal
    d = d+1;
    data(d,1) = dataind(t,1);
    t = t + interval;
    xvektor(d,1)=d;
    nulvektor(d,1)=0;
end

%Standardfunktionen "autocorr" anvendes til beregning af en
%autokorrelationsvektor
[ACF, Lags, Bounds] = autocorr(data,d-1);
figure
autocorr(data, [], 1)
set(gca,'fontsize',14)
set(get(gca,'XLabel'),'String',['Tidsinterval [' num2str(interval) ' sek'],'fontsize',14);
set(get(gca,'YLabel'),'String',['Autokorrelation (' filename ')'],'fontsize',14);
pause
[m,n]=size(Lags)
Bounds
%Skæringspunkt mellem ACF og nullinien bestemmes og korrelationstiden
%udregnes
%xvektorkort = xvektor(1:round(1200/interval));
%ACFkort = ACF(1:round(1200/interval));
%nulvektorkort = nulvektor(1:round(1200/interval));
%[xi,yi] = polyxpoly(xvektorkort,ACFkort,xvektorkort,nulvektorkort)
%[xi,yi] = polyxpoly(xvektor,ACF,xvektor,nulvektor);

%korrelationstid((interval/60),1) = (xi(1,1)-1)*interval;
% interval
%if interval == 400

%Grafen plottes
f1 = figure;
set(gca,'fontsize',14)
set(f1,'Name',[filename]);
hold on
plot(ACF);

```



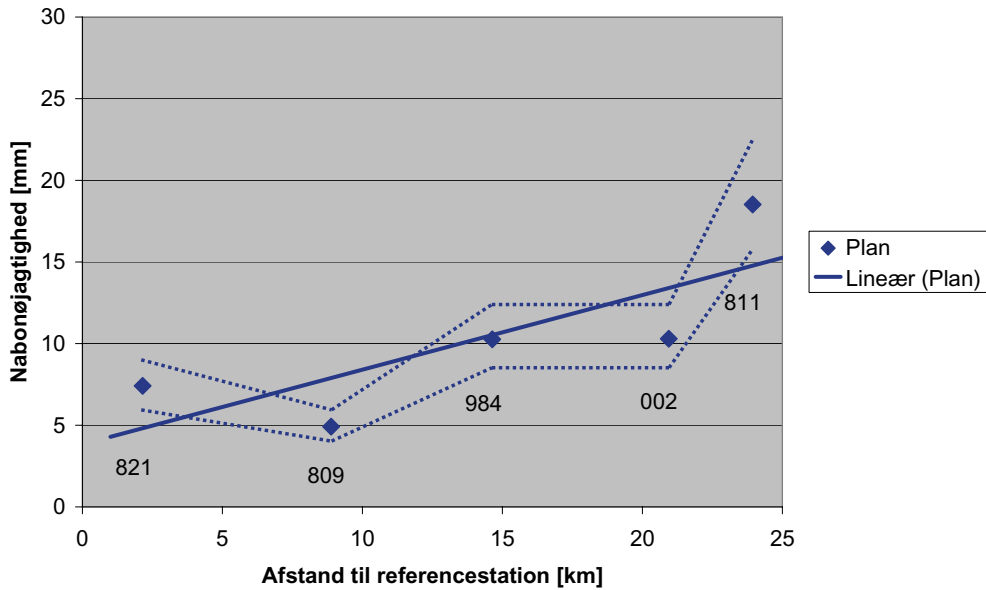
```
plot(xvektor,nulvektor)
plot([0;m],[Bounds(1,1);Bounds(1,1)],'r--');
plot([0;m],[Bounds(2,1);Bounds(2,1)],'r--');
set(get(gca,'XLabel'),'String',['Tidsinterval [' num2str(interval) ' sek]'],'fontSize',14);
set(get(gca,'YLabel'),'String',['Autokorrelation (' filename ')'],'fontSize',14);
grid on
pause
%end
end

%korrelationstid

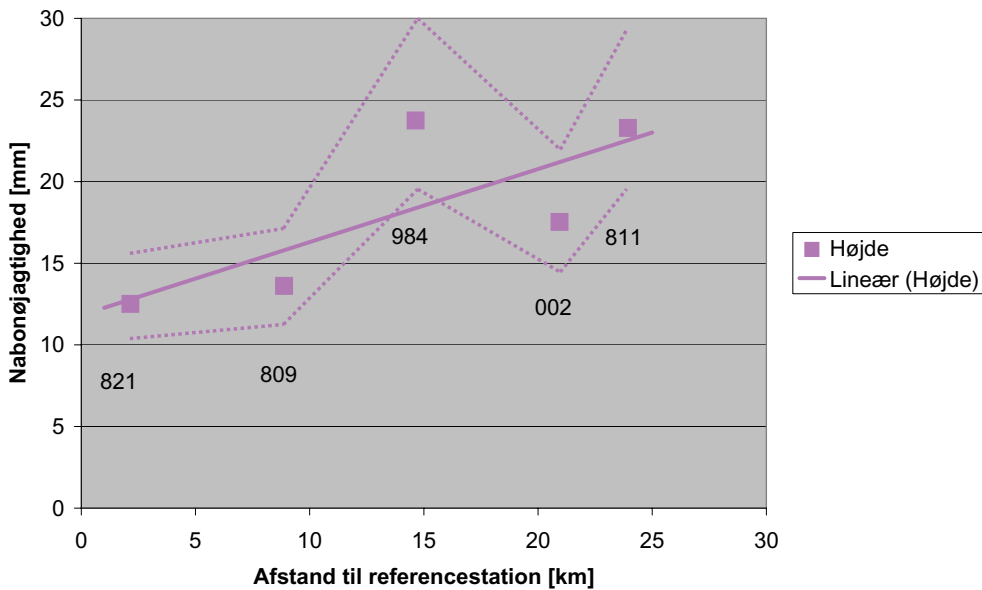
%middelværdi og spredning beregnes
%mean(korrelationstid)/60
%std(korrelationstid)/60
```

Bilag 9

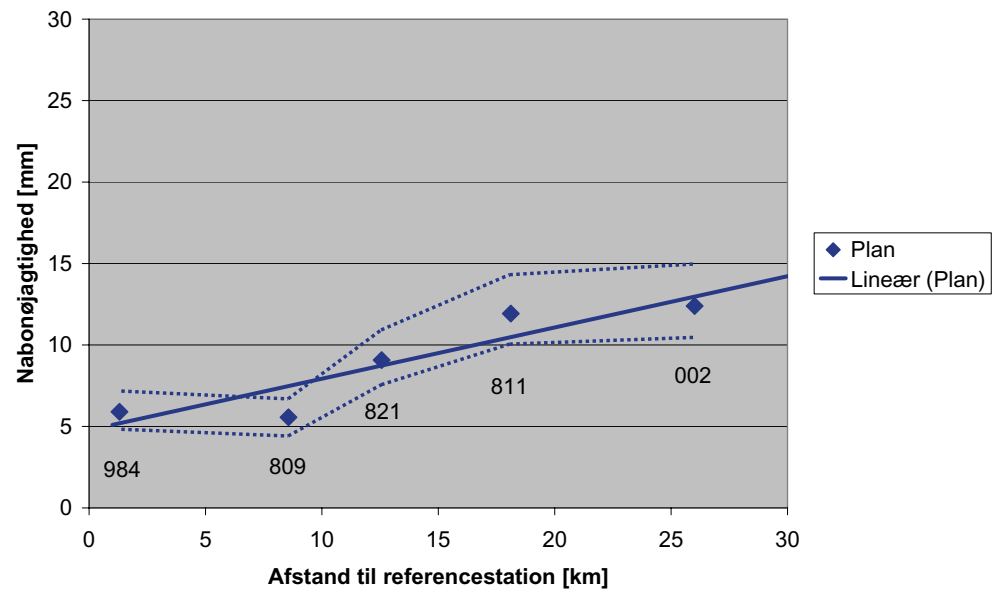
Konfidensintervaller for nabonøjagtighed



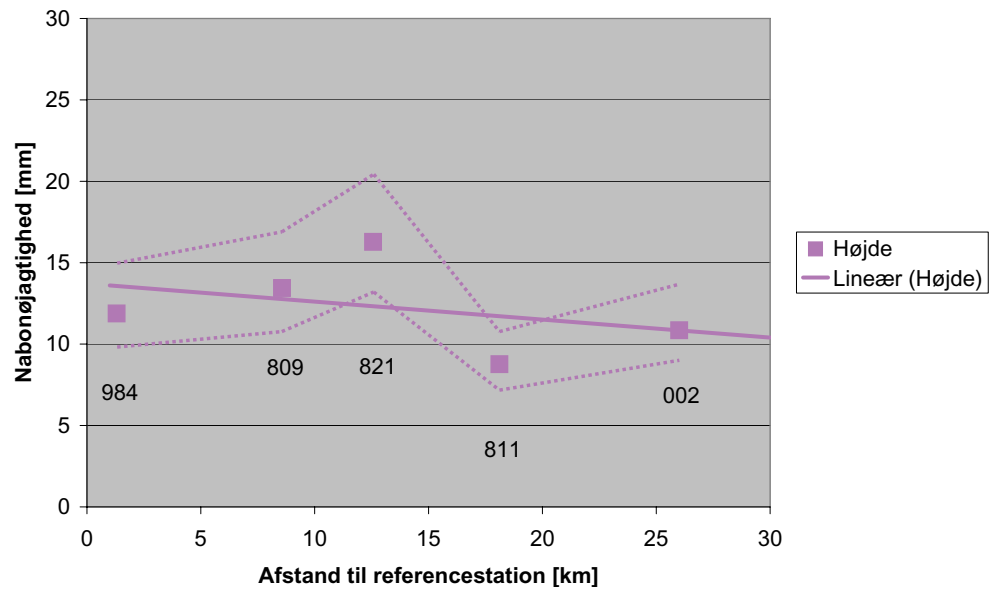
Figur 9.1: Tendenslinie og konfidensinterval for nabonøjagtigheden i planen ved GPS-Referencen.



Figur 9.2: Tendenslinie og konfidensinterval for nabonøjagtigheden i højden ved GPS-Referencen.



Figur 9.3: Tendenslinje og konfidensinterval for nabonøjagtigheden i planen ved GPSnet.



Figur 9.4: Tendenslinje og konfidensinterval for nabonøjagtigheden i højden ved GPSnet.

Bilag 10

Projekt CD

