

# Methodologie voor de nauwkeurigheidscertificatie van totaalstations met ondersteuning voor satellietplaatsbepaling

Alain MULS  
Koninklijke Militaire School  
Departement CISS  
alain.muls@rma.ac.be

Alain DE WULF  
Universiteit GENT  
Geografie  
alain.de.wulf@ugent.be

17 september 2007

# Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>6</b>
1.1	Opzet van het onderzoek . . . . .	6
1.2	Situering van het onderzoek . . . . .	7
1.3	De geodetische benadering . . . . .	9
1.4	De geometrische referenties in de topografie . . . . .	16
<b>2</b>	<b>De theodoliet</b>	<b>20</b>
2.1	Algemeenheden . . . . .	20
2.2	De anatomie van een theodoliet . . . . .	21
2.3	De elektronische hoekmeting . . . . .	27
2.4	De instrumentele fouten van een theodoliet . . . . .	33
2.5	Het meten van afstanden . . . . .	37
<b>3</b>	<b>Veldvalidatie van een totaalstation</b>	<b>57</b>
3.1	De ISO normen 17123 . . . . .	57
3.2	Analyse van de precisie van de hoekmetingen . . . . .	58
3.3	Meetprocedure voor de standaardafwijking van horizontale richtingen . . . . .	59
3.4	Meetprocedure voor de standaardafwijking van verticale richtingen . . . . .	63
3.5	Analyse van de precisie van de elektro-optische afstandmeter . . . . .	66
<b>4</b>	<b>Kalibratie van elektronische afstandsmeters</b>	<b>73</b>
4.1	Inleiding . . . . .	73
<b>5</b>	<b>Het GPS-NavSTAR systeem</b>	<b>77</b>
5.1	Geschiedenis van het GPS-NavSTAR systeem . . . . .	77
5.2	De segmenten van het GPS systeem . . . . .	78
5.3	De GPS signaalstructuur . . . . .	83
5.4	Het navigatiebericht . . . . .	87
5.5	Basis operatie van een GPS ontvanger . . . . .	89
5.6	Technieken voor plaatsbepaling met het GPS systeem . . . . .	93
5.7	Landmeetkundige GPS meetmethoden . . . . .	94
<b>6</b>	<b>Analyse van de precisie van satellietplaatsbepaling</b>	<b>96</b>
6.1	De GPS validatie testprocedure . . . . .	96
6.2	Inleidende controle van de metingen . . . . .	98
6.3	Berekening van de statistische waarden voor de volledige test volgens het voorstel tot ISO-norm . . . . .	99

6.4	Voorstel tot aanpassing van het voorstel tot ISO-norm . . . . .	101
<b>7</b>	<b>Kalibratie van de satellietplaatsbepaling</b>	<b>105</b>
7.1	Inleiding . . . . .	105
7.2	On-Line Processing van GPS data . . . . .	106
7.3	Methodiek voor de kalibratie van satellietplaatsbepaling . . . . .	107
<b>A</b>	<b>Veldvalidatie van een totaalstation</b>	<b>109</b>
A.1	Validatie van de horizontale hoekmetingen . . . . .	109
A.2	Validatie van de verticale hoekmetingen . . . . .	123
A.3	Veldvalidatie van de afstandsmeter . . . . .	136
<b>B</b>	<b>Veldvalidatie van GPS apparatuur</b>	<b>140</b>
B.1	Meetopzet . . . . .	140
B.2	Monofrequente Code-meting (C/A) met naverwerking uitgewerkt conform het voorstel tot ISO-norm . . . . .	141
B.3	RTK FLEPOS metingen uitgewerkt conform het voorstel tot ISO-norm . . . . .	146
B.4	Monofrequente code-meting (C/A) met naverwerking volgens het voorstel tot aanpassing van de ISO-norm . . . . .	147

# Lijst van figuren

1.1	Toepassingsdomeinen van landmeetkundige toestellen . . . . .	8
1.2	Het diagram van Ishikawa toegepast op de landmeetkunde . . . . .	13
1.3	De AGN netwerken in België . . . . .	17
1.4	Het BeRef netwerk en haar verdichting . . . . .	18
2.1	Beperkt overzicht van de evolutie van de theodoliet tot totaalstation . . . . .	21
2.2	De opbouw en hoekmeting van een optisch-mechanische theodoliet . . . . .	22
2.3	Schematische voorstelling van de assen en cirkelranden van een theodoliet [Bron: wikipedia] . . . . .	23
2.4	Schematische opbouw van een reïterator en een repetitor theodoliet . . . . .	23
2.5	Enkele voorbeelden van mogelijke kruisdraden van een theodoliet . . . . .	24
2.6	De topografische kijker van de eerste familie of Kepler kijker . . . . .	24
2.7	De topografische kijker van de tweede familie . . . . .	24
2.8	Principewerking van een pendelcompensator . . . . .	26
2.9	De absolute codering van een cirkelrand in 3 bits . . . . .	27
2.10	De optisch gecodeerde cirkelrand en afleesarm . . . . .	28
2.11	De dynamische hoekmeting . . . . .	29
2.12	De incrementele elektronische hoekmeting . . . . .	31
2.13	De elektronische interpolatie . . . . .	33
2.14	De relatieve inclinatiefout . . . . .	34
2.15	De horizontale collimatiefout . . . . .	35
2.16	De methode van de randstanden . . . . .	36
2.17	De optische as snijdt de primaire as niet . . . . .	36
2.18	De primaire as gaat niet door het centrum van de horizontale cirkelrand . . . . .	37
2.19	De reductie naar zeeniveau . . . . .	38
2.20	AGA Geodimeter Model 3, Museum voor de Geschiedenis van de Wetenschappen, UGent . . . . .	39
2.21	Tellurometer MRA1 . . . . .	40
2.22	Wild-DI10, Museum voor de Geschiedenis van de Wetenschappen, UGent . . . . .	41
2.23	Principe van de prismareflector . . . . .	42
2.24	Principewerking van de elektromagnetische afstandmeting . . . . .	43
2.25	Het opheffen van de faseonbepaaldheid . . . . .	43
2.26	Integratie van de pulsen tot een detecteerbaar signaal . . . . .	45
2.27	De nulpuntfout of optelconstante . . . . .	47
2.28	Amplitude- en frequentiemodulatie van een datasignaal . . . . .	48
2.29	Schematische opbouw van een afstandsmeter . . . . .	48

2.30	Principewerking van een piëzo-electrische kring . . . . .	50
2.31	Mogelijk verloop van de frequentie in functie van de temperatuur (Bron: Joeckel, R., Stober, M., Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung, 1995, pag. 44) . . . . .	51
2.32	De cyclische fout met elektrische oorzaken . . . . .	54
2.33	Cyclische fout door de meerweginterferentie . . . . .	55
3.1	Configuratie voor de volledige meetcampagne voor het bepalen van de experimentele horizontale standaardafwijking $s_h$ . . . . .	59
3.2	Configuratie voor de volledige meetcampagne voor het bepalen van de experimentele verticale standaardafwijking $s_v$ . . . . .	63
3.3	Testveld voor de vereenvoudigde elektro-optische afstandsmetprocedure . . . . .	67
3.4	Testveld voor de volledige elektro-optische afstandmeting . . . . .	68
3.5	Overzicht van de afstanden die gemeten worden in de volledige testprocedure . . . . .	69
3.6	Grafische voorstelling van de berekende waarden . . . . .	71
4.1	Interferentie tussen twee signalen . . . . .	74
4.2	Basisprincipe van de Michelson interferometer . . . . .	74
4.3	Principe van het 2 frequentie systeem . . . . .	75
5.1	Ruimtelijke voorstelling van de GPS satellietenconstellatie . . . . .	79
5.2	De generaties van GPS satellieten . . . . .	81
5.3	Het GPS controlesegment . . . . .	82
5.4	De signaalgeneratie voor een GPS satelliet . . . . .	84
5.5	De BPSK modulatie van de draaggolf . . . . .	86
5.6	Formattering van het navigatiebericht . . . . .	88
5.7	Trilateratie principe toegepast in het GPS systeem . . . . .	90
5.8	Invloed van de klokfout op de positiebepaling . . . . .	92

# Lijst van tabellen

1.1	De parameters van de kaartprojectiesystemen in België . . . . .	19
2.1	Standaard binaire codering . . . . .	28
3.1	De statistische analyse voor de volledige meetcampagne van de horizontale hoekmetingen . . . . .	62
3.2	De statistische analyse voor de volledige meetcampagne van de verticale hoekmetingen	65
3.3	Statistische analyse voor de validatie van de afstandmetingen . . . . .	72
5.1	De nummering van de GPS satellieten . . . . .	80
5.2	De componenten van het GPS signaal . . . . .	85
5.3	De specificaties voor de SPS en PPS diensten . . . . .	87
B.1	Resultaat van de code-meting op merktekens 502 en 61 . . . . .	141
B.2	Afstand- en hoogteverschil tussen de merktekens 502 en 61 . . . . .	142
B.3	De residu's van de C/A afstandsmetingen en hoogteverschillen . . . . .	143
B.4	Berekening van $\frac{SD,i}{SD,j}$ en $\frac{SH,i}{SH,j}$ voor de 3 series in merkteken 502 . . . . .	146
B.5	Resultaat van de RTK FLEPOS-meting op merktekens 502 en 61 . . . . .	146
B.6	De experimentele standaardafwijking voor de C/A metingen . . . . .	148
B.7	Monofrequente code-meting (C/A) – eerste meetdag . . . . .	149
B.8	Monofrequente code-meting (C/A) – tweede meetdag . . . . .	150
B.9	Monofrequente code-meting (C/A) – statistische verwerking . . . . .	151

# Hoofdstuk 1

## Inleiding

### Inhoudsopgave

---

<b>1.1</b>	<b>Opzet van het onderzoek</b>	<b>6</b>
<b>1.2</b>	<b>Situering van het onderzoek</b>	<b>7</b>
<b>1.3</b>	<b>De geodetische benadering</b>	<b>9</b>
1.3.1	De relatie tussen model, meting en kwaliteit	11
1.3.2	De begrippen kalibratie en ijking in de metrologie	12
1.3.3	Invloeden in de landmeetkundige opmetingen	13
1.3.4	De fouten in de metrologie	13
1.3.5	Het onafhankelijkheidsprincipe	14
1.3.6	De kansrekening in de Geodesie	14
1.3.7	De wet van de voortplanting van fouten	16
<b>1.4</b>	<b>De geometrische referenties in de topografie</b>	<b>16</b>

---

### 1.1 Opzet van het onderzoek

De topografische meetinstrumenten voor driedimensionale puntpositionering waren tot het einde van de jaren 1980 totaalstations : een evolutie van een klassieke theodoliet gekoppeld aan een elektro-optische afstandsmeter en uitgerust met een microprocessor en geheugen. Het totaalstation laat toe horizontale en verticale hoekmetingen te combineren met elektro-optische afstandsmetingen. Vanaf de jaren 1990 worden satellietobservaties, hoofdzakelijk uitgevoerd naar de satellieten van het GPS systeem, ingeschakeld voor het bepalen van de coördinaten van referentiepunten. De coördinaten van de (lokale) referentiepunten werden vroeger hoofdzakelijk berekend gebaseerd op richtingsmetingen naar terrestrische referentiepunten uitgevoerd met een totaalstation. Het opzetten van verschillende RTK (Real Time Kinematic) netwerken<sup>1</sup> in België heeft de integratie van GPS metingen in topografische projecten een flinke duw in de rug gegeven.

---

<sup>1</sup>Het FLEPOS of FLEmish POSitioning RTK netwerk bedekt Vlaanderen, in Wallonië werd WALCORS of WALlonie Continuous Operating Reference System uitgewerkt terwijl GPSBru de dekking van het Brusselse Gewest verzekert.

De complementariteit van beide technieken (totaalstation en satellietobservaties), met elk hun eigen voordelen en beperkingen, zijn goed gedocumenteerd in de literatuur. Initieel werden de beide technieken onafhankelijk van elkaar ontwikkeld en leidde dit tot twee onafhankelijke toestellen. De landmeter bepaalde zijn referentie- of basispunten aan de hand van satellietwaarnemingen en verdichte van hieruit met klassieke topografische technieken zijn project. Door de miniaturisatie op hardware niveau, de voortschrijdende integratie van planimetrische en altimetrische technieken in een 3D modelering van de realiteit en de vooruitgang in de verwerking van satellietwaarnemingen worden actueel deze beide technieken gecombineerd in de nieuwste generatie van totaalstations.

Deze nieuwe generatie totaalstations worden meer en meer ingezet bij het opmeten van terreinen, wegen, gebouwen, ... voor toepassingen onder andere opmeten en uitzetten van gronden, gebouwen, wegen en kunstwerken en dit zowel boven als ondergronds en bij grensbepalingen. De juistheid van deze metingen is belangrijk, vermits te betalen bedragen, contractuele aspecten en kwaliteitseisen er vaak van afhangen. Hier ligt een rol weggelegd voor de FOD Economie, daar deze voor België verantwoordelijk is voor het verspreiden van juiste meeteenheden door kalibraties en voor het verzekeren van juiste metingen in het economisch verkeer door wettelijke metrologie. Via die weg kan de FOD Economie, en meer bepaald haar Algemene Directie Kwaliteit en Veiligheid bijdragen aan het verzekeren van de kwaliteit en de juistheid van de toepassing van meetinstrumenten.

Opdat FOD Economie haar controletaak kan uitvoeren, moeten de klassieke kalibratie procedures voor theodolieten mee evolueren en dringt een aanpassing aan de nieuwe generatie totaalstations zich op. Dit document stelt zich tot doel een kader te ontwikkelen voor het uitwerken van kalibratie procedures toepasbaar op de huidige generatie van theodolieten en totaalstations. Om algemeen bruikbare kalibratie procedures te ontwikkelen wordt het totaalstation opgedeeld in zijn samenstellende eenheden, namelijk (a) de horizontale en verticale hoekmetingen, (b) de elektro-optische afstandsmeter, (c) de GPS eenheid en (d) de rekeneenheid. In de volgende paragrafen zal deze opdeling van het totaalstation verduidelijkt worden en de interactie tussen deze onderdelen gedetailleerd worden. Vervolgens worden er voor ieder van deze eenheden een testmethodologie voorgesteld. De precisie nodig voor het correct uitvoeren van de kalibratie metingen kan enkel bereikt worden in laboratorium omstandigheden. Adviezen betreffende de keuze van de middelen en de inrichting van dit laboratorium vormen een bijkomend luik behandeld in dit document. Uiteindelijk wordt getracht een conclusie te trekken naar de geïntegreerde nauwkeurigheid van het totaalstation.

## 1.2 Situering van het onderzoek

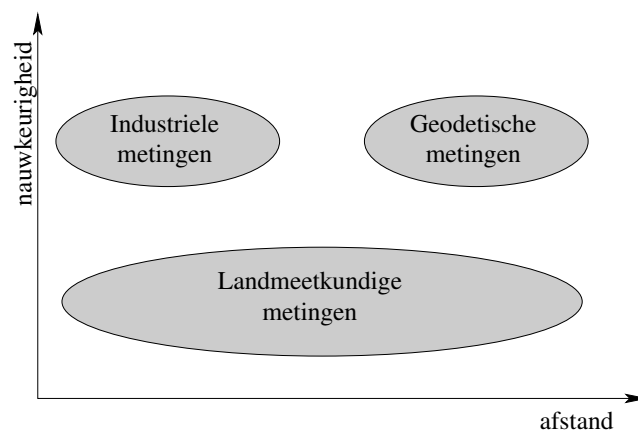
Een topografisch toestel wordt ingezet voor het uitvoeren van opmetingen in sterk uiteenlopende domeinen. Het onderscheid tussen deze domeinen wordt bepaald door enerzijds de afstand waarover het toestel wordt ingezet en anderzijds de vereiste precisie van de meting die de uiteindelijke nauwkeurigheid van de coördinaten van de opgemeten punten bepaalt. Deze benadering laat toe om de volgende deeldomeinen te onderscheiden :

1. De hoog nauwkeurige toepassingen met betrekking tot industriële metingen vereisen een nauwkeurigheid van millimeter of sub millimeter niveau. Industriële toepassingen hebben ook een beperkt domein : afstanden zullen bijna nooit groter dan 100 bij 100 meter zijn. Het instrument



bij voorkeur gebruikt voor deze metingen is het totaalstation, al dan niet in combinatie met een precisie waterpastoestel. Bijna steeds wordt in een lokaal assenstelsel gewerkt, onafhankelijk van nationale of internationale coördinaatreferentiesysteem.

2. Geodetische metingen worden gekenmerkt door zowel hoge eisen van nauwkeurigheid als door de grote afstanden die gekoppeld zijn aan de uitgestrektheid van de gebieden waarop ze betrekking hebben. Een GNSS (Global Navigation Satellite System, of satellietplaatsbepalingssysteem) is bijzonder efficiënt voor dit type metingen. Bijna steeds wordt in een nationaal (bijvoorbeeld BD72) of internationaal coördinaatreferentiesysteem (bijvoorbeeld ETRS89) gemeten.
3. Landmeetkundige toepassingen waarbij meestal een positie nauwkeurigheid van centimeterorde gewenst is. De gebruikte instrumenten zijn veelal een combinatie van totaalstations, waterpastoestellen en GPS apparatuur. De vereffening kan in een lokaal systeem worden uitgevoerd en nadien worden getransformeerd naar een nationaal of internationaal coördinatensysteem, of rechtstreeks in het nationaal of internationaal datum gemeten en verwerkt worden. In het eerste geval wordt vaak een totaalstation gebruikt (die opmetingen verricht in een local level reference system en worden getransformeerd naar het gewenste datum) terwijl de inzet van een GPS instrument meestal toelaat (door gebruik te maken van nationaal of internationaal bepaalde transformatieformules) in het geschikte datum te werken. De nauwkeurigheidseisen worden bepaald door het netwerk van punten van de gebruikte geodetische referentie. De punten<sup>2</sup> van de Belgische nationale planimetrische (de klassieke netten van orde 1, 2 en 3 die actueel geïntegreerd zijn) en altimetrische (TAW) netten hebben een nauwkeurigheid van 2 cm te wijten aan de ouderdom van de metingen waarmee dit net werden bepaald. Het actuele geodetische net van orde 0 werd uitsluitend met behulp van GPS waarnemingen opgemeten, zodat de verwerking een mm-nauwkeurigheid van dit net met zich mee brengt.



**Figuur 1.1:** Toepassingsdomeinen van landmeetkundige toestellen

Sinds midden 1990 worden GNSS meettoestellen, hoofdzakelijk GPS ontvangers, ingezet voor geodetische metingen en staan ze in voor het uitzetten van de basispunten bij landmeetkundige toepassingen. Initieel werden deze technieken enkel bij grootschalige projecten gebruikt, maar recentelijk vervangen GNSS meettechnieken steeds meer de klassieke technieken voor het uitzetten van basispunten.

<sup>2</sup>Nationaal Geografisch Instituut, <http://www.ngi.be/NL/NL2-1-1-5.shtm>, geraadpleegd op 7/6/2006

Voor de opkomst van de GNSS technieken werden totaalstations en waterpastoestellen ingezet in alle toepassingsdomeinen, maar actueel wordt hun inbreng in de geodetische metingen vervangen door GPS toestellen. Actueel hebben totaalstations een groot nut voor de (klassieke) landmeetkundige toepassingen en de industriële metingen.

Tijdens de verdere studie gaat de aandacht uit naar deze beide toepassingsdomeinen van het totaalstation. Het verschil in vereiste meetprecisie en de grootte van de meetzone introduceren een dualiteit in de benadering van de kwaliteitscertificatie van het totaalstation :

1. bij **landmeetkundige toepassingen** wordt het totaalstation ingezet om coördinaten van gematerialiseerde punten te bekomen binnen de nationale referentie. De gewenste nauwkeurigheid voor deze coördinaten is het cm-niveau, terwijl de te overbruggen afstanden enkel door onderlinge zichtbaarheid van de punten beperkt wordt. De technieken toegapast door de landmeter zijn veelvuldig : voorwaartse en achterwaartse insnijdingen, veelhoekmetingen en detailmetingen, oppervlakte en volumemetingen, opmeten van punten ten behoeve van situatiemetingen en afpalingen, uitzetten van punten voor allerhande inplantingen, . . . . Voor de vereffening van deze meettechnieken dient de landmeter te beschikken over precisieindicatoren die het meettoestel karakteriseren en nauwkeurigheidscriteria die de resultaten kenmerken. Deze indicatoren zijn de standaardafwijkingen voor de hoekmetingen in het horizontale en verticale vlak, de standaardafwijking voor de afstandsmeter, de afwijking van het optisch schietlood en de precisie waarmee de verticale cirkelrand een horizontale referentie beJ
2. bij **industriële metingen** zijn de nauwkeurigheidseisen strenger en dienen de coördinaten van een puntenwolk met mm-nauwkeurigheid bepaald te worden. De vereisten voor de precisie van de metingen ligt bijgevolg veel hoger dan bij landmeetkundige toepassingen. Om aan deze kwaliteitseisen tegemoet te komen, dient het meettoestel grondig geanalyseerd te worden. Voor ieder van de meettoestellen moet bijkomend beoordeeld worden welke factoren, intern of extern aan het toestel, de metingen beïnvloeden. De gedetailleerde analyse van de metingen en hun invloeds- factoren vormen een tweede onderdeel van dit document.

In de landmeetkundige toepassingen wordt bijna uitsluitend gebruik gemaakt van totaalstations, terwijl voor industriële toepassingen nog veelvuldig gebruikt gemaakt wordt van preciese theodolieten, specifieke elektro-optische afstandsmeters die een hogere meetprecisie toelaten dan de afstandsmeter geïntegreerd in het totaalstation en waterpasinstrumenten.

### 1.3 De geodetische benadering

Iedere wetenschap wordt gekenmerkt door het onderwerp van de discipline enerzijds en door de methoden en technieken specifiek ontwikkeld voor deze discipline anderzijds. De studie, de analyse en de ontwikkeling van deze methoden en technieken behoren toe aan de **methodologie**. De methodologie is een abstract onderwerp en zij analyseert *de werkwijze toegepast door een persoon die een probleem analyseert en de technieken die hij ontwikkelt om tot een oplossing voor dit probleem te komen*.

De **geodetische benadering** of de **geodetische methodologie** groepeerde de technieken en methoden die in de geodesie gebruikt worden. Zij specificereert de werkwijze volgens dewelke technieken en methoden die toebehoren aan andere disciplines, zoals de statistiek, kunnen toegepast worden op een geodetisch probleem. De geodetische benadering<sup>3</sup> steunt op het gebruik van modellen, op de precisie waarmee de metingen het model ondersteunen en op de aandacht besteed aan de kwaliteit van de resultaten. Wanneer we hier aan toevoegen dat een geodeet al zijn activiteiten baseert op metingen, kunnen we de geodetische benadering samenvatten door de 3 begrippen :

1. de **meting**
2. de **modellering**
3. de **kwaliteit**

Deze 3 noties vormen een geïntegreerd geheel. De metingen worden uitgevoerd om door het model gedefinieerde grootheden te kwantificeren en laten toe de kwaliteit van dit model te evalueren. Om de toepasbaarheid van het model te bewijzen dient men de kwaliteit ervan te toetsen aan de hand van een reeks hypothesen. De kwaliteitsnorm wordt opgesteld binnen het kader van het model en gebruikt de metingen als referentiepunten.

Metingen zijn niets anders dan het *waarnemen van de realiteit*, iedere waarneming van de realiteit wordt gekenmerkt door een reeks storingen of (meet)fouten. Minstens even belangrijk als de toepassing van een correcte meettechniek is de transformatie van deze meetwaarde in een nuttige informatie.

De Geodesie bepaalt finaal informatie met betrekking tot de Aarde, de installaties op haar oppervlak (gebouwen, wegen, ...) en hun posities op de vaste aarde of op zee. Deze informatie worden aangeduid door de **Geo-Informatie**. Een geo-informatie bestaat uit twee delen :

1. de **thematische** informatie : *over welke installatie gaat het ?*
2. de **geometrische** informatie : *waar bevindt deze installatie zich ?*

Tot recentelijk associeerde men de Geodesie hoofdzakelijk met het geometrische aspect : waar bevindt zich de installatie? Deze metrische benadering herleidde de wereld tot een geheel van (discrete) punten en hun onderlinge geometrische verbanden. Deze benadering bood het voordeel dat de strikte regels van de metrologie en de statistiek toepasbaar zijn maar verloor uit het oog de thematische samenhang van het geheel of van de individuele punten. De introductie van informatiesystemen en de toenemende automatisatie doen het belang van het thematische aspect toenemen. Vandaag stelt men vast dat de geo-informatie uitgroeit tot één van de belangrijkste beleidsinstrumenten.

De geo-informatie wordt bekomen door het uitvoeren van (soms langdurige) metingen op het terrein : de **topografie**. Het gebruik van detectoren aan boord van vliegtuigen of in satellieten laten een snellere acquisitie toe door de *waarneming op afstand* : de **fotogrammetrie** richt zich naar de geometrische informatie terwijl de **teledetectie** zich oriënteert naar de thematische aspecten. Sinds midden van de jaren '90 wordt de opmeting aangevuld door afstandsmetingen naar satellietssystemen : de **ruimtegeodesie** waarvan het Global Positioning System het best gekende voorbeeld is.

---

<sup>3</sup>De voorgestelde geodetische benadering is deze ontwikkeld aan de TECHNISCHE UNIVERSITEIT DELFT en staat gekend onder de naam *De Delftse School*

### 1.3.1 De relatie tussen model, meting en kwaliteit

Iedere waarnemer heeft een ander beeld van de realiteit. Een architect, een aannemer, een bouwheer of een potentiële koper bekijken ieder een woning uit een ander oogpunt, dat bepaald wordt door de toepassingsmogelijkheden die zij beogen. Het is dan ook niet mogelijk om een genormaliseerde numerieke beschrijving van de geo-informatie te bepalen dat beantwoordt aan alle mogelijke toepassingen. Het **model** dat de realiteit vertaalt is dus functie van de toepassing. De belangrijkste modellen zijn :

- het geometrische model,
- het structurele model,
- het referentiemodel,
- het kwaliteitsmodel,
- het semantische model.

Nadat de gebruiker het model gekozen heeft, wordt dit model geconcretiseerd door het uitvoeren van de metingen die het model ondersteunen. Dit houdt in dat de metingen (meettechnieken en -instrumentarium) afgestemd worden op het gekozen model en zo economisch mogelijk moeten leiden tot het verwerven van de door het model bepaalde meetgegevens. De kwaliteitscontrole wordt bekomen door de meetgegevens via het model te propageren naar specifieke statistische (numerieke) waarden.

Dit kwaliteitsproces wordt gekenmerkt door (a) de **precisie** houdt verband met de variabiliteit van de metingen en de invloed van deze fouten uitgeoefend doorheen het model op de geo-informatie ; (b) de **nauwkeurigheid** houdt rekening met de invloed op de geo-informatie van systematische of grove fouten die niet gedetecteerd werden ; (c) de **integriteit** controleert of het meetproces een volledige en correcte identificatie van de geo-informatie toelaat ; (d) de **actualiteit** is een maat van overeenstemming tussen de geo-informatie en de huidige toestand van de realiteit.

Met de **precisie** van een meetmethode bedoelt men de mate waarin een reeks volgens de meetmethode verkregen meetwaarden onderling overeenstemmen. De meetprecisie omvat de centeringsprecisie, de precisie van het meetinstrumentarium, van de meetpunten en van de waarnemer.

Onder **nauwkeurigheid** van een meetmethode en het model verstaat men de mate waarin de (berekende) resultaten voor een onbekende van het model overeenstemmen met het gekozen model.

Het opmeten en verwerken van de geo-informatie veronderstelt dat de gebruikte meettechnieken en meetinstrumenten aan een aantal voorwaarden voldoen :

1. de geo-informatie moet correct geïdentificeerd zijn ;
2. de op te meten geo-informatie is toegankelijk voor de ingezette middelen ;
3. de gebruikte meetinstrumenten zijn equivalent en afgestemd op de te bepalen geo-informatie ;
4. de modellering van het terrein is afgestemd op de geo-informatie.

### 1.3.2 De begrippen kalibratie en ijking in de metrologie

**Metrologie** wordt gedefinieerd door het International Bureau of Weights and Measures (BIPM) als "... de wetenschap van het meten waarbij zowel de experimentele als theoretische bepaling van een grootte gekenmerkt door een bepaald niveau van onzekerheid en dit in elk domein van de Wetenschappen en Technologie". Metrologie is erg breed en kan onderverdeeld worden in de volgende domeinen :

**Wetenschappelijke of fundamentele metrologie** richt zich op het vastleggen van meeteenheden, maatstaven of referenties, de ontwikkeling van nieuwe meettechnieken, de realisatie van meetstandaarden en de traceerbaarheid of herleidbaarheid van deze standaarden naar hun gebruik in de praktijk.

**Toegepaste of industriële metrologie** houdt zich bezig met de toepassing van de metrologie tijdens de fabricatie van meettoestellen of de toepassing ervan. Ze zorgt voor de traceerbaarheid van de standaarden naar hun gebruik in de meettoestellen.

**Wettelijke metrologie** bepaalt de wettelijke vereisten en bepalingen voor meetinstrumenten en standaarden met het oog op de bescherming van de gezondheid, de consument en de eerlijke handel.

Een fundamenteel concept in de metrologie is de **traceerbaarheid** of **herleidbaarheid** wat inhoudt dat een meetwaarde kan teruggebracht worden tot de waarde van een standaard binnen zekere onzekerheidsgrenzen. De traceerbaarheid wordt meestal bekomen door de kalibratie die het verband vastlegt tussen de aangeduide meetwaarde van een meettoestel en de waarde van een meetstandaard.

In de metrologie worden meetinstrumenten onderworpen aan verschillende controles :

- De **ijking** is het bepalen van de nauwkeurigheid van een meetmethode ten opzichte van een goed bekende standaard. Alle meetapparatuur die professioneel gebruikt wordt moet regelmatig geijkt worden om er zeker van te zijn dat de metingen nog aan de gestelde eisen (specificaties) voldoen. Vooral als de meetapparatuur gebruikt wordt voor de overdracht van eigendom moet de ijking gebeuren door een officiële instantie.
- Bij het **kalibreren** van meettoestellen wordt de afwijking (bias) van het meettoestel vastgesteld. Dit kan door te vergelijken met een referentie of met een berekend model. De afwijkingen worden vastgelegd in een zogenaamde correctietabel. Bij digitale verwerking van meetwaarden kunnen de correctiewaarden met de gemeten waarden verrekend worden zodat een nauwkeurig resultaat wordt verkregen. Op basis van de kalibratie kan worden bepaald of het meettoestel nog aan zijn specificaties voldoet. Bij het gebruik van referenties moeten deze van een bepaalde kwaliteit zijn zodat de afregelingen juist verlopen. De kalibratie laat toe om de door middel van de controle en bepaling van instrumentele parameters tijdens de meting of de verwerking deze meetwaarden te corrigeren.
- Het **justeren** steunt op de kalibratie gegevens en brengt correcties of veranderingen aan het instrument aan zodat de kalibratiefout ofwel wordt verkleind ofwel wordt weggewerkt.

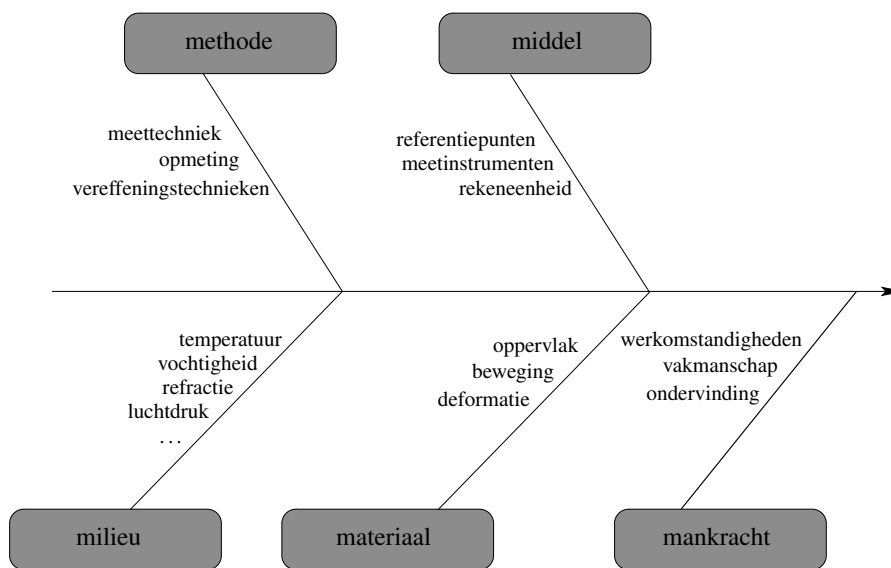
Uit de kalibratieinventaris van de omgevingsgebonden fouten (systematische fouten) en de instrumentele fouten (constante of systematische fouten) zal duidelijk blijken dat sommige nazichten en bijhorende correcties door de gebruiker zelf kunnen gebeuren terwijl andere fouten enkel in gespecialiseerde werkplaatsen kunnen uitgevoerd worden.

### 1.3 Invloeden in de landmeetkundige opmetingen

Wanneer de gebruiker zelf controles uitvoert spreekt men van de **veldvalidatie** van het toestel. In het andere geval zal een gespecialiseerd laboratorium een **ijking** van het meettoestel uitvoeren, waarbij de herleidbaarheid van de meting naar een standaard voorop staat. De veldvalidatie van een toestel kan op regelmatige basis uitgevoerd worden voor de landmeetkundige toepassingen (Sectie 1.2 op pagina 7) terwijl voor industriële toepassingen een geijkt toestel vereist.

#### 1.3.3 Invloeden in de landmeetkundige opmetingen

Het geheel metingen – model – kwaliteit wordt beïnvloed door een groot aantal parameters. Het Ishikawa diagram, eveneens gekend onder de benamingen *visgraatdiagram* of *oorzaak-gevolgen diagram*, is een voorstelling die de oorzaken van bepaalde gebeurtenissen toont. Dit diagram wordt gebruikt voor de analyse van de kwaliteit van toestellen en meetmodellen. Het diagram laat toe om de verschillende oorzaken te identificeren die effect hebben op de kwaliteit van een meting of parameter. De toepassing van dit diagram op landmeetkundige opmetingen werd uitgevoerd door A. MARTIN-ROLAND (Figuur 1.2). Alvorens aan een opdracht te beginnen zal de landmeter dit diagram doorlopen



**Figuur 1.2:** Het diagram van Ishikawa toegepast op de landmeetkunde

en aandacht besteden aan de oorzaken die de nauwkeurigheid van de resultaten volgens zijn model kan beïnvloeden.

#### 1.3.4 De fouten in de metrologie

Eén van de fundamenteën van een waarnemingswetenschap is het postulaat dat *iedere meting gepaard gaat met fouten*. Deze meetfouten hebben als gevolg dat de meetresultaten niet overeenstemmen met de realiteit. Meetfouten worden onderverdeeld in :

**de grove fouten** zijn in het algemeen eenvoudig te detecteren en vinden hun oorsprong in de onoplettendheid van de waarnemer. De grove fouten moeten uit de metingen geweerd worden en kunnen niet door een vereffeningstechniek verwerkt worden.

**de systematische fouten** stellen een verstoring van de meetwaarde voor door de houding van de waarnemer, door de toestand van het meetinstrument of iedere uitwendige invloed waarmee het model geen rekening houdt. Men spreekt dan ook van *systematische afwijkingen van het model*. Een specifiek geval van de systematische fouten zijn de *constante fouten* die zich steeds voordoen met dezelfde grootte en volgens dezelfde zin en de *periodieke fouten* die een perioditeit vertonen.

Een systematische fout kan geëlimineerd of in grootte gereduceerd worden door de toepassing van een aangepaste meettechniek, het aanbrengen van een gepaste correctieterm of het herhaald meten onder andere omstandigheden van de grootte. De toepassing van één van deze technieken betekent een verfijning van het gebruikte model.

**de accidentele of residuele of toevallige fouten** stemmen overeen met de variabiliteit die men vaststelt in een reeks metingen die vrij zijn van grove of systematische fouten en die tot uitdrukking komt in het histogram van de meetwaarden.

### 1.3.5 Het onafhankelijkheidsprincipe

Volgens het Ishikawa diagram wordt het resultaat beïnvloed door diverse factoren of foutenbronnen. Bij het behandelen van de voortplanting van de fouten wordt aangenomen dat een instrument meerdere instrumentele fouten vertoont, de waarnemer een oorzaak kan zijn van subjectieve fouten en de omgevingsfactoren de resultaten kunnen beïnvloeden.

Elke fout kan echter afzonderlijk bestudeerd worden volgens het onafhankelijkheidsprincipe. Zijn  $e_1, e_2, \dots, e_n$  de verschillende instrumentele fouten dan kan men aannemen dat de aflezing  $E$  bepaald wordt volgens  $E = E(e_1, e_2, \dots, e_n)$ . Dit meetresultaat kan eveneens beschreven worden volgens :

$$\begin{aligned} E &= E_0 + dE(e_1, e_2, \dots, e_n) \\ &= E_0 + \frac{\partial E}{\partial e_1|_0} e_1 + \frac{\partial E}{\partial e_2|_0} e_2 + \dots + \frac{\partial E}{\partial e_n|_0} e_n \end{aligned}$$

met  $E_0$  ... het ideale meetresultaat wanneer geen fouten voorkomen

$e_i$  ... de grootte van de meetfout  $i$

$\frac{\partial E}{\partial e_i|_0}$  ... de invloed van de meetfout  $i$  op het bekomen meetresultaat

Het onafhankelijkheidsprincipe stelt dat we de meetfouten individueel kunnen bestuderen in afwezigheid van alle andere fouten. Dit betekent dat  $\frac{\partial E}{\partial e_i|_0}$  bestudeerd kan worden in afwezigheid van alle andere meetfouten ( $e_j = 0 \quad j \neq i$ )

### 1.3.6 De kansrekening in de Geodesie

De geodesie maakt gebruik van de wetten en mathematische modellen uit de *kansrekening* en de *statistiek* die de variabiliteit van de meetresultaten beschrijven. Deze variabiliteit van de meetresultaten

wordt beschreven door het begrip *stochastische veranderlijke* die meerdere waarden kan aannemen met een zekere probabiliteit.

In de geodesie wordt een serie metingen meestal beschreven door de *normale wet*. Het resultaat van een meting kan theoretisch iedere waarde aannemen en is een continue stochastische veranderlijke. De *verdelingsfunctie* bepaalt de waarschijnlijkheid dat een meetresultaat een bepaalde waarde  $x$  zal aannemen. Voor de normale verdeling geldt :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

waarbij  $\mu$  en  $\sigma$  respectievelijk de *wiskundige verwachting* of de *meest waarschijnlijke waarde* en de *standaardafwijking* voorstellen. De grafische voorstelling van de waarschijnlijkheidsfunctie stemt overeen met de resultaten bekomen door een oneindig aantal herhaalde metingen.

Onder *precisie* van een meettechniek verstaat men *de mate van overeenstemming van een reeks meetresultaten bekomen door deze techniek*. Om de precisie van een meettechniek te bepalen kan men eenzelfde grootte een groot aantal keren ( $n$ ) meten en het histogram bepalen van deze metingen : een hoog en nauw histogram duidt op een grote precisie van de meetresultaten, terwijl een breed en afgeplat histogram overeenstemt met een lage precisie en een grote spreiding van de meetresultaten.

Wanneer men aanneemt dat de vorm van een histogram in de limiet voor  $n \rightarrow \infty$  overeenstemt met een normale verdeling dan stemt de precisie overeen met de parameter  $\sigma$ . De standaardafwijking  $\sigma$  is een maat voor de afwijking van de meetresultaten ten overstaan van de wiskundige verwachting. De wiskundige verwachting  $\mu$  stemt overeen met het meest waarschijnlijke meetresultaat.

In de praktijk beschikt men slechts over een beperkt aantal  $n$  metingen  $\{(x)_1, \dots, (x)_n\}$  met, bijvoorbeeld  $n = 4$ . Men definieert dan :

**Definitie 1.3.1.** *Het rekenkundige gemiddelde  $\bar{x}$  is de beste schatter van de wiskundige verwachting  $\mu$*

*van de verdelingswet die overeenstemt met de uitgevoerde metingen :*

$$\bar{x} \doteq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x)_i$$

**Definitie 1.3.2.** *de grootte  $s^2$  is de beste schatter van de variantie  $\sigma^2$  van de verdelingswet die*

*overeenstemt met de uitgevoerde metingen :*

$$s^2 \doteq \frac{\sum_{i=1}^n \{(x)_i - \bar{x}\}^2}{n - 1}$$

*Ze laat toe de standaardafwijking  $\sigma$  van de verdelingswet te schatten.*



### 1.3.7 De wet van de voortplanting van fouten

De wet van de voortplanting van fouten beschrijft het effect van de invloed van onzekerheden van de waarde van veranderlijken  $x_i$  op de resulterende waarde van een functie  $f$  gebaseerd op deze veranderlijken. Meestal zijn de veranderlijken  $x_i$  gemeten waarden in een experiment waardoor hun respectieve onzekerheden  $\sigma_{x_i}$  te wijten zijn aan de beperkingen van de meetmethode (bvb. de instrumentele precisie van het meettoestel). Deze onzekerheden planten zich voort naar het resultaat bepaald door  $f$ .

Stel dat  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  een functie is die afhankelijk is van  $n$  veranderlijken  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . De onzekerheid van iedere veranderlijke wordt gegeven door zijn standaardafwijking  $\sigma_i$  :

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad \forall x_i : x_i \pm \sigma_i$$

Wanneer de veranderlijken  $x_i$  ongecorrleerd zijn, kan de onzekerheid van de functie  $f$  berekend worden door :

$$\sigma_f = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \sigma_i \right)^2} \quad (1.1)$$

met :  $\frac{\partial f}{\partial x_i}$  ... de partieel afgeleide van  $f$  naar de  $i$ -de veranderlijke  $x_i$ .

Wanneer de veranderlijken  $x_i$  gecorreleerd zijn, dient men rekening te houden met de covarianties  $\sigma_{i,j}^2$  en wordt de standaardafwijking voor de functie  $f$  gegeven door :

$$\sigma_f = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} \sigma_{i,j}^2 \right)} \quad (1.2)$$

met :  $\sigma_{i,i}^2$  ... de variantie van de veranderlijke  $x_i$ .

De functiewaarde  $f$  is gekend op de onzekerheid  $\sigma_f$  na :  $f \pm \sigma_f$ .

Voor de veranderlijke  $z$  die de som is van twee onafhankelijke metingen  $x$  en  $y$ , bekomen door twee meettechnieken gekenmerkt door de respectieve standaardafwijkingen  $\sigma_x$  en  $\sigma_y$ , kan men aantonen dat de standaardafwijking van de veranderlijke  $z$  equivalent is met de standaardafwijking van een fictieve meting gegeven door  $\sigma_z = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$ .

## 1.4 De geometrische referenties in de topografie

Iedere topografische opmeting wordt gerefereerd naar een referentiesysteem. Dit referentiesysteem kan lokaal, regionaal of globaal gedefinieerd zijn. Een **lokaal referentiesysteem** zal meestal een werf integreren en enkel voor de duur van de werkzaamheden gematerialiseerd worden. Een **regionaal of nationaal referentiesysteem** bepaalt de coördinatenreferentie voor een grotere (op nationaal niveau of regionaal, bvb. Europees, niveau) zone terwijl een **globaal referentiesysteem** een wereldwijde voetprint heeft.

Vanuit een historisch perspectief wordt de topografie gekenmerkt door (a) te refereren naar een lokaal of nationale referentie en (b) een strikte scheiding tussen de planimetrische en altimetrische referenties. De planimetrie had tot doel de coördinaten van een punt of puntenwolk te bepalen ten opzichte van een lokale horizontale referentie of ten opzichte van het nationale projectiesysteem in voege. De bepaling van de waarde van de hoogte van een punt was het onderwerp van de altimetrie.

De strikte scheiding, zowel in meettechniek, in meettoestellen als in de verwerking tussen de planimetrie en de altimetrie hield aan tot de opkomst van het totaalstation. Wanneer echter zeer nauwkeurige hoogtemetingen vereist zijn, blijft de separate opmeting van de hoogte nog steeds van toepassing.

De succesvolle toepassing van geodetische GPS opmetingen en de proliferatie van geografische informatiesystemen in de lokale besturen hebben geleid tot een verschuiving van het referentiesysteem waarin de landmeter werkt. Actueel zal een landmeter slechts zelden gebruik maken van een lokaal referentiesysteem maar zich minstens aansluiten aan de nationale referentie. Bovendien houdt de integratie van een GPS ontvanger met een totaalstation nu echter ook in dat de landmeter gebruik maakt van een globale referentie.

De integratie van nationale en globale referenties vormt dus actueel een belangrijk onderdeel van de kennis waarover een landmeter moet beschikken. Deze integratie wordt bevorderd en vereenvoudigd door de uitbouw van de permanente GPS netwerken in België, gegroepeerd in het *Active Geodetic Network* (AGN<sup>4</sup>, Figuur 1.3) en door de definitie van een nieuw projectiesysteem voor België door

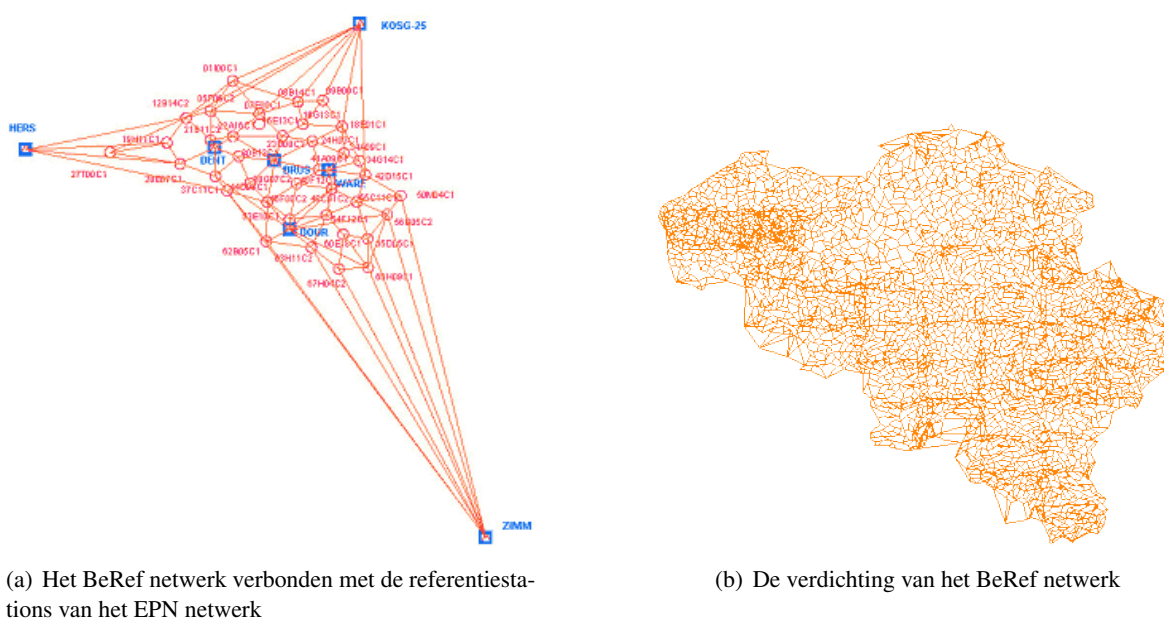


**Figuur 1.3:** De AGN netwerken in België

het Nationaal Geografisch Instituut.

<sup>4</sup>FLEPOS in Vlaanderen, WALCORS in Wallonië en GPSBRU in het Brusselse hoofdstedelijke gewest.

1. In 1987 hebben EUREF, subcommissie voor Europa van de internationale vereniging van geodesie, en CERCO (*Comitrop des Responsables de la Cartographie Officielle*) beslist een nieuw Europees geodetisch referentiesysteem uit te werken, gebaseerd op GPS. Deze nieuwe referentie, ETRS89 genaamd (*European Terrestrial Reference System*) werd gerealiseerd in 1989 en is bruikbaar voor alle geodetische, geofysische en cartografische toepassingen in gans Europa. Steunend op dit nieuw Europees referentiekader heeft het NGI, tussen 1989 en 2002, het geodetisch net herzien en verdicht via GPS waarnemingen. Deze Belgische component van het ETRS89 systeem kreeg de naam **BeRef** (*Belgian Reference Frame*) mee en werd ten opzichte van het Europese netwerk EPN (*European Permanent Network*) ingemeten waarbij zowel Belgische stations als referenties in de buurlanden werden betrokken. De referentiestationen van de



**Figuur 1.4:** Het BeRef netwerk en haar verdichting

AGN-netwerken werden met hoge nauwkeurigheid ingemeten ten opzichte van BeRef. Door een verhoogde nauwkeurigheid van zowel de GPS-basislijnen als de EPN-aansluitingspunten heeft deze vereffening in 2002 geleid tot een zeer homogeen netwerk met hoog nauwkeurige ETRS89-coördinaten ( $\sigma = 5$  mm voor de drie dimensies). Dit vernieuwde BEREf-net vormt de basis voor de bepaling van de Belgische permanente GPS-stations van de AGN RTK-netwerken en leidde tot de berekening van de ETRS89 coördinaten van 4200 geodetische grondpunten in België.

2. Voor alle praktische toepassingen is en blijft tot nu toe de **Belgian Datum 1972** (BD72) zowel op nationaal als op internationaal vlak het enige officiële referentiesysteem. Het bestaat uit ongeveer 12.000 gematerialiseerde punten (palen en verheven punten) bepaald door tienduizenden waarnemingen. Ten opzichte van dit referentiesysteem definieerde het NGI de Belgische projectie **Lambert 1972** die een conische, directe en conforme kaartprojectie bepaalt waarvan de parameters hernomen zijn in tabel 1.1 op de pagina hierna. De projectie verbonden aan het referentiesysteem BeRef is de nieuwe Lambert 2008 projectie, waarvan de parameters hernomen zijn in tabel 1.1 op de volgende pagina. De parameters van de projectie zijn zo gekozen dat er geen enkele verwarring kan bestaan met de Lambert 1972-coördinaten. De Lambert-2008 co-

		Lambert 1972	Lambert 2008
Ellipsoïde	Naam	Hayford 1924	GRS80
	halve grote as $a$	6 378 388,0m	6 378 137,0m
	inverse afplatting $1/f$	297,0	298,257 222 101
standaard parallellen	$\varphi_1$	N 49° 50'00,002 04"	N 49° 50'00"
	$\varphi_2$	N 51° 10'00,002 04"	N 51° 10'00"
oorsprong	breedte $\varphi_0$	90°	N 50° 47'52,134"
	centrale meridiaan $\lambda_0$	E 4° 22'02,952"	E 4° 21'33,177"
translatie	<i>false northing</i>	150 000,013 m	649 328,000 m
	<i>false easting</i>	5 400 088,438 m	665 262,000 m

**Tabel 1.1:** De parameters van de kaartprojectiesystemen in België

ördinaten bezitten een positieve verschuiving van ongeveer een kilometer in  $x$  en  $y$  ten opzichte van de Lambert 1972-coördinaten.

De kwaliteit van de Lambert-2008 coördinaten is identiek aan deze van de hoog nauwkeurige GPS opmetingen waarmee het BeRef netwerk werd opgebouwd, aangezien deze kaartcoördinaten het resultaat zijn van een zuivere wiskundige projectie toegepast op de referentieellipsoïde GRS80. Het berekenen van Lambert-1972 coördinaten vanuit GPS opmetingen steunt op een transformatie tussen de beide referentieellipsoïden en vervormt de nauwkeurige GPS opmetingen naar de minder nauwkeurige klassieke opmetingen gebruikt bij het uitwerken van BD72.

## Hoofdstuk 2

# De theodoliet

### Inhoudsopgave

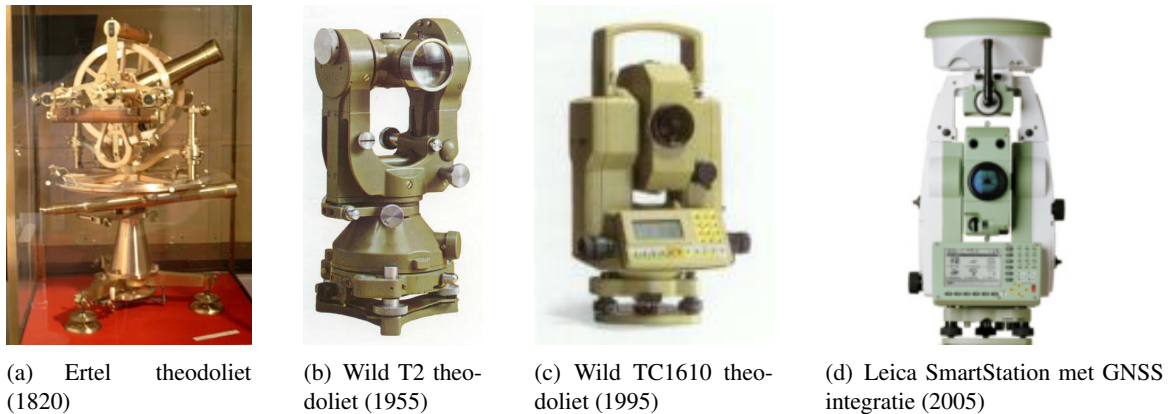
---

<b>2.1</b>	<b>Algemeenheden</b>	<b>20</b>
<b>2.2</b>	<b>De anatomie van een theodoliet</b>	<b>21</b>
<b>2.3</b>	<b>De elektronische hoekmeting</b>	<b>27</b>
2.3.1	De statische of absolute elektronische hoekmeting	27
2.3.2	De dynamische hoekmeting	29
2.3.3	De incrementele elektronische hoekmeting	31
2.3.4	De verticale cirkelrand	32
2.3.5	Verhoging van de nauwkeurigheid van de elektronische aflezing	32
<b>2.4</b>	<b>De instrumentele fouten van een theodoliet</b>	<b>33</b>
<b>2.5</b>	<b>Het meten van afstanden</b>	<b>37</b>
2.5.1	De reductie van de gemeten schuine afstand	38
2.5.2	Historische situering van elektronische afstandsmeting	39
2.5.3	Meetprincipe	40
2.5.4	Fouten bij elektronische afstandsmetingen	46

---

### 2.1 Algemeenheden

De theodoliet is het basisapparaat voor het topografisch werk en laat toe hoekmetingen in het horizontaal en in het verticaal vlak uit te voeren. Actueel worden de meeste theodolieten uitgerust met een afstandsmeter (Sectie ?? op pagina ??) : deze toestellen worden door de term **totaalstation** aangeduid. De theodoliet heeft een grondige evolutie gekend sedert haar conceptie (Figuur 2.1 op de volgende pagina) : de uitwendige gegradueerde cirkels werden naar het inwendige van de theodoliet verplaatst, het vaste objectief werd vervangen door een objectief met veranderlijke instellens en de elektronica assisteert de operator tijdens de metingen en laat toe een groot aantal taken te automatiseren en de theodoliet uit te bouwen tot een rekentoestel bruikbaar in het terrein. De aflezing van de horizontale of verticale hoek gebeurt met behulp van optische hulpmiddelen in een **optische theodoliet** (ook wel *optisch-mechanische* of *opto-mechanische* theodoliet genoemd, vb. Wild T2) die een beeld vormen van de cirkelranden gegradueerd in honderddelige graden of gon (1 cirkel = 400<sup>g</sup>) of in zestigdelige



**Figuur 2.1:** Beperkt overzicht van de evolutie van de theodoliet tot totaalstation

graden (1 cirkel =  $360^\circ$ ). Vroeger militaire modellen maakten gebruik van een onderverdeling in duizendsten (1 cirkel =  $6400''$ ) maar zijn buiten gebruik geraakt. De aflezing gebeurt via een stelsel van spiegels, prisma's en een afleeskijker excentrisch opgesteld naast de topografische kijker. De moderne toestellen behoren tot de **elektro-optische theodolieten** (vb Leica TC2002) waar de lezing van de cirkelrand gebeurt middels optische sensoren. De **gemotoriseerde theodolieten** kunnen rond hun assen draaien door gebruik van servo-motoren. Dit biedt een groter gebruikcomfort en men kan de kijker oriënteren volgens een vooraf bepaalde of ingestelde hoek. De **gerobotiseerde theodoliet** zoekt bovendien automatisch een merkteken op en voert het fijn richten zelfstandig uit (bvb. door gebruik te maken van een infrarood straal en een  $360^\circ$  prisma).

## 2.2 De anatomie van een theodoliet

### De assen van een theodoliet

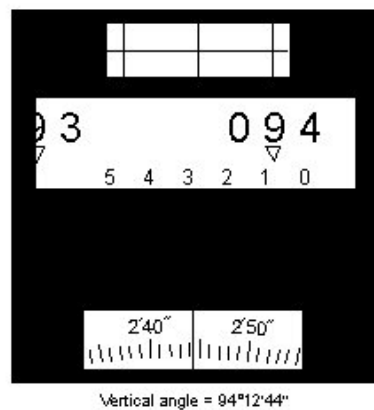
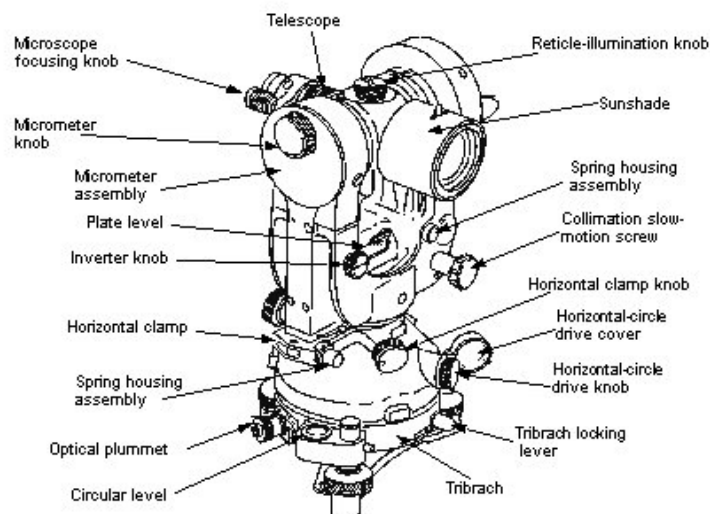
De ideale theodoliet is samengesteld uit 3 onderling loodrechte assen (Figuur 2.3 op pagina 23) :

- de **primaire as** of **hoofdass** (V) die na het *in station brengen* of *opstellen* samenvalt met de lokale verticaal ;
- de **secundaire as** of de **scharnieras** of de **kipas** (H) die na het opstellen horizontaal gelegen is ;
- de **tertiaire as** of de **vizierlijn** van de topografische kijker (S).

De **alhidade** is het bovenste gedeelte van de theodoliet dat de topografische kijker bevat en kan draaien rond de primaire as. Het onderste gedeelte wordt de **limbus** genoemd en bevat de horizontale cirkelrand.

Met een *rerator* of *rerator* theodoliet (Figuur 2.4(a) op pagina 23) kan men zowel de alhidade als de limbus (maw. de horizontale cirkelrand) rechtstreeks vastklemmen op de primaire as.

Bij een *repetitor* of *repetitor* theodoliet (Figuur 2.4(b) op pagina 23) kan enkel de limbus op de primaire as geklemd worden, terwijl de alhidade consolidair met de limbus gemaakt kan worden. De *algemene beweging* wordt bekomen wanneer de alhidade bevestigd wordt op de limbus terwijl deze laatste vrij kan bewegen ten opzichte van de primaire as, terwijl de *particu-*

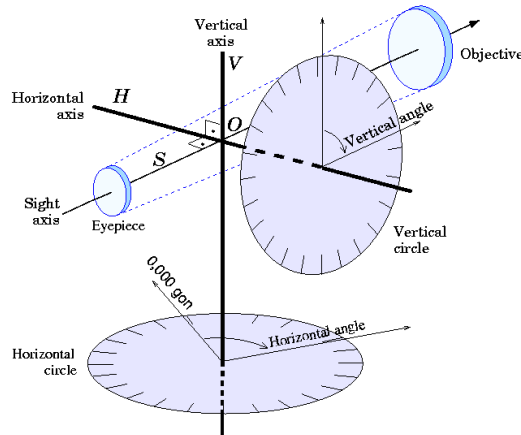


**Figuur 2.2:** De opbouw en hoekmeting van een optisch-mechanische theodoliet

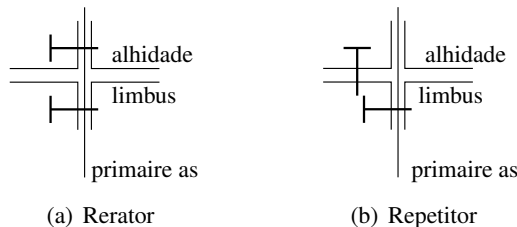
*liere beweging* overeenstemt met een limbus vastgeklemd aan de primaire as en de alhidade vrij beweegt ten opzichte van de limbus.

### De topografische kijker

Klassiek werden de theodolieten uitgerust met kijkers van het merk PORRO : dit waren *analogetische kijkers*. De topografische kijker laat toe naar merktekens in het terrein te richten. Een topografische kijker is een optische kijker samengesteld uit een **objectief** en een **oculair** bijkomend uitgerust met een **kruisdraad** (Figuur 2.5 op pagina 24). Het objectief is een geheel van lenzen dat convergerend werkt en een grote brandpuntsafstand heeft. Het beeld van het objectief is omgekeerd en wordt in het vlak van de kruisdraad gevormd. Bij moderne toestellen wordt tussen het objectief en de kruisdraad een omkeerprisma geplaatst zodat de waarnemer een rechtopstaand beeld ziet. Het oculair is een convergerende lens met kleine brandpuntsafstand en werkt als een vergrootglas waarmee de kruisdraden en het beeld van het voorwerp gevormd door het objectief vergroot wordt weergegeven voor de waarnemer. De centrale instellens van het objectief laat toe om de brandpuntsafstand van het objectief te veranderen terwijl de vergroting nagenoeg ongewijzigd blijft. De kruisdraad is aangebracht op een glazen plaat en bevindt



**Figuur 2.3:** Schematische voorstelling van de assen en cirkelranden van een theodoliet  
[Bron: wikipedia]



**Figuur 2.4:** Schematische opbouw van een reiterator en een repetitor theodoliet

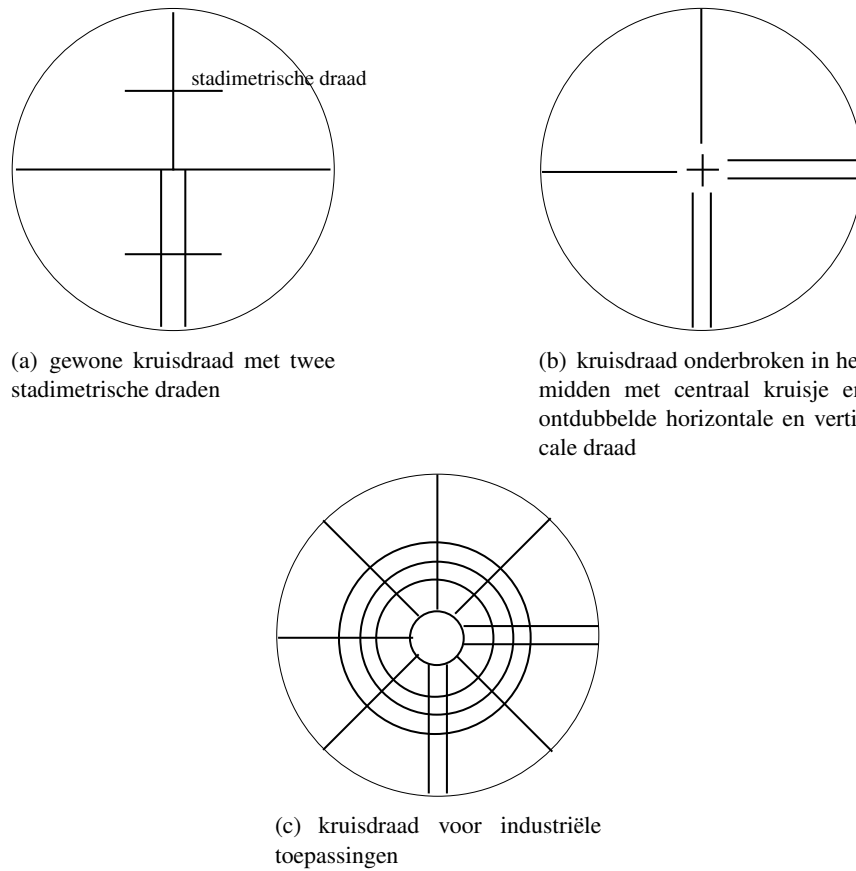
zich voor het oculair. De kruisdraad bestaat uit verticale en horizontale draden en laat toe een specifiek punt in het terrein te viseren.

Men onderscheidt twee families topografische kijkers :

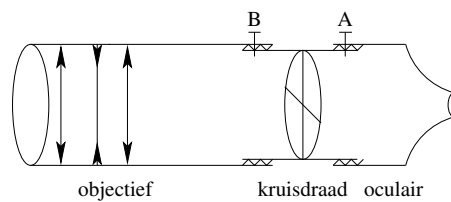
1. De eerste familie topografische kijkers of Kepler kijkers worden gekarakteriseerd door een vast objectief (dwz. samengesteld uit een aantal lenzen die onderling een vaste positie innemen) en een beweegbare kruisdraad (Figuur 2.6 op de pagina hierna) ; Deze topografische kijkers zijn verouderd en worden nagenoeg niet meer gebruikt.
2. de tweede familie topografische kijkers of kijkers met centrale instellens zijn uitgerust met een mobiel objectief (zoom dispositief) en een kruisdraad ingebouwd op een vaste positie (Figuur 2.7 op de volgende pagina). De brandpuntsafstand van het objectief verandert met de positie van het zoom gedeelte. Deze familie kijkers bieden het voordeel dat ze compacter zijn en een heldere beeldvorming toelaten. Het divergerend zoom objectief bevindt zich tussen de kruisdraad en het vast gedeelte van het objectief en laat toe het beeld gevormd door het objectief te vormen in het vlak van de kruisdraad. De constructeur draagt er zorg voor dat de primaire as gelegen is in dit vlak.

Het draaien van de kijker rond de verticale as (of primaire as) wordt het **zwenken** genoemd, rond de secundaire as spreekt men van het **kantelen** van de kijker. De samenstelling van beide bewegingen wordt de **dubbele (om)kering** of het **doorslaan** van de topografische kijker genoemd.

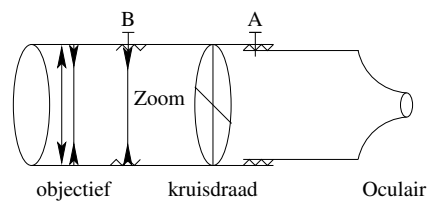




**Figuur 2.5:** Enkele voorbeelden van mogelijke kruisdraden van een theodoliet



**Figuur 2.6:** De topografische kijker van de eerste familie of Kepler kijker



**Figuur 2.7:** De topografische kijker van de tweede familie

De vergroting van de topografische kijker varieert tussen 20× en 40×.

Het richten met een topografische kijker veronderstelt dat de **subjectieve** en **objectieve** regeling correct ingesteld worden :

1. De *subjectieve* regeling past de brandpuntsafstand van de oculairlens aan aan het oog van de waarnemer. Ze is functie van de operator en beoogt een scherp beeld te vormen van de kruisdraad doorheen het oculair. Deze regeling gebeurt door de regelschroef A (Figuren 2.6 op de pagina hiervoor et 2.7 op de vorige pagina). Na deze regeling bevindt de kruisdraad zich in het voorwerpbrandpuntsvlak van het oculair ;
2. de *objectieve* regeling werkt in op de brandpuntsafstand van het objectief. Ze is onafhankelijk van de waarnemer en heeft tot doel het beeldvlak van het objectief te laten samenvallen met het vlak van de kruisdraad. Deze operatie wordt gerealiseerd met behulp van de regelschroef B (Figuren 2.6 op de pagina hiervoor et 2.7 op de vorige pagina) en wordt na de subjectieve regeling uitgevoerd.

De **beelddiepte** van het menselijk oog heeft tot gevolg dat een persoon twee beelden op verschillende afstanden (of diepte) met dezelfde scherpte waar te nemen. Het is dus mogelijk dat, na een verzorgde subjectieve regeling, de waarnemer zowel het beeld komende van het objectief als de kruisdraad scherp waarneemt, hoewel ze beide niet in hetzelfde vlak gelegen zijn : men spreekt van een parallax tussen (a) het beeld van het objectief en (b) de kruisdraad. Hiervan kan men zich overtuigen door het oog te bewegen achter het oculair. Wanneer de parallax aanwezig is, zal het beeld van het objectief bewegen ten opzichte van de kruisdraad. Men kan hieraan verhelpen door bij voorkeur de objectieve regeling aan te passen tot de parallax verdwijnt. Door het effect van de beelddiepte kan men eventueel de subjectieve regeling aanpassen.

### De cirkelranden van een theodoliet

Een theodoliet is uitgerust met twee cirkelranden : de **horizontale cirkelrand** en de **verticale cirkelrand**. Deze cirkelranden zijn vrij klein en worden gecentreerd op hun respectieve referentieassen. De kwaliteitscontrole tijdens het fabricatieproces is streng wat een constructieprecisie van het niveau van de micrometer inhoudt.

Bij de opto-mechanische theodolieten gebeurt de aflezing door middel van een coïncidentie micrometer waarbij de (micrometer)schaal op transparante cirkelranden gegraveerd is (Figuur 2.2 op pagina 22).

Elektro-optische theodolieten automatiseren de lezing van de hoekwaarde. Volgens de constructeur worden hiertoe verschillende technieken ingezet. Er bestaan meerdere technische implementaties voor het uitvoeren van een richtingsmeting :

1. De **statische of absolute methode** maakt gebruik van een coderingssysteem aangebracht op de cirkelrand. De cirkelrand is onbeweeglijk ten opzichte van de primaire as voor het uitvoeren van horizontale richtingsmetingen en onbeweeglijk ten opzichte van de secundaire as voor de verticale richtingsmetingen.
2. De **dynamische methode** verricht fasemetingen terwijl de cirkelrand aan een constante snelheid draait rond de respectieve as.
3. De **incrementele methode** meet de variaties van de lezingen op een gecodeerde cirkelrand die vast verbonden is met het toestel.

De elektronische hoekmeting wordt gedetailleerd in Sectie 2.3 op pagina 27.

### De nivellen van een theodoliet

Het doel van een nivelle is de horizontaliteit van een vlak of de verticaliteit van een rechte te realiseren. De meest voorkomende nivellen zijn bolvormig of cilindrisch :

1. de **sferische nivelle** of **doosniveau** wordt gekenmerkt door een bolvormige kap die gedeeltelijk gevuld is met een vloeistof met laag vriespunt (ether, alcohol, ...). Een gasbel bevindt zich steeds op de hoogste positie van de bolvormige kap. Op deze kap is een referentiecirkel gegraveerd die toelaat de horizontaliteit van het vlak waarop de nivelle rust te beoordelen. De kromtestraal van de bolvormige kap is relatief klein waardoor de sferische nivelle een beperkte precisie heeft. Deze precisie is echter voldoende om een grove horizontaliteit (of verticaliteit) te bekomen ;
2. de **cilindrische nivelle** of **buisniveau** bestaat uit een gedeelte van een cilinder of torus waarvan het inwendige gedeelte een kromtestraal kan vertonen van enkele tientallen meter. Hierdoor is ze veel preciezer dan de sferische nivelle. Op de bovenzijde van de cilindrische kap wordt een graduatie aangebracht waarvan de tussenafstand meestal gelijk is aan 2 mm.

### Het schietlood

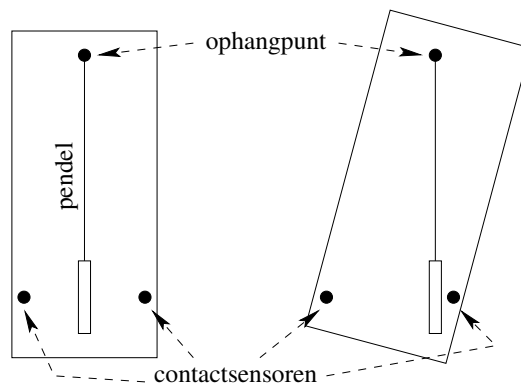
Het optisch schietlood van een theodoliet wordt gevormd door een kleine kijker (voorzien van een elleboog) waardoor men het punt op de grond waarop men het toestel wenst te centreren, kan waarnemen. Wanneer de theodoliet *in station staat* dan stemt de richtlijn van het optisch schietlood overeen met de lokale verticale.

### De (neiging)compensatoren

Compensatoren meten de afwijking van de horizontale of verticale assen van het meetinstrument door de oriëntatie van deze assen te vergelijken met de zwaartekracht. In elektronische toestellen kunnen deze afwijkingen digitaal verwerkt worden om de meetwaarden te corrigeren voor de scheefstand van de as.

De (neiging)compensatoren baseren zich op mechanische pendelsystemen of maken gebruik van vloeistofniveaus.

1. De **mechanische pendelcompensator** wordt voorgesteld op figuur 2.8. Een mechanische slinger oriënteert zich volgens de richting van de lokale verticaal. Wanneer de afwijking



**Figuur 2.8:** Principewerking van een pendelcompensator

ten opzichte van deze vertikaal te groot wordt, komt de slinger in contact met de contact-sensoren die een signaal genereren.

2. De **vloeistof compensator**

## 2.3 De elektronische hoekmeting

Voor het uitvoeren van een elektronische hoekmeting wordt de becijfering van de cirkelrand binair gecodeerd en afgetast door lichtgevoelige fotocellen. De nulzezing van de cirkelrand kan elektronisch ingesteld worden volgens een willekeurige richting. Een absolute binaire codering van de cirkelrand wordt toegepast bij de **statische of absolute methode** terwijl een incrementele binaire codering aangewend wordt bij de **dynamische en incrementele methode**.

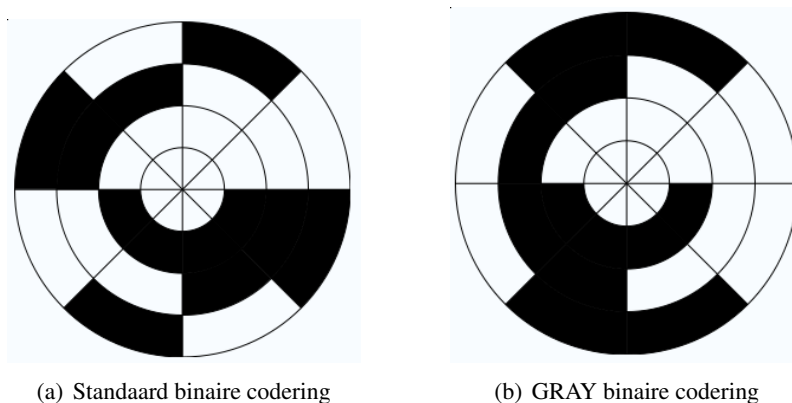
De uitgelezen waarde  $l$  is een discrete binaire voorstelling gekarakteriseerd door een bijhorende afleesnauwkeurigheid van de analoge hoekwaarde of richting die we wensen te meten. De lezing  $l$  of meetwaarde wordt gevormd door de combinatie van een grove lezing  $a$  te combineren met een fijnlezing  $r$ :

$$l = a + r$$

waarbij  $a$  en  $r$  door twee verschillende processen wordt bepaald. De grove lezing  $a$  wordt bepaald door de binaire codering terwijl de fijnaflezing bekomen wordt door interpolatie.

### 2.3.1 De statische of absolute elektronische hoekmeting

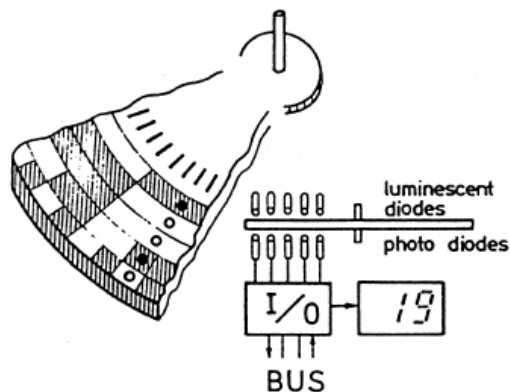
De statische of absolute elektronische hoekmeting maakt gebruik van een absolute binaire codering van de cirkelrand. (Figuur 2.9). Bij een theodoliet bestaat de constructie uit een optisch gecodeer-



**Figuur 2.9:** De absolute codering van een cirkelrand in 3 bits

de cirkelrand (diameter ongeveer 10cm) waarvan de rotatie wordt bepaald ten opzichte van een U-vormige afleesarm. De afleesarm is voorzien van lichtgevende diodes op de ene zijde en lichtgevoelige receptoren op de andere zijde en scant hiermee de binaire code (Figuur 2.10 op de pagina hierna). Een bepaalde stand van de afleesarm tot de cirkelrand komt overeen met een unieke combinatie van transparante en niet-transparante velden. Deze unieke combinatie wordt door de microprocessor omgezet in een richtingswaarde. De resolutie en de nauwkeurigheid worden bepaald door het aantal sporen op de cirkelrand en dus door het aantal diodes. Het aantal velden op elk spoor van de cirkelrand hangt hier uiteraard mee samen.

## 2.3 De statische of absolute elektronische hoekmeting



**Figuur 2.10:** De optisch gecodeerde cirkelrand en afleesarm

De cirkelrand wordt over verschillende sporen  $n$  (Figuur 2.9(a) op de vorige pagina, met  $n = 3$ ) binair gecodeerd door een specifieke opeenvolging van transparante en niet-transparante zones. Deze cirkelrand is meestal vast verbonden met de (primaire of secundaire as) terwijl de afleesarm consolidaair beweegt met de kijker (horizontaal of verticaal). Wanneer de diodes tegenover een transparante zone staan, wordt een signaal gedetecteerd (binaire waarde "0öf öff"), voor een niet-transparante zone wordt het signaal onderbroken (binaire waarde "1öf ön"). Wanneer er  $n = 3$  detectoren worden gebruikt, wordt de cirkelrand gecodeerd in  $2^3 = 8$  segmenten van ieder  $50^\circ$  resolutie. De codering wordt in tabel 2.1 samengevat. De standaard binaire codering vertoont echter een groot nadeel. In de

Sector	Contact 1	Contact 2	Contact 3	Lezing
1	off	off	off	$0^\circ \dots 50^\circ$
2	off	off	on	$50^\circ \dots 100^\circ$
3	off	on	off	$100^\circ \dots 150^\circ$
4	off	on	on	$150^\circ \dots 200^\circ$
5	on	off	off	$200^\circ \dots 250^\circ$
6	on	off	on	$250^\circ \dots 300^\circ$
7	on	on	off	$300^\circ \dots 350^\circ$
8	on	on	on	$350^\circ \dots 400^\circ$

**Tabel 2.1:** Standaard binaire codering

praktijk is het onmogelijk om alle  $n$  detectoren perfect op te lijnen volgens een radiaal van de cirkelrand. De tabel 2.1 toont dat bij sommige overgangen minstens 2 detectoren van waarde veranderen. Wanneer de veranderingen van de overeenstemmende binaire waarden door een foutieve oplijning niet gelijktijdig plaatsgrijpt, dan verspringt de uitgelezen waarde volgens een niet logisch patroon<sup>1</sup>. Om dit te vermijden wordt de standaard binaire codering vervangen door de Gray codering (Figuur 2.9(b) op de pagina hiervoor) waarbij er voor iedere sector overgang juist één detector van binaire waarde verandert. Dit verzekert een logische opeenvolging van de gelezen richtingen.

<sup>1</sup>Zo kan de overgang van sector 6 naar sector 7 de opeenvolgende aflezingswaarden  $250^\circ \dots 300^\circ$ ,  $350^\circ \dots 400^\circ$ ,  $300^\circ \dots 350^\circ$ .

## 2.3 De dynamische hoekmeting

De resolutie van de hoeklezing neemt toe met een uitbreiding van het aantal detectoren. Wanneer er  $n = 16$  detectoren gebruikt worden, wordt de resolutie van een sector bepaald door :

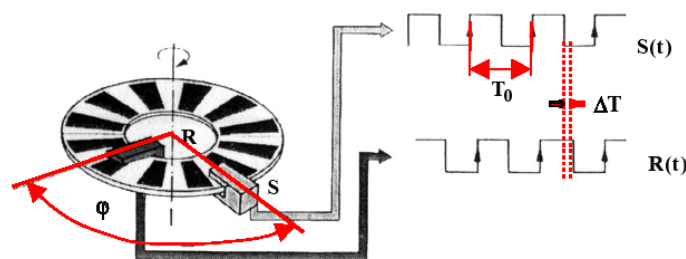
$$\frac{400^{\text{g}}}{2^{n=16}} = \frac{400^{\text{g}}}{65536} \approx 6,1 \cdot 10^{-3} = 61^{\text{cc}}$$

Dit veronderstelt echter dat voor een cirkelrand met straal 50 mm de veldbreedte van een transparante of niet-transparante zone circa  $5 \mu\text{m}$  bedraagt. Dergelijke waarden zijn in de praktijk niet haalbaar. Dit kan echter opgevangen worden door een elektronische interpolatie van de gedetecteerde lichtintensiteit door te voeren.

Een praktisch voordeel van een toestel met absolute codering van de hoeklezingen is dat steeds een absolute richtingswaarde wordt afgelezen, zelfs al werd het toestel uitgeschakeld en verdraaid. De vrij grote complexiteit van dit systeem en de hoge eisen met betrekking tot de dimensionale stabiliteit van de afleesarm en de cirkelrand zijn nadelen die de kostprijs van het afleessysteem nadelig beïnvloeden.

### 2.3.2 De dynamische hoekmeting

De dynamische hoekmetingen steunen op een draaiende glazen cirkelrand onderverdeeld in een opeenvolging van transparante en niet-transparante lijnen vergelijkbaar met de spaken van een fietswiel. Deze cirkelrand voert een volledige rotatie uit bij iedere hoekmeting en wordt tijdens deze rotatie afgetast door een vaste  $L_S$  en mobiele  $L_R$  lichtdetector (Figuur 2.11). De mobiele detector  $L_R$  is vast verbonden met de alhidade voor horizontale hoekmetingen en met de secundaire as voor de verticale hoekmetingen. De uitgangssignalen van de detectoren vormen een beeld van de cirkelrand in functie van de tijd. De vaste detector  $L_S$  bepaalt de nul-oriëntatie van de cirkelrand terwijl de mobiele detector  $L_R$  de lezing aangeeft naar het gemikte punt. De hoek  $\varphi$  tussen deze beide richtingen stemt overeen met de uit te voeren lezing  $l$  naar het geviseerde punt in het terrein en wordt in het afleesvenster getoond.



**Figuur 2.11:** De dynamische hoekmeting

De informatie betreffende de grootte van de hoek  $\varphi$  ligt vervat in de verhouding tussen de fase van de uitgangssignalen  $L_S$  en  $L_R$ . Wanneer de beide detectoren volgens dezelfde richting georiënteerd zijn of gelegen zijn op een (boog)afstand die een geheel veelvoud is van de periode<sup>2</sup>  $\varphi_0$ , dan zijn hun on-

<sup>2</sup>De periode  $\varphi_0$  stemt overeen met de hoekafstand van de detectoren gelijk aan de booglengte tussen een koppel transparant/niet-transparant onderverdeling van de cirkelrand.

derlinge uitgangssignalen niet te onderscheiden. Dit wil zeggen dat de uitgangssignalen dezelfde fase hebben (men zegt dat *beide fasen opgelijnd zijn*) et dat het te bepalen faseverschil  $\Delta\varphi$  gelijk aan nul is. Wanneer het signaal van  $L_R$  gedefaseerd is ten opzichte van het signaal  $L_S$ , dan registreert de detector  $L_R$  de doorgang van een onderverdeling van de draaiende cirkelrand met een zekere tijdvertraging  $\Delta T$  ten opzichte van de detector  $L_S$ . Deze tijdvertraging is een maat voor de fijnlezing van de hoek die wordt gemeten en is evenredig met het fractionele hoekverschil  $\Delta\varphi$  dat onderdeel is van de te lezen hoekwaarde.

Het fractionele hoekdeel  $\Delta\varphi$  verhoudt zich tot de periode  $\varphi_0$  zoals  $\Delta T$  zich verhoudt tot de periode  $T_0$ .  $\Delta T$  is het tijdsinterval dat verloopt tussen de detectie van de doorgang van een willekeurige verdelingstreep door  $L_S$  en de detectie van de volgende doorgang van een verdelingstreep door  $L_R$ . De hoekmeting  $\Delta\varphi$  wordt op deze manier omgevormd tot een tijdmeting. De periode  $T_0$  wordt bepaald door de rotatiesnelheid van de cirkelrand en het aantal onderverdelingen. De verhouding  $\frac{\varphi}{\varphi_0} = \frac{T}{T_0}$  is dus enkel geldig binnen één interval  $[0 \dots \varphi_0[$  en de correcte bepaling van de hoek  $\varphi$  of de overeenstemmende tijd  $T$  gaat gepaard met het oplossen van de *faseonbepaaldheid*  $n$  van de meting : de hoekmeting overeenstemmend met  $\Delta\varphi$  is bepaald op een geheel aantal perioden  $n\varphi_0$  na :

$$\varphi = n \times \varphi_0 + \frac{\Delta T}{T_0} \times \varphi_0$$

De meting wordt dus opgesplitst in een grove meting  $r = n \times \varphi_0$  en een fijnlezing  $a = \Delta\varphi$  (of  $\Delta T$ ). De grove meting  $n$  wordt bekomen door het aantal onderverdelingen te tellen die verlopen tussen de doorgang doorheen de vaste detector  $L_S$  en de mobiele detector  $L_R$ . Hiervoor kan men gebruik maken van een koppel onderverdelingen die volledig transparant zijn en die de start en het einde van de grove telling bepalen.

Het fractionele hoekdeel  $\Delta\varphi$  herhaalt zich bij iedere doorgang van een transparant/niet-transparant deel en kan bijgevolg bij iedere doorgang gemeten worden. Door het gemiddelde te nemen van de metingen over ieder transparant/niet-transparant koppel voert de dynamische hoekmeting de techniek van meerdere randstanden toe (Sectie 2.4 op pagina 33).

De meetprecisie voor de dynamische of incrementele elektronische hoekmeting steunt op de precisie waarmee een fasemeting uitgevoerd kan worden. Stel dat precisie van de fasemeting  $\sigma = 10^{-5}$  en er 1024 zones (512 transparant/niet-transparant delen) op de cirkelrand zijn aangebracht, dan is de precisie van de hoekmeting bepaald door :

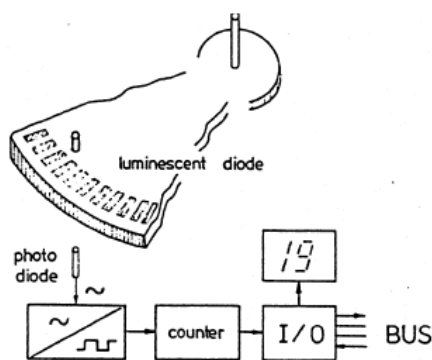
$$\sigma_{\Delta\varphi} = \frac{2\pi}{512} \times \sigma = 0,12 \cdot 10^{-6}$$

Dit is echter een theoretische precisie die in de praktijk moeilijk haalbaar is aangezien een onderverdeling op een cirkelschijf van 26mm overeenstemt met een afstand van ongeveer 32mm ingenomen door het transparant/niet-transparant deel. Een kleine constructiefout van de cirkelrand introduceert daardoor fouten die groter dan deze theoretische precisie zijn.

Het grote voordeel van de elektro-optische theodoliet is enerzijds de tijdwinst bij iedere hoekmeting en anderzijds het automatisch opheffen van afleesfouten en instrumentale fouten.

### 2.3.3 De incrementele elektronische hoekmeting

De meeste elektronische theodolieten zijn tegenwoordig voorzien van een randverdeling (Figuur 2.12) bestaande uit een onbecijferd raster van afwisselend transparante en niet-transparante radiale lijnen (zwarte en witte blokjes met een vaste onderlinge afstand). Hierbij wordt het aantal lijnen (blokjes) geteld dat voorbij een fotocel passeert bij het verdraaien van de kijker. Men meet dus rechtstreeks de verandering van richting, vandaar dat men spreekt van **incrementeel gecodeerde randen**. Een verandering van richting geeft per definitie een hoekwaarde zodat bij deze methode hoeken en geen richtingen meet.



**Figuur 2.12:** De incrementele elektronische hoekmeting

Bij het opstarten van het toestel bedraagt de openingsrichting nul of de laatst gemeten waarde, afhankelijk van het toestel. De gebruiker kan steeds een andere richtingswaarde instellen via het controlepaneel. Bij het verdraaien van het toestel, wordt de hoek van de verdraaiing bepaald door het toestel en, afhankelijk van de draaizin, bijgeteld of afgetrokken van de waarde van de openingsrichting.

Een praktisch nadeel van deze werkwijze is dat, telkens het toestel wordt heropgestart, de openingsrichting opnieuw nul bedraagt. Indien de gebruiker richtingsmetingen wenst uit te voeren, dient hij, bij het inschakelen van het toestel een bekende en gematerialiseerde richting te viseren. Zelfs indien het toestel in staat is op te starten met de laatst afgelezen richtingswaarde als openingsrichting, dan nog bezit de gebruiker geen enkele garantie dat de kijker niet geroteerd werd terwijl het toestel uitgeschakeld was. Het viseren van een bekende richting blijft dan noodzakelijk.

Sommige fabrikanten zorgen er echter voor dat de gebruiker, mits het toepassen van een kleine kunstgreep, toch absolute richtingen kan bepalen. Hiertoe voorzien zij een nulmerkteken, gekoppeld aan het onderstel van het toestel. In dat geval dient de gebruiker, bij het opstarten van het toestel, de kijker te roteren om zijn eerste as totdat het nulmerkteken wordt gedetecteerd. Bij het heropstarten van het toestel dient nu geen bekende richting meer te worden geviseerd, zelfs indien de kijker geroteerd werd bij uitgeschakeld toestel. Zolang het onderstel van het toestel niet wordt verplaatst, zullen alle gemeten horizontale richtingen onderling consistent zijn (dit wil zeggen gemeten ten opzichte van dezelfde horizontale referentie-richting). Analoog kan het nulpunt van de verticale rand worden ingesteld door de kijker om zijn tweede as doorheen de verticale of de horizontale stand te draaien.



Zoals hoger vermeld, bestaat de hoekmeting uit het tellen van de spanningswisselingen die een fotodiode genereert als gevolg van de schommeling van de belichtingsintensiteit die op de diode invalt. Deze schommelingen worden veroorzaakt doordat licht, afkomstig van een lichtgevende diode, door het blokjespatroon van de cirkelrand gedeeltelijk wordt tegengehouden bij het verdraaien van de kijker van het ene punt naar het andere.

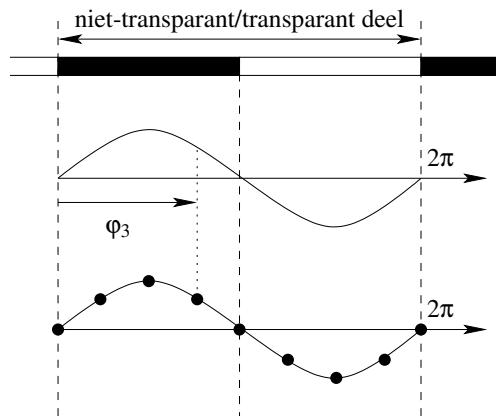
Aangezien de fotodiode onder het raster een verschillende lichtintensiteit waarneemt afhankelijk van de positie van de lichtgevende diode (direct, gedeeltelijk of helemaal niet boven een transparant veld van het blokjespatroon), neemt de fotodiode benaderend een sinusvormige intensiteitsmodulatie van het uitgezonden licht waar tijdens het draaien van de cirkelrand ten overstaan van de lichtgevende diode. Iedere opeenvolging van een transparant/niet-transparant veld veroorzaakt één periode van een sinusvormig signaal. De fotodiode is gekoppeld aan een teller die bijhoudt hoeveel periodes van het sinusvormig signaal zijn opgetreden bij draaiing van het toestel rond de eerste as in het geval van een horizontale hoekbepaling en rond de tweede as in het geval van een verticale hoekbepaling. De resolutie van de toestellen wordt bepaald door het aantal blokjes of lijnen op de cirkelrand. Een raster van bijvoorbeeld 11 000 zwarte lijnen, met ertussen even brede transparante velden, levert een resolutie van  $0,018^g$  0,018 gon of  $1'$ . Op een cirkelrand met een diameter van 100 mm komt dit overeen met een lijnbreedte van ongeveer 0,014 mm.

### 2.3.4 De verticale cirkelrand

De verticale cirkelrand is solidair met de secundaire as. Haar mobiele index  $L_R$  volgt de kantelbeweging van de topografische kijker terwijl de vaste index  $L_S$  vast verbonden is met de secundaire as. Om een elevatie- of depressiehoek te meten moet men een richtlijn materialiseren die gelegen is in het horizontale vlak van het stationspunt. Hiervoor is de theodoliet uitgerust met een cilindrische nivelle die solidair is met de topografische kijker. Deze nivelle kan gemonteerd worden op de topografische kijker of op de steun van de index van de verticale cirkelrand. De moderne elektro-optische theodoliet vervangen deze nivelle door een compensator systeem dat de invloed van een verticaliteitsfout van de primaire as in rekening brengt.

### 2.3.5 Verhoging van de nauwkeurigheid van de elektronische aflezing

De detectie door de detectoren is geen zuivere binaire functie doordat de opeenvolging van transparante en niet-transparante zones een sinus-achtige vervorming van de digitalisering veroorzaakt. Hierdoor kan de resolutie van de elektronische aflezing verbeterd worden door het toepassen van een elektronische interpolatietechniek die de rol van de optische micrometer bij een optische theodoliet vervult. Figuur 2.13 op de pagina hierna toont het principe van een eenvoudige elektronische interpolatie toegepast bij theodolieten van lagere tot gemiddelde nauwkeurigheid. Deze theodolieten gebruiken gewoonlijk de incrementele methode voor het aftasten van de cirkelranden. Bij draaiing van de cirkelrand ten overstaan van de scanner over één transparant/niet-transparant veld, ontvangt de fotodiode één periode van een sinusvormig lichtsignaal. Het aantal periodes wordt bijgehouden in een teller voor de ruwe meting. De lengte van de periode van signaal is  $2\pi$  of  $\lambda$ . De fasehoek  $\varphi_i$  is een fractie van  $2\pi$  en stemt overeen met verschillende intensiteiten van het signaal. Een eenvoudige



**Figuur 2.13:** De elektronische interpolatie

interpolator kan acht verschillende posities binnen de periode van het signaal onderscheiden zodat een verfijnder meting mogelijk wordt. Zo bekomt men een resolutie van ongeveer 2 mgon of 7'' voor een cirkelrand met 11 000lijnen. Krachtiger interpolatoren kunnen enkele tientallen posities binnen de periode onderscheiden. Hierdoor kan het aantal referentiestrepen op de cirkelrand worden verminderd, wat de etsing ervan minder kritisch (kwetsbaar) maakt.

## 2.4 De instrumentele fouten van een theodoliet

Voor de analyse van de instrumentele fouten van een theodoliet maken we gebruik van het onafhankelijkheidsprincipe (Sectie 1.3.5 op pagina 14). We beperken ons tot de invloed van deze fouten op de horizontale hoekmeting aangezien de externe invloed van de verticale refractie de overwegende fout is die een verticale hoekmeting beïnvloedt.

### Opdeling van de instrumentele fouten

De instrumentele fouten kunnen in 3 categorieën gerangschikt worden :

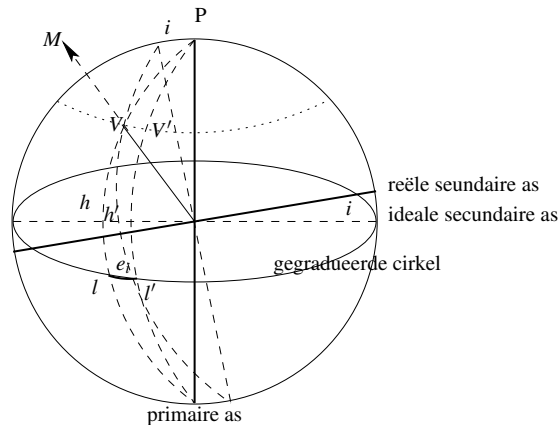
1. de **asfouten** waarvan de oorsprong ligt in het niet onderling loodrecht zijn van de verschillende assen van de theodoliet ;
2. de **graduatiefouten** inherent aan de productie van de gegraduateerde cirkels ;
3. de **excentriciteitsfouten** te wijten aan het niet snijdend zijn van de assen van de theodoliet.

### De asfouten

1. **De relatieve inclinatiefout of de spilfout  $e_i$**

Deze fout resulteert uit het niet loodrecht staan van de secundaire as ten opzichte van de primaire as.

De hoek tussen de ideale positie en de reële positie van de secundaire as wordt aangeduid door  $i$  (Figuur 2.14 op de pagina hierna). In reële omstandigheden wordt de lezing  $l'$  uitgevoerd op de horizontale gegraduateerde cirkelrand voor een gemikt punt  $M$ . Bij een ideaal instrument zou de uitgevoerde lezing de waarde  $l$  bedragen. De relatieve inclinatiefout  $e_i$



**Figuur 2.14:** De relatieve inclinatiefout

wordt bepaald door het verschil  $l' - l = e_i$ . In de boldriehoek<sup>3</sup>  $\Delta PVV'$  en  $\Delta VV'l'$  gelden de betrekkingen :

$$\frac{\sin e_i}{\sin VV'} = \frac{\sin 90^\circ}{\sin(90^\circ - h)}$$

$$\frac{\sin i}{\sin VV'} = \frac{\sin 90^\circ}{\sin h'}$$

In de benadering dat  $i \ll$ ,  $e_i \ll$  en  $h \approx h'$  bekomt men :

$$e_i = i \tan h \tag{2.1}$$

De relatieve inclinatiefout volgt een tangentiële wet geparametreerd in de elevatiehoek  $h$  naar het gemikte punt  $M$ . De fout neigt naar oneindig wanneer de elevatiehoek gaat naar  $\pm 90^\circ$  en annuleert zich wanneer de hoek  $h = 0^\circ$ .

De fout kan geëlimineerd worden door de techniek van de **dubbele omkering**, ook wel aangeduid door de **cirkel links/cirkel rechts methode (CL/CR)**. Deze techniek bestaat erin de kijker te draaien over  $200^g$  rond de secundaire as en vervolgens de alhidade te draaien rond de primaire as over  $200^g$  waarna opnieuw het punt  $M$  gemikt wordt. We bekomen een figuur die symmetrisch is volgens het vlak  $PVl$ .

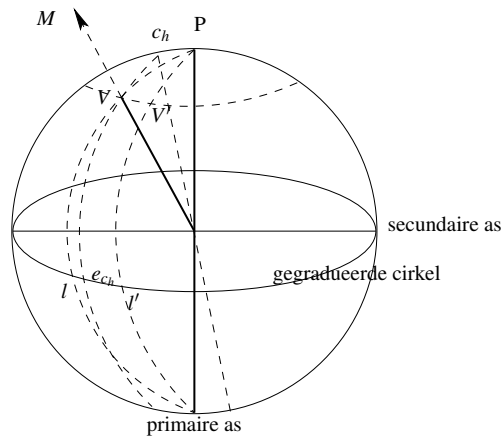
2. **De horizontale collimatiefout  $e_{c_h}$**

Deze fout treedt op doordat de vizierlijn van de topografische kijker niet loodrecht staat op de secundaire as. De vizierlijn, gematerialiseerd door de draden van de kruisdraad, sluit een hoek  $c_h$  in met het vlak dat loodrecht op de secundaire as staat (Figuur 2.15 op de volgende pagina). De overeenstemmende leesfout  $e_{c_h} = l - l'$  wordt bekomen in de boldriehoeken  $\Delta PVV'$  :

$$\frac{\sin e_{c_h}}{\sin c_h} = \frac{\sin 90^\circ}{\sin(90^\circ - h)}$$

$$e_{c_h} \approx \frac{c_h}{\cos h} \tag{2.2}$$

<sup>3</sup>De driehoeken  $\Delta PVV'$  en  $\Delta VV'l'$  zijn benaderingen van boldriehoeken aangezien de zijde  $VV'$  een boogsegment van een parallelcirkel is.



**Figuur 2.15:** De horizontale collimatiefout

Wanneer het punt  $M$  in het horizontale vlak van de kijker ligt, wordt deze fout geminimaliseerd (ze is gelijk aan de grootte van de ontregeling  $c_h$ ) en ze wordt nooit gelijk aan nul. Men kan gemakkelijk vaststellen dat de techniek CL/CR deze fout elimineert uit de metingen.

**De graduatiefouten**

In een ideaal instrument zijn de graduaties aangebracht op de cirkelranden equidistant. Door een foutieve centrering van de matris ten opzichte van de cirkelrand tijdens de fabricatie ervan, gaat deze equidistantie verloren : men stelt vast dat de graduaties in een zone van de cirkelrand verder van elkaar liggen terwijl in de diametrale zone deze graduaties dicht bij elkaar liggen. Tijdens de meting van een hoek zal de bekomen waarde te groot of te klein zijn volgens de zone van de cirkelrand waarin de aflezingen worden uitgevoerd. Deze fout kan niet door een meettechniek geëlimineerd worden maar haar grootte kan wel gereduceerd worden door toepassing van de **techniek der randstanden**.

De CL/CR techniek zorgt er voor dat de meting van de hoek  $\alpha$  tussen 2 punten plaatsgrijpt in 2 diametrale zones van de cirkelrand. De techniek van de randstanden verhoogt artificieel dit aantal zones door de oriëntatie van de cirkelrand te veranderen ten opzichte van de gemikte punten.

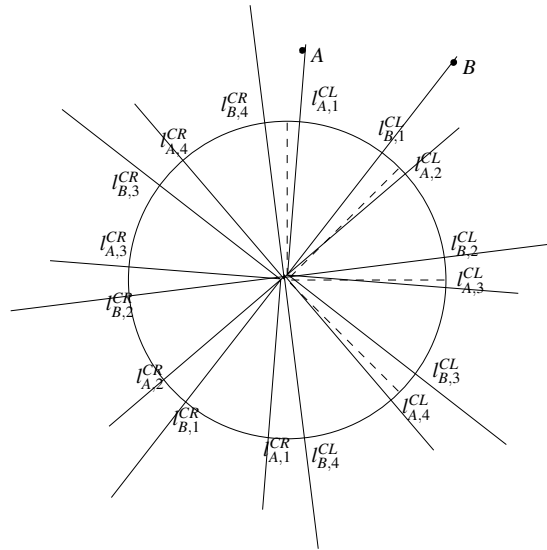
In functie van de gewenste meetprecisie kiest men het aantal randstanden,  $n$ . Dit aantal verdeelt de halve cirkelrand in  $n$  sectoren of zones. De oriëntatie van iedere zone wordt bepaald door  $200^g/n$ , per randstand wordt de lezing volgens de techniek CL/CR ook uitgevoerd in de zone bepaald door  $200^g/n + 200^g$  (Figuur 2.16 op de pagina hierna). Voor iedere randstand wordt de hoek  $\alpha$  bekomen door :

$$\alpha_i = \frac{\alpha_i^{CL} + \alpha_i^{CR}}{2} = \frac{(l_{B,i}^{CL} - l_{A,i}^{CL}) + (l_{B,i}^{CR} - l_{A,i}^{CR})}{2}$$

zodat de waarde van de hoek uiteindelijk gegeven wordt door :

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i}{n}$$

**De excentriciteitsfouten**



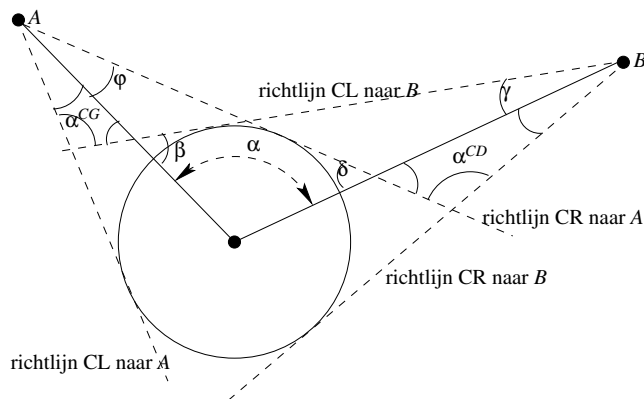
**Figuur 2.16:** De methode van de randstanden

1. *De optische as snijdt de secundaire as niet*

Deze instrumentele fout heeft geen invloed op de meting van een horizontale hoek.

2. *De optische as snijdt de primaire as niet*

Deze instrumentele fout brengt met zich mee dat de vizierlijn een cirkel (de straal van deze cirkel is gelijk aan de excentriciteitsfout) beschrijft rond de primaire as. De hoek  $\alpha$  wordt gemeten volgens de techniek CL/CR door het gemiddelde te vormen tussen  $\alpha^{CL}$  en  $\alpha^{CR}$  die niet overeenstemmen met de ideale waarden van de CL en de CR meting in afwezigheid van deze excentriciteitsfout (Figuur 2.17). Men heeft :



**Figuur 2.17:** De optische as snijdt de primaire as niet

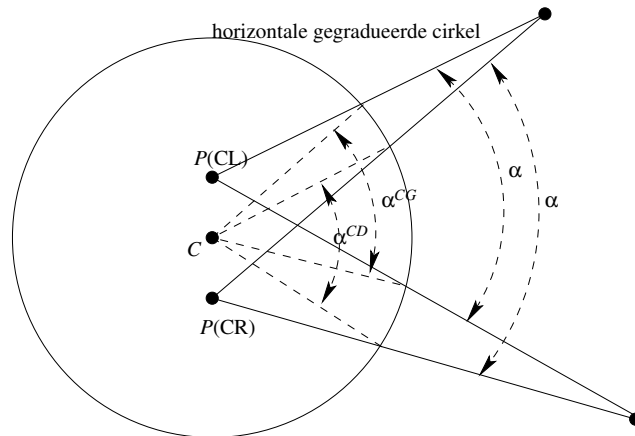
$$\alpha^{CL} + \varphi = 200^g - \beta = \alpha + \gamma$$

$$\alpha^{CR} + \gamma = 200^g - \delta = \alpha + \varphi$$

De excentriciteitsfout wordt door de CL/CR methode geëlimineerd uit de metingen.

3. *De primaire as gaat niet door het centrum van de horizontale cirkelrand*

Wanneer de primaire as  $P$  niet door het centrum  $C$  van de horizontale cirkelrand gaat, dan stemt de hoek  $\alpha^{CL}$  gelezen in CL positie niet overeen met de te lezen  $\alpha$  wanneer het een ideaal gold (Figuur 2.18). Na de techniek van de dubbele omkering, verplaatst<sup>4</sup> het



**Figuur 2.18:** De primaire as gaat niet door het centrum van de horizontale cirkelrand

centrum  $C$  van de horizontale cirkelrand zich rond de primaire as  $P$  over een hoek van  $200^g$  en leest men de hoek in CR positie, er geldt  $\alpha^{CR} \neq \alpha$ . Men kan aantonen dat :

$$\alpha = \frac{\alpha^{CL} + \alpha^{CR}}{2}$$

zodat deze instrumentele fout uit de metingen wordt geëlimineerd.

## 2.5 Het meten van afstanden

In de landmeetkunde worden afstandsmetingen mede gekenmerkt door hun helling in een vertikaal vlak, de hoogte boven het referentievlak van de meting en het gebruikte kaartprojectiesysteem. Daarom wordt eerst ingegaan op de zogenaamde reductie van afstanden tot horizontale afstanden op kaart of plan (Sectie 2.5.1 op de volgende pagina). Vervolgens wordt de eigenlijke afstandsmeting geanalyseerd. Na een historische situering (Sectie XXXX) worden de voornaamste werkingsprincipes toegelicht (Sectie XXXXX) en in Sectie XXXXX wordt aandacht besteed aan de fouten bij elektronische afstandsmeting. Tenslotte volgt in Sectie XXXXX een bespreking van de mogelijkheden tot het kalibreren van elektronische afstandsmeters. In de literatuur is de engelse term EDM (Electronic Distance Measurement) een gebruikelijk acroniem.

<sup>4</sup>Voor de eenvoud van de tekening laten we de primaire as  $P$  draaien rond het centrum  $C$ .

### 2.5.1 De reductie van de gemeten schuine afstand

De planimetrische toepassingen, waarbij de coördinaten van gematerialiseerde punten in het kaartprojectievlak bepaald worden, wordt gebruik gemaakt van de **horizontale afstand**. Deze afstand is echter de **lengte van het lijnsegment** bepaald tussen de beide punten in het projectievlak. Aan deze lengte en haar verhouding tot de effectief gemeten afstand op het topografisch oppervlak dient men een juiste interpretatie te geven.

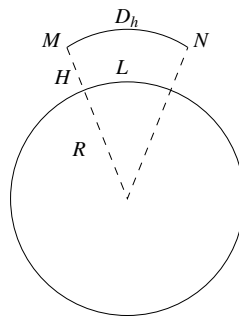
De kaartcoördinaten van de punten  $(X, Y)$  worden bekomen na toepassing van de projectievergelijkingen. Deze vergelijkingen hebben als vertrekpunt de geografische coördinaten van de punten op het mathematische model van de Aarde waarbij men impliciet veronderstelt dat deze punten op een ortometrische hoogte gelijk aan 0 m gelegen zijn.

De gemeten afstand  $D$  echter is de schuine afstand tussen de punten  $M$  en  $N$  gelegen op het topografische oppervlak.

De overgang of **reductie** van deze gemeten afstand naar de projectieafstand gebeurt in drie opeenvolgende stappen :

**de reductie voor de helling** : het berekenen van de horizontale afstand  $D_h$  van de schuine afstand  $D_s$  gebeurt principieel door de gemeten schuine afstand  $D_s$  te projecteren in het horizontale vlak van het opstelpunt. Tijdens de verschillende meettechnieken behandeld in de volgende paragrafen zullen we hier nader op ingaan ;

**de reductie naar zeeniveau** : wanneer de beide punten ver boven of ver onder het zeeniveau gelegen zijn, moet rekening gehouden worden met het feit dat de projecterende loodlijnen niet evenwijdig zijn wegens de bolvorm van de Aarde (Figuur 2.19). De punten  $M$  en het projectiepunt van



**Figuur 2.19:** De reductie naar zeeniveau

$N$  in het horizontale vlak van  $M$  liggen op een hoogte  $H$  boven de geoïde of het zeeniveau. De afstand  $L$  bepaald op zeeniveau is de afstand die naar het kaartvlak wordt geprojecteerd. Men heeft :

$$\frac{D_h}{L} = \frac{R+H}{R} = 1 + \frac{H}{R}$$

$$L = D_h - \frac{HD_h}{R} = D_h - \Delta L$$

## 2.5 Historische situering van elektronische afstandsmeting

Daar  $R$  groot is ten opzichte van  $H$  mag men in het tweede lid  $L$  door  $D_h$  vervangen en vindt men voor de correctie :

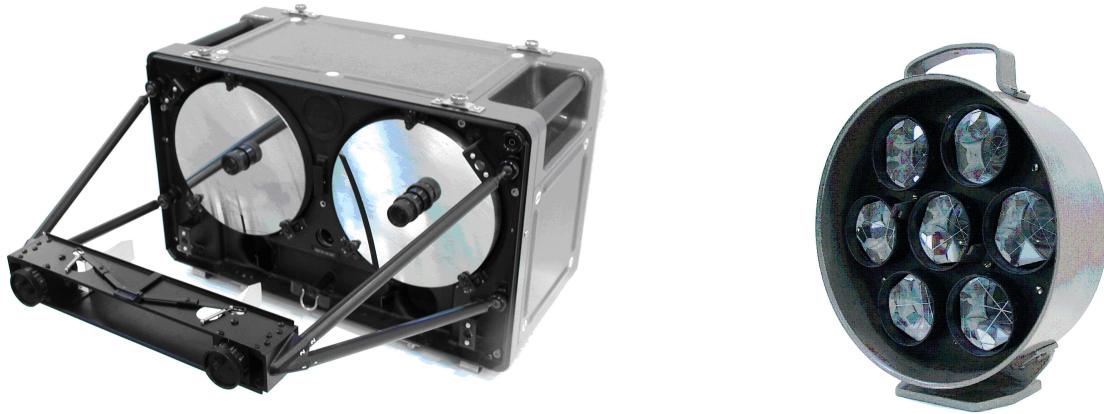
$$\Delta L = \frac{HD_h}{R}$$

Voor bijvoorbeeld  $H = 500$  m,  $R \approx 6400$  km en  $D_h = 100$  vindt men  $\Delta L = 8$  mm.

**de reductie naar het kaartvlak :** wanneer men gebruik maakt van een kaartprojectie worden de afstanden bekomen uit de kaartcoördinaten beïnvloed door de lineaire vervormingen van de gebruikte projectie. Deze afstanden moeten vermenigvuldigd worden met de lokale lineaire vergroting (Hoofdstuk ?? op pagina ??).

### 2.5.2 Historische situering van elektronische afstandsmeting

In 1941 ontwierp de Zweedse geodeet E. BERGSTAND een toestel dat in staat was om zeer nauwkeurig de lichtsnelheid in de atmosfeer te meten. Op basis van dit gegeven bouwde hij in 1947 een toestel dat afstanden mat en verkocht aan het Zweedse bedrijf AGA de licentie om dit toestel aan te passen aan de noden van de landmeter. Gevolg hiervan was dat de AGA series, *NASM* en *M Geodimeter* (acroniem voor **Geodetic Distance Meter**), die zichtbaar wit licht gebruikten, de markt van de elektro-optische toestellen domineerden tussen 1949 tot 1969. Het toestel meet afstanden tot maximaal 40 km bij nacht. Op figuur 2.20 is de AGA Geodimeter Model 3 met de bijhorende prismakrans afgebeeld, in 1956



**Figuur 2.20:** AGA Geodimeter Model 3, Museum voor de Geschiedenis van de Wetenschappen, UGent

aangekocht door de Universiteit Gent en met grote waarschijnlijkheid de eerste elektromagnetische afstandsmeter in gebruik in België.

In de jaren 50 vervaardigde de Zuid-Afrikaan T.L. WADLEY een electronische afstandsmeter, die met microgolven met een golflengte  $\lambda$  tussen 0,8cm en 10cm werkte en afstanden van maximaal 80km zowel bij dag als nacht haalde. Het eerste commerciële toestel, de *tellurometer* (Figuur 2.21 op de volgende pagina, verscheen in 1957 op de markt, het was een product van "TELLUROMETER LTD. OF SOUTH AFRICA". Haar MRA-series domineerden de markt tussen 1957 en 1967.





**Figuur 2.21:** Tellurometer MRA1

In de jaren zestig zorgde de LASER (acroniem voor Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) voor een nieuwe dynamiek binnen de elektromagnetische afstandsmeting. In 1966 was het Amerikaanse bedrijf SPECTRA PHYSICS de eerste met haar *Geodolite 3G*, om een afstandsmeter met Laser op de markt te brengen. Het jaar daarop in 1967 plaatste AGA een Spectra-Physics laser in hun M8 Geodimeter. In 1969, toen de *WILD DI10* (Figuur 2.22 op de pagina hierna) werd geïntroduceerd, kwam de grote doorbraak voor elektromagnetische afstandsmeters. Dit toestel kon immers met behulp van een infrarood laser een afstand meten van maximaal 1 km, met een nauwkeurigheid van  $\pm 1 \text{ cm}^5$  en dit binnen de minuut. Dit toestel bestond uit 2 delen : een opzetstuk voor montage op een optische theodoliet en een zware elektronica/batterij eenheid die naast het toestel werd opgesteld. Het meetprincipe is gebaseerd op het meten van **faseverschillen** tussen een (continu) uitgestuurde en een gereflecteerde elektromagnetische golf.

### 2.5.3 Meetprincipe

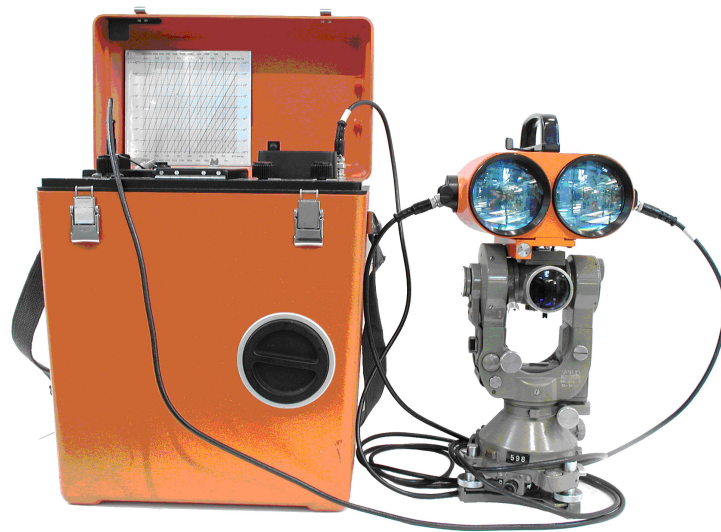
Elektromagnetische energie plant zich voort als een sinusoidale golf en doorgaat een faseverandering van  $2\pi$  radialen in één cyclus. Een elektromagnetische golf plant zich voort met de snelheid van het licht, deze snelheid is constant verondersteld in het vacuüm en bij conventie bepaald op 299 792 458 m/s. Indien men ook de frequentie kent, kan de afstand, die in één cyclus wordt afgelegd, zeer nauwkeurig bepaald worden. Deze afstand noemen we de golflengte<sup>6</sup>.

De relatie tussen de golflengte  $\lambda$  en de frequentie  $f$  wordt gegeven door de vergelijking :

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

<sup>5</sup>Laurila, S.H., 1983, *Electronic surveying in practice*, JOHN WILEY & SONS inc., New York (NY), pag. 194-195

<sup>6</sup>Saastamoinen, J.J. (e.d.), 1968, *surveyor's guide to Electromagnetic Distance Measurement*, Adam Hilger, London, pag. 5



**Figuur 2.22:** Wild-DI10, Museum voor de Geschiedenis van de Wetenschappen, UGent

met :  $\lambda$  ... de golflengte in [m],

$c$  ... de lichtsnelheid in [m/s], Aangezien de voortplantingssnelheid van elektromagne-

$f$  ... de frequentie in [Hz]

tische golven varieert volgens het voortplantingsmedium zal de overeenstemmende golflengte eveneens veranderlijk zijn. Het is dan ook beter een golf te karakteriseren door haar constante frequentie  $f$  dan door hun golflengte  $\lambda$ .

In essentie onderscheiden we twee methoden voor afstandsmeting met elektromagnetische golven<sup>7</sup> :

1. De eerste methode voert een **faseverschilmeting**. Deze methode wordt toegepast door zowel elektro-optische als microgolfsystemen, al komen deze laatste nog slechts zelden voor ;
2. Elektro-optische systemen met een generatie van pulsen en directe tijdsmeting of de zogenaamde **Time of Flight (TOF)** methode. Deze methode bood als eerste de mogelijkheid reflectorloos te meten<sup>8</sup>

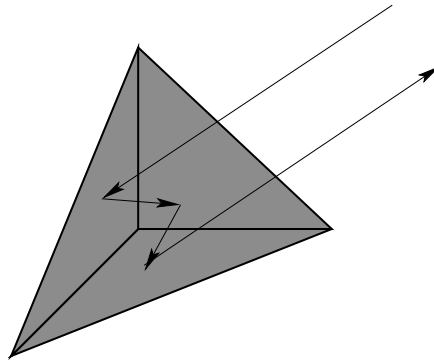
Het laatste decennium werden echter ook faseverschilmethoden ontwikkeld die reflectorloos kunnen meten. Beide systemen kunnen met zichtbaar of onzichtbaar (infrarood) laserlicht werken. Infrarood licht biedt doorgaans een beter signaal/ruisverhouding en dus een groter bereik terwijl zichtbaar licht praktische voordelen biedt bij het richten tijdens een reflectorloze afstandsmeting. Principieel geldt een faseverschilmeting als het meest nauwkeurige principe, terwijl pulssystemen in principe gekenmerkt worden door een kortere meettijd en een groter maximale bereik, zeker bij reflectorloze afstandsmeting (bijvoorbeeld voor Trimble S6 totaalstation met reflectorloze pulsmeting : 1-5 s meettijd, 300 m bereik, met reflectorloze faseverschilmeting : 3-15 s meettijd, 120 m bereik). De gebruikte

<sup>7</sup>Höglund, R., Large, P., 2002, Direct Reflex EDM technology for the Surveyor and Civil Engineer, Trimble Integrated Surveying Group, Westminster (Colorado) USA, pp. 10

<sup>8</sup>Paiva, J.V.R., s.d., Operational aspects of Reflectorless EDM Total Stations, Trimble Integrated Surveying Group, Westminster (Colorado) USA, pag. 2

laser is ofwel van klasse 2 (1 mW) ofwel, zoals tegenwoordig vaak bij reflectorloze afstandsmeters, van klasse 3a (5 mW).

Een prismareflector (Figuur 2.23) bezit als eigenschap dat de laserstraal wordt teruggekaatst in de



**Figuur 2.23:** Principe van de prismareflector

richting waar de straal vandaan komt, met name ook bij het niet loodrecht zijn van de laserstraal op het vlak van de prismareflector. Dit wordt bekomen door 3 onderling loodrechte spiegels te bundelen, waardoor de uitgaande straal evenwijdig is aan de invallende straal. De zijdelingse translatie is klein (cm-orde) en dient idealiter binnen de bundelbreedte van de laserstraal te vallen. Door de constructie blijft de afgelegde weg binnen het prisma evenlang waar ook gericht wordt.

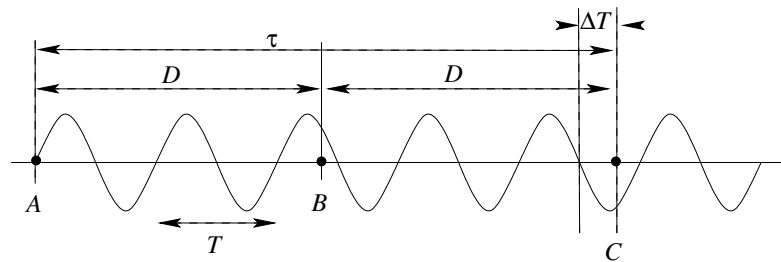
Het gebruik van een prismareflector is bij sommige totaalstations noodzakelijk, maar ook indien dit niet het geval is, verdient een meting met prismareflector de voorkeur boven een reflectorloze meting omwille van :

1. de kortere meettijd (voor Trimble S6 met pulsmeting: 1,2 sec. in plaats van 1 s tot 5 s) ;
2. het grotere maximale bereik (voor Trimble S6 met pulsmeting : 2 500m in plaats van 300m) ;
3. principieel een betere nauwkeurigheid bekomen wordt (het textuur en de kleur van het reflecterend materiaal beïnvloedt de afstandsmeting. Deze factoren worden constant gehouden bij gebruik van een prismareflector) ;
4. maar vooral de grotere betrouwbaarheid (de afstand wordt dan zeker tot de prismareflector gemeten en niet tot een willekeurig reflecterend oppervlak dat zich toevallig in het pad van de laserstraal bevindt).

### Afstandmetingen met continue elektromagnetische signalen

Voor de meting van de afstand  $A \rightarrow B$  wordt een continu elektromagnetisch signaal uitgezonden in  $A$  en na reflectie in  $B$  terug opgevangen in  $A$  (punt  $C$  op Figuur 2.24 op de pagina hierna, waarbij de fasesprong in  $B$  na reflectie niet getekend werd). De afstand  $A \rightarrow B \rightarrow C$  bevat een geheel aantal golflengten ( $n$ ) en een fractie van een golflengte ( $\Delta T$  wanneer uitgedrukt in tijdseenheden). De looptijd van het signaal bedraagt :

$$\tau = nT + \Delta T = nT + \frac{\Delta T}{T} \times T$$



**Figuur 2.24:** Principewerking van de elektromagnetische afstandmeting

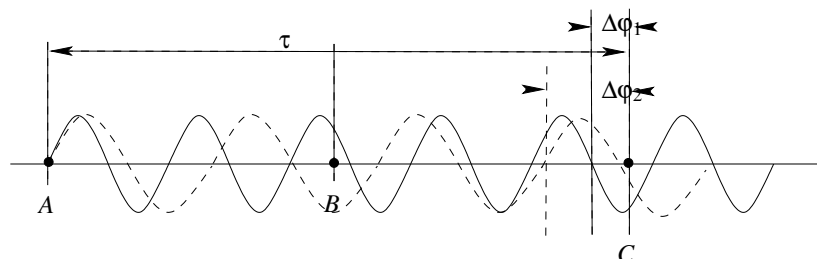
De fractie  $\frac{\Delta T}{T}$  stelt de fractionele fase  $\Delta\phi$  van het elektromagnetisch signaal voor. De afstandmeting wordt aldus herleid tot de bepaling van het geheel aantal golflengten  $n$  en tot de meting van de fractionele fase  $\Delta\phi$ .

Deze fractionele fase kan gemeten worden met een relatieve nauwkeurigheid van  $1 \cdot 10^{-5}$ . Indien men een mm-precisie voor de afstandmeting vooropstelt, dan dient het gebruikte signaal te behoren tot de meter-golven ( $\lambda \leq 10\text{m}$ ). Hieruit volgt dat wanneer geen bijzondere techniek wordt toegepast om de gehele fasebepaaldheid  $n$  te meten, de maximale dracht van de afstandmeter  $\pm 5\text{m}$ . Bovendien krommen deze golven zich door hun hoge golflengte, zodat ze slechte voorplantingseigenschappen vertonen om een rechtlijnige afstand te meten. Daarom wordt deze golf gemoduleerd op een draaggolf die een rechtlijnige voortplanting garandeert : men gebruikt hiervoor meestal een optische draaggolf die als voordeel biedt dat ze door een eenvoudige reflector (spiegel) kan weerkaatst worden : men spreekt van een **geodimeter**.

De dracht wordt vergroot door een techniek toe te passen die de fasebepaaldheid  $n$  opheft : men herhaalt hiertoe de meting met een tweede frequentie. Stel dan de metingen uitgevoerd worden met frequenties  $f_1$  en  $f_2$  waarvoor de bijhorende perioden  $T_1 = 1/f_1$  en  $T_2 = 1/f_2$  zijn. Men kiest de beide frequenties zodat :

$$100 \times T_1 = 101 \times T_2$$

De looptijden  $\tau_1$  en  $\tau_2$  voor beide signalen zijn gelijk :  $\tau_1 = \tau_2 = \tau$ . De gemeten fractionele fasen bedragen respectievelijk  $\Delta\phi_1$  en  $\Delta\phi_2$  (Figuur 2.25). Voor beide metingen geldt :



**Figuur 2.25:** Het opheffen van de fasebepaaldheid

$$\tau = n_1 T_1 + \Delta\phi_1 T_1 \quad (2.3)$$

$$\tau = n_2 T_2 + \Delta\phi_2 T_2 \quad (2.4)$$

Door vermenigvuldiging met respectievelijk 100 en 101 en beide vergelijking lid aan lid af te trekken, bekomt men :

$$\tau = (n_2 - n_1)100T_1 + (\Delta\phi_2 - \Delta\phi_1)100T_1 \quad (2.5)$$

De bovenstaande vergelijking kan opgevat worden als het resultaat van de meting van de afstand met een fictieve elektromagnetisch golf waarvan de periode  $T_f = 100 \times T_1$ . Wanneer  $n_2 = n_1$  vervalt de faseonbepaaldheid voor deze fictieve golf : de fictieve golflengte  $\lambda_f = cT_f$  bepaalt de effectieve draagwijdte (maximaal  $\lambda_f/2$ ) van de afstandmeter.

De vergelijking ( 2.5) bepaalt de grove meting van de afstand (dm-precisie) terwijl de vergelijkingen ( 2.3) of ( 2.4) de fijnmeting van de afstand bepalen.

**Voorbeeld 2.5.1.** *De te meten afstand bedraagt 235,346m De specificaties van het toestel zijn :*

$$\begin{aligned} \lambda_1 = 10\text{m} & \Rightarrow f_1 = 29979245,8\text{Hz} \\ & T_1 = 3,335641 \cdot 10^{-8}\text{s} \\ 100T_1 = 101T_2 & \Rightarrow T_2 = 3,302614 \cdot 10^{-8}\text{s} \\ & \lambda_2 = 9,9\text{m} \end{aligned}$$

Voor de afstand  $D$  bekomt men de volgende meetwaarden

$$\begin{aligned} D = 235,346\text{m} & \Rightarrow \tau = 1,570060 \cdot 10^{-6}\text{s} \\ \tau = n_1 T_1 + \Delta\phi_1 T_1 & \Rightarrow \begin{cases} n_1 = 47 \\ \Delta\phi_1 = 0,06920\text{cy} = 0,43480\text{rad} \end{cases} \\ \tau = n_2 T_2 + \Delta\phi_2 T_2 & \Rightarrow \begin{cases} n_2 = 47 \\ \Delta\phi_2 = 0,53989\text{cy} = 3,39223\text{rad} \end{cases} \\ \tau = (n_2 - n_1)100T_1 + (\Delta\phi_2 - \Delta\phi_1)100T_1 & \text{ met } \begin{cases} n_f = n_2 - n_1 = 0 \\ \Delta\phi_f = \Delta\phi_2 - \Delta\phi_1 = 2,95743\text{rad} \\ = 0,47069\text{m} \end{cases} \end{aligned}$$

Uit deze metingen wordt de afstand berekend door :

$$\begin{aligned} \left. \begin{array}{l} n_f = 0 \\ \Delta\phi_f = 2,95743\text{rad} \end{array} \right\} & \Rightarrow \begin{cases} \tau = 1,570052 \cdot 10^{-6}\text{s} \\ D_f = 235,344\text{m} \end{cases} \\ D_f = 235,344\text{m} & \Rightarrow n_1 = 47 \\ \left. \begin{array}{l} n_1 = 47 \\ \Delta\phi_1 = 0,43480\text{rad} \end{array} \right\} & \Rightarrow \begin{cases} \tau = 1,570059 \cdot 10^{-6}\text{s} \\ D = 235,3459\text{m} = 235,346\text{m} \end{cases} \end{aligned}$$

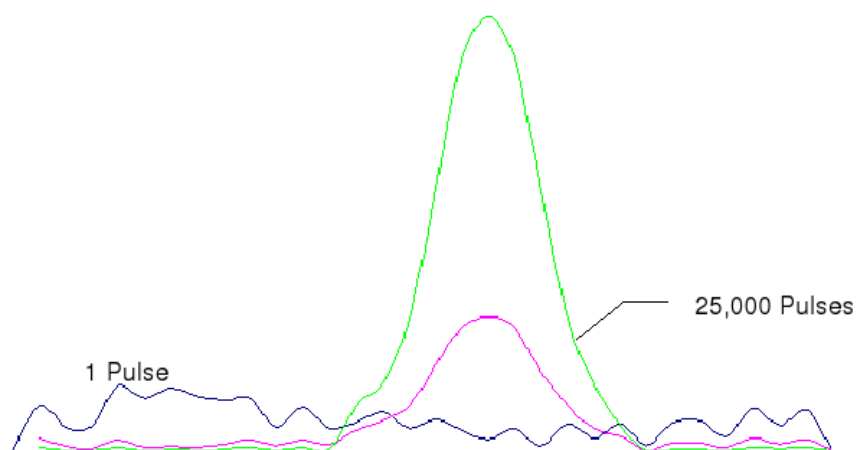
De fictieve golflengte bepaalt de grove afstand  $D_f$ , waarvan in dit voorbeeld de fout 2 mm bedraagt. Door gebruik te maken van de meting met de golf  $\lambda_1$  bekomt men vervolgens de exacte meerwaarde.

### Het puls (TOF) meetprincipe

De **time of flight** methode steunt principieel op tijdsmetingen. Een toestel zendt korte Laser licht pulsen (laser diode) in het infrarood gebied uit, deze pulsen worden gereflecteerd en terug ontvangen door het toestel. De elektronica van het toestel bepaalt uiterst nauwkeurig het tijdsverloop tussen het uitzenden en ontvangen van de puls. De meting kan gebeuren volgens verschillende methoden : (a) detectie op de stijgende flank (wanneer het uitgezonden en gereflecteerde signaal een bepaalde drempelwaarde overstijgt), (b) meting op het middelpunt van de puls of *centroid* meting (deze meting veronderstelt dat de terugkerende puls haar vorm behoudt) of (c) detectie door correlatie tussen de uitgezonden en terugkerende signalen. De behaalde nauwkeurigheid is functie van de duur van de puls. In het theoretische geval dat een perfect rechthoekige puls wordt uitgezonden en deze correleert met een perfect rechthoekige ontvangen puls, is het correlatiesignaal driehoekig. De breedte van de correlatiepiek is het dubbele van de lengte van de puls en omgekeerd evenredig met de frequentie. Hoe kleiner de pulsbreedte, hoe nauwkeuriger de correlatie en meetresolutie. Een kleinere pulsbreedte veronderstelt echter een hogere bandbreedte.

In praktijk echter kan geen perfecte puls gegenereerd worden en zal de vorm van de terugkerende puls beïnvloed worden door de karakteristieken van de reflector, zodat een detectie op de stijgende flank of het middelpunt nagenoeg onmogelijk wordt. Bovendien verzwakt de sterkte van het ontvangen signaal in functie van de afstand. Door divergentie van de uitgezonden puls verwijdt de puls zich conisch zodat het oppervlak van de puls op het gemikte voorwerp toeneemt met de afstand tot de lichtbron (voor de Trimble 5600 DR<sup>+</sup> bedraagt dit 0,8 mrad of 8 cm per 100 m). Belangrijk is dat landmeters zich realiseren dat de energie die wordt teruggekaatst afkomstig van de volledige, uitgesmeerde *footprint*.

Daarom gaat de voorkeur uit naar een correlatietechniek waarbij meerdere terugkerende pulsen geïntegreerd worden om een voldoende sterk en detecteerbaar signaal te bekomen (Figuur 2.26).



**Figuur 2.26:** Integratie van de pulsen tot een detecteerbaar signaal

De beoogde nauwkeurigheid is van de orde van 0,01 ns, wat overeenkomt met een (enkelvoudige) afstand van ongeveer 1,5 mm. Uit de metingen wordt, rekening houdend met de snelheid van het licht

## 2.5 Fouten bij elektronische afstandsmetingen

in de atmosfeer  $v$ , de gewenste afstand berekend door :

$$D = \frac{\Delta t \times v}{2} = \frac{\Delta t \times c}{2n}$$

met :  $D$  ... de te bepalen afstand  
 $\Delta t$  ... de looptijd tussen het uitzenden en de ontvangst van de lichtpuls  
 $c$  ... de voorplantingssnelheid van het licht in het luchtledige  
 $n$  ... de brekingsindex van de atmosfeer  
 $v = \frac{c}{n}$  ... de voorplantingssnelheid van het licht in de atmosfeer

Het bereik van dergelijk toestel bedraagt 10km tot 15km km als men richt op een prismareflector (afhankelijk van de gebruikte prisma's). Door de hoge energetische waarde van de uitgezonden puls (km[W]12 voor de Trimble 5600 DR<sup>+</sup>) is het gebruik van een prismareflector niet strikt noodzakelijk en is reflectie mogelijk op een willekeurig oppervlak. Wanneer wordt gemeten zonder reflector zal het bereik van de toestellen van dalen tot 100m tot 300m, afhankelijk van de karakteristieken van het reflecterend oppervlak en lichtcondities. Het bereik van deze toestellen is maximaal 's nachts en onder een bewolkte hemel. Wanneer reflectorloos wordt gemeten karakteriseert men het reflecterende oppervlak aan de hand van een schaalverdeling tussen het witte (100% of totaal reflecterend) of donkergrijs (18%) oppervlak van een *kodak gray card*. Objecten met lichte kleuren en vlakke oppervlakken loodrecht op de uitgezonden puls zullen het sterkst reflecteren en het minst vervorming van de puls veroorzaken.

### 2.5.4 Fouten bij elektronische afstandsmetingen

De fouten die de elektro-magnetische afstandsmeting beïnvloeden kunnen worden opgedeeld (a) in functie van hun foutkarakter (constant, lineair, kwadratisch, ...) of (b) in functie van hun oorzaak (apparatuurgebonden, gebruikersgebonden of extern aan beide). In de volgende paragrafen wordt een hoofdindeling op basis van het foutkarakter gehanteerd. Aldus kunnen de volgende fouten onderscheiden worden :

1. Constante fouten, onafhankelijk van de afstand, apparatuurgebonden : **nulpuntfout** of **optelconstante**,
2. Lineaire of schaalfouten, evenredig met de afstand, apparatuurgebonden : **oscillatorfout** (stabiliteit van de modulatorfrequentie),
3. Lineaire of schaalfouten, evenredig met de afstand, extern : **brekingsindex** (druk, temperatuur, vochtigheid, ...),
4. Overige apparatuurgebonden fouten: **richtfout** of **alignementsfout**

De constante en lineaire fouten worden algemeen als de belangrijkste aanzien.

In de technische specificaties van een totaalstation worden de fouten samengevat in een vereenvoudigd foutmodel van het type :

$$d_L = a + b \times L$$

## 2.5 Fouten bij elektronische afstandsmetingen

met :  $a$  ... de optelconstante, met typische waarden gelegen tussen 1 mm en 3 mm  
 $b$  ... de vermenigvuldigingsconstante, met typische waarden gelegen tussen 1 ppm en 3 ppm (1 mm/km en 3 mm/km)  
 $L$  ... de gemeten afstand in m

Merk op dat, aangezien beide fouttermen in hoge mate onafhankelijk van mekaar zijn, volgens het onafhankelijkheidsprincipe het correcter is om de vierkantswortel van de som der kwadraten van de beide termen te nemen :

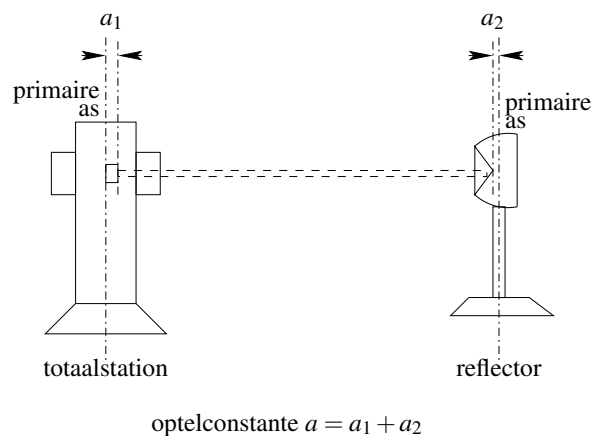
$$d_L = \sqrt{a^2 + (b \times L)^2}$$

Gezien het toegepaste model een vereenvoudiging is, wordt dit echter zelden toegepast. Bovendien zijn, in de landmeetkundige praktijk, de afstanden vaak kleiner dan 100 m, zodat beide formules zich dan met goede benadering herleiden tot een constante fout van  $a$  mm. Voor metingen over heel grote afstanden (meerdere km) herleiden beide formules zich met goede benadering tot  $b \times L$ . Enkel in het gebied van de middelmatig grote afstanden (100 m tot enkele km) levert de tweede formule een iets kleinere fout op.

De volgende paragrafen bespreken gedetailleerd de verschillende fouten.

### Nulpuntfout of optelconstante

De **nulpuntfout** of **optelconstante** is het gevolg van het verschil tussen het fysische en het elektro-optische centrum van zowel de afstandsmeter zelf als van de reflector. Deze fout is normaal constant en uniek voor elke combinatie van totaalstation en prismareflector. De correctie die bij de afgelezen afstand moet opgeteld worden om de correcte afstand te bekomen wordt de **optelconstante** genoemd. Deze optelconstante wordt gewoonlijk door de constructeur in het toestel elektronisch in rekening gebracht, hoewel nog altijd toevallige variaties kunnen voorkomen bij het gebruik van verschillende prisma's van hetzelfde merk. Wanneer echter toestellen en prisma's van verschillende constructeurs door elkaar gebruikt worden, moet de nulpuntfout expliciet bepaald en ingegeven worden in het toestel, of achteraf verrekend worden bij de naverwerking. Na verloop van tijd kan de nulpuntfout eveneens veranderen door slijtage van de prismahouder. Uit bovenstaande blijkt duidelijk dat de nulpuntfout  $a$  bestaat uit 2 componenten



**Figuur 2.27:** De nulpuntfout of optelconstante

(Figuur 2.27) : (a) de eerste component  $a_1$  is te wijten aan het meettoestel terwijl (b) de twee-

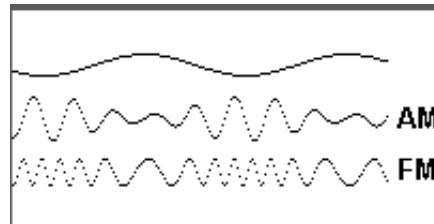


## 2.5 Fouten bij elektronische afstandsmetingen

de component  $a_2$  zijn oorsprong vindt aan de prismareflector. Teneinde eerstgenoemde fout te reduceren, voorzien de fabrikanten het totaalstation van een **inwendige kalibratie**.

Binnen de elektro-optische afstandsmeting worden twee modulatiemethodes onderscheiden :

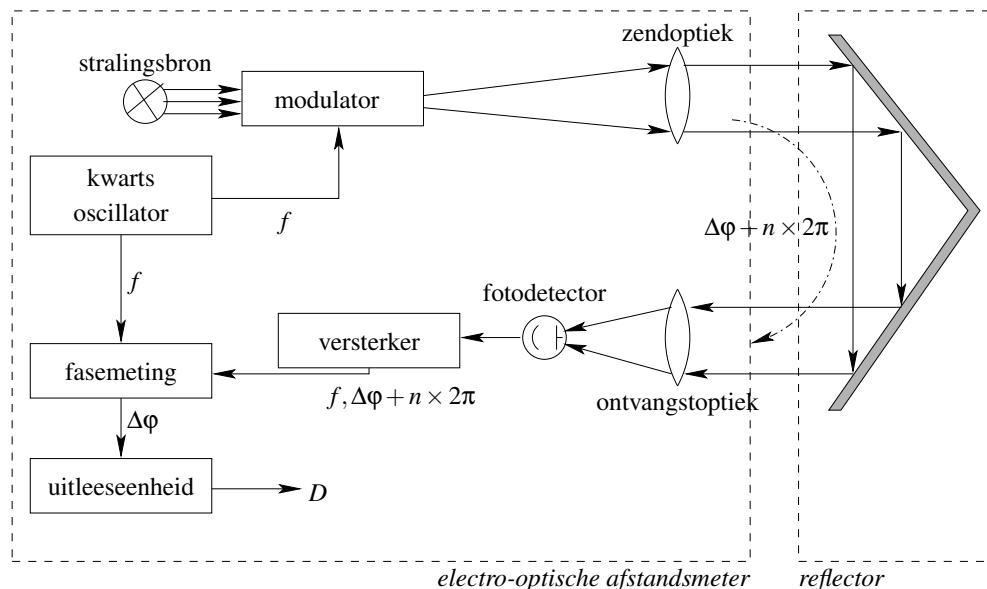
- **frequentiemodulatie** (FM) waarbij de amplitude van de gemoduleerde golf constant blijft, terwijl de frequentie van de signaal golf varieert, of
- **amplitudemodulatie** (AM) waarbij de frequentie van de gemoduleerde golf constant blijft, terwijl de amplitude van de signaal golf varieert.



**Figuur 2.28:** Amplitude- en frequentiemodulatie van een datasignaal

In de meeste toestellen maakt men gebruik van de frequentiemodulatie, meestal in de buurt van 15MHz, wat overeenkomt met een golflengte van ongeveer 20m. Tegenwoordig wordt echter ook gebruik gemaakt van kleinere golflengtes, eerder in de buurt van 1 m tot 5 m, waardoor de modulatiefrequentie 300MHz tot 60MHz bedraagt.

Met behulp van een zeer stabiele kwartsoscillator wordt de modulatiefrequentie gegenereerd. Een deel van de energie van de modulatiefrequentie wordt gebruikt voor de modulatie van de infraroodstraling van de zenddiode, terwijl het resterende deel als referentiesignaal dient in de fase detector (Figuur 2.29). De fotodetector vangt het gereflecteerde signaal op en vormt het om



**Figuur 2.29:** Schematische opbouw van een afstandsmeter

tot een elektrisch signaal. Na versterking en filtering wordt dit signaal in fase vergeleken met het referentiesignaal in de fase detector, waarbij een gemiddelde waarde van meerdere duizenden

metingen worden uitgevoerd door de rekenenheid. In de rekenenheid wordt eveneens de fijne en de grove meting gecombineerd. Het eindresultaat  $D$  wordt onder numerieke vorm op de display van de afstandmeter afgebeeld.

Een dergelijk afstandmeter zou echter weinig nauwkeurig zijn omdat zowel in de zend- en fotodiode als in de elektronische ketting het signaal faseverschuivingen ondergaat : de **inwendige faseverschuiving**. We wensen enkel maar de **nuttige faseverschuiving** te meten te wijten aan het tijdsinterval dat de lichtstraal nodig heeft om het traject heen en terug af te leggen.

De inwendige faseverschuiving kan niet in rekening gebracht worden bij de kalibratie van het toestel door de fabrikant omdat de inwendige faseverschuiving willekeurig varieert in de tijd. Om dit probleem te omzeilen gebruikt men het principe van de **inwendige kalibratie**. Daarvoor worden telkens twee metingen uitgevoerd : (a) een uitwendige meting gebeurt op het signaal dat door de reflector weerkaatst wordt, en (b) een inwendige meting gebeurt op het signaal dat met behulp van een kleine draaibare spiegel, direct voor de zenddiode geplaatst, rechtstreeks naar de fotodiode wordt gestuurd. Draagt men er nu zorg voor dat beide signalen dezelfde intensiteit hebben, dan zal de inwendige faseverschuiving voor beide dezelfde waarde hebben. Door het verschil van beide metingen in de rekenenheid te gebruiken, wordt de gemeenschappelijke inwendige verschuiving geëlimineerd. De enige niet gemeenschappelijke faseverschuiving is enkel te wijten aan het verschil in afgelegde weg tussen beide signalen.

### Oscillatorfout of stabiliteit van de modulatorfrequentie

Van de onderdelen van de afstandsmeter is de oscillator het meest gevoelig en geeft ook de meeste aanleiding tot fouten die evenredig zijn met de gemeten afstand (schaalfout of lineaire fout). Daarom wordt hier alleen op de werking van de oscillator ingegaan.

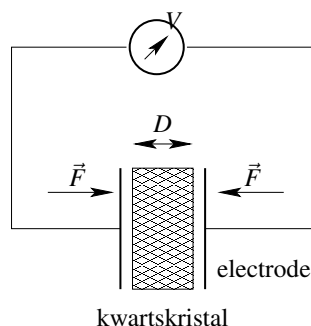
Heel algemeen kan gesteld worden dat een oscillator opgebouwd is uit : (a) een trillingssysteem, (b) een detector van de trilling, (c) een versterker die voor de nodige (onderhouds)energie zorgt, en (d) een motor die toelaat de (onderhouds)energie op het trillingssysteem over te brengen. Bij een kwartsoscillator speelt het kwarts gelijktijdig de rol van detector, trillingssysteem en motor. Als kwarts gebruikt men meestal het hexagonale bergkristal (siliciumdioxide) afkomstig uit Brazilië.

Een kwartsoscillator is gesteund op het piëzo-elektrische effect van een kwartskristal. Het gebruik van kwarts als trillingssysteem is te wijten aan twee van zijn eigenschappen :

- het piëzo-elektrische effect is een eigenschap waardoor zekere kristallen aan hun oppervlakken een elektrische lading ontwikkelen, wanneer ze volgens bepaalde voorkeursrichting onderworpen worden aan een mechanische druk of trek, en
- het is hard, elastisch en chemisch stabiel.

Indien de oppervlakten van een kwarts met elektroden worden bekleed en druk  $F$  wordt uitgeoefend, dan zal op de voltmeter een elektrische spanning  $V$  verschijnen (Figuur 2.30 op de pagina hierna. In geval een trekkracht wordt uitgeoefend, zal de polariteit van de spanning omkeren. Het piëzo-elektrische effect is omkeerbaar, wat betekent dat naargelang de polariteit van de aangelegde spanning het kwarts zal inkrimpen of uitzetten. Wordt er aan de elektroden een wisselspanning aangelegd, dan zal het kwartskristal beginnen trillen. Door de frequentie  $f$  van de wisselspanning aan te passen aan de eigenfrequentie van het kristal, zal dit laatste in resonantie treden. De frequentie  $f$  wordt gegeven door de formule :

$$f = \frac{K}{D} \quad [\text{kHz}]$$



**Figuur 2.30:** Principewerking van een piëzo-electrische kring

met :  $f$  ... de trillingsfrequentie van het kristal

$D$  ... de breedte van het kristal in [mm]

$K$  ... een constante ongeveer gelijk aan 2 800 kHz/mm.

Een kwarts met een lengte van 0,28mm zal dan trillen met een frequentie van 10MHz. Bij kalibratie van een totaalstation, kan de frequentie worden gemeten en haar waarde in het totaalstation softwarematig worden geprogrammeerd.

Bij een kwartsoscillator wordt het piëzo-elektrische effect gebruikt om enerzijds de elektrische onderhoudsenergie om te vormen tot een trilling en anderzijds deze mechanische energie terug om te zetten in een elektrisch signaal. De oscillator bestaat dan in principe uit een eenvoudige versterker waarvan de ingang en de uitgang verbonden zijn met de elektroden van het kwarts. De stabiliteit van een dergelijke oscillator is zeer groot.

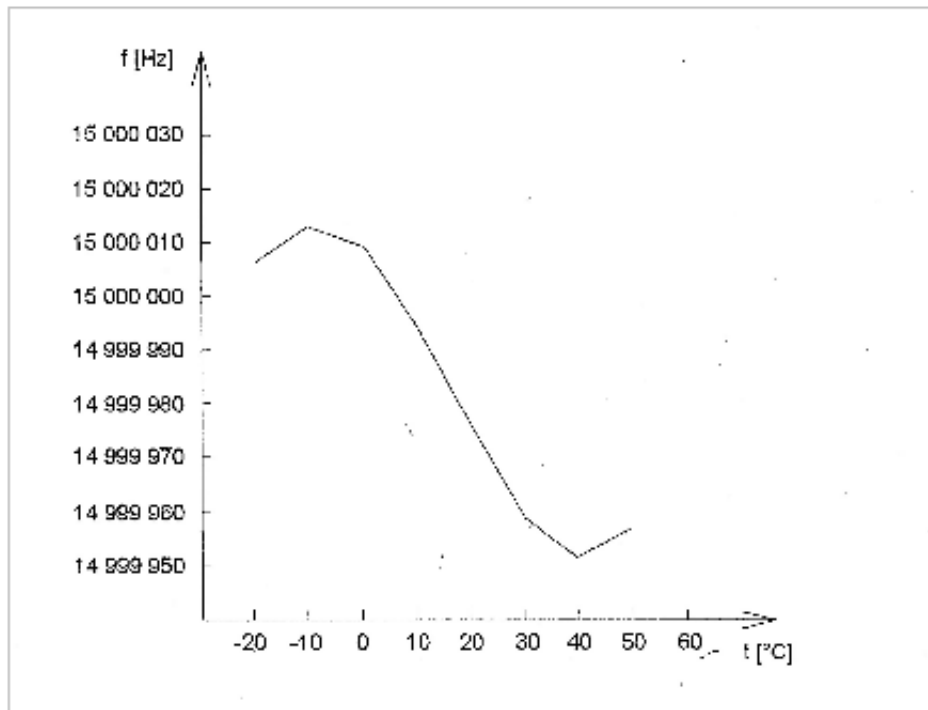
Daar de afmetingen van het kristal door de temperatuur beïnvloed worden, zal ook de eigenfrequentie licht beïnvloed worden. Een voorbeeld van het verloop van de frequentie in functie van de temperatuur is weergegeven in figuur 2.31 op de volgende pagina. De variatie van de frequentie in functie van de temperatuur is gekend en wordt in de fabriek voor elk kristal geëvalueerd. Dit levert een ijkingscurve op, die meegegeven wordt aan het toestel. Een goede temperatuursmeting is wel noodzakelijk voor een goede correctie op de frequentie en daardoor op de gemeten afstand. Tegenwoordig bereikt men een relatieve nauwkeurigheid van  $10^{-11}$  op de gemiddelde frequentie.

Tengevolge van elektrische en mechanische verliezen in de oscillatorkring verouderd het kristal. Bij een kwartsuurwerk, dat in principe bestaat uit een oscillator en een optelmechanisme, zal die veroudering een bepaalde drift veroorzaken. Omdat de drift continu is, kan deze gecorrigeerd worden, zodat het uurwerk weer juist loopt. Bij een afstandsmeter die voortdurend aan en uit wordt gezet, is het onmogelijk deze drift te bepalen en er eventueel rekening mee te houden. Bij constante temperatuur bedraagt de frequentiedrift ongeveer  $10^{-5}$  tot  $10^{-6}$  per jaar. Concreet betekent dit, bijvoorbeeld voor een basisfrequentie van 15 MHz, een frequentieverschuiving van 15Hz tot 150Hz per jaar. Het kristal zal sneller gaan trillen en de frequentie zal vergroten. De relatieve fout op de afstandsmeting neemt met dezelfde hoeveelheid toe.

#### **Invloed van de brekingsindex**

De atmosferische omstandigheden (druk, temperatuur, vochtigheid, ...) beïnvloeden rechte reeks de brekingsindex, die gekoppeld is aan de voortplantingssnelheid van de elektro-magnetische golven. Daarom zijn zelfs in een homogeen milieu met constante brekingsindex, vooral temperatuur en druk uiterst belangrijke foutoorzaken voor elektro-magnetische golven. In een niet-homogeen milieu (variabele brekingsindex) treedt bovendien straalbuiging of refractie op, die

## 2.5 Fouten bij elektronische afstandsmetingen



**Figuur 2.31:** Mogelijk verloop van de frequentie in functie van de temperatuur (Bron: Joeckel, R., Stober, M., Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung, 1995, pag. 44)

vooral de hoogtemeting beïnvloedt maar nauwelijks de afstandsmeting. De luchtvochtigheid is enkel cruciaal bij het gebruik van radiogolven (zgn. tellurometers), die tegenwoordig nauwelijks nog worden gebruikt in de landmeetkunde.

De brekingsindex is naast de hoger behandelde oscillatorfout, de belangrijkste oorzaak van schaalfouten of lineaire fouten bij electro-magnetische afstandsmeting.

De fout op de modulatiefrequentie is via het uitvoeren van experimentele afstandsmetingen moeilijk te onderscheiden van de fout op het bepalen van de brekingsindex. Beide zijn immers schaalfouten die evenredig zijn met de gemeten afstand. Toch kunnen beide apart worden bepaald. De modulatiefrequentie kan worden gemeten met een frequentiemeter, waardoor deze fout afzonderlijk kan worden berekend. Het berekenen van de brekingsindex is mogelijk indien luchtdruk, temperatuur en (uitzonderlijk ook) de luchtvochtigheid gemeten worden en de golflengte van de draaggolf gekend is.

De belangrijkste factor die hierbij in rekening moet worden gebracht is de brekingsindex  $n$  die de verhouding is tussen de lichtsnelheid in vacuüm  $c$  en de voortplantingssnelheid in de atmosfeer  $v$ . De waarde van  $n$  varieert met plaats en tijd normalerwijs tussen 1,000 200 en 1,000 400 2. De gemiddelde waarde voor  $n$  bedraagt 1,000 274 bij een temperatuur van 20 °C en een druk van 1 013 hPa

De brekingsindex is a priori afhankelijk van de golflengte van de draaggolf, die voor elk totaalstation principieel constant is. Een empirische vergelijking geeft de invloed van de golflengte weer :

$$n_g = 1 + \left( 287,604 + \frac{4,8864 \mu\text{m}^2}{\lambda^2} + \frac{0,0680 \mu\text{m}^4}{\lambda^4} \right) \times 10^{-6}$$

## 2.5 Fouten bij elektronische afstandsmetingen

met :  $\lambda$  ... de golflengte van de draaggolf in [ $\mu\text{m}$ ]

$n_g$  ... de brekingsindex bij standaard atmosferische omstandigheden.

Verder is de brekingsindex afhankelijk van luchtdruk, temperatuur en in mindere mate van de luchtvochtigheid :

$$n = 1 + \frac{2,2767 \cdot 10^{-3} \text{ K/Pa} \times (n_g - 1) P}{T} + \frac{1,2704 \cdot 10^{-4} \text{ K/Pa} \times e}{t}$$

met :  $P$  ... de luchtdruk in [Pa]

$T$  ... de luchttemperatuur in [K]

$e$  ... de dampspanning in [Pa]

Het relatieve effect op de brekingsindex, en bijgevolg op de gemeten afstand, bedraagt benaderd (a)  $-1 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  voor de temperatuur, (b)  $3 \cdot 10^{-7} / \text{hPa}$  voor de druk en (c)  $-1 \cdot 10^{-8} / \%$  toename van de luchtvochtigheid. Zoals blijkt uit bovenstaande vergelijkingen en de benaderde effecten is de impact van de relatieve vochtigheid aanzienlijk kleiner dan de correctieterm voor de druk, om die reden wordt de relatieve vochtigheid meestal niet in rekening gebracht. De snelheid van de electro-magnetische golf in de atmosfeer is :

$$v = \frac{c}{n}$$

Rekening houdend met  $\lambda = \frac{v}{f} = \frac{c}{f \times n}$  wordt de formule voor de afstand  $D$  bij fasemetingen :

$$D = \frac{N \times c}{2f \times n} + \frac{\Delta\phi \times c}{2\pi \times 2f \times n}$$

Als de voortplantingssnelheid van de elektromagnetische straling in de atmosfeer gekend is, kan de een afstandsfout per afstandseenheid worden berekend. Dit geeft een beeld van het verschil in afstand afgelegd door elektromagnetische straling in het vacuüm ten overstaan van elektromagnetische straling in de atmosfeer binnen een zelfde tijdseenheid. Deze correctie wordt vaak uitgedrukt als millimeters per kilometer of parts per million (ppm). De meeste toestellen worden gekalibreerd bij een temperatuur van  $20^\circ\text{C}$  en een luchtdruk van ongeveer 1023 hPa. De waarde van  $n$  en de eruit volgende correctie kan ofwel berekend worden ofwel afgeleid worden uit tabellen van de fabrikant en bij de naverwerking worden toegepast. Bij de meeste hedendaagse totaalstations wordt de temperatuur en luchtdruk door het toestel zelf elektronisch gemeten en wordt de correctie automatisch toegepast. Voor korte afstanden zal het immers voldoende zijn om temperatuur en druk te meten ter hoogte van het opstelpunt. Voor langere afstanden of wanneer het terrein wordt gekenmerkt door een uitgesproken topografie, wordt een gemiddelde voortplantingssnelheid bepaald door de atmosferische condities te meten, zowel ter hoogte van het instrument als ter hoogte van de reflector. Daarom laat een totaalstation meestal ook toe dat de gebruiker de temperatuur en luchtdruk opgeeft waarmee de correctie moet gebeuren.

Een benaderende, maar handige uitdrukking voor de berekening van de brekingsindex  $n$  is :

$$n = 1 + 79,1 \frac{P}{T} \times 10^{-6}$$

met :  $P$  ... de luchtdruk in [Pa]

$T$  ... de luchttemperatuur in [K]

De voornaamste fouten bij het bepalen van de brekingsindex zijn :

- Een onnauwkeurige aflezing of waarneming van de meteowaarnemingen.  
Dit is weinig waarschijnlijk aangezien er maar een matige nauwkeurigheid van de waarnemingen gevraagd wordt. Blijft de fout op de waarneming binnen de 3 hPa of 1 °C, dan zal de invloed hiervan op de brekingsindex van de grootteorde van  $1 \cdot 10^{-6}$  zijn.
- Een foutieve beoordeling van de brekingsindex.  
De veronderstelling dat het gemiddelde van de atmosferische waarnemingen, geregistreerd in één of in beide eindpunten van de te meten afstand, representatief is voor de gemiddelde atmosferische toestand langs de vizierlijn is niet altijd juist. De atmosferische omstandigheden kunnen onderweg variëren, en daarmee ook de brekingsindex.

De moeilijkheid om de werkelijke waarde van de brekingsindex te bepalen vormt een belangrijke hinderpaal bij de elektro-optische afstandsmeting. Vooral op grotere afstanden wordt deze fout van cruciaal belang.

Een *Kern ME5000 Mekometer* laat toe experimenteel de brekingsindex ook op het terrein en bij grotere afstanden zeer nauwkeurig te bepalen door het gebruik van laserlicht van 2 verschillende frequenties en laat aldus toe klassieke elektro-magnetische afstandsmeters te valideren.

### De cyclische fout

De cyclische fout is een periodieke fout, wat betekent dat deze zich herhaalt over een bepaalde meetcyclus. Deze fout wordt vooral veroorzaakt door elektrische en optische interferenties tussen het weerkaatste signaal en het referentiesignaal in zend- en ontvangststelsel.

**Elektrische oorzaken :** De modulatiefrequentie van de elektro-optische afstandsmeter ligt in het korte golf bereik. Aangezien de zender en de ontvanger in dezelfde behuizing zijn ondergebracht en zeer dicht bij elkaar liggen, is een elektrische overlapping van delen van het uitgezonden en het teruggekaatste signaal onvermijdelijk. Ondanks de pogingen van de fabrikant om de zender en de ontvanger van elkaar af te schermen, blijven toch nog steeds enkele gemeenschappelijke onderdelen bestaan, met als minimum de kabel voor de stroomvoorziening.

Voor de mathematische beschrijving van de elektrische cyclische fout  $\alpha_e$  wordt een benadering gebruikt van KAHMEN 1973 en REGER/COVELL 1980. We definiëren het uitgezonden referentiesignaal  $s_1$  en het met een faseverschil  $\Phi$  verschoven signaal  $s_2$  (zonder cyclische fout) :

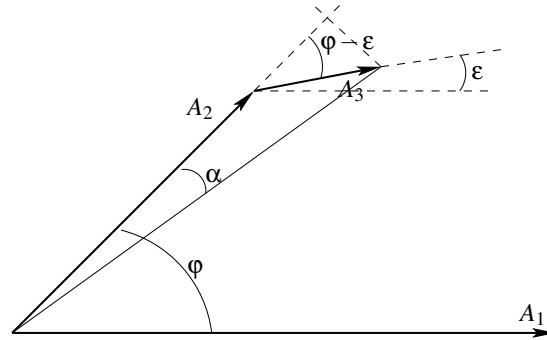
$$\begin{aligned}s_1 &= A_1 \sin(\omega t) \\ s_2 &= A_2 \sin(\omega t + \varphi)\end{aligned}$$

dan geldt voor de cyclische fout :

$$s_3 = A_3 \sin(\omega t + \varepsilon_e)$$

waarbij de faseverschuiving van het storingsignaal  $\varepsilon_e$  vanwege de korte looptijd meestal klein is. De overlapping van de signalen  $s_2$  en  $s_3$  bij het resulterende signaal  $s$  met amplitude  $A$  kan bekomen worden door vectoradditie  $\vec{s} = \vec{s}_2 + \vec{s}_3$  berekend worden (Figuur 2.32 op de pagina hierna. De cyclische hoekfout  $\alpha_e$  van de fasemeting volgt uit :

$$\tan \alpha_e = \frac{A_3 \sin(\varphi - \varepsilon_e)}{A_2 + A_3 \sin(\varphi - \varepsilon_e)}$$



Figuur 2.32: De cyclische fout met elektrische oorzaken

Wanneer rekening gehouden wordt met de volgende vereenvoudigingen :

$$\begin{aligned} \tan \alpha_e \approx \alpha_e & \quad \dots \quad \alpha_e \ll 1 \\ A_2 + A_3 \sin(\varphi - \epsilon_e) & \quad \dots \quad A_3 \ll A_2 < A_1 \\ \cos \epsilon_e \approx 1 \text{ en } \sin \epsilon_e \approx 0 & \quad \dots \quad \epsilon_e \ll 1 \end{aligned}$$

bekomt men :

$$\alpha_e \approx \frac{A_3}{A_2} \sin(\varphi - \epsilon_e) \approx \frac{A_3}{A_2} \sin \varphi - \frac{A_3}{A_2} \epsilon_e \cos(\varphi)$$

Hieruit kunnen enkele besluiten worden getrokken :

1. De amplitude van de cyclische fout  $\alpha_e$  stijgt met een toenemende afstand, terwijl de amplitude  $A_3$  van het storingssignaal constant van de amplitude  $A_1$  van het zendsignaal afhangt. De amplitudeverhouding  $\frac{A_3}{A_2}$  neemt dus met de afstand toe.
2. Als  $\epsilon_e$  nadert naar nul, is ook de cyclische fout nul. Dit gebeurt als de gemeten afstand een geheel veelvoud is van de fijne golflengte ( $\varphi = 0$ ).

**Optische oorzaken :** de optische signaaloverlapping  $\alpha_o$  ontstaat door verspreide infraroodstraling, waarbij het gemoduleerde licht direct van de zender bij de ontvanger komt en daar overlapt met het teruggekaatste signaal. Bij de doorgang door het gemeenschappelijke onderdeel (zender-ontvanger) is de loopweg van het storingssignaal  $s_4$  zeer kort, zodat er slechts een kleine faseverschuiving  $\epsilon_o$  optreedt tegenover het referentiesignaal  $s_1$  :

$$s_4 = A_4 \sin(\omega t - \epsilon_o)$$

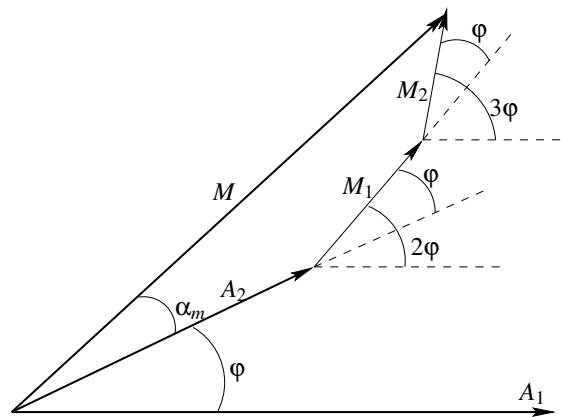
De optische cyclische fout  $\alpha_o$  is op dezelfde manier als de elektrische af te leiden.

$$\begin{aligned} \alpha_o &= \frac{A_4}{A_2} \sin(\varphi - \epsilon_o) \\ &\approx \frac{A_4}{A_2} \sin \varphi - \frac{A_4}{A_2} \epsilon_o \cos \varphi \end{aligned}$$

Meer cyclische foutcomponenten  $\alpha_m$  kunnen door een meerwegssignaal ontstaan, dat wil zeggen dat het signaal dat door reflectie aan de lens, zend of ontvangdioden ontstaat, meer doet dan gewoon heen en teruglopen langs de meetlijn. Bij elke gereflecteerd traject ontstaat een signaal  $m_k$  met een meer afgezwakte amplitude  $M_k$  en een nieuwe faseverschuiving  $\varphi(1 \dots n)$  :

$$\begin{array}{lll}
 m_1 & = & M_1 \sin(\omega t + 2\varphi) \quad M_1 \ll A_2 \\
 m_2 & = & M_2 \sin(\omega t + 2\varphi) \quad M_2 < M_1 \\
 \vdots & & \vdots \\
 m_k & = & M_k \sin(\omega t + 2\varphi) \quad M_k < M_{k-1}
 \end{array}$$

Figuur 2.33 toont de vectoradditie van alle signalen tot het resulterende vervalste signaal  $m$  met amplitude  $M$ . De resulterende fout op de fasen  $\alpha_m$  volgt uit :



**Figuur 2.33:** Cyclische fout door de meerweginterferentie

$$\begin{aligned}
 \tan \alpha_m &= \frac{M_1 \sin(2\varphi - \varphi) + M_2 \sin(3\varphi - \varphi) + \dots}{A_2 + M_1 \cos(2\varphi - \varphi) + M_2 \cos(3\varphi - \varphi) + \dots} \\
 &= \frac{\sum_{k=1}^n M_k \sin[(k+1)\varphi - \varphi]}{A_2 + \sum_{k=1}^n M_k \cos[(k+1)\varphi - \varphi]} \\
 &= \frac{\sum_k M_k \sin(k\varphi)}{A_2 + \sum_k M_k \cos(k\varphi)}
 \end{aligned}$$

Met de vereenvoudigingen :

$$\begin{aligned}
 \tan \alpha_m &\approx \alpha_m \\
 M_1 \cos \varphi &= M_2 \cos(2\varphi) = 0
 \end{aligned}$$

bekomt men :

$$\begin{aligned}
 \alpha_m &\approx \frac{M_1}{A_2} \sin \varphi + \frac{M_2}{A_2} \sin(2\varphi) + \dots + \frac{M_n}{A_2} \sin(n\varphi) \\
 \alpha_m &\approx \frac{1}{A_2} \sum_{k=1}^n M_k \sin(k\varphi)
 \end{aligned}$$

De cyclische fout, afkomstig van de meerwegssignalen laat zich in perioden vastleggen, die zich uit de deling van de fijne golflengte door een geheel getal laat vastleggen. Bij



## 2.5 Fouten bij elektronische afstandsmetingen

---

instrumenten met golflengte  $\lambda = 10$  m resulteert dit bijvoorbeeld in cyclische fouten met perioden van 10 m, 5 m, 3,33 m, 2,5 m . . . . De amplitude  $M_k$  van de afzonderlijke componenten wordt steeds kleiner, naarmate het signaal vaker heen en terug loopt.

**De totale cyclische fout** : Aangezien zowel de fasen ( $\epsilon_j$ ) als ook de amplitudes en de periode van de componenten van de cyclische fout verschillen naargelang de oorzaak ervan, maar toch overlappen, vereisen zij een gezamenlijke correctie  $K_z$  voor de cyclische fout :

$$K_z = (\alpha_e + \alpha_o + \alpha_m) \frac{\lambda}{2\pi}$$

die dikwijls door een Fourier reeks wordt beschreven :

$$K_z = \sum_{j=1}^n K_{1j} \sin(jx) + \sum_{j=1}^n K_{2j} \cos(jx)$$
$$x = D \frac{2\pi}{U}$$

met :  $m$  . . . de orde van de hoogste op te lossen foutfrequentie

$\lambda$  . . . de golflengte van de fijne golf

$D$  . . . de gemeten afstand.

Bij nieuwere toestel-

len blijven de grootste cyclische afwijkingen op de meting met de fijne golflengte in het bereik van 2 mm tot 3 mm, zodat er een gemiddelde afwijking van ongeveer 1 mm tot 2 mm te verwachten valt.

### De richtfout of alignementsfout

Bij de meeste coaxiale elektro-optische afstandsmeters blijkt het meetresultaat te veranderen als men eerst precies op het prisma richt en het daarna een kleine richtingsverandering geeft, zodanig dat het signaal maar weinig verandert. Dit effect hangt samen met de heterogeniteiten in het ontvangstelement. Het is dus van belang het instrument en de reflector zo goed mogelijk op elkaar te richten. De alignementsfout kan gemakkelijk worden bepaald via experimentele opstelling. Sommige totaalstations geven de sterkte van het gereflecteerd signaal, waardoor getest kan worden of de maximale sterkte overeenkomt bij het richten van de vizierlijn op het centrum van het prisma.

## Hoofdstuk 3

# Veldvalidatie van een totaalstation

### Inhoudsopgave

---

<b>3.1</b>	<b>De ISO normen 17123</b> . . . . .	<b>57</b>
<b>3.2</b>	<b>Analyse van de precisie van de hoekmetingen</b> . . . . .	<b>58</b>
<b>3.3</b>	<b>Meetprocedure voor de standaardafwijking van horizontale richtingen</b> . . . . .	<b>59</b>
3.3.1	Berekeningen – vereenvoudigde testprocedure . . . . .	60
3.3.2	Berekeningen – volledige testprocedure . . . . .	61
3.3.3	Statistische analyse . . . . .	61
<b>3.4</b>	<b>Meetprocedure voor de standaardafwijking van verticale richtingen</b> . . . . .	<b>63</b>
3.4.1	Berekeningen – vereenvoudigde testprocedure . . . . .	64
3.4.2	Berekeningen – volledige testprocedure . . . . .	64
3.4.3	Statistische analyse . . . . .	65
<b>3.5</b>	<b>Analyse van de precisie van de elektro-optische afstandmeter</b> . . . . .	<b>66</b>
3.5.1	De vereenvoudigde testprocedure . . . . .	67
3.5.2	De volledige testprocedure . . . . .	68

---

### 3.1 De ISO normen 17123

Sinds 2002 bepalen de ISO normen 17123-1 tot en met 17123-8 zijn de basisdocumenten voor de veldvalidatie van topografische instrumenten. In tegenstelling tot andere ingenieurstoepassingen gebruikt de geodeet of landmeter de notie standaardafwijking in plaats van tolerantie om de precisie van een meetinstrument te karakteriseren. De ISO normen benadrukken dat (a) de meettoestellen gebruikt moeten worden volgens de voorschriften van de fabrikant, (b) de standaard accessoires gebruikt moeten worden, (c) de meetmethodologie strikt gevolgd moet worden en (d) dat de ervaring en apparaatkennis van de waarnemer zich reflecteert in de gevonden waarden. De normen benadrukken dat tijdens de metingen voor het bepalen van de experimentele standaardafwijkingen  $s$  het meettoestel geacclimatiseerd moet zijn. De beste resultaten worden bekomen bij weinig wind en een bewolkte hemel. De normen maken een verschil tussen de de vereenvoudigde testprocedure, de volledige testprocedure en de statistische testen.

De vereenvoudigde testprocedure geeft een indicatie of de precisie van het instrument binnen een bepaalde tolerantie ligt. Het aantal metingen en de wiskundige verwerking worden tot een minimum gereduceerd zodat geen significante waarde voor de experimentele standaardafwijking  $s$  bekomen kan worden. De vereenvoudigde testprocedure kan snel ter verificatie van het toestel worden toegepast, bijvoorbeeld om na te gaan of er tijdens het transport niets misgelopen is.

De volledige testprocedure bepaalt de beste waarde voor de experimentele standaardafwijking  $s$  van het meettoestel in combinatie met de standaard accessoires. Deze testen bestaan uit reële veldmetingen zonder gebruik te maken van externe middelen of extra meetapparatuur.

De statistische testen kunnen enkel toegepast worden op de meetresultaten bekomen tijdens een volledige testprocedure. Deze testen bepalen of de bekomen experimentele standaardafwijking  $s$  voldoet aan de karakteristieken bepaald door de fabrikant. Aangezien het aantal metingen beperkt is, kan de experimentele standaardafwijking  $s$  niet zonder meer vergeleken worden met de door de fabrikant opgegeven waarde van de standaardafwijking  $\sigma$ . Een statistische test, meestal gebaseerd op de  $\chi^2$  verdeling, laat toe een 95% vertrouwensinterval te bepalen. De  $F$ -test wordt aangewend om aan te tonen of de experimentele standaardafwijkingen  $s$  van meerdere testen gelijk zijn en dus behoren tot dezelfde statistische familie.

De ISO norm 17123 bestaat uit verscheidene onderdelen :

- de norm 17123-1 detailleert de theorie voor het uitvoeren van statistisch relevante testen ;
- de norm 17123-2 beschrijft het waterpastoestel of het niveau ;
- de norm 17123-3 behandelt de hoekmetingen met een theodoliet of totaalstation ;
- de norm 17123-3 detailleert de elektro-optische afstandsmeter.

### 3.2 Analyse van de precisie van de hoekmetingen

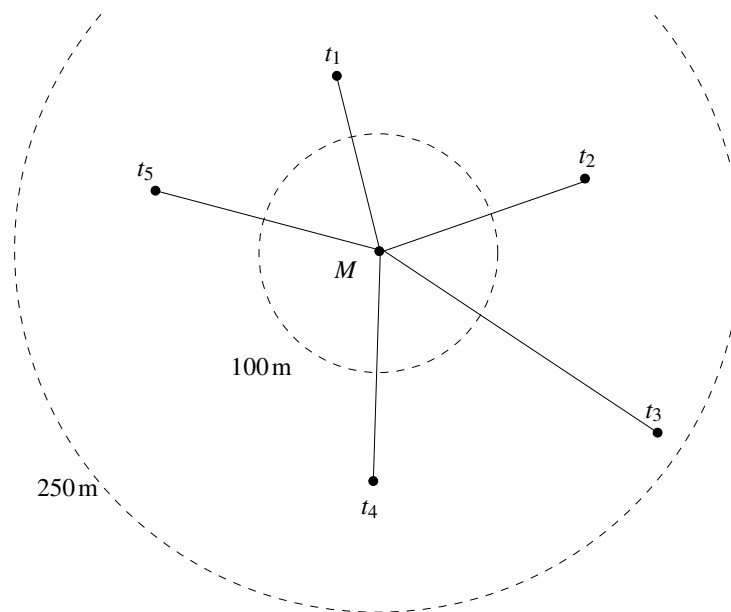
De ISO norm 17123-3 “*Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments – Part 3: Theodolites*” bepaalt de methode voor de bepaling van de precisie van de horizontale en verticale hoekmetingen.

De norm bepaalt de experimentele standaardafwijking (of root mean square error) van de horizontale richting (aangeduid door Hz) en de experimentele standaardafwijking van de verticale hoek (aangeduid door Vz). De metingen worden uitgevoerd in beide kijkerstanden (CL en CR).

De meetprocedure voor de bepaling van de experimentele horizontale standaardafwijking  $s_h$  is gescheiden van de procedure voor de bepaling van de experimentele verticale standaardafwijking  $s_v$ .

### 3.3 Meetprocedure voor de standaardafwijking van horizontale richtingen

De veldtest voor het bepalen van de experimentele standaardafwijking voor een horizontale hoek verloopt gelijkaardig voor de vereenvoudigde en de volledige testprocedure. Een aantal merktekens (4 voor de vereenvoudigde en 5 voor de volledige testprocedure) worden opgesteld in nagenoeg hetzelfde horizontale vlak als het meetinstrument, op afstanden tussen 100m en 250m. De azimuthale verdeling van deze merktekens is zo uniform mogelijk (Figuur 3.1). De merktekens moeten het punt op eenduidige wijze materialiseren, er worden bij voorkeur topografische merktekens gebruikt. Iedere



**Figuur 3.1:** Configuratie voor de volledige meetcampagne voor het bepalen van de experimentele horizontale standaardafwijking  $s_h$

meetcampagne  $i = 1, \dots, n$  verloopt in meerdere sessies,  $j = 1, \dots, m$ , waarbij voor de vereenvoudigde methode  $n = 1$  is en voor de volledige methode  $n = 4$  bedraagt, waarbij iedere meetcampagne onder verschillende maar niet extreme omstandigheden verlopen. Iedere meetsessie  $j$  bestaat uit reeksen van metingen naar  $t = 1, \dots, k$  topografische merktekens.

Bij toepassing van de vereenvoudigde testprocedure bestaat er geen vereiste om het toestel en de topografische merktekens perfect te centreren boven een grondpunt aangezien de enige meetcampagne in één enkele beurt wordt uitgevoerd.

Tijdens de voorbereiding van de verschillende meetcampagnes van de volledige testprocedure is een geforceerde centrering nodig wanneer de onderscheiden meetcampagnes op verschillende tijdstippen worden uitgevoerd. Een foutieve centrering leidt tot fouten in de gemeten richtingen die groter is naarmate de afstand tot het geïndiceerde punt klein is.

Indien de meetcampagnes van de testprocedure gebruikt worden om verschillende toestellen onderling te vergelijken dienen de opstelplaatsen van het totaalstation en van de topografische merktekens voorzien te worden van gewongen centreringen.

### 3.3 Berekeningen – vereenvoudigde testprocedure

De topografische merktekens worden in iedere reeks metingen waargenomen in de cirkel links (CL) en de cirkel rechts (CR) positie van het totaalstation.

Tijdens de volgende paragrafen worden de volgende indices gebruikt :

#### vereenvoudigde meetcampagne

- aantal meetcampagnes  $n = 1$ , index  $i = 1, \dots, n$
- aantal meetsessies  $m = 3$ , index  $j = 1, \dots, m$
- aantal topografische merktekens  $k = 4$ , index  $t = 1, \dots, k$

#### volledige meetcampagne

- aantal meetcampagnes  $n = 4$ , index  $i = 1, \dots, n$
- aantal meetsessies  $m = 3$ , index  $j = 1, \dots, m$
- aantal topografische merktekens  $k = 5$ , index  $t = 1, \dots, k$

### 3.3.1 Berekeningen – vereenvoudigde testprocedure

De vereenvoudigde testprocedure geeft een indicatie van de precisie van de horizontale hoekmetingen door de toepassing van een kleinste kwadraten vereffening van de metingen. In de volgende vergelijkingen duidt de index  $j$  de meetsessie aan terwijl de index  $t$  de topografische merktekens afloopt en  $l$  is de gelezen waarde op de horizontale cirkelrand van het totaalstation. De indexen 1 en 2 duiden de beide posities aan van het totaalstation.

Voor ieder topografisch merkteken  $t$  wordt de horizontale richting  $l_{j,t}$  ten opzichte van de horizontale cirkelrand van de theodoliet bepaald door de metingen volgens de beide posities van het totaalstation te middelen :

$$l_{j,t} = \frac{l_{j,t,1} + l_{j,t,2} \pm 200^g}{2} \quad j = 1, \dots, m = 3; \quad t = 1, \dots, k = 4$$

De gemiddelden worden gereduceerd naar het eerste topografisch merkteken door :

$$\hat{l}_{j,t} = l_{j,t} - l_{j,1} \quad j = 1, \dots, m = 3; \quad t = 1, \dots, k = 4$$

waarna de gemiddelde afgelezen waarde voor iedere richting naar een topografisch merkteken bekomen wordt door :

$$\bar{l}_t = \frac{\sum_{j=1}^{m=3} \hat{l}_{j,t}}{m} \quad t = 1, \dots, k = 4$$

Voor iedere meting wordt het verschil  $d_{j,t}$  berekend volgens :

$$d_{j,t} = \bar{l}_t - \hat{l}_{j,t} \quad j = 1, \dots, m = 3; \quad t = 1, \dots, k = 4$$

waarna het rekenkundige gemiddelde bekomen wordt door :

$$\bar{d}_j = \frac{\sum_{t=1}^{k=4} d_{j,t}}{k} \quad j = 1, \dots, m = 3$$

waaruit de residus voor iedere horizontale hoekaflezing bekomen wordt :

$$r_{j,t} = d_{j,t} - \bar{d}_j \quad j = 1, \dots, m = 3$$

Op de afrondingsfouten na, voldoet iedere meetreeks aan de voorwaarde :

$$\sum_{t=1}^{k=4} r_{j,t} = 0 \quad j = 1, \dots, m = 3$$

De experimentele standaardafwijking  $s$  voor de vereenvoudigde testprocedure wordt bekomen aan de hand van de som der kwadraten van de residus  $r_{j,t}$  en de vrijheidsgraad  $\nu$  van het systeem :

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{m=3} r^2 &= \sum_{j=1}^{m=3} \sum_{t=1}^{k=4} r_{j,t}^2 \\ \nu &= (m-1) \times (k-1) = (3-1) \times (4-1) = 6 \\ s &= \sqrt{\frac{\sum r^2}{\nu}} = \sqrt{\frac{\sum r^2}{6}} \end{aligned}$$

### 3.3.2 Berekeningen – volledige testprocedure

De volledige testprocedure onderscheidt zich van de vereenvoudigde testprocedure door voor iedere meetsessies naar  $k = 5$  topografische merktekens uit te voeren. Voor iedere individuele meetcampagne verloopt de berekening van de experimentele standaardafwijking  $s_i \quad i = 1, \dots, n = 4$  op dezelfde wijze als voor de vereenvoudigde testprocedure en wordt bepaald door :

$$s_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m=3} r_i^2}{\nu_i}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m=3} r_i^2}{8}} \quad i = 1, \dots, n = 4$$

waarbij de vrijheidsgraad  $\nu_i$  voor iedere meetcampagne  $i$  van de volledige testprocedure gegeven wordt door  $\nu_i = (m-1) \times (k-1) = (3-1) \times (5-1) = 8$ .

De experimentele standaardafwijking  $s_h$  voor de horizontale richtingaflezing wordt bekomen door een gemiddelde te bepalen van de experimentele standaardafwijkingen  $s_i$  van alle individuele meetsessies en leidt tot :

$$s_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n=4} \sum_{j=1}^{m=3} r_i^2}{\nu}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n=4} \sum_{j=1}^{m=3} r_i^2}{32}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n=4} s_i^2}{4}}$$

### 3.3.3 Statistische analyse

Het toepassen van statistische testen op de aflezingsen en de resultaten van de volledige testprocedure laten toe de betrouwbaarheid en de herhaalbaarheid van de metingen en de experimentele standaardafwijking te onderzoeken. Om de ijking van de horizontale aflezing van het totaalstation te valideren, worden de volgende statistische testen onderzocht :

- is de experimentele standaardafwijking  $s$  kleiner dan de theoretische standaardafwijking  $\sigma$  zoals bepaald door de fabrikant of opgelegd door een ander criterium ?
- behoren twee experimentele standaardafwijkingen  $s$  en  $\tilde{s}$  bepaald door hetzelfde type meetinstrument tijdens twee verschillende meetcampagnes (met dezelfde vrijheidsgraad) tot dezelfde populatie ?

De twee experimentele standaardafwijkingen  $s$  en  $\tilde{s}$  kunnen bekomen worden door gebruik van hetzelfde meetinstrument door verschillende operators, of door gebruik van hetzelfde meetinstrument op verschillende tijdstippen, of door gebruik te maken van verschillende meetinstrumenten.

Wanneer de experimentele standaardafwijkingen bepaald uit verschillende meetcampagnes tot dezelfde familie behoren, kan een gemiddelde voor de experimentele standaardafwijking  $\tilde{s}$  bepaald worden door de individuele waarden van iedere meetcampagne te middelen. Wanneer echter het tweede criterium een de experimentele standaardafwijking voor een specifieke meetcampagne niet aanvaard als behorende tot dezelfde familie, dan wordt deze meetcampagne uitgesloten voor de berekening van de gemiddelde experimentele standaardafwijking.

Voor de statistische testen wordt een vertrouwensinterval van 95% vooropgesteld  $1 - \alpha = 0.95$ . De vrijheidsgraad van de volledige testprocedure bedraagt  $\nu = 32$ . De hypothesen worden samengevat in de tabel 3.1 :

	Nul-hypothese	alternatieve hypothese
Criterium 1	$s \leq \sigma$	$s > \sigma$
Criterium 2	$s = \tilde{s}$	$s \neq \tilde{s}$

**Tabel 3.1:** De statistische analyse voor de volledige meetcampagne van de horizontale hoekmetingen

De nul-hypothese voor de vergelijking van de experimentele standaardafwijking  $s$  met een vooropgestelde waarde  $\sigma$  uit het eerste criterium wordt aanvaard wanneer :

$$\begin{aligned}
 s &\leq \sigma \times \sqrt{\frac{\chi_{1-\alpha}^2(\nu)}{\nu}} \\
 &\leq \sigma \times \sqrt{\frac{\chi_{0,95}^2(32)}{32}} \\
 &\leq \sigma \times \sqrt{\frac{46,19}{32}} \\
 &\leq \sigma \times 1,20
 \end{aligned}$$

Wanneer aan deze voorwaarde niet voldaan wordt, aanvaardt men de alternatieve hypothese voor het eerste criterium.

## Meetprocedure voor de standaardafwijking van verticale richtingen

De nul-hypothese voor het vergelijken van experimentele standaardafwijkingen uit verschillende meet-sessies steunt op de  $F$ -verdeling en wordt aanvaard indien :

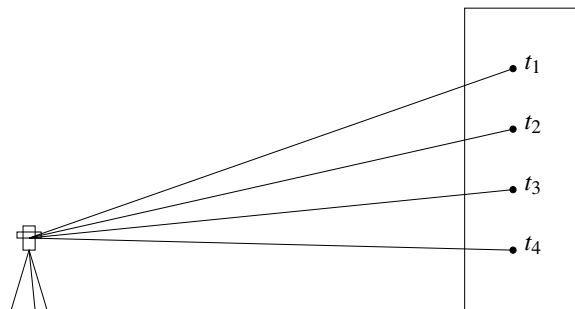
$$\begin{aligned} \frac{1}{F_{1-\frac{\alpha}{2}}(v;v)} &\leq \frac{s_h^2}{\tilde{s}_h^2} \leq F_{1-\frac{\alpha}{2}}(v;v) \\ \frac{1}{F_{0,975}(32;32)} &\leq \frac{s_h^2}{\tilde{s}_h^2} \leq F_{0,975}(32;32) \quad (\text{met : } F_{0,975}(32;32) = 2,02) \\ 0,49 &\leq \frac{s_h^2}{\tilde{s}_h^2} \leq 2,02 \end{aligned}$$

Wanneer aan de voorgaande voorwaarde niet voldaan is, wordt de alternatieve hypothese voor het tweede criterium weerhouden.

### 3.4 Meetprocedure voor de standaardafwijking van verticale richtingen

Voor het bepalen van de experimentele standaardafwijking  $s_v$  voor de verticale hoeken wordt het totaalstation in station gebracht op een afstand van ongeveer 50m van een hoog gebouw (30m). Dit gebouw wordt voorzien van topografische of eenduidig identificeerbare merktekens volgens een verticale lijn zodat een verticaal bereik van ongeveer  $30^\circ$  wordt overspannen. Het is aangeraden het meettoestel te acclimatiseren, waarbij een wachttijd van 2 minuten per graad Celsius aangenomen wordt. De ISO norm voorziet eveneens een vereenvoudigde testprocedure ( $n = 1$ ) en een volledige testprocedure ( $n = 4$ ).

De enige meetcampagne van de vereenvoudigde testprocedure bestaat uit het opmeten van de verticale hoek  $l_{j,t}$  voor  $j = 1, \dots, m = 3$  meet sessies van  $t = 1, \dots, k = 4$  topografische merktekens.



**Figuur 3.2:** Configuratie voor de volledige meetcampagne voor het bepalen van de experimentele verticale standaardafwijking  $s_v$

Tijdens de volledige testprocedure worden onder verschillende atmosferische omstandigheden meetcampagnes uitgevoerd, waarbij iedere meetcampagne bestaat uit  $i = 1, \dots, m = 4$  verschillende meet-sessies.

Voor iedere sessie  $i$  worden de topografische merktekens opgemeten in cirkel links positie van het merkteken in de zin 1 tot 4 en in de cirkel rechts positie voor de merktekens in de zin 4 tot 1.



### 3.4.1 Berekeningen – vereenvoudigde testprocedure

De evaluatie van de experimentele standaardafwijking wordt bekomen door toepassing van een kleinste kwadraten benadering van de waarnemingsvergelijkingen.

Voor ieder topografisch merkteken wordt de zenitale of verticale hoek bekomen door de cirkel links en cirkel rechts waarden te middelen :

$$l_{j,t} = \frac{l_{j,t,1} - l_{j,t,2} \pm 400^g}{2} \quad j = 1, \dots, m = 3; \quad t = 1, \dots, k = 4$$

Door toepassing van de meettechniek “cirkel links, cirkel rechts” of “doorslaan van de kijker” wordt de verticale indexfout  $\delta_i$  uit de metingen geëlimineerd. Deze verticale indexfout zal voor iedere meet-sessie bij de volledige testprocedure via een aparte berekening bepaald worden.

De gemiddelde waarde van de zenitale hoek voor de 3 sessies van metingen naar het merkteken geeft :

$$\bar{l}_t = \frac{\sum_{j=1}^{m=3} l_{j,t}}{m} \quad t = 1, \dots, k = 4$$

en de residus voor de zenitale hoekmeting naar ieder merkteken worden bekomen door :

$$r_{j,t} = l_{j,t} - \bar{l}_t \quad j = 1, \dots, m = 3; \quad t = 1, \dots, k = 4$$

Op de afrondingsfouten na geldt :

$$\sum_{j=1}^{m=3} \sum_{t=1}^{k=4} r_{j,t} = 0$$

Voor de enige meetsessie  $i = 1$  wordt de kwadratische som van de residus bepaald door :

$$\sum r_{(i=1)}^2 = \sum_{j=1}^{m=3} \sum_{t=1}^{k=4} r_{j,t}^2$$

De vrijheidsgraad voor de vereenvoudigde testprocedure bedraagt  $v_{(i=1)} = (m - 1) \times k = 2 \times 4 = 8$ , zodat de experimentele standaardafwijking  $s_{(i=1)}$  voor de enige uitgevoerde meetcampagne  $i = 1$  gegeven wordt door :

$$s_{(i=1)} = \sqrt{\frac{\sum r_{(i=1)}^2}{v_{(i=1)}}} = \sqrt{\frac{\sum r_{(i=1)}^2}{8}}$$

### 3.4.2 Berekeningen – volledige testprocedure

De verticale indexfout  $\delta_i$  kan voor iedere campagne  $i = 1, \dots, n = 4$  berekend worden door :

$$\delta_i = \frac{1}{m \times k} \sum_{j=1}^{m=3} \sum_{t=1}^{k=4} \frac{l_{j,t,1} + l_{j,t,2} - 400^g}{2}$$

De indexfout  $\delta$  voor het meettoestel wordt bekomen door het rekenkundige gemiddelde te bepalen over de verschillende meetcampagnes :

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^{n=4} \delta_i}{4}$$

Voor de volledige testprocedure geldt dat de vrijheidsgraad  $v = 4 \times v_i$  zodat de experimentele standaardafwijking  $s_v$  voor een zenitale hoek berekend over alle meetcampagnes  $i = 1, \dots, n = 4$  bekomen wordt door :

$$s_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n=4} \sum r_i^2}{v}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n=4} \sum r_i^2}{32}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n=4} s_i^2}{4}}$$

### 3.4.3 Statistische analyse

Statistische analyse van de metingen voor de volledige meetcampagne laten toe om voor de experimentele standaardafwijking  $s_v$  voor de zenitale hoeken en de verticale indexfout  $\delta$  conclusies te trekken met betrekking tot hun representativiteit voor de precisie van het toestel.

De experimentele standaardafwijking  $s_v$  wordt vergeleken met een theoretische waarde  $\sigma_v$ , bepaald door de fabrikant of gekozen in functie van een uit te voeren meetcampagne. De verticale indexfout  $\delta_i$  is voor een theoretisch perfect gefabriceerd meettoestel gelijk aan nul.

De statistische analyse onderzoekt de hypothesen opgesomd in tabel 3.2 :

	nul-hypothese	alternatieve hypothese
Criterium 1	$s_v \leq \sigma_v$	$s_v > \sigma_v$
Criterium 2	$s_v = \tilde{s}_v$	$s_v \neq \tilde{s}_v$
Criterium 3	$\delta = 0$	$\delta \neq 0$

**Tabel 3.2:** De statistische analyse voor de volledige meetcampagne van de verticale hoekmetingen

De nul-hypothese voor de vergelijking van de experimentele standaardafwijking  $s$  met een vooropgestelde waarde  $\sigma_v$  uit het eerste criterium wordt aanvaard wanneer :

$$\begin{aligned} s &\leq \sigma_v \times \sqrt{\frac{\chi_{1-\alpha}^2(v)}{v}} \\ &\leq \sigma_v \times \sqrt{\frac{\chi_{0,95}^2(32)}{32}} \\ &\leq \sigma_v \times \sqrt{\frac{46,19}{32}} \\ &\leq \sigma_v \times 1,20 \end{aligned}$$

Wanneer aan deze voorwaarde niet voldaan wordt, aanvaardt men de alternatieve hypothese voor het eerste criterium.

De nul-hypothese voor het vergelijken van experimentele standaardafwijkingen uit verschillende meet-sessies steunt op de  $F$ -verdeling en wordt aanvaard indien :

$$\begin{aligned} \frac{1}{F_{1-\frac{\alpha}{2}}(v; v)} &\leq \frac{s_v^2}{\tilde{s}_v^2} \leq F_{1-\frac{\alpha}{2}}(v; v) \\ \frac{1}{F_{0,975}(32; 32)} &\leq \frac{s_v^2}{\tilde{s}_v^2} \leq F_{0,975}(32; 32) \quad (\text{met : } F_{0,975}(32; 32) = 2,02) \\ 0,49 &\leq \frac{s_v^2}{\tilde{s}_v^2} \leq 2,02 \end{aligned}$$

Wanneer aan de voorgaande voorwaarde niet voldaan is, wordt de alternatieve hypothese voor het tweede criterium weerhouden.

De nul-hypothese die stelt dat de verticale indexfout  $\delta$  gelijk is aan nul wordt aanvaard indien voldaan wordt aan :

$$\begin{aligned} |\delta| &\leq s_\delta \times t_{1-\frac{\alpha}{2}} \\ &\leq s_\delta \times t_{0,975}(32) \quad \left( \text{met : } s_\delta = \frac{s}{\sqrt{12} \times \sqrt{4}} \text{ en } t_{0,975}(32) = 2,04 \right) \\ &\leq s \times \frac{2,04}{\sqrt{48}} \\ &\leq s \times 0,3 \end{aligned}$$

### 3.5 Analyse van de precisie van de elektro-optische afstandmeter

De ISO norm 17123-4 "*Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments – Part 4 : Electro-optical distance meters (EDM)*" bepaalt de methode voor de bepaling van de precisie van de elektro-optische afstandmeter. Zoals voor de bepaling van de precisie van de horizontale en verticale hoeken zijn deze EDM testen bedoeld om na te gaan of de elektro-optische afstandmeter voldoet voor de topografische taak waarvoor hij gebruikt wordt en wordt een onderscheid gemaakt tussen een vereenvoudigde en een volledige testprocedure.

Het EDM toestel moet gebruikt worden in overeenstemming met de voorschriften van de fabrikant en wordt bij voorkeur gebruikt met het annexe materieel (statief, reflectoren, geforceerde centrering (bij voorkeur), ...) van dezelfde fabrikant.

De veldtesten worden in reële omstandigheden uitgevoerd en zijn beïnvloed door de heersende atmosferische omstandigheden. De gebruiker dient er ook rekening mee te houden dat de ondergrond de voorplantingssnelheid via de refractiviteit van het medium beïnvloedt. De EDM metingen kunnen ook onder gecontroleerde omstandigheden uitgevoerd worden in een laboratorium en de atmosferische effecten grotendeels uitsluiten. Een labometing vertoont echter twee nadelen, (a) de behaalde meetprecisie is meestal veel beter dan de bereikbare meetnauwkeurigheid tijdens reële veldmetingen en (b) ze zijn meestal duur.

In de volgende secties worden de vereenvoudigde en volledige testprocedure beschreven volgens de ISO norm 17123-4. Er wordt aangenomen dat (a) de metingen worden uitgevoerd op dezelfde dag,

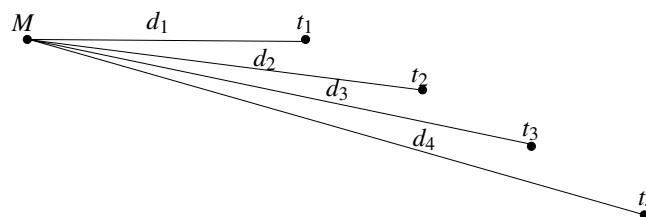
(b) de frequentie op voorhand met een frequentiemeter werd gecontroleerd, (c) de zichtbaarheid goed is en er niet teveel zonneschijn invalt op het meettoestel, (d) de heersende temperatuur en druk op regelmatige tijdstippen wordt opgemeten en (e) dat de hellingsreductie wordt toegepast om horizontale afstanden te bekomen (Secties 2.5.1 op pagina 38).

### 3.5.1 De vereenvoudigde testprocedure

De vereenvoudigde meetcampagne steunt op een beperkt aantal metingen om snel vast te stellen of de experimentele standaardafwijking  $s_{100}$  voor de elektro-optische afstandmeting voldoet aan de door de fabrikant vooropgestelde standaardafwijking  $\sigma_{100}$ .

De vereenvoudigde testprocedure steunt op een testveld waarbij de afstanden a priori gekend zijn. Deze gekende afstanden kunnen bekomen worden door (a) de afstanden te bepalen met een meettechniek die gekenmerkt wordt door een hogere orde precisie, of (b) door dezelfde afstanden te bepalen volgens de volledige testprocedure.

Het testveld bestaat uit een opstelplaats voor het meetinstrument  $M$  en 4 reflectoren  $t = 1, \dots, m = 4$  die op typische gebruiksafstanden (tussen 20 m en 200 m) voor de elektro-optische afstandmeter geplaatst zijn (Figuur 3.3). Wanneer de reflectoren niet op een permanente basis geplaatst kunnen worden,



**Figuur 3.3:** Testveld voor de vereenvoudigde elektro-optische afstandsmeetprocedure

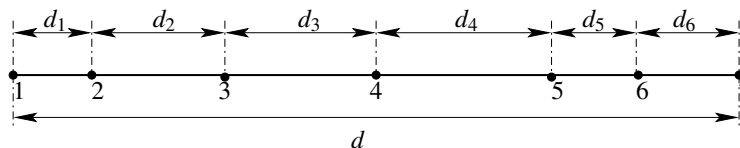
dienen de grondpunten echter op een permanente manier gematerialiseerd te zijn. De afstand tussen het meetinstrument  $M$  en ieder merkteken  $t_i$  wordt minstens  $3 \times$  opgemeten :  $d_{t,i}$  met  $i = 1, \dots, n = 3$ . Voor ieder merkteken  $t$  wordt het gemiddelde van de elektro-optische afstandsmetingen bepaald volgens :

$$d_t = \frac{\sum_{i=1}^{n=3} d_{t,i}}{n} \quad \text{voor } t = 1, \dots, m = 4$$

Deze gemiddelde afstanden  $d_t$  worden verbeterd om rekening te houden met de afwijkingen ten opzichte van de standaardatmosfeer. Hiertoe wordt tijdens de meetcampagne de heersende druk en temperatuur gemeten. De aan te brengen correcties worden besproken .

### 3.5.2 De volledige testprocedure

Het testveld voor de volledige testprocedure bestaat uit een rechte lijn van ongeveer 600m in een horizontaal veld of met een constante hellingshoek. Deze lijn wordt onderverdeeld in 6 segmenten (Figuur 3.4).



**Figuur 3.4:** Testveld voor de volledige elektro-optische afstandmeting

Het bepalen van de experimentele standaardafwijking  $s_{100}$  en de nulpuntscorrectie  $\delta$  voor een specifiek elektro-optische afstandmeter impliceert dat de afstanden tussen de testpunten gekozen worden in functie van de meetschaal van het EDM toestel. Deze meetschaal wordt bepaald door de helft van de golflengte van de frequentie  $\lambda/2$  waarmee de fijnmeting voor de afstanden wordt uitgevoerd (Sectie ?? op pagina ??).

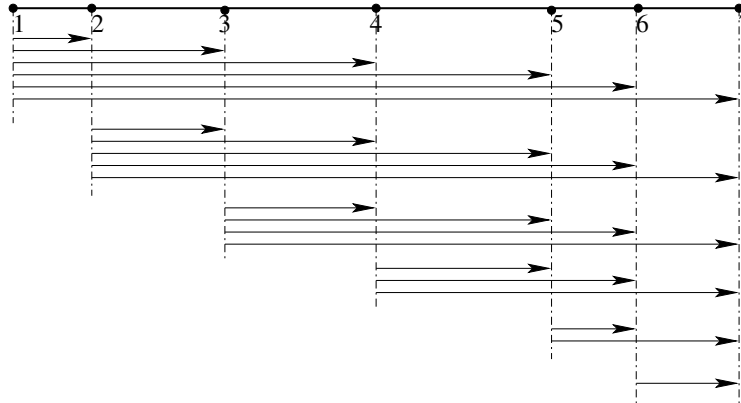
Een ideale testconfiguratie wordt bekomen wanneer de tussenafstanden  $d_1, \dots, d_6$  bepaald worden volgens :

- $d \approx 600$  m is de totale afstand van de basislijn ;
- $\lambda$  is de golflengte voor de fijnmeting van de afstandmeter. De meetschaal van de afstandmeter bedraagt  $\lambda/2$  ;
- Men bepaalt twee verdeelwaarden  $\beta$  en  $\gamma$  volgens :
  - de waarde  $\beta_0$  wordt gegeven door  $\beta_0 = \frac{d-6,5 \times \lambda}{15}$ . De afronding van  $\beta_0$  naar een geheel veelvoud van de meetschaal van de afstandmeter bepaalt  $\beta = \mu \times \frac{\lambda}{2}$  met  $\mu \in \mathcal{N}$  ;
  - $\gamma$  wordt gelijkgesteld aan  $\gamma = \frac{\lambda}{72}$  ;
- de tussenafstanden worden bekomen door :

$$\begin{aligned} d_1 &= \lambda + \beta + 3\gamma \\ d_2 &= \lambda + 3\beta + 7\gamma \\ d_3 &= \lambda + 5\beta + 11\gamma \\ d_4 &= \lambda + 4\beta + 9\gamma \\ d_5 &= \lambda + 2\beta + 5\gamma \\ d_6 &= \lambda + 3\gamma \end{aligned}$$

De totale afstand bedraagt dan  $d = 6\lambda + 15\beta + 36\gamma$ .

Alle 21 mogelijke afstanden tussen de 7 verschillende punten worden op dezelfde dag opgemeten (Figuur 3.5). Tijdens de meet sessie worden de opstelplaatsen voorzien van een geforceerde centrering



**Figuur 3.5:** Overzicht van de afstanden die gemeten worden in de volledige testprocedure

zodat centreringsfouten vermeden worden. De reflector is voorzien van een voldoende aantal prisma's, zodat het teruggekaatste signaal voldoende sterk is. Tijdens de metingen worden de atmosferische druk en temperatuur op verschillende tijdstippen opgetekend.

#### Berekeningen uitgevoerd bij de volledige testprocedure

De volgende notaties worden aangewend :

- $d_{p,q}$  ... de afgelezen of gemeten afstanden bekomen met de elektro-optische afstandmeter,
- $D_{p,q}$  ... de gecorrigeerde afstanden waarbij rekening wordt gehouden met de correcties voor de atmosferische omstandigheden (Sectie 3.5.1 op pagina 67) en met een reductie naar het horizontale vlak,
- $\bar{d}_{p,q}$  ... de vereffende waarde voor de tussenafstanden.

Hoewel niet alle afstanden even groot zijn, krijgen ze ieder hetzelfde gewicht toegekend. Tijdens de berekeningen worden de 6 tussenafstanden  $\bar{d}_{1,2}$ ,  $\bar{d}_{2,3}$ ,  $\bar{d}_{3,4}$ ,  $\bar{d}_{4,5}$ ,  $\bar{d}_{5,6}$  en  $\bar{d}_{6,7}$  alsook de nulpuntscorrectie  $\bar{\delta}$  berekend.

De procedure verloopt volgens :

$$a_p = \sum_{q=1}^{7-p} D_{q,p+q} - \sum_{q=1}^p D_{q,7-p+q} \quad p = 4, 5, 6$$

$$b_p = \frac{1}{7} \left( \sum_{q=p+1}^7 D_{p,q} - \sum_{q=1}^{p-1} D_{p,q} \right) \quad p = 1, \dots, 7$$

$$\delta = \frac{1}{35} \sum_{p=4}^6 (2p - 7) \times a_p$$

De volgende uitwerking van bovenstaande formules geeft een beter overzicht van de betekenis van de parameters  $a_p$  en  $b_p$  :

$$\begin{aligned}
 a_4 &= (D_{1,5} + D_{2,6} + D_{3,7}) - (D_{1,4} + D_{2,5} + D_{3,6} + D_{4,7}) \\
 a_5 &= (D_{1,6} + D_{2,7}) - (D_{1,3} + D_{2,4} + D_{3,5} + D_{4,6} + D_{5,7}) \\
 a_6 &= (D_{1,7}) - (D_{1,2} + D_{2,3} + D_{3,4} + D_{4,5} + D_{5,6} + D_{6,7}) \\
 \\
 b_1 &= \frac{1}{7} [(D_{1,2} + D_{1,3} + D_{1,4} + D_{1,5} + D_{1,6} + D_{1,7})] \\
 b_2 &= \frac{1}{7} [(D_{2,3} + D_{2,4} + D_{2,5} + D_{2,6} + D_{2,7}) - (D_{1,2})] \\
 b_3 &= \frac{1}{7} [(D_{3,4} + D_{3,5} + D_{3,6} + D_{3,7}) - (D_{1,3} + D_{2,3})] \\
 b_4 &= \frac{1}{7} [(D_{4,5} + D_{4,6} + D_{4,7}) - (D_{1,4} + D_{2,4} + D_{3,4})] \\
 b_5 &= \frac{1}{7} [(D_{5,6} + D_{5,7}) - (D_{1,5} + D_{2,5} + D_{3,5} + D_{4,5})] \\
 b_6 &= \frac{1}{7} [(D_{6,7}) - (D_{1,6} + D_{2,6} + D_{3,6} + D_{4,6} + D_{5,6})] \\
 b_7 &= -\frac{1}{7} (D_{1,7} + D_{2,7} + D_{3,7} + D_{4,7} + D_{5,7} + D_{6,7})
 \end{aligned}$$

**Opmerking 3.5.1.** De interpretatie<sup>1</sup> van de termen  $a_p$  en  $b_p$  wordt bij wijze van voorbeeld uitgewerkt voor  $p = 4$ .

We kunnen de bekomen uitdrukking voor  $a_4$  verder ontwikkelen door de termen op te splitsen in de deelafstanden :

$$a_4 = (\{D_{1,4} + D_{4,5}\} + \{D_{2,5} + D_{5,6}\} + \{D_{3,6} + D_{6,7}\}) - (D_{1,4} + D_{2,5} + D_{3,6} + D_{4,7})$$

wat leidt tot :

$$a_4 = (D_{4,5} + D_{5,6} + D_{6,7}) - D_{4,7}$$

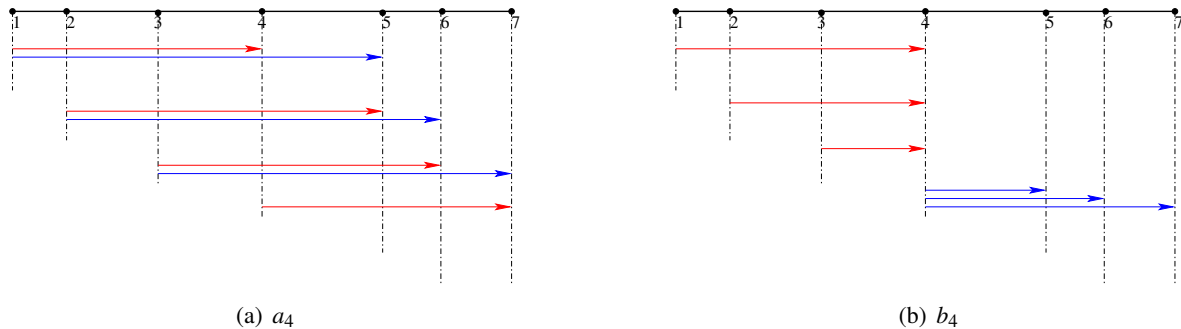
Theoretisch is de waarde van  $a_4$  dus gelijk aan nul. In de praktijk bestaan er echter meetfouten waardoor de waarde van  $a_4$  een maat is voor de meetfouten. De grafische voorstelling van  $a_4$  wordt op figuur 3.6(a) op de volgende pagina voorgesteld.

De berekende waarde  $b_4$  is het verschil tussen enerzijds de som der afstanden voorwaarts gemeten en anderzijds de som der afstanden achterwaarts gemeten zoals voorgesteld in figuur 3.6(b) op de pagina hierna.

Voor iedere gemeten afstand wordt een residu  $r_{p,q}$  berekend door de combinatie :

$$r_{p,q} = b_p - b_q - \frac{7 + 2(q-p)}{7} \times \delta - D_{p,q} \quad p = 1, \dots, 6 \quad q = p + 1, \dots, 7$$

<sup>1</sup>Deze interpretatie wordt enkel uitgewerkt als een gedachteconstructie. De formules kunnen niet als dusdanig gebruikt worden voor de berekening van de experimentele standaardafwijking.



**Figuur 3.6:** Grafische voorstelling van de berekende waarden

De kwadratische som van de residu's wordt :

$$\sum r^2 = \sum_{p=1}^6 \sum_{q=p+1}^7 r_{p,q} = r_{1,2}^2 + r_{1,3}^2 + \dots + r_{1,7}^2 + \dots + r_{2,1}^2 + \dots + r_{6,7}^2$$

De vrijheidsgraad  $\nu$  van het systeem bedraagt  $\nu = n - m = 14$ , met  $n = 21$  het aantal gemeten afstanden en  $m = 7$  het aantal onbekenden.

De experimentele standaardafwijking  $s_{100}$  voor een afstandmeting bedraagt :

$$s_{100} = \sqrt{\frac{\sum r^2}{\nu}} = \sqrt{\frac{\sum r^2}{14}}$$

terwijl de standaardafwijking  $s_{\delta}$  voor de nulpuntscorrectie gegeven wordt door :

$$s_{\delta} = s_{100} \times \frac{1}{\sqrt{5}} \approx s_{100} \times 0,45$$

### Statistische analyse voor de validatie van de afstandmetingen

Deze statistische analyse wordt alleen toegepast op de volledige testprocedure. Deze analyse beoogt de betrouwbaarheid te valideren van de experimentele standaardafwijking  $s_{100}$  voor de afstandmetingen en voor de experimentele nulpuntscorrectie  $\delta$ .

De experimentele standaardafwijking  $s_{100}$  voor de afstandmetingen wordt (a) enerzijds vergeleken met de waarde  $\sigma_{100}$  opgegeven door de fabrikant (criterium 1) en (b) anderzijds wordt onderzocht of de experimentele standaardafwijkingen  $s_{100}$  en  $\tilde{s}_{100}$  voor 2 onafhankelijk uitgevoerde testprocedures tot dezelfde populatie behoren (criterium 2).

De experimentele nulpuntscorrectie  $\delta$  wordt vergeleken met de vooropgestelde nul-waarde of de opgegeven nulpuntscorrectie  $\delta_0$  van het gebruikte prisma (criterium 3).

De statistische analyse wordt samengevat in tabel.



	Nul hypothese	Alternatieve hypothese
Criterium 1	$s_{100} \leq \sigma_{100}$	$s_{100} > \sigma_{100}$
Criterium 2	$s_{100} = \tilde{s}_{100}$	$s_{100} \neq \tilde{s}_{100}$
Criterium 3	$\delta = \delta_0$	$\delta \neq \delta_0$

Tabel 3.3: Statistische analyse voor de validatie van de afstandmetingen

Voor deze testen wordt een betrouwbaarheidsinterval van  $1 - \alpha = 0,95$  aangenomen en bedraagt de vrijheidsgraad  $\nu = 14$ .

De nul-hypothese voor het eerste criterium wordt voldaan wanneer aan de volgende voorwaarde wordt voldaan :

$$\begin{aligned}
 s_{100} &\leq \sigma_{100} \times \sqrt{\frac{\chi_{1-\alpha}^2(\nu)}{\nu}} \\
 &\leq \sigma_{100} \times \sqrt{\frac{\chi_{0,95}^2(14)}{14}} \\
 \chi_{0,95} &= 23,68 \\
 s_{100} &\leq 1,30 \times \sigma_{100}
 \end{aligned}$$

De nul-hypothese wordt aanvaard wanneer  $s_{100} \leq 1,30 \times \sigma_{100}$ , anders wordt de alternatieve hypothese weerhouden.

Het tweede criterium vergelijkt de experimentele standaardafwijkingen van twee verschillende meet-sessies  $s_{100}$  en  $\tilde{s}_{100}$  en bepaalt of ze tot dezelfde steekproef behoren en wordt aanvaard indien :

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{F_{1-\frac{\alpha}{2}}(\nu, \nu)} &\leq \frac{s_{100}^2}{\tilde{s}_{100}^2} \leq F_{1-\frac{\alpha}{2}}(\nu, \nu) \\
 \frac{1}{F_{0,975}(14, 14)} &\leq \frac{s_{100}^2}{\tilde{s}_{100}^2} \leq F_{0,975}(14, 14) \\
 F_{0,975}(14, 14) &= 2,98 \\
 0,34 &\leq \frac{s_{100}^2}{\tilde{s}_{100}^2} \leq 2,98
 \end{aligned}$$

Het derde criterium wordt aanvaard wanneer :

$$\begin{aligned}
 |\delta - \delta_0| &\leq s_{\delta} \times t_{1-\frac{\alpha}{2}}(\nu) \\
 |\delta - \delta_0| &\leq s_{\delta} \times t_{0,975}(14) \\
 s_{\delta} &= \frac{s}{\sqrt{5}} = s \times 0,45 \\
 t_{0,975}(14) &= 2,14 \\
 |\delta - \delta_0| &\leq \frac{s}{\sqrt{5}} \times 2,14
 \end{aligned}$$

## Hoofdstuk 4

# Kalibratie van elektronische afstandsmeters

### Inhoudsopgave

---

4.1 Inleiding .....	73
---------------------	----

---

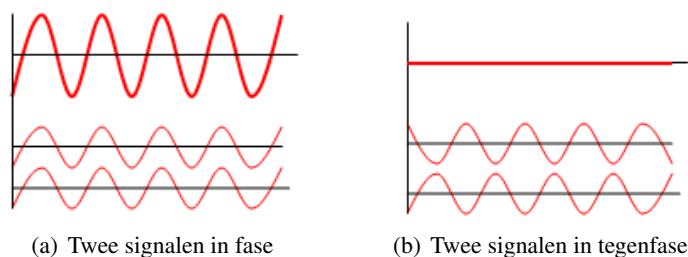
## 4.1 Inleiding

De validatie van electro-magnetische afstandsmeters kan gesplitst worden in 2 aspecten : (a) enerzijds controle van de absolute afstandsmaat en (b) anderzijds controle van de spreiding of herhaalbaarheid van de metingen. Voor eerstgenoemde controle wordt in principe steeds een interferometer gebruikt en wordt hieronder behandeld. Voor het tweede type controle bestaan normen, waarvan de ISO norm (Sectie 3.5 op pagina 66) de belangrijkste is.

Voor de meest nauwkeurige controle van afstandsmetingen worden interferometers ingezet waarbij de interferentie tussen twee lichtgolven met eenzelfde golflengte wordt bestudeerd. Deze lichtgolven worden door een laser geproduceerd, vanwege de hoge stabiliteit van de gekende golflengte en fase van het geproduceerde licht<sup>1</sup>. Het laserlicht wordt door een stralingsdeler gesplitst in twee coherente deelstralen met een gelijke intensiteit. De stralen leggen aparte optische wegen af, en komen dan terug bij elkaar en gaan met elkaar interfereren. De faseverschuiving van de signalen die voorkomt uit het verschil in afgelegde afstand van de gedeelde laserstralen gaat het signaal versterken of verzwakken. Wanneer beide golven in fase zijn, dan wordt het resulterende signaal versterkt (Figuur 4.1(a) op de pagina hierna). Bedraagt het faseverschil echter een halve golflengte  $\lambda/2$ , dan doven de interfererende signalen elkaar uit (Figuur 4.1(b) op de volgende pagina). Het faseverschil wordt bepaald door het verschil in afstand dat de beide deelstralen afleggen. Richt men de beide deelstralen op een fotodetector en verandert men de af te leggen weg van één van de stralen op continue wijze, dan zal de fotodetector een afwisseling van een helder-donker signaal waarnemen. Het aantal helder-donker wisselingen is

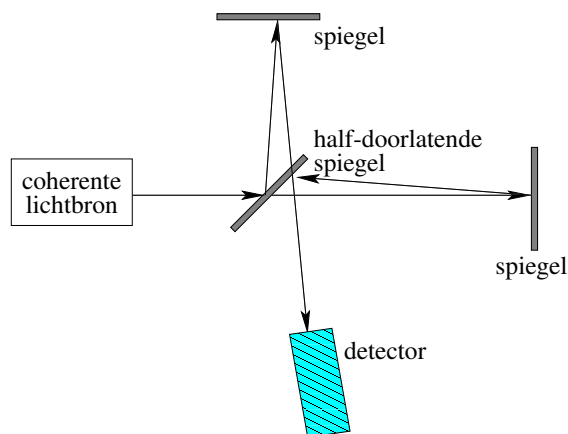
---

<sup>1</sup>De juiste benaming is laserinterferometrie, maar dit wordt meestal afgekort tot interferometrie



**Figuur 4.1:** Interferentie tussen twee signalen

daarbij een maat voor de verandering van afstand van afgelegde weg van de ene lichtstraal tegenover de andere. Dit principe is in de MICHELSON interferometer (Figuur 4.2) uitgewerkt. Er zijn twee



**Figuur 4.2:** Basisprincipe van de Michelson interferometer

golfwegen die tussen de coherente lichtbron en de fotodetector worden afgelegd. De eerste golfweg reflecteert op de half-doorlatende spiegel, gaat naar de bovenste (vaste) spiegel en reflecteert terug naar beneden. Deze straal gaat doorheen de half-doorlatende spiegel en wordt door de fotodetector opgevangen. De tweede golfweg gaat doorheen de half-doorlatende spiegel en wordt gereflecteerd op de (bewegende) spiegel. De half-doorlatende spiegel breekt dit signaal zodat het eveneens invalt op de fotodetector. Wanneer deze twee golfwegen verschillen door een geheel veelvoud van de golflengte van de electro-magnetische golf, dan wordt een versterkt signaal waargenomen door de fotodetector. Wanneer het verschil tussen beide golfpaden een geheel aantal en een half golflengten bedraagt (bvb. 0,5, 1,5, 2,5, ...), dan treedt een destructieve interferentie op en wordt een zwak signaal gedetecteerd door de fotodetector.

Nemen we als uitgangspositie aan dat beide deelstralen in fase aankomen bij de fotodetector. De fotodetector levert een bij maximum helderheid ontstane maximum aanvangsspanning. Bij het verschuiven van de beweegbare reflector over een afstand van  $\frac{\lambda}{4}$  doorloopt de tweede deelstraal een extra afstand van  $\frac{\lambda}{2}$ . De samengebrachte deelstralen ondergaan een faseverschil van een halve golflengte, waardoor de bijgaande spanning van de fotodetector een minimale waarde aanneemt. Bij een verdere verschuiving van de reflector over een afstand  $\frac{\lambda}{4}$  wordt weer een spanningsmaximum waargenomen.

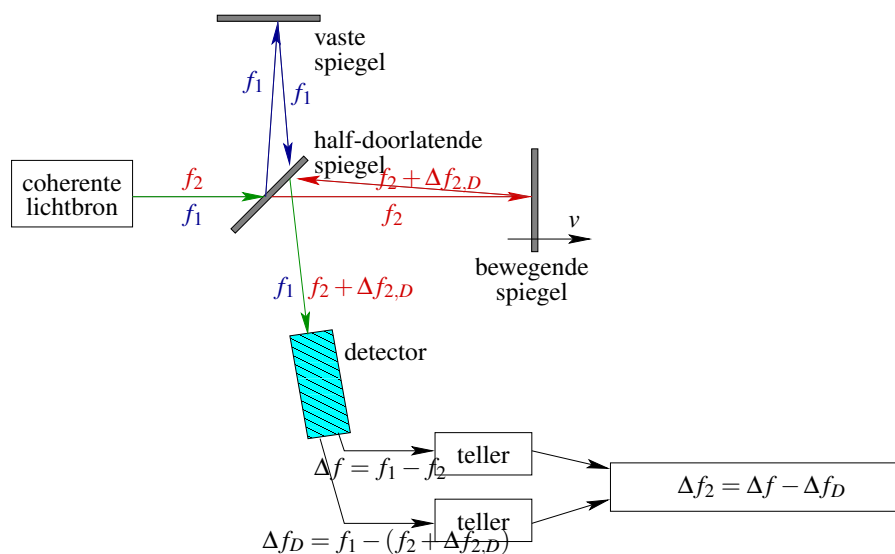
Wordt nu het aantal maxima  $N_{\max}$  door een aan de fotodetector geschakelde teller bepaald, dan verkrijgt men de afstand  $D$  van het verschuiven van de bewegende reflector door :

$$D = N_{\max} \times \frac{\lambda}{2}$$

De resolutie van dit systeem bedraagt dus  $\frac{\lambda}{2}$ , wat bij een golflengte van  $\lambda = 0,6 \mu\text{m}$  neerkomt op ongeveer  $0,3 \mu\text{m}$ . Gestabiliseerde lasers kunnen gedurende lange tijd een signaal met een relatieve nauwkeurigheid van  $\frac{d\lambda}{\lambda} = 10^{-8}$  genereren. De nauwkeurigheid van de afstand, afgeleid van de golflengte van de laser, is daardoor van dezelfde grootteorde.

Het grote nadeel van de Michelson interferometer is dat de detector de richting van de verplaatsing van de reflector niet kan onderscheiden. Dit wordt opgelost door gebruik te maken van een heterodyne systeem met twee frequenties. De laserbron zendt dan licht uit met de frequenties  $f_1$  en  $f_2$ , met bijhorende golflengten  $\lambda_1$  en  $\lambda_2$ . In het toestel wordt door frequentieoverlapping de zweeffrequentie  $\Delta f = f_1 - f_2$  samengesteld en de maxima van deze zweeffrequentie worden geteld.

De stralingsbron genereert twee electro-magnetische signalen met respectieve frequenties  $f_1$  en  $f_2$ . De deelstraal met frequentie  $f_1$  loopt over een vaste afstand, terwijl de deelstraal met frequentie  $f_2$  door de bewegende reflector terug in de polariserende interferometer wordt gereflecteerd (Figuur 4.3).



**Figuur 4.3:** Principe van het 2 frequentie systeem

De fotodetector levert de signalen :

- de zweeffrequentie  $\Delta f = f_1 - f_2$ ,
- wanneer de bewegende spiegel met een snelheid  $v$  wordt verschoven, wordt door het Doppler-effect de frequentie  $f_2$  verschoven over  $\Delta f_{2,D}$  waarvoor geldt dat :

$$\Delta f_{2,D} = f_2 \frac{2 \times v(t)}{c}$$

Beweegt de reflector naar de interferometer toe, dan is  $\Delta f_{2,D}$  positief, bij verwijdering van de interferometer negatief. Uit de fotodetector en de aangesloten teller wordt dan het frequentieverschil  $\Delta f_D$  bepaald volgens :

$$\Delta f_D = f_1 - (f_2 + \Delta f_{2,D})$$

Uit de twee bovenstaande vergelijkingen kan de verplaatsing  $D$  afgeleid worden.

$$v(t) = \frac{\Delta f_2 \times c}{2 \times f_2}$$

$$\Delta f_{2,D} = f_1 - f_2 - \Delta f_D = \Delta f - \Delta f_D$$

Wordt de reflector gedurende een periode  $t_2 - t_1$  met de variabele snelheid  $v(t)$  verschoven, dan bepaalt de integratie de gezochte verplaatsing  $D$  :

$$D = \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt = \frac{\lambda_2}{2} \int_{t_1}^{t_2} \Delta f_{2,D} dt$$

$$= \frac{\lambda_2}{2} \int_{t_1}^{t_2} (\Delta f - \Delta f_{2,D}) dt$$

De oplossing van deze integraal gebeurt in de praktijk in het toestel door het optellen van de telimpulsen gedurende de verplaatsingstijd  $dt$ .

Ook hier geldt de bij de Michelson interferometer genoemde relatieve nauwkeurigheid van  $10^{-8}$ . De resolutie daarentegen ligt bij het heterodyne systeem nog hoger en kan tot  $0,01 \mu\text{m}$  bedragen. Deze extreem hoge resolutie kan wel alleen maar bij zeer korte afstanden gehaald worden (grootteorde 10cm). Ook op deze korte afstand is de invloed van de atmosfeer de beperkende factor.

Bij metingen tot 30m bedraagt de atmosferische invloed ongeveer  $3 \cdot 10^{-7}$  m. Onder optimale omstandigheden (een kamer met klimaatregeling) kan  $1 \cdot 10^{-7}$  m gehaald worden.

Uit onderstaande blijkt de noodzaak van een goede atmosferische conditionering van de metingen. De golflengte van de laser ondergaat niet te onderschatten wijzigingen bij verandering van atmosferische omstandigheden, zoals blijkt uit onderstaand overzicht van de invloed van de atmosferische parameters :

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} \approx 1 \cdot 10^{-6} \text{ per } ^\circ\text{C} \text{ temperatuurverhoging}$$

$$\approx -3 \cdot 10^{-7} \text{ per hPa drukverhoging}$$

$$\approx 1 \cdot 10^{-8} \text{ per procentuele toename van de relatieve vochtigheid.}$$

Metten met de interferometer is niet evident en slechts onder bepaalde omstandigheden mogelijk. Zo moet de beweegbare reflector zich van zijn vertrekpunt over de gehele afstand in de as van de laser bevinden. De minste onderbreking van de laserstraal moet ten stelligste vermeden worden. Dit maakt dat de interferometer slechts geschikt is voor metingen in labomstandigheden. De interferometer kan perfect gebruikt worden voor het kalibreren van de electro-magnetische afstandmeters van een totaalstation omdat deze in het beste geval een nauwkeurigheid beiden van  $1 \cdot 10^{-6}$ .

## Hoofdstuk 5

# Het GPS-NavSTAR systeem

### 5.1 Geschiedenis van het GPS-NavSTAR systeem

Bij aanvang van de jaren 1960 toonden verschillende gouvernementele organisaties van de VSA, waaronder het DEPARTMENT OF DEFENCE (DoD), de NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE AGENCY (NASA) en het DEPARTMENT OF TRANSPORTATION (DoT), interesse voor de ontwikkeling van een satelliet gebaseerd systeem dat zou toelaten de positie en de snelheid van een vector te bepalen en dat de mogelijkheid zou bieden tijdsoverdrachten tussen ver verwijderde stations te realiseren. Het optimale systeem werd gekenmerkt door :

- een wereldwijde dekking ;
- een continue werking onafhankelijk van de klimatologische omstandigheden ;
- een grote nauwkeurigheid.

Door het samenvoegen en consolideren van onafhankelijke projecten en inspanningen van de verschillende krijgsmacht delen in een enig project, startte in 1969 de **Office of the Secretary of Defense** het **Defense Navigation Satellite System** (DNSS) programma. Hieruit groeide het **GPS Joint Program Office** (JPO) dat actueel nog steeds verantwoordelijk is voor de verdere ontwikkeling van het GPS systeem, de productie van nieuwe satellieten, het controle segment en de militaire ontvangers.

De volledige benaming **GPS-NavSTAR** staat voor **Global Positioning System – NAVigation by Satellite Timing And Ranging**. GPS-NavSTAR is een navigatiesysteem dat toelaat met een grote precisie de positie, de snelheid en de tijd van een vector te bepalen in een gemeenschappelijke referentie op een continue wijze, op wereldwijde schaal en dit onafhankelijk van de weersomstandigheden. De eerste GPS satelliet werd in 1978 gelanceerd. Sindsdien is het systeem gedeeltelijk gedeclasseerd en kan het voor burgerlijke doeleinden gebruikt worden.

In 1992 bereikte het GPS systeem haar **Full Operational Capability** (FOC) wanneer de constellatie van 24 (productie en test) satellieten bereikt werd en de militaire positiecodes toegankelijk waren. Ze voorzagen in de driedimensionele bepaling van de positie en de snelheid met een ongekennde precisie en

op wereldwijde basis. GPS laat eveneens toe de tijd te verspreiden en een synchronisatie te bekomen met de **Universal Coordinated Time** UTC.

Het GPS systeem voorziet in 2 **positioneringsdiensten** of **Positioning Services** (Sectie 5.3.2 op pagina 86) : de **Standard Positioning Service (SPS)** is bestemd voor burgerlijk gebruik terwijl de meer nauwkeurige **Precise Positioning Service (PPS)** gereserveerd is voor (Amerikaans) militair gebruik en geselecteerde gouvernementele organisaties.

Deze positioneringsdiensten steunen op het gebruik van **pseudo toevallige ruiscodes** of **Pseudo Random Noise codes (PRN)**. De toegang tot de verschillende satellieten van het GPS systeem verloopt via een **Code Division Multiple Access (CDMA)** discriminatie tussen de satellieten : iedere GPS satelliet krijgt een eigen (civiele en militaire) code toegewezen die via twee draaggolven naar de gebruikers worden doorgestuurd.

## 5.2 De segmenten van het GPS systeem

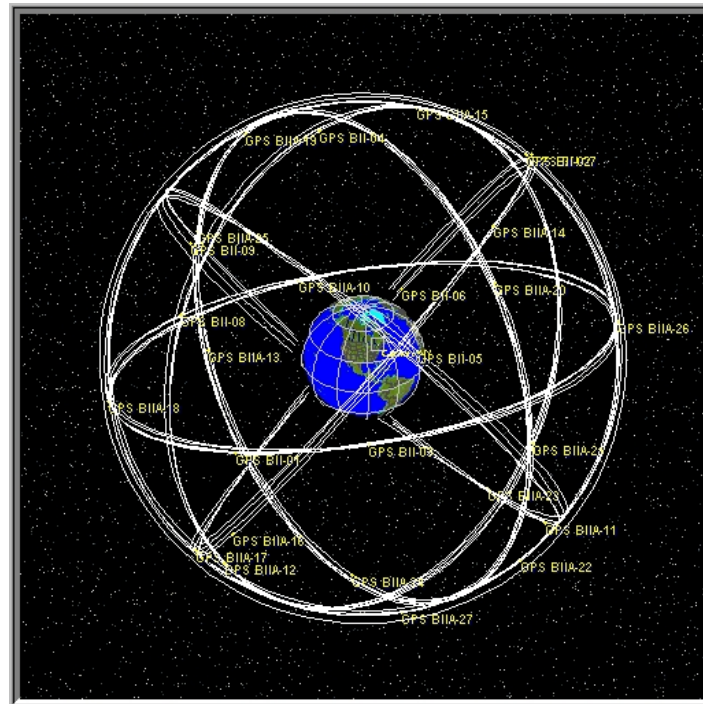
Het GPS systeem is opgebouwd uit drie segmenten : het **ruimtesegment** samengesteld uit actieve satellieten die de navigatiesignalen uitzenden, het **controlesegment** die de controle- en grondapparatuur omhelst en het **gebruikerssegment** dat de satellietsignalen ontvangt en omvormt tot positie-, snelheid- en tijdinformatie.

### 5.2.1 Het ruimtesegment

De **nominale GPS constellatie** bestaat uit 24 satellieten (Figuur 5.1 op de volgende pagina) en wordt dikwijls aangeduid door de **21+3 constellatie**. Hieronder verstaat men dat er 21 actieve satellieten zijn en 3 satellieten als reserve optreden. Deze laatste 3 satellieten zenden hun signalen permanent uit op dezelfde wijze als de actieve satellieten en kunnen voor navigatiedoeleinden gebruikt worden. De reserve satellieten worden echter gebruikt om de ruimtelijke verdeling van de satellietenconstellatie aan te passen door het uitvoeren van orbitale manoeuvres, waardoor ze binnen hun orbietvlak van positie kunnen veranderen. De satellieten zijn verdeeld over **6 baanvlakken** met een verschil in rechte klimming van  $60^\circ$ . In ieder orbietvlak draaien 4 satellieten. De nominale **orbitale periode** bedraagt een halve siderale dag (12hST), wat overeenstemt met ongeveer  $11^h58^m$  middelbare of universele tijd. De orbieten zijn nagenoeg **cirkelvormig** en de nominale **inclinatiehoek** bedraagt  $55^\circ$ . De nominale waarde van de halve grote as bedraagt 26 600 km. De uitbouw van de constellatie is zodanig dat ieder punt op aarde **minimaal 4 satellieten** waarneemt boven zijn lokale horizon.

De aanduiding van de satellieten volgt verschillende methodes.

1. Volgens de eerste methode wordt een satelliet aangeduid door een letter die het orbietvlak aanduidt (van A ... F) en een cijfer (van 1 ... 4) per satelliet in het orbietvlak. Zo is satelliet B3 de derde satelliet in het orbietvlak B.



**Figuur 5.1:** Ruimtelijke voorstelling van de GPS satellietenconstellatie

2. De **NavSTAR nummering**, of **SVN** (*Space Vehicle Number*), wordt door de U.S. Air Force toegekend. Dit nummer duidt het volgnummer aan van de satelliet in de lanceringsreeks van GPS satellieten. Zo is satelliet SVN11 de elfde GPS satelliet die werd gelanceerd.
3. De **PRN** nummer is de derde methode die steunt op de pseudo random noise code (Sectie ?? op pagina ??) die wordt toegekend aan de GPS satelliet en die gebruikt wordt voor het bepalen van de oplossing aan het navigatievraagstuk (Sectie ?? op pagina ??). Deze codes zijn uniek voor iedere actieve satelliet en laten een ontvanger toe de satelliet te identificeren. Actueel zijn 32 verschillende codes toegekend voor gebruik in het ruimtesegment (Tabel 5.1 op de pagina hierna). Deze laatste nummering wordt gebruikt in de verschillende berichten die binnen het GPS systeem worden gegenereerd.

De operationele levensduur van een GPS satelliet werd op 6 jaar geschat. Actueel bedraagt de effectieve levensduur gemiddeld 10 jaar voor de satellieten. De stroomvoorziening wordt betrokken vanuit twee zonnepanelen die continu naar de zon gericht worden. Ze laden drie interne batterijen op die tijdens een eclips van de satelliet de stroomvoorziening overnemen. Iedere satelliet beschikt over een eigen propulsiesysteem dat gebruikt wordt om de satelliet op haar orbiet te houden en om de stabiliteit van de satelliet te verzekeren. De 3 reserve satellieten maken eveneens van dit propulsiesysteem gebruik om orbitale manoeuvres uit te voeren.

Iedere GPS satelliet beschikt over 4 atoomklokken (2 Rubidium en 2 Caesium klokken). Deze atoomklokken zijn cruciaal voor de operatie van het systeem en vertonen een hoge nauwkeurigheid. De klokken, waarvan de verwachte levensduur anderhalf jaar was, worden sequentieel gebruikt : na pane van een atoomklok wordt de volgende geactiveerd.



## 5.2 De generaties van GPS satellieten

Satellietnummer					Satellietnummer				
Blok	PRN	SVN	Orbiet	Lanceer datum	Blok	PRN	SVN	Orbiet	Lanceer datum
I	12	10	A1	Sep 84	IIA	28	28	C2	Apr 92
II	14	14	E1	Feb 89	IIA	26	26	F2	Jul 92
II	02	13	B3	Jun 89	IIA	27	27	A3	Sep 92
II	16	16	E3	Aug 89	IIA	01	32	F1	Nov 92
II	19	19	A4	Okt 89	IIA	29	29	F4	Dec 92
II	17	17	D3	Dec 89	IIA	22	22	B1	Feb 93
II	18	18	F3	Jan 90	IIA	31	31	C3	Mar 93
II	20	20	B2	Mar 90	IIA	07	37	C4	Mei 93
II	21	21	E2	Aug 90	IIA	09	39	A1	Jun 93
II	15	15	D2	Okt 90	IIA	05	35	B4	Aug 93
IIA	23	23	E4	Nov 90	IIA	04	34	D4	Okt 93
IIA	24	24	D1	Jul 91	IIA	06	36	C1	Mar 94
IIA	25	25	A2	Feb 92					

**Tabel 5.1:** De nummering van de GPS satellieten

### 5.2.2 De generaties van GPS satellieten

De ontwikkeling van het ruimtesegment en het controlesegment (Sectie 5.2.3 op de volgende pagina) van het GPS systeem verliep gefaseerd over meerdere jaren. In het midden van de jaren 70 startte de validatiefase op die later gevolgd werd door de productie- en exploitatiefase. De type satelliet wordt geassocieerd met zulk een fase en wordt aangeduid door de groepsnaam **Satellite Blok**. De karakteristieken van iedere fase en van ieder blok satellieten worden hierna kort vermeld.

Tot op heden werden drie verschillende satellietblokken ontplooid en zijn twee nieuwe generaties satellieten gepland. De satellieten van de validatiefase werd aangeduid door de term **Blok I** satellieten. De **Blok II** satellieten behoorden tot de initiële productiefase terwijl **Blok IIA** verwijst naar de verbeterde productiesatellieten. Satellieten van Blok I, II en IIA zijn gelanceerd en actueel vormen de Blok II en IIA satellieten het hart van de GPS constellatie. Sinds 1995 zijn de **Blok IIR** satellieten, de “*replenishment<sup>1</sup> satellites*”, in productie en worden de **Blok IIF** satellieten, gerefereerd als de “*follow-on of sustainment<sup>2</sup>*” satellieten gepland.

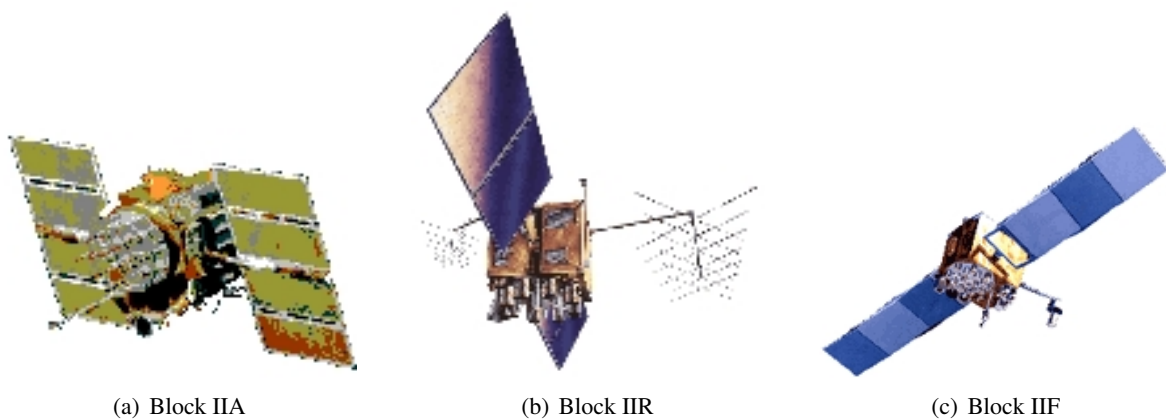
Negen Blok II satellieten en 15 Blok IIA satellieten vormden in 1995 de effectieve GPS constellatie. Nog 4 bijkomende Blok IIA satellieten werden aangekocht en worden gebruikt om defecte of onbruikbare satellieten te vervangen. Hierna worden nieuwere Blok IIR satellieten gebruikt tijdens de periode 1996–2004. Na 2004 zal het GPS ruimtesegment verder onderhouden worden met Blok IIF satellieten. Van de reeds beschikbare blok IIR satellieten wordt actueel een aantal satellieten aangepast aan de nieuwe militaire codes. Deze M-codes vormen de toekomstige basis voor de militaire positioneringsdienst van het GPS systeem. De gemodificeerde satellieten worden aangeduid door **Blok IIR-M** satellieten.

<sup>1</sup>Vrij vertaald betekent replenishment het *weder opvullen* van de constellatie

<sup>2</sup>De *opvolgings- of onderhoudssatellieten*

De nuttige last voor de navigatie of **navigation payload** van een GPS satelliet vormt slechts een onderdeel van de satelliet. Andere systemen zijn verantwoordelijk voor de stabiliteitscontrole (**attitude control**), de energievoorziening, ... De navigation payload bestaat uit de gedeelten die instaan voor de ontvangst van data komende van het controlesegment (Sectie 5.2.3), voor het uitvoeren van afstandmetingen tussen de GPS satellieten onderling (enkel aanwezig op Block IIR en Block IIF satellieten) en voor de overzending van de nodige signalen en gegevens naar de GPS gebruiker toe (Sectie 5.3 op pagina 83).

De figuur 5.2 toont de verschillende generaties van GPS satellieten.



**Figuur 5.2:** De generaties van GPS satellieten

### 5.2.3 Het controlesegment

Het controlesegment of **Operational Control Segment (OCS)** is verantwoordelijk voor het onderhoud en de goede werking van het GPS systeem. Dit houdt hoofdzakelijk de volgende taken in :

- de orbitale controle van de satellieten of **station keeping** ;
- de controle op de correcte werking van de verschillende deelsystemen van de satelliet (elektrische voorzieningen, propulsie, ... ) ;
- het activeren van de reserve satellieten en het initialiseren van eventuele orbitale manoeuvres.

Iedere 24 uur (frequenter bij noodzaak) actualiseert het controlesegment de data betreffende de boordklok, de efemeriden en de almanak (Sectie 5.4 op pagina 87) in het boordgeheugen van de satellieten. De efemeride voorstelling van de satellietbaan is geldig gedurende een periode van 1,5 tot maximaal 6 uur, dit **navigatiebericht** wordt tijdens normale operaties ieder uur aangepast. Afhankelijk van de versie van de satelliet (of Satellite Block (Sectie 5.2.1 op pagina 78)) kan men de navigatieberichten voor de volgende 14 dagen tot 210 dagen stockeren in het boordgeheugen van de satelliet. De almanak is een vereenvoudigde voorstelling van het efemeride bericht (7 parameters in plaats van 15) en wordt gebruikt om een ruwe voorspelling van de positie van de satelliet te bepalen. De almanak ondersteunt de ontvanger tijdens de acquisitiefase van de satellieten. Het controlesegment meet de

pseudo-afstanden (**pseudo-range**) en haar variaties (**delta-range**) naar de satellieten om door middel van orbitografie de parameters van het navigatiebericht te berekenen en te extrapoleren.

Het controlesegment bestaat uit een **Master Control Station** (MCS) te COLORADO SPRINGS (USA), 4 volgstations of **Master Stations** en een serie grondantennes (**Ground Antenna's**) verdeeld gelegen langs de evenaar. Initieel was het MCS gelegen op de VANDENBERG AFB (CA) maar het centrum werd verplaatst naar het CONSOLIDATED SPACE OPERATIONS CENTRE (CSOC) te COLORADO SPRINGS (CO). Het CSOC verzamelt de metingen van de diverse MS en berekent de efemeride en klokparameters volgens een filtering procedure.

Naast het MS te COLORADO SPRINGS heeft men een MS op ASCENSION ISLAND (Atlantische Oceaan), te DIEGO GARCIA (Indische Oceaan), te KWAJALEIN en op HAWAÏ (Stille Oceaan) (Figuur 5.3). Ieder MS is uitgerust met 2 atoomklokken, ontvangers die de militaire code iedere 1,5 s decoderen via parallelle kanalen naar alle gelijktijdige zichtbare satellieten en detectoren voor het meten van de atmosferische omgevingsparameters. Deze metingen, tezamen met ionosferische data, worden gegroepeerd in blokken van 15 minuten en doorgestuurd naar het MCS.



**Figuur 5.3:** Het GPS controlesegment

De efemeride en klokparameters worden via de grondantennes doorgestuurd via een S-band communicatiekanaal naar de GPS satellieten. De huidige generaties van satellieten zijn uitgerust met een inter-satelliet communicatielink zodat berichten doorgestuurd kunnen worden via dit kanaal. Wanneer het controlesegment zou uitvallen, dan kunnen de huidige satellieten gedurende 14 dagen hun eigen parameters bepalen waarbij de nauwkeurigheid geleidelijk zou afnemen van de nominale 10m efemerideprecisie<sup>3</sup> tot ongeveer 200m na 14 dagen.

### 5.2.4 Het gebruikerssegment

De strikte definitie van het gebruikerssegment of **User Segment** staat in verband met de notie **militair** zoals dit door het U.S.DoD wordt gedefinieerd : het komt erop neer dat enkel militaire gebruikers in

<sup>3</sup>De actueel behaalde nauwkeurigheid voor de positie van de satelliet bedraagt 2,5m

de strikte zin van de definitie behoren tot het GPS User Segment. Tijdens de ontwikkeling van het GPS systeem voorzag het DoD dat iedere militaire eenheid met een GPS ontvanger zou worden uitgerust. Dit zou de samenwerking tussen de diverse strijdmacht delen (Navy, Air Force en Army) sterk vereenvoedigen. Zo werd bijvoorbeeld tijdens de Golfoorlog de operaties van de troepen sterk vereenvoedigd door het gebruik van GPS navigatiemiddelen in een woestijn die geen of weinig merkpunten bezit. Sinds 1998 worden andere gebruikers ook officieel erkend door het DoD en krijgen de civiele gebruikers van het GPS systeem officieel inspraak in de beslissing langs het U.S.DoT (**Department of Transportation**) om.

De toepassingsdomeinen van het GPS systeem blijven ook niet beperkt tot militaire navigatie. **Topografie** en **geodesie** zijn domeinen waarin GPS verder doordringt. Actueel wordt volop onderzoek gedaan naar en worden systemen geïmplementeerd om GPS in te zetten voor **synchronisatie van tijdstandaarden** voor telecommunicatie over heel de wereld. In het **verkeer** kan GPS ingezet worden om automatisch tolheffingen rond grootsteden op te zetten of om de snelheid van voertuigen te beperken in woonzones. GPS zal ook ingezet worden in de organisatie van nationale en internationale hulpdiensten en voor **Search & Rescue** operaties.

### 5.3 De GPS signaalstructuur

Een GPS satelliet zendt twee draaggolven in de L-band<sup>4</sup> uit : de primaire draaggolf **L1** en de secundaire frequentie **L2**. Deze draaggolven worden gemoduleerd door (a) codes die de identificatie van en de afstandsmeting naar de satelliet toelaten en (b) door een navigatiebericht. Alle GPS satellieten zenden uit op dezelfde dragers L1 en L2 maar de interferenties tussen hun signalen, die gelijktijdig ontvangen worden, zijn minimaal door de keuze van de modulerende codes. Deze codes behoren tot de klasse van de **Pseudo Random Noise** codes (of pseudo stochastische ruis) en vertonen een hoge graad van auto-correlatie en zijn nagenoeg ongevoelig voor effecten van kruis-correlatie (Sectie ?? op pagina ??). Aangezien iedere satelliet een enige PRN code toegewezen krijgt, voert de ontvanger de discriminatie tussen de satellieten door middels de **Code Division Multiple Access (CDMA)** techniek.

#### 5.3.1 Overzicht van de GPS signalen

Figuur 5.4 op de volgende pagina schetst de generatie van signalen aan boord van een GPS satelliet.

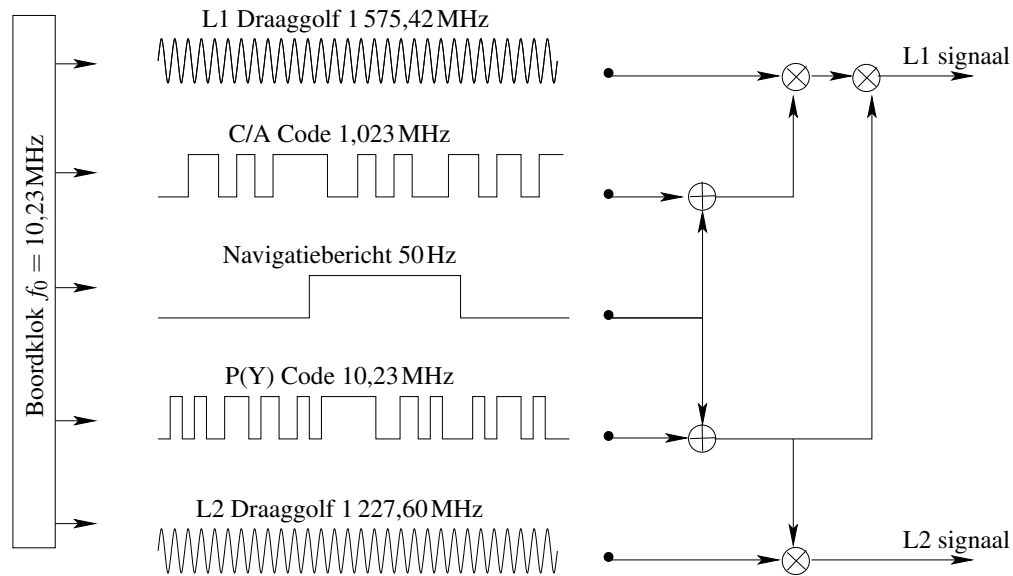
De boordklok van een GPS satelliet ligt aan de basis van de signaalgeneratie. Deze atoomklok genereert een signaal met nominale frequentie  $f_0$  gelijk aan 10,23MHz waarvan de stabiliteit gelijk is aan  $10^{-13}$  per dag<sup>5</sup>. Onder **nominale frequentie** dient men te verstaan dat dit de frequentie is van de boordklok zoals dit waargenomen zou worden door een ontvanger die zich op de aarde bevindt. In de werkelijkheid echter, dient men rekening te houden met de relativistische effecten te wijten aan de snelheid en de graviteitspotentiaal van de satelliet, waardoor de werkelijk gegenereerde frequentie

---

<sup>4</sup>De L-band strekt zich uit van 1 GHz tot 2 GHz

<sup>5</sup>De nauwkeurigheid van de boordklokken stemt overeen met een meetprecisie beter dan  $\pm 9$  ns

### 5.3 Overzicht van de GPS signalen



**Figuur 5.4:** De signaalgeneratie voor een GPS satelliet

aan boord van de satelliet iets lager ligt<sup>6</sup>. Bovenop de relativistische effecten dient men ook rekening te houden met de opzettelijke degradatie van de signalen door het DoD tijdens perioden wanneer de **Selective Availability** geactiveerd is.

Een GPS satelliet zendt 2 draaggolven uit :

- **draaggolf L1** waarvan de frequentie 154 keer de nominale frequentie bedraagt  
 $f_{L1} = 154 \times f_0 = 1\,575,42 \text{ MHz}$
- **draaggolf L2** waarvan de frequentie 120 keer de nominale frequentie bedraagt  
 $f_{L2} = 120 \times f_0 = 1\,227,60 \text{ MHz}$

Twee codes worden gebruikt binnen het GPS systeem. Deze codes laten toe de boordklok te lezen (datering van het zendtijdstip) en bijgevolg de afstand tot de satellieten te meten. Zij behoren tot de categorie van **Pseudo-Random Noise** of **PRN**-codes (Sectie ?? op pagina ??). Deze codes zijn :

- de **Coarse/Acquisition code (C/A code)** wordt gegenereerd aan de frequentie  $f_0/10$  of 1,023 MHz en herhaalt zich iedere milliseconde. Deze C/A code vormt de basis voor gebruik van het GPS systeem door civiele gebruikers ;
- de **Precision code (P code)** waarvan de frequentie gelijk is aan  $f_0$  of 10,23 MHz en die een periode bezit van nagenoeg 266,4 dagen. Deze code is bedoeld voor militair gebruik binnen het GPS systeem. Actueel wordt de militaire code versleuteld tot de geheime Y-code onder invloed van het effect van anti-spoofing. Dit wordt aangeduid door het symbool P(Y).

Naast deze beide navigatiecodes worden de draaggolven ook gemoduleerd aan de hand van het navigatiebericht *Dmsg* opgebouwd uit 1500 databits en, uitgezonden aan de frequentie van 50 Hz, een duur bezit gelijk aan 30 s.

<sup>6</sup>De werkelijk gegenereerde frequentie door de boordklok bedraagt 10,229 999 995 43 MHz

Tabel 5.2 geeft een overzicht van de componenten die de GPS signaalstructuur bepalen.

Component	Frequentie	Opmerking
nominale frequentie	$f_0 = 10,23 \text{ MHz}$	
L1 draaggolf	$154 \times f_0 = 1\,575,42 \text{ MHz}$	$\lambda \approx 19,0 \text{ cm}$
L2 draaggolf	$120 \times f_0 = 1\,227,60 \text{ MHz}$	$\lambda \approx 24,4 \text{ cm}$
P(Y) code	$f_0 = 10,23 \text{ MHz}$	1 chip $\approx 30 \text{ m}$
C/A code	$f_0/10 = 1,023 \text{ MHz}$	1 chip $\approx 300 \text{ m}$
Navigatie bericht D	$f_0/204\,600 = 50 \text{ Hz}$	

**Tabel 5.2:** De componenten van het GPS signaal

Binnen het GPS systeem worden binaire codes (met of zonder data informatie) gecombineerd volgens de binaire operator **exclusive OR** ( $\oplus$ ) waarvan de waarheidstabel gegeven wordt door :

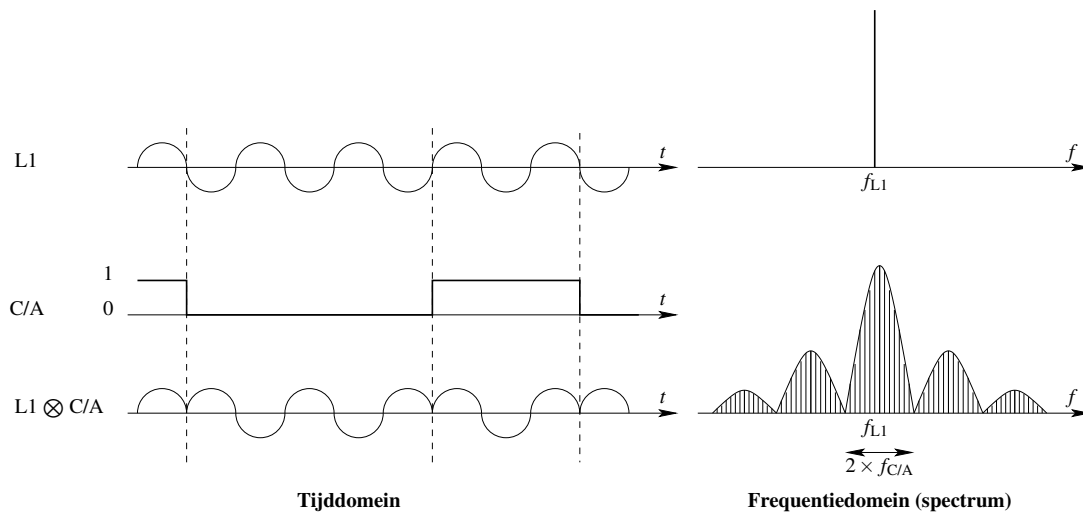
$x$	$y$	$x \oplus y$
1	1	0
1	0	1
0	1	1
0	0	0

Volgens dit principe wordt het navigatiebericht (D) gecombineerd met de beide codes (C/A en P) vooraleer deze combinaties ( $C/A \oplus D$  en  $P(Y) \oplus D$  respectievelijk) gemoduleerd worden op de draaggolven. De toegepaste techniek is de **Bi Phase Shift Key** (BPSK) modulatie, die een verschuiving over  $180^\circ$  veroorzaakt van de fase van de draaggolf bij iedere overgang van de gemoduleerde code van een binaire “1” naar een binaire “0” en omgekeerd. Als gevolg hiervan wordt het vermogen vervat in de drager uitgespreid over het ganse frequentiespectrum (**Spread Spectrum Modulation**). Het effect van deze BPSK modulatie wordt in figuur 5.5 op de pagina hierna geïllustreerd. Door (a) de spreiding van het beschikbare vermogen over het ganse frequentiespectrum, (b) door de grote afstand tussen de satelliet en de ontvanger, en (c) doordat de satelliet uitzendt in een gebied dat groter is dan een halve hemisfeer is het vermogen van het ontvangen satelliet signaal zeer laag. De signaal/ruis  $\frac{S}{N}$  verhouding voor de ontvangst van de L1-C/A bedraagt ongeveer  $\frac{S}{N} \approx \frac{1}{75}$ , terwijl voor de signalen L1-P en L2-P deze verhouding respectievelijk  $\frac{1}{1500}$  en  $\frac{1}{3000}$  bedragen. Dit houdt in dat de GPS signalen verzonken liggen in de omgevingsruis en de ontvanger door het toepassen van speciale technieken de nuttige GPS signalen aan de omgevingsruis te onttrekken.

In standaard operaties worden zowel de L1 als de L2 draaggolf gemoduleerd door  $P(Y) \oplus D$ , de exclusive-or operatie tussen de militaire precisie code P(Y) en het navigatiebericht D. De  $C/A \oplus D$  code wordt enkel op de L1 draaggolf gemoduleerd.

Het controlesegment kan de modulatie van de L2 draaggolf wijzigen middels een **keuzeschakelaar** die toelaat L2 te moduleren met :

- $P(Y) \oplus D$  : de precisie code P(Y) gecombineerd met het navigatiebericht D ;
- P(Y) : enkel de precisie code P(Y) ;
- $C/A \oplus D$  : de coarse/acquisition code C/A gecombineerd met het navigatiebericht D.



**Figuur 5.5:** De BPSK modulatie van de draaggolf

### 5.3.2 De GPS positioneringsdiensten

GPS biedt twee positioneringsdiensten of **Positioning Services** aan :

**Standard Positioning Service (SPS)** is een dienst die toelaat te **navigeren** en klokken te **synchro-niseren** en wordt beschikbaar gesteld aan **alle gebruikers**, ongeacht hun potentiële alliantie, **wereldwijd** en op een **permanente basis** zonder dat er voor deze diensten betaald moet worden. De SPS service houdt de toegang in tot de L1 draaggolf gemoduleerd door de C/A code en het navigatie bericht D, met of zonder toepassing van SA (**Selective Availability**) door het DoD.

**Precise Positioning Service (PPS)** is de **militaire** dienst die toelaat met een hoge nauwkeurigheid de **positie, snelheid en tijdsynchronisatie** te bepalen. Deze dienst is **wereldwijd** uitgebouwd op **permanente basis** en wordt beschikbaar gesteld aan door de VSA **toegestane gebruikers**. De PPS dienst houdt toegang in tot de P(Y) code op zowel de L1 als de L2 draaggolf, de toegang tot de P(Y) code wordt versneld door gebruik te maken van de C/A code gemoduleerd op de L1 drager.

De gebruikers van de PPS positioneringsdienst beschikken over bijkomende mogelijkheden waardoor de negatieve effecten van SA kunnen opgeheven worden. De PPS dienst werd ontworpen voor militair gebruik en haar toegang wordt ontzegd aan niet geautoriseerde gebruikers. PPS wordt beschikbaar gesteld aan het Amerikaanse leger en Amerikaanse federale gebruikers. Beperkt, niet Amerikaans federaal, gebruik van PPS, zowel nationaal als buitenlands, wordt op aanvraag toegestaan na het onderzoek van iedere individuele aanvraag en op voorwaarde dat het Amerikaanse belang niet geschaad wordt en de aanvrager de nodige veiligheids garanties kan voorleggen.

De specificaties voor de SPS en PPS positioneringen worden opgesomd in Tabel 5.3 op de volgende pagina.

	SPS ( $2\sigma$ of 95 %)	PPS ( $2\sigma$ of 95 %)
planimetrische positie	100 m	22 m
altimetrie	156 m	27,7 m
snelheid		0,2 m/s
tijdoverdracht	340 ns	200 ns

**Tabel 5.3:** De specificaties voor de SPS en PPS diensten

Een precisie van  $2\sigma$  stemt overeen met de straal van een cirkel waarbinnen minimaal 95% van alle mogelijke (positie of tijd) resultaten gelegen zijn.

De GPS positie wordt gerefereerd naar de **World Geodetic System 1984** (WGS84) ellipsoïdale, terwijl de referentie voor de precisie van de tijdoverdracht UTC(USNO)<sup>7</sup> is.

De vermelde nauwkeurigheden voor de SPS dienst stemmen niet overeen met de werkelijke capaciteit van de burgerlijke positioneringsdienst, die duidelijk beter presteert dan geanticipeerd tijdens de ontwikkeling van het GPS systeem. De haalbare nauwkeurigheid met de burger positioneringsdienst werd opzettelijk verminderd door het invoeren van de **Selective Availability (SA)** of de opzettelijke degradatie van de nauwkeurigheid. Deze vrijwillige degradatie bleef actief tot 2 mei 2000.

Op 31 januari 1994 trad het lang verwachte **antispoofing (AS)** in voege en is tot op heden actief. Het doel van AS is enerzijds de toegang tot de militaire codes te beperken tot geautoriseerde (militaire) gebruikers, en anderzijds het storen of **jammen** van de militaire positioneringsdienst PPS tegen te gaan.

## 5.4 Het navigatiebericht

Het GPS navigatiebericht (**Navigation Message**) bevat de gegevens die de gebruiker nodig heeft om de baan en de klokfout van de satellieten te berekenen. Deze berekeningen worden vervolgens gebruik voor het oplossen van het **navigatievraagstuk**, namelijk het bepalen van de positie (en tijd) van de GPS ontvanger. Het navigatiebericht is identiek voor de gebruikers met toegang tot de SPS of de PPS positioneringsdienst (Sectie 5.3.2 op de pagina hiervoor).

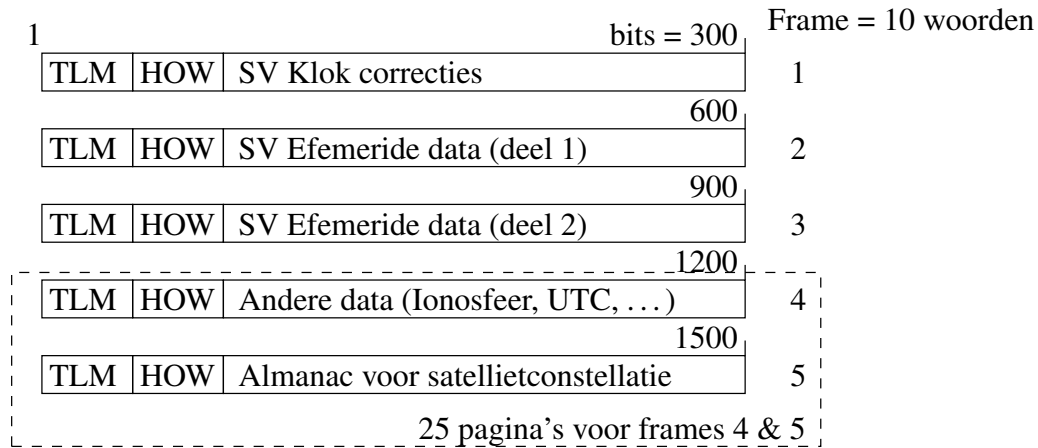
Het navigatiebericht herhaalt zich iedere 30 s. Het databericht is verdeeld in **5 frames** van ieder 6 s lengte (Figuur 5.6 op de volgende pagina).

Ieder frame is verder onderverdeeld in **10 woorden** van **30 bits**. De 24 eerste databits van een woord bevatten nuttige informatie terwijl de 6 laatste bits gebruikt worden voor pariteitsinformatie. Een parameter van het databericht kan over meerdere woorden verspreid zijn.

Het eerste dataframe (**Data Block I**) bevat **correctie termen voor de boordklok** van de satelliet en (zelden gebruikte) parameters voor de berekening van de atmosferische vertraging opgelopen door de codesignalen. Hiernaast bekomt de gebruiker ook een gezondheidsparameter betreffende de actuele

<sup>7</sup>De UTC(USNO) is de realisatie van de universeel gecoördineerde tijd (UTC) zoals bijgehouden door het U.S. Naval Observatory (USNO)





$$1 \text{ woord} = \begin{array}{|c|c|} \hline 24 \text{ databits} & 8 \text{ par} \\ \hline \end{array}$$

**Figuur 5.6:** Formattering van het navigatiebericht

status (of **health**) van de satelliet.

Het tweede en het derde frame (**Data Block II**) groeperen de efemeridegegevens voor de satelliet (Sectie ?? op pagina ??).

Het **Data Block III** is uitgespreid over de subframes 4 en 5 en bevatten volgens een cyclisch patroon de **almanak parameters, klokcorrectietermen en gezondheidsinformatie** voor de gehele satellietconstellatie. De almanak gegevens vormen een vereenvoudiging van de efemeriden voor alle satellieten en worden gebruikt tijdens de acquisitiefase van de GPS signalen (Sectie ?? op pagina ??). Binnen dit cyclisch patroon van de frames 4 en 5 bevinden zich een aantal berichten die voorbehouden zijn voor gebruik door het controlesegment. In totaal worden 25 frames 4 & 5 uitzonden, zodat het binnenhalen van alle data vervat in het navigatiebericht 12,5 min duurt. Voor het starten van de navigatie volstaan echter de gegevens vervat in de data blokken 1 en 2 (vensters 1 tot en met 3) die binnen een interval van 30 s binnegehaald worden.

Ieder frame start met het **Telemetry Word** (TLM) en de C/A naar P-code **Handover Word** (HOW). Het TLM woord bevat een vast patroon dat de ontvanger aanwendt voor het uitvoeren en permanent controleren van de synchronisatie tijdens de decodering. Het HOW woord assisteert de ontvangerhardware bij de overgang van de korte C/A code naar de lange P codereeks bij de start van ieder frame van 6 s lengte. Het navigatiebericht wordt in principe om het uur geactualiseerd door het controlesegment.

Het eerste datablok is gegroepeerd in het **eerste ondervenster** van 10 woorden en herhaalt zich om de 30 s. Dit datablok wordt door het controlesegment gegenereerd en omvat correctietermen op de boordklok, een geassocieerde **Issue Of Data Clock** (IODC) woord en coëfficiënten voor de modellering van de atmosfeer<sup>8</sup>.

<sup>8</sup>Aan de atmosferische termen wordt verder geen aandacht besteed aangezien ze weinig nauwkeurig zijn en bijgevolg slechts zeer zelden gebruikt worden

De **satellietposities** worden door het controle segment geschat in een filter proces. De orbietsbogen worden voorgesteld door de **elementen van KEPLER** aangevuld met **stoorparameters**. Deze parameters houden rekening met effecten zoals onder andere de zonnwind, de gravitationele aantrekking van de zon, de maan en de planeten. De terminologie gebruikt in het navigatiebericht volgt de benamingen gebruikt in de hemelmechanica en refereert naar de **Kepleriaanse voorstelling** van een niet gestoord orbiet. De geldigheid van de parameters neemt af met de tijd en de nauwkeurigheid van de satellietpositie degradeert geleidelijk.

Het derde datablok wordt gevormd door een geheel van 25 vensters type 4 & 5. Deze vensters herhalen zich niet om de 30s zoals de beide vorige datablokken, maar hebben een cyclustijd van 12,5 min.

Ieder venster<sup>9</sup> geeft de almanak parameters voor 1 satelliet van de constellatie. De almanak is een vereenvoudiging, zowel wat aantal parameters als de nauwkeurigheid van deze parameters betreft, van de klok en efemeride parameterset. Deze minder nauwkeurige almanak parameters worden gebruikt om de satellietposities te voorspellen en ondersteunen de ontvanger in zijn zoektocht naar GPS satellieten. De geldigheid van de almanak parameters is 6 weken.

Naast de almanak bekomt men ook informatie over de gezondheidstoestand of **health** van de satelliet. Deze hexadecimale waarde codeert de mogelijke problemen die zich voordoen tijdens de werking van een satelliet en wordt door de ontvanger gebruikt om een niet correct functionerende satelliet uit de navigatieoplossing te weren.

## 5.5 Basis operatie van een GPS ontvanger

Het basisidee achter GPS is het gebruik van satellieten als gekende (mobiele) referentiepunten voor het bepalen van posities op (of in de omgeving van) de aarde. De signalen uitgezonden door de GPS satellieten komen toe aan de antenne van de ontvanger en worden in een trilateratieproces<sup>10</sup> verwerkt tot de positie van de ontvangstantenne. Tijdens dit trilateratieproces worden verschillende stappen doorlopen.

In de volgende paragrafen duidt een bovenindex  $j$  een satelliet aan terwijl de benedenindex  $k$  een ontvanger kenmerkt.

### 5.5.1 Het bepalen van de positie door trilateratie

Stel dat de ontvanger de afstand tot een satelliet meet en de waarde  $P_k^1 = 22\,000\text{km}$  meet (Sectie ?? op pagina ??). Door deze meting weet de ontvanger dat zijn lokatie zich bevindt op een bol met straal 22 000km en gecentreerd in de positie van de satelliet op het zendtijdstip van het signaal. Deze bol

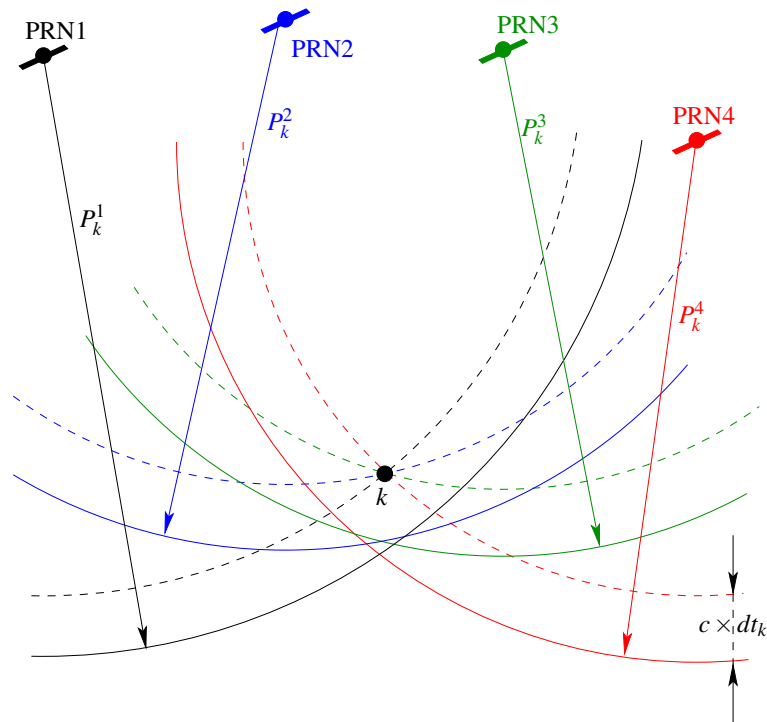
---

<sup>9</sup>Het gaat hier over 24 vensters 5 en 12 vensters 4 waardoor het navigatiebericht voorzien is om maximaal 36 GPS satellieten op te nemen in de GPS almanak

<sup>10</sup>In de topografie steunen trilateratie opmetingen op het verwerken van afstanden tot vaste punten gekend in coördinaten. De combinatie van de afstandsmetingen met de gekende posities van de groundbakens laat toe de exacte positie van het meetstation te bepalen.

## 5.5 Het bepalen van de positie door trilateratie

stelt de meetkundige plaats  $\mathcal{M}_1$  voor waarop de ontvanger zich bevindt, en beperkt zijn positie tot deze bol in de ruimte (Figuur 5.7). Vervolgens meet de ontvanger de afstand tussen zijn antenne en een



**Figuur 5.7:** Trilateratie principe toegepast in het GPS systeem

tweede satelliet en meet  $P_k^2 = 23\,000\text{ km}$ . Deze afstand bepaalt dat de ontvanger eveneens gelegen is op een tweede meetkundige plaats  $\mathcal{M}_2$  gevormd door een bol met straal  $23\,000\text{ km}$  en gecentreerd in de positie van deze tweede satelliet. De combinatie van beide meetkundige plaatsen bepaalt de positie van de ontvanger op de snijlijn tussen de beide bollen  $\mathcal{M}_1$  en  $\mathcal{M}_2$ : deze snijlijn is een cirkel. Een meting naar een derde satelliet geeft een afstand  $P_k^3 = 24\,000\text{ km}$  en bepaalt de derde meetkundige plaats  $\mathcal{M}_3$ . De snijding van deze bol met de cirkel (de snijlijn tussen  $\mathcal{M}_1$  en  $\mathcal{M}_2$ ) bepaalt 2 punten: één van beide punten stemt overeen met de positie van de ontvanger.

Door de afstand te meten tot 3 satellieten kan een ontvanger zijn mogelijke positie beperken tot 2 punten. Om een keuze uit deze beide punten te maken, kunnen meerdere oplossingen toegepast worden:

- het uitvoeren van een afstandsmeting naar een vierde satelliet beperkt het aantal mogelijkheden tot 1 positie. Dit is echter niet strikt nodig om een eenduidige oplossing te bekommen;
- onderzoek van de beide punten toont aan dat één van beide punten te verwerpen valt, aangezien het ofwel te ver van de aarde gelegen is, ofwel omdat het met een onmogelijke snelheid zich verplaatst. Deze niet logische oplossing kan verworpen worden;
- wanneer men beschikt over een benaderde positie (bvb. bekomen uit een voorgaande positiebepaling), dan zal één van beide mogelijke oplossingen dicht bij deze benaderde positie gelegen zijn en onze actuele positie voorstellen.

### 5.5.2 Het meten van de afstand tot een satelliet

Het meten van de afstand tussen een satelliet en de ontvanger steunt essentieel op het bepalen van de looptijd van het uitgezonden satelliet signaal. Om deze meting uit te voeren, veronderstellen we dat zowel de satelliet als de ontvanger dezelfde pseudo-random noise code (Sectie ?? op pagina ??) genereren op **exact dezelfde tijdschaal**. De ontvanger vergelijkt de PRN code komende van de satelliet met de lokaal gegenereerde replika van deze code op de gemeenschappelijke tijdschaal en zoekt een correlatiepiek op. Deze correlatiepiek wordt bekomen door de lokale code te verschuiven op de tijdschaal over de hoeveelheid  $\tau_k^j$  overeenstemmend met de looptijd van de satellietcode tussen satelliet en ontvanger. Door vermenigvuldiging van deze looptijd met de lichtsnelheid  $c$  bekomt de ontvanger de afstand tot de satelliet. Deze afstand wordt de **pseudo-afstand**  $P_k^j = c \times \tau_k^j$  tussen ontvanger  $k$  en satelliet  $j$  genoemd<sup>11</sup>.

Deze afstandsmeting steunt op het beschikbaar zijn van preciese tijdschalen zowel aan boord van de satellieten als in de ontvanger om een correcte looptijd  $\tau_k^j$  te bepalen.

Aan boord van de satellieten beschikt het GPS systeem over atoomklokken, die door toepassing van de klokparameters uit het navigatiebericht (Sectie ?? op pagina ??) perfect gesynchroniseerd worden met de GPS systeemtijd (Sectie ?? op pagina ??).

In de GPS ontvanger is het echter economisch niet denkbaar dat een atoomklok ingebouwd wordt. Een andere techniek dient toegepast te worden om de synchronisatie van de ontvangertijdschaal  $t_k$  te realiseren met de GPS tijdschaal  $t_{\text{GPS}}$ . Deze techniek steunt op de volgende redenering : de fout van de ontvangstklok<sup>12</sup>  $dt_k = t_{\text{GPS},k} - t_k$  komt voor in iedere looptijdmeting uitgevoerd naar alle satellieten, vermits de looptijd  $\tau_k^j$  bepaald wordt door het verschil van de individuele satelliettijden  $t^j$  en de gemeenschappelijke ontvangertijd  $t_k$ . De term  $c \times dt_k$  komt dus voor in iedere pseudo afstand en is dus gemeenschappelijk tussen alle afstandsmetingen. Tengevolge van deze fout zullen de 3 bollen of meetkundige plaatsen niet snijden in 1 (of 2) punt(en) (Figuur 5.8 op de pagina hierna). De ontvanger kan nu 1 gemeenschappelijke afstandscorrectie berekenen waardoor alle meetkundige plaatsen snijden in 1 enkel punt : deze correctie is de afstand overeenstemmend met de klokfout van de ontvanger en brengt de ontvangerklok in synchronisatie met de GPS referentietijd.

### 5.5.3 De fouten in de pseudo-afstand meting

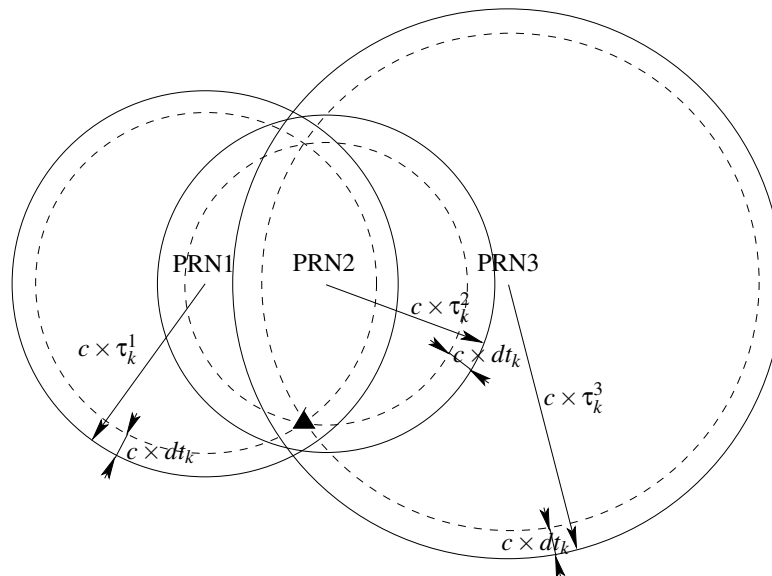
In de voorgaande paragrafen werd verondersteld dat de metingen niet beïnvloed worden door meetfouten andere dan de klokfout van de ontvanger. Diverse andere fouten veroorzaken echter afwijkingen ten opzichte van dit ideale model en zullen in deze paragraaf besproken worden.

#### De invloed van de atmosfeer :

Zoals te verwachten is de snelheid van het licht niet constant tijdens de doorgang van de satelliet signalen doorheen de atmosfeer. De geïoniseerde deeltjes van de **ionosfeer** en de met

<sup>11</sup>De benaming **pseudo-afstand** komt enerzijds door het gebruik van pseudo random noise codes voor de meting ervan, en anderzijds door het bestaan van fouten (Sectie 5.5.3) in deze meting waardoor ze niet overeenstemt met de geometrische of rechtlijnige afstand tussen satelliet en ontvanger.

<sup>12</sup>De term  $t_{\text{GPS},k}$  stelt de perfecte ontvangertijd voor gemeten op de GPS tijdschaal, terwijl  $dt_k$  de reële tijd gemeten op de foutieve ontvangerklok voorstelt.



**Figuur 5.8:** Invloed van de klokfout op de positiebepaling

waterdamp gevulde lagen van de **troposfeer** vertragen de snelheid waarmee de gemoduleerde PRN codes zich voortplanten. Het effect van de atmosfeer is dat de pseudoafstanden groter wordt dan de geometrische afstand. In tegenstelling tot de klokfout van de ontvanger is deze invloed niet constant voor alle metingen, maar functie van de specifieke weg afgelegd doorheen de atmosfeer van de individuele signalen van de satellieten. De atmosferische afstandsfout  $\delta\tau_k^j$  wordt berekend door te steunen op een **model** voor de ionosfeer en voor de troposfeer. De ionosfeer is een **dispersief medium** : dit betekent dat de ionosferische invloed frequentieafhankelijk is, zodat de meting op meerdere frequenties<sup>13</sup> toelaat de grootte van de ionosferische fout te bepalen. Dit is het grote voordeel van een ontvanger die toegang heeft tot de PPS service (Sectie 5.3.2 op pagina 86) aangezien gelijktijdige metingen op beide frequenties uitgevoerd kunnen worden.

#### **Meerweginterferenties of multi-path interferences :**

Het signaal dat invalt op de antenne van de ontvanger kan eerst weerkaatst worden door een reflecterende oppervlakte. Hierdoor bestaat het gevaar dat de correlatiepiek gevonden wordt op het weerkaatste signaal in plaats van op het rechtstreekse ontvangen satelliet signaal. Ingewikkelde procedures laten toe om de kans op meerweginterferenties te minimaliseren.

#### **Fouten in de satelliet :**

De klok- en efemerideparameters uit het navigatiebericht (Sectie 5.4 op pagina 87) laten toe enerzijds de klok van de satelliet te synchroniseren met de GPS systeemtijd en anderzijds de positie van de satelliet te berekenen. Deze beide modellen vertonen nog een residuele fout :

- de efemerideparameters zijn een voorspelling van de positie van de satelliet berekend door het controlesegment. De grootte van de fout van deze voorspelling (of extrapolatie) van de satellietpositie bedraagt 2,5m tot  $\pm 5,0$ m.
- de klok van de satelliet  $t^j$  wordt door een 2<sup>de</sup> orde veelterm gesynchroniseerd naar de GPS tijd toe. De fout op deze extrapolatie bedraagt 2m of 6ns.

<sup>13</sup>De bedoelde frequentie is deze van de draaggolf en niet de snelheid van de modulerende code.

### Selective Availability (SA) :

Hoewel SA sinds 2 mei 2000 niet meer actief is, is een onderzoek van de moedwillige degradatie van de nauwkeurigheid onder invloed van dit proces belangrijk. Het  $\delta$ -proces introduceert ruis op de klok, en bijgevolg op alle signalen uitgezonden door de satellieten, terwijl het  $\varepsilon$ -proces foutieve parameters in het navigatiebericht opneemt. Beide procedures zorgen ervoor dat de meetnauwkeurigheid daalt wat de positienauwkeurigheid beïnvloedt.

## 5.6 Technieken voor plaatsbepaling met het GPS systeem

De verschillende toepassingen die aansluiting zoeken op het GPS-systeem hebben plaatsbepaling als gemeenschappelijke component. De keuze van de meetmethode hangt af van de bijzondere projectvereisten en vooral van de verwachte precisie. We onderscheiden :

### Absolute plaatsbepaling

De absolute plaatsbepaling is de basismode aangeboden door het GPS systeem en wordt ook aangeduid door de term **navigatiemode**. Hierbij bepaalt een enkele ontvanger zelfstandig zijn eigen positie zonder gebruik te maken van additionele sensoren. De plaatsbepaling wordt gerealiseerd door het berekenen van de afstand tussen de ontvangstantenne en elke zichtbare of waargenomen satelliet. De afstand wordt door correlatietechnieken toegepast op de uitgezonden (burger of militaire) PRN code bepaald en wordt de **pseudo-afstand** genoemd. De burger C/A-code is altijd beschikbaar, maar tot 2 mei 2000 werd de haalbare precisie ervan moedwillig verzwakt door de Amerikaanse militairen door toepassing van **Selective Availability (SA)**. De toegang tot de militaire P(Y)-code wordt ontzegd aan de burgerlijke gebruiker. Omwille van de lagere precisie (zonder SA: 5 m tot 10 m) wordt deze meetmethode enkel gebruikt voor real-time navigatie of voor benaderende plaatsbepaling maar is ze niet geschikt voor landmeetkundig gebruik. Bij het bepalen van een ogenblikkelijke positie, maakt men gebruik van het navigatiebericht dat gemoduleerd is op de uitgezonden draaggolven. Dit navigatiebericht drukt de positie van de satellieten uit in het World Geodetic System 84 (WGS84).

### SBAS plaatsbepaling

Een verbetering van de nauwkeurigheid wordt bekomen door correctiesignalen voor de positiebepaling door te sturen via extra geostationaire satellieten. Dergelijke systemen heten **Satellite Based Augmentation Systems**. De uitgezonden differentiële correcties verhogen de meetprecisie van de burger C/A code en gelden voor een uitgebreide regionale zone. Deze Wide Area Differential GPS correctietermen (WADGPS) vectoriseren de verschillende foutenbronnen van het GPS systeem en zijn toepasbaar over een grote regionale zone. Bekende systemen zijn WAAS voor Noord-Amerika, EGNOS voor Europa en Noord-Afrika, MSAS voor Japan, . . . . De nauwkeurigheid van deze systemen, die de C/A code corrigeren, bedraagt 0,5 m tot 2 m standaardafwijking. Particuliere betalende systemen zoals STARFIRE halen, door correcties op beide golfengten te gebruiken, nauwkeurigheden tot 0,1 m in planimetrie en 0,3 m in altimetrie.

### Relatieve plaatsbepaling

Deze methode levert de hoogste nauwkeurigheid doch veronderstelt het gelijktijdig gebruik van twee of meer terrestrische ontvangers. In de praktijk wordt één van de ontvangers, de zogenaamde **rover**, geplaatst op het in te meten punt. Om een betere nauwkeurigheid te bekomen wordt echter gebruik gemaakt van correcties die bekomen worden door beroep te doen op extra

**referentieontvangers.** Deze referentieontvangers kunnen specifiek voor het project ingemeten worden of deel uitmaken van een netwerk, dat dan vaak door de overheid wordt beheerd, een zogenaamd RTK (*Real Time Kinematic*)-referentienetwerk. In Vlaanderen staan dankzij FLEPOS zo'n 38 permanente referentiestationen opgesteld, in Wallonië telt WALCORS 23 stations en in Brussel is GPSBru het enige station. De afstand tot de rover ontvanger is hierdoor gemiddeld kleiner zijn dan 17 km in België. De rover wordt door de gebruiker ingezet voor het opmeten van puntenvelden of detailmetingen. Voor elke waargenomen satelliet worden correcties berekend in de referentiestationen door de gemeten afstand te vergelijken met de modellering en de eigen gekende coördinaten. De relatieve plaatsbepaling heeft een hogere precisie doordat de foutenbronnen van de GPS-signalen, die gelijktijdig door beide ontvangers geregistreerd worden, sterk ruimtelijk en temporeel gecorreleerd zijn waardoor het mogelijk is om deze effecten te reduceren. Dit kan in real-time gebeuren (Real Time Kinematic) mits een (éénrichtings-)radiolink kan gerealiseerd worden naar de rover toe en dit over een afstand van hoogstens enkele tientallen kilometer. De radiolink kan gerealiseerd worden via GSM of, voor kortere afstanden, via een eigen radiozender en -ontvanger (modems). Zonder het gebruik van radio-link, is een oplossing door naverwerking (post-processing) mogelijk, mits zowel de rover als de referentiestationen de ruwe meetdata registreren. De rover kan stil staan (statische toepassing) of bewegen (kinematische toepassing). Naverwerking is in het bijzonder bij geodetische toepassingen aanbevolen, omdat hiermee een betere nauwkeurigheid en betere kwaliteitscontrole mogelijk is.

Voor landmeetkundig gebruik worden metingen verricht worden op de fase van de draaggolven. Aangezien de golflengten van de uitgezonden draaggolven ongeveer 20 cm zijn, wordt al vlug een centimeter precisie bereikt bij deze fasemetingen, al dienen de referentiestationen nu maximaal enkele tientallen kilometer verwijderd te zijn. Bij een sessie GPS-fasemetingen worden de ogenblikkelijke faseverschillen tussen twee golven (L1 en/of L2 enerzijds en een intern gegenereerde golf in de ontvanger) geregistreerd. Bij de noodzakelijke en specifieke verwerking wordt het geheel aantal golflengten bepaald. Dit noemt men het oplossen van de meerduidigheden.

Toestellen die enkel de C/A (of P(Y) voor militair gebruik) code gebruiken voor de plaatsbepaling heten differentiële code-ontvangers en zijn door hun kleinere nauwkeurigheid (enkele dm) geschikt voor GIS en vele archeologische toepassingen. Dit kan in real-time gebeuren (DGPS) mits radiolink kan gerealiseerd worden van een referentiestation naar de rover toe en dit over een afstand van hoogstens enkele honderden kilometer.

## 5.7 Landmeetkundige GPS meetmethoden

Volgende methoden beslaan het merendeel van de landmeetkundige toepassingen :

### **Real-time kinematisch (RTK GPS) met gebruik van een RTK netwerk zoals FLEPOS of WALCORS**

Deze techniek wordt hoofdzakelijk toegepast voor het meten en uitzetten van punten. Bij deze techniek verplaatst de rover zich van punt naar punt. Er is een directe GSM-communicatie met het referentienetwerk dat een virtueel referentiestation creëert in de onmiddellijke omgeving van de rover. Deze beschikt over specifieke software voor de real-time berekening van de meerduidigheden. De resultaten zijn op die manier onmiddellijk beschikbaar. De uiteindelijke precisie is afhankelijk van de lengte van de basislijn, het aantal en de spreiding van de

referentiestations, het aantal en de spreiding van het aantal beschikbare satellieten en eventuele modellering van systematische afwijkingen langs referentiezijde. Het inbellen en positioneren van een enkel punt duurt met hedendaagse apparatuur minder dan 1 minuut. De update-snelheid van de positieberekening bedraagt typisch 1 tot 10 Hz.

### **Real-time kinematisch (RTK GPS) met gebruik van een eigen RTK referentie-ontvangers**

Het doel en de opzet van deze techniek is identiek aan de vorige toepassing. Het gebruik van een eigen referentiestation of netwerk van referentiestations biedt twee voordelen :

- (a) het (unieke) referentiestation kan in de onmiddellijke omgeving van de rover worden opgesteld waardoor de nauwkeurigheid verhoogt door een kortere basislijn.
- (b) Voor de radiolink kan een eigen radiozender en -ontvanger worden gebruikt, wat toelaat de GSM verbindingkosten uit te sluiten.

### **Post-processing (PP GPS) met bifrequente L1/L2 fase-ontvangers**

Deze techniek wordt hoofdzakelijk toegepast bij statische toepassingen waarbij hoog nauwkeurige coördinaten voor individuele punten worden gezocht. Indien geen real-time oplossing noodzakelijk is, kan eventueel overgeschakeld worden op deze post-processing methode dat volgende voordelen biedt, die vooral bij geodetische metingen belangrijk zijn : (a) Mogelijkheid van een vereffening op basis van waarnemen ten opzichte van verschillende referentiestations die goed gespreid en op korte afstand rond de rover worden opgesteld. Door de kortere basislijnen verbetert de nauwkeurigheid. (b) Betere nauwkeurigheid omdat met de ionosfeerparameters en werkelijke satellietbanen kan worden rekening gehouden. (c) Betere nauwkeurigheid omdat de postprocessing toelaat berekeningsparameters (uitschakelen satellieten, minimale elevatiehoek, oplossingsalgoritme, ...) optimaal in te stellen. (d) De datalink wordt overbodig. In vele buitenlandse gebieden is overigens een datalink moeilijk realiseerbaar.

### **Post-processing (PP GPS) met monofrequente L1 fase-ontvangers**

Deze analoge techniek kan toegepast worden voor het bepalen van de coördinaten van individuele punten. Monofrequente ontvangers zijn compacter (handheld toestellen beschikbaar), voordeliger in aankoop doch leveren een iets kleinere nauwkeurigheid en vergen minstens een dubbel zo lange meettijd.



## Hoofdstuk 6

# Analyse van de precisie van satellietplaatsbepaling

In de *committee draft ISO/CD 17123-8*, met als titel **Field procedures for testing geodetic and surveying instruments - Part 8 : GNSS field measurements systems in real-time kinematics (RTK)**, wordt de methodologie ter bepaling van de standaardafwijking in altimetrie en planimetrie van GNSS apparatuur bepaald.

Dit deel van de ISO 17123-norm handelt over de veldprocedures die gebruikt worden bij de bepaling en de evaluatie van de nauwkeurigheid van een Global Navigation Satellite System (GNSS). GNSS omvat het Amerikaanse Global Positioning System (GPS), het Russische Global Orbiting Navigation Satellite System (GLONASS) en het Europese GALILEO.

De ISO-norm 17123-8 kan beschouwd worden als een van de eerste stappen in de evaluatie van metingen. Een resultaat heeft namelijk altijd een bepaalde onzekerheid. Die onzekerheid hangt af van vele factoren. De herhaalbaarheid en reproductie van een meting zijn zeer belangrijk. Ook moet er steeds een grondige beoordeling van alle mogelijke foutenbronnen gebeuren.

De norm gaat ervan uit dat er gemeten wordt volgens de real-time kinematic methode (RTK), al is er ons inziens geen reden te vinden waarom de norm niet even goed zou kunnen toegepast worden op andere types van meetmethoden voor satellietplaatsbepaling zoals metingen met naverwerking (post-processing) of voor absolute navigatie positionering.

### 6.1 De GPS validatie testprocedure

Vooreerst is het de bedoeling dat de GNSS-set die getest wordt, gebruikt wordt zoals voorgeschreven in de handleiding van de producent. De precisie van de centrering boven de punten moet 1 mm bedragen en de antennehoogte moet tot op 1 mm gekend zijn.

Het testveld bestaat uit een basispunt en twee roverpunten, de locatie van de roverpunten wordt zo gekozen dat deze vallen binnen de grenzen van het gebied waarbinnen de toepassing zal gebruikt worden.

De horizontale afstand en het hoogteverschil tussen de roverpunten worden bepaald met een onafhankelijke en nauwkeurige methode (bijvoorbeeld met totaalstation en waterpastaestetel) met een precisie beter dan 3 mm. Deze waarden  $\widehat{D}$  en  $\widehat{\Delta H}$  worden als nominale of referentiewaarden beschouwd. De horizontale afstand en het hoogteverschil berekend uit de gemeten GNSS coördinaten in elke meetserie worden vergeleken met deze nominale waarden om de eventuele uitschieters te elimineren. Verder worden de nominale horizontale afstanden en hoogteverschillen niet gebruikt.

Een serie van metingen bestaat uit 5 sets van metingen. Elke sessie bestaat uit een meting op ieder van beide roverpunten en dient om de vijf minuten te worden uitgevoerd.

Er zijn 2 verschillende testprocedures : de **vereenvoudigde** en de **volledige procedure**.

Bij de vereenvoudigde procedure is er slechts één serie van metingen nodig. Hierbij zijn 5 sets van metingen nodig, met 5 minuten tussentijd afwisselend uitgevoerd op elk van beide punten, wat een kleine 25 minuten vergt. Dit is bedoeld om multipath effecten te elimineren. Er wordt hierbij gebruik gemaakt van een a priori aangenomen waarde van de planimetrische en altimetrische standaardafwijking om eventuele uitschieters te elimineren.

De planimetrische componenten worden bekomen in de nationale projectie en voorgesteld door  $(E, N)$  terwijl de hoogtecomponent  $H$  refereert naar het nationaal altimetrische referentievlak.

Bij de volledige procedure wordt de serie van 5 metingen driemaal herhaald met telkens minstens 90 minuten tussen. Er worden meerdere series metingen gebruikt om de invloed van de verandering van satellietconfiguratie en de variatie van de ionosferische en troposferische condities te kunnen visualiseren. De volledige procedure is bedoeld om de experimentele standaardafwijking van één enkele meting te bepalen. Verder kan ook de nauwkeurigheid van de apparatuur onder bepaalde condities bepaald worden of de nauwkeurigheid van de apparatuur op verschillende ogenblikken onder verschillende condities of de vergelijkbaarheid tussen verschillende nauwkeurigheden van apparatuur gebruikt onder dezelfde condities.

Vervolgens worden een aantal berekeningen verricht op de data. Eerst wordt gecontroleerd op eventuele grove fouten, door de gemeten data te vergelijken met de absolute data. Vervolgens worden een aantal statistische waarden berekend : de experimentele standaardafwijking van één enkele meting in het horizontale vlak  $s_D$  en de experimentele standaardafwijking van één enkele meting van het hoogteverschil  $s_{\Delta H}$ . Tenslotte worden een aantal statistische tests verricht om na te gaan of de apparatuur voldoet aan de specificaties geleverd door de fabrikant.

## 6.2 Inleidende controle van de metingen

In de eerste stap worden de horizontale afstand en het hoogteverschil bekomen uit de GNSS coördinaten tussen de verschillende roverpunten berekend voor elke set  $j = 1, \dots, 5$  in elke serie  $i = 1, \dots, 3$ . Deze waarden worden met de nominale waarden vergeleken om na te gaan of er zich geen grove fouten bevinden in de metingen. Ook de afwijking op de (door totaalstation opgemeten) afstand en hoogteverschil wordt bepaald. Bij elke meting wordt er echter eerst een correctie toegepast om de systematische fout te elimineren. Elk toestel heeft namelijk bij een meting van een bepaalde duur en voor een bepaalde afstand een systematische fout. Voordat deze fout echter bepaald wordt, worden eerst de blunders eruit gehaald.

Wanneer de waarden van de afwijking, na toepassing van de correctie, niet voldoen aan onderstaande voorwaarden, worden ze beschouwd als uitschieter en worden ze niet gebruikt voor de verdere berekeningen.

De planimetrische of horizontale afstand  $D_{i,j}$  en het hoogteverschil  $\Delta H_{i,j}$  tussen de punten 1 en 2 voor iedere serie  $j$  van iedere set  $i$  worden bepaald door :

$$\begin{aligned} D_{i,j} &= \sqrt{(E_{i,j,2} - E_{i,j,1})^2 + (N_{i,j,2} - N_{i,j,1})^2} \\ \Delta H_{i,j} &= H_{i,j,2} - H_{i,j,1} \end{aligned}$$

De afwijking van de GNSS gebaseerde horizontale afstand  $\varepsilon_D$  en hoogteverschil  $\varepsilon_H$  ten opzichte van de nominale waarden worden gegeven door :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{D_{i,j}} &= D_{i,j} - \widehat{D} \\ \varepsilon_{H_{i,j}} &= \Delta H_{i,j} - \widehat{\Delta H} \end{aligned}$$

Wanneer één van de afwijkingen niet voldoet aan één van de twee onderstaande voorwaarden, kan worden afgeleid dat er zich een uitschieter bevindt in de desbetreffende meting.

$$\begin{aligned} |\varepsilon_{D_{i,j}}| &\leq 2.5 \times \sqrt{2} \times s_D \\ |\varepsilon_{H_{i,j}}| &\leq 2.5 \times \sqrt{2} \times s_{\Delta H} \end{aligned}$$

Wat er ingeval van uitschieters precies moet gebeuren, preciseert de norm niet. Bovendien stelt zich het probleem dat bij een afwijkend afstands- of hoogteverschil één of beide roverpunten aan de oorzaak kan liggen.

In feite zijn er twee mogelijkheden betreffende het elimineren van metingen die uitschieters zijn :

1. De metingen op beide roverpunten worden verworpen.
2. De meting van dat roverpunt wordt verworpen dat het meest afwijkt van de gemiddelde waarde bekomen in dit roverpunt.

Een andere vraag is of de verworpen metingen moeten vervangen worden door nieuwe. Wellicht verandert deze vervanging weinig aan het eindresultaat, maar de vervanging door nieuwe metingen voorkomt dat de formules voor de berekening telkens moeten worden aangepast aan het variabel aantal geldige metingen en vereenvoudigt de berekeningen.

### 6.3 Berekening van de statistische waarden voor de volledige test volgens het voorstel tot ISO-norm

#### 6.3.1 Berekening van de experimentele standaardafwijkingen volgens het voorstel tot ISO-norm

Eerst wordt op alle metingen van de series de kleinste kwadratenmethode toegepast. De schattingen van  $\bar{E}_k$ ,  $\bar{N}_k$  en  $\bar{H}_k$  voor elk roeverpunt  $k$  worden als volgt berekend :

$$\begin{aligned}\bar{E}_k &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{m_i} \sum_{j=1}^{m_j} E_{i,jk} \\ \bar{N}_k &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{m_i} \sum_{j=1}^{m_j} N_{i,jk} \\ \bar{H}_k &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{m_i} \sum_{j=1}^{m_j} H_{i,jk}\end{aligned}$$

met :  $k = 1, \dots, m_k = 2$  ... duidt het merkteken aan  
 $j = 1, \dots, m_j = 5$  ... het aantal metingen binnen 1 serie  
 $i = 1, \dots, m_i = 3$  ... het aantal series op 1 merkteken  
 $n = 15$  ... aantal metingen per punt voor de drie series

De residu's voor de planimetrische en altimetrische coördinaten worden bepaald door :

$$\begin{aligned}r_{Ei,jk} &= \bar{E}_k - E_{i,jk} \\ r_{Ni,jk} &= \bar{N}_k - N_{i,jk} \\ r_{Hi,jk} &= \bar{H}_k - H_{i,jk}\end{aligned}$$

zodat de kwadraten van de residu's gegeven worden door :

$$\begin{aligned}\sum r_{\Delta E}^2 &= \sum_{i=1}^{m_i} \sum_{j=1}^{m_j} \sum_{k=1}^{m_k} r_{Ei,jk}^2 \\ \sum r_{\Delta N}^2 &= \sum_{i=1}^{m_i} \sum_{j=1}^{m_j} \sum_{k=1}^{m_k} r_{Ni,jk}^2 \\ \sum r_{\Delta H}^2 &= \sum_{i=1}^{m_i} \sum_{j=1}^{m_j} \sum_{k=1}^{m_k} r_{Hi,jk}^2\end{aligned}$$

De vrijheidsgraad voor iedere verschilcoördinaat  $v_{\Delta E}$ ,  $v_{\Delta N}$  en  $v_{\Delta H}$  bedraagt :

$$v_{\Delta E} = v_{\Delta N} = v_{\Delta H} = (m_i \times m_j - 1) \times m_k = (3 \times 5 - 1) \times 2 = 28 \quad (6.1)$$

zodat de standaardafwijking op de verschilcoördinaten wordt bepaald door :

$$s_{\Delta E} = \sqrt{\frac{\sum r_{\Delta E}^2}{v_{\Delta E}}} = \sqrt{\frac{\sum r_{\Delta E}^2}{28}} \quad s_{\Delta N} = \sqrt{\frac{\sum r_{\Delta N}^2}{v_{\Delta N}}} = \sqrt{\frac{\sum r_{\Delta N}^2}{28}} \quad s_{\Delta H} = \sqrt{\frac{\sum r_{\Delta H}^2}{v_{\Delta H}}} = \sqrt{\frac{\sum r_{\Delta H}^2}{28}} \quad (6.2)$$

### 6.3 Statistische testen volgens het voorstel tot ISO-norm

Deze standaardafwijkingen zijn gerelateerd aan de ISO standaardafwijkingen volgens :

$$s_D = \sqrt{\frac{\sum r_{\Delta E}^2 + \sum r_{\Delta N}^2}{v_{\Delta E} + v_{\Delta N}}} = \sqrt{\frac{s_{\Delta E}^2 \times v_{\Delta E} + s_{\Delta N}^2 \times v_{\Delta N}}{v_{\Delta E} + v_{\Delta N}}} = \sqrt{\frac{s_{\Delta E}^2 + s_{\Delta N}^2}{2}} \quad (6.3)$$

$$s_{\Delta H} = \sqrt{\frac{\sum r_{\Delta H}^2}{28}} \quad (6.4)$$

met  $s_D$  en  $s_{\Delta H}$  respectievelijk de experimentele planimetrische en altimetrische standaardafwijking volgens de ISO-norm.

#### 6.3.2 Statistische testen volgens het voorstel tot ISO-norm

Voor de interpretatie van de resultaten worden statistische testen toegepast. Deze testen maken gebruik van de experimentele standaardafwijking  $s_D$  voor de planimetrische coördinaten en  $s_{\Delta H}$  voor het altimetrisch hoogteverschil verkregen uit de metingen.

Voor de statistische tests wordt een vertrouwensniveau van 5 % gebruikt, zodat  $1 - \alpha = 0,95$ .

De eerste test heeft betrekking op de aanvaardbaarheid van de bekomen experimentele standaardafwijkingen voor de planimetrische afstand en het hoogteverschil. De beide nulhypotesen die worden onderzocht zijn :

1. is de berekende experimentele standaardafwijking  $s_D$  van de planimetrische coördinaten kleiner dan een vooropgezette waarde  $\sigma_D$  ?
2. is de berekende experimentele standaardafwijking  $s_{\Delta H}$  van de altimetrische component kleiner dan een vooropgezette waarde  $\sigma_{\Delta H}$  ?

De vooropgestelde nulhypothese luiden :

$$\text{planimetrische nulhypothese} \quad s_D \leq \sigma_D \quad (6.5)$$

$$\text{altimetrische component} \quad s_{\Delta H} \leq \sigma_{\Delta H} \quad (6.6)$$

Een fabrikant van GNSS apparatuur kenmerkt zijn toestel aan de hand van standaardafwijkingen voor de planimetrische positie  $\sigma_P$  en voor de altimetrische component  $\sigma_H$ . Het voorstel tot ISO-norm gebruikt rechtstreeks deze waarden, zodat :

$$\sigma_D = \sigma_P \quad \sigma_{\Delta H} = \sigma_H$$

Deze nulhypotesen worden aanvaard wanneer respectievelijk aan de volgende voorwaarden wordt voldaan :

$$s_D \leq \sigma_D \times \sqrt{\frac{\chi_{1-\alpha}^2(v_{\Delta E} + v_{\Delta N})}{v_{\Delta E} + v_{\Delta N}}} = \sigma_D \times \sqrt{\frac{\chi_{0.95}^2(56)}{56}} = 1,153 \times \sigma_D$$

$$s_{\Delta H} \leq \sigma_H \times \sqrt{\frac{\chi_{1-\alpha}^2(v_H)}{v_H}} = \sigma_H \times \sqrt{\frac{\chi_{0.95}^2(28)}{28}} = 1,215 \times \sigma_H$$

Een tweede test onderzoekt of de experimentele standaardafwijkingen  $s_D$  en  $\tilde{s}_D$  voor de planimetrische coördinaten, respectievelijk  $s_{\Delta H}$  en  $\tilde{s}_{\Delta H}$  voor de altimetrische component, die bepaald zijn door 2 verschillende steekproeven tot dezelfde populatie behoren. De nulhypothese  $s_D \approx \tilde{s}_D$  wordt aanvaard wanneer :

$$\frac{1}{F_{1-\frac{\alpha}{2}}(v_{\Delta E} + v_{\Delta N}, \tilde{v}_{\Delta E} + \tilde{v}_{\Delta N})} \leq \frac{s_D^2}{\tilde{s}_D^2} \leq F_{1-\frac{\alpha}{2}}(v_{\Delta E} + v_{\Delta N}, \tilde{v}_{\Delta E} + \tilde{v}_{\Delta N})$$

$$\frac{1}{F_{0,975}(56, 56)} \leq \frac{s_D^2}{\tilde{s}_D^2} \leq F_{0,975}(56, 56)$$

$$0,585 \leq \frac{s_D^2}{\tilde{s}_D^2} \leq 1,709$$

en naar analogie bekomt men voor de nulhypothese voor de altimetrische sessies :

$$\frac{1}{F_{1-\frac{\alpha}{2}}(v_H, \tilde{v}_H)} \leq \frac{s_H^2}{\tilde{s}_H^2} \leq F_{1-\frac{\alpha}{2}}(v_H, \tilde{v}_H)$$

$$\frac{1}{F_{0,975}(28, 28)} \leq \frac{s_H^2}{\tilde{s}_H^2} \leq F_{0,975}(28, 28)$$

$$0,469 \leq \frac{s_H^2}{\tilde{s}_H^2} \leq 2,133$$

## 6.4 Voorstel tot aanpassing van het voorstel tot ISO-norm

Een grondige analyse van het voorstel tot ISO-norm voor de validatie van een GNSS systeem (Sectie 6.3 op pagina 99) vertoont een aantal zwakheden en tekortkomingen aan het licht :

1. de ISO norm bepaalt dat de vrijheidsgraad voor iedere verschilcoördinaatcomponent  $v_E$ ,  $v_N$  en  $v_H$  gelijk is aan de som van de vrijheidsgraden in ieder roverpunt (Vgl (6.1) en (6.2)). Het is echter foutief te stellen dat een vrijheidsgraad bekomen in één roverpunt de statistische karakteristieken in het andere roverpunt beïnvloedt. De vrijheidsgraad van iedere verschilcoördinaatcomponent bedraagt dus

$$v_E = v_N = v_H = (m_i \times m_j - 1) = (3 \times 5 - 1) = 14 \quad (6.7)$$

De experimentele standaardafwijking  $s_E$ ,  $s_N$  en  $s_H$  op iedere coördinaatcomponent worden bepaald door :

$$s_{E,k} = \sqrt{\frac{r_{Ei,jk}^2}{v_E}} \quad s_{N,k} = \sqrt{\frac{r_{Ni,jk}^2}{v_N}} \quad s_{H,k} = \sqrt{\frac{r_{Hi,jk}^2}{v_H}}$$

2. de ISO norm bepaalt de experimentele standaardafwijking op de planimetrische afstand  $s_D$  volgens formule (6.3). Deze afstand wordt bepaald door de formule van de afstandsberekening toe te passen op de  $E$  en  $N$  coördinaat van beide roverpunten. De GNSS metingen op ieder roverpunt bepalen de standaardafwijking voor deze roverpunten. Het resultaat van deze wiskundige bewerking bezit een experimentele standaardafwijking bepaald volgens de wet van de voortplanting der fouten (Sectie 1.3.7 op pagina 16). Aangezien de metingen in beide roverpunten onafhankelijk uitgevoerd worden zijn de coördinaatcomponenten niet gecorreleerd, zodat de

## 6.4 Statistische testen volgens het voorstel tot aanpassing van de ISO-norm

experimentele standaardafwijking  $s_D$  voor de planimetrische afstand berekend wordt volgens vergelijking 1.1 op pagina 16.

De standaardafwijking  $s_D$  op de horizontale afstand  $D_{1,2}$  wordt bekomen door toepassing van de wet van de voortplanting van de varianties (Sectie 1.3.6 op pagina 14), waarbij we aannemen dat er geen correlatie bestaat tussen de planimetrische veranderlijken  $x_i = E_1, E_2, N_1, N_2$  :

$$\begin{aligned} D_{1,2} &= f(E_1, E_2, N_1, N_2) = \sqrt{(E_1 - E_2)^2 + (N_1 - N_2)^2} \\ s_D^2 &= \sum_{x_i=E_1}^{N_2} \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} s_{x_i} \right)^2 \\ &= \left( \frac{\partial D_{1,2}}{\partial E_1} s_{E_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial D_{1,2}}{\partial E_2} s_{E_2} \right)^2 + \left( \frac{\partial D_{1,2}}{\partial N_1} s_{N_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial D_{1,2}}{\partial N_2} s_{N_2} \right)^2 \end{aligned}$$

De partiële afgeleiden worden berekend volgens :

$$\begin{aligned} \frac{\partial D_{1,2}}{\partial E_1} &= \frac{1}{2D_{1,2}} 2(E_1 - E_2) \\ \frac{\partial D_{1,2}}{\partial E_2} &= -\frac{1}{2D_{1,2}} 2(E_1 - E_2) \\ \frac{\partial D_{1,2}}{\partial N_1} &= \frac{1}{2D_{1,2}} 2(N_1 - N_2) \\ \frac{\partial D_{1,2}}{\partial N_2} &= -\frac{1}{2D_{1,2}} 2(N_1 - N_2) \end{aligned}$$

zodat de experimentele standaardafwijking op de afstand  $s_D = s_D$  gegeven wordt door :

$$\begin{aligned} s_D^2 &= \frac{1}{D_{1,2}^2} \left[ (E_1 - E_2)^2 s_{E_1}^2 \right] + \frac{1}{D_{1,2}^2} \left[ (E_1 - E_2)^2 s_{E_2}^2 \right] \\ &\quad + \frac{1}{D_{1,2}^2} \left[ (N_1 - N_2)^2 s_{N_1}^2 \right] + \frac{1}{D_{1,2}^2} \left[ (N_1 - N_2)^2 s_{N_2}^2 \right] \\ s_D &= \frac{1}{D_{1,2}} \sqrt{\left[ (E_1 - E_2)^2 (s_{E_1}^2 + s_{E_2}^2) + (N_1 - N_2)^2 (s_{N_1}^2 + s_{N_2}^2) \right]} \end{aligned}$$

3. Voor het hoogteverschil bepaalt de ISO-norm een experimentele standaardafwijking waarbij de resulterende vrijheidsgraad ten opzichte van een individueel rooverpunt verdubbeld. Een correcte toepassing bepaalt de experimentele standaardafwijking voor het hoogteverschil  $s_{\Delta H}$  door de lineaire combinatie van de experimentele standaardafwijkingen op de beide altimetrische componenten :

$$s_{\Delta H} = \sqrt{s_{H_1}^2 + s_{H_2}^2}$$

### 6.4.1 Statistische testen volgens het voorstel tot aanpassing van de ISO-norm

De interpretatie van de resultaten na aanpassing van het voorstel tot ISO-norm steunen op analoge statistische testen. Deze testen maken gebruik van de experimentele standaardafwijking  $s_D$  voor de planimetrische coördinaten en  $s_{\Delta H}$  voor de altimetrische component verkregen uit de metingen.

## 6.4 Statistische testen volgens het voorstel tot aanpassing van de ISO-norm

Voor de tests wordt eenzelfde vertrouwensniveau van 5% gebruikt, zodat  $1 - \alpha = 0,95$ .

De eerste test heeft betrekking op de aanvaardbaarheid van de bekomen experimentele standaardafwijkingen voor de planimetrische coördinaten en de altimetrische component. De beide nulhypothesen worden hernomen en luiden :

1. is de berekende experimentele standaardafwijking  $s_D$  van de planimetrische coördinaten kleiner dan een vooropgezette waarde  $\sigma_D$  ?
2. is de berekende experimentele standaardafwijking  $s_H$  van de altimetrische component kleiner dan een vooropgezette waarde  $\sigma_H$  ?

De vooropgestelde nulhypothese luiden :

$$\text{planimetrische nulhypothese} \quad s_D \leq \sigma_D = \sqrt{2} \times \sigma_P \quad (6.8)$$

$$\text{altimetrische component} \quad s_{\Delta H} \leq \sigma_{\Delta H} = \sqrt{2} \times \sigma_H \quad (6.9)$$

Een fabrikant van GNSS apparatuur kenmerkt zijn toestel aan de hand van standaardafwijkingen voor de planimetrische positie  $\sigma_P$  en voor de altimetrische component  $\sigma_H$ . Het voorstel tot ISO-norm bepaalt een experimentele standaardafwijking van de planimetrische afstand  $D$  (het hoogteverschil  $\Delta H$ ) tussen twee roverpunten, die onafhankelijk worden ingemeten. De vergelijkingswaarde voor de afstand  $\sigma_D$  (voor het hoogteverschil  $\sigma_{\Delta H}$ ) wordt bepaald door de combinatie van de vooropgestelde planimetrische (altimetrische) standaardafwijking in ieder individueel roverpunt :

$$\begin{aligned} \sigma_D^2 &= \sigma_{P,1}^2 + \sigma_{P,2}^2 \\ \sigma_{\Delta H}^2 &= \sigma_{H,1}^2 + \sigma_{H,2}^2 \end{aligned}$$

wat bij gebruik van eenzelfde type ontvanger in beide roverpunten zich herleidt tot :

$$\sigma_D = \sqrt{2} \times \sigma_P \quad (6.10)$$

$$\sigma_{\Delta H} = \sqrt{2} \times \sigma_H \quad (6.11)$$

De vergelijkingen (6.10) en (6.11) geven aanleiding tot de correcte formulering van de nulhypothesen in vergelijkingen (6.8) en (6.9).

Deze nulhypothesen worden aanvaard wanneer respectievelijk aan de volgende voorwaarden wordt voldaan :

$$\begin{aligned} s_D &\leq \sqrt{2} \times \sigma_P \times \sqrt{\frac{\chi_{1-\alpha}^2(v_D)}{v_D}} = \sqrt{2} \times \sigma_P \times \sqrt{\frac{\chi_{0,95}^2(14)}{14}} = 1,83 \times \sigma_P \\ s_H &\leq \sqrt{2} \times \sigma_H \times \sqrt{\frac{\chi_{1-\alpha}^2(v_H)}{v_H}} = \sqrt{2} \times \sigma_H \times \sqrt{\frac{\chi_{0,95}^2(14)}{14}} = 1,83 \times \sigma_H \end{aligned}$$

Een tweede test onderzoekt of de experimentele standaardafwijkingen  $s_D$  en  $\tilde{s}_D$  voor de planimetrische coördinaten,, respectievelijk  $s_H$  en  $\tilde{s}_H$  voor de altimetrische component, die bepaald zijn door 2



## 6.4 Statistische testen volgens het voorstel tot aanpassing van de ISO-norm

---

verschillende steekproeven tot dezelfde populatie behoren. De nulhypothese  $s_D \simeq \tilde{s}_D$  wordt aanvaard wanneer :

$$\begin{aligned}\frac{1}{F_{1-\frac{\alpha}{2}}(v_D, \tilde{v}_D)} &\leq \frac{s_D^2}{\tilde{s}_D^2} \leq F_{1-\frac{\alpha}{2}}(v_D, \tilde{v}_D) \\ \frac{1}{F_{0,975}(14, 14)} &\leq \frac{s_D^2}{\tilde{s}_D^2} \leq F_{0,975}(14, 14) \\ 0,402 &\leq \frac{s_D^2}{\tilde{s}_D^2} \leq 2.484\end{aligned}$$

en naar analogie bekomt men voor de nulhypothese voor de altimetrise sessies :

$$\begin{aligned}\frac{1}{F_{1-\frac{\alpha}{2}}(v_H, \tilde{v}_H)} &\leq \frac{s_H^2}{\tilde{s}_H^2} \leq F_{1-\frac{\alpha}{2}}(v_H, \tilde{v}_H) \\ \frac{1}{F_{0,975}(14, 14)} &\leq \frac{s_H^2}{\tilde{s}_H^2} \leq F_{0,975}(14, 14) \\ 0,402 &\leq \frac{s_H^2}{\tilde{s}_H^2} \leq 2.484\end{aligned}$$

## Hoofdstuk 7

# Kalibratie van de satellietplaatsbepaling

### 7.1 Inleiding

De positienauwkeurigheid van een GNSS systeem wordt beïnvloed door de waarnemingen die gebruikt worden en de kwaliteit van de ontvanger. Factoren die de kwaliteit van de waarnemingen bepalen zijn het effect van de meerweg-interferentie, het aantal satellieten en hun elevatiehoek die door de *dilution of parameters* (xDOP) en de signaal-ruis verhouding van de signalen wordt weergegeven en de duur waarover de waarneming wordt uitgevoerd.

Voor navigatiedoeleinden of absolute plaatsbepalingen wordt hoofdzakelijk gebruik gemaakt van C/A, of voor militaire toepassing de P(Y), pseudo-afstandswaarnemingen. Geodetische toepassingen steunen op de fasemetingen rechtstreeks uitgevoerd op de draaggolven uitgezonden door de satellieten (Sectie 5.6 op pagina 93). De positienauwkeurigheid wordt verhoogd voor de navigatie door het toepassen van differentiële technieken, terwijl de geodetische technieken steunen op relatieve plaatsbepalingen. De relatieve plaatsbepalingen berekend aan de hand van de fasemetingen leveren een positienauwkeurigheid op van enkele mm. Een belangrijke opmerking is ook het feit dat de inzet van satellietplaatsbepaling voor de landmeter steunt op (a) (differentiële) codemetingen voor GIS (*Geografische Informatie Systemen* met beperkte schaal) of (b) op relatieve fasemetingen volgens de RTK techniek voor integratie in de Belgische geodetische referentie. Om de kost van het project te drukken, wordt bovendien de tijdsduur van deze metingen zo sterk mogelijk beperkt en maakt de landmeter bij voorkeur gebruik van technieken die de posities in reële tijd bepalen.

De relatieve plaatsbepaling door fasemetingen laat toe geodetische nauwkeurigheden te bereiken en wordt, onder de vorm van RTK-meettechnieken (Sectie 5.7 op pagina 94), toegepast in de landmeetkunde. De nauwkeurigheid haalbaar door toepassing van de RTK-techniek wordt beperkt door de zeer beperkte duur van de meting : de tijdsduur van een RTK-meting is ogenblikkelijk aangezien iedere gelijktijdige fasemeting aanleiding geeft tot de bepaling van één onafhankelijke positie. De positienauwkeurigheid bedraagt 1 cm tot 2 cm.

Dit feit laat toe om een RTK landmeetkundige bepaling van de positie van een punt te kalibreren aan de hand van een relatieve fasemeting uitgevoerd over een groter tijdsinterval. Diverse (commerciële) programma's laten toe de relatieve faseoplossing te berekenen. De commerciële software pakketten zijn dikwijls verbonden aan een bepaald type GPS ontvanger en maken gebruik van binaire bestanden waarin de code- en fase-metingen opgeslagen zijn. Deze programma's kunnen via het internationale RINEX (*Receiver Independant Exchange*, meestal optioneel) uitwisselingsformaat de posities voor andere type ontvangers berekenen. Dit heeft echter als nadeel dat niet dezelfde informatie voor alle type ontvangers gebruikt wordt voor de verwerking van de metingen. Niet-commerciële softwares kunnen voor niet-commerciële doeleinden vrij gebruikt worden. Aangezien deze pakketten niet aan een type ontvanger gebonden zijn, behandelen ze alle ontvangers gelijk door de metingen via het RINEX-formaat in te voeren. Het aanwenden van dit type software, commercieel of vrij, vraagt een grondige kennis van de verwerkingsstrategieën en de referentie (Sectie 1.4 op pagina 16) waarbinnen de oplossing wordt berekend.

De volgende paragrafen stellen een techniek voor om satellietplaatsbepaling te kalibreren aan de hand van geautomatiseerde verwerkingen. Hierdoor is het mogelijk om een kalibratie methode voor te stellen die met de nodige voorzichtigheid gebruik kan worden door een operator die niet noodzakelijk een geodetische achtergrond heeft.

## 7.2 On-Line Processing van GPS data

### 7.2.1 Algemeenheden over de On-Line Processing diensten

Verskillende organismen bieden een geautomatiseerde on-line dienst aan die een gebruiker toelaat om met hoge nauwkeurigheid de coördinaten van een GPS station te berekenen. Deze organismen maken gebruik van permanente referentiestationen van het *International GPS Service* (IGS) en werken bij voorkeur met databestanden die de fasemetingen van 24 h bevatten. De meest gekende on-line diensten zijn (a) Automated GIPSY-OASIS Analyses of **Auto-GIPSY** aangeboden door het Jet Propulsion Laboratory (JPL), (b) Online Positioning User Service of **OPUS** opgezet door National Geodetic Survey (NGS) en (c) het Scripps Coordinate Update Tool of **SCOUT** geopereerd door de University of California, San Diego (UCSD). De basisfilosofie van deze diensten is identiek : de gebruiker kan een RINEX bestand, dat de fasemetingen bevat, aan de on-line dienst overmaken waarna het organisme de berekeningen uitvoert en de gebruiker de resultaten van de relatieve plaatsbepaling toestuurt.

OPUS laat enkel toe stations te bepalen ten opzichte van de permanente stations behorende tot het *Continuous Operating Reference Stations* (CORS) verspreid over de *Continental United States* (CONUS). De aangeboden verwerking kan dus niet voor Europese stations gebruikt worden.

Het *GPS-Inferred Positioning SYstem and Orbit Analysis SIMulation Software* (GIPSY-OASIS) biedt een unieke benadering voor de bepaling van de positie van een GPS ontvanger. Deze software steunt niet op relatieve plaatsbepaling, maar modelleert aan de hand van precisie orbitografie de orbieten van de GPS satellieten, waarna de fasemetingen van het individuele station een ruimtelijke insnijding bepalen van de positie van dit station.

De SCOUT dienst steunt op de GAMIT-GLOBK (*GPS Analysis MIT – GLOBal Kalman*) software bestaat 2 grote modules, ieder opgebouwd uit een serie van programma's en scripts. De GAMIT module bepaalt de positie van een station door relatieve fasemetingen, terwijl de GLOBK module verschillende oplossingen combineert om een tijdsanalyse van de positie toe te laten. De on-line SCOUT dienst maakt enkel gebruik van de GAMIT module voor de verwerking van de GPS metingen.

Een analyse van de kwaliteit van deze on-line diensten toont aan (a) dat de nauwkeurigheid van deze diensten toeneemt met de waarnemingsduur en (b) dat SCOUT de beste nauwkeurigheid en interne consistentie geeft. Voor de kalibratie van de satellietplaatsbepaling wordt in de verdere paragrafen gebruik gemaakt van de SCOUT dienst.

### 7.2.2 De SCOUT On-Line Processing Service

De SCOUT dienst wordt verzorgd door het *Scripps Orbit and Permanent Array Center* (SOPAC) dat deel uit maakt van het UCSD. SOPAC is een data- en analysecentrum van het IGS en biedt binnen dit kader verschillende diensten aan. De SCOUT dienst is een ITRF coördinaten generator die via het Internet ter beschikking staat van de internationale gemeenschap.

De SCOUT dienst bepaalt de gemiddelde coördinaten van een station door het RINEX waarnemingsbestand voor een bepaalde dag te verwerken. Dit bestand wordt door de gebruiker via anonieme FTP ter beschikking gesteld van SCOUT. De relatieve positie van het station wordt standaard bepaald ten opzichte van de drie meest nabij gelegen IGS stations, waarvoor data voor de betreffende dag beschikbaar zijn. Optioneel kan de gebruiker de referentiestations bepalen die hij wil gebruiken. Deze stations dienen echter door SCOUT gekend te zijn (beschikbaarheid van de waarnemingen en de kennis van de stationscoördinaten). Wanneer het type ontvanger of type antenne niet volgens de internationale normen in het RINEX bestand zijn opgenomen, zal SCOUT deze informatie opvragen.

De analyse door SCOUT uitgevoerd baseert zich op een gelijktijdige netwerkvereffening van de verschillende stations. Het resultaat van de SCOUT analyse wordt per elektronische post verstuurd naar de gebruiker. Dit rapport bevat (a) de gemiddelde cartesische en geodetische coördinaten van het station geldig op het tijdstip overeenstemmend met het RINEX bestand, (b) de standaard afwijkingen en (c) de gemiddelde basislijn tussen de gebruikte stations. De coördinaten zijn uitgedrukt in de ITRF2000 materialisatie, terwijl de geodetische coördinaten op de WGS84 geprojecteerd zijn.

## 7.3 Methodiek voor de kalibratie van satellietplaatsbepaling

Voor de beschrijving van de methodiek behandelen we de RTK plaatsbepaling, maar de methode is overdraagbaar op differentiële codemetingen.

Voor de kalibratie van de satellietplaatsbepaling wordt de (GPS) ontvanger opgesteld in een goed gematerialiseerd basispunt. De meetsessie bedraagt 24h (van 0<sup>h</sup> tot 24<sup>h</sup> volgens de GPS tijdschaal)

tijdens de welke de metingen en de RTK-posities, berekend door de interne rekeneenheid van de GPS ontvanger, geregistreerd worden.

appendices

# Bijlage A

## Veldvalidatie van een totaalstation

### Inhoudsopgave

---

<b>A.1 Validatie van de horizontale hoekmetingen</b> . . . . .	<b>109</b>
A.1.1 Volledige meetcampagne van 29 juni 2006 . . . . .	109
A.1.2 Volledige meetcampagne van 14 november 2006 . . . . .	116
A.1.3 Combinatie van de beide meetcampagnes . . . . .	122
<b>A.2 Validatie van de verticale hoekmetingen</b> . . . . .	<b>123</b>
A.2.1 Volledige meetcampagne van 21 juni 2006 . . . . .	123
A.2.2 Volledige meetcampagne van 23 november 2006 . . . . .	129
A.2.3 Combinatie van de beide meetcampagnes . . . . .	135
<b>A.3 Veldvalidatie van de afstandsmeter</b> . . . . .	<b>136</b>
A.3.1 Volledige meetcampagne van 21 juni 2006 en 28 november 2006 . . . . .	136

---

### A.1 Validatie van de horizontale hoekmetingen

De opmetingen voor de veldvalidatie van een totaalstation werd uitgevoerd door Adjudant MEULEPAS en 1ste Korpotaal Chef VAN OPSTAL op twee verschillende perioden. Voor beide meetcampagnes werd gebruikt gemaakt van een Leica TC805 totaalstation, gekenmerkt door een standaardafwijking voor de horizontale en verticale hoeken gelijk aan  $\sigma_h = 000^g00^c10^{cc} = 10^{cc}$ . De eerste meetcampagne werd uitgevoerd op 29 juni 2006 onder ideale klimatologische omstandigheden terwijl de tweede meetcampagne plaatsgreep in sterk winderig en regenachtig weer op 14 november 2006. De volgende pagina's geven een overzicht van de resultaten voor beide meetcampagnes.

#### A.1.1 Volledige meetcampagne van 29 juni 2006

De rekenbladen op de volgende bladzijden geven een overzicht van de metingen en de berekeningen voor de volledige methode voor iedere sessie  $i = 1, \dots, n = 4$ .

## **Bijlagen A.1 – Veldvalidate voor de horizontale hoeken**

---

De statistische analyse aanvaardt de beide hypothesen voor alle meetsessies. Hieruit kunnen we besluiten dat de experimentele horizontale standaardafwijkingen een betrouwbare weergave zijn van de theoretische precisie  $10^{\text{cc}}$  voor het meettoestel. De gemiddelde waarde van deze experimentele horizontale standaardafwijkingen  $\bar{s}_h = 6,65^{\text{cc}}$  is dan ook de standaardafwijking waarmee rekening gehouden wordt voor de veldmetingen uitgevoerd met dit toestel.





Bijlagen A.1 – Veldvalidatie voor de horizontale hoeken

Datum	29 Juni 2006	Project	ISO 17123-3	Weer	zonnig	Temp	26°C	Wind	weinig	$\sigma_h$	0.0010 g	$\sigma_v$	0.0010 g	Eenheid	gon	Campagne		Berekeningen									
$i$	$j$	$t$	Halve Cirkel		Topografisch merkteken		200 g		200 g		200 g		200 g		200 g		$\bar{l}_t$	$d_{j,t}$	$r_{j,t}$	$r_{j,t}^2$							
$i$	$j$	$t$	$l_{j,t,1}$	$l_{j,t,1}$	$l_{j,t,2}$	$l_{j,t,2}$	$l_{j,t}$	$l_{j,t}$	$l_{j,t}$	$\hat{l}_{j,t}$	$\hat{l}_{j,t}$	$\bar{l}_t$	$d_{j,t}$	$r_{j,t}$	$r_{j,t}^2$	$r_{j,t}$	$r_{j,t}^2$	$\bar{l}_t$	$d_{j,t}$	$r_{j,t}$	$r_{j,t}^2$						
2	1		0.0000	199.9984	0.0000	199.9984	-0.0008	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000						
			57.5858	257.5854	57.5856	257.5856	57.5856	57.5856	57.5856	57.5864	57.5864	57.5855	-9.33	-9.40	88.36	-9.40	88.36	57.5855	-9.33	-9.40	88.36						
			115.4136	315.4148	115.4142	315.4142	115.4142	115.4142	115.4142	115.4150	115.4150	115.4160	9.67	9.60	92.16	9.60	92.16	115.4160	9.67	9.60	92.16						
			218.0962	18.0970	218.0966	18.0970	218.0966	218.0966	218.0974	218.0980	218.0980	218.0978	4.33	4.27	18.20	4.27	18.20	218.0978	4.33	4.27	18.20						
			293.4330	93.4336	293.4333	93.4336	293.4333	293.4333	293.4341	293.4342	293.4342	293.4337	-4.33	-4.40	19.36	-4.40	19.36	293.4337	-4.33	-4.40	19.36						
		AVG											0.07	0.00	0.00	0.00	0.00		0.07	0.00	0.00						
2	2		67.0000	267.0024	67.0012	267.0024	67.0012	67.0012	67.0012	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	3.13	9.82	3.13	9.82	0.0000	0.00	3.13	9.82						
			124.5862	324.5866	124.5864	324.5866	124.5864	124.5864	124.5864	57.5852	57.5852	57.5852	2.67	5.80	33.64	5.80	33.64	57.5852	2.67	5.80	33.64						
			182.4178	382.4188	182.4183	382.4188	182.4183	182.4183	182.4183	115.4171	115.4171	115.4171	-11.33	-8.20	67.24	-8.20	67.24	115.4171	-11.33	-8.20	67.24						
			285.1004	85.0980	285.0992	85.0980	285.0992	285.0992	285.0980	218.0980	218.0980	218.0980	-1.67	1.47	2.15	1.47	2.15	218.0980	-1.67	1.47	2.15						
			360.4350	160.4358	360.4354	160.4358	360.4354	360.4354	360.4354	293.4342	293.4342	293.4342	-5.33	-2.20	4.84	-2.20	4.84	293.4342	-5.33	-2.20	4.84						
		AVG											-3.13	0.00	0.00	-3.13	0.00		-3.13	0.00	0.00						
2	3		134.0000	334.0000	134.0000	334.0000	134.0000	134.0000	134.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	-3.07	9.40	-3.07	9.40	0.0000	0.00	-3.07	9.40						
			191.5850	391.5846	191.5848	391.5846	191.5848	191.5848	191.5848	57.5848	57.5848	57.5848	6.67	3.60	12.96	3.60	12.96	57.5848	6.67	3.60	12.96						
			249.4148	49.4168	249.4158	49.4168	249.4158	249.4158	249.4158	115.4158	115.4158	115.4158	1.67	-1.40	1.96	-1.40	1.96	115.4158	1.67	-1.40	1.96						
			352.0978	152.0984	352.0981	152.0984	352.0981	352.0981	352.0981	218.0981	218.0981	218.0981	-2.67	-5.73	32.87	-5.73	32.87	218.0981	-2.67	-5.73	32.87						
			27.4324	227.4330	27.4327	227.4330	27.4327	27.4327	27.4327	293.4327	293.4327	293.4327	3.07	6.60	43.56	6.60	43.56	293.4327	3.07	6.60	43.56						
		AVG											3.07	0.00	0.00	3.07	0.00		3.07	0.00	0.00						
		SUM																									
		$s_i$																			436.53						
																					7.39						

Datum	Project	Weer	Temp	Wind	$\sigma_h$	$\sigma_v$	Eenheid	Campagne	Sessie	Halve Cirkel			Topografisch merkteken			Berekeningen										
					g	g	gon		j	t	$l_{j,t,1}$	$l_{j,t,2}$	200	g	$l_{j,t}$	[gon]	$\hat{l}_{j,t}$	[gon]	$\bar{l}_t$	[gon]	$d_{j,t}$	[dmgon]	$r_{j,t}$	[dmgon]	$r_{j,t}^2$	[dmgon]
29 Juni 2006	ISO 17123-3	zonnig	26°C	weinig	0.0010	0.0010	gon		1		0.0000	199.9996	257.5852	200	-0.0002	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-1.67	0.27	1.93	0.07	3.74
											57.5850	315.4148	218.0982	293.4342	57.5851	115.4154	57.5853	115.4156	218.0980	293.4336	218.0980	2.33	4.27	0.40	18.20	0.16
											293.4340	93.4344	18.0994	293.4342	218.0980	218.0982	293.4344	218.0981	293.4336	293.4336	218.0980	-8.00	-6.07	-0.87	36.80	
										AVG												-1.93	0.00	0.00	0.75	
									2		67.0000	267.0006	324.5840	360.4339	67.0003	0.0000	0.0000	57.5847	115.4155	218.0981	293.4336	4.33	3.47	-0.87	12.02	
											124.5860	382.4148	85.0978	360.4339	124.5850	0.0000	0.0000	115.4155	218.0981	293.4336	218.0981	1.33	0.47	3.47	0.22	
											182.4168	85.0978	160.4338	360.4339	182.4158	0.0000	0.0000	218.0981	293.4336	293.4336	285.0984	-1.33	-2.20	-0.87	4.84	
										AVG												0.87	0.00	0.00	0.75	
									3		134.0000	334.0016	391.5858	499.4336	134.0008	0.0000	0.0000	57.5854	115.4160	218.0976	293.4328	0.00	-1.07	-1.07	1.14	
											191.5866	49.4170	152.0990	499.4336	191.5862	0.0000	0.0000	115.4160	218.0976	293.4328	218.0976	-2.67	-3.73	-3.73	13.94	
											249.4166	352.0978	227.4340	352.0984	249.4168	0.0000	0.0000	218.0976	293.4328	293.4328	352.0984	-3.67	-4.73	-4.73	22.40	
											27.4332	227.4340	27.4336	27.4336	27.4336	0.0000	0.0000	293.4328	293.4328	293.4328	27.4336	8.00	6.93	6.93	48.07	
										AVG												1.07	0.00	0.00	48.07	
										SUM															169.87	
										$s_i$															4.61	

Bijlagen A.1 – Veldvalidate voor de horizontale hoeken

Datum	29 Juni 2006	Project	ISO 17123-3	Weer	zonnig	Temp	26°C	Wind	weinig	$\sigma_h$	0.0010 g	$\sigma_v$	0.0010 g	Eenheid	gon	Campagne		Berekeningen									
$i$	$j$	Sessie	$t$	Halve Cirkel	Topografisch merkteken		200 g		200 g								$\bar{l}_t$	$d_{j,t}$	$r_{j,t}$	$r_{j,t}^2$							
				$l_{j,t,1}$	$l_{j,t,2}$	$l_{j,t}$	$l_{j,t}$	$\hat{l}_{j,t}$	$\bar{l}_t$	$d_{j,t}$	$r_{j,t}$	$r_{j,t}^2$															
4	1			0.0000	200.0016	0.0008	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000						
				57.5856	257.5850	57.5853	57.5853	57.5845	57.5856	11.33	1.60	2.56															
				115.4154	315.4150	115.4152	115.4152	115.4144	115.4158	14.00	4.27	18.20															
				218.0966	18.0960	218.0963	218.0963	218.0955	218.0970	14.67	4.93	24.34															
				293.4314	93.4358	293.4336	293.4336	293.4328	293.4337	8.67	-1.07	1.14															
			AVG							9.73	0.00	0.00															
4	2			67.0000	267.0000	67.0000	67.0000	0.0000	0.0000	0.00	10.47	109.55															
				124.5886	324.5860	124.5873	124.5873	57.5873	57.5873	-16.67	-6.20	38.44															
				182.4178	382.4158	182.4168	182.4168	115.4168	115.4168	-10.00	0.47	0.22															
				285.1000	85.0974	285.0987	285.0987	218.0987	218.0987	-17.33	-6.87	47.15															
				360.4340	160.4350	360.4345	360.4345	293.4345	293.4345	-8.33	2.13	4.55															
			AVG							-10.47	0.00	0.00															
4	3			134.0000	334.0012	134.0006	134.0006	0.0000	0.0000	0.00	-0.73	0.54															
				191.5848	391.5866	191.5857	191.5857	57.5851	57.5851	5.33	4.60	21.16															
				249.4168	49.4168	249.4168	249.4168	115.4162	115.4162	-4.00	-4.73	22.40															
				352.0974	152.0972	352.0973	352.0973	218.0967	218.0967	2.67	1.93	3.74															
				27.4330	227.4356	27.4343	27.4343	293.4337	293.4337	-0.33	-1.07	1.14															
			AVG							0.73	0.00	0.00															
			SUM									389.87															
			$s_i$									6.98															

## Bijlagen A.1 – Veldvalidatie voor de horizontale hoeken

<b>Datum</b>	29 Juni 2006									
<b>Project</b>	ISO 17123-3									
<b>Weer</b>	zonnig									
<b>Temp</b>	26°C									
<b>Wind</b>	weinig									
<b>Eenheid</b>	gon									
$\sigma_h$	0.0010 g									
$\sigma_v$	0.0010 g									
<b>Meetsessie</b>		$s_i$		<b>Crit 1:</b> $s_i \leq \sigma_h$					<b>Crit 2:</b> $s = \tilde{s}$	
1		7.23	12.00	<b>OK</b>	1.00	.98	1.57	1.04	<b>OK</b>	<b>OK</b>
2		7.39	12.00	<b>OK</b>	1.02	1.00	1.60	1.06	<b>OK</b>	<b>OK</b>
3		4.61	12.00	<b>OK</b>	.64	.62	1.00	.66	<b>OK</b>	<b>OK</b>
4		6.98	12.00	<b>OK</b>	.97	.95	1.51	1.00	<b>OK</b>	<b>OK</b>
$\bar{\sigma}$		<b>6.65</b>	dmgon							

**A.1.2 Volledige meetcampagne van 14 november 2006**

De rekenbladen op de volgende bladzijden geven een overzicht van de metingen en de berekeningen voor de volledige methode voor iedere sessie  $i = 1, \dots, n = 4$ .

Bijlagen A.1 – Veldvalidate voor de horizontale hoeken

Datum	14-Nov-06	Project	ISO 17123-3	Weer	regen	Temp	13°C	Wind	rukwind	$\sigma_h$	0.0010 g	$\sigma_v$	0.0010 g	Eenheid	gon	Campagne		Halve Cirkel					200	Topografisch merkteken					Berekeningen								
<i>i</i>	<i>j</i>	<i>Sessie</i>	<i>t</i>	$l_{j,t,1}$	$l_{j,t,2}$	$l_{j,t}$	$\hat{l}_{j,t}$	$\bar{l}_t$	$d_{j,t}$	$r_{j,t}$	$r_{j,t}^2$																										
													g					g					[dmgon]														
1	1	1	1	0.0000	200.0030	0.0015	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	25.60	655.36																								
			2	66.1048	266.1080	66.1064	66.1049	66.1034	-15.00	10.60	112.36																										
			3	120.6804	320.6828	120.6816	120.6801	120.6751	-50.00	-24.40	595.36																										
			4	228.1726	28.1718	228.1722	228.1707	228.1683	-24.00	1.60	2.56																										
			5	312.5334	112.5350	312.5342	312.5327	312.5288	-39.00	-13.40	179.56																										
			<b>AVG</b>						-25.60	0.00	0.00																										
1	2		1	67.0000	267.0160	67.0080	0.0000		0.00	-37.60	1413.76																										
			2	133.1060	333.1078	133.1069	66.0989		45.00	7.40	54.76																										
			3	187.6776	387.6766	187.6771	120.6691		60.00	22.40	501.76																										
			4	295.1714	95.1746	295.1730	228.1650		33.00	-4.60	21.16																										
			5	379.5324	179.5312	379.5318	312.5238		50.00	12.40	153.76																										
			<b>AVG</b>						37.60	0.00																											
1	3		1	134.0000	333.9966	133.9983	0.0000		0.00	12.00	144.00																										
			2	200.1036	0.1058	200.1047	66.1064		-30.00	-18.00	324.00																										
			3	254.6744	54.6744	254.6744	120.6761		-10.00	2.00	4.00																										
			4	362.1674	162.1676	362.1675	228.1692		-9.00	3.00	9.00																										
			5	46.5252	246.5312	46.5282	312.5299		-11.00	1.00	1.00																										
			<b>AVG</b>						-12.00	0.00																											
			<b>SUM</b>																																		
			$s_i$																																		

**Bijlagen A.1 – Veldvalidatie voor de horizontale hoeken**

Datum	14-Nov-06	Project	ISO 17123-3	Weer	regen	Temp	13°C	Wind	rukwind	$\sigma_h$	0.0010 g	$\sigma_v$	0.0010 g	Eenheid	gon	Campagne		Sessie		Topografisch merkteken					Berekeningen												
$i$	$j$	$t$	$t$	$l_{j,t,1}$	$l_{j,t,2}$	$l_{j,t}$	$l_{j,t}$	$\hat{l}_{j,t}$	$\bar{l}_t$	$d_{j,t}$	$r_{j,t}$	$r_{j,t}^2$	$s_i$																								
				Halve Cirkel		200 g																															
1	1			0.0000	199.9986	-0.0007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	7.67	58.78	0.0000	0.0000	66.1071	2.67	0.0000	0.0000	0.00	7.67	58.78	0.0000	0.0000	66.1071	2.67	0.0000	0.0000	0.00	7.67	58.78					
				66.1058	266.1064	66.1061	66.1068	66.1068	66.1068	66.1068	66.1068	66.1068	106.78	106.78	120.6794	320.6802	120.6798	120.6805	120.6805	120.6789	-16.00	-8.33	10.33	106.78	106.78	120.6794	320.6802	120.6798	120.6805	120.6805	120.6789	-16.00	-8.33	10.33	106.78		
				228.1702	28.1754	228.1728	228.1735	228.1717	228.1735	228.1735	228.1735	228.1735	69.44	69.44	312.5304	112.5352	312.5328	312.5335	312.5318	-17.00	-9.33	0.00	-8.33	69.44	69.44	312.5304	112.5352	312.5328	312.5335	312.5318	-17.00	-9.33	0.00	-8.33	69.44		
				312.5304	112.5352	312.5328	312.5335	312.5314	312.5335	312.5335	312.5335	312.5335	87.11	87.11	AVG					-17.00	-9.33	0.00	-9.33	87.11	87.11	AVG					-17.00	-9.33	0.00	-9.33	87.11		
1	2			67.0000	267.0022	67.0011	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	11.11	11.11	67.0000	267.0022	67.0011	66.1073	66.1073	0.0000	0.00	-3.33	11.11	11.11	67.0000	267.0022	67.0011	66.1073	66.1073	66.1073	66.1073	66.1073	66.1073	66.1073	66.1073	66.1073	
				133.1068	333.1100	133.1084	133.1084	133.1084	133.1084	133.1084	133.1084	133.1084	32.11	32.11	187.6802	387.6788	187.6795	120.6784	120.6784	120.6784	5.00	5.00	1.67	2.78	2.78	187.6802	387.6788	187.6795	120.6784	120.6784	120.6784	120.6784	120.6784	120.6784	120.6784	120.6784	
				295.1702	95.1754	295.1728	228.1717	228.1717	228.1717	228.1717	228.1717	228.1717	44.44	44.44	379.5316	179.5334	379.5325	312.5314	312.5314	312.5314	4.00	4.00	0.67	0.44	0.44	379.5316	179.5334	379.5325	312.5314	312.5314	312.5314	312.5314	312.5314	312.5314	312.5314	312.5314	
				379.5316	179.5334	379.5325	312.5314	312.5314	312.5314	312.5314	312.5314	312.5314	0.44	0.44	AVG					3.33	3.33	0.00	0.00	0.44	0.44	AVG					3.33	3.33	0.00	0.00	0.44		
1	3			134.0000	334.0008	134.0004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	18.78	18.78	134.0000	334.0008	134.0004	66.1071	66.1071	0.0000	0.00	-4.33	18.78	18.78	134.0000	334.0008	134.0004	66.1071	66.1071	66.1071	66.1071	66.1071	66.1071	66.1071	66.1071	66.1071	
				200.1078	0.1072	200.1075	200.1075	200.1075	200.1075	200.1075	200.1075	200.1075	21.78	21.78	254.6778	54.6786	254.6782	120.6778	120.6778	120.6778	11.00	11.00	6.67	44.44	44.44	254.6778	54.6786	254.6782	120.6778	120.6778	120.6778	120.6778	120.6778	120.6778	120.6778	120.6778	120.6778
				362.1722	162.1744	362.1733	228.1729	228.1729	228.1729	228.1729	228.1729	228.1729	40.11	40.11	46.5292	246.5326	46.5309	312.5305	312.5305	312.5305	-2.00	-2.00	-6.33	40.11	40.11	46.5292	246.5326	46.5309	312.5305	312.5305	312.5305	312.5305	312.5305	312.5305	312.5305	312.5305	312.5305
				46.5292	246.5326	46.5309	312.5305	312.5305	312.5305	312.5305	312.5305	312.5305	75.11	75.11	AVG					4.33	4.33	0.00	0.00	0.00	0.00	AVG					4.33	4.33	0.00	0.00	0.00		
				SUM															613.33	613.33																	
				$s_i$															8.76	8.76																	

**Bijlagen A.1 – Veldvalidatie voor de horizontale hoeken**

Datum	14-Nov-06												
Project	ISO 17123-3												
Weer	regen												
Temp	13°C												
Wind	rukwind												
$\sigma_h$	0.0010 g												
$\sigma_v$	0.0010 g												
Eenheid	gon												
Campagne	Sessie												
$i$	$j$	$t$	$l_{j,t,1}$	$l_{j,t,2}$	$l_{j,t}$	$\hat{l}_{j,t}$	$\bar{l}_t$	$d_{j,t}$	$r_{j,t}$	$r_{j,t}^2$			
			Topografisch merkteken					Berekeningen					
			Halve Cirkel										
			200 g										
<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	0.0000	199.9998	-0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	-3.60	12.96		
			66.1066	266.1058	66.1062	66.1063	66.1070	6.67	3.07	9.40			
			120.6778	320.6766	120.6772	120.6773	120.6775	2.00	-1.60	2.56			
			228.1700	28.1698	228.1699	228.1700	228.1713	12.67	9.07	82.20			
			312.5290	112.5314	312.5302	312.5303	312.5300	-3.33	-6.93	48.07			
			<b>AVG</b>										
			<b>1</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	67.0000	266.9980	66.9990	0.0000	0.0000	0.00	-5.20	27.04
						133.1050	333.1062	133.1056	66.1066	66.1066	3.67	-1.53	2.35
						187.6742	387.6762	187.6752	120.6762	120.6762	13.00	7.80	60.84
						295.1690	95.1722	295.1706	228.1716	228.1716	-3.33	-8.53	72.82
						379.5264	179.5290	379.5277	312.5287	312.5287	12.67	7.47	55.75
<b>AVG</b>													
<b>1</b>	<b>3</b>	<b>3</b>				134.0000	334.0022	134.0011	0.0000	0.0000	0.00	8.80	77.44
						200.1082	0.1100	200.1091	66.1080	66.1080	-10.33	-1.53	2.35
						254.6806	54.6796	254.6801	120.6790	120.6790	-15.00	-6.20	38.44
						362.1724	162.1742	362.1733	228.1722	228.1722	-9.33	-0.53	0.28
						46.5310	246.5330	46.5320	312.5309	312.5309	-9.33	-0.53	0.28
			<b>AVG</b>										
			<b>SUM</b>										492.80
			$s_i$										<b>7.85</b>



Bijlagen A.1 – Veldvalidatie voor de horizontale hoeken

Datum	14-Nov-06	Project	ISO 17123-3	Weer	regen	Temp	13°C	Wind	rukwind	$\sigma_h$	0.0010 g	$\sigma_v$	0.0010 g	Eenheid	gon	Campagne		Sessie		Topografisch merkteken	Halve Cirkel	200 g	Berekeningen	$r_{j,t}$	$r_{j,t}^2$																							
$i$	$j$	$t$	$j$	$t$	$l_{j,t,1}$	$l_{j,t,2}$	$l_{j,t}$	$\hat{l}_{j,t}$	$\bar{l}_t$	$d_{j,t}$	$r_{j,t}$	$r_{j,t}^2$																																				
															Topografisch merkteken	Halve Cirkel	200 g	Berekeningen	$r_{j,t}$	$r_{j,t}^2$																												
															[gon]	[gon]	[gon]	[gon]	[dmgon]	[dmgon]																												
<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>			0.0000	200.0010	0.0005	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	66.1071	66.1078	66.1071	66.1071	0.0000	-7.00	3.93	15.47	119.54																								
					66.1084	266.1082	66.1083	66.1078	66.1078	66.1071	66.1078	66.1078	66.1078	66.1078	66.1078	66.1071	66.1078	66.1071	66.1071	66.1078	-13.00	-2.07	4.27	15.47																								
					120.6792	320.6792	120.6792	120.6787	120.6774	120.6792	120.6787	120.6787	120.6787	120.6787	120.6787	120.6774	120.6787	120.6787	120.6774	120.6787	-14.00	-3.07	9.40	9.40																								
					228.1718	28.1746	228.1732	228.1727	228.1713	228.1718	228.1732	228.1727	228.1732	228.1732	228.1732	228.1713	228.1732	228.1727	228.1713	228.1732	-20.67	-9.73	94.74	94.74																								
					312.5330	112.5356	312.5343	312.5338	312.5317	312.5330	312.5343	312.5338	312.5338	312.5338	312.5338	312.5317	312.5338	312.5338	312.5317	312.5338	-10.93	0.00	0.00	0.00																								
																<b>AVG</b>																																
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>2</b>			67.0000	266.9978	66.9989	0.0000	0.0000	67.0000	66.9989	66.9989	66.9989	66.9989	66.9989	66.9989	66.9989	66.9989	66.9989	66.9989	0.00	-5.07	25.67	25.67																								
					133.1076	333.1058	133.1067	66.1078	66.1078	133.1076	133.1067	133.1067	133.1067	133.1067	133.1067	133.1067	133.1067	133.1067	133.1067	133.1067	-7.00	-12.07	145.60	145.60																								
					187.6758	387.6738	187.6748	120.6759	120.6759	187.6758	187.6738	187.6748	187.6748	187.6748	187.6748	187.6738	187.6748	187.6748	187.6738	187.6748	15.00	9.93	98.67	98.67																								
					295.1684	95.1698	295.1691	228.1702	228.1702	295.1684	95.1698	295.1691	295.1691	295.1691	295.1691	295.1691	295.1691	295.1691	295.1691	295.1691	11.00	5.93	35.20	35.20																								
					379.5284	179.5316	379.5300	312.5311	312.5311	379.5284	179.5316	379.5300	379.5300	379.5300	379.5300	379.5300	379.5300	379.5300	379.5300	379.5300	6.33	1.27	1.60	1.60																								
																<b>AVG</b>																																
<b>1</b>	<b>3</b>	<b>3</b>			134.0000	334.0002	134.0001	0.0000	0.0000	134.0000	134.0001	134.0001	134.0001	134.0001	134.0001	134.0001	134.0001	134.0001	134.0001	134.0001	0.00	-5.87	34.42	34.42																								
					200.1076	0.1040	200.1058	66.1057	66.1057	200.1076	0.1040	200.1058	200.1058	200.1058	200.1058	200.1058	200.1058	200.1058	200.1058	200.1058	14.00	8.13	66.15	66.15																								
					254.6788	54.6766	254.6777	120.6776	120.6776	254.6788	54.6766	254.6777	254.6777	254.6777	254.6777	254.6777	254.6777	254.6777	254.6777	254.6777	-2.00	-7.87	61.88	61.88																								
					362.1700	162.1722	362.1711	228.1710	228.1710	362.1700	162.1722	362.1711	362.1711	362.1711	362.1711	362.1711	362.1711	362.1711	362.1711	362.1711	3.00	-2.87	8.22	8.22																								
					46.5292	246.5316	46.5304	312.5303	312.5303	46.5292	246.5316	46.5304	46.5304	46.5304	46.5304	46.5304	46.5304	46.5304	46.5304	46.5304	14.33	8.47	71.68	71.68																								
																<b>AVG</b>																																
															<b>SUM</b>																																	
															$s_i$																																	

<b>Datum</b>	14-Nov-06								
<b>Project</b>	ISO 17123-3								
<b>Weer</b>	regen								
<b>Temp</b>	13°C								
<b>Wind</b>	Rukwind								
<b>Eenheid</b>	gon								
$\sigma_h$	0,0010	g							
$\sigma_v$	0,0010	g							
<b>Meetsessie</b>		$s_i$	<b>Crit 1: <math>s_i \leq \sigma_h</math></b>				<b>Crit 2: <math>s = \bar{s}</math></b>		
1		22,84	12,00 <b>NOK</b>	1,00	2,61	2,91	2,29 <b>OK</b>	<b>NOK</b>	<b>NOK</b>
2		8,76	12,00 <b>OK</b>	,38	1,00	1,12	,88 <b>NOK</b>	<b>OK</b>	<b>OK</b>
3		7,85	12,00 <b>OK</b>	,34	,90	1,00	,79 <b>NOK</b>	<b>OK</b>	<b>OK</b>
4		9,95	12,00 <b>OK</b>	,44	1,14	1,27	1,00 <b>NOK</b>	<b>OK</b>	<b>OK</b>
$\bar{s}$		<b>8,85</b>							
									dmgon

De statistische analyse verwerpt de resultaten van de eerste meetsessie : de bekomen experimentele horizontale standaardafwijking is te groot volgens het eerste criterium. De andere 3 meetsessies vertonen een aanvaardbare waarde voor de berekende experimentele horizontale standaardafwijking. De analyse van de tweede hypothese toont aan dat de meetsessies 2 tot en met 4 behoren tot dezelfde representatieve klasse, terwijl de eerste meetsessie niet voldoet aan het criterium en dus niet representatief is voor de precisie van het meettoestel. De combinatie van de beide statistische criteria tonen aan dat de experimentele horizontale standaardafwijking bekomen tijdens de laatste 3 meetsessies representatief zijn voor de horizontale hoekmeting met het totaalstation en dat ze voldoen aan de horizontale standaardafwijking van het totaalstation vooropgesteld door de fabrikant. De gemiddelde waarde voor de bekomen experimentele horizontale standaardafwijking bedraagt 8,85<sup>cc</sup>.

### A.1.3 Combinatie van de beide meetcampagnes

Wanneer beide meetcampagnes samengevoegd worden, is de experimentele horizontale standaardafwijking voor de TC805 bepaald door de statistische combinatie van 7 meetsessies en wordt ze gegeven door :

$$s_h = \sqrt{\frac{s_1^2 \times 4 + s_2^2 \times 3}{7}} = 7,98^{\text{cc}} = 000^{\text{g}}00^{\text{c}}07,98^{\text{cc}}$$

met  $s_1$  en  $s_2$  de gemiddelde waarden voor de experimentele standaardafwijking bekomen tijdens de twee meetcampagnes.

## A.2 Validatie van de verticale hoekmetingen

De opmetingen voor de veldvalidatie van een totaalstation werd uitgevoerd door Adjudant MEULEPAS en 1ste Korpotaal Chef VAN OPSTAL op twee verschillende perioden. Voor beide meetcampagnes werd gebruikt gemaakt van een Leica TC805 totaalstation, gekenmerkt door een standaardafwijking voor de verticale hoeken gelijk aan  $\sigma_v = 000 \text{ g}00 \text{ c}10^{\text{cc}} = 10^{\text{cc}}$ . De eerste meetcampagne werd uitgevoerd op 21 juni 2006 onder ideale klimatologische omstandigheden terwijl de tweede meetcampagne plaatsgreep in sterk regenachtig weer op 23 november 2006. De volgende pagina's geven een overzicht van de resultaten voor beide meetcampagnes.

### A.2.1 Volledige meetcampagne van 21 juni 2006

De rekenbladen op de volgende bladzijden geven een overzicht van de metingen en de berekeningen voor de volledige methode voor iedere sessie  $i = 1, \dots, n = 4$ .

Voor de meetcampagne van 29 juni verwerpt de statistische analyse de vierde meetsessie wat het tweede criterium (behorend tot dezelfde familie) betreft. Dit houdt in dat we de resultaten voor deze meetsessie niet meenemen in de bepaling van een gemiddelde experimentele standaardafwijking  $\bar{s}$  voor de campagne. De experimentele standaardafwijkingen voor de sessies van 23 november behoren allen tot dezelfde familie en worden allen gebruikt voor het berekenen van de experimentele standaardafwijking. De experimentele standaardafwijkingen bedragen respectievelijk  $\bar{s} = 3,45^{\text{cc}}$  en  $\bar{s} = 13,14^{\text{cc}}$ .

De statistische analyse van de verticale indexfout verwerpt alle resultaten voor de campagne van 29 juni. Voor de meetcampagne van 23 november wordt enkel de derde meetsessie niet weerhouden en hieruit wordt de experimentele waarde van de indexfout berekend :  $\bar{\delta} = 1,83^{\text{cc}}$ .

## Bijlagen A.2 – Veldvalidate voor de verticale hoeken

Datum	Project	Weer	Temp	Wind	$\sigma_h$	$\sigma_v$	Eenheid	Campagne	Sessie	$\delta$	Berekeningen				$\delta_i$				
21-Jun-06	ISO 17123-3	regen	13°C	rukwind	0,0010	0,0010	gon			200	$\delta$	Berekeningen				$\delta_i$			
$i$	$j$	$t$	$r$	$\Sigma_{r=1}^{k=4} r_{j,t}$	Halve Cirkel Topografisch merkteken $I_{j,t,1}$ [gon]	$I_{j,t,2}$ [gon]	$I_{j,t}$ [gon]	$I_{j,t}$ [gon]	$I_t$ [gon]	$r_{j,t}$ [dmgon]	$r_{j,t}^2$ [dmgon]	Berekeningen				$\delta_i$			
												$\Sigma_{t=1}^{k=4} r_{j,t}$	$\Sigma_{t=1}^{k=4} I_t$	$\Sigma_{t=1}^{k=4} r_{j,t}$	$\Sigma_{t=1}^{k=4} r_{j,t}^2$				
1	1	1	1	1	317,51220	82,48520	317,51350	317,51350	317,51353	-,33	,11								
		2	2	2	307,16400	92,83300	307,16570	307,16570	307,16557	1,33	1,78								
		3	3	3	298,96020	101,03820	298,96100	298,96100	298,96077	2,33	5,44								
		4	4	4	291,35020	108,64760	291,35130	291,35130	291,35140	-1,00	1,00								
				$\Sigma_{t=1}^{k=4} r_{j,t}$						2,33	8,33								
1	2	1	1	1	317,51220	82,48540	317,51340	317,51340	317,51340	-1,33	1,78								
		2	2	2	307,16400	92,83280	307,16560	307,16560	307,16560	,33	,11								
		3	3	3	298,95980	101,03860	298,96060	298,96060	298,96060	-1,67	2,78								
		4	4	4	291,35040	108,64740	291,35150	291,35150	291,35150	1,00	1,00								
				$\Sigma_{t=1}^{k=4} r_{j,t}$						-1,67	5,67								
1	3	1	1	1	317,51280	82,48540	317,51370	317,51370	317,51370	1,67	2,78								
		2	2	2	307,16420	92,83340	307,16540	307,16540	307,16540	-1,67	2,78								
		3	3	3	298,95960	101,03820	298,96070	298,96070	298,96070	-,67	,44								
		4	4	4	291,35060	108,64780	291,35140	291,35140	291,35140	,00	,00								
				$\Sigma_{t=1}^{k=4} r_{j,t}$						-,67	6,00								
				$\Sigma_{t=1}^{k=4} \Sigma_{j=1}^{m=3} r_{j,t}$						,00	3,16								
												$\Sigma_{t=1}^{k=4} I_t$	$\Sigma_{t=1}^{k=4} r_{j,t}$	$\Sigma_{t=1}^{k=4} r_{j,t}^2$					
$i$	$j$	$t$	$r$	$\Sigma_{r=1}^{k=4} r_{j,t}$	Topografisch merkteken		$I_{j,t,1}+I_{j,t,2}-100\delta$ [dmgon]	$\Sigma_{t=1}^{k=4} I_t$ [dmgon]	$\Sigma_{t=1}^{k=4} r_{j,t}$ [dmgon]	$\Sigma_{t=1}^{k=4} r_{j,t}^2$ [dmgon]					$\delta_i$				
1	1	1	1	1			-13,0	-13,0	-45,0	-132,0									
		2	2	2			-13,0	-13,0	-45,0	-132,0									
		3	3	3			-8,0	-8,0	-45,0	-132,0									
		4	4	4			-11,0	-11,0	-45,0	-132,0									
1	2	1	1	1			-12,0	-12,0	-47,0	-132,0									
		2	2	2			-16,0	-16,0	-47,0	-132,0									
		3	3	3			-8,0	-8,0	-47,0	-132,0									
		4	4	4			-11,0	-11,0	-47,0	-132,0									
1	3	1	1	1			-9,0	-9,0	-40,0	-110,0									
		2	2	2			-12,0	-12,0	-40,0	-110,0									
		3	3	3			-11,0	-11,0	-40,0	-110,0									
		4	4	4			-8,0	-8,0	-40,0	-110,0									
				$\delta_i$											-11,0				

### Bijlagen A.2 – Veldvalidate voor de verticale hoeken

Datum	21-Jun-06	Sessie	200	⊗		Berekeningen		$r_{jt}^2$	
Project	ISO 17123-3	Sessie	$i_{j,t,1}$	Topografisch merkteken	$i_{j,t,2}$	$l_{jt}$	$l_{jt}$	$r_{jt}$	
Weer	regen	$j$	$i_{j,t,1}$	Halve Cirkel	$i_{j,t,2}$	$l_{jt}$	$l_{jt}$	$r_{jt}$	
Temp	13°C	$j$	317.51240	$i_{j,t,1}$	82.48520	317.51360	317.51370	$r_{jt}$	
Wind	rukwind	$j$	307.16400	$i_{j,t,1}$	92.83320	307.16540	307.16530	$r_{jt}$	
$\sigma_{jt}$	0.0010	$j$	298.96000	$i_{j,t,1}$	101.03780	298.96110	298.96097	$r_{jt}$	
$\sigma_{jt}$	0.0010	$j$	291.35080	$i_{j,t,1}$	108.64740	291.35170	291.35153	$r_{jt}$	
Eenheid	gon	$j$		Topografisch merkteken				$r_{jt}$	
Campagne	$i$	$j$	$\Sigma_{t=1}^{k=4} r_{jt}$	Topografisch merkteken				$r_{jt}$	
2	1	1	317.51260	82.48500	317.51380	317.51370	1.00	1.00	1.00
2	1	2	307.16560	92.83360	307.16500	307.16550	-3.00	-1.00	9.00
2	1	3	298.95980	101.03840	298.96070	298.96110	-2.67	-2.67	7.11
2	1	4	291.35040	108.64760	291.35140	291.35150	-1.33	-1.33	1.78
		$\Sigma_{t=1}^{k=4} r_{jt}$					-6.00	-6.00	18.89
2	2	1	317.51260	82.48520	317.51370	317.51370	.00	.00	.00
2	2	2	307.16480	92.83380	307.16550	307.16550	2.00	2.00	4.00
2	2	3	298.96020	101.03800	298.96110	298.96110	1.33	1.33	1.78
2	2	4	291.35060	108.64760	291.35150	291.35150	-3.33	-3.33	.11
		$\Sigma_{t=1}^{k=4} r_{jt}$					3.00	3.00	5.89
		$\Sigma_{j=1}^m \Sigma_{t=1}^k r_{jt}$					.00	.00	
		$\delta_j$				$\frac{l_{j,t,1}+l_{j,t,2}-100\theta}{2}$		$\Sigma_{t=1}^{m=3} r_{jt}$	$\Sigma_{t=1}^{m=3} r_{jt}^2$
	1	1				-12.0			
	1	2				-14.0			
	1	3				-11.0			
	1	4				-9.0			
	2	1				-12.0	-45.0		
	2	2				-14.0			
	2	3				-9.0			
	2	4				-10.0			
	3	1				-11.0			
	3	2				-7.0			
	3	3				-9.0			
	3	4				-9.0			
		$\delta_j$							-10.6
		$\delta_j$						$\Sigma_{t=1}^{m=3} r_{jt}$	$\Sigma_{t=1}^{m=3} r_{jt}^2$
									3.96

## Bijlagen A.2 – Veldvalide voor de verticale hoeken

Datum	21-Jun-06	Sessie	200	Topografisch merkteken		Berekeningen				
Project	ISO 17123-3	$j$	$\delta_j$	$i_{j,t,1}$	$i_{j,t,2}$	$i_{j,t}$	$i_t$			
Weer	regen			[gon]	[gon]	[gon]	[gon]			
Temp	13°C									
Wind	rukwind									
$\sigma_{v_i}$	0,0010									
$\sigma_{v_j}$	0,0010									
Eenheid	gon									
Campagne	$i$	$j$	$t$	$\Sigma_{t=1}^{k=4} r_{j,t}$						
3	1	1	1	317,51220	82,48560	317,51330	317,51353	317,51353	-2,33	$r_{j,t}^2$
			2	307,16460	92,83380	307,16540	307,16547	-67	5,44	[dmgon]
			3	298,96000	101,03840	298,96080	298,96087	-67	,44	
			4	291,35060	108,64780	291,35140	291,35140	,00	,00	
			$\delta_i$					-3,67	6,33	
3	2	1	1	317,51260	82,48520	317,51370	317,51370	1,67	2,78	
			2	307,16440	92,83380	307,16530	307,16530	-1,67	2,78	
			3	298,95980	101,03820	298,96080	298,96080	-67	,44	
			4	291,35040	108,64760	291,35140	291,35140	,00	,00	
			$\delta_i$					-67	6,00	
3	3	1	1	317,51240	82,48520	317,51360	317,51360	,67	,44	
			2	307,16480	92,83340	307,16570	307,16570	2,33	5,44	
			3	298,96020	101,03820	298,96100	298,96100	1,33	1,78	
			4	291,35020	108,64740	291,35140	291,35140	,00	,00	
			$\delta_i$					4,33	7,67	
			$\delta_i$					,00	,00	

Campagne	$i$	Sessie	$j$	$t$	Topografisch merkteken		$\Sigma_{t=1}^{k=4} r_{j,t}$	$\Sigma_{t=1}^{k=4} \frac{r_{j,t}}{2} - 100\delta_j$	$\Sigma_{t=1}^{m=3} \frac{r_{j,t}}{2} - 100\delta_j$
					[gon]	[dmgon]	[dmgon]	[dmgon]	[dmgon]
3	1	1	1	1	-11,0	-35,0	-35,0	-116,0	
			2	2	-8,0				
			3	3	-8,0				
			4	4	-8,0				
3	2	1	1	1	-11,0	-40,0	-40,0		
			2	2	-9,0				
			3	3	-10,0				
			4	4	-10,0				
3	3	1	1	1	-12,0	-41,0	-41,0		
			2	2	-9,0				
			3	3	-8,0				
			4	4	-12,0				
			$\delta_i$	$\delta_i$					-9,7

## Bijlagen A.2 – Veldvalidatie voor de verticale hoeken

Datum	21-Jun-06								
Project	ISO.17123-3								
Weer	regen								
Temp	13°C								
Wind	rukwind								
$\sigma_h$	0,0010								
$\sigma_v$	0,0010								
Eenheid	gon								
Campagne	Sessie								
$i$	$j$	$t$	Topografisch merkteken		Berekeningen		$r_{j,t}^2$		
			$i_{j,t,1}$	$i_{j,t,2}$	$I_{j,t}$	$I_{j,t}$	$I_{j,t}$	$r_{j,t}$	
			[gon]	[gon]	[gon]	[gon]	[dmgon]	[dmgon]	
4	1	1	317,51220	82,48540	317,51340	317,51340	317,51353	-1,33	1,78
		2	307,16460	92,83360	307,16550	307,16550	307,16550	0,00	0,00
		3	298,96020	101,03800	298,96110	298,96110	298,83423	1,268,67	1,609,515,11
		4	291,35060	108,64720	291,35170	291,35170	291,35160	1,00	1,00
		$\sum_{t=1}^{k=4} r_{j,t}$					1,268,33	1,609,517,89	
4	2	1	317,51260	82,48520	317,51370	317,51370	317,51370	1,67	2,78
		2	307,16420	92,83340	307,16540	307,16540	307,16540	-1,00	1,00
		3	298,99960	101,03840	298,78060	298,78060	298,78060	-536,33	287,653,44
		4	291,35060	108,64720	291,35170	291,35170	291,35170	1,00	1,00
		$\sum_{t=1}^{k=4} r_{j,t}$					-534,67	287,658,22	
4	3	1	317,51220	82,48520	317,51350	317,51350	317,51350	-33	11
		2	307,16440	92,83320	307,16560	307,16560	307,16560	1,00	1,00
		3	298,56000	101,03800	298,76100	298,76100	298,76100	-732,33	536,312,11
		4	291,35020	108,64740	291,35140	291,35140	291,35140	-2,00	4,00
		$\sum_{t=1}^{k=4} r_{j,t}$					-733,67	536,317,22	
		$\sum_{j=1}^m \sum_{t=1}^k r_{j,t}$					40		
		$s_i$							1,103,06
Campagne	Sessie	$t$	Topografisch merkteken		$\frac{I_{j,t,1}+I_{j,t,2}-100g}{2}$		$\sum_{t=1}^{k=4}$	$\sum_{j=1}^{m=3}$	
$i$	$j$				[dmgon]		[dmgon]	[dmgon]	
4	1	1			-12,0	-12,0	-41,0	-3932,0	
		2			-9,0	-9,0			
		3			-9,0	-9,0			
		4			-11,0	-11,0			
4	2	1			-11,0	-11,0	-1844,0		
		2			-12,0	-12,0			
		3			-1810,0	-1810,0			
		4			-11,0	-11,0			
4	3	1			-13,0	-13,0	-2047,0		
		2			-12,0	-12,0			
		3			-2010,0	-2010,0			
		4			-12,0	-12,0			
		$\delta_i$						-327,7	



<b>Datum</b>	29 Juni 2006																		
<b>Project</b>	ISO 17123-3																		
<b>Weer</b>	zonnig																		
<b>Temp</b>	26°C																		
<b>Wind</b>	weinig																		
<b>Eenheid</b>	gon																		
$\sigma_h$	0.0010	g																	
$\sigma_v$	0.0010	g																	
<b>Campagne</b>	$s_i$	<b>Crit 1:</b> $s_i \leq \sigma_h$	<b>Crit 2:</b> $s \leq \tilde{s}$																
	[dmgon]	[dmgon]																	
1	3.16	12.00	1.00	.80	1.00	.00	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
2	3.96	12.00	1.25	1.00	1.25	.00	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
3	3.16	12.00	1.00	.80	1.00	.00	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
4	1103.06	12.00	348.82	278.68	348.82	1.00	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK	NOK
$\bar{s}$	<b>3.45</b>																		
<b>Indexfout</b>																			
<b>Campagne</b>	$\delta_i$	<b>Crit 1:</b> $\delta_i \leq s \times 0.3$																	
	[dmgon]	[dmgon]																	
1	-11.00	3.00	NOK																
2	-10.58	3.00	NOK																
3	-9.67	3.00	NOK																
4	-327.67	3.00	NOK																
$\ \bar{\delta}\ $	<b>10.43</b>																		

### A.2.2 Volledige meetcampagne van 23 november 2006

De rekenbladen op de volgende bladzijden geven een overzicht van de metingen en de berekeningen voor de volledige methode voor iedere sessie  $i = 1, \dots, n = 4$ .

Het eerste criterium verworpt de tweede meetsessie, zodat de experimentele verticale standaardafwijking  $s_v$ , bepaald door de meetsessies 1, 3 en 4 gegeven wordt door  $s_v = 9,5^{\text{cc}} = 000^{\text{g}}0009.5$ . Ze voldoet juist aan de standaardafwijking opgelegd door de fabrikant.

In tegenstelling tot de conclusie uit het eerste criterium is de tweede meetsessie echter representatief voor de bepaling van de experimentele verticale standaardafwijking, ze behoort tot dezelfde familie als de andere drie meetsessies.

Voor de bepaling van de verticale inclinatiefout  $\delta_i$  mogen we geen rekening houden met de derde meetsessie. De experimentele waarde wordt bepaald door  $\delta_i = 1,8^{\text{cc}} = 000^{\text{g}}0001.8$ .

## Bijlagen A.2 – Veldvalide voor de verticale hoeken

Datum	23-Nov-06					
Project	ISO 17123-3					
Weer	regen					
Temp	13°C					
Wind	rukwind					
$\sigma_h$	0.0010 g					
$\sigma_v$	0.0010 g					
Eenheid	gon					
<b>Sessie</b>		<b>Topografisch merkteken</b>		<b>Berekeningen</b>		
<i>i</i>	<i>j</i>	<i>t</i>	<i>l<sub>i,j,t</sub></i>	<i>l<sub>i</sub></i>	<i>r<sub>i,t</sub></i>	<i>r<sub>i,t</sub><sup>2</sup></i>
			[gon]	[gon]	[dmgon]	[dmgon]
1	1	1	291.19960	291.20110	-1.00	1.00
		2	298.93380	298.93480	-1.33	1.78
		3	307.26960	307.26990	.67	.44
		4	315.92920	315.92920	5.33	28.44
		$\sum_{t=1}^k r_{i,t}$	84.07080	315.92867	3.67	31.67
1	2	1	291.20040	291.20070	-4.00	16.00
		2	298.93480	298.93530	3.67	13.44
		3	307.26980	307.26950	-3.33	11.11
		4	315.92900	315.92880	1.33	1.78
		$\sum_{t=1}^k r_{i,t}$	84.07140	-2.33	42.33	
1	3	1	291.20060	291.20160	5.00	25.00
		2	298.93500	298.93470	-2.33	5.44
		3	307.27040	307.27010	2.67	7.11
		4	315.92900	315.92800	-6.67	44.44
		$\sum_{t=1}^k r_{i,t}$	84.07300	-1.33	82.00	
		$\sum_{j=1}^m \sum_{t=1}^k r_{i,t}$	<i>s<sub>i</sub></i>	<b>.00</b>	<b>.00</b>	<b>8.83</b>
<b>Sessie</b>		<b>Topografisch merkteken</b>		<b>Berekeningen</b>		
<i>i</i>	<i>j</i>	<i>t</i>	<i>l<sub>i,j,t</sub></i>	$\frac{l_{i,t,1}+l_{i,t,2}-100g}{2}$	$\sum_{j=1}^m$	$\sum_{j=1}^m$
			[dmgon]	[dmgon]	[dmgon]	[dmgon]
1	1	1	-14.0	-27.0	-24.0	
		2	-10.0	-3.0		
		3	-3.0			
		4	0.0			
1	2	1	-3.0	-3.0		
		2	-5.0			
		3	3.0			
		4	2.0			
1	3	1	-10.0	6.0		
		2	3.0			
		3	3.0			
		4	10.0			
		$\delta_i$			<b>-2.0</b>	

## Bijlagen A.2 – Veldvalidate voor de verticale hoeken

Datum		23-Nov-06							
Project		ISO 17123-3							
Weer		regen							
Temp		13°C							
Wind		rukwind							
$\sigma_{fi}$		0.0010 g							
$\sigma_v$		0.0010 g							
Eenheid		gon							
Sessie		Set							
$i$	$j$	Halve Cirkel		200 g		Berekeningen			
		Topografisch merkteken		$I_{j,i,1}$	$I_{j,i,2}$	$I_{j,i}$	$I_i$	$r_{j,i}$	$r_{j,i}^2$
$i$	$j$	$t$	$r_{j,i,t}$	[gon]	[gon]	[gon]	[gon]	[dmgon]	[dmgon]
2	1	1	$\Sigma_{t=1}^k r_{j,i,t}$	291.20120	108.79860	291.20130	291.20157	-2.67	7.11
		2		298.93380	101.06620	298.93380	298.93410	-3.00	9.00
		3		307.26980	92.73180	307.26900	307.26960	-6.00	36.00
		4		315.92840	84.07320	315.92760	315.92820	-6.00	36.00
			$\Sigma_{t=1}^k r_{j,i,t}$					-17.67	88.11
2	2	1	$\Sigma_{t=1}^k r_{j,i,t}$	291.20140	108.79860	291.20140	291.20140	-1.67	2.78
		2		298.93260	101.06620	298.93320	298.93320	-9.00	81.00
		3		307.26980	92.73120	307.26930	307.26930	-3.00	9.00
		4		315.92820	84.07220	315.92800	315.92800	-2.00	4.00
			$\Sigma_{t=1}^k r_{j,i,t}$					-15.67	96.78
2	3	1	$\Sigma_{t=1}^k r_{j,i,t}$	291.20160	108.79760	291.20200	291.20200	4.33	18.78
		2		298.93540	101.06480	298.93530	298.93530	12.00	144.00
		3		307.27100	92.73000	307.27050	307.27050	9.00	81.00
		4		315.92940	84.07140	315.92900	315.92900	8.00	64.00
			$\Sigma_{t=1}^k r_{j,i,t}$					33.33	307.78
			$\Sigma_{t=1}^k \Sigma_{j=1}^m r_{j,i,t}$					<b>.400</b>	<b>15.70</b>
$i$	$j$	$t$	$s_i$	Topografisch merkteken		$\frac{I_{j,i,1}+I_{j,i,2}-100g}{2}$		$\Sigma_{j=1}^m r_{j,i}$	$\Sigma_{j=1}^m r_{j,i}^2$
				[dmgon]	[dmgon]	[dmgon]	[dmgon]		
2	1	1		-1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		2		8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
		3		8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
		4		8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
2	2	1		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		2		-6.0	-6.0	-6.0	-6.0	-6.0	-6.0
		3		5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
		4		2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
2	3	1		-4.0	-4.0	-4.0	-4.0	-4.0	-4.0
		2		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
		3		5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
		4		4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
			$\delta_i$						<b>1.8</b>

Datum	23-Nov-06								
Project	ISO 17123-3								
Weer	regen								
Temp	13°C								
Wind	rukwind								
$\sigma_h$	0.0010 g								
$\sigma_v$	0.0010 g								
Eenheid	gon								
<b>Sessie</b>		<b>Topografisch merkteken</b>		<b>Berekeningen</b>		<b>Berekeningen</b>			
<i>i</i>	Set	<i>t</i>	<i>j</i>	$I_{j,t,1}$ [gon]	$I_{j,t,2}$ [gon]	$I_{j,t}$ [gon]	$I_t$ [gon]	$r_{j,t}$ [dmgon]	$r_{j,t}^2$ [dmgon]
3	1	1	1	291.20100	108.79820	291.20140	291.20150	-1.00	1.00
		2	1	298.93300	101.06500	298.93400	298.93450	-5.00	25.00
		3	1	307.27040	92.73220	307.26910	307.26907	.33	.11
		4	1	315.92820	84.07220	315.92850	315.92840	1.00	1.00
		$\Sigma_{t=1}^k r_{j,t}$						-4.67	27.11
3	2	1	2	291.20220	108.79840	291.20190		4.00	16.00
		2	2	298.93580	101.06580	298.93500		5.00	25.00
		3	2	307.27040	92.73120	307.26960		5.33	28.44
		4	2	315.92840	84.07160	315.92840		.00	.00
		$\Sigma_{t=1}^k r_{j,t}$						14.33	69.44
3	3	1	3	291.20140	108.79900	291.20120		-3.00	9.00
		2	3	298.93500	101.06600	298.93450		.00	.00
		3	3	307.27000	92.73300	307.26850		-5.67	32.11
		4	3	315.92880	84.07220	315.92830		-1.00	1.00
		$\Sigma_{t=1}^k r_{j,t}$						-9.67	42.11
		$\Sigma_{j=1}^m r_{j,t}$						.00	
		$\delta_i$							<b>8.33</b>
<b>Sessie</b>		<b>Topografisch merkteken</b>		$\frac{I_{j,t,1}+I_{j,t,2}-100g}{2}$ [dmgon]		$\Sigma_{t=1}^k$ [dmgon]	$\Sigma_{j=1}^m$ [dmgon]		
<i>i</i>	Set	<i>t</i>	<i>j</i>						
3	1	1	1	-4.0		6.0	52.0		
		2	1	-10.0					
		3	1	13.0					
		4	1	7.0					
3	2	1	2	3.0	19.0				
		2	2	8.0					
		3	2	8.0					
		4	2	0.0					
3	3	1	3	2.0	27.0				
		2	3	5.0					
		3	3	15.0					
		4	3	5.0					
		$\delta_i$							<b>4.3</b>

Datum	23-Nov-06										
Project	ISO 17123-3										
Weer	regen										
Temp	13°C										
Wind	rukwind										
$\sigma_{fi}$	0.0010 g										
$\sigma_j$	0.0010 g										
Eenheid	gon										
Sessie	$i$	Set	$j$	$t$	Halve Cirkel	$I_{j,t,1}$	$I_{j,t,2}$	$I_{j,t}$	Berekeningen	$r_{j,t}$	$r_{j,t}^2$
					Topografisch merkteken	[gon]	[gon]	[gon]	$I_t$	[dmgon]	[dmgon]
	4	1	1	1	291.20200	108.79800	291.20200	291.20143	291.20143	5.67	32.11
			2	2	298.93380	101.06580	298.93400	298.93387	298.93387	1.33	1.78
			3	3	307.26820	92.73140	307.26840	307.26900	307.26900	-6.00	36.00
			4	4	315.92820	84.07370	315.92725	315.92812	315.92812	-8.67	75.11
				$\sum_{t=1}^k r_{j,t}$						-7.67	145.00
	4	2	1	1	291.20120	108.79900	291.20110	291.20110	291.20110	-3.33	11.11
			2	2	298.93300	101.06500	298.93400	298.93400	298.93400	1.33	1.78
			3	3	307.27000	92.73200	307.26900	307.26900	307.26900	0.00	0.00
			4	4	315.92860	84.07180	315.92840	315.92840	315.92840	2.83	8.03
				$\sum_{t=1}^k r_{j,t}$						.83	20.92
	4	3	1	1	291.20140	108.79900	291.20120	291.20120	291.20120	-2.33	5.44
			2	2	298.93400	101.06680	298.93360	298.93360	298.93360	-2.67	7.11
			3	3	307.26980	92.73060	307.26960	307.26960	307.26960	6.00	36.00
			4	4	315.92900	84.07160	315.92870	315.92870	315.92870	5.83	34.03
				$\sum_{t=1}^k r_{j,t}$						6.83	82.58
				$\sum_{j=1}^m \sum_{t=1}^k r_{j,t}$						.400	
				$s_i$							11.15

Sessie	$i$	Set	$j$	$t$	Topografisch merkteken	$\frac{I_{j,t,1}+I_{j,t,2}-100g}{2}$	$\sum_{t=1}^k r_{j,t}$	$\sum_{j=1}^m \sum_{t=1}^k r_{j,t}$
						[dmgon]	[dmgon]	[dmgon]
	4	1	1	1		0.0	5.5	19.5
			2	2		-2.0		
			3	3		-2.0		
			4	4		9.5		
	4	2	1	1		1.0	3.0	
			2	2		-10.0		
			3	3		10.0		
			4	4		2.0		
	4	3	1	1		2.0	11.0	
			2	2		4.0		
			3	3		2.0		
			4	4		3.0		
				$\delta_i$				1.6

<b>Datum</b>	23-Nov-06								
<b>Project</b>	ISO 17123-3								
<b>Weer</b>	regen								
<b>Temp</b>	13°C								
<b>Wind</b>	rukwind								
$\sigma_h$	0.0010								
$\sigma_v$	0.0010	g							
<b>Meetsessie</b>	$s_i$								<b>Crit 2: <math>s = \bar{s}</math></b>
	[dmgon]								
1	8.83	12.00	<b>OK</b>	1.00	.56	1.06	.79	<b>OK</b>	<b>OK</b>
2	15.70	12.00	<b>NOK</b>	1.78	1.00	1.88	1.41	<b>OK</b>	<b>OK</b>
3	8.33	12.00	<b>OK</b>	.94	.53	1.00	.75	<b>OK</b>	<b>OK</b>
4	11.15	12.00	<b>OK</b>	1.26	.71	1.34	1.00	<b>OK</b>	<b>OK</b>
$\bar{s}$	<b>13.14</b>								
<b>Indexfout</b>	$\delta_i$								
									<b>Crit 1: <math>\delta_i \leq s \times 0.3</math></b>
1	-2.00	3.94	<b>OK</b>						
2	1.83	3.94	<b>OK</b>						
3	4.33	3.94	<b>NOK</b>						
4	1.62	3.94	<b>OK</b>						
$\ \bar{\delta}\ $	<b>1.83</b>								

### A.2.3 Combinatie van de beide meetcampagnes

Wanneer beide meetcampagnes samengevoegd worden, is de experimentele standaardafwijking voor de TC805 bepaald door de statistische combinatie van 7 meetsessies en wordt ze gegeven door :

$$s = \sqrt{\frac{s_1^2 \times 4 + s_2^2 \times 3}{7}} = 7,6^{\text{cc}} = 000^{\text{g}}00^{\text{c}}07,6^{\text{cc}}$$

met  $s_1$  en  $s_2$  de gemiddelde waarden voor de experimentele standaardafwijking bekomen tijdens de twee meetcampagnes.



## A.3 Veldvalidatie van de afstandsmeter

### A.3.1 Volledige meetcampagne van 21 juni 2006 en 28 november 2006

De rekenbladen op de volgende bladzijden geven een overzicht van de metingen en de berekeningen voor de volledige testprocedure toegepast op de elektronische afstandmeter van een totaalstation TC605.

De experimentele standaardafwijkingen  $s_{100}$  voor de respectieve meetcampagnes bedragen (a)  $s_{100} = 9,4$  mm voor de campagne van 21 juni 2006, en (b)  $s_{100} = 62,8$  mm voor de campagne van 28 november 2006. Dit grote verschil kan grotendeels verklaard worden door de slechte weeromstandigheden tijdens de meetcampagne van 28 november 2006.

De statistische analyse toont dat de bekomen experimentele standaardafwijking  $s_{100}$  voor beide volledige meetsessies niet voldoet aan het eerste criterium. Hieruit dient te worden geconcludeerd dat de elektronische afstandmeter buiten de toleranties van de fabrikant valt en de bekomen afstanden niet gebruikt kunnen worden.

Onderzoek van het tweede toont eveneens dat de beide volledige meetcampagnes niet tot dezelfde steekproef behoren. Dit is waarschijnlijk te wijten aan de slechte weersomstandigheden tijdens de meetsessie van 28 november 2006.

De experimentele nulpuntscorrectie  $\delta$  voldoet niet aan het derde criterium zodat de nulpuntscorrectie voor het gebruikte prisma niet gelijk aan 0 gesteld kan worden.

Bijlagen A.3 – Veldvalidate voor de elektronische afstandmeter

Datum 21-Jun-06  
 Project ISO 17123-3  
 Weer mooi weer  
 Temp 21°C-26°C  
 Wind geen  
 Eenheid gon  
 $\sigma_{100}$  2 mm + 2ppm

<i>j</i>	<i>p</i>	<i>q</i>	$D_{p,q}$	$a_p$	$b_p$	$b_p - b_q$	$-\frac{7+2(q-p)}{7} \times \delta$	$r_{p,q}$ [mm]	$r_{p,q}^2$ [mm <sup>2</sup> ]
1	1	2	50.982		309.4430	50.9567	0.0078	-17.5	305.2
2	1	3	162.902			162.8857	0.0047	-11.6	134.5
3	1	4	335.956			335.9546	0.0016	0.1	0.0
4	1	5	478.431			478.4399	-0.0016	7.3	53.2
5	1	6	558.806			558.8220	-0.0047	11.3	127.9
6	1	7	579.024			579.0421	-0.0078	10.3	106.6
7	2	3	111.932		258.4863	111.9290	0.0078	4.8	23.2
8	2	4	285.002			284.9979	0.0047	0.5	0.3
9	2	5	427.488			427.4831	0.0016	-3.3	10.8
10	2	6	507.872			507.8653	-0.0016	-8.3	68.5
11	2	7	528.092			528.0854	-0.0047	-11.3	126.8
12	3	4	173.071		146.5573	173.0689	0.0078	5.7	32.2
13	3	5	315.559			315.5541	0.0047	-0.2	0.0
14	3	6	395.942			395.9363	0.0016	-4.2	17.2
15	3	7	416.163			416.1564	-0.0016	-8.1	66.2
16	4	5	142.487	-0.0110	-26.5116	142.4853	0.0078	6.1	37.2
17	4	6	222.870			222.8674	0.0047	2.1	4.5
18	4	7	243.091			243.0876	0.0016	-1.9	3.5
19	5	6	80.383	-0.0390	-168.9969	80.3821	0.0078	7.0	48.4
20	5	7	100.604			100.6023	0.0047	3.0	8.9
21	6	7	20.220	-0.0510	-249.3790	20.2201	0.0078	8.0	63.3
					-269.5991			0.0	1238.6
				$\delta =$	-0.0109			$s_{100} =$	9.4

Bijlagen A.3 – Veldvalidatie voor de elektronische afstandmeter

**Datum** 28-Nov-06  
**Project** ISO 17123-3  
**Weer** slecht regenachtig weer  
**Temp** 15°C  
**Wind** geen  
**Eenheid** gon  
 $\sigma_{100}$  2 mm + 2ppm

<i>j</i>	<i>p</i>	<i>q</i>	$D_{p,q}$	$a_p$	$b_p$	$b_p - b_q$	$-\frac{7+2(q-p)}{7} \times \delta$	$r_{p,q}$ [mm]	$r_{p,q}^2$ [mm <sup>2</sup> ]
1	1	2	50.817		309.3254	50.8576	-0.0300	10.6	111.8
2	1	3	162.739			162.6963	-0.0180	-60.7	3686.2
3	1	4	335.837			335.8379	-0.0060	-5.1	26.4
4	1	5	478.298			478.2983	0.0060	6.3	39.5
5	1	6	558.658			558.6589	0.0180	18.9	355.6
6	1	7	578.929			578.9291	0.0300	30.1	908.6
7	2	3	111.625		258.4679	111.8387	-0.0300	183.7	33750.9
8	2	4	285.024			284.9803	-0.0180	-61.7	3808.7
9	2	5	427.484			427.4407	-0.0060	-49.3	2429.1
10	2	6	507.845			507.8013	0.0060	-37.7	1422.4
11	2	7	528.114			528.0716	0.0180	-24.4	596.8
12	3	4	173.099		146.6291	173.1416	-0.0300	12.6	158.0
13	3	5	315.559			315.6020	-0.0180	25.0	625.0
14	3	6	395.920			395.9626	-0.0060	36.6	1337.5
15	3	7	416.190			416.2329	0.0060	48.9	2387.0
16	4	5	142.461	0.0010	-26.5124	142.4604	-0.0300	-30.6	934.6
17	4	6	222.821			222.8210	-0.0180	-18.0	324.0
18	4	7	243.091			243.0913	-0.0060	-5.7	32.7
19	5	6	80.361	-0.0020	-168.9729	80.3606	-0.0300	-30.4	925.9
20	5	7	100.631			100.6309	-0.0180	-18.1	329.2
21	6	7	20.271	0.2950	-249.3334	20.2703	-0.0300	-30.7	943.4
					-269.6037			0.0	55133.1
			$\delta =$	0.0420				$s_{100} =$	62.8

<b>Datum</b>	21 Jun ? 28 nov 2006			
<b>Project</b>	ISO 17123-3			
<b>Eenheid</b>	gon			
$\sigma_{100}$	2 mm + 2ppm			
$\delta_0$	0			
$\sigma_{\delta_0}$	1.5			
<b>Meetsessie</b>		$s_i$		
21/06/06		9.4	2.6	<b>Crit 1:</b> $s_{100} \leq 1,3 \times \sigma_{100}$ <b>NOK</b>
28/11/06		62.8	2.6	<b>NOK</b>
			0.022	<b>Crit. 2:</b> $0,34 \leq \frac{s_{100}^2}{s_{100}^2} \leq 2,98$ <b>NOK</b>
			9.4	<b>Crit 3:</b> $ \delta - \delta_0  \leq \frac{s}{\sqrt{5}} \times 2,14$ <b>NOK</b>
			62.8	<b>1.44</b> <b>NOK</b>
				<b>1.44</b> <b>NOK</b>

## Bijlage B

# Veldvalidatie van GPS apparatuur

### B.1 Meetopzet

Onder 3.6 werd het ontwerp van ISO-norm 18723-8 voor GPS-apparatuur toegelicht. Deze norm werd voor de veldvalidatie toegepast op 5 soorten GPS- apparatuur :

1. Monofrequente Code-meting (C/A-code) met naverwerking (LEICA SR20 ontvanger),
2. Monofrequente Fase-meting (L1) met naverwerking (LEICA SR20 ontvanger),
3. Bifrequente Fase-meting (L1/L2) met naverwerking (LEICA 9500 ontvanger),
4. RTK-meting (L1/L2) met (LEICA 9500 ontvanger) met eigen modem,
5. RTK-FLEPOS meting (TRIMBLE S8 ontvanger).

Telkens wordt, voor elk van de 5 soorten ontvangers, nagegaan of ze voldoen aan de specificaties van de fabrikant wat betreft herhaalbaarheid van de meting.

Herhalen we kort dat volgens het ontwerp van de ISO-norm :

- elke meting bestaat uit 3 meetseries,
- elke meetserie bestaat uit 5 meetsessies,
- elke meetsessie of meetset bestaat uit het meten op 2 merktekens, de punten 502 en 61.

De horizontale afstand tussen beide punten werd met een totaalstation bepaald op 144,970m en het hoogteverschil werd met een nauwkeurig waterpastoestel bepaald op 0,632m, in beide gevallen met een nauwkeurigheid beter dan 3mm zoals de norm oplegt.

Behalve met de FLEPOS-metingen, werd voor alle metingen gebruik gemaakt van een eigen referentiestation opgesteld in de onmiddellijke omgeving (basislijn kleiner dan 100m). Aan het referentiepunt werden vaste coördinaten gegeven die werden bepaald door vroegere metingen ten opzichte van referentiestations van BEREf. De nauwkeurigheid van deze coördinaten is niet kritisch omdat de ISO

norm de herhaalbaarheid van de metingen op rover-punten nagaat en deze worden in eerste orde niet beïnvloed door de absolute waarde van de coördinaten van het referentiepunt.

De gegevens werden in post processing verwerkt in Leica Geo Office (LGO). LGO berekent code- of fase-oplossingen bekomen naargelang de meettijd en de instellingen binnen de software. De resultaten worden door LGO getransformeerd naar het Belgisch geodetische referenties, de Lambert projectie van 1972 (North *N* en East *E* coördinaat in m) en de ortometrische hoogte *H* (in m). Deze coördinaten worden geëxporteerd naar Excel waar de berekeningen volgens het ontwerp van ISO-norm 17123-8 worden uitgevoerd.

## **B.2 Monofrequente Code-meting (C/A) met naverwerking uitgewerkt conform het voorstel tot ISO-norm**

De ontvanger die gebruikt werd voor de monofrequente code-meting is de LEICA SR20. De theoretische nauwkeurigheid, zoals vermeld in de technische specificaties van de Leica SR20, bedraagt in planimetrie  $\sigma_P = 0,300\text{m}$  en in altimetrie  $\sigma_H = 0,600\text{m}$ .

Voor een betere nauwkeurigheid werd geen gebruik gemaakt van de interne antenne doch van een externe antenne LEICA AT502 die op statief boven het meetpunt kon worden opgesteld. De SR20 is een mono-frequente ontvanger, die zowel in statische als kinematische mode kan werken. Er wordt in principe gewerkt in post-processing, waarbij de gegevens achteraf worden berekend. Het volledige systeem is flexibel. De SR20 kan als referentiestation worden opgesteld, als een statische ontvanger, als kinematische ontvanger, als GIS-ontvanger en als navigator worden ingezet om objecten te kunnen lokaliseren.

De bekomen coördinaten voor de merktekens 502 en 61 zijn samengevat in tabel B.1.

<b>Punt</b>	<b>Nr</b>	<b>E [m]</b>	<b>N [m]</b>	<b>H [m]</b>
502	1a	103 777,707	190 589,854	9,578
	1b	103 778,296	190 591,121	10,149
	1c	103 778,189	190 591,275	8,864
	1d	103 778,505	190 590,685	11,356
	1e	103 778,387	190 590,765	10,013
	2a	103 778,513	190 591,540	10,451
	2b	103 778,558	190 590,612	11,557
	2c	103 778,247	190 591,485	10,288
	2d	103 777,949	190 591,031	10,910
	2e	103 778,557	190 590,806	10,324
	3a	103 778,262	190 591,284	10,412
	3b	103 778,708	190 590,847	11,688
	3c	103 778,057	190 591,156	9,797
	3d	103 778,550	190 590,667	10,941
	3e	103 777,935	190 590,860	9,883

<b>Punt</b>	<b>Nr</b>	<b>E [m]</b>	<b>N [m]</b>	<b>H [m]</b>
61	1a	103 915,593	190 543,682	9,523
	1b	103 915,389	190 544,506	9,461
	1c	103 915,527	190 543,929	9,757
	1d	103 915,674	190 543,624	10,192
	1e	103 915,248	190 543,825	10,135
	2a	103 915,600	190 544,312	8,985
	2b	103 915,626	190 543,943	10,776
	2c	103 915,533	190 544,596	9,902
	2d	103 915,230	190 544,440	10,864
	2e	103 915,386	190 544,422	10,014
	3a	103 915,516	190 544,452	10,472
	3b	103 915,924	190 544,342	12,768
	3c	103 915,722	190 543,723	10,339
	3d	103 915,693	190 544,046	10,502
	3e	103 915,178	190 544,038	9,853

**Tabel B.1:** Resultaat van de code-meting op merktekens 502 en 61

Vooraf wordt een controle op uitschieters van de metingen uitgevoerd. Daarna worden de statistische waarden berekend.

**Controle van de resultaten**

De horizontale afstand tussen beide punten werd met totaalstation bepaald op  $\hat{D} = 144,970$  m en het hoogteverschil werd met waterpastoestel bepaald op  $\widehat{\Delta H} = 0,632$  m. Dit wordt overeenkomstig de norm vergeleken met de berekende horizontale afstand en het berekend hoogteverschil uit de GPS code coördinaten. Dit is in se een iteratief proces omdat hiervoor eerst de standaardafwijking in planimetrie en altimetrie moet worden berekend, die op zijn beurt beïnvloed wordt door eventuele uitschieters.

Tabel B.2 geeft een overzicht van de horizontale afstanden en de hoogteverschillen bekomen door de C/A metingen alsook de afwijking ervan ten opzichte van het gemeten afstandsverschil en hoogteverschil.

Afstandsverschil [m]		Afwijking [m]		Hoogteverschil [m]		Afwijking [m]	
$D_{1,1}$	145,411	$eD_{1,1}$	0,441	$H_{1,1}$	-0,055	$eH_{1,1}$	0,577
$D_{1,2}$	144,801	$eD_{1,2}$	-0,169	$H_{1,2}$	-0,689	$eH_{1,2}$	-0,057
$D_{1,3}$	145,270	$eD_{1,3}$	0,300	$H_{1,3}$	0,894	$eH_{1,3}$	1,526
$D_{1,4}$	145,018	$eD_{1,4}$	0,048	$H_{1,4}$	-1,164	$eH_{1,4}$	-0,532
$D_{1,5}$	144,688	$eD_{1,5}$	-0,282	$H_{1,5}$	0,122	$eH_{1,5}$	0,754
$D_{2,1}$	144,994	$eD_{2,1}$	0,025	$H_{2,1}$	-1,466	$eH_{2,1}$	-0,834
$D_{2,2}$	144,795	$eD_{2,2}$	-0,175	$H_{2,2}$	-0,781	$eH_{2,2}$	-0,149
$D_{2,3}$	145,073	$eD_{2,3}$	0,103	$H_{2,3}$	-0,387	$eH_{2,3}$	0,245
$D_{2,4}$	144,971	$eD_{2,4}$	0,002	$H_{2,4}$	-0,047	$eH_{2,4}$	0,585
$D_{2,5}$	144,478	$eD_{2,5}$	-0,492	$H_{2,5}$	-0,311	$eH_{2,5}$	0,321
$D_{3,1}$	145,024	$eD_{3,1}$	0,054	$H_{3,1}$	0,061	$eH_{3,1}$	0,693
$D_{3,2}$	144,882	$eD_{3,2}$	-0,088	$H_{3,2}$	1,080	$eH_{3,2}$	1,712
$D_{3,3}$	145,608	$eD_{3,3}$	0,639	$H_{3,3}$	0,542	$eH_{3,3}$	1,173
$D_{3,4}$	144,851	$eD_{3,4}$	-0,119	$H_{3,4}$	-0,439	$eH_{3,4}$	0,193
$D_{3,5}$	145,010	$eD_{3,5}$	0,040	$H_{3,5}$	-0,030	$eH_{3,5}$	0,602

**Tabel B.2:** Afstand- en hoogteverschil tussen de merktekens 502 en 61

**Statistische waarden**

De beste schatters voor de Lambert ( $\bar{E}, \bar{N}$ ) coördinaten en voor de ortometrische hoogte  $\bar{H}$  worden gegeven door :

Punt	$\bar{E}$ [m]	$\bar{N}$ [m]	$\bar{H}$ [m]
<b>502</b>	103 778,295	190 590,933	10,414
<b>61</b>	103 915,523	190 544,125	10,236

De residu's voor de C/A metingen worden in tabel B.3 op de pagina hierna samengevat. De experimentele standaardafwijking  $s$  wordt voor iedere coördinaat bekomen volgens :

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n r_i^2}{v}}$$

met  $v$  de vrijheidsgraad voor de beschouwde coördinaat. De vrijheidsgraad bedraagt voor deze meetcampagne 28 voor iedere coördinaat, zodat de volgende resultaten voor de experimentele standaardafwijkingen bekomen worden :

$$s_{\Delta E} = 0,249 \text{ m} \quad s_{\Delta N} = 0,378 \text{ m} \quad s_{\Delta H} = 0,820 \text{ m}$$

De ISO norm groepeert de horizontale experimentele standaardafwijkingen :

$$s_D = 0,320 \text{ m} \quad s_{\Delta H} = 0,820 \text{ m}$$

## Bijlagen A.3 – Veldvalidatie voor de elektronische afstandmeter

Merkteken 502				Merkteken 61			
Reeks	r <sub>E</sub> [m]	r <sub>N</sub> [m]	r <sub>H</sub> [m]	Reeks	r <sub>E</sub> [m]	r <sub>N</sub> [m]	r <sub>H</sub> [m]
1	0,588	1,079	0,836	1	-0,070	0,444	0,713
	-0,002	-0,189	0,265		0,134	-0,380	0,775
	0,106	-0,343	1,550		-0,004	0,196	0,479
	-0,210	0,248	-0,942		-0,152	0,502	0,044
	-0,092	0,168	0,401		0,274	0,300	0,101
2	-0,218	-0,608	-0,037	2	-0,078	-0,187	1,251
	-0,263	0,320	-1,143		-0,103	0,183	-0,540
	0,048	-0,552	0,126		-0,010	-0,470	0,335
	0,345	-0,098	-0,496		0,293	-0,315	-0,628
	-0,262	0,126	0,090		0,136	-0,297	0,222
3	0,032	-0,351	0,003	3	0,006	-0,327	-0,236
	-0,414	0,086	-1,274		-0,401	-0,216	-2,532
	0,238	-0,224	0,617		-0,200	0,402	-0,103
	-0,255	0,265	-0,527		-0,170	0,079	-0,266
	0,360	0,073	0,531		0,345	0,087	0,383

**Tabel B.3:** De residu's van de C/A afstandsmetingen en hoogteverschillen

De controle op te grote residu's gebeurt volgens de testen :

$$|D_{i,j}| < 2,5 \times \sqrt{2} \times s_D = 1,130 \text{ m}$$

$$|H_{i,j}| < 2,5 \times \sqrt{2} \times s_H = 2,899 \text{ m}$$

De residu's voldoen aan bovenstaande voorwaarden zodat geen enkele meting wordt verworpen. Om de herhaalbaarheid van de ISO-procedure te controleren werden alle metingen, los van enige ISO eis of aanbeveling, herhaald op een verschillende dag. De verwerking ervan is hieronder niet hernomen doch de resultaten van de tweede meting zijn :

$$s_D = 0,247 \text{ m} \quad s_{\Delta H} = 1,013 \text{ m}$$

Globaal zijn de resultaten voor beide dagen van dezelfde grootte-orde wat een vermoeden van goede reproduceerbaarheid ondersteunt.

### Aanvaardbaarheidshypothesen

#### De experimentele standaardafwijkingen voldoen aan de criteria van de constructeur

We onderzoeken de aanvaardbaarheid van de C/A metingen door de bekomen experimentele standaardafwijkingen  $s_D$  en  $s_H$  te vergelijken met de vooropgestelde waarden  $\sigma_P = 0,300 \text{ m}$  en  $\sigma_H = 0,600 \text{ m}$  van de fabrikant (Sectie B.2 op pagina 141).

De nulhypothese voor het aanvaarden van de planimetrische experimentele standaardafwijkingen is :

$$s_D = 0,320 \text{ m} \leq \sigma_P \times \sqrt{\frac{\chi_{0,95}^2 (v_E + v_N)}{v_E + v_N}}$$

$$\leq \sigma_P \times \sqrt{\frac{\chi_{0,95}^2 (56)}{56}}$$

$$\leq \sigma_P \times 1,153$$

$$\leq 0,346 \text{ m}$$



Een analoge berekening bepaalt de nulhypothese voor de experimentele standaardafwijking voor de orthometrische hoogte :

$$\begin{aligned}
 s_H = 0,820 \text{ m} &\leq \sigma_H \times \sqrt{\frac{\chi_{0,95}^2(v_H)}{v_H}} \\
 &\leq \sigma_H \times \sqrt{\frac{\chi_{0,95}^2(28)}{28}} \\
 &\leq \sigma_H \times 1,215 \\
 &\leq 0,729 \text{ m}
 \end{aligned}$$

De nulhypothese wordt voor de altimetrische component verworpen.

#### Representativiteit van de meetsessies

Verder onderzoeken we of twee experimentele standaardafwijkingen  $s_D$  en  $\tilde{s}_D$  bepaald voor twee verschillende metingen tot dezelfde populatie behoren. De nulhypothese hiertoe is :

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{F_{\frac{\alpha}{2}}(v_E + v_N, \tilde{v}_E + \tilde{v}_N)} &\leq \frac{\tilde{s}_D}{s_D} \leq F_{\frac{\alpha}{2}}(v_E + v_N, \tilde{v}_E + \tilde{v}_N) \\
 \frac{1}{F_{0,975}(56, 56)} &\leq \frac{\tilde{s}_D}{s_D} \leq F_{0,975}(56, 56) \\
 0,585 &\leq \frac{\tilde{s}_D}{s_D} \leq 1,709 \\
 0,585 &\leq \frac{0,320}{0,247} \leq 1,709 \\
 0,585 &\leq 1,678 \leq 1,709
 \end{aligned}$$

De nulhypothese wordt weerhouden zodat we kunnen besluiten dat de planimetrische coördinaten voor beide sessies behoren tot dezelfde populatie.

Een analoge redenering toegepast op de orthometrische hoogte  $H$  geeft :

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{F_{0,975}(28, 28)} &\leq \frac{\tilde{s}_H}{s_H} \leq F_{0,975}(28, 28) \\
 0,469 &\leq \frac{\tilde{s}_H}{s_H} \leq 2,133 \\
 0,469 &\leq \frac{1,013}{0,820} \leq 2,133 \\
 0,469 &\leq 1,526 \leq 2,133
 \end{aligned}$$

en leidt tot dezelfde conclusie.

Vervolgens onderzoeken we of de experimentele standaardafwijkingen bepaald voor ieder merkteken behoren tot eenzelfde populatie. De individuele experimentele standaardafwijkingen voor de merktekens 502 en 61 bedragen :

$$\begin{aligned}
 s_{D,502} = 0,359 \text{ m} & \quad s_{H,502} = 0,275 \text{ m} \\
 s_{D,61} = 0,359 \text{ m} & \quad s_{H,61} = 0,864 \text{ m}
 \end{aligned}$$

De nulhypothese voor de planimetrische experimentele standaardafwijkingen wordt weerhouden wanneer geldt :

$$\begin{aligned} \frac{1}{F_{0,975}(28,28)} &\leq \frac{s_{D,502}}{s_{D,61}} \leq F_{0,975}(28,28) \\ 0,469 &\leq \frac{s_{D,502}}{s_{D,61}} \leq 2,133 \\ 0,469 &\leq 1,704 \leq 2,133 \end{aligned}$$

We kunnen besluiten dat de planimetrische resultaten voor de beide meetsessies op de merktekens 502 en 61 tot dezelfde populatie behoren.

Naar analogie bekomen we voor de altimetrise component :

$$\begin{aligned} \frac{1}{F_{0,975}(14,14)} &\leq \frac{s_{H,502}}{s_{H,61}} \leq F_{0,975}(14,14) \\ 0,335 &\leq \frac{s_{H,502}}{s_{H,61}} \leq 2,983 \\ 0,335 &\leq 0,800 \leq 2,983 \end{aligned}$$

wat tot een analoge conclusie leidt.

#### **Analyse van de series binnen een meetsessies**

Iedere meetsessie is onderverdeeld in 3 series van ieder 5 metingen (Tabel B.1 op pagina 141). Voor iedere serie van de meetsessie op het merkteken 502 kan de experimentele standaardafwijking bepaald worden, wat leidt tot :

$$\begin{aligned} s_{D,1} &= \sqrt{\frac{\frac{0.530}{9} + \frac{2.128}{9}}{2}} = 0,384 \text{ m} & s_{H,1} &= \sqrt{\frac{5.572}{9}} = 0,787 \text{ m} \\ s_{D,2} &= \sqrt{\frac{\frac{0.428}{9} + \frac{1.279}{9}}{2}} = 0,308 \text{ m} & s_{H,1} &= \sqrt{\frac{3.990}{9}} = 0,666 \text{ m} \\ s_{D,3} &= \sqrt{\frac{\frac{0.772}{9} + \frac{0.586}{9}}{2}} = 0,275 \text{ m} & s_{H,3} &= \sqrt{\frac{9.259}{9}} = 1,014 \text{ m} \end{aligned}$$

De volgende nul-hypothese controleert of de onderlinge series behoren tot dezelfde populatie :

$$\begin{aligned} \frac{1}{F_{0,975}(v_D, v_D)} &\leq \frac{s_{D,i}}{s_{D,j}} \leq F_{0,975}(v_D, v_D) \\ 0.384 &\leq \frac{s_{D,i}}{s_{D,j}} \leq 2.600 \end{aligned}$$

met de vrijheidsgraad  $v_D$  overeenstemmend met de planimetrische component. Een analoge redenering wordt toegepast voor de altimetrise component. De tabel B.4 op de volgende pagina geeft een overzicht van de verhoudingen tussen de experimentele standaardafwijkingen volgens de planimetrische en altimetrise component voor de 3 series opgemeten in punt 502.

Voor beide componenten kan besloten worden dat iedere serie van de meetsessie op het merkteken 502 behoort tot dezelfde populatie.

Planimetrisch				Altimetrisch			
Serie	1	2	3	Serie	1	2	3
1	—	0.643	0.513	1	—	0.716	1.660
2	1.554	—	0.797	2	1.396	—	2.320
3	1.949	1.254	—	3	0.602	0.431	—

Tabel B.4: Berekening van  $\frac{SD,i}{SD,j}$  en  $\frac{SH,i}{SH,j}$  voor de 3 series in merkteken 502

### B.3 RTK FLEPOS metingen uitgewerkt conform het voorstel tot ISO-norm

Voor deze meting werd de positie van een Trimble-ontvanger ingemeten door RTK (*Real Time Kinematic*) metingen uit te voeren naar het FLEPOS netwerk. Het Trimble R8 GNSS Systeem is een 72 kanaals en multi-frequentie GNSS (Global Navigation Satellite System) ontvanger van de allernieuwste generatie, met geïntegreerde antenne en datalink radio of GSM/GPRS modem. Het combineert geavanceerde ontvanger technologie en een bewezen systeemvormgeving om een maximale nauwkeurigheid en productiviteit te genereren. De R-Track technologie ondersteunt de gemoderniseerde GPS signalen, waaronder L2C en L5 signalen en ook GLONASS L1/L2 signalen. De Trimble R8 GNSS is uitgerust met een vernieuwde *RTK engine* waardoor een initialisatie in minder dan 10 seconden wordt bereikt. Aanvullend op de ondersteuning van GPS modernisatie, werkt Trimble R&D nauw samen met Galileo, om verzekerd te zijn van volledige ondersteuning van dit nieuwe GNSS signaal.

De theoretische nauwkeurigheid bedraagt in planimetrie 0,005 m en in altimetrie 0,005 m. Het merkwaardige aan deze cijfers is dat de nauwkeurigheid in altimetrie niet, zoals gebruikelijk en wetenschappelijk algemeen aanvaard, ongeveer 1,4 keer groter is dan de nauwkeurigheid in planimetrie.

Punt	Nr	E [m]	N [m]	H [m]
502	1a	103 778,228	190 590,797	10,639
	1b	103 778,229	190 590,799	10,634
	1c	103 778,227	190 590,796	10,631
	1d	103 778,224	190 590,795	10,632
	1e	103 778,228	190 590,797	10,635
	2a	103 778,235	190 590,792	10,629
	2b	103 778,234	190 590,787	11,617
	2c	103 778,235	190 590,797	10,627
	2d	103 778,235	190 590,798	10,623
	2e	103 778,233	190 590,793	10,621
	3a	103 778,233	190 590,810	10,611
	3b	103 778,235	190 590,808	10,604
	3c	103 778,235	190 590,807	10,605
	3d	103 778,238	190 590,806	10,601
	3e	103 778,238	190 590,804	10,595

Punt	Nr	E [m]	N [m]	H [m]
61	1a	103 915,440	190 544,017	10,008
	1b	103 915,440	190 544,017	10,015
	1c	103 915,440	190 544,016	10,017
	1d	103 915,442	190 544,016	10,017
	1e	103 915,441	190 544,017	10,012
	2a	103 915,438	190 544,019	10,021
	2b	103 915,443	190 544,017	10,021
	2c	103 915,442	190 544,020	10,022
	2d	103 915,439	190 544,021	10,021
	2e	103 915,441	190 544,017	10,019
	3a	103 915,440	190 544,020	10,025
	3b	103 915,441	190 544,018	10,019
	3c	103 915,441	190 544,022	10,022
	3d	103 915,439	190 544,021	10,020
	3e	103 915,438	190 544,019	10,022

Tabel B.5: Resultaat van de RTK FLEPOS-meting op merktekens 502 en 61

Hier doet zich een bijzonder probleem voor indien er, overeenkomstig de ISO-norm, uitschieters worden opgespoord. Er blijken heel veel uitschieters te zijn op basis van de berekende standaarddeviatie van 0,004m planimetrisch en 0,010m altimetrisch : 12 van de 30 metingen zijn volgens de norm uitschieters. In werkelijkheid zijn de vastgestelde afwijkingen op afstand en hoogte echter klein (res-

pectievelijk gemiddeld 0,006 m en 0,030 m) zodat deze nauwkeurigheid van **dezelfde orde** is als de referentiewaarden gemeten met totaalstation (0,003 m volgens de norm).

Om die reden werd, vooraleer de uitschieter-test toe te passen, eerst gecorrigeerd voor de systematische fout op afstand en hoogte (**HOEZO??**). Hierna werd de uitschieter-test toegepast en konden alle metingen behouden blijven. Dit wijst op het feit dat de uitschieter-test van het normontwerp niet adequaat is. Net zoals tijdens andere testen werd opgemerkt zou het effectiever zijn metingen uit te sluiten waarvan het residu driemaal het gemiddeld residu (in absolute waarden) overschrijdt.

Na aftrek van de systematische fout worden volgende waarden verkregen :

$$\begin{aligned}s_D &= 0,004 \text{ m} \\ s_{\Delta H} &= 0,010 \text{ m}\end{aligned}$$

De statistische testen leiden tot de volgende besluiten :

1. vergelijking van de experimentele standaardafwijking  $s_D$  met de vooropgestelde standaardafwijking  $\sigma_P$  :

$$0,004 \text{ m} = s_D \leq 1,153 \times \sigma_D = 0,006 \text{ m} \quad \text{aanvaard}$$

2. vergelijking van de experimentele standaardafwijking  $s_{\Delta H}$  met de vooropgestelde standaardafwijking  $\sigma_H$  :

$$0,010 \text{ m} = s_{\Delta H} \leq 1,215 \times \sigma_H = 0,006 \text{ m} \quad \text{verworpen}$$

3. behoren de experimentele planimetrische standaardafwijkingen tot dezelfde populatie :

$$0,469 \leq \frac{s_D^2}{\hat{s}_D^2} = 10,336 \leq 2,133 \quad \text{verworpen}$$

De twee roverpunten behoren bijgevolg in planimetrie niet tot dezelfde populatie. Wel dient opgemerkt dat de waarden allebei binnen de specificatie van de fabrikant liggen. Bijgevolg is dit geen reden tot afkeuring van het toestel.

4. behoren de experimentele altimetrische standaardafwijkingen tot dezelfde populatie :

$$0,335 \leq \frac{s_{\Delta H}^2}{\hat{s}_{\Delta H}^2} = 10,217 \leq 1,983 \quad \text{verworpen}$$

De twee roverpunten behoren bijgevolg in altimetrie niet tot dezelfde populatie. Voor punt 502 worden de specificaties van de fabrikant overschreden.

## B.4 Monofrequente code-meting (C/A) met naverwerking volgens het voorstel tot aanpassing van de ISO-norm

Er werd gebruik gemaakt van de metingen verwerkt volgens het voorstel tot ISO-norm uit sectie B.2 op pagina 141. De nauwkeurigheidskennmerken van deze ontvanger zijn  $\sigma_P = 0,300 \text{ m}$  en  $\sigma_H = 0,600 \text{ m}$ .

### Bijlagen A.3 – Veldvalidatie voor de elektronische afstandmeter

De rekenbladen (tabellen B.7 op de volgende pagina, B.8 op pagina 150 en tabel B.9 op pagina 151) op de volgende bladzijden behandelen de C/A-code metingen voor de merktekens 502 en 61 en de diverse resultaten van de berekeningen.

De horizontale afstand tussen beide punten werd met totaalstation bepaald op  $\hat{D} = 144,970$  m en het hoogteverschil werd met waterpastoestel bepaald op  $\hat{H} = 0,632$  m. Dit wordt overeenkomstig de norm vergeleken met de berekende horizontale afstand en het berekend hoogteverschil uit de GPS code coördinaten. Deze afstands- en hoogteverschilvergelijking laat eveneens toe om de metingen die een te groot residu vertonen te elimineren uit de steekproef.

De beste schatters voor de Lambert ( $\bar{E}, \bar{N}$ ) coördinaten en voor de ortometrische hoogte  $\bar{H}$  worden gegeven door :

Punt	$\bar{E}$ [m]	$\bar{N}$ [m]	$\bar{H}$ [m]
502	103 778,295	190 590,933	10,414
61	103 915,523	190 544,125	10,236

De controle van mogelijke slechte metingen vergelijkt per coördinaat de afwijkingen  $\varepsilon_E = E_i - \bar{E}$ ,  $\varepsilon_N = N_i - \bar{N}$  en  $\varepsilon_H = H_i - \bar{H}$  in absolute waarde met de tolerantie  $T_i = 2.6 \times s_i \dots i = E, N, H$ . Voor alle metingen kunnen we de gemeten waarden aannemen.

De experimentele standaardafwijking voor de C/A-code afstand  $s_D$  en het hoogteverschil  $s_{\Delta H}$  worden samengevat in tabel B.6.

Meetdag	$s_D$	$s_{\Delta H}$
1	0,375 m	1,159 m
2	0,213 m	1,433 m

**Tabel B.6:** De experimentele standaardafwijking voor de C/A metingen

De statische analyse in tabel B.9 op pagina 151 toont dat voor beide metingen voldaan wordt aan de nul-hypothese voor de planimetrie  $s_D \leq \sigma_D$  terwijl de nul-hypothese voor het hoogteverschil  $s_{\Delta H} \leq \sigma_{\Delta H}$  verworpen wordt. In planimetrie echter stellen we vast dat de beide steekproeven niet behoren tot dezelfde populatie, terwijl dit wel geldt voor de altimetrische component.

## Bijlagen A.3 – Veldvalidatie voor de elektronische afstandsmeter

Project		C/A-code meting ? eerste meting		144.970		m		m	
Toestel		Leica SR20		0,300 m		0,600 m			
$\sigma_P$	$\sigma_H$	$\hat{D}_{1,2}$	$\hat{H}_{1,2}$	LbE [m]	LbE [m]	OrthH [m]	LbE [m]	OrthH [m]	
		144.970	0.632	190589.854	190591.121	9.578	190543.682	9.523	
		103777.707	103778.296	190591.121	190591.275	10.149	190543.929	9.461	
		103778.189	103778.505	190590.685	190590.765	8.864	190543.624	9.757	
		103778.387	103778.513	190591.540	190591.612	11.356	190543.825	10.192	
		103778.557	103778.558	190591.485	190591.031	10.013	190543.825	10.135	
		103778.262	103778.708	190590.847	190591.156	10.451	190544.312	8.985	
		103778.057	103778.550	190590.667	190590.860	11.557	190544.422	10.776	
		103777.935	103778.295	190590.933	190590.933	10.288	190544.596	9.902	
		0.285	0.285	0.420	0.420	10.910	190544.440	10.864	
		0.375	0.375	1.159	1.159	10.941	190544.422	10.014	
		-0.588	-1.079	-0.836	-1.079	9.797	190544.452	10.472	
		0.002	0.189	-0.265	0.343	11.688	190544.342	12.768	
		-0.106	0.343	-1.550	0.942	10.412	190543.723	10.339	
		0.210	-0.248	0.942	-0.401	9.883	190544.046	10.502	
		0.092	-0.168	-0.401	0.037	10.414	190544.038	9.853	
		0.218	0.608	0.037	0.037	10.414	190544.125	10.236	
		0.263	-0.320	1.143	0.103	0.773	0.330	0.864	
		-0.048	0.552	-0.126	0.010	0.070	-0.444	-0.713	
		-0.345	0.098	0.496	-0.293	0.070	0.380	-0.775	
		0.262	-0.126	-0.090	0.078	0.078	-0.479	-0.479	
		-0.032	0.351	-0.003	-0.006	0.078	-0.502	-0.044	
		0.414	-0.086	1.274	0.401	0.078	-0.300	-0.101	
		-0.238	0.224	-0.617	0.200	0.078	0.187	-1.251	
		0.255	-0.265	0.527	0.170	0.078	0.540	0.540	
		-0.360	-0.073	-0.531	-0.345	0.078	-0.335	-0.335	
						0.078	0.628	0.628	
						0.078	0.297	-0.222	
						0.078	0.327	0.236	
						0.078	0.216	2.532	
						0.078	-0.402	0.103	
						0.078	-0.079	0.266	
						0.078	-0.087	-0.383	

Tabel B.7: Monofrequente code-meting (C/A) – eerste meetdag

## Bijlagen A.3 – Veldvalidatie voor de elektronische afstandmeter

Project		C/A-code meting <sup>2</sup> , tweede meting		m	
Toestel		Leica SR20		m	
$\sigma_r$	$\sigma_H$	0,300m	0,600m	144,970	0,632
$\hat{D}_{1,2}$	$H_{1,2}$				
<b>Merkteken 502</b>					
Serie/Meting					
1a	LbE [m]	103779,008	190591,121	OrtoH [m]	10,069
1b	LbE [m]	190590,884	190590,884	OrtoH [m]	9,366
1c	LbE [m]	103778,902	190590,751	OrtoH [m]	8,443
1d	LbE [m]	103778,796	190590,796	OrtoH [m]	7,817
1e	LbE [m]	103778,709	190590,903	OrtoH [m]	7,778
2a	LbE [m]	103778,758	190590,020	OrtoH [m]	8,045
2b	LbE [m]	103778,752	190590,537	OrtoH [m]	7,984
2c	LbE [m]	103778,806	190590,267	OrtoH [m]	8,722
2d	LbE [m]	103778,877	190590,030	OrtoH [m]	8,793
2e	LbE [m]	103778,871	190590,503	OrtoH [m]	8,019
3a	LbE [m]	103779,031	190590,451	OrtoH [m]	8,162
3b	LbE [m]	103779,082	190590,436	OrtoH [m]	8,332
3c	LbE [m]	103779,089	190590,500	OrtoH [m]	8,032
3d	LbE [m]	103779,099	190590,647	OrtoH [m]	7,466
3e	LbE [m]	103779,041	190590,649	OrtoH [m]	7,443
mean value $\bar{E}, \bar{N}, \bar{H}$					
		$\sigma_E, \sigma_N, \sigma_H$	190590,566	8,298	0,706
			0,137	0,349	
<b>ISO-NORM</b>					
		$\sigma^D$	0,213	1,433	
CIJ metingen					
	$\epsilon_E$	0,086	0,554	$\epsilon_H$	1,771
	OK	OK	OK	OK	OK
	0,090	0,318	1,068	0,080	0,080
	OK	OK	OK	-0,066	OK
	-0,020	0,185	0,145	-0,124	OK
	OK	OK	OK	-0,089	OK
	-0,126	0,230	-0,481	-0,065	OK
	OK	OK	OK	-0,065	OK
	-0,213	0,337	-0,520	0,098	OK
	OK	OK	OK	0,086	OK
	-0,164	-0,546	-0,253	0,060	OK
	OK	OK	OK	-0,035	OK
	-0,171	-0,030	-0,314	-0,023	OK
	OK	OK	OK	-0,056	OK
	-0,116	-0,299	0,424	-0,065	OK
	OK	OK	OK	0,097	OK
	-0,045	-0,537	0,495	0,080	OK
	OK	OK	OK	-0,023	OK
	-0,052	-0,064	-0,279	-0,056	OK
	OK	OK	OK	0,216	OK
	0,108	-0,115	-0,136	0,168	OK
	OK	OK	OK	-1,260	OK
	0,160	-0,130	0,034	-1,446	OK
	OK	OK	OK	-1,557	OK
	0,167	-0,067	-0,266	-1,550	OK
	OK	OK	OK		OK
	0,176	0,081	-0,832		OK
	OK	OK	OK		OK
	0,119	0,082	-0,855		OK
	OK	OK	OK		OK

**Tabel B.8:** Monofrequente code-meting (C/A) – tweede meetdag

Project	C/A-code meting				
Toestel	Leica SR20				
$\sigma_P$	0.300	m			
$\sigma_H$	0.600	m			
$\hat{D}_{1,2}$	144.970				
$H_{1,2}$	0.632				
Sessie			$s_D$		
Eerste meting			0.375	$s_{\Delta H}$	1.159
Tweede meting			0.213	$s_{\Delta H}$	1.433
			$\sigma_D$	$\sigma_{\Delta H}$	
			$\sigma_D \leq \sigma_D$	$\sigma_{\Delta H} \leq \sigma_{\Delta H}$	
			OK	NOK	
			OK	NOK	
					Crit 3: zelfde populatie?
					Planimetrisch 3.107 NOK
					Altimetrisch 0.655 OK

Tabel B.9: Monofrequente code-meting (C/A) – statistische verwerking