Gebruikershandleiding

Versie 4.7

© Sweco Nederland B.V.

Alle rechten voorbehouden

Handelsnamen

Alle handelsnamen en productnamen die in dit document worden genoemd zijn handelsnamen of geregistreerde handelsnamen van de respectievelijke eigenaren.

Auteursrechten

Dit softwareproduct valt onder de bescherming van de wetgeving op het auteursrecht en alle rechten worden voorbehouden door Sweco Nederland B.V. Licentiehouders van dit softwareproduct mogen de programma's in het geheugen van hun computer laden, om op de computer te worden uitgevoerd als toepassingsprogramma. Kopiëren, dupliceren, verkopen of op een andere manier distribueren van dit product is een overtreding van de wet op het auteursrecht.

Deze handleiding valt onder de bescherming van de wetgeving op het auteursrecht en alle rechten worden voorbehouden.

Hoewel deze handleiding met grote zorg is samengesteld aanvaardt Sweco Nederland geen aansprakelijkheid ten aanzien van de volledigheid of de juistheid van de inhoud. Sweco Nederland geeft voorts geen garanties, expliciet of impliciet, met betrekking tot de toepasbaarheid van het softwareproduct voor de doeleinden van de gebruiker.

N.B.

Uitvoering en specificaties kunnen zonder kennisgeving worden veranderd.

Sweco Nederland B.V.

E-mail MOVE3@Sweco.nl

https://move3software.com/

Inhoud

1. Om te beginnen 6

1.1. Inleiding 7

1.1.1. Algemeen 7

1.1.2. Over deze Handleiding 7

1.1.3. MOVE3 Specificaties 8

1.2. Installatie 12

1.2.1. Inhoud Programmapakket 12

1.2.2. Hardware en Software Eisen 12

1.2.3. Installatie Procedure 12

1.2.4. Starten MOVE3 12

1.2.5. Tutorial 12

2. Werken met MOVE3 13

2.1. Inleiding 14

2.1.1. Systeem Overzicht 14

2.2. MOVE3 Model 15

2.2.1. Algemeen 15

2.2.2. Waarnemingstypes 17

2.2.3. Dimensie Schakelaar en Waarnemingstype 21

2.2.4. Combineren van Waarnemingen 24

2.2.5. Meer informatie... 27

3. Geodetische Aspecten 28

3.1. Inleiding 29

3.2. Referentie Systemen 30

3.2.1. Algemeen 30

3.2.2. Globale en Lokale Systemen 32
3.2.3. Geoïde en Hoogte Definitie 33
3.2.4. Datum Transformaties 35
3.3. Kaartprojecties 37
3.3.1. Eigenschappen en Methoden 37
3.3.2. Transversale Mercator Projectie. 39
3.3.3. De Lambert Projectie 40
3.3.4. De Stereografische Projectie 42
3.3.5. De Lokale (Stereografische) Projectie 42
3.4. GNSS/GPS 44
3.4.1. Algemeen 44
3.4.2. GNSS/GPS waarnemingen 44
3.4.3. GNSS/GPS in geodetische netwerken 46
3.4.4. Het GNSS/GPS kansmodel 47
3.4.5. Hoogtemeting met GNSS/GPS 47
3.5. Detailmeting 48
3.5.1. Geometrische relaties 48
3.5.2. Idealisatieprecisie 51
3.5.3. Excentrisch richtpunt 52
3.6. RDNAPTRANS2008™ 53
4. Kwaliteitscontrole 54
4.1. Inleiding 55
4.1.1. Vereffening, Precisie, Betrouwbaarheid en Toetsing 56
4.1.2. Kwaliteitscontrole tijdens de Verkenning 57
4.2. Kleinste Kwadraten Vereffening 60
4.2.1. Algemeen 60
4.2.2. Functiemodel 60

4.2.3. Kansmodel 63
4.2.4. Vereffening in Fasen 65
4.2.5. Formules 66
4.3. Precisie en Betrouwbaarheid 69
4.3.1. Algemeen 69
4.3.2. Precisie 70
4.3.3. Betrouwbaarheid 71
4.4. Toetsing 75
4.4.1. Algemeen 75
4.4.2. F-toets 76
4.4.3. W-toets 77
4.4.4. T-toets 79
4.4.5. Interpreteren van Toetsingsresultaten 80
4.4.6. Geschatte Fouten 82
5. Overzichten 84
5.1. Overzicht van Kaartprojecties en Constanten 85
5.2. Literatuurlijst 89
5.3. Verklarende Woordenlijst 90

1. Om te beginnen

1.1. Inleiding

1.1.1. Algemeen

MOVE3 is een software pakket, ontwikkeld door Sweco Nederland, voor de verkenning en vereffening van 3D, 2D en 1D geodetische netwerken. MOVE3 voldoet volledig aan de eisen en specificaties van de Delftse puntsbepalingstheorie. Deze theorie wordt algemeen aanvaard als het meest efficiënte middel voor de verwerking en kwaliteitscontrole van landmeetkundige gegevens.

MOVE3 handelt alle complexe wiskundige vraagstukken van 3D netwerken op een correcte wijze af. 3D vereffeningen worden in een zuiver 3D wiskundig model uitgevoerd, zonder vereenvoudigingen of compromissen. Naast 3D vereffeningen kan de software ook 2D en 1D vereffeningen uitvoeren. Dit wordt mogelijk gemaakt door de zogenaamde Dimensie Schakelaar.

MOVE3 kan alle geodetische waarnemingstypes verwerken, in praktisch elke willekeurige combinatie. Wanneer de waarnemingen een 3D oplossing mogelijk maken, zal MOVE3 positie en hoogte bepalen. Op dezelfde wijze wordt een 2D of 1D oplossing verkregen, als de beschikbare waarnemingen een dergelijke oplossing toelaten. Dit is feitelijk de enige vereiste voor MOVE3 om een netwerk te kunnen verwerken.

MOVE3 is eenvoudig te bedienen en vereist een minimale training. De Windows grafische gebruikersinterface bevat onder andere: pull down menu's, intelligente grafisch gekoppelde data editors, muisbesturing, standaard ASCII file I/O en geavanceerde on-line help.

1.1.2. Over deze Handleiding

De MOVE3 handleiding is opgesplitst in een aantal delen:

- **Hoofdstuk 1,** Om te beginnen, bevat algemene informatie over de software, met inbegrip van een beschrijving van de installatie procedure.
- **Hoofdstuk 2,** Werken met MOVE3, bevat beknopte informatie over het gebruik van de MOVE3 software. Uitgebreide informatie is beschikbaar door middel van de on-line help van de MOVE3 Windows gebruikersinterface.
- **Hoofdstuk 3,** Geodetische Aspecten, presenteert een kort overzicht van enkele theoretische elementen van MOVE3: referentie systemen, kaartprojecties en GPS.
- **Hoofdstuk 4,** Kwaliteitscontrole, is gewijd aan de in MOVE3 geïmplementeerde gereedschappen voor kwaliteitscontrole. Een belangrijk onderdeel heeft betrekking op de Delftse puntsbepalingstheorie.
- **Hoofdstuk 5,** Overzichten, bevat aanvullende technische informatie voor het gebruik van de software. Verder zijn in dit deel opgenomen een literatuurlijst, een verklarende woordenlijst en een index.

Het is niet noodzakelijk dat de gebruiker, voordat hij met de software begint, de handleiding van begin tot einde volledig doorneemt. Na het installeren van de software kan men meteen starten met behulp van de tutorial. De bediening van de software wordt beschreven in hoofdstuk 2, waarin wordt verwezen naar onderwerpen die in hoofdstuk 3 en 4 meer in detail worden behandeld. De gebruiker kan deze delen raadplegen wanneer een nadere uitleg noodzakelijk is.

1.1.3. MOVE3 Specificaties

Minimale systeemeisen

- Windows 11;

Capaciteit

De maximale netwerk grootte is afhankelijk van de hardware.

Waarnemingstypes

MOVE3 kan alle beschikbare waarnemingstypes integraal verwerken, zowel terrestrische als GPS waarnemingen. De volgende waarnemingstypes worden door MOVE3 ondersteund:

- Richtingen (maximaal 200 onafhankelijke series per punt);
- Afstanden (maximaal 10 schaalfactoren per netwerk);
- Zenithoeken (maximaal 10 refractie coëfficiënten per netwerk);
- Azimuts maximaal (10 azimut offsets per netwerk);
- Hoogteverschillen;
- Lokale coördinaten;
- GNSS/GPS basislijnen;
- GNSS/GPS coördinaatwaarnemingen;
- Geometrische relaties:
    - hoek tussen 3 punten (incl. haaksheid);
    - evenwijdige lijnen (evt. met gemeten afstand);
    - collineariteit;
    - haakse lijnen;

  - afstand van punt tot lijn;
  - voetmaat en loodlijn;
  - dubbele afstand;
  - meetbandafstand;
  - identiekverklaring.
- Verschuivingsvectoren voor deformatie-analyse.

Verwerkingsmethoden

Met MOVE3 kunnen voor 3D, 2D en 1D geodetische netwerken zowel verkennings- als vereffeningsberekeningen uitgevoerd worden. Hierbij bestaat tevens de mogelijkheid voor het uitvoeren van een vrije netwerk of aansluitingsvereffening.

Projecties

De volgende projecties worden ondersteund:

Algemeen:

- Transversale Mercator;
- Lambert;
- Stereografisch.

Specifiek:

- RD (Nederland);
- Lambert 72 (België);
- Gauss Krüger (Duitsland);
- Lokaal (Stereografisch);
- BRSO (Borneo);
- Malaysian RSO;
- Swiss.

Tools

MOVE3 bevat een aantal handige tools, zoals een volledige automatische bepaling van benaderde coördinaten (COGO3), een automatische kringdetectie inclusief toetsing van sluitfouten (LOOPS3), een berekeningsmodule voor geoidehoogtes binnen Nederland (GEOID3) en diverse globale controles over de invoer (PRERUN3).

Algemeen

- MOVE3 heeft open bestand specificaties in de vorm van tekstbestanden.
- Twee taal versies: Nederlands en Engels. De taalversie die gekozen wordt bij het opstarten van MOVE3 is afhankelijk van de taal van het operating system.
- Interfaces met GNSS/GPS verwerkingspakketten van o.a. Leica, Sokkia, Topcon en Trimble.
- Interfaces met digitale tachymeterbestanden van o.a. Leica, Sokkia, Topcon en Trimble.

- Interfaces met digitale waterpasbestanden van o.a. Leica, Sokkia, Topcon en Trimble.
- Interface met SFN-bestanden van het Nederlandse Kadaster.
- Ondersteuning van het Nederlandse en Belgische geoide model.
- Exporteren naar DXF files.
- Online Help functionaliteit.

1.2. Installatie

1.2.1. Inhoud Programmapakket

Het MOVE3 programmapakket bevat de volgende onderdelen:

- MOVE3 installatiepakket;
- MOVE3 licentie in de vorm van een hardware lock, softwarematige licentie of cloud licentie.

1.2.2. Hardware en Software Eisen

De volgende hardware is minimaal vereist voor het draaien van MOVE3:

Bij gebruik van USB lock als softwarebeveiliging:

- PC met USB poort.
- Het MOVE3 USB hardware lock.

Bij gebruik van een cloud licentie:

- Internetverbinding (zonder onderbrekingen).

De volgende software is vereist voor het draaien van MOVE3:

- Windows 11;
- MOVE3 software;
- Sentinel system drivers of CodeMeterRutime voor het de licentiecontrole.

1.2.3. Installatie Procedure

Volg de aanwijzingen in de installatiehandleiding om MOVE3 te installeren

1.2.4. Starten MOVE3

Om MOVE3 te starten klikt u het *MOVE3* item onder *Programma's* in het Windows *Start* menu. Om MOVE3 te starten en onmiddellijk een project te laden gebruikt u *Verkenner* om de PRJ file te dubbelklikken.

1.2.5. Tutorial

Zie de afzonderlijke Tutorial om stapsgewijs een netwerk met MOVE3 te verwerken.

2. Werken met MOVE3

2.1. Inleiding

Hoofdstuk 2 van de handleiding bevat informatie over de bediening van de MOVE3 netwerkvereffeningssoftware. De software bestaat uit een Windows grafische gebruikersinterface, en een aantal berekeningsmodules. Via de Windows gebruikersinterface heeft de gebruiker de volledige controle over de opties en parameters die de berekeningsmodules besturen.

De opties en parameters worden beschreven in de **on-line help** van de MOVE3 gebruikersinterface.

In dit hoofdstuk van de handleiding wordt het MOVE3 model beschreven. Een groot deel van deze paragraaf is gewijd aan een belangrijk onderwerp: de Dimensie Schakelaar. Het gebruik van de Dimensie Schakelaar is eenvoudig. Echter, de keuze voor een bepaalde dimensie heeft effect op de verwerking van de verschillende waarnemingstypes. Daarom is deze paragraaf voor elke gebruiker van belang.

2.1.1. Systeem Overzicht

Alle taken die door MOVE3 worden uitgevoerd, worden vanuit de Windows gebruikersinterface geactiveerd. De gebruiker hoeft de gebruikersinterface dus niet te verlaten tijdens de verwerking van een netwerk, bijvoorbeeld om gegevens te veranderen of om tussenresultaten te bekijken. In het algemeen worden de gegevens beheerd (d.w.z. ingelezen, aangepast, weergegeven en bewaard) door de gebruikersinterface, en verwerkt (d.w.z. voorbewerkt, gecontroleerd en vereffend) door de andere berekeningsmodules.

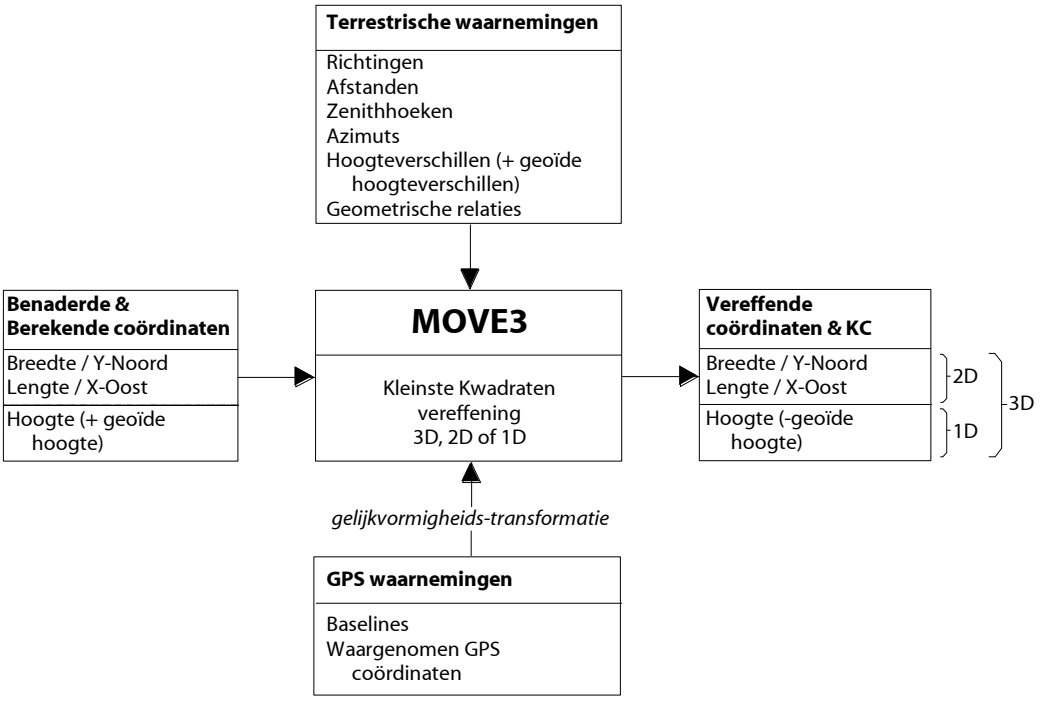
Het software systeem bevat de volgende berekeningsmodules.

- COGO3 voor het berekenen van benaderde coördinaten.
- GEOID3 voor het bepalen van de geoïdehoogtes.
- LOOPS3 voor het opsporen van kringen en het berekenen van kringsluitfouten.
- PRERUN3 voor de automatische controle van de invoer.
- MOVE3 voor het uitvoeren van verkennings- en vereffeningsberekeningen.

2.2. MOVE3 Model

2.2.1. Algemeen

Het functiemodel in MOVE3 is ellipsoïdisch ongeacht de dimensie van de oplossing. In principe is een ellipsoïde een gekromd 2D oppervlak. De derde dimensie wordt geïntroduceerd met behulp van hoogten boven de ellipsoïde De coördinaat onbekenden zijn daarom breedtegraad, lengtegraad en hoogte. Deze onbekenden worden door MOVE3 intern gebruikt. De gebruiker kan bekende en benaderde coördinaten opgeven in een kaartprojectie (X Oost, Y Noord), deze coördinaten worden voor het rekenwerk omgezet naar lengte- en breedtegraad, waarmee gerekend wordt. De coördinaten na vereffening worden weer omgezet in geprojecteerde coördinaten, zodat het ellipsoïdisch model voor de gebruiker verborgen blijft (figuur 2.2-1). De hoogte waarmee intern wordt gerekend is een ellipsoidische hoogte.



figuur 2.2-1: Vereenvoudigde structuur van MOVE3

Als er een geoïdemodel beschikbaar is (zie paragraaf 3.2.3, **Geoïde en Hoogte Definitie**) kunnen geoïdehoogtes in combinatie met orthometrische hoogten worden ingevoerd. MOVE3 zal de orthometrische hoogten dan voor de vereffening omrekenen tot ellipsoidische hoogten. Na de vereffening worden de berekende hoogten weer omgezet en gepresenteerd als orthometrische hoogten. Als er geen geoïdemodel beschikbaar is worden de ingevoerde hoogten geïnterpreteerd als ellipsoidische hoogten.

In het functiemodel wordt een directe relatie vastgelegd tussen de ingevoerde originele waarnemingen, en de ellipsoidische onbekenden (verderop in deze paragraaf wordt ingegaan op het belang van de verwerking van originele waarnemingen). Het

gelineariseerde model wordt, in zijn meest algemene vorm, gepresenteerd in figuur 2.2-2, MOVE3 functiemodel. De vector aan de linker zijde bevat de waarnemingen: richtingen (R), afstanden (S), zenithoeken (Z), azimuts (A), hoogteverschillen (DH), GNSS/GPS basislijnen (DX), waargenomen GNSS/GPS coördinaten (X) en geometrische relaties (GR). De vector aan de rechter zijde, naast de design matrix A, bevat de onbekenden: breedte (φ), lengte (□), hoogte (h) van alle punten en de overige onbekenden (np).

$$\begin{array}{ccccc} \textit{waarnemingen} & & \textit{design matrix} & & \textit{onbekenden} \\ \begin{bmatrix} R_{ij} \\ S_{ij} \\ Z_{ij} \\ A_{ij} \\ DH_{ij} \\ DX_{ij} \\ X_{ij} \\ GR_{ijk} \\ GR_{ijkl} \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots \\ \dots & A & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} & * & \begin{bmatrix} \varphi_i \\ \lambda_i \\ h_i \\ \varphi_j \\ \lambda_j \\ h_j \\ : \\ np \\ : \end{bmatrix} \end{array}$$

figuur 2.2-2: MOVE3 functiemodel

In de vereffening worden de onbekenden niet in één keer opgelost, maar in een aantal iteratie stappen waarin de benaderde waarden telkens verbeterd worden.

De redenen voor het gebruik van een ellipsoïdisch vereffeningsmodel zijn:

- GNSS/GPS waarnemingen kunnen in een dergelijk model relatief eenvoudig verwerkt worden, omdat deze in cartesische of ellipsoidische coördinaat verschillen zijn uitgedrukt.
- Een ellipsoïdisch model biedt een zeer geschikte basis voor de gezamenlijke verwerking van de klassieke terrestrische horizontale (2D) en verticale (1D) waarnemingen.

Daarom is een ellipsoïdisch model zeer geschikt voor de *gecombineerde* verwerking van GNSS/GPS en terrestrische waarnemingen.

Het is essentieel dat de waarnemingen in originele vorm in het MOVE3 functiemodel worden gebruikt. Dit betekent dat waarnemingen niet naar de ellipsoïde gereduceerd worden, en dat waarnemingstypes niet in andere waarnemingstypes worden omgezet vóór de aanvang van de vereffening. Dit is van eminent belang voor de toetsing: alleen de toetsing van originele waarnemingen maakt een duidelijke interpretatie van eventuele verwerpingen mogelijk. Het toetsen van afgeleide waarnemingen daarentegen kan tot problemen leiden; de interpretatie wordt complex en verwarrend. In MOVE3 worden de originele GNSS/GPS basislijn elementen (DX,DY,DZ) gebruikt en niet, zoals in sommige andere pakketten gebeurt, hieruit afgeleide azimuts en afstanden. Dit betekent dat in MOVE3 mogelijke verwerpingen direct op de ingevoerde waarnemingen teruggevoerd kunnen worden.

Een bijkomend voordeel van het werken met een ellipsoïdisch model, met breedte en lengte als coördinaat onbekenden, is dat de kaartprojectie buiten de vereffening blijft. In het vereffeningsmodel hoeft geen rekening gehouden te worden met de complexe vervormingen die een kaartprojectie met zich meebrengt (zie paragraaf 3.3.1, **Eigenschappen en Methoden**).

Om de voordelen van het ellipsoidische model in MOVE3 samen te vatten kan men stellen:

- Het ellipsoïdisch model is het meest geschikt voor de gecombineerde verwerking van GNSS/GPS en terrestrische waarnemingen.
- De originele waarnemingen worden getoetst, en niet afgeleide waarnemingen. Dit impliceert een directe relatie tussen de toetsing en de waarnemingen.
- Met de vervorming, veroorzaakt door kaartprojecties, wordt rekening gehouden door kaartprojectie formules toe te passen vóór de vereffening. Dit maakt MOVE3 geschikt voor de verwerking van netwerken van iedere afmeting.

2.2.2. Waarnemingstypes

MOVE3 kan de volgende waarnemingstypes verwerken:

- richtingen [R];
- afstanden [S];
- zenithoeken [Z];
- azimuts [A];
- hoogteverschillen [DH];
- Lokale coördinaten [E], [N], [H];
- Verschuivingsvector [DE],[DN],[DH];

- GNSS/GPS basislijnen [DX];
- waargenomen GNSS/GPS coördinaten [X];
- 2D Geometrische relaties [GR], te weten:
  - hoeken tussen 3 punten [AN];
  - haaksheid tussen 3 punten [PD];
  - collineariteiten (3 punten liggen op één lijn) [CL];
  - afstanden van punt tot lijn [PL];
  - evenwijdige lijnen [PA], evt. met afstand [LL] ;
  - haakse lijnen [AL];
  - voetmaten [CH] en loodlijnen [PL];
  - dubbele afstand [DD];
  - meetbandafstand [TD];
  - identiekverklaring [EQ].

Richtingen.

In MOVE3 kunnen horizontale richtingen ingevoerd worden in *GON* (centesimale graden), *DEG* (sexagesimale graden) of *DMS* (graden, minuten, seconden). Het waarnemingstype voor richtingen is *R*, gevolgd door een cijfer dat de bijbehorende serie weergeeft, default *R0*. Een maximum van 100 series per opstelpunt is toegestaan.

Afstanden.

In MOVE3 worden afstanden als horizontaal of schuin beschouwd, afhankelijk van de dimensie van het record en de beschikbaarheid van zenithoeken (zie paragraaf 2.2.3, Dimensie Schakelaar en Waarnemingstype). Afstanden worden gegeven in meters. Het waarnemingstype voor afstanden is *S*, gevolgd door een cijfer dat de bijbehorende schaalfactor weergeeft, default *S0*. Een maximum van 10 schaalfactoren per netwerk is toegestaan.

Zenithoeken.

In MOVE3 kunnen zenithoeken gegeven worden in *GON* (centesimale graden), *DEG* (sexagesimale graden) of *DMS* (graden, minuten, seconden). Het waarnemingstype voor zenithoeken is *Z*, gevolgd door een cijfer dat de bijbehorende refractiecoëfficiënt weergeeft, default *Z0*. Een maximum van 10 refractiecoëfficiënten per netwerk is toegestaan.

⚠ **De richtingseries (R0...R199) zijn onafhankelijk van de schaalfactoren (S0...S9) en de refractiecoëfficiënten (Z0...Z9). Voorbeeld: een total station record kan bestaan uit R1, S0 en Z0.**

Total station record.

Richtingen, afstanden en zenithoeken kunnen in één waarnemingsrecord gecombineerd worden; het zogenaamde total station record. Andere toegestane combinaties zijn:

- richting en afstand;
- richting en zenithoek;
- afstand en zenithoek.

De interpretatie van deze combinaties is afhankelijk van de gekozen dimensie voor de oplossing en de dimensie van het record (zie paragraaf 2.2.3, Dimensie Schakelaar en Waarnemingstype).

Azimuts.

In MOVE3 is een azimut een horizontale hoek tussen de richting naar het noorden en de richting naar een richtpunt. Azimuts worden gegeven in *GON* (centesimale graden), *DEG* (sexagesimale graden) of *DMS* (graden, minuten, seconden). Het waarnemingstype voor azimuts is *A*, gevolgd door een cijfer dat de bijbehorende offset weergeeft, default *A0*. Een maximum van 10 offsets per netwerk is toegestaan.

Hoogteverschillen.

In MOVE3 worden hoogteverschillen gegeven in meters. Het waarnemingstype voor hoogteverschillen is *DH*. Als er een geoïdemodel beschikbaar is, worden gewaterpaste (en/of trigonometrisch verkregen) hoogteverschillen en orthometrische hoogten, vóór de vereffening, geconverteerd naar ellipsoidische hoogteverschillen en hoogten, met behulp van de ingevoerde geoide hoogten (zie paragraaf 3.2.3, Geoïde en Hoogte Definitie). De hoogten die na de vereffening worden gepresenteerd zijn weer orthometrische hoogten. Als er geen geoïdemodel beschikbaar is, worden de bekende hoogten en hoogteverschillen beschouwd als ellipsoidische hoogten en hoogteverschillen. Er vindt dan geen conversie plaats.

GNSS/GPS basislijnen.

In MOVE3 is een GNSS/GPS basislijn een 3D vector met drie cartesische coördinaatverschillen in WGS'84 (in bepaalde ontvanger software kunnen GNSS/GPS basislijnen in verschillende referentie systemen worden uitgevoerd. MOVE3 neemt echter aan dat het referentie systeem WGS'84 is). GNSS/GPS basislijnen worden gegeven in meters, met als waarnemingstype *DX*.

GNSS/GPS coördinateatwaarnemingen.

In MOVE3 is een waargenomen GNSS/GPS coördinaat een 3D cartesische coördinaat in WGS'84. Met deze coördinaten kunnen de zeven transformatie parameters tussen WGS'84 en het lokale stelsel bij benadering bepaald worden. Waargenomen GNSS/GPS coördinaten worden gegeven in meters, met als waarnemingstype *X*.

Lokale coördinaten.

Een Lokale coördinaat in MOVE3 is een coördinatenset in de gekozen projectie. De waarneming kan bestaan uit alleen de X en Y coördinaat, alleen de hoogte of een combinatie van XY en hoogte. Het waarnemingstype is E (Easting) voor de X, N (Northing) voor de Y en H voor de hoogte.

Verschuivingsvector.

Een Verschuivingsvector in MOVE3 is een vector, coördinatenverschil in de gekozen projectie. De waarneming kan bestaan uit alleen de delta X en delta DY coördinaat, alleen een hoogteverschil of een combinatie van delta XY en hoogte. Het waarnemingstype is DE (Easting) voor de delta X, DN (Northing) voor de delta Y en DH voor het hoogteverschil.

Geometrische relaties.

Een aantal waarnemingstypen die betrekking hebben op meer dan twee punten worden in MOVE3 samengevat met de naam geometrische relaties. Het betreft hier de waarnemingstypen:

Hoek, een willekeurige horizontale hoek tussen drie punten, uitgedrukt in *GON* (centesimale graden), *DEG* (sexagesimale graden) of *DMS* (graden, minuten, seconden). Het waarnemingstype voor hoek is AN.

Haaksheid, dit is loodrechte hoek tussen 3 punten (100 of 300 gon). MOVE3 zal bij het rekenen zelf, aan de hand van de benaderde coördinaten, bepalen welke hoek gekozen dient te worden. De standaardafwijking wordt uitgedrukt in *GON*, *DEG* of *DMS* en het waarnemingstype voor haaksheid is PD.

Collineariteit, de relatie dat 3 punten op een rechte lijn liggen, de standaardafwijking voor collineariteit wordt uitgedrukt in meters met als waarnemingstype CL.

Afstand van punt tot lijn, hiermee wordt de loodrechte afstand van een punt tot een lijnelement (opgespannen door twee andere punten) bedoeld. De eenheid is in meters met als waarnemingstype PL.

Evenwijdigheid, de relatie dat twee lijnen evenwijdig aan elkaar lopen. De twee lijnen worden elk opgespannen door twee punten. De standaardafwijking wordt uitgedrukt in *GON*, *DEG* of *DMS* en het waarnemingstype voor evenwijdigheid is PA.

Afstand tussen evenwijdig lijnen, tussen twee evenwijdige lijnen kan ook een afstand gemeten worden. Deze afstand wordt uitgedrukt in meters en het waarnemingstype is LL.

Haakse hoek tussen twee lijnen, de relatie dat twee lijnen elkaar onder een loodrechte hoek snijden. MOVE3 zal bij het rekenen zelf bepalen welke hoek gekozen dient te worden (100 of 300 gon). De standaardafwijking wordt uitgedrukt in *GON*, *DEG* of *DMS* en het waarnemingstype is AL.

Voetmaat en loodlijn, een combinatie van de loodrechte afstand in een lijn (voetmaat) en de loodrechte afstand op een lijn (loodlijn) naar een punt, uitgedrukt in meters. Het waarnemingstype voor voetmaat is CH en voor loodlijn is PL. Voetmaat en loodlijn kunnen alleen in combinatie gebruikt worden, niet afzonderlijk.

Dubbele afstand, een punt is vanuit twee andere punten met een meetband ingemeten (bogensnijpunt). De combinatie met Links/Rechts informatie maakt het punt eenduidig bepaald. Het waarnemingstype voor dubbele afstand is DD.

Meetbandafstand, een met de meetband gemeten afstand (eigenmaat of blokmaat). Het waarnemingstype voor meetbandafstand is TD.

Identiekverklaring, twee punten met verschillende naam zijn aan elkaar gelijk. Het waarnemingstype voor identiekverklaring is EQ.

Alle geometrische relaties die een afstand bevatten (voetmaat, loodlijn, afstand van punt tot lijn, de afstand tussen twee evenwijdige lijnen, de dubbele afstand en meetbandafstand) hebben betrekking op schaalfactor 0.

Alle geometrische relaties zijn pure 2D waarnemingen, waarbij de hoogte in het vereffeningsmodel geen rol speelt. Met haaksheid tussen drie punten wordt dus een haaksheid in het platte vlak bedoeld. Alle afstanden van geometrische relaties zijn horizontale afstanden.

2.2.3. Dimensie Schakelaar en Waarnemingstype

In MOVE3 kan de dimensie van de oplossing gekozen worden met behulp van de Dimensie Schakelaar. Echter, de gebruiker kan niet elke willekeurige dimensie kiezen. Normaal gesproken is de keuze van de dimensie afhankelijk van de waarnemingen: wanneer punten met elkaar verbonden zijn door middel van waarnemingen die zowel de horizontale als de verticale positie bepalen, is een 3D oplossing mogelijk. Wanneer alle punten alleen in hoogte of horizontale positie zijn te bepalen, dient (respectievelijk) een 2D of 1D oplossing te worden gekozen.

In 3D is het niet verplicht om de positie en hoogte voor elk punt te bepalen. Afhankelijk van de aanwezige waarnemingen bepaalt MOVE3 welke dimensie voor het betreffende punt van toepassing is. Op deze manier worden waterpasbouten (alleen hoogteverschillen) alleen in hoogte opgelost. Punten die alleen door middel van richtingen aan het netwerk zijn verbonden worden alleen in horizontale positie opgelost.

MOVE3 probeert de waarnemingen altijd volledig te benutten, binnen de grenzen die door de gekozen dimensie zijn vastgelegd. Dit betekent dat, afhankelijk van de gekozen dimensie, alle waarnemingen of een deel van de waarnemingen bijdragen aan de oplossing (zie tabel 2.2-1).

Dimensie	**Waarnemingstypes die aan de oplossing kunnen bijdragen**
3D	richting horizontale afstand schuine afstand zenithoek azimut hoogteverschil lokale coördinaat (XY en hoogte) verschuivingsvector (DX DY en DHoogte) geometrische relaties GNSS/GPS basislijn waargenomen GNSS/GPS coördinaat
2D	richting horizontale afstand schuine afstand+zenithoek ➔ gereduceerde horizontale afstand azimut lokale coördinaat (XY) verschuivingsvector (DX DY) geometrische relaties GNSS/GPS basislijn
1D	schuine afstand+zenithoek ➔ gereduceerd trigonometrisch hoogteverschil hoogteverschil lokale coördinaat (hoogte) verschuivingsvector (Dhoogte)

tabel 2.2-1: De relatie tussen dimensie en waarnemingstype

Zoals uit tabel 2.2-1 valt af te lezen, dient er onderscheid gemaakt te worden tussen horizontale afstanden en schuine afstanden. Een horizontale afstand wordt verkregen, wanneer de schuine afstand tussen standplaats en richtpunt met behulp van de zenithoek wordt gereduceerd. De manier waarop afstanden, zenithoeken en combinaties daarvan in hetzelfde record worden verwerkt, is afhankelijk van de dimensie van het netwerk en de op te geven dimensie bij het total station record:

- In 3D mode worden afzonderlijke afstanden, d.w.z. afstanden die niet met een zenithoek zijn gecombineerd, als horizontale afstanden beschouwd indien de dimensie van het total station record op 2D staat en als schuine afstand indien de dimensie van het record op 3D staat. Een afstand gecombineerd met een zenithoek wordt beschouwd als een schuine afstand. Indien de dimensie van het record op 2D staat wordt de afstand voor de vereffening gereduceerd tot een horizontale afstand en wordt de zenithoek niet afzonderlijk gebruikt in de vereffening. Hierdoor zal dit record niet bijdragen aan de oplossing van de hoogtecomponenten van het opstelpunt en richtpunt.
- In 2D mode wordt er altijd met horizontale afstanden gerekend. Indien er een zenithoek in het record aanwezig is wordt de afstand beschouwd als een schuine afstand, die *vóór* de vereffening tot een horizontale afstand wordt gereduceerd. Afzonderlijke zenithoeken worden niet gebruikt in de 2D oplossing.
- In 1D mode worden afzonderlijke afstanden en afzonderlijke zenithoeken genegeerd. Een afstand gecombineerd met zenithoek wordt als schuine afstand beschouwd. Een dergelijke combinatie wordt *vóór* de vereffening tot een trigonometrisch hoogteverschil gereduceerd.

In tabel 2.2-2 zijn deze gevallen nog eens samengevat.

Dimensie		**Waarnemingen**	**Resultaat**
netwerk	**record**		
3D	3D	S + Z	schuine afstand + zenithoek
	3D	S	schuine afstand
	2D	S + Z	horizontale afstand, gereduceerd
	2D	S	horizontale afstand
	1D	S + Z	hoogteverschil, gereduceerd
2D	3D	S + Z	horizontale afstand, gereduceerd
	3D	S	niet gebruikt
	2D	S + Z	horizontale afstand, gereduceerd
	2D	S	horizontale afstand
1D	3D	S + Z	hoogteverschil, gereduceerd
	1D	S + Z	hoogteverschil, gereduceerd

tabel 2.2-2: Verwerking van afstand - zenithoek combinatie

Wanneer zenithoeken worden ingevoerd, kan rekening gehouden worden met de invloed van refractie door middel van de introductie van refractiecoëfficiënten. In 3D mode kunnen deze coëfficiënten opgelost worden als onbekenden in de vereffening. In 2D en 1D mode is dit echter niet mogelijk, zodat de coëfficiënten worden vastgehouden op de van tevoren gekozen waarde.

2.2.4. Combineren van Waarnemingen

In MOVE3 mogen alle waarnemingstypes vrijelijk gecombineerd worden zolang dit niet leidt tot een slecht bepaald vereffeningsprobleem. Dit geldt ook voor de combinatie van GNSS/GPS en terrestrische waarnemingen: elke willekeurige combinatie, rekening houdend met bovenstaande beperking, is toegestaan. Bijvoorbeeld, een GNSS/GPS netwerk dat hier en daar versterkt is met terrestrische waarnemingen kan gemakkelijk verwerkt worden met MOVE3.

Afhankelijk van de waarnemingstypes in het netwerk, is een 3D, 2D of 1D oplossing mogelijk. Naast de dimensie, dienen nog enkele elementen in beschouwing te worden genomen:

- het type netwerk (terrestrisch en/of GNSS/GPS);
- het type van de bekende coördinaten (in kaartprojectie of ellipsoïdisch/cartesisch);
- het projectie type (Transversale Mercator, Lambert of Stereografisch);
- de referentie ellipsoïde (lokaal of globaal).

De referentie ellipsoïde speelt hier een sleutelrol. Omdat het functiemodel van MOVE3 ellipsoïdisch is, is het altijd noodzakelijk een referentie ellipsoïde te kiezen. Dit betekent dat ook in het simpele geval van een waterpasnet, bestaande uit hoogteverschillen en bekende hoogten, een ellipsoïde dient te worden gespecificeerd. Het geval waarin de referentie ellipsoïde de WGS'84 ellipsoïde is, wordt als een speciaal geval beschouwd vanwege de belangrijke rol van WGS'84 als globaal datum.

De bovenbeschreven elementen zijn vervat in 9 verschillende gevallen, weergegeven in tabel 2.2-3. De tabel kan van pas komen wanneer invoer voor MOVE3 moet worden geprepareerd. De laatste twee kolommen geven het coördinaattype van de bekende punten weer, en het file type waarin deze punten zich dienen te bevinden. Het coördinaat en file type zijn gerelateerd aan het type netwerk en aan de gekozen projectie en ellipsoïde (kolommen 2, 3 en 4). In tabel 2.2-3 wordt met 'globaal' expliciet de WGS'84 of WGS'72 ellipsoïde bedoeld, terwijl voor 'lokaal' elke andere ellipsoïde kan worden ingevuld (bijvoorbeeld de Bessel ellipsoïde).

Er zijn in MOVE3 twee files die coördinaten kunnen bevatten: de Terrestrische COördinaten staan in de TCO file, de GNSS/GPS COördinaten staan in de GCO file. Afhankelijk van het type netwerk kunnen één van de twee files, of beide, deel uit maken van de invoer:

- Een TCO file is nodig indien het netwerk terrestrische waarnemingen bevat, of indien een lokale ellipsoïde is gekozen. Dit betreft alle gevallen uit tabel 2.2-3 behalve geval 5. Indien een projectie is gedefinieerd, of indien geen projectie maar wel een lokale ellipsoïde is gedefinieerd, dient de TCO file bovendien de bekende punten te bevatten.

- Een GCO file is nodig indien het netwerk GNSS/GPS waarnemingen bevat, of indien een globale ellipsoïde is gekozen. Dit betreft alle gevallen, behalve de gevallen 1 en 3. Wanneer een globale ellipsoïde is gekozen, dient de GCO file bovendien de bekende punten te bevatten.

				Bekende punten	
Geval	Netwerk	Projectie	Ellipsoïde	Coördtype	File
1	TER	geen	lokaal	(φ,λ,h)	TCO
2	TER	geen	globaal	(φ,λ,h) of (X,Y,Z)	GCO
3	TER	Mer/Lam/Ster	elke	(E,N,h)	TCO
4	GPS	geen	lokaal	(φ,λ,h)	TCO
5	GPS	geen	globaal	(φ,λ,h) of (X,Y,Z)	GCO
6	GPS	Mer/Lam/Ster	elke	(E,N,h)	TCO
7	TER+GPS	geen	lokaal	(φ,λ,h)	TCO
8	TER+GPS	geen	globaal	(φ,λ,h) of (X,Y,Z)	GCO
9	TER+GPS	Mer/Lam/Ster	elke	(E,N,h)	TCO
(φ,λ,h) = ellipsoidische coördinaten (breedte, lengte, hoogte) (E,N,h) = kaartprojectie coördinaten (X Oost, Y Noord, hoogte) (X,Y,Z) = cartesische coördinaten					

tabel 2.2-3: De 9 gevallen die onderscheiden kunnen worden bij de verwerking van terrestrische en/of GPS-netwerken.

Het coördinaattype in de TCO file, (E,N,h) of (φ,λ,h), wordt bepaald door de PROJECTION parameter in deze file. In de GCO file wordt het coördinaattype (φ,λ,h), (X,Y,Z) of (E,N,h), bepaald door de COORDINATES parameter (zie de MOVE3 file specificaties onder **GPS coördinaten file (GCO)**).

Om de interpretatie van tabel 2.2-3 te verduidelijken, volgen hier enkele voorbeelden:

Voorbeeld 1:

Het netwerk in dit voorbeeld bestaat uit een combinatie van terrestrische en GPS waarnemingen. Bekende punten zijn beschikbaar in een kaartprojectie. Dit is geval 9 in tabel 2.2-3:

- een gecombineerd terrestrisch/GPS netwerk;
- er is een kaartprojectie gekozen;
- de projectie is gecombineerd met een specifieke lokale ellipsoïde (bijvoorbeeld de combinatie RD projectie - Bessel 1841 ellipsoïde).

De bekende en benaderde coördinaten van de TER punten dienen in de TCO file gegeven te worden, in de gekozen projectie. Benaderde coördinaten voor de GNSS/GPS punten moeten gegeven worden in de GCO file.

Voorbeeld 2:

Een eenvoudig waterpasnet dient te worden vereffend. Om het netwerk aan de referentie ellipsoïde te kunnen relateren, is het gewenst, maar niet noodzakelijk, dat er voor de punten 3D benaderde coördinaten zijn. Dit is een consequentie van het ellipsoidische model in MOVE3. Het is in dit voorbeeld dus gewenst om naast bekende hoogten ook benaderde coördinaten (X Oost, Y Noord) of (breedte, lengte) in te voeren. Wanneer we aannemen dat de benaderde coördinaten afkomstig zijn van een topografische kaart in een bepaalde projectie, komen we tot geval 3 in tabel 2.2-3:

- het netwerk is terrestrisch;
- er is een kaartprojectie gekozen;
- de projectie is gecombineerd met een specifieke lokale ellipsoïde (bijvoorbeeld de combinatie RD projectie - Bessel 1841 ellipsoïde).

De bekende en benaderde coördinaten dienen dus gegeven te worden in de TCO file, in de gekozen projectie. Een GCO file is niet nodig.

Voorbeeld 3:

Stel dat een vrije netwerk vereffening van een GNSS/GPS netwerk moet worden uitgevoerd. In dit stadium is de belangrijkste zorg de juistheid van de GNSS/GPS waarnemingen, en niet de berekening van de uiteindelijke vereffende coördinaten. Daarom wordt er nog geen kaartprojectie gespecificeerd. De referentie ellipsoïde is dan per definitie de GNSS/GPS referentie ellipsoïde WGS'84. Dit is geval 5 in tabel 2.2-3:

- een GNSS/GPS netwerk;
- geen kaartprojectie;

- de referentie ellipsoïde is WGS'84.

De bekende en benaderde punten moeten in de GCO file gegeven worden. Een TCO file is niet nodig. Dit voorbeeld is in principe geldig in zowel 3D als 2D.

Alhoewel een grote variëteit aan gevallen kan voorkomen, is het meest waarschijnlijk dat de gebruiker beschikt over bekende punten in een bepaalde kaartprojectie. Deze punten moeten dan per definitie in de TCO file worden ingevoerd. Wanneer het netwerk GNSS/GPS waarnemingen bevat, moeten benaderde waarden voor de GNSS/GPS punten in de GCO file worden ingevoerd. Het ellipsoïdisch model blijft dan verborgen, zodat de gebruiker zich alleen met de keuze van kaartprojectie en ellipsoïde hoeft bezig te houden.

2.2.5. Meer informatie...

Meer informatie over het gebruik van het MOVE3 vereffeningspakket kan worden gevonden in de **on-line help** van de MOVE3 gebruikersinterface. De help functie kan op drie manieren worden aangeroepen:

- Selecteer een Help commando uit het *Help* menu;
- Gebruik de F1-knop van het toetsenbord;
- Kies de *Help* knop van de betreffende dialoog box. Deze methode geeft u snel toegang tot specifieke informatie over de dialoog box.

3. Geodetische Aspecten

3.1. Inleiding

Dit gedeelte van de handleiding behandelt enkele theoretische grondbegrippen, die van belang zijn in MOVE3. Aangenomen wordt dat de gebruiker enigszins bekend is met de beginselen van landmeetkunde en vereffeningsberekeningen. Een compleet overzicht van alle theoretische aspecten valt buiten het bestek van deze handleiding. De geïnteresseerde gebruiker wordt verwezen naar de literatuuropgave in paragraaf 5.2, Literatuurlijst.

MOVE3 maakt gebruik van een ellipsoïdisch functiemodel. De coördinaat onbekenden zijn breedtegraad, lengtegraad en hoogte. Het is daarom altijd noodzakelijk een ellipsoïde als referentie systeem voor de vereffening te selecteren. In veel gevallen is het ook nodig een kaartprojectie te selecteren. De kaartprojectie wordt intern gebruikt om de ingevoerde X Oost en Y Noord aan de ellipsoidische onbekenden te relateren. In de paragrafen 3.2 en 3.3 worden de onderwerpen 'Referentie Systemen' en 'Kaartprojecties' behandeld. Een bijkomende reden voor de behandeling van referentie systemen is de belangrijke rol van het 'World Geodetic System 1984' (WGS'84) in de plaatsbepaling met GNSS/GPS.

Paragraaf 3.4, is gewijd aan GNSS/GPS, een systeem dat zich ontwikkeld heeft tot een belangrijk meetinstrument in de geodetische praktijk. De verwerking van GNSS/GPS-metingen wijkt echter op vele punten af van de verwerking van terrestrische waarnemingen, vandaar dat er een aparte paragraaf voor dit onderwerp is gereserveerd. Er wordt aandacht besteed aan de toepassing van GNSS/GPS in geodetische netwerken, het GNSS/GPS kansmodel en hoogtemeting met GNSS/GPS.

Paragraaf 3.5, Detailmeting, behandelt de verwerking van detailmetingen in de vereffening. Specifieke eigenschappen als geometrische relaties, idealisatieprecisie en excentrisch richtpunt worden toegelicht.

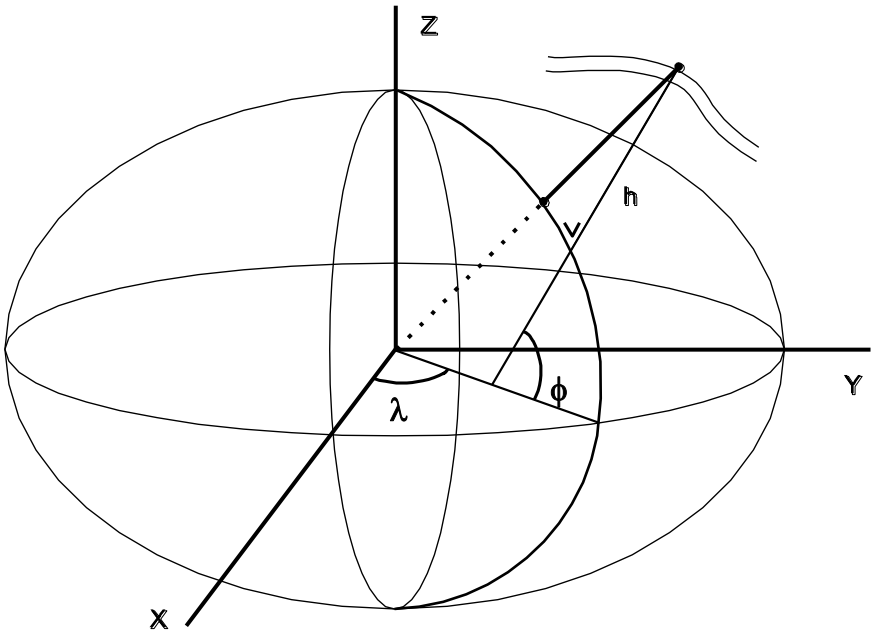
3.2. Referentie Systemen

MOVE3 maakt gebruik van een ellipsoïdisch functiemodel. Dit betekent dat MOVE3 intern met ellipsoidische coördinaten werkt. De gebruiker moet bijgevolg een ellipsoïde selecteren als referentie systeem in de vereffening. In deze paragraaf wordt daarom aandacht besteed aan referentie systemen in het algemeen, en aan de belangrijke rol van het World Geodetic System 1984 (WGS'84) in GNSS/GPS plaatsbepaling in het bijzonder.

3.2.1. Algemeen

Onder plaatsbepaling wordt verstaan: de bepaling van de coördinaten van een punt in een goed gedefinieerd referentie systeem. Deze definitie verklaart direct de belangrijke rol die referentie systemen in de geodesie spelen.

De twee meest gebruikte coördinatenstelsels, als referentie systemen voor het vastleggen van een positie in een driedimensionale ruimte, zijn (figuur 3.2-1):



figuur 3.2-1

Het ellipsoïdisch coördinatenstelsel.

Als referentie dient hier een wiskundig gedefinieerd gekromd oppervlak: de ellipsoïde Het voordeel van een ellipsoïde is dat zijn oppervlak redelijk overeenkomt met de vorm van het aardoppervlak. Dit vergemakkelijkt de interpretatie van ellipsoidische coördinaten. Een punt P in ellipsoidische coördinaten wordt gegeven door:

breedte φ_P

lengte λ_P

hoogte h_P

Het cartesische coördinatenstelsel.

Een punt P in een cartesisch stelsel wordt vastgelegd door middel van drie afstanden naar drie loodrechte assen. Meestal wordt uitgegaan van een rechtsdraaiend stelsel met het XY vlak in het equatoriaal vlak. De positieve X-as wijst dan in de richting van de Greenwich meridiaan. De positieve Z-as, loodrecht op het XY vlak, wijst richting de noordpool. De coördinaten van een punt P worden gegeven door: X_p, Y_p, Z_p. Een cartesisch stelsel is bijzonder geschikt om relatieve posities weer te geven, zoals GNSS/GPS basislijnen.

Er bestaat een directe relatie tussen deze twee stelsels. Ellipsoidische coördinaten kunnen eenvoudig in cartesische coördinaten worden omgerekend, en vice versa.

De vorm van een ellipsoïde wordt bepaald door de halve lange as *a* en de halve korte as *b*, of door de halve lange as en de afplatting *f*. Deze parameters zijn op de volgende wijze gerelateerd:

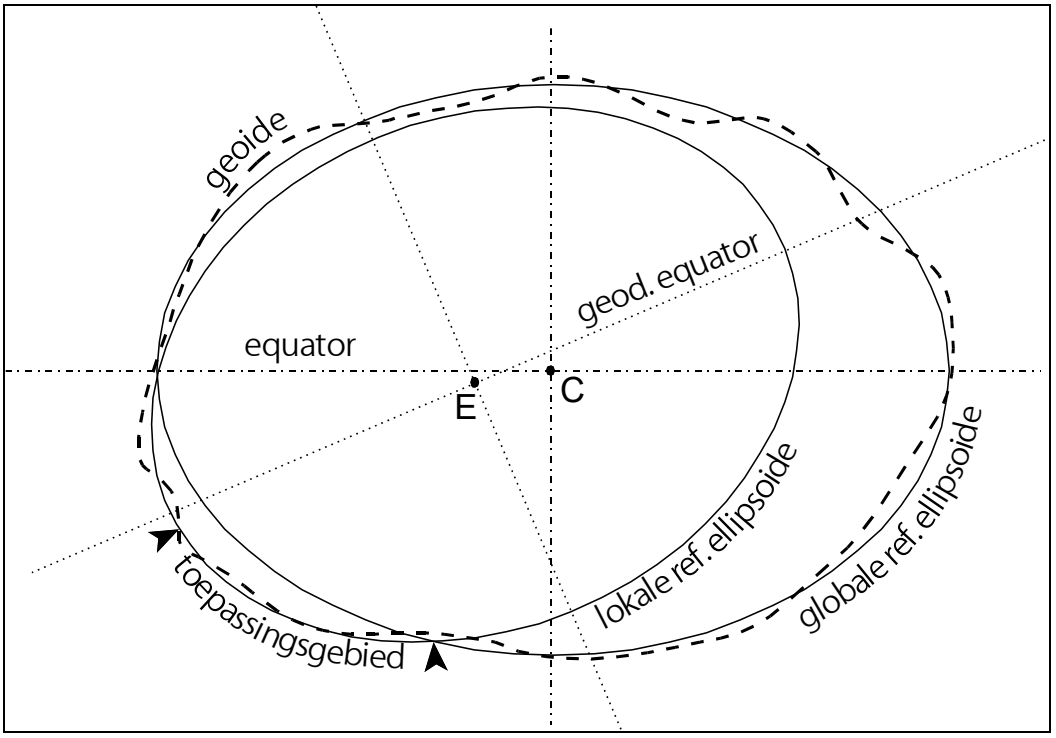
$$f = (a - b) / a$$

Het positioneren van de ellipsoïde in de ruimte vereist zes parameters die alle vrijheidsgraden, drie translaties en drie rotaties, elimineren. Met de bepaling van de vorm en ligging van een referentie ellipsoïde is het zogenaamde **datum** vastgelegd.

In de klassieke geodesie wordt de referentie ellipsoïde alleen gebruikt als horizontaal datum. Hoogten worden gerelateerd aan gemiddeld zeeniveau, oftewel aan de geoïde De geoïde is hier dus in feite een verticaal datum (zie paragraaf 3.2.3, Geoïde en Hoogte Definitie).

3.2.2. Globale en Lokale Systemen

Er kan onderscheid worden gemaakt tussen globale en lokale referentie systemen (figuur 3.2-2). Het GNSS/GPS referentie stelsel bijvoorbeeld, is een globaal referentie stelsel. De oorsprong van dit stelsel wordt verondersteld samen te vallen met het centrum van aardse zwaartekracht **C**, terwijl de Z-as wordt verondersteld samen te vallen met de rotatie as van de aarde. WGS'84 is het meest recente 'earth-centred, earth-fixed' (ECEF) coördinatenstelsel, voorafgegaan door WGS'72, WGS'66 en WGS'60. Elk van deze systemen is gebaseerd op verbeterde gegevens, en daardoor is elk systeem nauwkeuriger dan zijn voorganger. WGS'84 is van algemeen belang, o.a. als intermediair voor het omrekenen van posities in verschillende lokale referentie stelsels.



figuur 3.2-2

Niet alle referentie ellipsoïden zijn geocentrische ('earth centred') ellipsoïden Een groot aantal referentie ellipsoïden is dusdanig gekozen, dat het aardoppervlak in een afgebakend gebied (land, groep landen, continent) zo goed mogelijk wordt benaderd. Om dit te bereiken wordt de ellipsoïde op een lokaal passende manier gepositioneerd, en daardoor is deze ellipsoïde in veel gevallen niet-geocentrisch. De oorsprong valt dan samen met **E**, en niet met **C** (figuur 3.2-2).

Voorbeelden van datums gebaseerd op lokale niet-geocentrische ellipsoïden zijn: European Datum 1950, North American Datum 1927, RD en Ordnance Survey UK 70. Deze datums zijn gebaseerd op verschillende ellipsoïden European Datum 1950 is gebaseerd op de International Hayford 1924 ellipsoïde North American Datum 1927 is gebaseerd op Clarke 1866, RD is gebaseerd op Bessel 1841, Ordnance Survey UK 70 is gebaseerd op Airy.

De lokale ellipsoïden spelen tevens een rol bij de definitie van nationale coördinatenstelsels. Deze worden gedefinieerd door een referentie ellipsoïde en een kaartprojectie (zie paragraaf 3.3, Kaartprojecties). De Nederlandse RD coördinaten bijvoorbeeld, worden bepaald door coördinaten op de Bessel ellipsoïde te projecteren op een plat vlak met behulp van de Stereografische projectie.

3.2.3. Geoïde en Hoogte Definitie

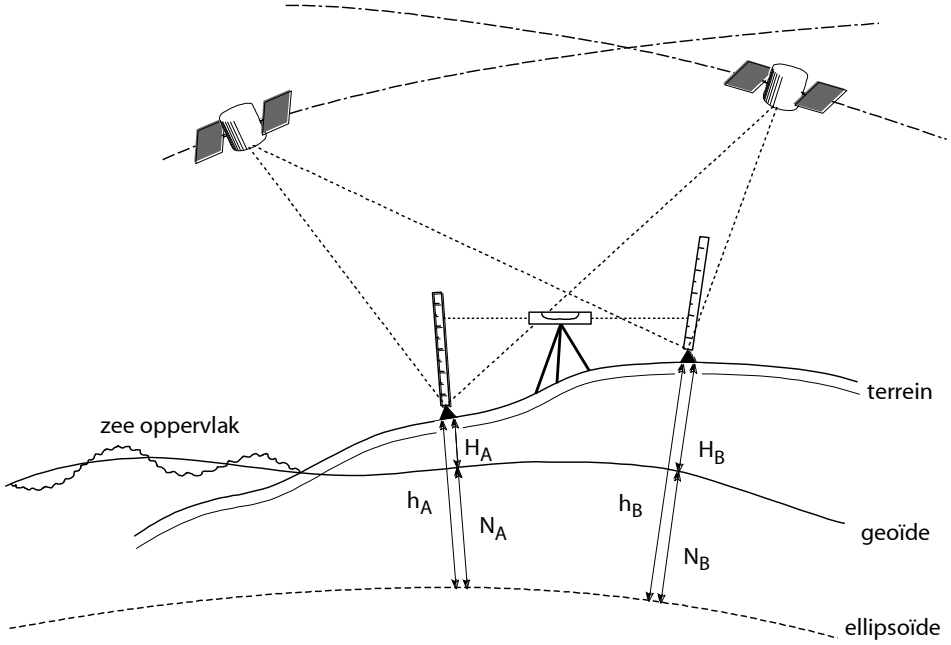
De **geoïde** kan worden gedefinieerd als het oppervlak dat, over de gehele aarde genomen, samenvalt met gemiddeld zeeniveau (figuur 3.2-2). Het is een equipotentiaal vlak, dat wil zeggen een vlak dat overal de richting van de lokale zwaartekracht loodrecht snijdt. Het aards zwaartekracht veld is tamelijk complex, hetgeen resulteert in een onregelmatig gevormde geoïde De bepaling van de vorm van de geoïde is gebaseerd op zwaartekrachtmetingen te land en ter zee, en op informatie geleverd door satellieten. Deze informatie komt voort uit de analyse van satellietbanen en uit satelliet altimeter metingen boven de oceanen. Omdat deze informatie niet overal beschikbaar is en bovendien in kwaliteit uiteen loopt, is de geoïde slechts bij benadering bekend.

De hoogte die in paragraaf 3.2.1, Algemeen, is genoemd is een **ellipsoidische hoogte h**, een hoogte boven de wiskundig gedefinieerde ellipsoïde Meer algemeen gebruikt worden de **orthometrische hoogten H**. Deze hoogten hebben de geoïde als verticaal datum. Ellipsoidische hoogten zijn belangrijker geworden sinds de introductie van plaatsbepaling met satellieten. Vóór deze periode werden hoogten voornamelijk bepaald met waterpasinstrumenten, met een op de geoïde gebaseerd nulniveau. Omdat orthometrische hoogten aldus op indirecte wijze aan de zwaartekracht zijn gerelateerd, bezitten ze een praktische eigenschap, die ellipsoidische hoogten missen: ze vertellen naar welke kant het water stroomt.

Ellipsoidische hoogten h kunnen geconverteerd worden in orthometrische hoogten H door middel van **geoïdehoogtes** of **ondulaties N** (figuur 3.2-3). De volgende simpele relatie geldt:

$$h_A = H_A + N_A$$

Geoïdehoogtes, ten opzichte van de WGS'84 ellipsoïde lopen op van ongeveer -100 m in het zuiden van India, tot ongeveer +65 m rond IJsland. De standaardafwijking van geoïdehoogtes varieert per regio, afhankelijk van de beschikbare hoeveelheid zwaartekrachtgegevens. Belangrijker is echter dat de precisie van geoïdehoogteverschillen N_A-N_B veel hoger is. In gebieden met een dicht netwerk van zwaartekrachtmetingen is een precisie van 2 tot 4 ppm van de afstand haalbaar.



figuur 3.2-3

Wanneer geen geoïde informatie beschikbaar is, worden de waterpashoogten eenvoudig vervangen door ellipsoidische hoogten. De fout die dan gemaakt wordt zal variëren met de gesteldheid van het terrein (vlak of bergachtig). De absolute fout in de hoogteverschillen kan oplopen tot 1 m over een afstand van 10 km. Deze afwijking is in het algemeen voornamelijk systematisch van aard, doordat de geoïde veelal een glad verloop heeft over het projectgebied. Als gevolg hiervan "verdwijnt" de invloed van de afwijking bij de aansluitingsvereffening voor een belangrijk deel in de GNSS/GPS-transformatieparameters. De fouten tengevolge van de resterende ongemodelleerde ondulaties liggen meestal binnen 1 decimeter.

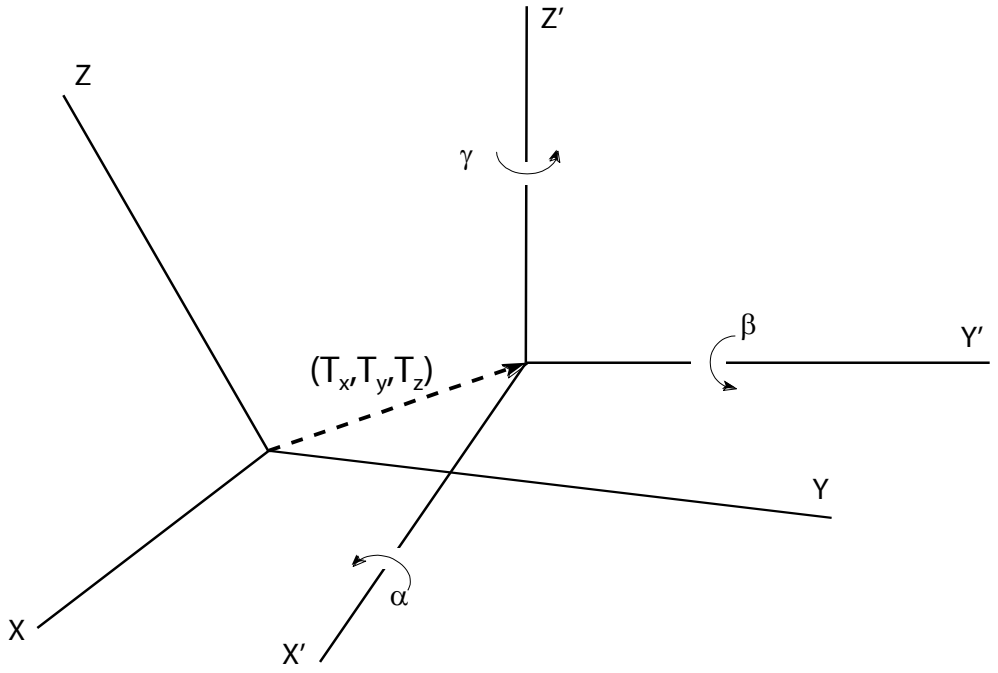
Principieel beter, en voor kritische toepassingen noodzakelijk, is het om orthometrische hoogten en hoogteverschillen vóór de vereffening om te zetten in ellipsoidische hoogten en hoogteverschillen met behulp van bekende geoïdehoogtes Na de vereffening worden de berekende ellipsoidische hoogten dan vice versa omgezet in orthometrische hoogten.

3.2.4. Datum Transformaties

GNSS/GPS is een wereldomvattend plaatsbepalingssysteem, gebaseerd op een globaal datum. Karakteristiek voor een dergelijk datum is (vergelijk paragraaf 3.2.2, Globale en Lokale Systemen):

- de oorsprong wordt verondersteld samen te vallen met het aardse centrum van zwaartekracht;
- de Z-as wordt verondersteld samen te vallen met de rotatie as van de aarde.

Zoals reeds eerder in deze paragraaf is besproken, bestaan er ook lokale datums gebaseerd op een ellipsoïde die in een beperkt gebied goed aansluit bij het aardoppervlak. Om de transformatie van coördinaten van het ene datum naar het andere te kunnen uitvoeren, is het noodzakelijk om de relatieve positie van de verschillende datums te kennen. Een datum transformatie kan worden uitgevoerd, wanneer de 7 parameters van een 3D gelijkvormigheidstransformatie bekend zijn (figuur 3.2-4): 3 translatie parameters (T_x, T_y, T_z), 3 rotatie parameters (α, β, γ) en 1 schaalfactor.



figuur 3.2-4

In het algemeen zijn de rotatie hoeken en schaal tussen de verschillende stelsels zeer klein; in de orde van enkele boogseconden en een paar ppm. De translatie parameters, die de 'shift' (verschuiving) weergeven tussen de beide oorsprongen, kunnen waarden in de orde van grootte van enkele honderden meters hebben. Het verschil bijvoorbeeld, tussen het Nederlandse datum RD (Bessel 1841 ellipsoïde) en het WGS'84 datum is ongeveer 593 m, 26 m en 478 m, in respectievelijk de X-, Y-, en Z-richting.

Een transformatie is noodzakelijk indien GNSS/GPS waarnemingen in het lokale stelsel, bijvoorbeeld het stelsel van de bekende punten, moeten worden ingepast. Wanneer met GNSS/GPS basislijnen wordt gewerkt, is het niet nodig dat de translatie parameters opgelost worden. Er blijven dan in de vereffening nog 4 transformatie parameters over. In MOVE3 worden deze 4 transformatie parameters opgelost in de vereffening. De gebruiker hoeft deze parameters dus niet in te voeren. Bijgevolg hebben de opgeloste transformatie parameters slechts een **lokale betekenis**; ze kunnen niet als algemeen geldig worden verondersteld voor gebieden buiten het betreffende netwerk.

Naast het oplossen van de GNSS/GPS transformatie parameters is het tevens mogelijk om de transformatie parameters vast te houden of gewogen vast te houden.

⚠ **Het is mogelijk om alle 7 transformatie parameters op te lossen door het invoeren van waargenomen GNSS/GPS coördinaten. Waargenomen GNSS/GPS coördinaten behoren tot de waarnemingstypen die in MOVE3 kunnen worden verwerkt (zie paragraaf 2.2.2,** Waarnemingstypes**).**

3.3. Kaartprojecties

Na een korte inleiding worden in deze paragraaf de in de geodesie meest toegepaste kaartprojecties besproken: de Transversale Mercator, de Lambert en de Stereografische projectie. Kaartprojecties worden in MOVE3 gebruikt om de ingevoerde X Oost en Y Noord coördinaten om te rekenen naar de intern gebruikte ellipsoidische coördinaten.

3.3.1. Eigenschappen en Methoden

In de landmeetkunde is het vaak handiger om met rechthoekige coördinaten in een plat vlak te werken, dan met ellipsoidische coördinaten op een gekromd oppervlak. Kaartprojecties (F_{mp}) worden gebruikt om de ellipsoidische breedte en lengte om te zetten in X Oost en Y Noord, en vice versa:

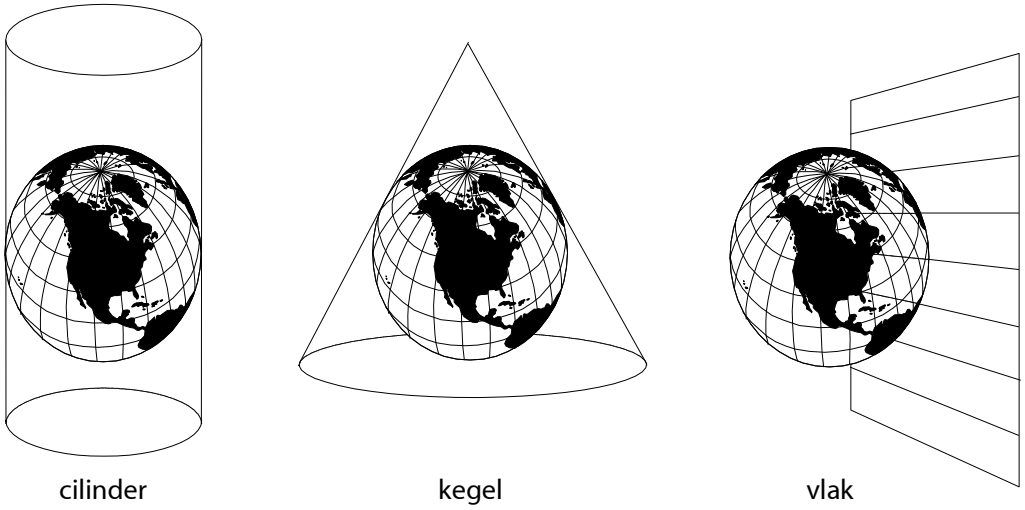
$$\left.\begin{matrix} breedte & \varphi \\ lengte & \lambda \end{matrix}\right\} \xrightarrow{F_{mp}} \left\{\begin{matrix} X\ Oost \\ Y\ Noord \end{matrix}\right.$$

$$\left.\begin{matrix} X\ \ Oost \\ Y\ Noord \end{matrix}\right\} \xrightarrow{F_{mp}^{-1}} \left\{\begin{matrix} breedte & \varphi \\ lengte & \lambda \end{matrix}\right.$$

⚠ **Bij kaartprojecties ontstaat vaak verwarring over de oriëntering van het vlakke coördinatenstelsel. In sommige landen, bijvoorbeeld Duitsland, wijst de positieve X-as naar het noorden, terwijl de positieve Y-as naar het oosten wijst. In andere landen, zoals in Nederland, is de situatie juist omgedraaid. Om deze verwarring te voorkomen, worden voor de X- en Y-as vaak de benamingen 'Easting' en 'Northing' gebruikt.**

Het afbeelden van de ellipsoïde op een plat vlak zal onvermijdelijk leiden tot een vervorming van geometrische elementen. Op basis van deze vervorming worden kaartprojecties gewoonlijk ingedeeld in conforme, equidistante en equivalente projecties. Conforme projecties zijn hoekgetrouw: de hoek tussen twee lijnen op de ellipsoïde is gelijk aan de hoek tussen hun afbeeldingen. Deze eigenschap maak conforme projecties bij uitstek geschikt voor geodetische doeleinden. Equidistante (afstandgetrouwe) en equivalente (oppervlaktegetrouwe) projecties worden wel toegepast in andere disciplines zoals de cartografie.

Een andere onderverdeling van kaartprojecties kan gemaakt worden op basis van het projectie oppervlak: een cilinder, een kegel of een plat vlak (figuur 3.3-1).



figuur 3.3-1

De ligging van het projectie vlak ten opzichte van de ellipsoïde kan worden aangepast afhankelijk van het af te beelden gebied. Bij deze zogenaamde oblique projecties wordt een bol als intermediair tussen de ellipsoïde en het platte vlak gebruikt. De projectie formules geven in dat geval een relatie tussen bolcoördinaten en rechthoekige coördinaten.

De drie meest toegepaste projecties (met projectie vlak) zijn:

- de Transversale Mercator projectie (cilinder);
- de Lambert projectie (kegel);
- de Stereografisch projectie (plat vlak).

De toegepaste kaartprojectie verschilt vaak van land tot land. De keuze voor een bepaalde projectie wordt ingegeven door de wens om de onvermijdelijke vervorming zo klein mogelijk te houden. Zo hebben landen die zich voornamelijk in oost-west richting uitstrekken in veel gevallen gekozen voor de Lambert projectie, omdat de vervorming in deze richting minimaal is. De Lambert projectie wordt toegepast in onder andere België, Frankrijk en Denemarken. Ook enkele staten van de USA gebruiken de Lambert projectie (in andere staten wordt de Transversale Mercator projectie gebruikt).

Om overeenkomstige redenen gebruiken landen die zich voornamelijk in noord-zuid richting uitstrekken de Transversale Mercator projectie. De algemene Mercator projectie is een cilinder projectie met de as van de cilinder in noord-zuid richting. Bij de Transversale Mercator projectie bevindt de as van de cilinder zich in het vlak van de equator. Deze projectie wordt gebruikt in Groot Brittannië, Australië, Canada en in de vroegere Sovjet Unie. In Duitstalige landen wordt Transversale Mercator projectie de Gauss-Krüger projectie genoemd. De Mercator projectie is vooral bekend door de wereldwijd gebruikte Universal Transverse Mercator (UTM) projectie. De UTM projectie bedekt het complete aardoppervlak, onderverdeeld in 60 zones van elk 6 graden.

In Nederland wordt een oblique Stereografische projectie gebruikt, evenals in andere ruwweg cirkelvormige landen zoals Polen en Hongarije. Het met deze projectie verkregen rechthoekige coördinatenstelsel wordt het 'RD' stelsel (Rijksdriehoeksmeting) genoemd.

Projecties kunnen worden geïdentificeerd aan de hand van op de kaart afgebeelde meridianen en parallellen:

- De Transversale Mercator projectie beeldt de equator en de centrale meridiaan, de raaklijn cilinder-ellipsoïde als rechte lijnen af. Andere meridianen en parallellen worden als complexe krommen afgebeeld.
- De Lambert projectie beeldt parallellen af als op ongelijke afstand gelegen bogen van concentrische cirkels. Meridianen worden afgebeeld als op gelijke afstand gelegen stralen van deze cirkels.
- De polaire Stereografische projectie beeldt parallellen af als concentrische cirkels, en meridianen als rechte lijnen die ontspringen onder getrouwe hoeken vanuit het polaire projectiecentrum. De oblique variant van deze projectie beeldt alle meridianen en parallellen af als cirkels. Uitzonderingen hierop zijn de centrale meridiaan door de lengte oorsprong en de parallel met tegengesteld teken als de breedte oorsprong. Deze laatste twee worden als rechten afgebeeld.

Projecties worden gedefinieerd met een aantal parameters. De interpretatie van deze parameters kan per projectie verschillen. In de volgende paragrafen worden de projectie parameters verder beschouwd.

3.3.2. Transversale Mercator Projectie.

De Transversale Mercator projectie is gebaseerd op de volgende parameters:

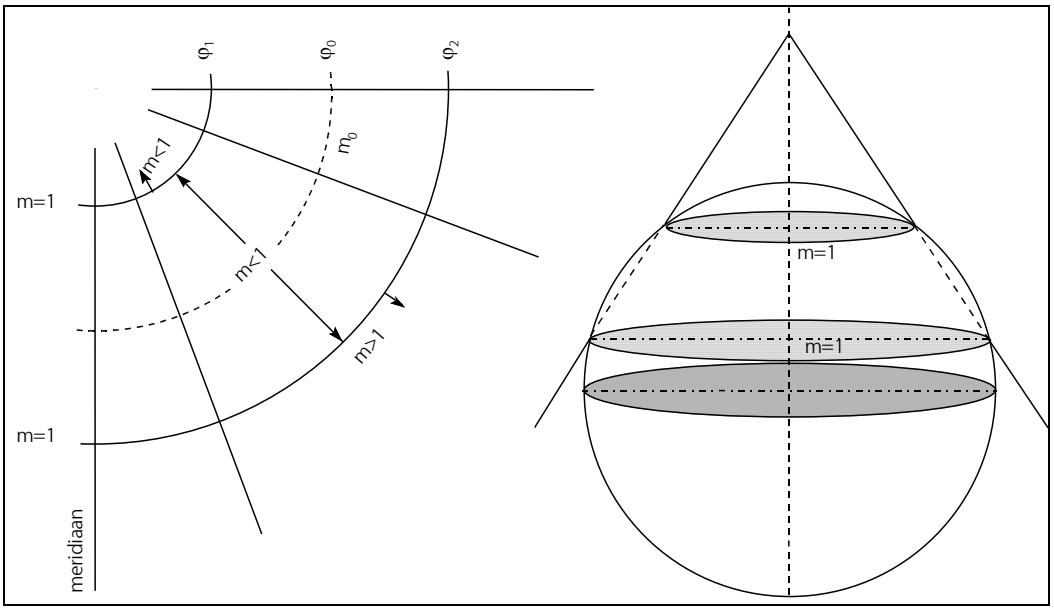
Centrale Meridiaan (CM):	Normaal gesproken de meridiaan die het gebied in kwestie midden doorsnijdt, en die samen met de breedte oorsprong de oorsprong van het vlakke rechthoekige coördinatenstelsel bepaalt. Er is geen schaalvervorming langs deze meridiaan.
Lengte Oorsprong:	Zie Centrale Meridiaan.
Breedte Oorsprong:	Normaal gesproken de parallel die het gebied in kwestie midden doorsnijdt, en die samen met de centrale meridiaan de oorsprong van het vlakke rechthoekige coördinatenstelsel bepaalt.
Schaalfactor:	De schaalfactor is constant langs de centrale meridiaan. De waarde van de schaalfactor langs deze lijn is vaak iets kleiner dan 1, zodat over de gehele kaart genomen de schaal niet te veel van 1 zal afwijken.
Translatie Oost:	In een aantal gevallen wordt een zogenaamde Translatie Oost geïntroduceerd, om het ontstaan van negatieve coördinaten te voorkomen. Een Translatie Oost is simpelweg een grote positieve waarde die bij de originele X Oost wordt opgeteld. Soms wordt deze waarde zodanig gekozen dat de X Oost onmiddellijk als zodanig herkenbaar is, en dus niet kan worden verwisseld met de Y Noord.
Translatie Noord:	In een aantal gevallen wordt een zogenaamde Translatie Noord geïntroduceerd, om het ontstaan van negatieve coördinaten te voorkomen. Een Translatie Noord is simpelweg een grote positieve waarde die bij de originele Y Noord wordt opgeteld. Soms wordt deze waarde zodanig gekozen dat de Y Noord onmiddellijk als zodanig herkenbaar is, en dus niet kan worden verwisseld met de X Oost.

3.3.3. De Lambert Projectie

De Lambert projectie kan op twee manieren gedefinieerd worden, afhankelijk van het aantal standaard parallellen (figuur 3.3-2):

- In het geval van één standaard parallel φ_0, zal de schaalfactor m_0 langs deze parallel over het algemeen een waarde kleiner dan 1 hebben.
- In het geval van twee parallellen φ_1 and φ_2, is de schaalfactor 1 langs beide parallellen.

Deze twee gevallen zijn gerelateerd: uit de enkele standaard parallel φ_0 met schaalfactor m_0, kunnen de twee parallellen φ_1 en φ_2, met schaalfactor gelijk aan 1, worden afgeleid en vice versa.



figuur 3.3-2

De Lambert projectie is gebaseerd op de volgende parameters:

Standaard Parallel(len):	In geval van twee parallellen geven deze de snijcirkels van de kegel en de ellipsoïde In het geval van één parallel is dit over het algemeen geen snijcirkel, maar een cirkel tussen de twee snijcirkels in.
Lengte Oorsprong:	Normaal gesproken de meridiaan die het gebied in kwestie midden doorsnijdt, en die samen met de breedte oorsprong de oorsprong van het vlakke rechthoekige coördinatenstelsel bepaalt.
Breedte Oorsprong:	Normaal gesproken de parallel die het gebied in kwestie midden doorsnijdt, en die samen met de lengte oorsprong de oorsprong van het vlakke rechthoekige coördinatenstelsel bepaalt.
Schaalfactor:	In geval van één parallel wordt de schaalfactor langs deze lijn gewoonlijk iets kleiner dan 1 gekozen, zodat over de gehele kaart genomen de schaal niet te veel van 1 zal afwijken.
Translatie Oost:	In een aantal gevallen wordt een zogenaamde Translatie Oost geïntroduceerd, om het ontstaan van negatieve coördinaten te voorkomen. Een Translatie Oost is simpelweg een grote positieve waarde die bij de originele X Oost wordt opgeteld. Soms wordt deze waarde zodanig gekozen dat de X Oost onmiddellijk als zodanig herkenbaar is, en dus niet kan worden verwisseld met de Y Noord.
Translatie Noord:	In een aantal gevallen wordt een zogenaamde Translatie Noord geïntroduceerd, om het ontstaan van negatieve coördinaten te voorkomen. Een Translatie Noord is simpelweg een grote positieve waarde die bij de originele Y Noord wordt opgeteld. Soms wordt deze waarde zodanig gekozen dat de Y Noord onmiddellijk als zodanig herkenbaar is, en dus niet kan worden verwisseld met de X Oost.

3.3.4. De Stereografische Projectie

De Stereografische projectie is gebaseerd op de volgende parameters:

Lengte Oorsprong:	Lengte van het centrale punt (het raakpunt van ellipsoïde en vlak) van de projectie, meestal in het midden van het af te beelden gebied.
Breedte Oorsprong:	Breedte van het centrale punt van de projectie, meestal in het midden van het af te beelden gebied.
Schaalfactor:	De schaalfactor in het centrale punt van de projectie gedefinieerd door de breedte oorsprong en lengte oorsprong. Deze factor krijgt in het centrale punt vaak een waarde iets kleiner dan 1, zodat over de gehele kaart genomen de schaal niet te veel van 1 zal afwijken.
Translatie Oost:	In een aantal gevallen wordt een zogenaamde Translatie Oost geïntroduceerd, om het ontstaan van negatieve coördinaten te voorkomen. Een Translatie Oost is simpelweg een grote positieve waarde die bij de originele X Oost wordt opgeteld. Soms wordt deze waarde zodanig gekozen dat de X Oost onmiddellijk als zodanig herkenbaar is, en dus niet kan worden verwisseld met de Y Noord.
Translatie Noord:	In een aantal gevallen wordt een zogenaamde Translatie Noord geïntroduceerd, om het ontstaan van negatieve coördinaten te voorkomen. Een Translatie Noord is simpelweg een grote positieve waarde die bij de originele Y Noord wordt opgeteld. Soms wordt deze waarde zodanig gekozen dat de Y Noord onmiddellijk als zodanig herkenbaar is, en dus niet kan worden verwisseld met de X Oost.

3.3.5. De Lokale (Stereografische) Projectie

De Lokale (Stereografische) projectie kan gebruikt worden wanneer de netwerkcoördinaten in uw eigen lokale coördinaatsysteem zijn gegeven. MOVE3 gebruikt een stereografische projectie met de volgende default waarden voor de parameters:

Lengte Oorsprong:	0°
Breedte Oorsprong:	0°
Schaalfactor:	1.0
Translatie Oost:	0 m
Translatie Noord:	0 m

⚠ **Deze waarden kunnen door de gebruiker worden aangepast.**

3.4. GNSS/GPS

Deze paragraaf is gewijd aan het verwerken van GNSS/GPS-metingen. Tegenwoordig is GNSS/GPS een belangrijk meetinstrument in de geodetische praktijk, maar GNSS/GPS is een heel ander soort waarnemingstype dan de klassieke terrestrische waarnemingen. In deze paragraaf zal daarom ingegaan worden op specifieke problemen die een gebruiker tegen kan komen bij het verwerken van GNSS/GPS-metingen. Er wordt o.a. ingegaan op het verkrijgen van GNSS/GPS basislijnen, de inpassing van GNSS/GPS-metingen in lokale netwerken, het GNSS/GPS kansmodel en hoogtemeting met GNSS/GPS.

3.4.1. Algemeen

Door het meten van GNSS/GPS-fasemetingen is zeer nauwkeurige plaatsbepaling mogelijk, waardoor GNSS/GPS een geschikt meetsysteem is voor landmeetkundige toepassingen. GNSS/GPS heeft bovendien een aantal voordelen boven de traditionele landmeetkundige methoden:

- onderlinge zichtbaarheid tussen opstelpunt en richtpunt is niet langer een vereiste, hierdoor wordt de verkenning van een geodetisch netwerk een stuk eenvoudiger;
- GNSS/GPS basislijnen kunnen grote afstanden overbruggen;
- de waarnemingen hebben een hoge precisie;
- het meetproces is snel en efficiënt.

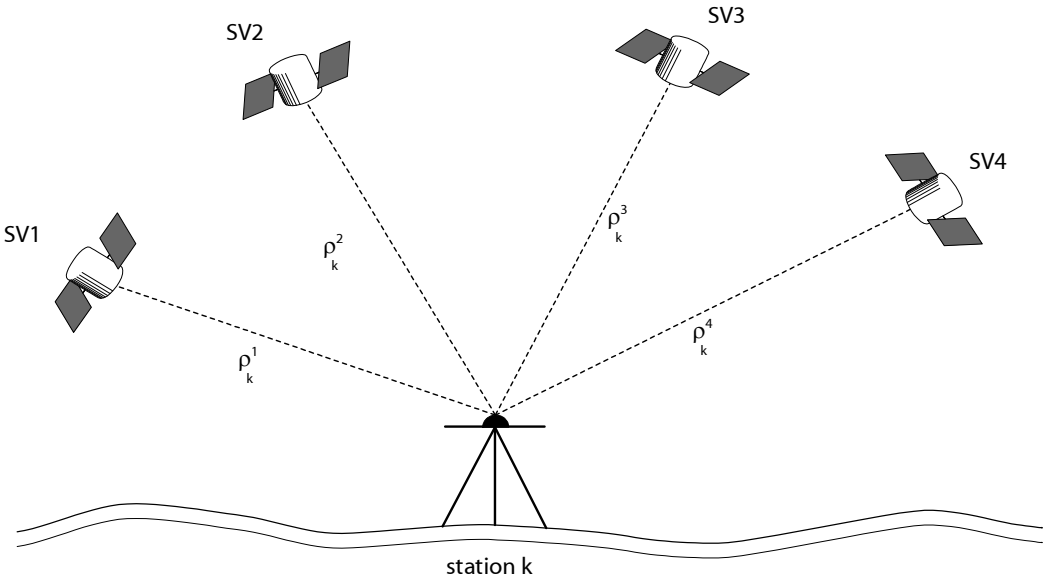
Het verwerkingsproces van GNSS/GPS is echter complex en bestaat feitelijk uit twee stappen. In de eerste stap worden de “ruwe” GNSS/GPS-metingen, zoals ze in de GNSS/GPS-ontvangers opgeslagen worden, omgerekend naar WGS’84 coördinaten of WGS’84 coördinaatverschillen (basislijnen). Meestal wordt deze verwerking uitgevoerd met software van de GNSS/GPS-fabrikant. Deze coördinaat (verschillen) vormen de invoer voor de tweede rekenstap, de vereffening met MOVE3.

Aangezien GNSS/GPS een wereldwijd systeem is, worden de GNSS/GPS-waarnemingen uitgedrukt in het wereldwijde WGS’84-stelsel (World Geodetic System 1984). Om uit GNSS/GPS-metingen lokale coördinaten te krijgen is altijd een transformatie nodig (zie paragraaf 3.2.4, Datum Transformaties).

3.4.2. GNSS/GPS waarnemingen

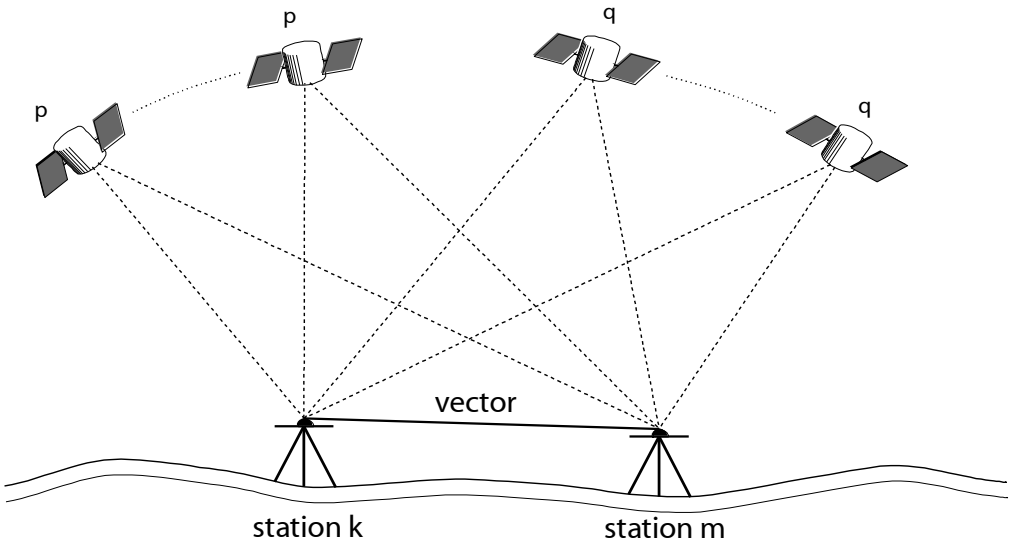
Er kan wat betreft de methode van plaatsbepaling met GNSS/GPS onderscheid gemaakt worden tussen absolute plaatsbepaling en relatieve plaatsbepaling:

- Onder absolute plaatsbepaling (figuur 3.4-1) wordt verstaan: de bepaling van de absolute coördinaten van een punt in het WGS'84-stelsel. Groot nadeel hierbij is dat de GNSS/GPS-signalen door verscheidene factoren verstoord worden, o.a. een bewuste verslechtering van de GNSS/GPS-signalen door de beheerders van het GNSS/GPS-systeem en atmosferische verstoringen. Deze verstoringen werken direct door op de te berekenen positie van de ontvanger. Hierdoor is het niet mogelijk nauwkeurige plaatsbepaling met de absolute meetmethode te doen. Een manier om deze verstoringen voor een groot deel te elimineren is door relatief te meten.



figuur 3.4-1, absolute plaatsbepaling met GNSS/GPS

- In geval van relatieve plaatsbepaling (figuur 3.4-2) wordt de positie van een punt bepaald ten opzichte van een ander punt. Door diverse bewerkingen op de GNSS/GPS-signalen van beide ontvangers uit te voeren kunnen de meeste verstoringen op de signalen geëlimineerd worden. Het resterende coördinaatverschil dat na deze voorbewerkingen overblijft (de basislijn) is in het algemeen een zeer precieze waarneming die de invoer vormt voor MOVE3.



figuur 3.4-2, relatieve plaatsbepaling met GNSS/GPS

3.4.3. GNSS/GPS in geodetische netwerken

GNSS/GPS-coördinaten (absolute plaatsbepaling) en GNSS/GPS-basislijnen (relatieve plaatsbepaling) worden uitgedrukt in het WGS'84 stelsel en om GNSS/GPS-metingen te kunnen gebruiken in lokale stelsels is een transformatie noodzakelijk. In MOVE3 wordt dit bewerkstelligd door de GNSS/GPS-metingen gelijkvormig te transformeren naar het lokale stelsel, waarbij de gebruiker de keuze heeft om de transformatieparameters uit de metingen te schatten, of ze (op eerder bepaalde waarden) vast te houden. Bij het gebruik van GNSS/GPS-basislijnen zijn 4 transformatieparameters noodzakelijk (3 rotaties en een schaalfactor), bij GNSS/GPS-coördinaten zijn het 7 parameters (3 rotaties, 3 translaties en een schaalfactor).

Strikt genomen is een GNSS/GPS-basislijn een gewoon waarnemingstype net als richtingen of afstanden. In MOVE3 is het dan ook mogelijk alle waarnemingstypes, zowel terrestrisch als GNSS/GPS, in een integrale vereffening te verwerken.

Doordat GNSS/GPS een 3D meetsysteem is, dienen GNSS/GPS-metingen altijd 3D verwerkt te worden. Ook indien in MOVE3 de dimensie op 2D wordt gezet, zullen de GNSS/GPS-basislijnen als 3D-waarnemingen behandeld worden.

3.4.4. Het GNSS/GPS kansmodel

Het GNSS/GPS-kansmodel wordt in principe verkregen met de GNSS/GPS-verwerkingssoftware die de basislijnen berekent. Per basislijn is vaak een 3 bij 3 variantiematrix beschikbaar (zie paragraaf 4.2.3, Kansmodel). Een probleem dat in de praktijk vaak speelt is dat de standaardafwijkingen die voor de basislijncomponenten berekend worden, vaak te optimistisch zijn. Dit kan grote problemen geven doordat de basislijnen dan te scherp getoetst worden. MOVE3 biedt twee hulpmiddelen om met dit probleem om te gaan. De eerste mogelijkheid is een verschalingsfactor toe te passen op standaardafwijkingen van de basislijncomponenten. Een tweede mogelijkheid is om gebruik te maken van een kansmodel dat bestaat uit een absolute en een relatieve standaardafwijking per basislijn. De relatieve standaardafwijking wordt meestal uitgedrukt in ppm (part per million van de basislijnlengte). In dit geval is er geen correlatie tussen de componenten van de basislijn.

3.4.5. Hoogtemeting met GNSS/GPS

Hoogteverschillen die met GNSS/GPS gemeten worden zijn altijd ellipsoidische hoogteverschillen. Om hieruit orthometrische hoogteverschillen te krijgen is een correctie voor de geoïde noodzakelijk (zie paragraaf 3.2.3, Geoïde en Hoogte Definitie). De precisie van geoïde hoogteverschillen is over het algemeen beperkt, hetgeen de totale precisie niet ten goede komt. Zelfs wanneer de geoïdehoogtes buiten beschouwing worden gelaten kan GNSS/GPS qua precisie niet concurreren met waterpassen.

3.5. Detailmeting

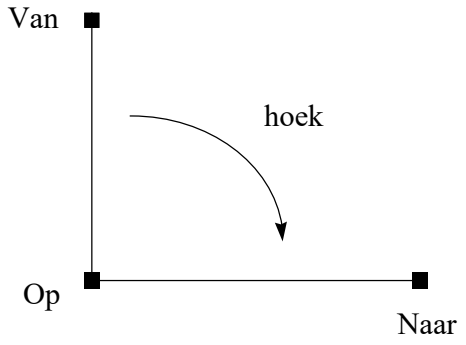
Detailmetingen hebben tot doel de onderlinge ligging van objecten in het terrein vast te leggen. In principe wijken detailmetingen niet af van “normale” grondslagmetingen, maar er zijn een aantal specifieke aspecten die met name bij detailmetingen spelen. Detailnetwerken bestaan vaak uit enorm veel waarnemingen, hetgeen de performance van een integrale vereffening kan beïnvloeden. Door de verscheidenheid aan op te nemen objecten dient er bij een detailvereffening rekening gehouden te worden met idealisatieprecisie en metingen worden soms excentrisch verricht. Naast total station en GNSS/GPS waarnemingen wordt bij detailnetwerken ook gebruik gemaakt van waarnemingen die in MOVE3 onder de naam geometrische relaties samengevat worden. De typische aspecten van detailmetingen worden in deze paragraaf besproken.

3.5.1. Geometrische relaties

MOVE3 gebruikt de term Geometrische relatie als een verzamelnaam voor de diverse waarnemingstypes die specifiek bij detailmetingen gebruikt worden. Specifiek kenmerk van geometrische relaties is dat ze in tegenstelling tot de andere waarnemingstypes op meer dan twee punten betrekking hebben (drie of vier punten). De geometrische relaties die in MOVE3 vereffend kunnen worden zullen nu één voor één beschreven worden:

Hoek

Hieronder wordt een willekeurige hoek tussen drie punten verstaan. In de praktijk zal vaak gebruik gemaakt worden van haakse hoeken (100 of 300 gon). De volgorde van de punten is van belang voor de definitie van de hoek:



Figuur 3.5-1, Hoek

Een hoek is in MOVE3 gedefinieerd als een hoek die rechtsom draait (met de wijzers van de klok mee).

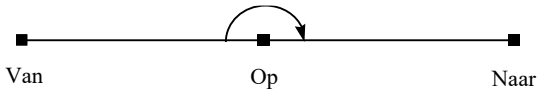
Het waarnemingstype hoek wordt ook gebruikt bij het importeren van matenseries vanuit een SFN-bestand. Een matenserie is een combinatie van loodrechte of gestrekte hoeken en afstanden.

Haaksheid

Bij het waarnemingstype haaksheid wordt alleen aangegeven dat de hoek tussen 3 punten haaks is, zonder dat expliciet de draairichting wordt opgegeven. Bij het gebruik van dit waarnemingstype is het van belang dat er goede benaderde coördinaten van de drie punten beschikbaar zijn. De informatie haaksheid kan namelijk niet gebruikt worden om de benaderde coördinaten te berekenen. Bij het rekenen met MOVE3 wordt aan de hand van de benaderde coördinaten bepaald of de hoek 100 of 300 gon is.

Colliniariteit

Met het waarnemingstype colliniariteit wordt aangegeven dat drie punten op een lijn liggen:

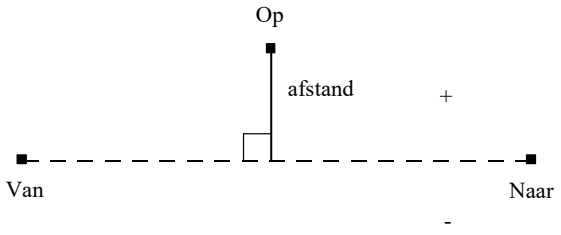


Figuur 3.5-2, Colliniariteit

Het '*Op'* punt is hier collineair met de lijn tussen '*Van'* en '*Naar'*. MOVE3 beschouwt een colliniariteit als een afstand van een punt tot lijn, waarbij de afstand gelijk is aan 0 meter. Zodoende dient de standaardafwijking voor colliniariteit ook opgegeven te worden meters.

Afstand tussen punt en lijn

Hiermee wordt een loodrechte afstand vanuit een punt ('*Op'*) naar een lijn ('*Van'* - '*Naar'*) bedoeld.



Figuur 3.5-3 , Afstand punt - lijn

Deze waarneming kan een negatieve waarde hebben indien het punt, gezien vanuit het '*Van*' punt rechts van de lijn ligt. Met het teken wordt dus de richting aangegeven. Het geprojecteerde punt op de lijn wordt het voetpunt genoemd. Als de afstand tussen punt en lijn gemeten wordt, zal altijd het voetpunt bepaald moeten worden. Voor de berekening van de totale standaardafwijking voor de gemeten afstand wordt dan ook rekening gehouden met de bepaling van het voetpunt.

Evenwijdigheid

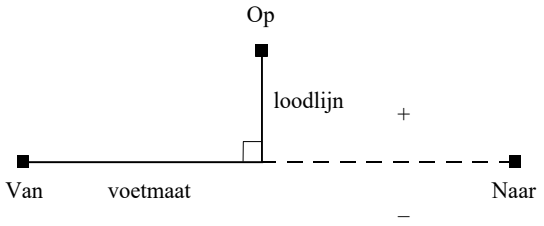
Geeft aan dat twee lijnelementen (beide opgespannen door twee punten) evenwijdig aan elkaar lopen. De evenwijdigheid kan eventueel aangevuld worden met de onderlinge loodrechte afstand.

Haakse lijnen

Geeft aan dat twee lijnelementen loodrecht op elkaar staan. Deze relatie is voornamelijk van toepassing voor harde topografie.

Voetmaat-loodlijn

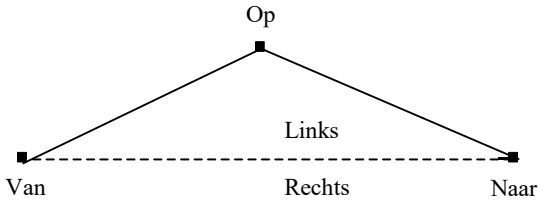
In MOVE3 wordt de orthogonaalmethode ondersteund. Bij de orthogonaalmethode worden detailpunten loodrecht op een meetlijn geprojecteerd (voetpunt). De voetpuntsmaat en de lengte van de loodlijn worden met de meetband gemeten.



Figuur 3.5-4, Voetmaat-loodlijn

Dubbele afstand

Als een detailpunt met een afstand vanuit twee andere punten is aangemeten (bogensnijpunt), dan kan deze constructie als dubbele afstand worden ingevoerd in MOVE3. De combinatie met Links/Rechts informatie maakt het punt eenduidig bepaald.



Figuur 3.5-5, Dubbele afstand

Meetbandafstand

Een met de meetband gemeten afstand (eigenmaat of blokmaat) kan als meetbandafstand worden ingevoerd. Combinaties van hoeken en meetbandafstanden vormen de zogenaamde matenseries.

Identiekverklaring

Als twee detailpunten, met met verschillende naam en codering aan elkaar gelijk dienen te zijn kan dit via de identiekverklaring in de vereffening worden bewerkstelligd.

3.5.2. Idealisatieprecisie

Bij detailvereffeningen is het van belang dat rekening wordt gehouden met de idealisatieprecisie. De idealisatieprecisie is de precisie waarmee in het terrein een punt kan worden aangewezen. Dit noemt men in de praktijk het idealiseren van een punt. Goed idealiseerbare punten zijn bijvoorbeeld hoeken van huizen; slecht te idealiseren punten zijn het midden of de kant van een sloot. De idealisatieprecisie is onafhankelijk van het gevolgde meetproces en is een absoluut precisiekenmerk van een punt. Voor de toekenning van een idealisatieprecisie kan gebruik gemaakt van de klasse indeling in tabel 3.5-1.

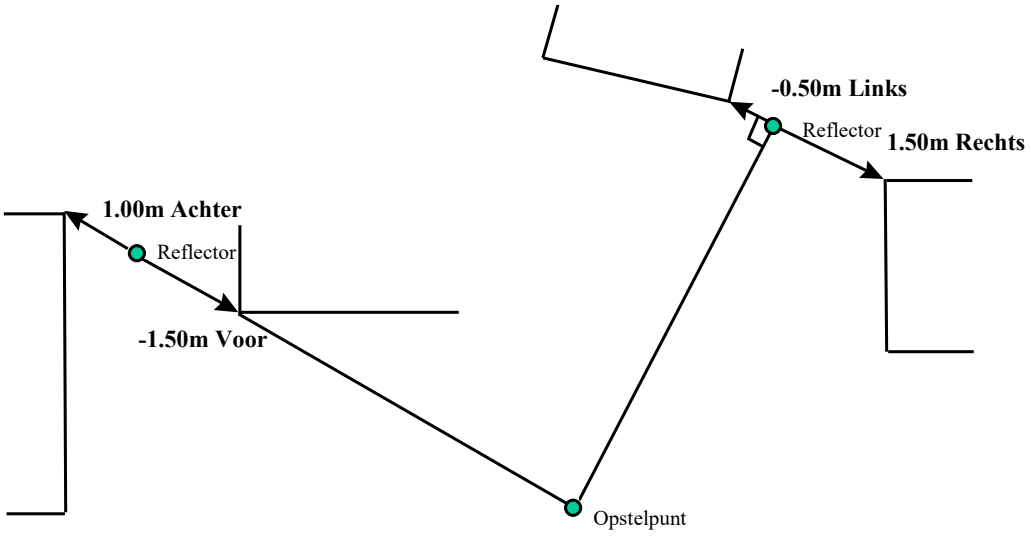
Klasse	**Klasse-indeling idealisatie**	**Standaard-afwijking idealisatie**
grenssteen, muur (harde topografie)	0.00 - 0.02 m	0.02 m
kant verharding, straatmeubilair, put	0.01 - 0.03 m	0.03 m
hek	0.02 - 0.05 m	0.05 m
heg, greppel	0.05 - 0.10 m	0.10 m
sloot	0.10 - 0.20 m	0.20 m
niet geklasseerde punten	> 0.20 m	0.32 m

tabel 3.5-1 : Klasse-indeling voor de idealisatieprecisie

De opgegeven idealisatieprecisie wordt verwerkt in de totale standaardafwijking voor de waarnemingen, op een zelfde manier als de centreerafwijking. De idealisatieprecisie kan derhalve ook gebruikt worden om de centreerafwijking per punt te variëren.

3.5.3. Excentrisch richtpunt

Indien door obstakels een detailpunt niet zichtbaar is of er geen reflector kan worden opgesteld, kan gebruik worden gemaakt van een excentrisch richtpunt. De reflector kan in de voerstraal van het opstelpunt naar het detailpunt worden gezet, of loodrecht daarop. De afstand van het detailpunt naar de reflector wordt met een rolmaat gemeten. Voorafgaand aan de vereffening worden de excentrische maten gebruikt om afgeleide waarnemingen te berekenen. Bij de bepaling van de totale standaardafwijking van de afgeleide waarnemingen wordt rekening gehouden met de standaardafwijking van de gemeten rolmaat afstand en de bepaling van het voetpunt.



Figuur 3.5-6, Excentrisch richtpunt

Voor meer informatie over detailvereffeningen zie HTW 1996, hoofdstuk 6, Detailmeting.

3.6. RDNAPTRANS2008™

Door het toenemend gebruik van GNSS/GPS bestaat er steeds meer behoefte om de GNSS/GPS-metingen te koppelen aan nationale en Europese referentiestelsels. Dit heeft geleid tot de introductie van het Europese referentiestelsel ETRS89 in Nederland, naast de bestaande RD en NAP stelsels.

De conversie tussen RD en NAP enerzijds en ETRS89 anderzijds is door het Kadaster en de Meetkundige Dienst vastgelegd. De procedure voor deze conversie staat bekend als RDNAPTRANS2008™ *.

Of men nu kiest voor RD en NAP of voor ETRS89 er bestaat ten allen tijde een duidelijke relatie tussen beide stelsels. Verwarring is uitgesloten door de verschillende vormen van de coördinaten. Omwille van de eenduidigheid worden de ETRS89 coördinaten uitsluitend als ellipsoïdische coördinaten ten opzichte van de GRS-80 ellipsoïde weergegeven.

De procedure RDNAPTRANS2008™ bevat de volgende stappen:

- Omzetting van ETRS89 ellipsoïdische coördinaten (GRS-80) naar ETRS89 XYZ.
- De 7 -parameter transformatie van ETRS89 XYZ naar Bessel(1841) XYZ.
- Omzetting van Bessel(1841) XYZ naar Bessel(1841) ellipsoïdische coördinaten.
- Projectie conform de RD-kaartprojectie naar Pseudo RD.
- Correctie op basis van het correctiegrid naar RD.
- Omzetting van de ellipsoïdische hoogte ten opzichte van de GRS-80 ellipsoïde naar NAP hoogte middels het Nederlandse Geoïdemodel NLGEO04.

De keuze voor de herdefinitie van RD gebaseerd op ETRS89 betekent dat de kadastrale kaart, de GBKN en de topografische kaarten niet veranderen. Voor de landmeter die lokaal bijhoudingsmetingen uitvoert met tachymetrie, relatiematen of geometrische relaties, verandert er niets. De GNSS/GPS-gebruiker heeft nu de keuze te werken in RD (voor afstanden tot ongeveer 15 km, afhankelijk van de vervorming van het RD stelsel ter plaatse) en NAP of ETRS89. De aansluiting aan ETRS89 maakt een goede kwaliteitscontrole van GNSS/GPS metingen zonder aansluitingsproblematiek mogelijk. De gemeten of vereffende ETRS89 coördinaten kunnen met de RDNAPTRANS2008™ procedure worden omgezet in RD en NAP coördinaten.

Bron: Geodesia nummer 2000-9. Dit themanummer is volledig gewijd aan de stelselherziening geometrische infrastructuur Nederland.

---

* RDNAPTRANS2008™ is een geregistreerde naam van het Kadaster en de Meetkundige Dienst van de Rijkswaterstaat

4. Kwaliteitscontrole

4.1. Inleiding

Het is voor een landmeter belangrijk dat hij de kwaliteit van zijn werk kan beoordelen en beheersen. De redenen liggen voor de hand:

- aan het uitgevoerde werk zullen bepaalde eisen worden gesteld, zodat het belangrijk is om na te kunnen gaan of aan de eisen wordt voldaan;
- wanneer door een structureel (zwak ontwerp) of incidenteel probleem (waarnemingsfout) niet aan de eisen wordt voldaan, dienen middelen aanwezig te zijn waarmee de situatie verbeterd kan worden.

Gegeven de mogelijk kostbare gevolgen van zwak ontworpen netwerken en waarnemingsfouten, vooral wanneer deze gebreken pas in een later stadium worden ontdekt, is het duidelijk dat een goede kwaliteitscontrole tijd en geld kan besparen.

Kwaliteitscontrole bij landmeetkundige werkzaamheden heeft vooral in de laatste jaren, mede door instrumentele ontwikkelingen, aan belang gewonnen. De moderne total punten en GNSS/GPS ontvangers kunnen grote hoeveelheden gegevens produceren. Dit vraagt om een efficiënte methode waarmee de toereikendheid en nauwkeurigheid van deze gegevens beoordeeld kan worden.

In dit hoofdstuk van de handleiding wordt kwaliteitscontrole in geodetische netwerken geïntroduceerd aan de hand van de begrippen precisie en betrouwbaarheid volgens de 'Delftse Methode':

- De controle over de voortplanting van waarnemingsruis naar de coördinaten van het netwerk. Deze controle wordt vastgelegd in termen van precisie.
- De opsporing van grove en/of systematische fouten in de waarnemingen, en de controle over de gevoeligheid van het netwerk voor deze fouten. Deze controle wordt vastgelegd in termen van betrouwbaarheid.

De uitleg die in deze paragraaf wordt gegeven, is beschrijvend van aard, bedoeld om de gebruiker een zekere theoretische achtergrond te verschaffen. Meer informatie kan gevonden worden in de literatuur vermeld in paragraaf 5.2, Literatuurlijst.

4.1.1. Vereffening, Precisie, Betrouwbaarheid en Toetsing

Op basis van de uitgevoerde waarnemingen, zal de landmeter een eindresultaat moeten berekenen: de coördinaten van de onbekende punten. Wanneer overtallige waarnemingen aanwezig zijn, dient een methode te worden gekozen waarmee een unieke en optimale oplossing kan worden bepaald. In de geodesie wordt hiervoor de kleinste kwadraten vereffening gebruikt. Deze is gebaseerd op het volgende criterium: de som van de kwadraten van de correcties aan de waarnemingen dient minimaal te zijn. Na het uitvoeren van een kleinste kwadraten **vereffening** kan men er zeker van zijn dat de best mogelijke oplossing is verkregen, op basis van de aanwezige waarnemingen.

Als een volgende stap is het belangrijk dat de landmeter de kwaliteit van zijn oplossing kan bepalen. Daarvoor dient de kwaliteit te worden gekwantificeerd. Op deze wijze kan worden nagegaan of aan de gestelde eisen wordt voldaan. Bijvoorbeeld: het is voor een landmeter (opdrachtnemer) van belang om vóór aflevering te weten in hoeverre aan het bestek van de opdrachtgever wordt voldaan. Dit werkt twee kanten op:

- het is ongewenst wanneer een netwerk van matige kwaliteit niet door de opdrachtgever wordt geaccepteerd;
- een netwerk met een veel betere kwaliteit dan noodzakelijk is vaak ongewenst vanuit een oogpunt van kostenbeheersing.

De **kwaliteit** van een netwerk, hetzij in ontwerp hetzij reeds gerealiseerd, kan worden beoordeeld in termen van **precisie** en **betrouwbaarheid**. Zowel de precisie als de betrouwbaarheid kunnen worden gekwantificeerd door parameters die in de volgende hoofdstukken ter sprake zullen komen.

Door een netwerk te ontwerpen dat geheel voldoet aan precisie- en betrouwbaarheidseisen, is het mogelijk om de kwaliteit in belangrijke mate te beheersen. Echter, het ontwerpen van een 'perfect' netwerk is niet voldoende. In de praktijk blijkt dat, vooral als gevolg van menselijke fouten, ongeveer 1 in elke 100 waarnemingen onjuist is. Dit betekent dat Kwaliteitscontrole een statistische **toetsing** dient te omvatten, zodat mogelijke waarnemings- of andere fouten kunnen worden ontdekt. De effectiviteit van de toetsing zal afhangen van de betrouwbaarheid van het netwerk. Hoe beter de betrouwbaarheid, hoe hoger de waarschijnlijkheid dat fouten door de toetsing zullen worden opgespoord.

De bovenstaande uitleg dient ter verduidelijking van de relatie tussen kleinste kwadraten vereffening, precisie en betrouwbaarheid, en statistische toetsing. Samengevat kan men stellen:

- de kleinste kwadraten vereffening bepaalt een optimale oplossing, op basis van de aanwezige gegevens;

- de statistische toetsing verifieert de oplossing door middel van het opsporen van mogelijke fouten;
- het precisie en betrouwbaarheid concept kwantificeert de kwaliteit van de oplossing.

4.1.2. Kwaliteitscontrole tijdens de Verkenning

Zoals in de vorige paragraaf is besproken, kan de kwaliteit van een netwerk worden beoordeeld in termen van precisie en betrouwbaarheid. Deze beoordeling kan plaatsvinden voordat de eigenlijke metingen in het veld van start gaan, namelijk tijdens de **verkenning** (ontwerp fase of sterkteberekening). Normaal gesproken zal bestudering van de topografische kaarten van het betreffende gebied en verkenning in het terrein voorafgaan aan het eerste ontwerp van het netwerk. Het resultaat van dit ontwerp is afhankelijk van het doel van het netwerk, en de daarmee samenhangende eisen aan precisie en betrouwbaarheid. Bovendien kan de ligging van de bekende punten, en de gesteldheid van het terrein (vlak of geaccidenteerd) het ontwerp beïnvloeden. In de ontwerpfase kan een aantal algemene vuistregels worden gehanteerd:

- Zorg voor een evenredig verdeling van bekende punten over het netwerk. Bovendien dient de integratie van bekende punten in het netwerk aanvaardbaar te zijn uit oogpunt van precisie en betrouwbaarheid (bijvoorbeeld een insnijding met minstens drie en bij voorkeur vier richtingen).
- Probeer kringen in het netwerk op te nemen. In het algemeen geven kleine kringen de beste betrouwbaarheid. In 2D netwerken kan de betrouwbaarheid van grote kringen worden verbeterd, door het meten van richtingen en afstanden naar tijdelijke hulp punten.
- Probeer te streven naar zijden van ongeveer gelijke lengte.

De precisie en betrouwbaarheid kunnen onderzocht worden in zowel het vrije net als voor een aansluiting, op basis van de volgende invoer:

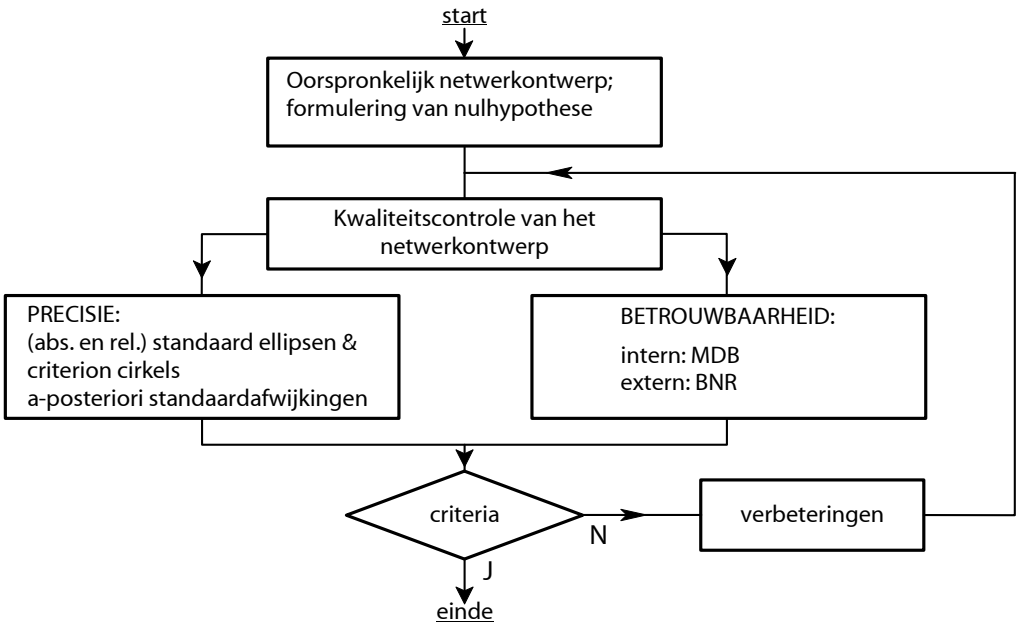
- Benaderde coördinaten van alle punten, bijvoorbeeld geprikt van een topografische kaart. (Omdat er nog geen echte waarnemingen beschikbaar zijn, kunnen nog geen benaderde coördinaten berekend worden.)
- Waarnemingen, d.w.z. niet de aflezingen, maar alleen standplaats, richtpunt en het te meten waarnemingstype.
- Basispunten (in geval van een verkenning van het vrije net).
- Bekende punten (in geval van een aangesloten netwerk verkenning).
- Het kansmodel van waarnemingen en bekende punten, d.w.z. a-priori standaardafwijkingen.

De uitvoer van de verkenningsberekeningen is:

- Absolute en relatieve standaardellipsen.
- Criterium cirkels (in geval van een fase 1 verkenning).
- A-posteriori standaardafwijkingen van de waarnemingen.
- A-posteriori standaardafwijkingen van de punten.
- Minimal Detectable Bias (MDB) van waarnemingen.
- Genormaliseerde Minimal Detectable Bias (MDBn) van waarnemingen.
- Minimal Detectable Bias (MDB) van bekende punten (in geval van een aansluitingsverkenning).
- Bias to Noise Ratio (BNR) van waarnemingen.
- Bias to Noise Ratio (BNR) van bekende punten (in geval van een aangesloten netwerk verkenning).

Gebaseerd op deze uitvoer, kan het netwerk verder verbeterd worden totdat aan de eisen is voldaan. Het (iteratieve) ontwerp proces kan worden voorgesteld door het schema in

figuur 4.1-1.


start
Oorspronkelijk netwerkontwerp;
formulering van nulhypothese
Kwaliteitscontrole van het
netwerkontwerp
PRECISIE:
(abs. en rel.) standaard ellipsen &
criterion cirkels
a-posteriori standaardafwijkingen
BETROUWBAARHEID:
intern: MDB
extern: BNR
criteria
N
J
verbeteringen
einde

figuur 4.1-1

4.2. Kleinste Kwadraten Vereffening

In deze paragraaf worden de beginselen van de kleinste kwadraten vereffening geïntroduceerd, in combinatie met de begrippen functiemodel en kansmodel. Bovendien worden enkele voor MOVE3 belangrijke onderwerpen nader beschouwd, zoals benaderde waarden, nuisance, voorwaarden en vereffenen in fasen.

4.2.1. Algemeen

Het is gebruikelijk dat een landmeter een bepaalde hoeveelheid overtallige waarnemingen verricht bij de opzet van een geodetisch netwerk. Overtalligheid zorgt voor extra voorwaarden die kunnen worden aangewend om de kwaliteit van het netwerk te verhogen. Door hun stochastische karakter zullen de waarnemingen echter niet zonder meer aan alle voorwaarden in het netwerk voldoen. Een voorwaarde is bijvoorbeeld: de hoeken van een driehoek dienen opgeteld precies 200 gon op te leveren. Daarom is een methode noodzakelijk die de waarnemingen zodanig corrigeert, dat wél aan de voorwaarden wordt voldaan. De correctie die aan een waarneming wordt opgelegd noemt men het residu van de waarneming. De **kleinste kwadraten vereffening** zorgt ervoor dat de waarnemingen aan het model voldoen door de kwadratensom van de residuen te minimaliseren. De residuen worden ook wel **kleinste kwadraten correcties** genoemd.

Een kleinste kwadraten vereffeningsmodel bestaat uit twee belangrijke componenten: het functiemodel en het kansmodel. Het functiemodel bevat de relaties tussen de waarnemingen en de onbekenden. Het kansmodel beschrijft de kansverdeling van de waarnemingen.

4.2.2. Functiemodel

In het algemeen zijn de waarnemingen zelf niet de grootheden waarin men uiteindelijk geïnteresseerd is. De waarnemingen worden slechts gebruikt om onbekende parameters, bijvoorbeeld coördinaten van punten, te kunnen bepalen. De functionele relatie tussen de waarnemingen en onbekenden wordt vastgelegd in het **functiemodel**.

In sommige gevallen is het functiemodel heel eenvoudig. De relatie tussen bijvoorbeeld de waargenomen hoogteverschillen en onbekende hoogten bij een waterpassing is lineair:

$$\Delta h_{ij} = h_j - h_i$$

Het wordt echter gecompliceerder in geval van een GNSS/GPS netwerk, met daarin onbekenden coördinaten (X,Y,Z) in een coördinaat systeem dat afwijkt van het coördinaat systeem van de waargenomen basislijnen ΔX:

$$\Delta X_{ij} = functie(\alpha, \beta, \gamma, \mu, X_i, Y_i, Z_i, X_j, Y_j, Z_j)$$

met α, β, γ, μ als transformatie parameters.

Omdat het noodzakelijk is dat de relaties tussen waarnemingen en onbekenden lineair zijn, dient het bovenstaande model gelineariseerd te worden. Dit betekent gewoonlijk dat voor het verkrijgen van een oplossing een aantal **iteraties** nodig is. Bovendien dienen voor de onbekende coördinaten **benaderde waarden** beschikbaar te zijn. Wanneer deze benaderde waarden niet voldoende goed zijn kan het aantal noodzakelijke iteraties toenemen. In het ongunstigste geval wordt helemaal geen convergentie bereikt.

Omdat men vooral geïnteresseerd is in de coördinaten, zijn de andere onbekenden in het model niet altijd belangrijk. Onbekenden zoals de eerder genoemde transformatie parameters worden overige parameters of 'nuisance' parameters genoemd. Typische nuisance parameters zijn: transformatie parameters, schaalfactoren, azimut offsets, oriënteringsonbekenden en refractiecoëfficiënten. Een aantal van deze parameters kan worden vastgehouden op een bepaalde waarde, hetgeen betekent dat ze in de vereffening niet gecorrigeerd worden. De vraag betreffende het al dan niet vasthouden van parameters kan niet eenvoudig worden beantwoord. Men moet altijd bedacht zijn op 'overconstraining' (teveel voorwaarden) maar ook op 'overparameterization' (teveel onbekenden). Bijvoorbeeld door het introduceren van refractiecoëfficiënten kunnen bepaalde systematisch effecten worden geabsorbeerd, die niet veroorzaakt worden door refractie. Aan de andere kant is het ook niet juist om de refractie te negeren wanneer deze wel degelijk van invloed is. Het succes van de afstemming (tuning) van het model is in belangrijke mate afhankelijk van de ervaring van de gebruiker.

Bij de boven genoemde 'tuning' van het model zijn ook de schaalfactoren van belang. In MOVE3 zijn maximaal 10 schaalfactoren per netwerk toegestaan, maar in de meeste gevallen is één schaalfactor voldoende. De introductie van een vrije schaalfactor is voornamelijk bedoeld om te kunnen corrigeren voor een systematische fout in de interne schaal van de afstandmeter. Bovendien is een vrije schaalfactor van belang in een vrij netwerk, waarin de schaal van het netwerk reeds door de basispunten wordt bepaald. Bij een aangesloten netwerk vereffening zal een vrije schaalfactor de schaal van het netwerk vergroten of verkleinen, zodat het netwerk optimaal past op de bekende punten. Dit kan in sommige gevallen de toetsing van de bekende coördinaten in de weg staan. Een fout in een coördinaat van een bekend punt kan verborgen blijven wanneer, door het vergroten of verkleinen, het netwerk toch aan de bekende punten kan worden aangepast. De fout wordt geabsorbeerd door de schaalfactor, welke een significant van 1.0 afwijkende waarde zal krijgen. Het is daarom aan te raden om na de vereffening de schaalfactor te controleren, en eventueel opnieuw te vereffenen met een vaste schaalfactor.

Een vereffening is niet oplosbaar wanneer het functiemodel, zoals gerepresenteerd door de design en normaal matrix (zie paragraaf 4.2.5, Formules), **singulier** wordt. Singulariteit wordt veroorzaakt door:

- een verkeerd gesteld probleem (ill-posed problem);
- een onjuist geformuleerd model.

In een verkeerd gesteld probleem wordt teveel verwacht van de aanwezige waarnemingen, of er zijn te weinig waarnemingen verricht. Bijvoorbeeld de bepaling van de 2D coördinaten van een punt door slechts één enkele richting leidt tot een singulariteit. Een model is onjuist geformuleerd wanneer er teveel onbekenden in het model zijn opgenomen. In een dergelijk model wordt de fysische werkelijkheid niet correct weergegeven.

Bij softwarematige oplossingen van kleinste kwadraten vraagstukken, kan het slecht geconditioneerd zijn van de normaal matrix leiden tot singulariteit. Singulariteit is het limietgeval van slecht-geconditioneerdheid. Een slecht geconditioneerde matrix kan singulier worden als gevolg van de beperkte interne nauwkeurigheid van de computer. Een voorbeeld van een slecht geconditioneerd probleem is de insnijding van een punt door twee bijna evenwijdige richtingen.

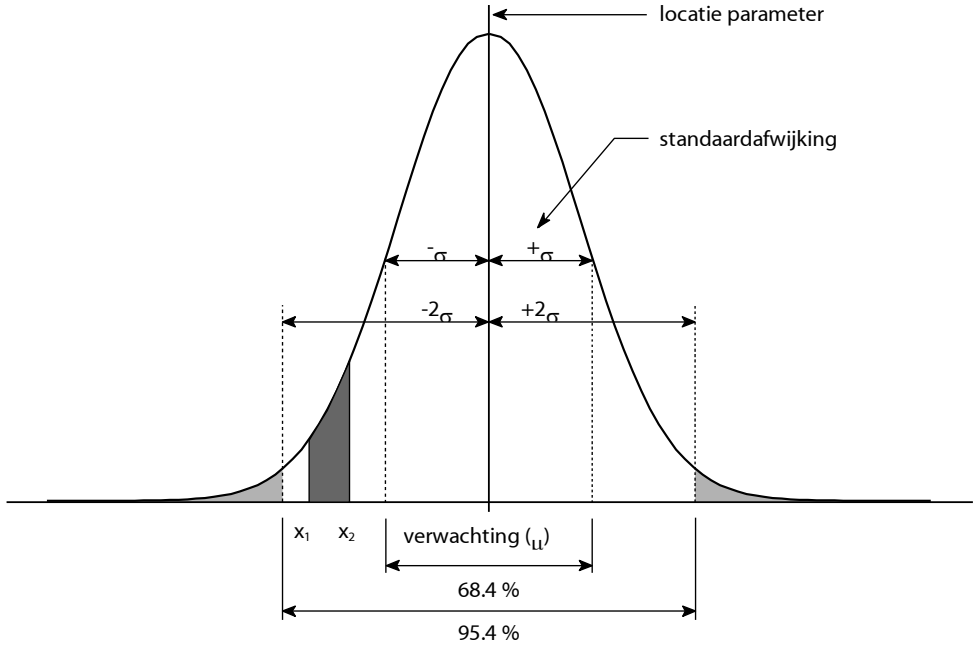
Een vereffening is ook niet oplosbaar wanneer de ligging, oriëntering en schaal van het netwerk (het 'datum') niet zijn vastgelegd. Het vastleggen gebeurt door zogenaamde **constraints** aan de oplossing op te leggen. Het minimum aantal constraints is afhankelijk van de dimensie van het netwerk:

- In geval van een **3D** netwerk zijn er 3 translaties, 3 rotaties en 1 schaalfactor. De singulariteit wordt dan geëlimineerd door middel van het vasthouden van 7 coördinaten (X $Oost_1$, Y $Noord_1$, h_1, X $Oost_2$, Y $Noord_2$, h_2, h_3).
- In geval van een **2D** netwerk zijn er 2 translaties, 1 rotatie en 1 schaalfactor. De singulariteit wordt dan geëlimineerd door middel van het vasthouden van 4 coördinaten (X $Oost_1$, Y $Noord_1$, X $Oost_2$, Y $Noord_2$)
- In geval van een **1D** netwerk kan de locatie van het netwerk bepaald worden door één hoogte vast te houden.

4.2.3. Kansmodel

Geodetische waarnemingen, zoals richtingen, afstanden en hoogteverschillen, zijn stochastische variabelen. Een stochastische variabele kent een zekere grillige variabiliteit: het is een grootheid die bepaalde waarden met bepaalde kansen kan aannemen. De meetuitkomsten die voortvloeien uit bijvoorbeeld de herhaalde meting van de afstand tussen twee punten, zal resulteren in een reeks verschillende waarden. Dit gedrag wordt beschreven met een kansverdeling. Dit betekent dat naast het functiemodel, ook een **kansmodel** dient te worden geformuleerd, dat rekening houdt met de stochastische variabiliteit van waarnemingen.

Geodetische waarnemingen worden geacht normaal verdeeld te zijn (zie figuur 4.2-1). De normale kansverdeling is gebaseerd op de **verwachting** μ en de **standaardafwijking** σ**.** De standaardafwijking is een maat voor de spreiding van meetuitkomsten ten opzichte van μ. De standaardafwijking karakteriseert daarmee de precisie van een waarneming (zie paragraaf 4.3.2, Precisie). Het kwadraat van σ wordt **variantie** genoemd. Er is per definitie een kans van 0.684 dat realisaties van een normaal verdeelde stochastische variabele binnen het interval tussen $-\sigma$ en $+\sigma$ vallen. Voor het interval tussen -2σ en $+2\sigma$ is deze kans 0.954. In het algemeen is de kans dat een stochastische variabele een waarde tussen x_1 en x_2 aanneemt, gelijk aan het oppervlak ingesloten door de kromme en de x_1 en x_2 ordinaten. Dit is het grijze oppervlak in figuur 4.2-1.



figuur 4.2-1: Normale verdeling

Het is mogelijk dat twee of meer waarnemingen onderling afhankelijk of **gecorreleerd** zijn. Dit betekent dat de ene waarneming de andere beïnvloedt. De correlatie tussen twee waarnemingen x en y kan worden vastgelegd door de covariantie σ_{xy}. De covariantie vindt men terug in de definitie van de correlatie coëfficiënt:

$$\rho = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}$$

De coëfficiënt kan waarden aannemen tussen min en plus een:

$$-1 \leq \rho \leq 1$$

Wanneer de waarnemingen onderling onafhankelijk zijn volgt: $\rho = 0$. De vectorelementen (DX, DY, DZ) van een GNSS/GPS basislijn zijn een voorbeeld van gecorreleerde waarnemingen. Om deze correlatie weer te geven wordt een 3x3 matrix gebruikt. In MOVE3 is deze symmetrische matrix een combinatie van standaardafwijkingen en correlatiecoëfficiënten:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{DX} & & \\ \rho_{DXDY} & \sigma_{DY} & \\ \rho_{DXDZ} & \rho_{DYDZ} & \sigma_{DZ} \end{pmatrix}$$

Om praktische redenen, en omdat hun invloed in de vereffening beperkt is, worden correlaties soms verwaarloosd.

In hoofdzaak wordt in het kansmodel een keuze voor de kansverdeling van de waarnemingen vastgelegd. Praktisch gezien betekent dit dat voor elke waarneming een standaardafwijking σ wordt gekozen. De waarde voor σ is gebaseerd op kennis over het meetproces (omstandigheden in het veld, type instrument) en ervaring. De standaardafwijking van de meeste waarnemingen wordt gemodelleerd met een absoluut en een relatief deel. Door middel van het relatieve deel wordt rekening gehouden met een afstandsafhankelijkheid (afstand van opstelpunt naar richtpunt), die karakteristiek is voor de precisie van de meeste waarnemingen. De aldus gevonden standaardafwijkingen worden in de variantie-covariantie matrix Q_y ingevuld (zie paragraaf 4.2.5, Formules). De precisie van de onbekenden in de vereffening hangt vervolgens af van de precisie van de waarnemingen, gegeven in Q_y, en de voortplanting van deze precisie in het functiemodel.

4.2.4. Vereffening in Fasen

De vereffening van een netwerk wordt normaal gesproken uitgevoerd in twee afzonderlijke stappen of fasen:

- vereffening van het vrije netwerk ;
- vereffening van het netwerk na aansluiting.

Door deze benadering wordt de toetsing van de waarnemingen en de bekende punten gescheiden.

Een vrij netwerk kan worden gedefinieerd als een netwerk waarvan de vorm alleen door de waarnemingen wordt bepaald. De ligging, schaal en oriëntering van het netwerk worden vastgelegd door de keuze van een minimum aantal constraints: de coördinaten van de zogenaamde basispunten. Aan het netwerk worden geen extra voorwaarden opgelegd. In een vrij netwerk vereffening ligt de nadruk op de toetsing van de waarnemingen, en niet zozeer op de berekening van coördinaten. Een andere keuze van basispunten zal andere coördinaten opleveren, maar desondanks blijven de resultaten van de statistische toetsing zoals geïmplementeerd in MOVE3 ongewijzigd.

Wanneer na het uitvoeren van een vrij netwerk vereffening de waarnemingsfouten zijn verwijderd, wordt het netwerk aangesloten op de bekende punten. In de **aansluitings**vereffening worden **wel** extra voorwaarden aan de oplossing opgelegd. De nadruk ligt nu op de toetsing van de bekende punten, en op de berekening van de definitieve coördinaten. De vereffening van het aangesloten netwerk kan plaatsvinden met of zonder correcties aan de bekende punten. MOVE3 kent 3 soorten aansluitingsvereffeningen:

- In een zogenaamde **pseudo kleinste kwadraten** vereffening blijven de coördinaten van de bekende punten ongewijzigd. Ook de standaardafwijkingen van de bekende punten zullen niet veranderen. Er worden dus voorwaarden gelegd op zowel de coördinaten als de standaardafwijkingen van de bekende punten.
- Bij een **gewogen aansluitingsvereffening** krijgen de bekende punten wel een correctie. De coördinaten van de bekende punten worden in de vereffening beschouwt als normale waarnemingen, alleen nu met de opgegeven standaardafwijkingen.
- Bij een **vaste aansluitingsvereffening** krijgen de coördinaten van de bekende punten geen correctie, maar worden de standaardafwijkingen van de bekende coördinaten vastgehouden op 0 cm. De bekende coördinaten worden dan in feite als een normale waarnemingen toegevoegd aan het model, alleen zullen ze oneindig veel gewicht krijgen in de vereffening, waardoor ze geen correctie kunnen krijgen.

De keuze voor het soort aansluitingsvereffening heeft **geen** gevolgen voor de toetsing van de bekende punten, omdat voor de toetsing altijd gebruik wordt gemaakt van de opgegeven standaardafwijkingen van de bekende coördinaten.

4.2.5. Formules

Het (gelineariseerde) functiemodel wordt gegeven door:

$$\underline{y} = Ax + \underline{e} + a$$

met:

$\underline{y}$ = (m) vector met waarnemingen;

$\underline{e}$ = (m) vector met correcties;

A = (m x n) design matrix;

x = (n) vector met onbekenden;

a = (m) vector met constanten.

Het kansmodel wordt gegeven door:

$$Q_y = \sigma^2 Q = \frac{1}{\sigma^2} P^{-1}$$

met:

Q_y = (m x m) variantie-covariantie matrix van de waarnemingen;

σ^2 = a-priori variantie factor;

Q = (m x m) gewichtscoëfficiënten matrix;

P = (m x m) gewichtsmatrix.

Het kleinste kwadraten criterium wordt gegeven door het minimaliseren van:

$$\underline{e}^t P \underline{e}$$

De oplossing wordt gegeven door:

$$\underline{\hat{x}} = (A^t P A)^{-1} A^t P (\underline{y} - a)$$

$$s^2 = \frac{e^t P e}{m - n}$$

met:

$(A^t P A)$ = N = (n x n) normaal matrix;

s^2 = a-posteriori variantie factor.

De variantie-covariantie matrix van de onbekenden:

$$Q_{\hat{x}} = \sigma^2 N^{-1}$$

⚠ **Hier wordt de a-priori σ^2 gebruikt, *niet* de a-posteriori s^2**

In geval van een gelineariseerd functiemodel, wordt een oplossing voor de vector met onbekenden x verkregen na een aantal iteratie stappen. Na elke stap worden de benaderde waarden x^0 verbeterd met $\Delta\hat{x}$:

$$\underline{\hat{x}} = x^0 + \Delta\underline{\hat{x}}$$

Na elke iteratie wordt de nieuwe oplossing vergeleken met de vorige. Als aan het iteratie criterium is voldaan, wordt het iteratie proces afgebroken en wordt de laatste oplossing als definitief beschouwd.

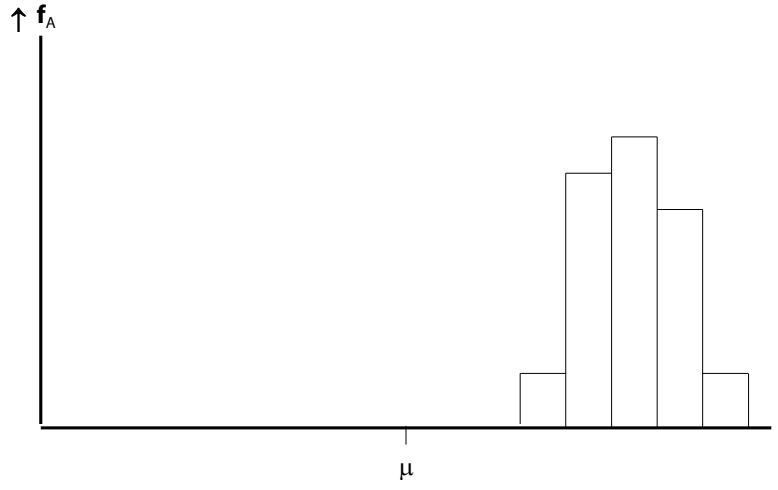
4.3. Precisie en Betrouwbaarheid

Het resultaat van een vereffening dient niet alleen precies, maar ook betrouwbaar te zijn. Het is niet voldoende wanneer de door een meetmethode verkregen waarnemingen alleen precies zijn, dat wil zeggen dat de waarnemingen van dezelfde grootheid onderling overeenstemmen. De waarnemingen dienen ook betrouwbaar te zijn, dat wil zeggen in overeenstemming met de **werkelijke** waarde. De kwaliteit van een netwerk kan daarom worden beschreven door twee elementen: precisie en betrouwbaarheid. De parameters welke precisie en betrouwbaarheid kwantificeren, worden in deze paragraaf nader beschouwd.

4.3.1. Algemeen

Alvorens dieper op de materie in te gaan, is het belangrijk dat men zich realiseert dat precisie en betrouwbaarheid twee verschillende begrippen zijn. Een meetmethode kan erg precies zijn, maar is desondanks niet per definitie betrouwbaar. Aan de andere kant hoeft een betrouwbare meetmethode geen precieze resultaten op te leveren. Vergelijk de frequentie verdelingen f_A en f_B van twee meetmethoden A en B (figuur 4.3-1 en figuur 4.3-2).

De precisie van methode A is beter dan van methode B; de waarnemingen van methode A stemmen beter overeen. Desondanks is methode A niet erg betrouwbaar. Een systematische fout, die door de meetopzet blijkbaar niet is geëlimineerd, heeft een onterechte verschuiving van de verdeling veroorzaakt.



figuur 4.3-1: Frequentieverdeling meetmethode A.

figuur 4.3-2: Frequentieverdeling meetmethode B

Methode B is niet erg precies, maar duidelijk veel betrouwbaarder omdat de verdeling beter gecentreerd is rond de 'werkelijke' waarde □.

In deze paragraaf zal het precisie en betrouwbaarheid concept worden behandeld, samen met de middelen die de gebruiker van MOVE3 ten dienste staan om de precisie en betrouwbaarheid van een netwerk te analyseren.

4.3.2. Precisie

In paragraaf 4.2, Kleinste Kwadraten Vereffening, is de standaardafwijking van waarnemingen behandeld. Het is noodzakelijk om een waarneming te beschrijven door de gemeten waarde, en de bijbehorende standaardafwijking. Door de standaardafwijking worden de stochastische afwijkingen van een waarneming weergegeven. De precisie van een netwerk kan worden gedefinieerd als de invloed van de stochastische afwijkingen in de waarnemingen op de uiteindelijke coördinaten.

In MOVE3 worden de a-posteriori standaardafwijkingen van alle waarnemingen en punten weergegeven. De precisie van punten wordt vaak gepresenteerd met behulp van **standaardellipsen**. Standaardellipsen kunnen worden beschouwd als het tweedimensionale equivalent van standaardafwijkingen. Deze ellipsen worden ook wel 'confidence' ellipsen genoemd. Er is een bepaalde mate van zekerheid (confidence), dat het punt in kwestie inderdaad binnen het door de ellips omsloten gebied gesitueerd is. Voor de standaardellipsen is deze waarschijnlijkheid 0.39 (om een waarschijnlijkheid van 0.95 te krijgen moeten de assen vermenigvuldigd worden met een factor 2.5).

Absolute standaardellipsen representeren de voortplanting van stochastische afwijkingen, via het functiemodel, in de coördinaten. **Relatieve** standaardellipsen representeren de precisie van coördinaat verschillen tussen twee punten. De vorm van een ellips wordt bepaald door de halve lange as *A* en de halve korte as *B*. De oriëntering van de absolute standaardellips wordt gedefinieerd door de hoek *Phi* tussen de halve lange as en de Y Noord as van het coördinatenstelsel. De oriëntering van de relatieve standaardellips wordt gedefinieerd door de hoek *Psi* tussen de halve lange as en de verbindingslijn tussen de twee punten.

Zoals beschreven in paragraaf 4.2, Kleinste Kwadraten Vereffening, worden de ligging, oriëntering en schaal van een netwerk bepaald door het vasthouden van een aantal punten, de zogenaamde basispunten. De interpretatie van standaardellipsen wordt bemoeilijkt omdat deze afhankelijk zijn van de keuze van de basispunten; ze zijn basisafhankelijk. In een vrije netwerk vereffening zal de grootte van de ellipsen systematisch oplopen met de afstand tot de basispunten. Omdat een andere keuze van basispunten anders gevormde ellipsen tot gevolg heeft, is het moeilijk om uitspraken te doen over de precisie van het netwerk wanneer alleen de standaardellipsen worden beschouwd. Daarom worden in de vrije netwerkvereffening zogenaamde **criteriumcirkels** geconstrueerd, die een zelfde afhankelijkheid van de gekozen basispunten vertonen. De criteriumcirkels bepalen een theoretisch model, dat een homogene precisie van het netwerk weergeeft, gebaseerd op dezelfde basispunten. Het is duidelijk dat de verhouding tussen de halve lange as van de standaardellips en de straal van de criteriumcirkel, A/R, van groter belang is dan de afzonderlijke waarden. Dit verhoudingsgetal hangt echter ook tot op zekere hoogte af van de keuze van de basis punten. Strikt genomen geldt dit ook nog, maar in veel geringere mate, voor de verhouding A/R behorende bij de relatieve standaardellipsen. In de meeste gevallen gedraagt de laatste grootheid zich echter nagenoeg basisonafhankelijk.

Het criteriummodel, weergegeven door de criteriumcirkels, wordt vastgelegd door de parameters **C0** en **C1**. De C0 parameter bepaalt het absolute deel van de precisie. De C1 parameter, het relatieve deel, is een coëfficiënt die aangeeft wat de invloed van de onderlinge afstand is op de relatieve precisie tussen twee punten. Vaak worden de empirisch vastgestelde waarden C0 = 0 cm² en C1 = 1 cm²/km toegepast.

4.3.3. Betrouwbaarheid

De betrouwbaarheid van een netwerk kan worden beschreven in termen van gevoeligheid voor de detectie van fouten. Betrouwbaarheid kan worden onderverdeeld in **interne** en **externe** betrouwbaarheid:

- **Interne betrouwbaarheid** wordt uitgedrukt door de grenswaarde oftewel **Minimal Detectable Bias** (MDB). De MDB geeft de grootte weer van de fout in een waarneming, die nog juist door de statistische toetsing (datasnooping) zal worden ontdekt, met een waarschijnlijkheid gelijk aan het onderscheidingsvermogen γ van

de toetsing. Een grote MDB duidt op een zwak gecontroleerde waarneming of bekende coördinaat. Dit betekent: hoe groter de MDB waarden, hoe zwakker de betrouwbaarheid. Wanneer een waarneming of gegeven coördinaat helemaal niet wordt gecontroleerd kan geen MDB worden berekend. Dan wordt door MOVE3 de melding '*vrije waarneming*' afgedrukt. Omdat het niet eenvoudig is om de grenswaardes van verschillende waarnemingstypes met elkaar te vergelijken wordt soms gebruik gemaakt van de **genormaliseerde grenswaarde** (MDBn) . Door de grenswaarde te relateren aan de spreiding van de waarneming kan de invloed van de maateenheid worden geëlimineerd. De genormaliseerde grenswaarde is een dimensieloze grootheid en daardoor zeer geschikt voor het vergelijken van waarnemingsgrootheden met een verschillende maateenheid. Bij ongecorreleerde waarnemingen is de genormaliseerde grenswaarde gelijk aan de grenswaarde gedeeld door de standaardafwijking van de waarneming. Een grote genormaliseerde grenswaarde duidt op een slecht gecontroleerde waarneming.

- **Interne betrouwbaarheid** kan ook worden weergegeven door het **Redundantiegetal**. Het (lokale) redundantiegetal representeert de bijdrage van een waarneming aan de totale overtalligheid. Het lokale redundantiegetal ligt in het besloten interval $0 \leq r_i \leq 1$ (in de MOVE3 uitvoerfile wordt het gepresenteerd als een percentage 0-100%). De correctie gedeeld door het redundantiegetal geeft de grootte van de waarnemingsfout weer. Een hoog redundantiegetal betekent een sterk gecontroleerde waarneming. Het redundantiegetal is gelijk aan nul indien de waarneming in zijn geheel niet gecontroleerd is ('*vrije waarneming').* De som van alle lokale redundantiegetallen is gelijk aan de overtalligheid.

- **Externe betrouwbaarheid** wordt uitgedrukt door de signaal-ruis verhouding oftewel de **Bias to Noise Ratio** (BNR). De externe betrouwbaarheid wordt gebruikt om de invloed te bepalen van mogelijke fouten in de waarnemingen op de vereffende coördinaten. De BNR van een waarneming geeft deze invloed weer, waarbij de grootte van de mogelijke waarnemingsfout gelijk wordt gesteld aan de MDB van deze waarneming. De BNR is een dimensieloze parameter waarin de invloed van één enkele waarnemingsfout op alle vereffende coördinaten wordt gecombineerd. Een meer praktische interpretatie kan gegeven worden wanneer de BNR beschouwd wordt als een bovengrens voor de verhouding tussen de invloed ∇ van de MDB van een waarneming op elke willekeurige coördinaat x, en de a-posteriori standaardafwijking σ van deze coördinaat:

$$\left| \frac{\nabla_X}{\sigma_X} \right| \leq BNR$$

Met andere woorden: de BNR kan worden geïnterpreteerd als de verhouding tussen betrouwbaarheid en precisie. Het is wenselijk dat de BNR homogeen is over het gehele net.

- **Externe betrouwbaarheid** kan ook worden weergegeven door de **Betrouwbaarheidsrechthoek**. De Betrouwbaarheidsrechthoek (voor elk punt berekend) wordt gebruikt als maat voor de invloed van een mogelijke fout in de waarnemingen of bekende coördinaten op de vereffende coördinaten. De grootte van de rechthoek wordt berekend voor een mogelijke fout (ter grootte van de MDB) in de waarneming of bekende coördinaat die de grootste invloed heeft op de coördinaat. De rechthoek geeft het gebied weer waar het punt in ligt (waarschijnlijkheid van 80 %) indien alle waarnemingen en bekende coördinaten van het netwerk door de statistische toetsen zijn aanvaard.

Een belangrijke eigenschap van zowel de MDB, redundantie getal als de BNR is dat ze **basisonafhankelijk** zijn.

De Betrouwbaarheidsrechthoek is **basisafhankelijk**.

Het onderstaande voorbeeld (tabel 4.3-1) illustreert het gedrag van de betrouwbaarheidsparameters.

Waarneming	Aflezing(m)	MDB (m)	Red	BNR	W-toets
Afstand A-B	1051.426	0.048	82	10.8	-0.76
Afstand A-B + Δ	1051.476	0.048	82	10.8	3.53**

tabel 4.3-1: Voorbeeld interne en externe betrouwbaarheid.

In dit voorbeeld is de afstand A-B een waarneming in een netwerk dat vereffend en getoetst is. Zoals blijkt uit de eerste waarde in de laatste kolom, heeft de toetsing deze waarneming geaccepteerd (kritieke waarde W-toets = 3.29). De interne betrouwbaarheid wordt gegeven door een MDB van 0.048 m. Dit betekent dat een fout van deze grootte waarschijnlijk door de W-toets zal worden gevonden (zie paragraaf 4.4.3, W-toets). Om dit te verifiëren, wordt een fout Δ van 0.05 m in de afstand A-B gestopt. Het netwerk wordt vervolgens opnieuw vereffend en getoetst met inbegrip van de fout. Zoals blijkt uit de tweede waarde in de laatste kolom, wordt de waarneming nu verworpen door de W-toets omdat de kritieke waarde wordt overschreden.

De externe betrouwbaarheid wordt gegeven door een BNR van 10.8. Dit betekent dat de invloed van de MDB van 0.048 m op elke coördinaat in het net, kleiner is dan 10.8 keer de a-posteriori standaardafwijking van de coördinaat. Het is in het algemeen wenselijk een homogene externe betrouwbaarheid te hebben over het gehele net. Het netwerk in het voorbeeld is homogeen, wanneer de BNR waarden van alle waarnemingen ongeveer even groot zijn. Aan de andere kant wordt het netwerk als inhomogeen beschouwd wanneer de BNR van bijvoorbeeld de afstand A-B, de BNR's van andere waarnemingen sterk overschrijdt. Het netwerk is dan instabiel of inhomogeen, d.w.z. de betrouwbaarheid is in hoge mate afhankelijk van één enkele waarneming.

4.4. Toetsing

Het doel van statistisch toetsen is om na te gaan of het functiemodel en kansmodel (zie paragraaf 4.2, Kleinste Kwadraten Vereffening), een juiste weergave van de 'werkelijkheid' geven. Bovendien is het van belang om mogelijke fouten en blunders, die de nauwkeurigheid negatief kunnen beïnvloeden, vroegtijdig te ontdekken. Dit maakt statistisch toetsen essentieel voor het proces van kwaliteitscontrole. De hier beschreven toetsing wordt uitgevoerd in samenhang met de kleinste kwadraten vereffening. De toetsing is deels gebaseerd op de analyse van kleinste kwadraten correcties of residuen. Het opsporen van mogelijke fouten kan ook worden uitgevoerd voorafgaand aan de vereffening, bijvoorbeeld in de vorm van een toetsing van sluitfouten in kringen of een controle op onjuiste puntnummering. Deze methoden zijn echter onderdeel van de voorbewerking (preprocessing), en worden hier verder niet besproken.

Er zijn drie types statistische toetsen in MOVE3 geïmplementeerd: de F-toets, de W-toets en de T-toets. In deze paragraaf worden de toets procedures besproken, voorafgegaan door een algemene beschrijving van hypothese toetsing. In de laatste twee paragrafen wordt aandacht besteed aan de interpretatie van de toetsingsresultaten en geschatte fouten.

4.4.1. Algemeen

Het functiemodel en kansmodel zijn gebaseerd op een aantal veronderstellingen. Deze verzameling veronderstellingen wordt een statistische **hypothese** genoemd. Verschillende veronderstellingen leiden tot verschillende hypothesen. Statistische toetsen worden ingezet om hypothesen te verifiëren. Een speciale verzameling veronderstellingen is bekend onder de naam nul-hypothese H_0. Deze hypothese houdt in dat:

- de waarnemingen geen grove fouten of blunders bevatten;
- het functiemodel een correcte beschrijving vormt van de relaties tussen waarnemingen en onbekenden;
- het gekozen kansmodel voor de waarnemingen de stochastische eigenschappen op een correcte wijze beschrijft.

Het is duidelijk dat de toetsing van de hypothese twee uitkomsten kan hebben: aanvaarding of verwerping. De zogenaamde **kritieke waarden** zijn beslissend voor aanvaarding of verwerping. De kritieke waarden leggen als het ware de acceptatie grenzen vast. Hoe verder een waarde van deze grenzen verwijderd is, hoe minder

waarschijnlijk dat de hypothese geldt. Kritieke waarden worden bepaald op basis van een **onbetrouwbaarheidsdrempel** α (level of significance). De waarschijnlijkheid dat een kritieke waarde wordt overschreden alhoewel de hypothese geldig is, is gelijk aan α. Met andere woorden, α is de waarschijnlijkheid van een onterechte verwerping. De complementaire 1-α, het zogenaamde **betrouwbaarheidsinterval**, geeft een maat voor het vertrouwen dat men in de beslissing 'aanvaarding of verwerping' kan hebben.

Wanneer de nul-hypothese H_0 wordt getoetst, kunnen er twee ongunstige situaties optreden:

- Verwerping van H_0 terwijl deze correct is. De waarschijnlijkheid dat deze situatie optreedt is gelijk aan de onbetrouwbaarheidsdrempel α. Dit wordt een Type I fout genoemd (tabel 4.4-1,Toetsing van nul-hypothese).
- Acceptatie van H_0 terwijl deze niet correct is. De waarschijnlijkheid dat deze situatie optreedt is gelijk aan 1-γ, waar γ het onderscheidingsvermogen van de toets is. Dit wordt een Type II fout genoemd (tabel 4.4-1,Toetsing van nul-hypothese).

SITUATIE	**BESLISSING: aanvaard H_0**	**BESLISSING: verwerp H_0**
H_0 correct	correcte beslissing: waarschijnlijkheid = 1-α	Type I fout: waarschijnlijkheid = α
H_0 niet correct	Type II fout: waarschijnlijkheid = 1-γ	correcte beslissing: waarschijnlijkheid = γ

tabel 4.4-1: Toetsing van nul-hypothese

In de volgende drie paragrafen worden methoden besproken voor het toetsen van de nul-hypothese en alternatieve hypothesen.

4.4.2. F-toets

De F-toets is een algemene, meerdimensionale toets voor het verifiëren van de nul-hypothese H_0. De F-toets wordt ook wel 'overall model test' genoemd, omdat het model in algemene zin getoetst wordt.

De uitkomst van de F-toets wordt gegeven door:

$$F = s^2 / \sigma^2$$

met

s^2 = a-posteriori variantie factor, afhankelijk van de correcties en de overtalligheid;

σ^2 = a-priori variantie factor.

Voor de toetsing wordt de kritieke waarde van de F-verdeling gebruikt, welke een functie is van de overtalligheid en de onbetrouwbaarheidsdrempel α. De oorzaken van verwerping, hieronder beschreven, kunnen zijn: grove fouten, een onjuist functiemodel en een onjuist kansmodel.

De informatie die uit de F-toets voortvloeit, namelijk aanvaarding of verwerping van de nul-hypothese, is niet erg specifiek. Wanneer de H_0 verworpen wordt, moet men verder zoeken naar fouten in de waarnemingen of in de gemaakte veronderstellingen. Grove fouten kunnen worden opgespoord met de W-toets. Bij de zogenaamde **datasnooping** wordt gebruik gemaakt van de W-toets om alle waarnemingen afzonderlijk te toetsen. De F- en de W-toets zijn onderling verbonden door een gemeenschappelijke waarde voor het onderscheidingsvermogen γ. Dit is de zogenaamde **B-methode van toetsen**. De W-toets en de B-methode van toetsen worden in de volgende paragraaf verder toegelicht.

Het kan ook voorkomen dat het functiemodel niet correct, of niet verfijnd genoeg is. Bijvoorbeeld de verticale refractiecoëfficiënt is ten onrechte verwaarloosd, of waarnemingen uit verschillende datums zijn gecombineerd zonder dat met een gelijkvormigheidstransformatie rekening is gehouden. In dit geval moet het functiemodel worden aangepast, om inferieure resultaten te voorkomen.

Een andere oorzaak van verwerping kan een te optimistische variantie-covariantie matrix zijn. Een remedie voor een dergelijke verwerping is het verhogen van de ingevoerde standaardafwijkingen van de waarnemingen. Vanzelfsprekend moet men hierbij wel het doel van de statistische toetsing voor ogen houden; het doel is niet om alle waarnemingen geaccepteerd te krijgen, maar om eventuele blunders of modelfouten te ontdekken.

Vanzelfsprekend kunnen bovenstaande oorzaken van verwerping ook in combinatie voorkomen.

4.4.3. W-toets

Een verwerping van de F-toets leidt niet direct naar de mogelijke oorzaak. Daarom dienen, wanneer de nul-hypothese wordt verworpen, andere hypothesen te worden geformuleerd die een bepaalde fout of combinatie van fouten beschrijven.

Er bestaat een oneindig aantal hypothesen, die alle als alternatief ten opzichte van de nul-hypothese geformuleerd kunnen worden. Wanneer deze hypothesen te complex worden, worden ze bijzonder moeilijk te interpreteren. Een simpele en effectieve hypothese is de zogenaamde **conventionele alternatieve hypothese**, gebaseerd op de veronderstelling dat er een fout aanwezig is in één enkele waarneming, terwijl alle andere correct zijn. De W-toets is een eendimensionale toets die van deze hypothese uitgaat.

De veronderstelling van een enkele fout is in de meeste gevallen zeer realistisch. Een grote verwerping van de F-toets kan vaak worden terug gevoerd op een grove fout of blunder in één waarneming. Er kan voor elke waarneming een alternatieve hypothese worden opgesteld, waarmee elke waarneming afzonderlijk kan worden getoetst. Het proces van toetsing van elke waarneming in het netwerk met de W-toets wordt **datasnooping** genoemd.

De grootte van de kleinste kwadraten correctie is geen echt goede indicator bij het zoeken naar mogelijke fouten in de waarnemingen. Beter geschikt als toetsgrootheid, echter alleen voor ongecorreleerde waarnemingen, is de kleinste kwadraten correctie gedeeld door zijn standaardafwijking. Bij gecorreleerde waarnemingen, bijvoorbeeld de drie elementen van een GNSS/GPS basislijn, moet echter ook rekening gehouden worden met de gewichtsmatrix van de waarnemingen. Dit laatste gebeurt bij de toetsgrootheid W van de W-toets. Deze toetsgrootheid kent een standaard normale verdeling, en is optimaal gevoelig voor een fout in een enkele waarneming.

De kritieke waarde W_{crit} is afhankelijk van de keuze van de onbetrouwbaarheidsdrempel α_0. Als $W>W_{crit}$ (de W-toets wordt verworpen), is er een waarschijnlijkheid $1-\alpha_0$ dat de bijbehorende waarneming inderdaad een fout bevat. Aan de andere kant is er een waarschijnlijkheid α_0 dat de waarneming toch correct is, hetgeen betekent dat de verwerping niet gerechtvaardigd is. In de geodesie zijn waarden voor α_0 tussen de 0.001 en 0.05 het meest gebruikelijk. De tabel 4.4-2 geeft een overzicht van α_0 waarden, en de bijbehorende kritieke waarden. De eigenlijke keuze is afhankelijk van hoe streng men de waarnemingen wil toetsen. Een strenge toetsing (kleine kritieke waarde), betekent een grote α_0 en bijgevolg een toenemende kans op verwerping van correcte waarnemingen. Een α_0 = 0.001 betekent één onterechte verwerping bij elke 1000 getoetste waarnemingen. De praktijk heeft bewezen dat dit een werkbare keuze is.

onbetrouwbaarheidsdrempel α_0	**0.001**	**0.010**	**0.050**
kritieke waarde W-toets	3.29	2.58	1.96

tabel 4.4-2: Overzicht onbetrouwbaarheidsdrempel/kritieke waarden.

Het is essentieel bij de B-methode van toetsen dat een bepaalde fout met dezelfde waarschijnlijk wordt ontdekt in zowel de F-toets als de W-toets. Daarom wordt voor het onderscheidingsvermogen γ van beide toetsen een vaste waarde gekozen, meestal 0.80. De onbetrouwbaarheidsdrempel α_0 van de W-toets wordt ook vastgehouden, zodat de onbetrouwbaarheidsdrempel α van de F-toets moet worden berekend. Deze α is sterk afhankelijk van de overtalligheid in het netwerk. In grote netwerken, bestaande uit een grote hoeveelheid waarnemingen en met een grote overtalligheid, is het moeilijk voor de F-toets om op een enkele waarnemingsfout te reageren. De F-toets, als algemene toets van het model, is voor dit doel niet gevoelig genoeg. Bijgevolg zal door de link tussen de F-toets en de W-toets, waarbij het onderscheidingsvermogen wordt vastgehouden op (bijvoorbeeld) 0.80, de onbetrouwbaarheidsdrempel α sterk toenemen. Daarom wordt in de praktijk altijd een datasnooping uitgevoerd, onafhankelijk van het resultaat van de F-toets.

Tijdens de datasnooping wordt elke waarneming afzonderlijk getoetst met behulp van de conventionele alternatieve hypothesen. Er kunnen echter nog meer alternatieve hypothesen getoetst worden. In MOVE3 wordt van een speciale alternatieve hypothese gebruik gemaakt om **antennehoogte fouten** op te sporen in GNSS/GPS basislijnen. Deze hypothese is gebaseerd op de veronderstelling dat een dergelijke fout zal samenvallen met de richting van de lokale verticaal. De antennehoogte W-toets heeft zich bewezen als een zeer effectieve toets, bijvoorbeeld bij het opsporen van 10 cm antennehoogte afleesfouten.

4.4.4. T-toets

Zoals reeds besproken in paragraaf 4.4.3, W-toets, is de W-toets een ééndimensionale toets die gebruik maakt van de conventionele alternatieve hypothesen. Deze hypothesen zijn gebaseerd op de veronderstelling dat er telkens één fout in het waarnemingsmateriaal aanwezig is. De datasnooping, die van de conventionele hypothesen gebruik maakt, functioneert goed voor enkele waarnemingen, zoals richtingen, afstanden, zenithoeken, azimuts en hoogteverschillen. Echter, voor waarnemingen zoals GNSS/GPS basislijnen is het vaak niet voldoende om de DX-, DY-, en DZ-elementen afzonderlijk te toetsen. Het is noodzakelijk om de basislijn ook als één geheel te toetsen.

Voor een dergelijke meerdimensionale toetsing wordt de T-toets gebruikt. Afhankelijk van de dimensie van de te toetsen grootheid, is de T-toets drie- of tweedimensionaal. Net als de W-toets is ook de T-toets met de F-toets verbonden door de B-methode van toetsen. De T-toets heeft hetzelfde onderscheidingsvermogen als de beide andere toetsen, maar heeft een eigen onbetrouwbaarheidsdrempel en kritieke waarde (tabel 4.4-3 en tabel 4.4-4).

onbetrouwbaarheidsdrempel α_0	**0.001**	**0.010**	**0.050**
onbetrouwbaarheidsdrempel α (2-dim)	0.003	0.022	0.089
kritieke waarde T-toets	5.91	3.81	2.42

tabel 4.4-3: Overzicht onbetrouwbaarheidsdrempel/kritieke waarden voor tweedimensionale T-toets, gebaseerd op α_0 van de W-toets.

Onbetrouwbaarheidsdrempel α_0	**0.001**	**0.010**	**0.050**
onbetrouwbaarheidsdrempel α (3-dim)	0.005	0.037	0.129
kritieke waarde T-toets	4.24	2.83	1.89

tabel 4.4-4: Overzicht onbetrouwbaarheidsdrempel/kritieke waarden voor driedimensionale T-toets, gebaseerd op α_0 van de W-toets.

De T-toets is ook van belang bij de toetsing van bekende punten. De datasnooping zoekt naar een fout, bijvoorbeeld een typefout, in ofwel de X Oost, **of** de Y Noord **of** de h-coördinaat. De verschuiving (deformatie) van een punt zal door de datasnooping niet gevonden worden, wanneer de afzonderlijke verschuivingen in X Oost, Y Noord en h-richting klein blijven. Om te kunnen toetsen op een complete verschuiving, d.w.z. in X Oost, **en** Y Noord, **en** h-richting, is een afwijkende alternatieve hypothese noodzakelijk. De driedimensionale T-toets toetst het volledige coördinaat drietal, en is dus beter toegerust om dergelijke verschuivingen op te sporen. De T-toets kan echter niet de richting bepalen waarin het punt zich heeft verplaatst.

⚠ **Het kan voorkomen dat de W-toets wordt aanvaard, terwijl de T-toets van dezelfde waarneming of coördinaat wordt verworpen. Dit is geen tegenstrijdige situatie; het is een kwestie van het toetsen van verschillende hypothesen.**

4.4.5. Interpreteren van Toetsingsresultaten

Wanneer men te maken heeft met toetsingsresultaten dient men zich te realiseren dat het begrip 'waarschijnlijkheid' in de toetsing een belangrijke rol speelt, en dat er geen 'absolute waarheden' bestaan. Met statistiek in het algemeen moet zorgvuldig worden omgegaan, dat wil zeggen met gebruik van het gezond verstand, praktische ervaring en aanvullende onafhankelijke bewijzen.

Zoals besproken in paragraaf 4.4.2, F-toets, kan de F-toets worden verworpen wanneer er sprake is van:

- grove fouten of blunders;
- een niet correct functiemodel;
- een niet correct kansmodel.

Het feit dat ook een combinatie van deze oorzaken mogelijk is, maakt het moeilijk om direct conclusies te trekken uit de verwerping van de F-toets. In het algemeen duidt een verworpen F-toets, in combinatie met een bepaald patroon van verworpen W-toetsen, op een fout in het functiemodel. Een incidenteel verworpen W-toets duidt op een of meer grove fouten.

Omdat de F-toets, W-toets en T-toets met elkaar verbonden zijn, is het logisch om de toetsen in combinatie te beschouwen:

- Een verworpen F-toets, in combinatie met een beperkt aantal W-toets (T-toets) verwerpingen, duidt in het algemeen op een of meer waarnemingsfouten.
- Wanneer de F-toets wordt verworpen, in combinatie met verworpen W-toetsen van alle waarnemingen van een specifiek type (bijvoorbeeld alle zenithoeken), kan de oorzaak wellicht gevonden worden in het functiemodel dat gecorrigeerd of verfijnd dient te worden. Bijvoorbeeld wanneer de W-toets van alle zenithoeken worden verworpen, kan het nodig zijn refractiecoëfficiënten mee te schatten.
- Wanneer de F-toets wordt verworpen, evenals de meeste W-toetsen (zonder echte uitschieters), kan de oorzaak bij het kansmodel liggen. De ingevoerde standaardafwijkingen zijn dan te optimistisch gekozen. Aan de andere kant kan het zijn dat de F-toets waarde ruim onder de kritieke waarde blijft, terwijl alle W-toets (T-toets) waarden rond de 0 liggen. In dat geval zijn de ingevoerde standaardafwijkingen wellicht te pessimistisch.

Stel dat de datasnooping van waarnemingen in een bepaald netwerk resulteert in een (beperkt) aantal verwerpingen. Er wordt aangenomen dat de verwerpingen niet veroorzaakt worden door fouten in het functiemodel, en dat voor de hand liggende fouten (bijvoorbeeld typefouten) al zijn hersteld. Dan blijft er een aantal mogelijkheden over:

- **Verwijder** de bij de verwerping horende waarneming.

  Dit is een toegestane, maar wel vérgaande manier om verwerpingen tegen te gaan. Men dient zich te realiseren dat het verwijderen van waarnemingen de overtalligheid doet afnemen, en dat daarmee de precisie en betrouwbaarheid wordt beïnvloed.

- **Hermeet** de bij de verwerping horende waarneming.

  Dit is een voor de hand liggende, maar ook kostbare methode, vooral wanneer de metingen in het veld reeds afgerond zijn. Het is daarom aan te bevelen om zoveel mogelijk van de waarnemingen ter plekke te verwerken.

- **Verhoog** de standaardafwijking van de bij de verwerping horende waarneming.

  Het verhogen van de standaardafwijking is een methode die altijd werkt, dat wil zeggen dat de F-, W- en T-toets waarden consequent lager zullen worden. Men dient echter wel het doel van de statistische toetsing voor ogen houden; het doel is niet om alle waarnemingen geaccepteerd te krijgen, maar om eventuele blunders of modelfouten te ontdekken.

- **Negeer** de verwerpingen.

  Vanzelfsprekend mogen verwerpingen niet zomaar genegeerd worden. Aan de andere kant kan het zijn dat de W-toets waarde de kritieke waarde slechts marginaal overschrijdt. In dat geval is het nuttig om de bij de verwerping horende geschatte fout te bekijken, en na te gaan of een dergelijke fout acceptabel is. Men dient ook rekening te houden met de mogelijkheid van een aantal ten onrechte verworpen waarnemingen.

⚠ **Het is niet de bedoeling om waarnemingen of bekende coördinaten zodanig te veranderen dat ze beter in het netwerk passen, tenzij de oorzaak van de fout (bijvoorbeeld een typefout) overduidelijk is.**

4.4.6. Geschatte Fouten

De fout die verantwoordelijk is voor de verwerping van de W-toets of T-toets, wordt geschat door MOVE3. Deze zogenaamde geschatte fout is een nuttig gereedschap bij het zoeken naar echte fouten. Men moet hier evenwel voorzichtig zijn:

- Beschouw alleen de geschatte fout behorend bij de grootste W-toets of T-toets waarde.

- De geschatte fout behorend bij een verwerping van de W-toets is gebaseerd op de conventionele alternatieve hypothese dat slechts in één waarneming of bekende coördinaat een fout is gemaakt. Wanneer er meer fouten in het netwerk zitten, dan heeft het resultaat van de schatting mogelijk weinig betekenis, tenzij het (geografisch) ver uit elkaar liggende waarnemingen of bekende coördinaten betreft.

- De geschatte fout behorend bij een verwerping van de T-toets is gebaseerd op de conventionele alternatieve hypothese dat één GNSS/GPS basislijn of de coördinaten van slechts één bekend punt foutief zijn. Wanneer er meer fouten aanwezig zijn, dan heeft het resultaat van de schatting mogelijk weinig betekenis, tenzij het (geografisch) ver uit elkaar liggende basislijnen of punten betreft.

- Bekende coördinaten worden getoetst door de W-toets en T-toets bij een aansluitingsvereffening. De toetsingsresultaten en de geschatte fouten hebben alleen betekenis, als fouten in de waarnemingen zijn gecorrigeerd in de voorafgaande vrije netwerk vereffening en toetsing.

5. Overzichten

5.1. Overzicht van Kaartprojecties en Constanten

Lokaal (voorbeeld waarden):

Projectie type:	Stereografisch
Lengte Oorsprong:	0°
Breedte Oorsprong:	0°
Schaalfactor:	1.0
Translatie Oost:	0 m
Translatie Noord:	0 m
Ellipsoïde:	Bessel 1841

Universal Transverse Mercator (UTM):

Projectie type:	Transversale Mercator
Centrale Meridiaan:	Afhankelijk van de zone, beginnend bij 177° W (183° O) en toenemend met 6° oostwaarts tot 177° O. De zone nummering begint in dit geval bij 1 en loopt op tot 60.
Breedte Oorsprong:	0° (de evenaar)
Schaalfactor:	0.9996
Translatie Oost:	500000.0 m
Translatie Noord:	0.0 m op het noordelijk halfrond
	10000000.0 m op het zuidelijk halfrond
Ellipsoïde:	International (Hayford)

België:

Projectie type:	Lambert 72
Lengte Oorsprong:	04° 21' 24.983" O
Breedte Oorsprong:	50° 47' 57.704" N
1e Standaard Parallel:	49° 50' 00.000" N
2e Standaard Parallel:	51° 10' 00.000" N

Translatie Oost:	150000.0 m
Translatie Noord:	5400000.0 m
Ellipsoïde:	International (Hayford)

Duitsland:

Projectie type:	Gauss-Krüger
Centrale Meridiaan:	3° O voor zone 1
	6° O voor zone 2
	9° O voor zone 3
	12° O voor zone 4
	15° O voor zone 5
Breedte Oorsprong:	0° (de evenaar)
Schaalfactor:	1.0
Translatie Oost:	1500000.0 m voor zone 1
	2500000.0 m voor zone 2
	3500000.0 m voor zone 3
	4500000.0 m voor zone 4
	5500000.0 m voor zone 5
Translatie Noord:	0 m
Ellipsoïde:	Bessel 1841

Frankrijk:

Projectie type:	Lambert
Lengte Oorsprong:	02° 20' 13.94952" O (0 Grad Parijs)
Breedte Oorsprong:	standaard parallel
Standaard Parallel:	49° 30' 00.0" O (55 Grad) Zone Nord
	46° 48' 00.0" O (52 Grad) Zone Centre
	44° 06' 00.0" O (49 Grad) Zone Sud
	42° 09' 54.0" O (46.85 Grad) Corse

Schaalfactor:	0.9998773411 Zone Nord
	0.9998774203 Zone Centre
	0.9998774993 Zone Sud
	0.9999447095 Corse
Translatie Oost:	600000.0 m
Translatie Noord:	200000.0 m
Ellipsoïde:	Clarke 1880

Groot Brittannië:

Projectie type:	Transversale Mercator
Centrale Meridiaan:	358° O
Breedte Oorsprong:	49° N
Schaalfactor:	0.9996013
Translatie Oost:	400000.0 m
Translatie Noord:	-100000.0 m
Ellipsoïde:	Airy

Maryland (als een voorbeeld voor de US):

Projectie type:	Lambert
Lengte Oorsprong:	283° 00' 0.0" O
Breedte Oorsprong:	37° 40' 0.0" N
1e Standaard Parallel:	38° 18' 0.0" N
2e Standaard Parallel:	39° 27' 0.0" N
Translatie Oost:	400000.0 m
Translatie Noord:	0 m
Ellipsoïde:	Clarke 1866

Nederland:

Projectie type:	Stereografisch (RD)

Lengte Oorsprong:	05° 23' 15.500" O
Breedte Oorsprong:	52° 09' 22.178" N
Schaalfactor:	0.9999079
Translatie Oost:	155000.0 m
Translatie Noord:	463000.0 m
Ellipsoïde:	Bessel 1841

Oostenrijk:

Projectie type:	Gauss-Krüger
Centrale Meridiaan:	10° 20' 0.0" O (28° oost van Ferro)
	13° 20' 0.0" O (31° oost van Ferro)
	16° 20' 0.0" O (34° oost van Ferro)
	(Ferro is 17° 40' 0.0" west van Greenwich)
Breedte Oorsprong:	0° (de evenaar)
Schaalfactor:	1.0
Translatie Oost:	0 m
Translatie Noord:	0 m
Ellipsoïde:	Bessel 1841

5.2. Literatuurlijst

Baarda, W.: 'A Testing Procedure for Use in Geodetic Networks', Netherlands Geodetic Commission, Publications on Geodesy, New Series, Vol. 2, No. 4, Delft (1968).

Baarda, W.: 'S-transformations and Criterion Matrices', Netherlands Geodetic Commission, Publications on Geodesy, New Series, Vol. 5, No. 1, Delft (1973).

Bakker, G., J.C. de Munck, G.L. Strang van Hees: 'Course on Radiopositioning', Department of Geodesy, Delft University of Technology (1985).

Brouwer, F.J.J., D.T. van Daalen, J.T. Gravensteijn, H.M. de Heus, J.J. Kok, P.J.G. Teunissen: 'The Delft approach for the design and computation of geodetic networks', in Forty Years of Thought, Geodetic Computer Centre, Delft (1982).

Heck, B.: 'Rechenverfahren und Auswertemodelle der Landesvermessung', Herbert Wichmann Verlag (1987).

Polman, J., M.A. Salzmann (redacteuren): 'Handleiding voor de Technische Werkzaamheden van het Kadaster', Kadaster Apeldoorn (1996).

Leick, A.: 'Satellite Surveying', John Wiley & Sons (1990).

Teunissen, P.J.G.: ' Adjustment theory, an introduction', Delft Academic Press (2004).

Teunissen, P.J.G.: ' Network quality control, Delft Academic Press (2006).

Vanicek, P., E.J. Krakiwsky: 'Geodesy: the concepts', North Holland (1986).

Wells, D.: 'Guide to GPS Positioning', Canadian GPS Associates (1986).

5.3. Verklarende Woordenlijst

Aangesloten netwerk vereffening: In een aangesloten netwerk vereffening wordt het netwerk aangesloten op *alle* bekende punten. In MOVE3 zijn er 3 verschillende aansluitingsvereffeningen. Bij de **pseudo** kleinste kwadraten methode blijven zowel de bekende coördinaten als de standaardafwijkingen van de bekende coördinaten na de vereffening ongewijzigd. Bij een **gewogen** aansluitingsvereffening, worden de bekende coördinaten als 'gewone' waarnemingen aan het model toegevoegd en zullen dus een correctie krijgen in de vereffening. Bij een **vaste** aansluitingsvereffening worden de bekende coördinaten eveneens als waarnemingen aan het model toegevoegd, alleen nu met een standaardafwijking van 0 meter, zodat ze een oneindig gewicht in de vereffening hebben en dus geen correctie zullen krijgen.

Afplatting (*f*): Een van de parameters, bepalend voor de vorm van een ellipsoide:

$$f = (a-b)/a$$

met

a = halve lange as

b = halve korte as

Afstand: De lengte van de vector tussen twee punten. De *schuine* afstand geeft de direct gemeten afstand van instrument naar reflector weer, terwijl de *horizontale* afstand de gereduceerde afstand weergeeft.

Azimut: De hoek tussen de richting naar het noorden en de richting naar het richtpunt.

Basislijn: Een drie dimensionale vector in WGS'84 tussen twee punten.

Basispunten: De basispunten vormen de rekenbasis waarop het netwerk wordt aangesloten in een vrije netwerk vereffening. Door slechts het minimale aantal coördinaten vast te houden worden ligging, oriëntering en schaal van het netwerk vastgelegd.

Bekend punt: Een bekend punt is een punt waarvan de coördinaten reeds vóór de vereffening met een bepaalde precisie bekend zijn. Tijdens een aangesloten netwerk vereffening wordt op de bekende punten aangesloten.

Betrouwbaarheid: De betrouwbaarheid van een netwerk kan worden gedefinieerd als de gevoeligheid voor de detectie van fouten. Betrouwbaarheid wordt gekwantificeerd met behulp van Minimal Detectable Biases (interne betrouwbaarheid) en Bias to Noise Ratio's (externe betrouwbaarheid).

Bias to Noise Ratio (BNR): De BNR geeft de invloed van een mogelijke fout ter grootte van de MDB in een waarneming, op alle coördinaten. De BNR kan worden beschouwd als de ratio tussen betrouwbaarheid en precisie. Een alternatieve benaming voor BNR is verstoringsfactor.

Cartesisch coördinatenstelsel: Een orthonormaal coördinatenstelsel, met gelijke schaal langs alle assen, waarbij de coördinaten segmenten langs de assen voorstellen, in 3D weergegeven als (X,Y,Z).

Collineariteit: De relatie dat drie punten op één lijn liggen.

Correlatie: Er is sprake van correlatie tussen twee grootheden wanneer deze statistisch gezien afhankelijk zijn, dat wil zeggen de grootheden beïnvloeden elkaar onderling. Correlatie wordt weergeven door □, de correlatie coëfficiënt.

Criteriumcirkel: De criteriumcirkels bepalen een theoretisch model dat een homogene precisie weergeeft, t.o.v. de basispunten. Criteriumcirkels worden gebruikt bij de beoordeling van de eveneens basisafhankelijke standaardellipsen van punten in een vrije netwerk vereffening.

Datasnooping: Methode van toetsen waarbij alle waarnemingen in een netwerk m.b.v. de W-toets afzonderlijk worden getoetst.

Datum: Een mathematisch model bestaande uit een ellipsoïde die zo is gekozen dat deze het aardoppervlak (compleet of in een bepaald gebied) zo goed mogelijk benadert. Het datum wordt gedefinieerd door de ellipsoïdische constanten (halve lange as, afplatting) en de parameters om de ligging van de ellipsoïde vast te leggen.

Ellipsoïde: Een mathematisch figuur, ontstaan door het omwentelen van een ellips om zijn halve korte as *b*. Een ellipsoïde wordt gewoonlijk gedefinieerd door de halve lange as *a*, en de afplatting, $f = (a-b)/a$.

Ellipsoïdische hoogte (h): De verticaal gemeten afstand van een punt tot de ellipsoïde.

Evenwijdigheid: De relatie dat twee lijnen evenwijdig (parallel) aan elkaar lopen.

Excentriciteit (e): Een van de parameters, bepalend voor de vorm van een ellipsoïde:

$$e^2 = f\,(2 - f) = (a^2 - b^2)/a^2$$

met

f = afplatting

a = halve lange as

b = halve korte as

(zie ook afplatting f).

Externe Betrouwbaarheid: De maximale invloed van een (niet ontdekte) fout ter grootte van de MDB op de uiteindelijke coördinaat.

F-toets: Meerdimensionale toets (overall model test), met behulp waarvan de nul-hypothese wordt getoetst.

Fase vereffening: Een vereffening kan worden uitgevoerd in fasen; een vrije netwerk vereffening en een aangesloten netwerk vereffening. Deze laatste kan worden onderverdeeld in een pseudo kleinste kwadraten vereffening, een gewogen kleinste kwadraten vereffening en een vaste kleinste kwadraten vereffening.

Functiemodel: Een model dat de relaties vastlegt tussen de waarnemingen en de onbekenden in een vereffening.

Geoide: Het zwaartekrachtsequipotentiaal vlak dat, over de gehele aarde genomen, samenvalt met gemiddeld zeeniveau. De geoïde is het verticale datum voor orthometrische hoogten.

Geoïde hoogte (N): Het verschil tussen ellipsoidische hoogte en orthometrische hoogte: N = h - H.

Geometrische relaties: Verzamelnaam voor de waarnemingstypes: hoek, haaksheid (tussen 3 punten of 2 lijnen), collineariteit, afstand tussen punt en lijn, evenwijdigheid en voetmaat & loodlijn.

Gewogen aansluitingsvereffening: Aangesloten netwerk vereffening waarbij de coördinaten van de bekende punten een correctie kunnen krijgen.

GNSS/GPS: Global Positioning System, een wereldomvattend, van satellieten gebruik makend plaatsbepalingssysteem, voor het bepaling van 3D absolute en relatieve posities.

Hypothese: Een verzameling veronderstellingen betreffende het gedrag van stochastische variabelen. Een speciaal geval is de nul-hypothese H_0 die aanneemt dat het functiemodel en kansmodel correct zijn en dat er geen blunders in de waarnemingen zitten. Deze aanname wordt geverifieerd m.b.v. statistische toetsing.

Idealistatieprecisie: Precisie waarmee in het terrein een terreinelement als punt gedefinieerd (aangewezen) kan worden.

Kaartprojectie: Een verzameling wiskundige formules, welke de projectie bepalen van ellipsoidische coördinaten (breedte, lengte) naar rechthoekige coördinaten (X Oost, Y Noord) en vice versa. De projectie gaat gepaard met vervorming van de geometrische elementen afstand en hoek. De meest gebruikte kaartprojecties in de geodesie zijn: Transversale Mercator projectie, Lambert projectie en Stereografische projectie.

Kansmodel: Een model dat de stochastische afwijkingen beschrijft van de waarnemingen en bekende coördinaten in een vereffening.

Kleinste kwadraten vereffening: Een methode om onbekenden uit overtallige waarnemingen te verkrijgen, gebaseerd op het kleinste kwadraten criterium. De onbekenden zijn aan de waarnemingen gerelateerd via het functiemodel. Volgens het kleinste kwadraten criterium dient de kwadratische som van de correcties aan de waarnemingen minimaal te zijn. Deze kleinste kwadraten correcties worden ook wel residuen genoemd.

Kritieke waarde: Een van tevoren vastgestelde waarde, bepalend voor de aanvaarding of verwerping van een hypothese die bij een statistische toets behoort.

Minimal Detectable Bias (MDB): De kleinst mogelijke fout in een waarneming of bekende coördinaat, welke nog door de W-toets met een bepaalde waarschijnlijkheid zal worden gevonden. Deze waarschijnlijkheid is gelijk aan het onderscheidingsvermogen van de toetsing. Een alternatieve benaming voor MDB is grenswaarde.

Minimal Detectable Bias, Genormaliseerd (MDBn): Maat voor de inwendige betrouwbaarheid. Bij ongecorreleerde waarnemingen gelijk aan de grenswaarde gedeeld door de standaardafwijking van de betreffende waarnemingsgrootheid. Een alternatieve benaming voor MDBn is genormaliseerde grenswaarde.

Oriëntering: Een oriëntering is de referentierichting in geval van horizontale richtingsmeting. Voor elk punt waar horizontale richtingsmeting is verricht, wordt een oriënteringsonbekende in de vereffening opgelost. Elke extra serie zorgt voor een extra oriënteringsonbekende.

Orthometrische hoogte (H): De verticale afstand van een punt naar de geoïde Verticaal betekent hier: langs de richting van de lokale loodlijn.

Overtalligheid: De overtalligheid, oftewel het aantal vrijheidsgraden, in een vereffening is gelijk aan het aantal waarnemingen minus het aantal onbekenden.

Plaatsbepaling: De bepaling van de coördinaten van een punt in een goed gedefinieerd coördinaatstelsel. In geval van relatieve plaatsbepaling worden coördinaatverschillen bepaald, in plaats van absolute coördinaten.

PPM: Een relatieve afstandsmaat hetgeen letterlijk één per miljoen betekent (Part Per Million), oftewel 1mm per km. PPM wordt vaak gebruikt om de relatieve standaardafwijking van GNSS/GPS basislijnen aan te geven.

Precisie: Precisie geeft de stochastische afwijkingen weer van waarnemingen en coördinaten. Precisie wordt weergegeven met standaardafwijkingen en standaardellipsen.

Pseudo kleinste kwadraten vereffening: vereffening om het netwerk aan te sluiten op alle bekende punten zonder correcties aan de bekende coördinaten en zonder correctie aan de standaardafwijkingen van de bekende punten.

Redundantie getal: Het (lokale) redundantie getal geeft aan hoeveel een waarneming bijdraagt aan de totale overtalligheid. De som van alle lokale redundantie getallen is gelijk aan het aantal vrijheidsgraden.

Refractiecoëfficiënt: De invloed van de refractie zorgt voor een kromming van lichtstralen in verticale richting. Deze kromming kan beschreven worden m.b.v. een refractiecoëfficiënt k. Onder gemiddelde omstandigheden geldt:

$$k \approx 0.13$$

De coëfficiënt heeft een positieve waarde als de lichtstraal convex is (kromming naar de aarde toe), en een negatieve waarde als de lichtstraal concaaf is (kromming van de aarde af).

Singulariteit: Singulariteit treedt op wanneer één of meerdere onbekenden niet oplosbaar zijn in de vereffening.

Stochastische variabele: Een stochastische variabele is een variabele met random of stochastische afwijkingen. Een dergelijke variabele kan niet door één enkele waarde worden weergegeven, maar wordt gewoonlijk weergegeven door een verwachtingswaarde en een standaardafwijking.

Standaardafwijking (σ): De standaardafwijking is een gestandaardiseerde maat voor de precisie.

Standaardellips: De precisie van punten in een netwerk wordt weergegeven door absolute standaardellipsen. Relatieve standaardellipsen representeren de precisie van coördinaat verschillen tussen twee punten. Standaardellipsen zijn het 2D equivalent van standaardafwijkingen.

Terrestrische waarnemingen: Waarnemingen die verkregen worden zonder gebruik van satellieten, zoals richtingen, afstanden, zenithoeken, azimuts en hoogteverschillen.

T-toets: Statistische toets met behulp waarvan fouten in een waarnemings- of coördinatendrietal of -paar kunnen worden opgespoord. Afhankelijk van of het een paar of drietal betreft is de T-toets twee of drie dimensionaal.

Variantie (σ^2): De variantie is het kwadraat van de standaardafwijking.

Variantie Componenten Analyse: De Variantie Componenten Analyse berekent een aparte schatting voor de a posteriori varianties voor verschillende waarnemingstypen en voor verschillende groepen van waarnemingen van het zelfde type.

Vaste aansluitingsvereffing: Aangesloten netwerkvereffening waarbij de bekende coördinaten geen correctie kunnen krijgen doordat de standaardafwijkingen van de bekende coördinaten om 0 m. vast wordt gehouden.

Verkenning: Bij een netwerk verkenning kiest men de bekende en onbekende punten en de verbindende waarnemingen vóór de eigenlijke meting. De kwaliteit van het netwerk ontwerp wordt beoordeeld in termen van precisie en betrouwbaarheid.

Verwachting (μ): De verwachting van een stochastische variabele is het gewogen gemiddelde over een alle mogelijke uitkomsten van het meetproces.

Voetpunt: Geprojecteerd punt op een meetlijn.

Vrije netwerk vereffening: Vereffening waarbij ligging, oriëntering en schaal van het netwerk zijn gedefinieerd door een minimum aantal coördinaten (alleen basispunten) vast te houden. Een vrije netwerk vereffening wordt in principe alleen gebruikt om de waarnemingen te toetsen vóór het netwerk wordt aangesloten op alle bekende punten.

Vrijheidsgraden: zie overtalligheid.

W-toets (datasnooping): Eendimensionale statistische toets met behulp waarvan fouten in individuele waarnemingen kunnen worden opgespoord. De W-toets toetst een zogenaamde conventionele alternatieve hypothese, die stelt dat één waarneming een fout bevat, terwijl alle andere juist zijn.

Waarneming: Een waarneming is de realisatie van een stochastische variabele.

Waarschijnlijkheid: Waarschijnlijkheid is gerelateerd aan de frequentie waarmee een bepaalde uitkomst van een meetproces voorkomt. Elke uitkomst heeft een bepaalde waarschijnlijkheid. De kansverdeling beschrijft de waarschijnlijkheid dat de realisatie van een bepaalde stochastische variabele voorkomt.

WGS'84: World Geodetic System 1984; het wereldomvattende referentie systeem voor GNSS/GPS waarnemingen, in gebruik sinds januari 1987. In sommige gevallen wordt nog steeds WGS'72, de voorloper van WGS'84, gebruikt.

Zenithoek: De verticale hoek tussen de richting naar het lokale zenit, en de richting naar het richtpunt. Het zenit is de richting tegengesteld aan de lokale richting van de zwaartekracht.

Index

Afplatting 32
Afstand 19
  horizontaal 24
  schuin 24
Antenne hoogte fout 80
Azimut 20
Basispunt 66
Betrouwbaarheid 57, 72
  extern 73
  intern 72
Betrouwbaarheidsrechthoek 74
B-methode van toetsen 78
BNR 73
Breedte Oorsprong 41, 42, 43
Capaciteit 8
Centrale Meridiaan 41
Constraint 63
Conventionele alternatieve hypothese 79
Coördinaat
  bekend 25
  benaderd 62
Coördinaattype
  cartesisch 25, 32
  ellipsoïdisch 25, 31
  projectie 25
  relatie met filetype 26
  relatie met netwerktype 26
Correctie, kleinste kwadraten 61
Correlatie 65
Covariantie 65
Criterium cirkel 72
Datasnooping 78, 79
Datum 32
Datum transformatie 36
Delftse Methode 56
Dimensie Schakelaar 22
Eisen
  hardware 12
  software 12
  systeem 8
Ellipsoïde 32
Excentrisch richtpunt 53
File
  GCO 26
  TCO 26
F-toets 77
Geoide 34
Geoide hoogte 34
Geoïde model 16
Geometrische relaties 21, 49
  afstand punt-lijn 21, 50
  collineariteit 21, 50
  dubbele afstand 22, 51
  evenwijdigheid 21, 51

haakse lijnen 22, 51
haaksheid 21, 50
hoek 21, 49
identiekverklaring 22, 52
meetbandafstand 22, 52
voetmaat loodlijn 22, 51
Geschatte fout 83
GNSS/GPS 45
GNSS/GPS basislijn 20
GNSS/GPS coördinaat 21
Grenswaarde 72
genormaliseerd 73
Halve korte as 32
Halve lange as 32
Hoogte
ellipsoidisch 34
orthometrisch 34
Hoogteverschil 20
trigonometrisch 24
Hypothese 76
Idealisatieprecisie 52
Installatie 12
Iteratie 62
Kaartprojectie 38
Kwaliteit 57
Lengte Oorsprong 41, 42, 43
Lokale (Stereografisch) 43
Lokale coördinaat 21
MDB 72
Model
mathematisch 16, 61
stochastisch 64
Nuisance parameters 62
Nul-hypothese 76
Onbetrouwbaarheidsdrempel 77
Onderscheidingsvermogen 77
Precisie 57, 64, 71
Projectie 38
Lambert 39, 41
Stereografisch 40, 43
Transversale Mercator 40
Referentie systeem
globaal 33
lokaal 33
Residu 61
Richting 19
Schaalfactor (projectie) 41, 42, 43
Singulariteit 63
Standaard Parallel 42
Standaardafwijking 64, 71
Standaardellips 71
absoluut 72
relatief 72
Toetsing 57
Total station record 20
Translatie Noord 41, 42, 43

Translatie Oost 41, 42, 43
T-toets 80
Variantie 64
Variantie-covariantie matrix 66
Vereffening 57, 61
aansluiting 66, 67
aansluiting gewogen 67
aansluiting pseudo 67
aansluiting vast 67
vrij netwerk 66
Verkenning 58
Verschuivingsvector 21
Verwachting 64
Vrije waarneming 73
Waarnemingstype 18
combineren 17, 25
relatie met dimensie 22
WGS'84 33
W-toets 78
Zenithoek 19