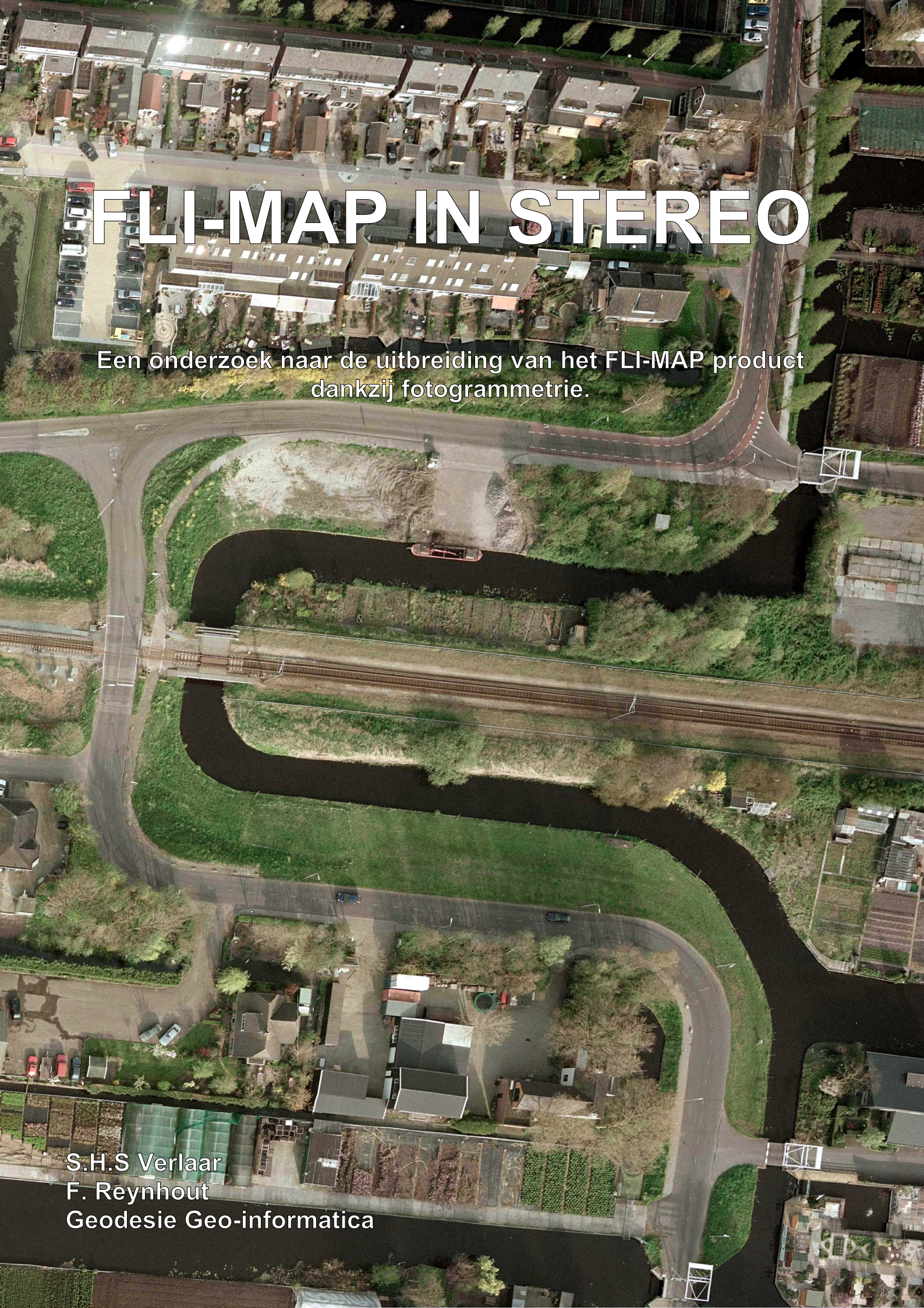


An aerial stereo image of a residential area. The image shows a canal winding through the center, with a railway track running parallel to it. On the left side of the canal, there are several houses and a parking lot. On the right side, there are more houses and a large green field. The image is presented in a stereo format, with two slightly offset views of the same scene to create a 3D effect when viewed.

FLI-MAP IN STEREO

Een onderzoek naar de uitbreiding van het FLI-MAP product
dankzij fotogrammetrie.

S.H.S Verlaar
F. Reynhout
Geodesie Geo-informatica

FLI-MAP IN STEREO

**Een onderzoek naar de uitbreiding van het FLI-MAP product
dankzij fotogrammetrie.**

juni 2007

Afstudeerscriptie ter verkrijging van de graad van
Bachelor of Science

S.H.S Verlaar (1183691)
F. Reynhout (1173306)

Hogeschool Utrecht
Faculteit Natuur en Techniek
Opleiding Geodesie en Geo-informatica

Afstudeerbegeleiding

Afstudeerbedrijf
Fugro-Inpark B.V.
Dillenburgsingel 69
2263 HW Leidschendam



Begeleider bij Fugro-Inpark B.V.
Dhr. M.P. Kodde MSc.

Begeleider bij de Hogeschool Utrecht
Dhr. Ir. H.J. Hagemans
Dhr. H. Jongbloed



Kaft: Luchtfoto van Boskoop, *uit het Rijnland project van Fugro-Inpark*

Samenvatting

Fugro-Inpark is wereldwijd marktleider op het gebied van het maken van digitale hoogte- en terreinmodellen met behulp van airborne laserscanning. Hiervoor wordt het door Fugro zelf ontwikkelde systeem FLI-MAP gebruikt. In het systeem zit ook een digitale camera waarvan de foto's tot orthofoto verwerkt worden die voornamelijk ter oriëntatie van de laserdata gebruikt worden. De camera is ten opzichte van fotogrammetrische camera's aanzienlijk minder van kwaliteit.

Vanuit de markt komt er steeds meer vraag naar een systeem dat airborne laserscanning en fotogrammetrie volledig integreert. Ook Fugro-Inpark wil graag in de foto's van FLI-MAP kunnen meten. Daarom luidt de doelstelling van dit onderzoek:

*De mogelijkheid naar driedimensionaal meten onderzoeken
in foto's van FLI-MAP en het bepalen van de kwaliteit
van het eventuele product.*

Tijdens het onderzoek is gebleken dat de lenscorrecties die gebruikt werden verkeerd bepaald zijn. Deze veroorzaken veel parallax in de stereomodellen waardoor het stereobeeld verstoord wordt. In een blokvereffening zijn deze lenscorrecties opnieuw bepaald aan de hand van een proefproject. Met de nieuw bepaalde lenscorrecties neemt de parallax in de stereomodellen aanzienlijk af.

Tijdens de blokvereffening wordt ook een fout in de GPS/INS-waarnemingen geconstateerd. Er wordt daarom aanbevolen de GPS/INS opnieuw te kalibreren.

Het is desalniettemin mogelijk om in stereomodellen te meten. In dit onderzoek wordt de precisie van de metingen volgens triangulatie en blokvereffening gesteld op $\sigma_{xy} = 8$ cm en $\sigma_y = 9$ cm.

Aan de hand van dit onderzoek wordt voorspeld dat *direct georeferencing* een nauwkeurigheid kan halen die in dezelfde orde ligt als de methode van triangulatie en blokvereffening. Zodra de fout in de GPS wordt opgelost zal *direct georeferencing* de voorkeur hebben boven de traditionele manier volgens triangulatie en blokvereffening. *Direct georeferencing* wordt geprefereerd vanwege de lage arbeidsintensiteit en omdat het gebruik van paspunten vermeden wordt.

Voorwoord

Voor u ligt onze afstudeerscriptie van de HBO opleiding Geodesie en Geo-informatica van de Hogeschool Utrecht. Wij hebben ons afstudeeronderzoek uitgevoerd bij Fugro-Inpark te Leidschendam. Daar hebben wij ons bij de afdeling Aerial Acquisition bezig gehouden met fotogrammetrie binnen FLI-MAP. Het onderzoek heeft plaatsgevonden van februari tot en met mei 2007.

Verschillende geodetische technieken komen in dit verslag aan de orde. Een belangrijk onderdeel van onze scriptie zijn de fotogrammetrische aspecten welke uitgebreid aan de orde komen. Verder maken we ook gebruik van andere inwinningstechnieken om ons onderzoek te ondersteunen. Tot slot beschrijven we een aantal bedrijfseconomische aspecten om de resultaten van ons onderzoek in een economisch kader te kunnen plaatsen.

Via deze manier willen wij Fugro-Inpark graag bedanken voor de mogelijkheid om een onderzoek bij hen uit te voeren. Alle medewerkers van Aerial Acquisition namen altijd de moeite ons te helpen wat een positieve inbreng heeft gehad in het onderzoek. Onze afstudeerbegeleider bij Fugro-Inpark, Martin Kodde, zouden wij in het bijzonder willen bedanken voor zijn opbeurende begeleiding en zijn kritische, maar heldere blik op ons onderzoek. Ook Ben van der Driesche mag niet ontbreken in dit dankwoord voor zijn hulp om ons fotogrammetrische product te beoordelen. Tot slot willen wij Luc Amoureux bedanken voor de hulp bij vele lastige vragen.

Stijn Verlaar
Frank Reynhout
Utrecht, mei 2007

Inhoudsopgave

Samenvatting 5

Voorwoord 7

Inhoudsopgave 8

Afkortingenlijst 11

1 Inleiding 12

- 1.1 Achtergrond 12
- 1.2 Doel- en probleemstelling 12
- 1.3 Werkwijze 13
- 1.4 Leeswijzer 13

2 FLI-MAP & fotogrammetrie 15

- 2.1 Het Systeem 15
 - 2.1.1 Laserscanner 15
 - 2.1.2 GPS en INS 16
 - 2.1.3 Digitale video- en fotocamera's 17
- 2.2 Fotogrammetrische aspecten 18
 - 2.2.1 Bepaling externe oriëntering dmv waarnemingsgroepen 18
 - 2.2.2 Parallax 21
- 2.3 Software 22
- 2.4 Conclusie 23

3 Bepaling waarnemingsgroepen 25

- 3.1 Camera 25
 - 3.1.1 Het maken en opslaan van foto's 26
 - 3.1.2 Charge Coupled Device 26
 - 3.1.3 Lenscorrecties 28
- 3.2 Fotogrammetrische triangulatie 29
 - 3.2.1 Beeldcorrecties 29
 - 3.2.2 Foto's inladen in ImageStation 30
 - 3.2.3 Relatieve oriëntering 32
 - 3.2.4 Verbeteringen voor de relatieve oriëntering 33
 - 3.2.5 Absolute oriëntering 35
 - 3.2.6 Verbeteringen voor de absolute oriëntering 36
- 3.3 Conclusie 38

4 Blokvereffening 39

- 4.1 Vereffening met Bingo 39
- 4.2 Meetopzet 40
- 4.3 Vereffening met alle waarnemingen 40
- 4.4 Controle van de paspunten 41
- 4.5 Vereffening zonder paspunt 1 43
- 4.6 Nieuwe lenscorrecties 44
- 4.7 Vereffeningen met nieuwe lenscorrecties 46
- 4.8 Bepaling van de nauwkeurigheid met checkpoints 48
- 4.9 Bepaling van de nauwkeurigheid door praktijkmetingen 49
- 4.10 Conclusie 51

5	Bedrijfseconomische aspecten	53
5.1	Methode volgens triangulatie en blokvereffening	53
5.2	Methode volgens <i>direct georeferencing</i>	54
5.3	Conclusie	54
6	Conclusies en aanbevelingen	57
6.1	Conclusies	57
6.2	Aanbevelingen	58
	Literatuur	59
	Bijlage I – Conversie tussen OPK en POK	
	Bijlage II – FLI-MAP foto's test project	
	Bijlage III – Meetresultaten	

Afkortingenlijst

auto-RO	Automatische Relative Oriëntering
CCD	Charge Coupled Device
EO	Externe Oriëntering
FLI-MAP	Fast Laser Imaging and Mapping Airborne Platform
GPS	Global Positioning System
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation System
NAP	Normaal Amsterdams Peil
OPK	Omega, Phi, Kappa
POK	Phi, Omega, Kappa
RGBG	Rood, Groen, Blauw, Groen
RO	Relative Oriëntering
RTK	Real Time Kinematic
UTM	Universal Transverse Mercator
WGS 84	World Geodetic System 1984

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Fugro-Inpark levert producten in meerdere inwinningstechnieken. *Airborne laserscanning* is er daar een van. Fugro-Inpark heeft voor deze techniek een eigen systeem ontwikkeld, genaamd FLI-MAP. Naast de driedimensionale inwinning van punten door middel van de laserscanner worden er ook gegevens ingewonnen met behulp van onder andere een digitale fotocamera. De digitale foto's worden vaak als mede-eindproduct aan de klanten geleverd in de vorm van een orthofoto. De ortofoto's zijn een aanvulling voor de laserdata en geven een, voor het menselijk oog, beter voor te stellen beeld van het terrein. Ook bieden de foto's uitkomst als in de laserdata onduidelijkheden zitten over objectclassificaties. De foto's zijn geogerefereneerd doordat er met GPS/INS gevlogen wordt en het tijdstip van het fotomoment opgeslagen wordt. De foto's zijn echter ongeschikt voor karteringen of andere metingen doordat zowel de onderlinge stand van twee opeenvolgende foto's als de koppeling naar terreincoördinaten niet nauwkeurig genoeg bepaald zijn. Het ultieme doel op dit gebied zou zijn om de techniek van fotogrammetrie te combineren met de laserscanning zodat niet alleen een driedimensionale puntenwolk of een stereopaar ontstaat maar een driedimensionaal natuurgetrouw beeld waarin metingen gedaan kunnen worden.

De eerste stap hierin is om de digitale foto's relatief en absoluut te oriënteren zodat stereomodellen ontstaan waarin gekarteerd kan worden. Fugro-Inpark heeft eerder pogingen gedaan dit voor elkaar te krijgen maar stuitte op problemen zoals een grote parallax.

Het product dat voor ogen staat zal tot een betere driedimensionale inwinning leiden waardoor er meer aan de eisen van de klant zal worden voldaan. Daarnaast is het een stap in de richting in de volledige integratie van fotogrammetrie in de laserscanning.

1.2 Doel- en probleemstelling

De doelstelling van het onderzoek wordt als volgt geformuleerd:

*De mogelijkheid naar driedimensionaal meten onderzoeken
in foto's van FLI-MAP en het bepalen van de kwaliteit
van het eventuele product.*

Uit deze doelstelling volgt de probleemstelling van ons onderzoek:

*Welke aanpassingen in FLI-MAP zijn nodig om stereomodellen
te kunnen maken waarin met een aanvaardbare
precisie gemeten kan worden?*

De volgende deelvragen zijn opgesteld om de probleemstelling te kunnen beantwoorden:

- In hoeverre heeft de kwaliteit van de camera invloed op de stereomodellen?
- Hoe is de parallax in stereomodellen te minimaliseren?
- Zijn er nog andere foutenbronnen aanwezig die de kwaliteit van de stereomodellen sterk beïnvloeden?
- Wat is de haalbare precisie van metingen in de stereomodellen?
- Is de nieuwe werkwijze bedrijfseconomisch praktisch?

1.3 Werkwijze

Om erachter te komen welke factoren de stereomodellen verstoren wordt eerst het normale fotogrammetrisch proces bekeken. Voor de problemen die worden geconstateerd zal een wijziging worden bedacht waardoor de foto's van FLI-MAP ook werkbaar worden voor fotogrammetrie. Van elke wijziging is het de vraag of en hoe dit doorwerkt op de kwaliteit van de stereomodellen die er uiteindelijk mee gemaakt worden. Vervolgens wordt met behulp van verschillende blokvereffeningen de kwaliteit van de verschillende waarnemingsgroepen beoordeeld. Door de resultaten uit de vereffeningen aan de praktijk te toetsen door middel van karteringen in stereomodellen kan van verschillende methoden de nauwkeurigheid bepaald worden. Ook worden de methoden nog beoordeeld vanuit bedrijfseconomisch oogpunt.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk twee wordt een algemene beschrijving gegeven over de onderdelen van FLI-MAP en de theorie van fotogrammetrie. De waarnemingsgroepen en het begrip parallax spelen hierin een belangrijke rol. In het derde hoofdstuk worden de aanpassingen in FLI-MAP beschreven zoals die van kracht moeten worden om de foto's van FLI-MAP werkbaar te maken voor fotogrammetrie. In dit hoofdstuk spelen de camera en de gebruikte software de hoofdrol. In hoofdstuk vier worden een aantal vereffeningen uitgevoerd ten behoeve van het opsporen van fouten bronnen. Ook wordt een indicatie gegeven van de precisie waarmee gemeten kan worden. Hoofdstuk vijf borduurt hierop voort door de methode op bedrijfseconomische wijze te toetsen. Tot slot staan in hoofdstuk zes alle conclusies en aanbevelingen die uit het onderzoek volgen.

2 FLI-MAP & fotogrammetrie

FLI-MAP is een acroniem voor Fast Laser Imaging and Mapping Airborne Platform. Het systeem bestaat uit een laserscanner, twee GPS-ontvangers, een INS (Inertial Navigation System), twee digitale camera's en twee digitale videocamera's. Daarnaast kan er ook een *line scan* camera actief zijn.

Onder een aantal soorten helikopters kan het systeem worden bevestigd voor het driedimensionaal modelleren van corridors. Spoorwegen, hoogspanningsleidingen, snelwegen en dijken worden veelvuldig ingevlogen. Belangen voor de projecten zijn uiteenlopend. Bij hoogspanningsleidingen is het bijvoorbeeld belangrijk om de vegetatie dicht naast de hoogspanningskabels goed te visualiseren. Als vegetatie te dicht bij de kabels komt kunnen beslissingen gemaakt worden om te gaan snoeien.

Een andere toepassing is het bepalen van bosvolumes. Omdat sommige pulsen nog de grond raken en andere op toppen van bomen reflecteren kunnen volumes berekend worden. Dit kan invloed hebben voor landen op uitstootrechten van CO₂. [www.flimap.nl]

2.1 Het systeem

Sinds kort wordt er bij Fugro-Inpark gebruik gemaakt van FLI-MAP 400. Dit nieuwe systeem haalt ten opzichte van het vorige (FLI-MAP II) een aanzienlijk betere nauwkeurigheid van zowel de laser scan data als de digitale foto's en video's.

Afbeelding 1: FLI-MAP helikopter
(bron: [www.flimap.nl])



2.1.1 Laserscanner

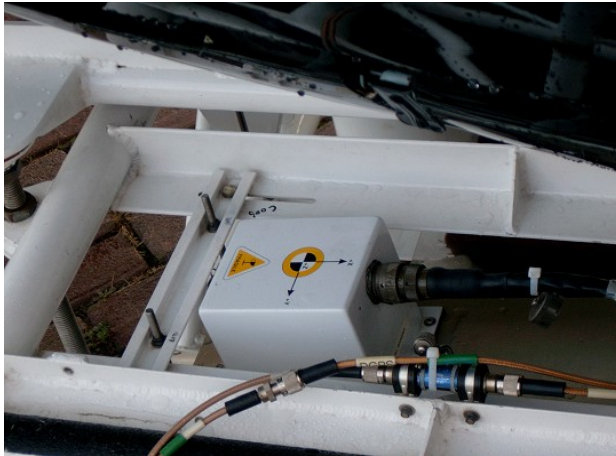
De laserscanner die gebruikt wordt bij FLI-MAP 400 is de EBAIRTM 3D Laser Scanner. Deze laserscanner zendt 150.000 laserpulsen per seconde uit naar het aardoppervlak in een waaier van 60°. Van alle terug ontvangen signalen wordt de afstand bepaald door middel van het meten van een tijdsinterval. Doordat de snelheid van de laserpuls bekend is kan de afstand eenvoudig bepaald worden. Samen met de tijd, plaats en de hoek waaronder de puls is uitgezonden valt een driedimensionale positie te berekenen van het reflectiepunt.

Om ervoor te zorgen dat dezelfde laserpulsen terug ontvangen worden als die uitgezonden werden, zorgt een filter ervoor dat alleen licht van dezelfde golflengte van de gebruikte laser doorgelaten wordt. Daarnaast moet het signaal een minimale lichtenergie hebben om doorgelaten te worden. Op deze manier wordt de ruis grotendeels geëlimineerd. [Wildemors, 2007]

2.1.2 GPS en INS

De positie en stand van de helikopter is een uitermate belangrijk onderdeel voor de bepaling van zowel de terreincoördinaten van de laserpunten als de relatieve oriëntering van twee opeenvolgende foto's. Twee GPS-ontvangers zorgen twee keer per seconde voor een positiebepaling met een nauwkeurigheid van enkele centimeters. De GPS-ontvangers zijn bevestigd aan twee uitstekende armen zoals te zien is in afbeelding 1. Door het gebruik van twee ontvangers wordt de kans verkleind op het verliezen van GPS-signaal. Daarnaast kan de positie beter bepaald worden door de overvloedigheid aan waarnemingen die ontstaat.

INS (Inertial Navigation System, in het Nederlands ook wel traagheidsnavigatie genoemd) kan naast de positie ook de stand bepalen van een object. Hiertoe bevat het een IMU (Inertial Measurement Unit). Dit instrument bevat drie versnellingsmeters en drie gyroscopen en levert 200 keer per seconde een waarneming.



Afbeelding 2: INS in het
FLI-MAP systeem
(bron: archief Fugro-Inpark)

De drie gyroscopen in de IMU meten hoeksnelheden om de x-, y- en z-assen. Voor het bepalen van de stand worden de hoeksnelheden eenmaal geïntegreerd. De rotatie om de as verticaal en loodrecht op de vliegrichting is de heading. De rotatie om de as in de vliegrichting en de as hier loodrecht op wordt de roll en pitch genoemd. Deze rotaties worden in de fotogrammetrie altijd omgerekend naar de zogenaamde omega, phi en kappa ofwel ω , φ en κ .

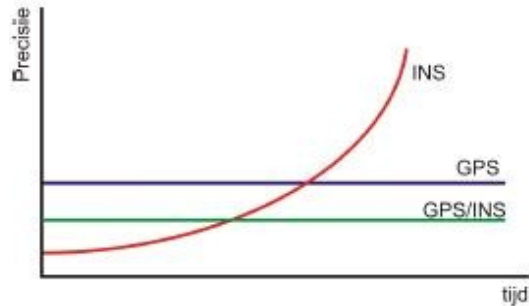
De drie versnellingsmeters meten lineaire versnellingen in x-, y- en z-richting. Om uit deze versnellingen een positie te bepalen zal twee keer geïntegreerd moeten worden over de tijd. Omdat de versnellingen vectoren zijn, zal de afstand die hieruit volgt ook een vector zijn en kan de nieuwe positie bepaald worden mbv de vorige positie en de afstandsvector.

$$s_1 = s_0 + \vec{s}_1 \quad \text{met} \quad \vec{s}_1 = \frac{1}{2} \vec{a} t^2 \quad (1)$$

De uiteindelijke uitvoer van de INS bestaat uit de tijd, X, Y, Z, φ , ω en κ .

De INS kan zeer nauwkeurig versnellingen en hoeksnelheden meten, daardoor is de relatieve precisie erg hoog. De absolute precisie neemt echter in de loop van de tijd af, omdat bij een positiebepaling over alle voorgaande waarnemingen geïntegreerd moet worden en zo de fouten gestapeld worden.

Afbeelding 3: GPS/INS precisie
(Bron: [Kodde 2004])



INS heeft ten opzichte van GPS dus een hogere precisie, terwijl GPS een homogene precisie levert. Door INS met GPS te combineren kunnen beide voordelen benut worden. De nauwkeurigheid van de INS vormt nu de basis van de positiebepaling, waarbij GPS het verloop van de fouten van de INS tegengaat. In afbeelding 3 is te zien dat GPS/INS een nauwkeurige en homogene precisie levert. De hoge frequentie aan waarnemingen uit de INS beschrijft de afgelegde baan beter en verkleint de kans op interpolatiefouten. Een Kalmanfilter wordt gebruikt om tot betrouwbaardere posities te komen. Het filter is oorspronkelijk opgezet om ruis uit een signaal te verwijderen. Het filter is sterk in het bepalen van posities van een bewegend object tussen waarnemingen in. Het bepalen van een positie wordt gedaan aan de hand van alle voorafgaande waarnemingen waaruit een toekomstige positie voorspeld wordt. Door deze voorspelde positie te vergelijken met de waarneming komt men tot een betrouwbaarder resultaat. Het resultaat kan vervolgens nog 'gesmooth' worden door het Kalmanfilter achteruit in de tijd uit te voeren.

(Kodde, 2004)

Afbeelding 4: De assen van de INS



2.1.3 Digitale video- en fotocamera's

Aan boord van het FLI-MAP systeem bevinden zich twee digitale videocamera's. Eén camera is schuin naar voren gericht en één is recht naar beneden gericht. De beelden van de digitale videocamera's dienen puur ter oriëntatie voor de processors en worden niet gebruikt om geometrie uit te bepalen.

De twee digitale fotocamera's die gebruikt worden bij FLI-MAP 400 zijn beide de Imperx 11M5. Een digitale camera heeft een frame met lichtgevoelige elementen, de zogeheten charge coupled devices (CCD). Door het ingevallen licht op deze CCD-elementen te meten kan de camera een digitale foto samenstellen. Het CCD-frame van de Imperx camera bestaat uit 4000 x 2672 pixels. De resolutie van een foto is dus bijna 11 megapixels. Net als de videocamera's zijn de fotocamera's ook zowel recht naar beneden als naar voren gericht. Alle foto's worden aan GPS-tijd gekoppeld zodat de foto's te combineren zijn met de laserdata. Van de foto's recht naar beneden worden ortho-gerectificeerde beelden gemaakt. De toepassingen van deze foto's zijn zeer beperkt omdat het uitvoeren van 3D-metingen of karteringen niet mogelijk is. Voor klanten die het product geleverd krijgen is het echter zeer zinvol om een beter beeld bij de puntenwolk van laserdata te krijgen.

De foto's die schuin naar voren zijn gericht worden net als de videocamera's weer alleen voor oriëntering en objectclassificatie gebruikt. Het schuin nemen van foto's maakt het makkelijker objecten te herkennen. Het voordeel met de techniek van oblique fotogrammetrie wordt niet op extra waarde geschat om tot de gewenste stereomodellen te komen.

Tenslotte is er een *line scan* camera aan de laserscanner gekoppeld. Het levert een driedimensionaal beeld dat aan elk laserpunt de kleur geeft die het op dezelfde plek heeft in de foto. In een oogopslag valt met deze techniek te zien hoe het terrein er ongeveer uitziet in werkelijkheid.

2.2 Fotogrammetrische aspecten

Als er in foto's driedimensionaal gemeten wordt ontkomt men niet snel aan de fotogrammetrie.

Een van de belangrijkste onderdelen van de fotogrammetrie is het bepalen van de oriënteringen van de foto's. Deze oriëntering heet de uitwendige oriëntering (in dit verslag ook wel EO genoemd). De uitwendige oriënteringsparameters van een foto bestaan uit een tijd, een positie (X, Y en Z) van het projectiecentrum en de stand (ϕ , ω en κ). De uitwendige oriëntering wordt ook rechtstreeks uit de GPS/INS verkregen. Deze wordt echter als slecht ervaren doordat in de stereomodellen veel parallax is. Daarom is in dit onderzoek het normale fotogrammetrische proces doorlopen om enerzijds tot beter stereomodellen te komen en anderzijds om mogelijke foutenbronnen op te sporen.

2.2.1 Bepaling EO d.m.v. waarnemingsgroepen

Om de uitwendige oriëntering te kunnen bepalen zijn waarnemingen nodig die voor, tijdens en na de vlucht verzameld worden. Deze waarnemingen zijn onder te verdelen in vijf waarnemingsgroepen.

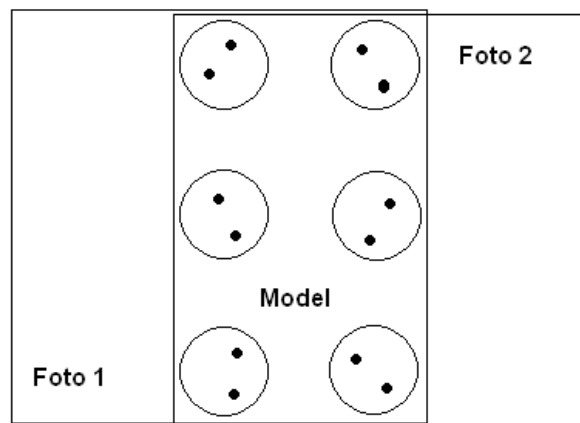
- Verbindingspunten in de foto
- Paspunten in de foto
- Paspunten in het terrein
- GPS/INS positie en stand
- Cameraparameters

Verbindingspunten in de foto

Verbindingspunten leggen de relatie tussen overlappende foto's. Een punt is een verbindingspunt als er op minimaal twee foto's de fotocoördinaten ervan gemeten worden. De nauwkeurigheid waarmee verbindingspunten gemeten worden heeft een grote invloed op de nauwkeurigheid van de vereffening die later volgt. Daarom worden de verbindingspunten zorgvuldig gekozen. Verbindingspunten moeten daarom duidelijk identificeerbaar en nauwkeurig meetbaar zijn. Voor de precisie van het meten van de verbindingspunten wordt meestal een a-priori standaardafwijking van $5\mu\text{m}$ gebruikt. De fotocoördinaten van de verbindingspunten vormen de waarnemingsgroep.

De configuratie van de verbindingspunten is ook belangrijk om tot een nauwkeurige relatieve oriëntering (in dit verslag ook wel RO genoemd) te komen. Volgens Von Gruber zijn de parameters van de relatieve oriëntering het nauwkeurigst te bepalen als per, naar hem vernoemde, locatie twee verbindingspunten gemeten worden. (zie afbeelding 5)

Afbeelding 5: Ligging van de verbindingspunten in de Von Gruber locaties



Paspunten in het terrein

Om de koppeling van de fotocoördinaten naar terreincoördinaten te kunnen leggen wordt er gebruik gemaakt van paspunten. De paspunten worden in het hele projectgebied geschilderd volgens bepaalde standaarden. Voor deze standaarden wordt verwezen naar Vosselman (1999). Deze paspunten worden real time met GPS ingemeten waarvoor geldt: $\sigma_{XY}=3\text{cm}$ en $\sigma_Z=4\text{ cm}$. Door de komst van GPS en INS is het aantal paspunten sterk gereduceerd, maar zijn paspunten nog steeds noodzakelijk.

De hoge precisie van de paspunten maken paspunten de meest betrouwbare referentie naar het terrein.

De terreincoördinaten van de paspunten vormen de waarnemingsgroep.

Paspunten in de foto

De paspunten in de foto's vormen een aparte waarnemingsgroep. De paspunten worden op dezelfde manier gemeten als de verbindingspunten en dus geldt ook voor de precisie een a-priori standaardafwijking van 5 µm. De fotocoördinaten van de paspunten legt samen met de terreincoördinaten van de paspunten de relatie tussen het fotostelsel en terreinstelsel vast.

GPS/INS positie en stand

Eigenlijk zijn de GPS/INS positie en stand twee verschillende waarnemingsgroepen. De positie wordt met een standaardafwijking van 5 cm bepaald. De drie waarnemingen voor de positie komen overeen met drie van de zes externe oriënteringsparameters. Het projectiecentrum heeft een vaste offset tot de GPS-antenne waardoor de positiewaarnemingen eenvoudig naar het projectiecentrum gerekend kunnen worden.

De drie waarnemingen voor de stand komen overeen met de andere drie externe oriënteringsparameters. De hoeken ω en ϕ worden bepaald met een standaardafwijking van 0,003 gon. Voor κ geldt een standaardafwijking van 0,009 gon.

Voor elke foto wordt een positie en een stand bepaald.

Cameraparameters

Bij analoge fotogrammetrie worden randmerken aangemeten om te bepalen hoe het fotostelsel bepaald is. Deze zogenaamde inwendige oriëntering wordt bij digitale fotogrammetrie door middel van de cameraparameters bepaald. Omdat digitale foto's uit één camera allemaal hetzelfde fotostelsel hebben kan de inwendige oriëntering volstaan worden met de cameraconstante, hoofdpuntcoördinaten en de pixelsize. Elke camera dient een kalibratierapport te hebben waar deze gegevens in te vinden zijn. De parameters worden tot op micrometers bepaald in een laboratorium. De standaardafwijkingen hiervan zijn zo laag dat de waarnemingen als niet-stochastisch meegenomen mogen worden.

Waarnemingsmodel

Alle waarnemingen worden vervolgens in een waarnemings-model gestopt. In de vereffening van het waarnemingsmodel kunnen de uitwendige oriënteringsparameters bepaald worden. Deze parameters worden bepaald door de collineariteitsvergelijkingen.

$$\begin{aligned} x_{s,i} &= -f \frac{r_{11}(X_i - X_s^0) + r_{21}(Y_i - Y_s^0) + r_{31}(Z_i - Z_s^0)}{r_{13}(X_i - X_s^0) + r_{23}(Y_i - Y_s^0) + r_{33}(Z_i - Z_s^0)} + x_0 \\ y_{s,i} &= -f \frac{r_{12}(X_i - X_s^0) + r_{22}(Y_i - Y_s^0) + r_{32}(Z_i - Z_s^0)}{r_{13}(X_i - X_s^0) + r_{23}(Y_i - Y_s^0) + r_{33}(Z_i - Z_s^0)} + y_0 \end{aligned} \quad (2)$$

Hierin zijn:

$x_{s,i}, y_{s,i}$	de fotocoördinaten van punt i in het fotostelsel s (index s van stralenbundel)
X_i, Y_i, Z_i	de objectcoördinaten van punt i
r_{ij_s}	de elementen van de rotatiematrix, die de rotatie van het fotostelsel s naar het objectstelsel beschrijft. De rotatie matrix is een functie van de hoeken $\omega_s, \phi_s, \kappa_s$.
X_s^0, Y_s^0, Z_s^0	de objectcoördinaten van het projectiecentrum van s
f, x_0, y_0	de cameraconstante en de hoofdpuntcoördinaten. Deze constanten bepalen mede de inwendige oriëntering en dienen bekend te zijn.

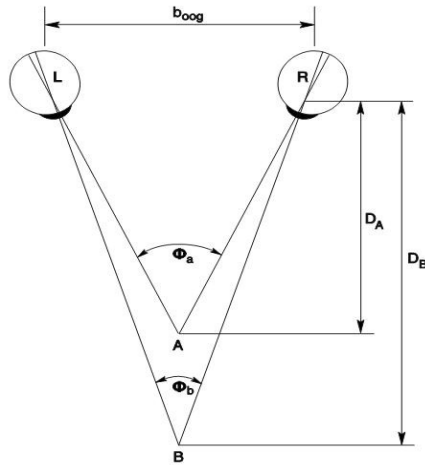
Wanneer van een objectpunt zowel de objectcoördinaten als de fotocoördinaten van het afgebeelde objectpunt bekend zijn en bovendien de inwendige oriënteringsparameters bekend zijn, resulteert dit in twee collineariteitsvergelijkingen, waarin alleen de zes elementen van de uitwendige oriëntering nog onbekend zijn. Wanneer van drie objectpunten zowel de objectcoördinaten als de fotocoördinaten bekend zijn, kunnen dus zes vergelijkingen worden opgesteld.

Hieruit kunnen de zes uitwendige oriënteringsparameters worden opgelost.

Als alle variabelen (fotocoördinaten en objectcoördinaten) nauwkeurig bepaald zijn, kunnen er met de berekende uitwendige oriënteringsparameters stereomodellen gemaakt worden met een verwaarloosbare parallax. Als men deze procedure hanteert voor de foto's van FLI-MAP, blijft er teveel parallax in de modellen wat karteren of het uitvoeren van andere metingen belemmert. Er valt dus te concluderen dat de variabelen niet nauwkeurig bepaald kunnen worden. De mogelijke oorzaken en oplossingen worden in hoofdstuk 3 en 4 besproken.

2.2.2 Parallax

Parallax is het verschijnsel dat de schijnbare positie van een voorwerp ten opzichte van de achtergrond verandert als men het vanuit verschillende posities bekijkt. De twee zichtlijnen snijden elkaar onder de zogenaamde parallactische hoek. Hoe groter de parallactische hoek, des te groter het verschil in schijnbare positie. In de astronomie wordt de parallactische hoek gebruikt om afstanden tot hemellichamen te berekenen. Ook in de fotogrammetrie wordt parallaxmeting gebruikt om afstanden te bepalen. Je zou hierbij twee projectiecentra van overlappende foto's kunnen beschouwen als ogen die een op een bekende afstand van elkaar waarnemen. De hoek waaronder een voorwerp gezien wordt bepaalt de afstand van dat voorwerp tot het oog. (zie afbeelding 6)



Afbeelding 6: Parallax
(bron: [Vosselman, 1996])

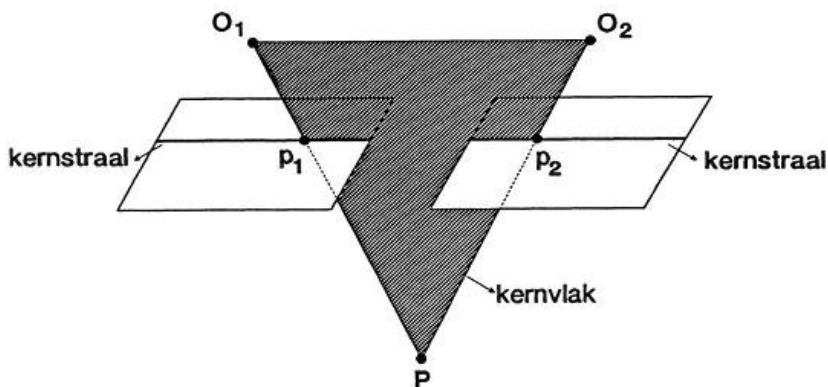
Nu kan op een foto niet die desbetreffende hoek gemeten worden, maar wel het verschil in afstand tussen de twee hoofdpunten en de twee fotopunten (p_R). Hierdoor kan de afstand bepaald worden tussen de twee fotopunten. De afstand tot het voorwerp kan nu berekend worden aan de hand van formule 3. Deze formule maakt hoogtemeting mogelijk. [Vosselman 1996]

$$H_R = \frac{Bf}{p_R} \quad (3)$$

met B = afstand tussen de twee projectiecentra
en f = brandpuntsafstand van de camera.

De hierboven omschreven parallax wordt langsparallax of x-parallax genoemd omdat er een verschil wordt gemeten in x-richting van het fotostelsel. Er bestaat echter ook een dwarsparallax of y-parallax.

Deze y-parallax is minder gewenst omdat deze het stereobeeld verstoort. Dit kan worden voorgesteld door twee ogen die naast een verschil in horizontale positie niet op gelijke hoogte waarnemen. Als deze y-parallax te groot wordt zal deze het driedimensionale beeld verstoren. In vaktaal: De kernstralen liggen niet in elkaars verlengde. Een kernstraal is de snijlijn van een kernvlak met het fotovlak, waarbij een kernvlak het vlak is tussen twee projectiecentra en een objectpunt. (zie afbeelding 7)



Afbeelding 7: Kernstralen
en kernvlak
(bron: [Vosselman, 1996])

Omdat twee opnamen nooit precies evenwijdig aan elkaar gemaakt kunnen worden zal er altijd y-parallax ontstaan. Door de foto's relatief te oriënteren kunnen de foto's zo ten opzichte van elkaar worden gelegd dat de y-parallax acceptabel wordt. [Vosselman, 1996]

2.3 Software

Voor dit onderzoek zijn hoofdzakelijk twee softwarepakketten gebruikt. Eén pakket bevat programma's die het volledige fotogrammetrische proces kunnen doorlopen, van het bepalen van oriënteringen tot karteren in stereomodellen. Het andere pakket is een vereffeningsprogramma speciaal voor fotogrammetrie.

ImageStation

ImageStation is ontwikkeld door InterGraph Corporation. In dit onderzoek wordt ImageStation gebruikt voor het bepalen van fotocoördinaten van verbindingpunten en paspunten. Daarnaast worden de stereomodellen altijd met behulp van ImageStation op parallax gecontroleerd.

Bingo

Bingo is het vereffeningspakket speciaal voor fotogrammetrie en is geschreven door dr. Erwin Kruck. Alle vereffeningen van dit onderzoek zijn met Bingo uitgevoerd. ImageStation kan fotocoördinaten exporteren naar een formaat dat Bingo direct kan inlezen.

Flip 7

Flip 7 is een softwarepakket dat door Fugro is ontwikkeld voor de processing van laserdata. In dit onderzoek wordt de laserdata gebruikt voor het uitvoeren van controles op paspunten.

2.4 Conclusie

In dit hoofdstuk is behandeld uit wat voor onderdelen het FLI-MAP systeem bestaat. Door de diversiteit aan onderdelen zal in het onderzoek speciaal aandacht besteed moeten worden aan het onderlinge verband van deze onderdelen. Een kleine fout in één van deze onderdelen kan namelijk gevolgen hebben op alle producten van het FLI-MAP systeem.

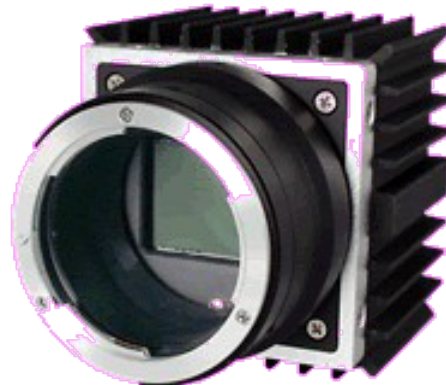
3 Het bepalen van de waarnemingsgroepen.

In het vorige hoofdstuk zijn alle waarnemingsgroepen benoemd. Deze waarnemingsgroepen worden in dit hoofdstuk bepaald door zoveel mogelijk een normaal fotogrammetrisch proces aan te houden. Twee van de vijf waarnemingsgroepen zijn al bepaald. De cameraparameters komen rechtstreeks uit het kalibratierapport en de GPS/INS-waarnemingen zijn tijdens de vlucht al per foto gemeten. Met behulp van het softwarepakket ImageStation worden alle stappen uit het fotogrammetrisch proces doorlopen. Op voorhand zijn een aantal grote verschillen te benoemen die bestaan tussen traditionele fotogrammetrie en de fotogrammetrie zoals die in dit onderzoek getracht wordt toe te passen. Het grootste verschil is de fotocamera die gebruikt wordt, daarnaast is de fotoschaal van de foto's van FLI-MAP aanzienlijk groter. Tenslotte worden in projecten van FLI-MAP geen paspunten gebruikt. Tijdens het proces komen deze verschillen aan de orde en worden deze verder behandeld.

3.1 De camera

Zoals in paragraaf 2.1.3 al werd beschreven wordt voor dit onderzoek alleen gebruik gemaakt van de camera die recht naar beneden is gericht.

Afbeelding 8: Digitale fotocamera van FLI-MAP (Imperx 11 mega pixel)
(Bron: [www.imperx.com])



De camera is een Imperx 11 megapixel camera. De pixels zijn vierkant met een lengte van 9 μm . Verder is de brandpuntsafstand van de camera 35,9646 mm. In de camera zitten geen bewegende delen zoals sluiters en spiegels, waardoor de camera veel robuuster en betrouwbaarder is dan een gewone digitale spiegelreflex camera. Hierdoor is de camera uitermate geschikt om vanuit een helikopter foto's te maken. De camera beschikt niet over een zoeker dus een spiegel is niet nodig, maar een sluiters is daarentegen natuurlijk wel aanwezig. Om de CCD te belichten worden alle elementen heel kort aan en uit gezet waardoor de CCD geladen wordt met gegevens waarna de gegevens worden verzonden naar een computer. De camera is in staat vijf keer per seconde de CCD te laden.

De behuizing van deze camera is speciaal ontworpen om makkelijk en stevig onder de helikopter gemonteerd te kunnen worden. De kans op montagefouten wordt hierdoor sterk gereduceerd.

De camera heeft een lens opening van 35 millimeter, dit is een standaard maat voor lenzen. Hierdoor kunnen veel verschillende lenzen gebruikt worden.

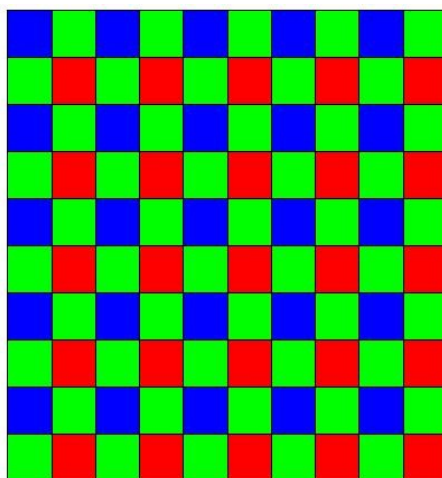
3.1.1 Het maken en opslaan van een foto

Van de vijf foto's die de camera elke seconde maakt wordt slechts 1 foto per ongeveer 2,5 seconde opgeslagen. Om te voorkomen dat de foto's over- of onderbelicht raken door grote verschillen in het terrein wordt in elke frame de optimale belichting bepaald welke gebruikt wordt voor de volgende frame. Op deze manier zal elke foto die opgeslagen wordt met een juiste belichting gemaakt worden.

Voor het opslaan van de foto's wordt geen geheugenkaart gebruikt maar de data wordt meteen naar een computer gestuurd. Diezelfde computer beheert het hele proces van foto's maken. Elke 2,5 seconden vraagt de computer aan de camera om een foto te versturen. De camera verstuurt zijn eerstvolgende foto naar de computer waar de foto op de harde schijf opgeslagen wordt. De camera geeft elke foto een timestamp zodat de computer weet wanneer de foto gemaakt is. Aan de hand van deze timestamp kan later de juiste waarneming van de positie en stand van de foto bepaald worden. Het synchronisatieprobleem van het moment van opname en de GPS/INS waarnemingen wordt met behulp van het Kalman filter opgelost zoals beschreven staat in paragraaf 2.1.2.

3.1.2 Charge Coupled Device

De Imperx camera van FLI-MAP heeft een CCD-element van 4000 bij 2672 pixels. Een foto gemaakt met deze camera bestaat dus uit 10.688.000 pixels. Om kleur op te slaan via de CCD wordt gebruik gemaakt van een Bayer filter, waarin wordt bepaald in welke volgorde en met welke kleur de chip zijn pixels vult. Het patroon van de filter is 50% groen, 25% rood en 25% blauw, daarom wordt het ook wel een RGBG of GRGB filter genoemd.



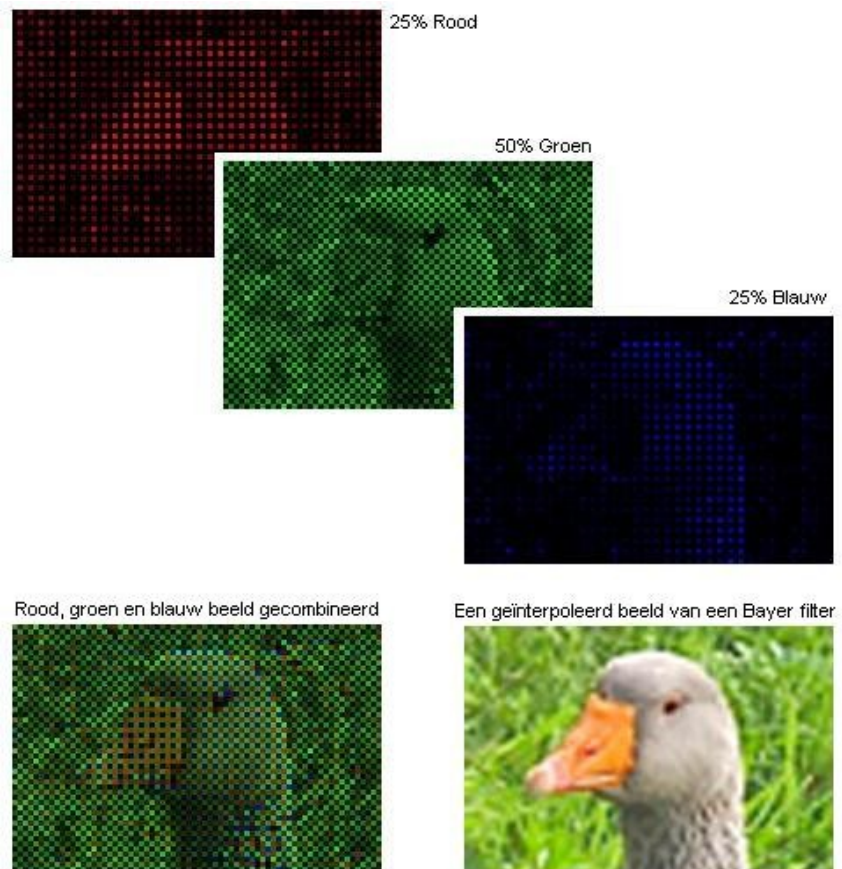
Afbeelding 9: Bayer filter met RGBG indeling

De raw-output van een Bayer filter wordt een Bayer pattern image genoemd (zie afbeelding 9). Omdat elk pixel van een CCD maar een van de drie kleuren opneemt gaat in principe tweederde van de data verloren.

Er bestaat ook een techniek die het mogelijk maakt om alle kleurinformatie te kunnen waarnemen. Deze techniek werkt met drie verschillende CCD's die elk zijn eigen kleur opslaat. Dit is mogelijk door prisma's die achter de lens zitten en het licht breken in rood, groen en blauw licht.

Elke kleur valt op een andere CCD wat resulteert in een rode, een groene en een blauwe foto. De drie foto's over elkaar geven een kleurenfoto als resultaat. Ondanks het feit dat deze camera's beter en nauwkeuriger foto's maken zijn dit soort camera's niet geschikt voor FLI-MAP. Ten eerste omdat door de splitsing van het licht minder licht op de CCD's valt waardoor de foto's nog donkerder zullen worden dan ze nu al zijn. Ten tweede zijn deze camera's ongeveer 100 keer zo duur als de huidige FLI-MAP camera, mede omdat deze techniek veel minder gebruikt wordt.

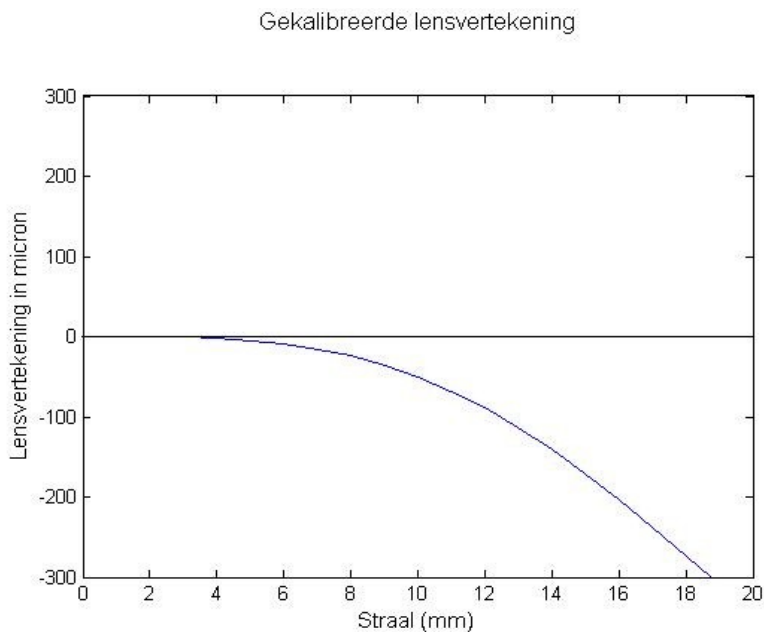
Afbeelding 10: Een voorbeeld van foto met een Bayer filter CCD



Er kunnen verschillende algoritmes gebruikt worden om te interpoleren naar een RGB waarde voor elk punt. Dit wordt gedaan door de kleurgegevens van de omliggende cellen te gebruiken. Twee veel gebruikte algoritmes voor fotografie zijn JPEG en TIFF. In afbeelding 10 is te zien hoe de verschillende kleuren van een Bayer filter tot een normaal beeld geïnterpoleerd wordt. In het linker beeld is het duidelijk zichtbaar dat er twee keer zoveel groene pixels aanwezig is.

3.1.3 Lenscorrecties

Lenzen zijn nooit precies van vorm zoals ze ontworpen zijn. Elke lens is uniek en kent daardoor zijn eigen lensvertekening. Door deze lensvertekening treden kleine verstoringen op waarvoor gecorrigeerd moet worden om een goed beeld te krijgen. Het is bij fotogrammetrische toepassingen noodzakelijk voor elke lens een lenskalibratie uit te voeren. ImageStation biedt de mogelijkheid deze lensvertekening in de vorm van lenscorrecties in te voeren voordat men aan metingen begint. De lensvertekening van de camera van FLI-MAP is radiaal bepaald, dat wil zeggen dat vanuit het optisch middelpunt de verstoring wordt gemeten met diversen stralen. Ofwel, voor alle punten met gelijke afstand tot het optisch middelpunt geldt dezelfde vervorming. De radiale lensvertekening die gebruikt wordt voor de camera van FLI-MAP is door kalibratie bepaald en is te zien in afbeelding 11. De vervorming wordt exponentieel groter naar mate de afstand tot de rand van de lens kleiner wordt.



Afbeelding 11:
FLI-MAP lensvertekening

3.2 Fotogrammetrische triangulatie

Het eerste deel van de doelstelling bestaat uit het onderzoek naar de mogelijkheid van driedimensionaal meten in de foto's van FLI-MAP.

Om dit deel van de doelstelling te kunnen onderzoeken is een project van FLI-MAP uitgekozen waar alle bevindingen en conclusies van dit onderzoek op gebaseerd zijn. Het betreft het project 'RijnGouwelijn'. Dit is de spoorlijn tussen Gouda en Leiden. Er is gekozen voor dit project omdat naast de laserdata ook een orthofoto een eindproduct zou worden. Vanwege het belang van de foto's is vliegen bij slecht weer geen optie. Hierdoor zou de kans op mooie foto's groter zijn dan bij andere projecten. Daarnaast was de projectlocatie dichtbij, zodat een bezoek aan het gebied geen praktische bezwaren zou opleveren.

Om de invloed van paspunten in het onderzoek mee te kunnen nemen moest het een project zijn wat nog niet gevlogen was. Vooraf aan de vlucht zijn daarom op een stuk van ongeveer 300 meter tien paspunten zo geschilderd, dat deze op een klein aantal opeenvolgende foto's te zien zouden zijn. Na de vlucht werd geconstateerd dat de paspunten op acht foto's te zien waren. Op deze acht foto's zijn alle bevindingen en conclusies van dit onderzoek gebaseerd.

3.2.1 Beeldcorrecties

De ruwe foto's van de camera uit het FLI-MAP systeem zijn vrij donker. Dit komt doordat de FLI-MAP camera niet beschikt over een forward motion compensator. Hierdoor mag de sluitertijd niet te lang worden, omdat dit anders ten koste van de scherpte van de foto gaat. Door de korte sluitertijd kan de CCD minder gevuld worden wat resulteert in donkere foto's. Het valt op dat de foto's aan de randen donkerder zijn dan in het midden. Dit is te verklaren doordat CCD elementen lichtstralen die onder een scherpere hoek invallen een mindere intensiteit toekennen dan dat ze in werkelijkheid hebben.

Gevolg van deze relatief donkere foto's is dat de auto-RO geen optimale resultaten kan geven. Door beeldcorrecties toe te passen op de foto's is het mogelijk om de donkere foto's lichter te maken. Bij FLI-MAP wordt hiervoor gebruik gemaakt van FM-Imageviewer. Dit programma beschikt over verschillende beeldcorrecties. De belangrijkste correcties zijn *white balance*, *vignette correction* en *gamma correction*. Voor het corrigeren van de donkere foto's is vooral gebruik gemaakt van de *gamma correction*.

De invoer van de beeldcorrectie bestaat uit de variabele γ . De waarde van pixel r wordt bepaald aan de hand van de volgende formule:

(4)

$$r' = c * r^\gamma$$

Waarin c een constante is en r' de nieuwe waarde van pixel r .

Wordt voor γ waarde 1 ingevoerd zal dit dus geen invloed hebben op pixel r . Zodra γ waarden kleiner dan 1 aanneemt zal het beeld exponentieel lichter worden. [Gonzalez en Woods, 2001]

3.2.2 Foto's inladen in ImageStation

Om de verschillende oriënteringen van de FLI-MAP foto's te kunnen bepalen wordt het programma ImageStation gebruikt. Dit programma beheerst het hele fotogrammetrische proces van het bepalen van de oriënteringen tot het karteren in de luchtfoto's.



Afbeelding 12: Een beeldpiramide van FLI-MAP foto's

Als een luchtfoto op een kleine schaal wordt gepresenteerd kun je details minder goed zien. Het is dan dus overbodig om elke pixel af te beelden. Daarnaast is het technisch niet eens mogelijk omdat een digitale luchtfoto meer pixels heeft dan een computerscherm (1280x1024 pixels). Er worden daarom van elke foto voor verschillende zoomniveaus nieuwe foto's opgeslagen. De foto's van elk zoomniveau hebben een andere resolutie en worden overviews genoemd. De verzameling van overviews noemt men een beeldpiramide. Met het gebruik van beeldpiramiden zijn foto's op laag zoomniveau te presenteren terwijl een uitsnede van dat beeld ook bekeken kan worden op volledige resolutie. [Vosselman, 1996]

De waarden van de pixels per overview kunnen op verschillende manieren berekend worden.

- Subsampling is een manier waarbij een selectief aantal pixels uit het originele beeld wordt gebruikt voor de nieuwe overview.
- Averaging is de methode waarbij van een kader van ($n \times n$) pixels een gemiddelde waarde wordt bepaald die één pixel in de nieuwe (met een n^2 keer zo lagere resolutie) overview krijgt.
- Gauss is een manier die eerst een filter over de afbeelding laat gaan, het resultaat hiervan wordt vervolgens volgens de methode van subsampling tot een nieuwe overview gemaakt. Het gebruikte filter in de methode van Gauss is een 5×5 convolutiekern die voor een elke pixel een nieuwe waarde berekent. (zie afbeelding 13)

[User's Guide ImageStation]

Als enkel subsampling wordt toegepast zal er veel informatie verloren gaan. De pixels die niet worden geselecteerd hebben namelijk geen invloed meer op nieuwe overviews. Bij Averaging is dit niet het geval, alleen krijgt elke pixel hetzelfde gewicht toegekend in het kader, waardoor scherpe overgangen van donker naar licht zullen vervagen. De methode van Gauss heeft hier geen last van omdat de convolutiekern volledig symmetrisch is en aan een verder weg gelegen pixel een kleiner gewicht geeft dan aan een dichtbij gelegen pixel. Je kunt dus zeggen dat de methode van Gauss het meest betrouwbare resultaat geeft. Daarom is voor het maken van beeldpiramiden altijd de methode van Gauss toegepast.

Afbeelding 13: Convolutiekern van de Gauss methode

1	4	6	4	1
4	16	24	16	4
16	24	36	24	16
4	16	24	16	4
1	4	6	4	1

3.2.3 Relatieve oriëntering

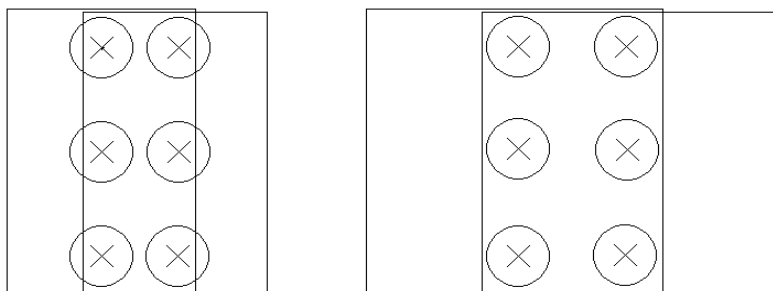
Het uitvoeren van een relatieve oriëntering kan door de meeste software pakketten automatisch worden gedaan. Het automatisch aanmeten van verbindingspunten is in ImageStation mogelijk door de functie *AutoRO*. Deze automatische functie neemt veel werk uit handen van de operator en is daardoor onmisbaar geworden.

Verbindingspunten

Voor de relatieve oriëntering is gesteld dat een nauwkeurige bepaling van de parameters mogelijk is, wanneer op elk van de zes *Von Gruber locaties* in een model twee punten gemeten worden. In ieder model dienen dus twaalf verbindingspunten aanwezig te zijn. Dit komt overeen met achttien punten per foto.

In ImageStation worden de *Von Gruber locaties* vastgelegd door in elke foto vertikaal door het midden drie punten te definiëren. In de overlap zijn daardoor zes locaties waar dus twaalf verbindingspunten worden gemeten.

Omdat de foto's van FLI-MAP rechthoekig zijn vallen de *Von Gruber locaties* meer naar de rand van de overlap en kan een deel van de cirkels zelfs buiten het stereomodel vallen. (zie afbeelding 14) Hierdoor kan de computer minder goed verbindingspunten definiëren. Een gevolg hiervan is dat soms een deel van de verbindingspunten met de hand gekozen moet worden wat veel tijd kost als het om veel stereomodellen gaat.



Afbeelding 14: De *Von Gruber locaties* in rechthoekige foto's van FLI-MAP en in vierkante foto's van traditionele fotogrammetrie

Benaderde EO waarden

In de projectopzet van ImageStation is het mogelijk om benaderde waarden van de externe oriëntering in te voeren. Deze benaderde waarden leggen de foto's onderling al bijna goed waardoor in de *AutoRO* soepeler verbindingspunten gemeten kunnen worden. Er is tijdens het onderzoek echter gebleken dat het invoeren van een EO als benaderde waarde niet het resultaat geeft wat verwacht zou worden. Nog steeds verloopt het vinden van verbindingspunten moeizaam waardoor het met de hand meten van de verbindingspunten de enige oplossing lijkt. Na onderzoek is gebleken dat de foto's met benaderde waarden in combinatie met één gemeten verbindingspunt onderling wel goed genoeg liggen om de *AutoRO* functie van ImageStation te gebruiken.

Mask size

De *AutoRO* functie werkt door binnen een vierkant kader op een *Von Gruber locatie* naar overeenkomsten tussen de foto's te zoeken. Een zijde van het kader bestaat uit een oneven aantal pixels, dit wordt de mask size genoemd. Door het oneven aantal pixels kan altijd het middelste pixel van de mask gecentreerd worden boven een ander pixel.

In het onderzoek is proefondervindelijk geconstateerd dat de verbindingpunten vaak te ver van de *Von Gruber locaties* gevonden worden. Dit kan verklaard worden door het feit dat foto's van FLI-MAP maar een tiende van het aantal pixels van traditionele luchtfoto's heeft. Hierdoor beslaat de mask relatief een groter oppervlak in foto's van FLI-MAP. Dit zou makkelijk op te lossen zijn door de mask size te verkleinen waardoor de verbindingpunten weer binnen een acceptabele afstand van de *Von Gruber locaties* gevonden zullen worden. Echter door het verkleinen van de mask size heeft de computer minder pixels om te matchen en wordt het dus veel moeilijker om overeenkomsten te vinden tussen de foto's. Hierdoor kan de relatieve oriëntering minder goed bepaald worden.

3.2.4 Verbeteringen voor de relatieve oriëntering

Overlap

Om te voorkomen dat teveel verbindingpunten met de hand gemeten moeten worden is het van belang dat de overlap tussen twee foto's niet kleiner wordt dan 60%. Het proces zal anders te arbeidsintensief worden om in de praktijk te gebruiken. De 60% overlap is ook van belang voor de betrouwbaarheid van de verbinding van de foto's. Omdat de *Von Gruber locaties* door de rechthoekige vorm van de foto's in de vliegrichting al dicht bij elkaar liggen neemt de betrouwbaarheid van de relatieve oriëntering sterk af als de overlap minder dan 60% is.

Op dit moment is bewaken van de overlap niet de eerste prioriteit in het FLI-MAP proces, wat logisch lijkt als je nagaat dat de foto's alleen ter oriëntatie van de laserdata gebruikt worden. Tijdens het inwinnen van de data kunnen zich situaties voordoen die de overlap van de foto's niet ten goede komen. Een voorbeeld hiervan is harde wind. Dit kan er voor zorgen dat de helikopter heen en weer slingert, waardoor de overlap minder goed gegarandeerd kan worden.

Om de overlap in de FLI-MAP foto's te garanderen zijn er een aantal punten onder elkaar gezet. Niet alle punten zijn praktisch haalbaar maar hebben wel als uitgangspunt de overlap van 60% of meer te garanderen.

Alleen vliegen bij mooi weer.

Voordelen: De kwaliteit van de foto's zal niet beïnvloed worden door minder goed weer.

Nadelen: Er zal veel minder gevlogen kunnen worden waardoor het product duurder wordt.

Hoger vliegen.

Voordelen: Hoger vliegen zal het grondoppervlak in de footprints groter maken. Karteren zal daardoor makkelijker worden.

Nadelen: Door hoger te vliegen worden de pixelsize en laserspot in het terrein vergroot.

Sneller achter elkaar foto's maken

Voordelen: Door sneller achter elkaar foto's te maken zal er meer overlap in de foto's zijn. Karteren zal daardoor makkelijker worden.

Nadelen: Door meer foto's te maken moet er ook meer en sneller data opgeslagen worden. Het is mogelijk dat in het systeem van dataopslag onderdelen vernieuwd moet worden.

Real time controle in de helikopter

Voordelen: Door real time te controleren of alle foto's genoeg overlap met elkaar hebben, kunnen stukken met weinig overlap opnieuw gevlogen worden.

Nadelen: De software in de helikopter zou aangepast moeten worden.

FLI-MAP in een vliegtuig ipv een helikopter

Voordelen: Een vliegtuig is stabielere waardoor de overlap beter te controleren is.

Nadelen: Voor dat dit ingevoerd kan worden zullen er verschillende testen uitgevoerd moeten worden.

Mask size

In paragraaf 3.2.2 is geconstateerd dat de *AutoRO* minder goed bepaald kan worden in FLI-MAP foto's doordat er minder pixels zijn om te matchen.

Om het zoekgebied wat groter te maken wordt ingesteld dat naast de mask size er in vier overviews gezocht mag worden. In een overzicht van lagere resolutie is een pixel namelijk groter in het terrein. Door de mask size op 15 te zetten wordt het zoekgebied 60 bij 60 pixels. *AutoRO* geeft bij deze instellingen een redelijk resultaat. Het aantal verbindingspunten per model is dan niet altijd genoeg om aan de voorwaarde van Von Gruber te voldoen, maar de paar punten die dan nog missen kunnen eventueel met de hand aangevuld worden. Er is besloten alleen de verbindingspunten te gebruiken die de *AutoRO* heeft gevonden omdat, indien het op deze wijze werkt, dit het automatische proces niet verder zal onderbreken. Er wordt niet verwacht dat de ontbrekende verbindingspunten de vereffening sterk zullen beïnvloeden vanwege de al aanwezige overvloedigheid aan waarnemingen van fotocoördinaten. Om dit probleem te verkleinen zou FLI-MAP een camera met een hogere resolutie moeten gaan gebruiken. Hierdoor zijn er meer pixels waardoor het matchen makkelijker zal worden.

Sinds de aankoop van de huidige camera heeft Imperx een nieuwe camera op de markt gebracht. Er zijn geen grote verschillen met de huidige camera naast een grotere CCD. De nieuwe camera beschikt over een een CCD van 4872 x 3248 wat overeenkomt met een 16 mega pixel camera. Als deze camera in het FLI-MAP systeem gebruikt zou gaan worden zou de verhouding pixels met digitale luchtfoto's verminderd zijn tot een factor zes. Nieuwere camera's zullen alleen maar meer pixels krijgen waardoor het een kwestie van tijd lijkt dat de RO goed bepaald kan worden.

3.2.5 Absolute oriëntering

Om luchtfoto's absoluut te oriënteren worden paspunten gebruikt. Paspunten zorgen voor de koppeling tussen het fotostelsel en het terreinstelsel. De terreincoördinaten van de paspunten maken het dus mogelijk om aan verbindingspunten bijbehorende terreincoördinaten te koppelen. In vergelijking 2 kunnen de paspuntcoördinaten worden ingevuld voor X_i, Y_i, Z_i . Om een fotoblok te kunnen oriënteren heb je minimaal zeven paspuntcoördinaten nodig, dus minimaal drie paspunten. Om echter controle op de paspunten te hebben en overtalligheid in de blokvereffening is het beter om meer dan drie paspunten per fotoblok te gebruiken.

Voor het testgebied langs de RijnGouwelijn is voor een grote overtalligheid aan paspunten gezorgd door 10 paspunten te schilderen over een lengte van ongeveer 300 meter.

Afbeelding 15: Locatie van de paspunten voor de RijnGouwelijn
[Bron: (afbeelding) Google Earth]



De grootte van de paspunten is erg belangrijk. Paspunten mogen niet te klein zijn omdat ze anders niet zichtbaar zijn op de foto's. Te groot is ook niet goed, omdat dan niet goed het midden van het paspunt aan te meten is. Volgens [Vosselman, 1999] moet de grootte van de witte schijf ongeveer 5-6 pixels zijn en de zwarte rand er omheen aan weerszijden 2-3 pixels. Op deze manier is het contrast aan de rand van de witte stip regelmatig.



Afbeelding 16: Een paspunt naast de RijnGouwelijijn

De pixelgrootte in het terrein wordt bepaald met de volgende formule:

$$pt = \left(\frac{pc}{f} \right) * h \quad (5)$$

met:

pt = Pixelsize in het terein

pc = Pixelsize van de CCD = 9 μm

f = Brandpuntsafstand = 35,9646 mm

h = Vlieghoogte = 150 m

De pixelgrootte in het terrein wordt berekend op 3.75 cm.

De paspunten voor de RijnGouwelijijn zijn geschilderd met een straal van 30 cm voor de witte schijf; dit komt in de foto overeen met 8 pixels. De zwarte rand is 15cm dik en komt dus overeen met 4 pixels in de foto. In totaal hebbende paspunten een straal van 60 cm, dus 16 pixels in de foto.

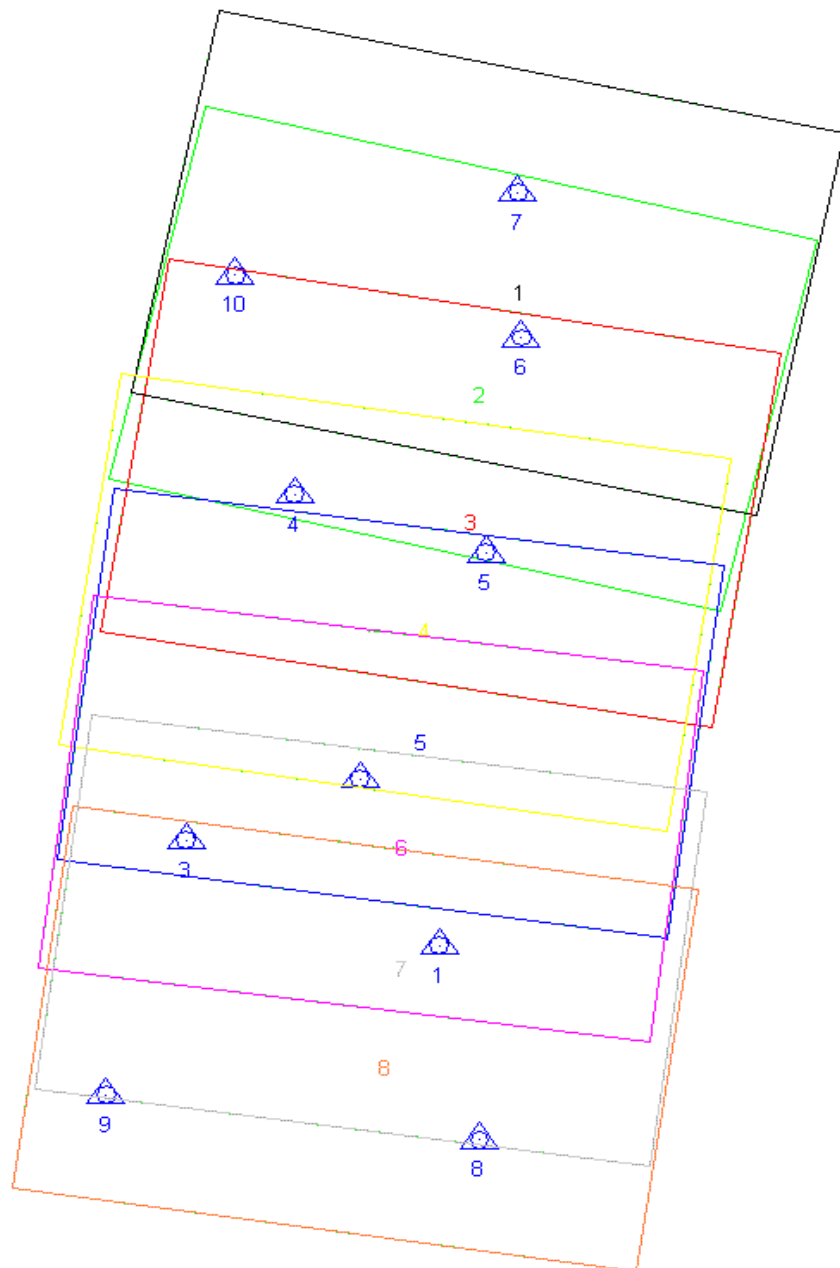
3.2.6 Verbeteringen voor de absolute oriëntering

In paragraaf 3.1.2 is uitgelegd dat de FLI-MAP camera gebruik maakt van een Bayer filter. Omdat de RGBG waarden van een Bayer filter geïnterpoleerd worden naar een kleurenbeeld is het moeilijker om contrastverschil tussen het zwart en wit van het paspunt te zien.

Een aantal paspunten van de RijnGouwelijijn vallen aan de rand van de foto's. Er is ondervonden dat de randen van de foto's van mindere kwaliteit zijn. Dit kan komen door de beeldcorrectie die op de foto's is toegepast om de donkere randen van de foto's lichter te maken. Wellicht heeft de interpolatie van het Bayer filter hier ook invloed op.

De bepaling van de grootte van een paspunt volgens [Vosselman, 1999] is gebaseerd op een camera zonder Bayer filter. Omdat de FLI-MAP camera wel gebruik maakt van een Bayer filter structuur moet de grootte van een paspunt aangepast worden zodat contrastverschillen door interpolatie minder negatieve gevolgen hebben op zichtbaarheid van de paspunten. Door het vergroten van de dikte van de zwarte rand van 15 cm naar 30 cm zal het contrastverschil van wit naar zwart groter zijn waardoor de paspunten beter zichtbaar zijn in de foto's. De totale vergroting van de paspunten van een diameter van 60 cm naar 90 cm is geen belemmering voor het aanmeten van het midden van het paspunt. Dit alles is natuurlijk gekoppeld aan de vlieghoogte van de helikopter, wat bij dit project ongeveer 150 meter is geweest. Als bij andere projecten de helikopter hoger gaat vliegen zullen de paspunten met een recht evenredige schaal moeten worden vergroot. Dit stuit op praktische bezwaren als er veel hoger gevlogen wordt.

Afbeelding 17: Footprint van de foto's met daarin de ligging van de tien paspunten.



3.3 Conclusie

In dit hoofdstuk zijn de waarnemingsgroepen bepaald aan de hand van het proces in ImageStation om de oriënteringen te bepalen. Er is geconstateerd dat de verschillende oriënteringen met de standaard instellingen van ImageStation niet bepaald kunnen worden. Om de relatieve en absolute oriëntering wel te kunnen bepalen zal rekening gehouden moet worden met het feit dat FLI-MAP foto's verschillen van foto's uit digitale fotogrammetrie.

Voor het bepalen van de relatieve oriëntering moet rekening gehouden worden met de volgende aspecten:

- Het aantal pixels per foto
- Het formaat van de foto's
- Benaderde waarden van EO-parameters

Voor het bepalen van de absolute oriëntering gelden de volgende aandachtspunten:

- De vorm en de grootte van de paspunten
- Aanmeet nauwkeurigheid van de paspunten

Door het proces aan te passen voor de FLI-MAP foto's is het mogelijk om een relatieve en absolute oriëntering te bepalen. In hoofdstuk 4 zullen door middel van een blokvereffening alle waarnemingsgroepen vereffend worden om nieuwe EO-parameters te berekenen.

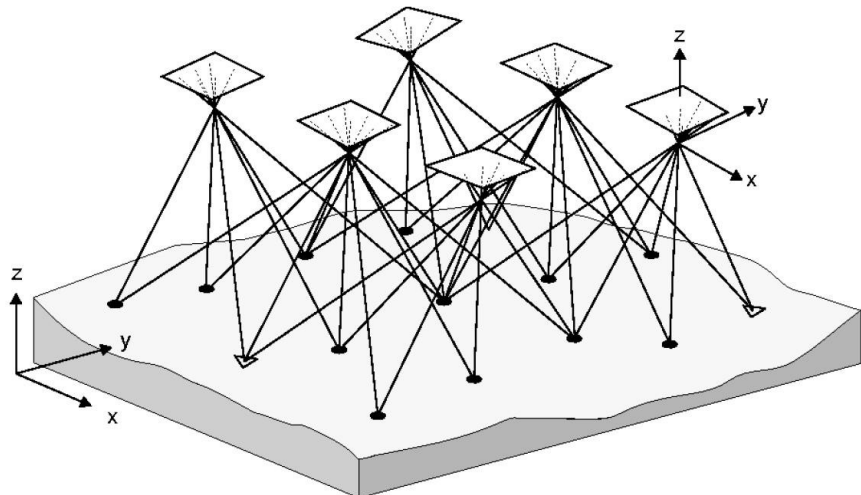
4 Blokvereffening

In het vorige hoofdstuk zijn de fotocoördinaten van de verbindingpunten en paspunten bepaald. Aan de hand van deze gegevens zijn de externe oriënteringsparameters te berekenen. Theoretisch zouden hiermee stereomodellen gemaakt kunnen worden met weinig parallax waarin dus onder andere gekarteerd kan worden. In dit hoofdstuk worden nieuwe foutenbronnen ontdekt en onderzocht. Tevens zal bepaald worden met welke nauwkeurigheid uiteindelijk metingen uitgevoerd kunnen worden.

4.1 Blokvereffening met Bingo

Met het vereffeningsprogramma Bingo worden alle gewenste waarnemingen in een waarnemingsmodel gestopt. Door de eerder genoemde collineariteitsvergelijkingen (formule 2) zijn de externe oriënteringsparameters te bepalen. Om het waarnemingsmodel kloppend te maken worden alle waarnemingen vereffend, ofwel: op alle waarnemingen wordt een correctie toegepast. De vereffening van een fotogrammetrisch blok wordt ook wel blokvereffening genoemd.

Afbeelding 18: Stralenbundels verbinden de foto's aan het terrein



Tijdens de blokvereffening komt een belangrijke grootheid naar voren. Deze zogenaamde variantiefactor (σ_0) geeft aan met welke precisie de fotocoördinaten zijn bepaald. De waarde van σ_0 wordt in micrometers uitgedrukt en geeft samen met de kennis van de pixelgrootte een goed beeld van de meetprecisie. Verder bestaat de mogelijkheid bij genoeg overtaligheid van waarnemingen om bekenden als onbekend te beschouwen en deze vervolgens uit te rekenen. Met deze methode kan een bekende waarde die in twijfel wordt getrokken gecontroleerd worden.

4.2 Meetopzet

Om meer inzicht te krijgen in foutenbronnen zijn er veel verschillende vereffeningen uitgevoerd. De belangrijkste zijn in de volgende paragrafen beschreven. Alle meetresultaten zijn terug te vinden in bijlage III. De terreincoördinaten zijn alle in UTM waarbij de hoogte ten opzichte van de ellipsoïde is uitgedrukt.

Bij het uitvoeren van een vereffening moet vooraf bepaald worden welke waarnemingen, bekenden en instellingen gebruikt zullen worden. Bij de instellingen is het invoeren van a-priori standaardafwijkingen het belangrijkste. Voor de FLI-MAP foto's van de RijnGouwelijk bleken onderstaande standaardafwijkingen na verschillende tests het beste te voldoen. Tenzij anders vermeld worden deze waarden bij alle testvereffeningen toegepast.

Precisie fotocoördinaten: $\sigma = 5 \mu\text{m}$
Precisie paspunten: $\sigma_{XY} = 3 \text{ cm}$ $\sigma_Z = 1 \text{ cm}$
Precisie GPS/INS: $\sigma_{XYZ} = 35 \text{ mm}$
 $\sigma_{\omega\phi} = 0,001 \text{ gon}$ $\sigma_{\kappa} = 0,035 \text{ gon}$

Verder worden alle meetresultaten voor X, Y en Z altijd uitgedrukt in meters en ω , ϕ en κ in gon.

4.3 Vereffening met alle waarnemingen

De eerste en meest logische vereffening heeft zoveel mogelijk waarnemingen in het waarnemingsmodel. Hierin bestaan de waarnemingen uit de fotocoördinaten van de verbindingpunten en paspunten gemeten door *AutoRO* in ImageStation, de GPS/INS-waarnemingen (positie en stand van het fotomoment) en de terreincoördinaten van de paspunten. De cameraparameters en lenscorrecties en worden als niet-stochastisch en dus als bekend beschouwd. De vereffening wordt als volgt geschreven.

Vereffening #1	
Waarnemingen	Bekenden
GPS / INS	Cameraparameters
10 Paspunten	Lenscorrecties
Fotocoördinaten	

Na de vereffening wordt als eerste de waarde van sigma-0 beoordeeld. Voor dit onderzoek wordt de maximale waarde voor sigma-0 gesteld op $40 \mu\text{m}$. Dit is ruim vier pixels in de foto. Er wordt aangenomen dat een aanmeetnauwkeurigheid van maximaal twee pixels zeker haalbaar is. Als deze grenswaarde wordt overschreden kan dus worden geconcludeerd dat er een grove fout in het model zit en zal de vereffening direct worden verworpen.

In de eerste vereffening is sigma-0 bepaald op 30.32. Deze hoge waarde doet vermoeden dat er nog fouten onopgemerkt in het model zitten. Ter vergelijking: bij normale fotogrammetrie wordt de norm voor de waarde van sigma-0 onder de $6-7 \mu\text{m}$ gesteld. Daarom worden in eerste instantie de vereffende externe oriënteringsparameters vergeleken met de GPS/INS-waarnemingen en de vereffende paspuntcoördinaten met de coördinaten van de paspunten gemeten met 06-GPS.

De verschillen tussen de vereffende EO-parameters en de GPS/INS waarnemingen zijn in tabel 1 te zien. Deze verschillen kan men zien als de correctie op de GPS/INS-waarnemingen die uit de vereffening volgt.

Tabel 1: Verschillen EO-parameters tussen vereffening #1 en GPS/INS

Foto	X	Y	Z	Phi	Omega	Kappa
1	-0.015	0.047	-0.153	-0.4413	-0.5455	-0.0276
2	-0.022	-0.011	-0.083	-0.3980	-0.5820	0.0947
3	-0.063	-0.041	-0.038	-0.4768	-0.6122	-0.0021
4	-0.016	-0.064	-0.090	-0.4493	-0.5792	0.0681
5	-0.001	-0.037	-0.055	-0.4833	-0.5508	0.0246
6	0.008	0.019	0.028	-0.5026	-0.5424	0.0233
7	0.030	-0.082	0.031	-0.5091	-0.5826	-0.0586
8	0.027	-0.083	-0.010	-0.5089	-0.6042	-0.0350
gem.	-0.01	-0.03	-0.05	-0.47	-0.57	0.01
st dev	0.03	0.05	0.06	0.04	0.03	0.05

In de tabel is te zien dat de verschillen voor X, Y, Z en κ erg klein zijn, maar dat de ω en ϕ erg afwijken van de INS-waarnemingen. Deze verschillen zijn opvallend genoeg vrijwel gelijk aan elkaar. Dit zou kunnen wijzen op een fout in de GPS/INS-waarnemingen. Ook in de correcties op de paspunten gebeurt iets merkwaardigs. Paspunt 1 krijgt namelijk een correctie van meer dan een meter in de X. Ook correcties op de overige paspunten zijn vrij groot in de X en Y dit is te zien in tabel 2.

Tabel 2: Residuen van paspunten in vereffening #1

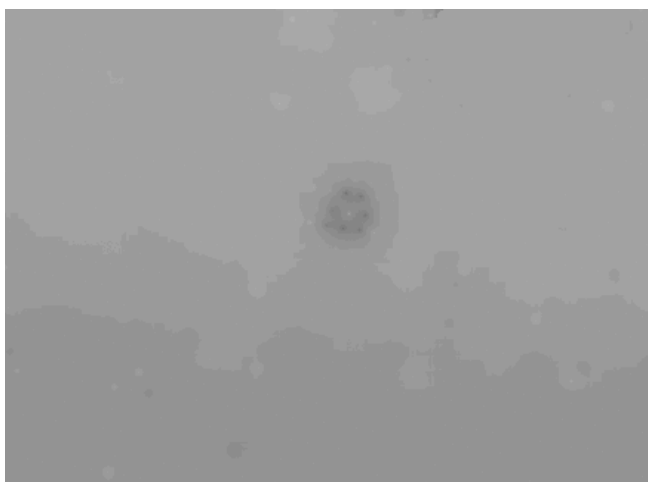
Paspunt	X	Y	Z
1	-1.249	0.511	0.106
2	0.418	0.15	0.023
3	-0.084	0.275	0.088
4	0.15	0.094	0.054
5	0.371	0.092	0.069
6	0.388	0.219	0.108
7	0.383	0.284	0.038
8	0.846	-0.319	0.113
9	-0.474	-0.183	0.087
10	-0.438	0.406	0.127
gem.	0.03	0.15	0.08
st dev	0.61	0.25	0.03

4.4 Controle van de paspunten

Op basis van de resultaten uit tabel 2 is besloten een onafhankelijke controle uit te voeren op de paspunten. De controle zou uit moeten wijzen of alle paspunten in het terrein correct gemeten zijn. De meest voor de hand liggende mogelijkheid om deze controle uit te voeren is om de paspunten in de laserdata te controleren. Voor de verwerking van de laserdata van FLI-MAP wordt het programma FLIP-7 gebruikt. FLIP-7 verzorgt de processing van de laserdata in de vorm van het visualiseren van de laserpunten op verschillende manieren waarop vervolgens bewerkingen uitgevoerd kunnen worden. Naast het presenteren van de laserpunten op basis van hoogteverschil kan FLIP-7 de laserpunten ook op mate van intensiteit presenteren.

Een signaal dat weerkaatst op een wit vlak heeft meer intensiteit dan een signaal dat op een zwart vlak weerkaatst. Een paspunt is een witte cirkel met een zwarte rand er omheen en is daarom terug te vinden in de laserdata. (zie afbeelding 19)

Vanwege de kleine omvang van een paspunt is het wel noodzakelijk om op een hoog zoomniveau te kijken. Daarom zal de ortho-gerectificeerde foto eerst voor de laserdata getoond moeten worden om de locatie van het paspunt vast te stellen. Voor alle paspunten in het testgebied zijn de coördinaten uit de laserdata gemeten. In tabel 3 zijn de verschillen te zien van de meting vanuit de laserdata ten opzichte van de meting met 06-GPS. Er moet wel rekening gehouden worden met de nauwkeurigheid van de zowel de laser als het aanmeten van de paspunten in de laserdata.



Afbeelding 19: Een paspunt uit de laserdata op intensiteit

Voor enkele paspunten wordt een verassend goede overeenkomst gevonden tussen de 06-GPS meting en de meting in de laserdata. Paspunt 1 vertoont echter een grove afwijking, precies zoals werd vermoed. Deze onafhankelijke controle heeft doen besluiten paspunt 1 uit alle volgende vereffeningen te laten. Het is zowel opvallend als zorgwekkend dat Bingo de grove fout in paspunt 1 niet heeft verworpen, wellicht kan dit later opgelost worden.

Paspunt	X	Y
1	2.16	0.51
2	-0.11	0.15
3	-0.09	-0.04
4	0.11	-0.13
5	-0.18	0.06
6	0.10	-0.01
7	0.08	-0.08
8	0.01	-0.01
9	-0.02	-0.05
10	0.01	-0.15
gem.	0.21	0.02
st dev	0.69	0.19

Tabel 3: Verschillen paspuntcoördinaten terestische meting t.o.v. laserdata

4.5 Vereffening zonder paspunt 1

Vereffening #2	
Waarnemingen	Bekenden
GPS / INS	Cameraparameters
9 Paspunten	Lenscorrecties
Fotocoördinaten	

De tweede vereffening die is uitgevoerd is dezelfde als de eerste, maar zonder paspunt 1. Op het eerste gezicht zijn de verschillen van de EO-parameters met de GPS-waarneming hetzelfde als bij de eerste vereffening het geval was. Als de twee oriënteringen van elkaar worden afgetrokken zit het grootste verschil in de phi, welke een kleinere correctie krijgt in de tweede vereffening van gemiddeld 0.06 gon.

De standaardafwijking van de correcties op de paspunten in X en Y daalt wel van resp. 61 cm en 25 cm naar 44 cm en 18 cm, maar is nog steeds vrij groot.

Beoordeling parallax in stereomodellen

Als aan de hand van de externe oriëntering die uit de tweede vereffening volgt wordt het stereomodel bekeken, en is direct te zien dat er teveel parallax aanwezig is. De mate van parallax is niet gelijkmatig verdeeld over het stereobeeld. Vaak is de parallax aan de randen hoger dan in het midden van het stereomodel.

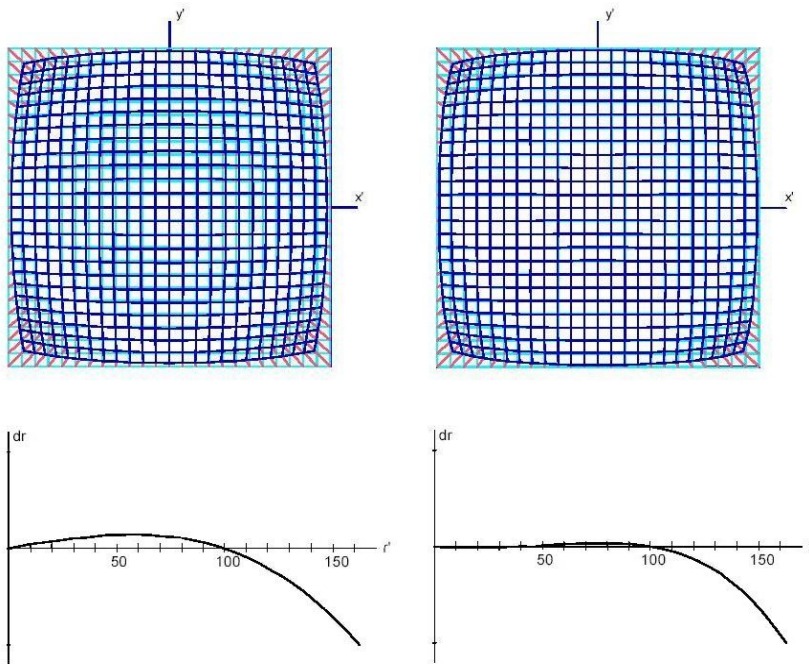
Er is moeilijk een waarde te koppelen aan de waargenomen parallax, wel is het duidelijk dat karteren in deze modellen zeker niet mogelijk is.

Naast de stereomodellen die uit vereffening volgen is ook gekeken naar de kwaliteit van de stereomodellen waarvan direct de GPS/INS-waarnemingen als externe oriëntering wordt ingevoerd. Deze manier van *direct georeferencing* is interessant om te bekijken vanwege het gemak. Buiten dat er geen vereffening plaats vindt worden er geen verbindingspunten gemeten. Dit scheelt enorm veel tijd wat bedrijfseconomisch uiteraard erg interessant is.

Opvallend genoeg worden de stereomodellen volgens *direct georeferencing* beter beoordeeld dan de stereomodellen die volgden uit de eerste vereffening. Hoewel nog steeds enige parallax te ontdekken is, is karteren in deze stereomodellen niet onmogelijk. De constatering dat *direct georeferencing* beter resultaat geeft dan de twee vereffeningen wijst op een mogelijk onopgemerkte fout in de vereffeningen.

4.6 Nieuwe lenscorrecties

De meest onzekere factor is de set van lenscorrecties die momenteel gehanteerd wordt bij FLI-MAP. Deze lenscorrecties zijn nooit met zekerheid als correct verondersteld. Eerder bepaalde lenscorrecties gaven geen goede resultaten terwijl de huidige (door een ander bedrijf geleverde) lenscorrecties wel voldoen voor de enige toepassing van de foto's; het maken van een orthomozaïek. Door de aanwezige twijfel over de lenscorrecties zijn deze in de volgende vereffening niet meer als bekend verondersteld.



Afbeelding 20: Twee voorbeelden van radiale lensvertekening (Bron: [Kruck, 2003])

Vereffening #3

Waarnemingen	Bekenden
Fotocoördinaten	Cameraparameters
9 Paspunten	
GPS / INS	

Met een voldoende overtalligheid aan waarnemingen kunnen deze lenscorrecties opnieuw bepaald worden. Daarom worden er zoveel mogelijk waarnemingen in deze vereffening meegenomen. Waar in de eerste twee vereffeningen de fotocoördinaten nog werden gecorrigeerd voor de lenscorrecties worden de fotocoördinaten nu niet meer aangepast. Het programma Bingo bevat een set van 30 verschillende additionele parameters waarmee de lensvertekening bepaald kan worden. Een aantal parameters kunnen radiale lensvertekeningen berekenen. De parameter voor een radiale lensvertekening wordt berekend via de volgende vergelijkingen.

$$\begin{aligned} x' &= x - x * (r^2 - c) * P \\ y' &= y - y * (r^2 - c) * P \end{aligned} \tag{6}$$

met: $r^2 = x^2 + y^2$
 en c is een constante
 [Jakobsen, 2003]

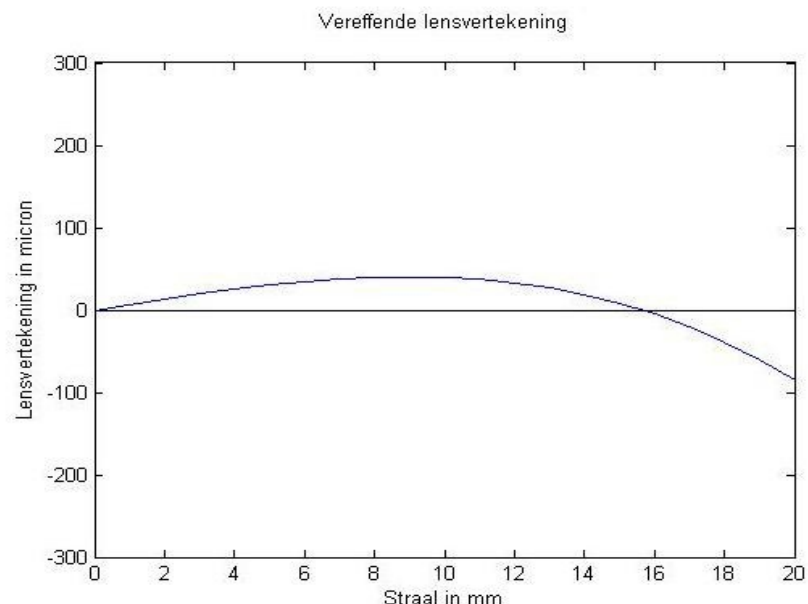
In het vereffeningrapport is de waarde van P uitgerekend evenals de standaardafwijking. Omdat P dimensieloos is, is de standaardafwijking ook dimensieloos en kan dus niet zonder meer aangenomen worden dat de parameter met de laagste standaardafwijking het nauwkeurigst is bepaald. Om de parameters goed te kunnen beoordelen wordt de waarde van P gedeeld door de standaardafwijking waarmee deze bepaald is. Hoe hoger deze waarde des te beter de additionele parameter de lensvertekening kan beschrijven.

Tabel 4: Gegevens over de waarde P uit Bingo

Par.no	Parameter value	Standard dev.	Value / Stand.dev
4	98.4	9.0	11.0
17	688.8	55.3	12.5
25	489.9	13.2	37.2

Uit het vereffeningrapport van de vereffening voor de lenscorrectie blijkt dat drie additionele parameters nauwkeurig bepaald kunnen worden. Eén van deze drie beschrijft een radiale lensvertekening. Een probleem dat ontstaat is dat ImageStation alleen voor een radiale lensvertekening kan corrigeren. De twee andere lensvertekeningen die zijn bepaald kunnen dus niet op de foto's worden toegepast. Omdat het effect van de lenscorrecties die toegepast zou moeten worden niet beoordeeld kan worden heeft het ook geen meerwaarde deze te bepalen in de vereffening. Het waarnemingsmodel wordt nu opnieuw vereffend, maar dit keer waarbij is ingesteld dat alleen de additionele parameter voor de radiale lensvertekening berekend wordt. De lensvertekening die nu berekend wordt ziet eruit zoals in afbeelding 21.

Afbeelding 21: Vereffende lenscorrectie



De vorm van de nieuw bepaalde lensvertekening is beduidend anders dan de lensvertekening die momenteel gebruikt wordt (zie afbeelding 11). Tot een straal van 16 mm is de vertekening zelfs in de tegengestelde richting.

4.7 Vereffeningen met nieuwe lenscorrecties

Om de nieuw bepaalde lensvertekening te beoordelen wordt in de vierde vereffening van het onderzoek deze lensvertekening als bekend beschouwd.

Vereffening #4	
Waarnemingen	Bekenden
Fotocoördinaten	Cameraparameters
9 Paspunten	Lenscorrectie (nieuw)
GPS / INS	

Tijdens de vereffening worden paspunt 8 en paspunt 6 verworpen. Dit is opmerkelijk als men naar tabel 3 kijkt waaruit werd geconstateerd dat alleen paspunt 1 grote afwijkingen vertoonde. Desondanks zijn de verwerpingen gehonoreerd. Uit de vereffening komt de waarde van sigma-0 op 18.54. Dit is aanzienlijk lager dan de eerste vereffening.

De fotocoördinaten worden door de andere lenscorrecties relatief sterk beïnvloed. Het feit dat de waarde van sigma-0 bijna gehalveerd is zegt wel dat het blok met de nieuwe lenscorrecties relatief aanzienlijk beter georiënteerd kan worden.

Als naar de residuen van de paspunten gekeken wordt zijn de correcties weer wat kleiner ten opzichte van de eerste twee vereffeningen. Met name de standaardafwijking in de X is gedaald van 44 cm naar 34 cm.

Paspunt	X	Y	Z
2	0.261	0.034	0.065
3	-0.227	0.193	0.112
4	0.007	0.217	0.077
5	0.421	0.114	0.091
7	0.380	0.370	0.043
9	-0.366	-0.126	0.067
10	-0.353	0.357	0.111
gem	0.02	0.17	0.08
st dev	0.34	0.18	0.03

Tabel 5: Residuen van paspunten in vereffening #4

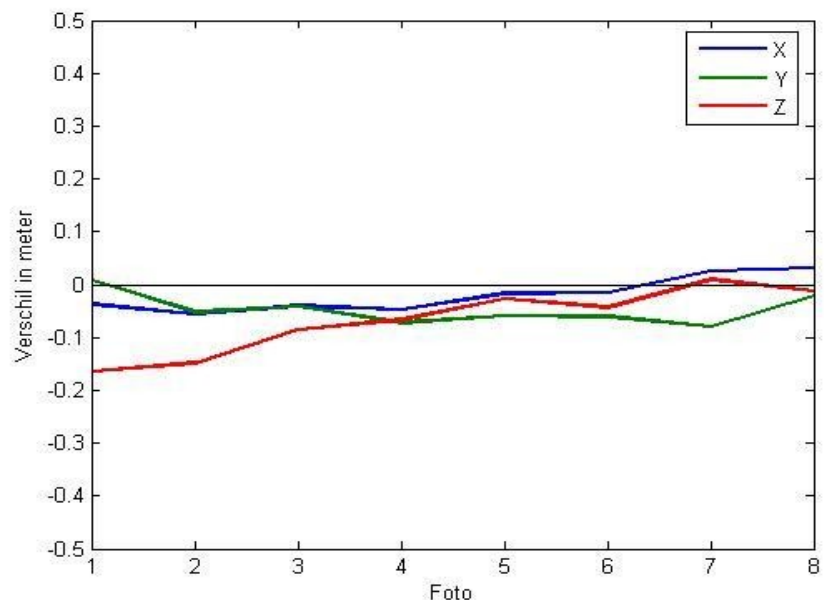
Nu beweerd is dat de vereffende lenscorrecties een positieve invloed hebben op het waarnemingsmodel zullen ook de vereffende EO-parameters opnieuw worden vergeleken met de GPS-waarnemingen. De verschillen zijn de zien in tabel 6. In de tabel is tevens de standaardafwijking van de correcties op de GPS/INS-waarneming opgenomen.

Vergeleken met de eerste twee vereffeningen verschilt de vereffening met de nieuwe lenscorrecties maar weinig. Opnieuw zijn de correcties op X, Y, Z en kappa klein en die van omega en phi erg groot. Verrassend is dit niet als men bedenkt dat het enige verschil tussen beide vereffeningen een andere set lenscorrecties is.

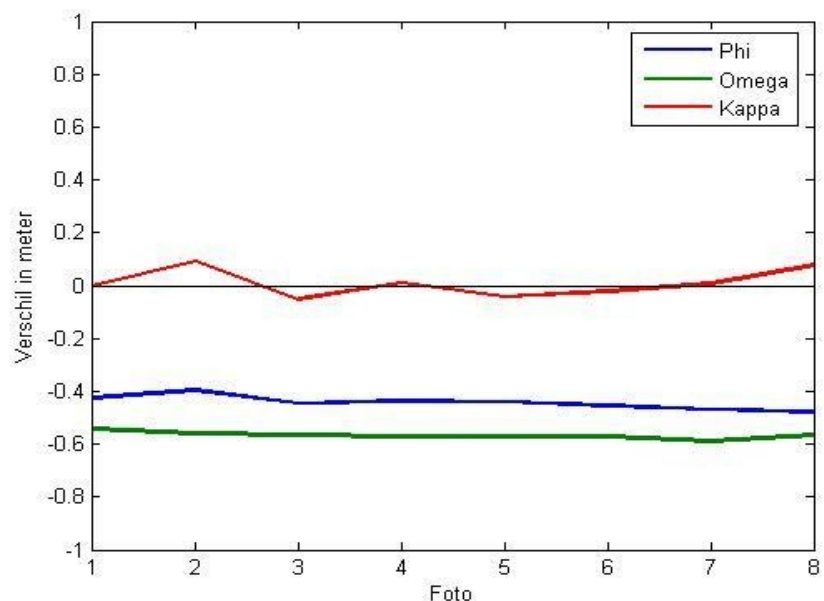
Wel is het verrassend dat deze grote correcties een lage standaardafwijking hebben. Dit lijkt een systematische fout te zijn. Een systematische fout is namelijk op alle waarnemingen van kracht met dezelfde grootte. Daarom zullen in de volgende vereffening de GPS/INS-waarnemingen uit het model worden gelaten.

In afbeelding 22 en 23 is ook te zien dat Phi en Omega een grote afwijking hebben.

Afbeelding 22: Verschillen X, Y, Z van de EO-parameters tussen vereffening #4 en GPS/INS



Afbeelding 23: Verschillen Phi, Omega, Kappa van de EO parameters tussen vereffening #4 en GPS/INS



Vereffening #5

Waarnemingen	Bekenden
Fotocoördinaten	Cameraparameters
9 Paspunten	Lensocorrectie (nieuw)

Het zou normaal zijn dat het model zwakker wordt doordat er minder waarnemingen zijn waardoor de onbekenden minder goed bepaald kunnen worden. Er wordt echter geconstateerd dat zonder GPS/INS-waarnemingen de waarde van sigma-0 sterk daalt, namelijk naar 7,41. Als men bedenkt dat voor normale fotogrammetrie een grenswaarde wordt gehanteerd van 7 is deze waarde voor de toepassing in FLI-MAP uitstekend. Een lage waarde van sigma-0 wil echter niet zeggen dat het resultaat ook daadwerkelijk naar behoren is. Dit is goed te zien als naar de verschillen van de vereffende EO-parameters met de GPS/INS data wordt gekeken. De correcties op de GPS/INS-waarnemingen worden ineens heel groot, terwijl de correcties op de paspunten zeer klein zijn worden.

Foto	X	Y	Z	Phi	Omega	Kappa
1	-1,466	-1,692	-1,513	-0,9111	0,0624	0,0408
2	-1,121	-0,964	-1,554	-0,7526	-0,2265	0,0944
3	-1,387	-0,611	-1,602	-0,9136	-0,3792	-0,0443
4	-1,137	-0,624	-1,548	-0,8014	-0,3551	-0,0123
5	-1,059	0,734	-1,252	-0,7887	-0,9655	0,0274
6	-1,468	0,920	-1,042	-0,9882	-1,0408	0,0792
7	-1,517	0,809	-0,752	-1,0626	-0,9822	0,0738
8	-1,938	1,203	-0,632	-1,2441	-1,0835	0,1281
gem	-1,39	-0,03	-1,24	-0,93	-0,62	0,05
st. afw.	0,29	1,07	0,39	0,16	0,45	0,06

Tabel 6: Verschillen EO-parameters tussen vereffening #5 en GPS/INS

Door de test van de betrouwbaarheid van de paspunten volgens tabel 3 is er een vertrouwen ontstaan in de kwaliteit van de paspunten in het waarnemingsmodel. De 9 paspunten leveren 27 waarnemingen voor het blok, terwijl een minimum van 7 geldt voor de oriëntering van een blok. Er is dus ruimschoots voldoende overtaligheid (zelfs met de verwerping van paspunt 8) wat zou betekenen dat het waarnemingsmodel ook zonder GPS-INS-waarnemingen in staat zou moeten zijn tot een goede externe oriëntering te komen. De oriëntering die uit de vereffening volgt wijkt echter aanzienlijk af van de GPS/INS-waarnemingen. Hieruit wordt geconcludeerd dat er een fout in de GPS/INS zit.

De lage waarde van sigma-0 zegt meer iets over de precisie van de paspunten dan over de betrouwbaarheid van het waarnemingsmodel.

Het is opmerkelijk dat de correcties op de GPS-INS-waarnemingen van de vorige vereffening, met uitzondering van phi en omega, erg klein zijn. Het heeft alle schijn dat de overtaligheid aan GPS/INS-waarnemingen het hele model naar deze waarnemingen heeft toegetrokken. Daarbij krijgen X, Y, Z en kappa meer gewicht in de vereffening omdat deze makkelijker uit een foto zijn te bepalen dan de rotaties phi en omega. Het hoge gewicht van X, Y, Z en kappa zorgt ervoor dat de correcties op deze parameters kleiner worden wat precies te zien is in voorgaande vereffeningen.

Toch wordt de fout verwacht in de phi en omega, juist omdat deze moeilijker te bepalen zijn.

4.8 Bepaling van de nauwkeurigheid met checkpoints

Er is getracht voor de ontdekte foutenbronnen zoveel mogelijk te corrigeren. Er moet wel gerealiseerd worden dat de bevindingen slechts op 8 foto's gebaseerd zijn. De correcties zijn dus niet betrouwbaar genoeg bepaald om als definitief beschouwd te kunnen worden. Zowel voor de lenscorrecties als voor de fout in de GPS/INS zal een uitgebreide kalibratie noodzakelijk zijn om betrouwbare correcties te vinden.

Voor de bepaling van de nauwkeurigheid waarmee momenteel gemeten kan worden zijn de correcties toegepast zoals die bepaald zijn aan de hand van de acht foto's. De nauwkeurigheid die in deze paragraaf bepaald wordt is dus alleen van kracht op de acht foto's maar geeft wel een goede indicatie van de nauwkeurigheid die uiteindelijk gehaald kan worden.

De meest eenvoudige manier om tot een absolute nauwkeurigheid te komen is door minder paspunten in de vereffening mee te nemen, waarbij diegene die eruit worden gelaten als checkpoint gezien worden. Deze checkpoints doen dus niet mee in de vereffening maar er worden wel terreincoördinaten van bepaald. De verschillen tussen deze coördinaten en de coördinaten gemeten met 06-GPS geven een indicatie van de nauwkeurigheid.

Vereffening #6	
Waarnemingen	Bekenden
Fotocoördinaten	Cameraparameters
6 Paspunten	Lenscorrectie (nieuw)
GPS / INS	

In de vereffening worden paspunt 3, 5 en 6 als checkpoint gezien. Dit zijn paspunten die in het midden van het testgebied liggen en waarvan daarom verwacht wordt dat deze minder invloed hebben op het waarnemingsmodel dan paspunten aan de randen. Uit de vereffening zijn de correcties op de checkpoints bepaald zoals in tabel 8 te zien is.

Tabel 7: Verschillen van checkpoint-coördinaten uit vereffening met 06-GPS.

Checkpoint	X	Y	Z
3	0,425	0,186	1,798
5	0,309	0,196	1,21
6	0,321	0,197	1,346

De verschillen in X en Y zijn niet verrassend als men bedenkt dat de standaardafwijking van de correcties op de paspunten uit vereffening met GPS/INS en nieuwe lenscorrecties respectievelijk 34 cm en 18 cm zijn. In de hoogte zit echter een heel grote afwijking, terwijl de standaardafwijking in de hoogte maar 2 cm was. Opvallend is het dat de afwijking in de hoogte sterk lijkt op het gemiddelde verschil van -1.24 m in de hoogte in de vereffening met alleen paspunten. (zie tabel 7)

Door de hoge betrouwbaarheid van de paspuntcoördinaten in de hoogte (deze is bepaald met een waterpassing en gecontroleerd in de laserdata) wordt geconcludeerd dat de overheersende GPS/INS-waarnemingen (48 waarnemingen tegenover 18 waarnemingen) de hoogtebepaling sterk negatief doet beïnvloeden. Daarnaast worden er tijdens de vereffening ook nog veel paspunten verworpen. De correcte paspunten passen blijkbaar niet meer in het waarnemingsmodel met de overheersende foutieve GPS/INS-waarnemingen. Het is nu ook niet heel vreemd meer dat paspunt 1 niet werd verworpen in de eerste vereffening.

4.9 Bepaling nauwkeurigheid door praktijkmeting

Een andere manier om de nauwkeurigheid te bepalen is om in stereomodellen punten te karteren die bekend zijn in coördinaten, ofwel de paspunten. Hierbij is in plaats van het theoretische verschil het verschil te zien dat in de praktijk gehaald wordt. Hiertoe heeft een ervaren fotogrammeter metingen uitgevoerd in stereomodellen waarbij de volgende EO-parameters worden ingevoerd:

- EO direct uit GPS/INS (*direct georeferencing*)
- EO uit vereffening met alleen paspunten
- EO uit vereffening met paspunten en GPS/INS-waarnemingen

Tijdens de meting blijkt dat de hoogtemeting van paspunt 3 wordt verstoord door overhangende takken waardoor deze niet wordt meegenomen in de meetresultaten.

In tabel 9 zijn de verschillen te zien tussen de paspuntcoördinaten gemeten met 06-GPS en gemeten in het stereomodel. De verschillen zijn over het algemeen klein, maar er zijn wat uitschieters te zien. De standaardafwijkingen in X en Y worden op 11 cm resp. 3 cm bepaald en van Z op 9 cm. Hieruit worden de volgende precisies afgeleid:

$$\sigma_{xy} = 8 \text{ cm}$$

$$\sigma_z = 9 \text{ cm}$$

Paspunt	X	Y	Z
2	-0,01	-0,02	0,08
3	-0,10	0,01	
4	0,05	0,00	0,17
5	0,11	0,03	-0,06
6	0,03	-0,02	0,00
10	0,22	0,05	0,11
st dev	0,11	0,03	0,09
gem.	0,05	0,01	0,06

Tabel 8: Verschillen per paspunt gemeten in stereomodellen met EO parameters volgens vereffening met alleen paspunten

Als naar de metingen in stereomodellen volgens *direct georeferencing* wordt gekeken is te zien dat de verschillen in X en Y boven verwachting goed zijn. De standaardafwijking van de X is zelfs beter dan de metingen met de EO-parameters uit de vereffening. De hoogte is echter erg slecht met een gemiddeld verschil van 1,50 m. (zie tabel 10)

Tabel 9: Verschillen per paspunt gemeten in stereomodellen volgens *direct georeferencing*

Paspunt	X	Y	Z
2	0,07	-0,02	-0,93
3	0,05	-0,02	
4	0,03	0,07	-1,91
5	0,11	-0,04	-1,32
6	0,09	0,04	-1,15
10	-0,03	-0,04	-2,19
st dev	0,05	0,05	0,45
gem.	0,05	0,00	-1,50

Het wekt wel vertrouwen dat *direct georeferencing* in X en Y zo goed blijkt te zijn. Mocht de fout in GPS/INS opgelost worden, dan wordt verwacht dat voor de hoogte een precisie behaald kan worden die in dezelfde orde van grootte ligt als van de X en Y.

De laatste meting die uitgevoerd is zou met correcte GPS/INS-waarnemingen de beste resultaten moeten geven. Nu wordt dit dus niet verwacht en geldt de meting alleen als bevestiging van de fout. In tabel 11 zijn de meetresultaten te zien.

Tabel 10: Verschillen per paspunt gemeten in stereomodellen met EO parameters volgens vereffening met paspunten en GPS/INS

Paspunt	X	Y	Z
2	-0,15	-0,07	-0,95
3	-0,19	-0,11	-1,30
4	-0,14	-0,13	-1,00
5	-0,16	-0,16	-1,10
6	-0,19	-0,14	-0,97
10	0,09	-0,08	-0,76
st dev	0,11	0,03	0,18
gem.	-0,12	-0,12	-1,01

Precies zoals verwacht zijn deze resultaten het minst goed. Er kan gezegd worden dat de aanwezigheid van paspunten de hoogte enigszins doet corrigeren in vergelijking tot *direct georeferencing*. De verschillen zijn echter een stuk kleiner dan de verschillen op de checkpoints zoals te zien in tabel 8. Een meting in de praktijk kan dus aanzienlijk verschillen van de theoretisch veronderstelde nauwkeurigheid.

4.10 Conclusie

Tijdens het uitvoeren van de vereffeningen zijn een aantal fouten geconstateerd. Er kan met zekerheid gezegd worden dat de lenscorrecties die momenteel gebruikt worden niet voldoen. De nieuwe, door vereffening bepaalde, set lenscorrecties heeft als gevolg dat parallax grotendeels uit stereomodellen verdwijnt. Verder is geconcludeerd dat er een fout in de GPS/INS aanwezig is die mogelijk systematisch is.

De haalbare precisie van driedimensionale metingen wordt gesteld op: $\sigma_{XY} = 8$ cm en $\sigma_Z = 9$ cm

Direct georeferencing wordt ondanks de slechte hoogte niet gelijk verworpen. Als voor de fout in de GPS/INS gecorrigeerd wordt zal de precisie van *direct georeferencing* ook beter worden. Daarnaast kan er wellicht een andere oplossing bedacht worden om de hoogte goed te krijgen.

5 Bedrijfseconomische haalbaarheid

Een bedrijf wil naast een kwalitatief goed product ook dat het product praktisch haalbaar is en uiteraard financieel aantrekkelijk is. De in dit onderzoek behandelde methode volgens triangulatie en blokvereffening zonder GPS/INS-waarnemingen haalt een goede nauwkeurigheid, maar is de methode wel haalbaar in de praktijk? Met de methode volgens *direct georeferencing* wordt nog niet de gewenste nauwkeurigheid gezien, maar het gemak van deze methode is erg groot. In dit hoofdstuk zal de haalbaarheid van de methoden worden onderzocht en zal tevens de afweging worden gemaakt welke methode bedrijfsmatig gezien aantrekkelijker is.

5.1 Methode volgens triangulatie en blokvereffening

Uit voorgaande hoofdstukken is gebleken dat via de methode van triangulatie en vereffening het mogelijk is met een goede nauwkeurigheid te karteren in stereomodellen. Aan de methode kleven echter ook een aantal nadelen. De belangrijkste worden nu omschreven.

- Het uitvoeren van de triangulatie en blokvereffening kost tijd. De lage vlieghoogte resulteert in een grote toename foto's per oppervlak ten opzichte van traditionele fotogrammetrie. Zelfs door automatisch verbindingspunten te kiezen levert trianguleren veel werk op. Voor grote gebieden kan financieel gezien zelfs beter een aparte vlucht gepland worden volgens traditionele fotogrammetrie om het triangulatieproces te versnellen. Daarnaast is ervaren dat in een project veel mis kan gaan. Instellingen moeten helemaal goed staan en zijn projectafhankelijk. Hiervoor is ervaring met ImageStation en Bingo geboden, wat binnen Fugro-Inpark minimaal aanwezig is.
- Vanwege de lage vlieghoogte is de overlap in het terrein erg klein. Als er in deze modellen gekarteerd wordt zal er dus snel van model gewisseld moeten worden om de lijn weer te kunnen oppakken. Dit vergroot de kans op fouten in de hoogte.
- De aanwezigheid van paspunten is noodzakelijk. Voor dit onderzoek zijn de paspunten geschilderd wat niet praktisch is voor de lange smalle blokken die er in grote mate zijn bij FLI-MAP. Het schilderen van paspunten is duur en daarnaast is minder goed te voorspellen waar op de foto's de paspunten uiteindelijk komen. De lage vliegsnelheid heeft als gevolg dat de helikopter minder stabiel is. Paspunten die op randen van foto's gepland worden lopen hierdoor een groter risico buiten de foto te vallen. Dit heeft op zijn beurt weer het gevolg dat paspunten dichter naar het midden van foto's worden gepland waardoor het blok minder goed aan het terrein gekoppeld kan worden. Voor projecten in het buitenland is het gebruik van paspunten nog minder aantrekkelijk. Fugro-Inpark wil zelf voor de paspunten zorgen waardoor extra personeel op een project gezet moeten worden.
Paspunten hoeven echter niet altijd geschilderd te zijn. Er kan ook gebruik worden gemaakt van natuurlijke paspunten waarbij markante punten die op de foto zichtbaar zijn later terrestisch

ingemeten worden. In Nederland zijn veel markante punten zoals hectometerpaaltjes en spoorportalen bekend in coördinaten bij bepaalde instanties. Hierdoor kan het hele proces van paspunten vooraf schilderen worden overgeslagen. Buiten de nadelen/onduidelijkheden die hierin aanwezig kunnen zijn (bestandsformaat, plaats van aanmeten, naamgeving) zijn deze gegevens in het buitenland naar verwachting vaak niet beschikbaar. Deze optie is dus minder aantrekkelijk voor Fugro-Inpark omdat een universeel systeem uiteraard de voorkeur heeft voor een bedrijf dat veel in het buitenland actief is.

De grootste praktische bezwaren worden gezien in de paspunten. Het schilderen van paspunten wordt in principe direct verworpen. Voornamelijk voor buitenlandse projecten wordt dit als onhandig ervaren. Het gebruik van natuurlijke paspunten heeft meer potentie in Nederland, maar ook dit valt bij buitenlandse projecten niet te realiseren. Nameten in het terrein is hier geen optie omdat men dan later terug moet naar het projectgebied.

5.2 Methode volgens *direct georeferencing*

Direct georeferencing is de methode waarbij de externe oriënteringsparameters niet worden uitgerekend door middel van een vereffeningprogramma maar rechtstreeks uit de GPS/INS komen. Door de techniek zoals die beschreven staat in paragraaf 2.1.2 wordt aan de fototijd een positie en stand vanuit de GPS/INS gekoppeld. De stereomodellen worden vervolgens bekeken met deze parameters voor de foto's. Het koppelen van een positie en stand aan de foto's wordt in het huidige proces ook al gedaan om orthofoto's te maken. Er kan dus gezegd worden dat deze methode geen extra kosten met zich mee brengt.

Ook *direct georeferencing* kent nadelen:

- Met *direct georeferencing* is er geen controle over de waarnemingen. Er vindt geen vereffening plaats dus mochten er foutieve waarnemingen zijn dan worden deze niet opgemerkt.
- Uit het onderzoek is gebleken dat in metingen uit stereomodellen nog een fout zit van gemiddeld anderhalve meter. Er zal eerst onderzocht moeten worden hoe deze fout in de modellen komt.

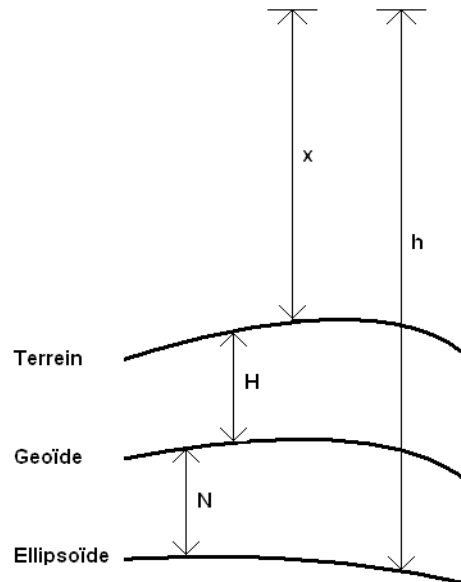
Direct georeferencing wordt aantrekkelijk als de nauwkeurigheid redelijk goed is. Er wordt niet verwacht dat de nauwkeurigheid net zo goed is als de methode volgens triangulatie en vereffening. In dit onderzoek werd geconstateerd dat in de X- en Y-richting de precisie voldoet, maar zoals zojuist gezegd de hoogte niet. De fout in de hoogte kan aan de hand van dit onderzoek niet verklaard worden. Wel is de overtuiging aanwezig dat de oorzaak van deze fout op te sporen is omdat uit controlemetingen in Flip 7 is gebleken dat de hoogte van de laserpunten wel degelijk goed bepaald is. Hiervoor zijn de paspunten weer als controlepunten gebruikt. Volgens afbeelding 22 wordt de NAP-hoogte van het terrein bepaald door van de GPS-hoogte (helikopter tot ellipsoïde) de afstand gemeten door de laserscanner af te trekken.

De afstandsmeter van de laserscanner is door Fugro gekalibreerd.

Omdat daarnaast de NAP-hoogte gecontroleerd is met behulp van de paspunten wordt geconcludeerd dat de GPS-hoogtemeting correct is.

Te zijner tijd dat de oplossing is gevonden voor deze fout in de hoogte wordt de kwaliteit van het product in zijn totaliteit acceptabel.

Afbeelding 24: Hoogte verschillen tussen terrein, geoïde en ellipsoïde



H = NAP hoogte

h = GPS hoogte uit FLI-MAP

N = geoïde hoogte

x = afstand uit laserscanner

5.3 Conclusie

De methode volgens triangulatie en blokvereffening wordt niet als makkelijk haalbaar aangeschreven. Het grootste struikelblok zit in de koppeling naar terreincoördinaten, ofwel het gebruik van paspunten. Schilderen van paspunten is niet praktisch en gebruik van natuurlijke paspunten levert nieuwe onzekerheden en is tevens niet mogelijk in het buitenland.

Direct georeferencing is vanwege het gemak sowieso makkelijk toepasbaar. Het enige nadeel is dat er geen controle is op de waarnemingen. Aan de hand van dit onderzoek is de meetnauwkeurigheid van *direct georeferencing* in dezelfde orde geplaatst als de methode van triangulatie en vereffening. Zodra voor de fout in de hoogte wordt gecorrigeerd is *direct georeferencing* de beste optie. De methode is goedkoop, makkelijk en nauwkeurig genoeg.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

- Het is mogelijk om in stereomodellen van FLI-MAP te meten met een precisie van $\sigma_{XY} = 8$ cm en $\sigma_Y = 9$ cm.
- Er wordt verwacht dat met *direct georeferencing* dezelfde meetnauwkeurigheid gehaald kan worden als volgens de methode van triangulatie.
- De lenscorrecties die momenteel door FLI-MAP gebruikt worden, zijn niet goed bepaald. Deze lenscorrecties hebben direct invloed op de fotocoördinaten en dus ook op de relatieve oriëntering. Dit verklaart een groot deel van de parallax in de stereomodellen.
- Het maken van stereomodellen met weinig tot geen parallax is mogelijk. Na het uitvoeren van de relatieve oriëntering en vereffening met nieuwe lenscorrecties kunnen er in de regel stereomodellen worden bekeken met weinig parallax.
- Er zit een fout in de GPS/INS-waarnemingen. Het lijkt op een systematische fout voor phi en omega.
- ImageStation is in staat om een triangulatie uit te voeren met rechthoekige foto's van een lagere resolutie, zij het met een aantal wijzigingen in het proces.
- De noodzaak van paspunten in de methode van triangulatie maakt de methode moeilijk haalbaar. Het gebruik van paspunten levert praktische bezwaren. Daarnaast verloopt het uitvoeren van de relatieve oriëntering enigszins moeizaam waardoor veel menselijke handelingen noodzakelijk worden. Grote projecten leveren al snel praktische bezwaren.
- Door de instabiliteit van de helikopter kan de overlap tussen opeenvolgende foto's niet gegarandeerd worden. Voldoende overlap is essentieel voor het bepalen van een goede relatieve oriëntering.
- De lens van de camera is niet optimaal voor fotogrammetrie, dit heeft invloed op de kwaliteit van de foto's.
- Een fotogrammetrische camera is geen praktische oplossing. Naast de hoge kosten is een fotogrammetrische camera te zwaar voor in een helikopter. Daarnaast geeft hoeveelheid extra data nog praktische bezwaren vanwege gebrek aan opslagcapaciteit.
- Foto's van FLI-MAP zijn aan de randen donkerder. Dit maakt het aanmeten van verbindingspunten moeilijker.

- De lage vlieghoogte maakt de fotoschaal erg groot. Hierdoor wordt het moeilijk verbindingspunten in de *Von Gruber locaties* te meten.
- Voor een acceptabel product mag er alleen met mooi weer gevlogen worden. Dat wil zeggen: weinig wind en een heldere hemel.

6.2 Aanbevelingen

- Zodra de fout in de GPS is achterhaald wordt de methode volgens *direct georeferencing* aanbevolen. Mocht dezelfde meetnauwkeurigheid behaald worden als triangulatie dan heeft *direct georeferencing* vele voordelen ten opzichte van trianguleren.
- De in dit onderzoek bepaalde lenscorrecties zijn bepaald aan de hand van slechts 8 foto's. Om de juiste lensvertekening vast te stellen zal een kalibratie uitgevoerd moeten worden, danwel in een laboratorium, danwel via een kalibratievlucht.
- Het wordt aanbevolen de GPS/INS opnieuw te kalibreren, zowel het systeem zelf als de relatie tot de andere systeemcomponenten in FLI-MAP.
- Er wordt aangeraden na te denken om het systeem in een vliegtuig te zetten. Een vliegtuig is stabielere dan een helikopter waardoor de overlap beter gecontroleerd kan worden. Daarnaast zijn er minder schommelingen waardoor minder de kans op gaten in de laserdata verkleint wordt.
- De lage vlieghoogte zorgt voor minder terreinoppervlak in de overlap wat karteren bemoeilijkt. Bij een te hoge vlieghoogte wordt de pixelgrootte in het terrein te groot wat de relatieve oriëntering weer belemmert. Onderzoek naar de optimale vlieghoogte wordt daarom aanbevolen.

Literatuur

Gonzalez R.C; Woods R.E, *Digital Image Processing*, 2001, University of Tennessee

Jacobsen, K, *BLUH User Manual*, februari 2003, Institute of Photogrammetry and GeoInformation, University of Hannover, Hannover, Duitsland

Kodde, M.P, *De waarde van een paspunt*, juni 2004, Afstudeerscriptie, Adviesdienst Geo-informatie en ICT, Delft

Kruck, E.J, *Bingo 5.0 User's Manual*, 2003, Geoinformatics & Photogrammetric Engineering, Aalden, Duitsland

Polman, J; Salzmann, M.A. *Handleiding voor de Technische Werkzaamheden van het Kadaster*, 1996, Kadaster, Apeldoorn

Velsink, H, *Collegedictaat Waarnemingsrekenen deel 3*, augustus 1998, Hogeschool Utrecht, Faculteit Natuur en Techniek, Utrecht

Vosselman, M.G, *Collegedictaat fotogrammetrie 1*, januari 1996, TU-Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, Delft

Vosselman, M.G, *Collegedictaat fotogrammetrie 2*, juni 1999, TU-Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, Delft

Wildemors, M.F.J, *Foutenanalyse van airborne laser scanning*, januari 2007, Afstudeerscriptie, Fugro-Inpark, Leidschendam

www.flimap.nl

www.flimap.com

Bijlage I – Conversie tussen OPK en POK

De stand van het platform in de lucht wordt bepaald door de INS, ofwel het traagheidsnavigatiesysteem. De IMU in de INS meet hoeksnelheden om drie assen. De roll is de draaiing om de as in de vliegrichting. De pitch staat hier loodrecht op in hetzelfde horizontale vlak. Tenslotte is de heading de richting hoe gevlogen is, ofwel de draaiing om de as recht omhoog en loodrecht op de roll en pitch. Deze roll, pitch en heading worden omgerekend tot een vergelijkbare omega, phi en kappa (OPK) die ook rotaties om drie assen beschrijven.

Fotogrammetrische programma's werken altijd met de waarden van phi, omega en kappa. Het programma POSEO zet de waarden van roll, pitch en heading om in waarden van OPK. Nu bestaat er een verschil in het definiëren van de volgorde van deze drie grootheden. Bingo kan namelijk alleen met POK overweg. Volgens de theorie van de lineaire algebra zit er een verschil in resultaat als de volgorde van het uitvoeren van de rotaties verandert.

$$[A] * [B] * [C] \neq [B] * [A] * [C]$$

Zo is ook

$$[\omega] * [\phi] * [\kappa] \neq [\phi] * [\omega] * [\kappa]$$

Om het OPK-formaat toch in te kunnen lezen in Bingo kunnen deze kolommen dus niet zonder meer verwisseld worden. Er zullen nieuwe waarden berekend moeten worden in POK-formaat. Omdat er hiervoor geen programma's beschikbaar zijn is in Excel een tool geschreven die deze conversie kan uitvoeren. De drie desbetreffende rotatiematrices worden als volgt beschreven.

$$R_{\omega} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix}$$

$$R_{\phi} = \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{pmatrix}$$

$$R_{\kappa} = \begin{pmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

De productmatrix is dezelfde als R zoals beschreven in de collineariteitsvergelijking.

$$R_{\omega \varphi \kappa} = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & -\cos \varphi \sin \kappa & \sin \varphi \\ \cos \omega \sin \kappa + \sin \varphi \cos \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \varphi \sin \kappa & -\sin \omega \cos \varphi \\ \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa & \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa & \cos \omega \cos \varphi \end{pmatrix}$$

Op dezelfde wijze is ook $R_{\varphi \omega \kappa}$ te bepalen.

$$R_{\varphi \omega \kappa} = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \kappa + \sin \varphi \sin \omega \sin \kappa & -\cos \varphi \sin \kappa + \sin \varphi \sin \omega \cos \kappa & \sin \varphi \cos \omega \\ \cos \omega \sin \kappa & \cos \omega \cos \kappa & -\sin \omega \\ -\sin \omega \cos \kappa + \cos \varphi \sin \omega \sin \kappa & \sin \varphi \sin \kappa + \cos \varphi \sin \omega \cos \kappa & \cos \omega \cos \varphi \end{pmatrix}$$

Wil men ervoor zorgen dat de matrix R geen invloed heeft op de verdere uitwerking van de collineariteitsvergelijkingen dan moet gelden $R_{\omega \varphi \kappa} = R_{\varphi \omega \kappa}$. De nieuwe rotaties komen dus tot dezelfde stand als de oorspronkelijke rotaties. Door de twee rotatiematrices aan elkaar gelijk te stellen zijn nieuwe waarden voor ω , φ en κ te berekenen. Na het gelijkstellen van de rotatiematrices moet gelden: $R_{\omega \varphi \kappa} - R_{\varphi \omega \kappa} = 0$

Nadat de uitvoer is berekend werd geconstateerd dat de verschillen erg klein zijn, maar niet altijd verwaarloosbaar. In figuur 1 zijn in het omcirkelde de verschillen te zien tussen de waarden van φ , ω en κ zoals die voor het testgebied uit het onderzoek zijn. Vooral het verschil van bijna 0,2 gon in een κ -waarde is niet te verwaarlozen. Er is proefondervindelijk geconcludeerd dat over het algemeen geldt: hoe groter de waarden voor ω en φ zijn, des te groter de verschillen worden na conversie.

Voor het omwisselen van de φ -kolom met de ω -kolom is altijd de conversietool gebruikt.

Excel spreadsheet showing a comparison of input and output values for rotation angles. The main table has columns for input angles (ω , φ , κ) and output angles (ω , φ , κ). A 'Verschiltabel' (Difference Table) is circled in red, showing the differences between input and output values.

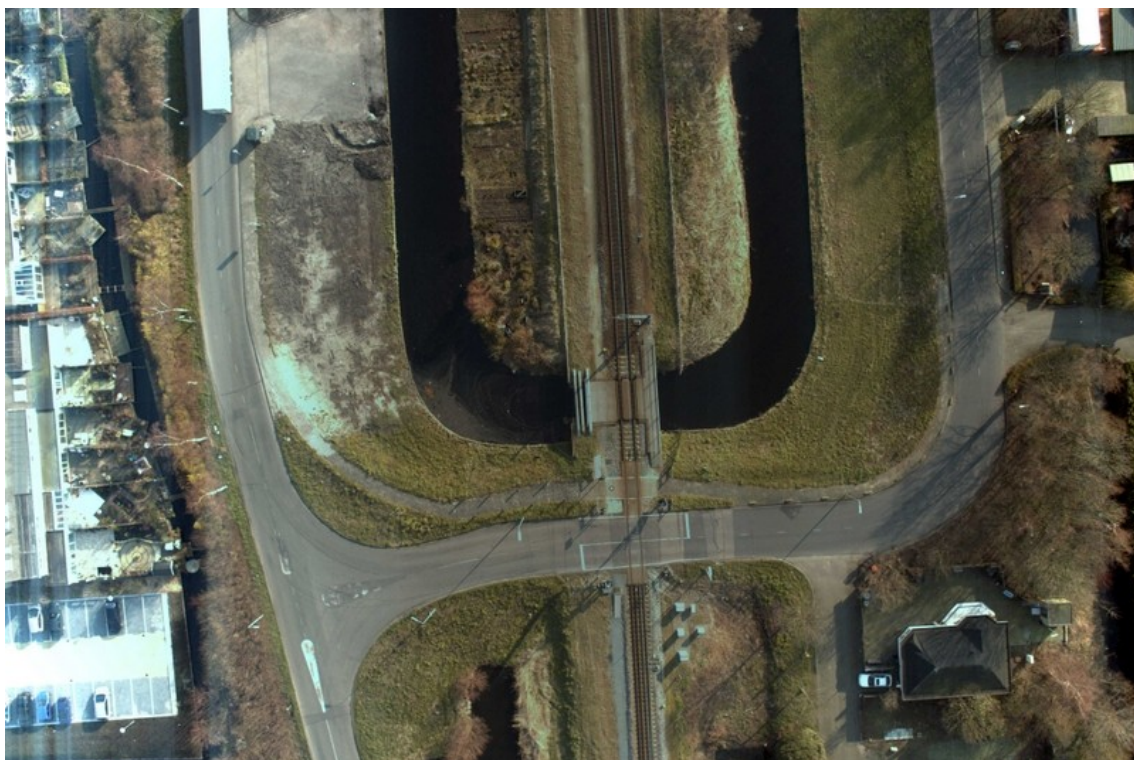
Invoer (OPK) in gon	ω	φ	κ	Uitvoer (POK) in gon	ω	φ	κ
1	0,2820	-5,1410	186,726		-5,141050	0,281081	186,7033
2	1,7670	-3,4110	185,325		-3,412312	1,764464	185,1272
3	-0,6300	-3,0610	189,266		-3,061150	-0,629272	189,2780
4	-0,5020	-0,4660	190,234		-0,466014	-0,501987	190,2249
5	-0,6420	-1,8910	191,140		-1,891096	-0,641717	191,1360
6	-0,2530	-1,3840	191,514		-1,384011	-0,252940	191,5158
7	-1,5580	-2,7420	191,291		-2,742820	-1,556555	191,2199
8	-0,3320	-2,5370	190,798		-2,537034	-0,331736	190,8053
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							
22							
23							
24							
25							
26							
27							
28							
29							

Verschiltabel	ω	φ	κ
	0,000919	0,000050	0,0227
	0,002536	0,001312	0,1978
	-0,000728	0,000150	-0,0120
	-0,000013	0,000014	0,0091
	-0,000283	0,000096	0,0040
	-0,000060	0,000011	-0,0018
	-0,001445	0,000820	0,0711
	-0,000264	0,000034	-0,0073

Bijlage II – FLI-MAP foto's test project

Foto's van FLI-MAP genomen bij Boskoop. De acht foto's zijn onderdeel van het testproject.









Bijlage III – Meetresultaten

In deze bijlage zijn alle testresultaten van het onderzoek te zien. In het bijgevoegde excel bestand staan alle formules.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1		Paspunten						GPS/INS							
2		paspunt nr.	Easting	Northing	Ell. Hoogte			Foto nr.	Easting	Northing	Ell. Hoogte	Phi	Omega	Kappa	
3		1	612919,705	5771536,849	41,545			3001	612919,195	5771756,519	190,130	-5,1411	0,2819	186,7261	
4		2	612895,280	5771590,964	43,371			3002	612916,905	5771720,750	186,235	-3,4106	1,7668	185,3251	
5		3	612843,560	5771571,007	42,651			3003	612911,554	5771684,271	184,260	-3,0615	-0,6298	189,2657	
6		4	612875,786	5771683,590	41,797			3004	612905,376	5771648,297	182,903	-0,4659	-0,5019	190,2342	
7		5	612932,721	5771664,591	42,114			3005	612900,355	5771612,649	182,657	-1,8914	-0,6419	191,1401	
8		6	612935,545	5771727,500	42,255			3006	612895,974	5771577,020	182,647	-1,3838	-0,2533	191,5142	
9		7	612942,170	5771782,006	42,101			3007	612891,965	5771541,145	184,459	-2,7417	-1,5579	191,2908	
10		8	612930,713	5771473,635	41,791			3008	612887,697	5771505,744	187,419	-2,5375	-0,3318	190,7979	
11		9	612819,684	5771488,091	41,918										
12		10	612858,296	5771755,054	41,442										
13															
14								GPS/INS met correctie voor vermoedelijke systematische fout							
15								Foto nr.	Easting	Northing	Ell. Hoogte	Phi	Omega	Kappa	
16								3001	612919,215	5771756,566	190,197	-4,6977	0,8494	186,7177	
17								3002	612916,925	5771720,797	186,302	-2,9672	2,3343	185,3167	
18								3003	612911,574	5771684,318	184,327	-2,6180	-0,0623	189,2573	
19								3004	612905,396	5771648,344	182,970	-0,0225	0,0656	190,2258	
20								3005	612900,375	5771612,686	182,724	-1,4480	-0,0744	191,1318	
21								3006	612895,994	5771577,067	182,714	-0,9403	0,3142	191,5059	
22								3007	612891,985	5771541,192	184,526	-2,2983	-0,9904	191,2825	
23								3008	612887,717	5771505,791	187,486	-2,0941	0,2357	190,7895	
24															
25															
26															
27															
28															
29															
30															
31															
32															
33															
34															
35															
36															
37															
38															
39															
40															

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1		Vereffening met 10 paspunten, GPS/INS-waarnemingen													
2															
3		Waarden uit vereffening													
4		paspunt nr.	Easting	Northing	Ell. Hoogte			Foto nr.	Easting	Northing	Ell. Hoogte	Phi	Omega	Kappa	
5		1	612919,954	5771536,338	41,439			3001	612919,210	5771756,472	190,283	-4,6998	0,8274	186,754	
6		2	612894,862	5771590,814	43,348			3002	612916,927	5771720,761	186,318	-3,0126	2,3488	185,23	
7		3	612843,644	5771570,732	42,563			3003	612911,617	5771684,312	184,298	-2,5847	-0,0176	189,268	
8		4	612875,636	5771683,496	41,743			3004	612905,392	5771648,361	182,993	-0,0166	0,0773	190,166	
9		5	612932,350	5771664,499	42,045			3005	612900,356	5771612,686	182,712	-1,4081	-0,0911	191,116	
10		6	612935,157	5771727,281	42,147			3006	612895,966	5771577,001	182,619	-0,8812	0,2891	191,491	
11		7	612941,787	5771781,722	42,063			3007	612891,935	5771541,227	184,428	-2,2326	-0,9753	191,349	
12		8	612929,867	5771473,954	41,678			3008	612887,670	5771505,827	187,429	-2,0286	0,2724	190,833	
13		9	612820,158	5771488,274	41,831										
14		10	612858,734	5771754,648	41,315										
15															
16		Verschillen met terrestrische meting													
17		paspunt nr.	Easting	Northing	Ell. Hoogte			Foto nr.	Easting	Northing	Ell. Hoogte	Phi	Omega	Kappa	
18		1	-1,249	0,511	0,106			3001	-0,015	0,047	-0,153	-0,4413	-0,5455	-0,0276	
19		2	0,418	0,150	0,023			3002	-0,022	-0,011	-0,083	-0,3980	-0,5820	0,0947	
20		3	-0,084	0,275	0,088			3003	-0,063	-0,041	-0,038	-0,4768	-0,6122	-0,0021	
21		4	0,150	0,094	0,054			3004	-0,016	-0,064	-0,090	-0,4493	-0,5792	0,0681	
22		5	0,371	0,092	0,069			3005	-0,001	-0,037	-0,055	-0,4833	-0,5508	0,0246	
23		6	0,388	0,219	0,108			3006	0,008	0,019	0,028	-0,5026	-0,5424	0,0233	
24		7	0,383	0,284	0,038			3007	0,030	-0,082	0,031	-0,5091	-0,5826	-0,0586	
25		8	0,846	-0,319	0,113			3008	0,027	-0,083	-0,010	-0,5089	-0,6042	-0,0350	
26		9	-0,474	-0,183	0,087			gem.	-0,007	-0,031	-0,046	-0,4711	-0,5749	0,0109	
27		10	-0,438	0,406	0,127			st. afw.	0,030	0,047	0,063	0,0392	0,0264	0,0524	
28															
29		st. afw.	0,607519446	0,251984325	0,034422376										
30															
31															
32		sigma-0	30,32												
33															
34		Verworpen waarnemingen:			geen										
35															
36															
37															
38															
39															
40															

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1		Vereffening met 9 paspunten, GPS/INS-waarnemingen													
2															
3		Waarden uit vereffening													
4		paspunt nr.	Easting	Northing	Ell. Hoogte			Foto nr.	Easting	Northing	Ell. Hoogte	Phi	Omega	Kappa	
5		2	612695,042	5771590,848	43,347			3001	612919,183	5771756,479	190,283	-4,7477	0,8161	186,7657	
6		3	612643,856	5771570,690	42,521			3002	612916,904	5771720,770	186,322	-3,0626	2,3377	185,2451	
7		4	612675,739	5771683,475	41,734			3003	612911,600	5771684,322	184,295	-2,6390	-0,0251	189,2932	
8		5	612932,456	5771664,512	42,060			3004	612905,387	5771648,375	182,984	-0,0775	0,0742	190,2157	
9		6	612935,242	5771727,270	42,161			3005	612900,371	5771612,717	182,696	-1,4780	-0,0862	191,1956	
10		7	612941,857	5771781,708	42,065			3006	612896,003	5771577,031	182,599	-0,9597	0,2955	191,5719	
11		8	612929,962	5771473,686	41,709			3007	612891,976	5771541,204	184,431	-2,3117	-0,9899	191,3568	
12		9	612620,284	5771488,209	41,813			3008	612887,678	5771505,730	187,432	-2,0970	0,2157	190,7049	
13		10	612658,825	5771754,616	41,299										
14															
15															
16		Verschillen met terrestrische meting						Foto nr.	Easting	Northing	Ell. Hoogte	Phi	Omega	Kappa	
17		2	0,238	0,116	0,024			3001	0,012	0,040	-0,153	-0,3934	-0,5342	-0,0396	
18		3	-0,296	0,317	0,130			3002	0,001	-0,020	-0,087	-0,3480	-0,5709	0,0800	
19		4	0,047	0,115	0,063			3003	-0,046	-0,051	-0,035	-0,4225	-0,6047	-0,0275	
20		5	0,265	0,079	0,054			3004	-0,011	-0,078	-0,081	-0,3884	-0,5761	0,0185	
21		6	0,303	0,230	0,094			3005	-0,016	-0,068	-0,039	-0,4134	-0,5557	-0,0555	
22		7	0,313	0,298	0,036			3006	-0,029	-0,011	0,048	-0,4241	-0,5488	-0,0577	
23		8	0,751	-0,051	0,082			3007	-0,011	-0,059	0,028	-0,4300	-0,5680	-0,0660	
24		9	-0,600	-0,118	0,105			3008	0,019	0,014	-0,013	-0,4405	-0,5475	0,0930	
25		10	-0,529	0,438	0,143			gem.	-0,010	-0,029	-0,041	-0,4075	-0,5632	-0,0068	
26								st. afw.	0,021	0,042	0,065	0,0298	0,0218	0,0633	
27		st. afw.	0,445	0,180	0,041										
28															
29															
30		sigma-0	26,66												
31															
32		Verworpen waarnemingen:			geen		Verschil in oriëntering van vereffening #1 en #2								
33															
34								Foto nr.	Easting	Northing	Ell. Hoogte	Phi	Omega	Kappa	
35								3001	0,027	-0,007	0,000	0,0479	0,0113	-0,0120	
36								3002	0,023	-0,009	-0,004	0,0500	0,0111	-0,0147	
37								3003	0,017	-0,010	0,003	0,0543	0,0075	-0,0254	
38								3004	0,005	-0,014	0,009	0,0609	0,0031	-0,0496	
39								3005	-0,015	-0,031	0,016	0,0699	-0,0049	-0,0801	
40								3006	-0,037	-0,030	0,020	0,0785	-0,0064	-0,0810	
41								3007	-0,041	0,023	-0,003	0,0791	0,0146	-0,0074	
42								3008	-0,008	0,097	-0,003	0,0684	0,0567	0,1280	
43								gem. verschil	-0,004	0,002	0,005	0,0636	0,0116	-0,0178	
44															
45															
46															

	A	B	C	D	E	F	G	H
1		Vereffening #3 ten behoeve van bepaling lensvertekening						
2								
3		Uit de Bingo.lis volgt						
4								
5		straal (mm)	distortion (µm)					
6		1	6,70					
7		2	13,10					
8		3	19,30					
9		4	25,00					
10		5	30,00					
11		6	34,20					
12		7	37,40					
13		8	39,50					
14		9	40,20					
15		10	39,50					
16		11	37,20					
17		12	33,00					
18		13	26,90					
19		14	18,70					
20		15	8,20					
21		16	-4,80					
22		17	-20,40					
23		18	-38,80					
24		19	-60,10					
25		20	-84,50					
26		21	-112,20					
27		22	-143,40					
28								
29								

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1		Vereffening met 9 paspunten, GPS/INS-waarnemingen en nieuwe set lenscorrecties													
2															
3		Waarden uit vereffening													
4		paspunt nr.	Easting	Northing	Ell. Hoogte			Foto nr.	Easting	Northing	Ell. Hoogte	Phi	Omega	Kappa	
5		2	612895,019	5771590,930	43,306			3001	612919,232	5771756,511	190,295	-4,7147	0,8244	186,7291	
6		3	612843,787	5771570,814	42,539			3002	612916,962	5771720,802	186,384	-3,0144	2,3277	185,2339	
7		4	612875,779	5771683,373	41,720			3003	612911,594	5771684,313	184,345	-2,6170	-0,0634	189,3181	
8		5	612932,300	5771664,477	42,023			3004	612905,424	5771648,370	182,969	-0,0288	0,0705	190,2228	
9								3005	612900,372	5771612,708	182,684	-1,4518	-0,0696	191,1826	
10		7	612941,790	5771781,636	42,058			3006	612895,989	5771577,080	182,690	-0,9283	0,3177	191,5356	
11								3007	612891,939	5771541,224	184,449	-2,2715	-0,9689	191,2637	
12		9	612820,050	5771488,217	41,851			3008	612887,666	5771505,765	187,431	-2,0596	0,2336	190,7214	
13		10	612858,649	5771754,697	41,331										
14															
15															
16		Verschillen met terrestische meting						Foto nr.	Easting	Northing	Ell. Hoogte	Phi	Omega	Kappa	
17		paspunt	Easting	Northing	Ell. Hoogte			3001	-0,037	0,008	-0,165	-0,4264	-0,5425	-0,0030	
18		2	0,261	0,034	0,065			3002	-0,057	-0,052	-0,149	-0,3962	-0,5609	0,0912	
19		3	-0,227	0,193	0,112			3003	-0,040	-0,042	-0,085	-0,4445	-0,5664	-0,0524	
20		4	0,007	0,217	0,077			3004	-0,048	-0,073	-0,066	-0,4371	-0,5724	0,0114	
21		5	0,421	0,114	0,091			3005	-0,017	-0,059	-0,027	-0,4396	-0,5723	-0,0425	
22		7	0,380	0,370	0,043			3006	-0,015	-0,060	-0,043	-0,4555	-0,5710	-0,0214	
23		9	-0,366	-0,126	0,067			3007	0,026	-0,079	0,010	-0,4702	-0,5890	0,0071	
24		10	-0,353	0,357	0,111			3008	0,031	-0,021	-0,012	-0,4779	-0,5654	0,0764	
25		st dev	0,341	0,176	0,025			st dev	0,033	0,029	0,063	0,0257	0,0131	0,0518	
26								gem. correct	-0,020	-0,047	-0,067	-0,4434	-0,5675	0,0084	
27															
28															
29		sigma-0	18,54												
30															
31		Verworpen waarnemingen:			paspunt 8										
32					paspunt 6										
33															
34															
35															
36															
37															
38															
39															
40															

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1		Vereffening met 9 paspunten en nieuwe set lenscorrecties													
2															
3		Waarden uit vereffening													
4		paspunt nr.	Easting	Northing	Ell. Hoogte			Foto nr.	Easting	Northing	Ell. Hoogte	Phi	Omega	Kappa	
5		2	612895,252	5771590,968	43,382			3001	612920,861	5771758,211	191,643	-4,2300	0,2195	186,6853	
6		3	612843,588	5771571,000	42,639			3002	612918,026	5771721,714	187,789	-2,6580	1,9933	185,2307	
7		4	612875,694	5771683,629	41,821			3003	612912,941	5771684,882	185,862	-2,1479	-0,2506	189,3100	
8		5	612932,749	5771664,557	42,124			3004	612906,513	5771648,921	184,451	0,3355	-0,1468	190,2465	
9		6	612935,563	5771727,477	42,230			3005	612901,414	5771611,915	183,909	-1,1027	0,3236	191,1127	
10		7	612942,182	5771781,989	42,101			3006	612897,442	5771576,100	183,689	-0,3956	0,7875	191,4350	
11								3007	612893,482	5771540,336	185,211	-1,6791	-0,5757	191,2170	
12		9	612819,715	5771488,096	41,912			3008	612889,635	5771504,541	188,051	-1,2934	0,7517	190,6698	
13		10	612858,298	5771755,086	41,440										
14															
15															
16		Verschillen met terrestische meting						Foto nr.	Easting	Northing	Ell. Hoogte	Phi	Omega	Kappa	
17		Paspunt	Easting	Northing	Ell. Hoogte			3001	-1,466	-1,692	-1,513	-0,9111	0,0624	0,0408	
18		2	0,028	-0,004	-0,011			3002	-1,121	-0,964	-1,554	-0,7526	-0,2265	0,0944	
19		3	-0,028	0,007	0,012			3003	-1,387	-0,611	-1,602	-0,9136	-0,3792	-0,0443	
20		4	0,092	-0,039	-0,024			3004	-1,137	-0,824	-1,548	-0,8014	-0,3651	-0,0123	
21		5	-0,028	0,034	-0,010			3005	-1,059	0,734	-1,252	-0,7887	-0,9655	0,0274	
22		6	-0,018	0,023	0,025			3006	-1,468	0,920	-1,042	-0,9882	-1,0408	0,0792	
23		7	-0,012	0,017	0,000			3007	-1,517	0,809	-0,752	-1,0626	-0,9822	0,0738	
24		9	-0,031	-0,005	0,006			3008	-1,938	1,203	-0,632	-1,2441	-1,0835	0,1281	
25		10	-0,002	-0,032	0,002			gem	-1,387	-0,028	-1,237	-0,9328	-0,6213	0,0484	
26		st dev	0,042	0,026	0,015			st. afw.	0,286	1,071	0,387	0,1639	0,4458	0,0571	
27															
28															
29															
30		sigma-0	7,41												
31															
32		Verworpen waarnemingen:			paspunt 8										
33					verbindingspunt 1-3007-2										
34															
35															
36															
37															
38															
39															
40															

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1		Vereffening met 6 paspunten, GPS/INS-waarnemingen en nieuwe set lenscorrecties													
2															
3		Waarden uit vereffening													
4		paspunt nr.	Easting	Northing	Ell. Hoogte			Foto nr.	Easting	Northing	Ell. Hoogte	Phi	Omega	Kappa	
5		3	612843,135	5771570,821	40,853			3001	612919,213	5771756,498	190,258	-4,7201	0,8313	186,7269	
6		5	612932,412	5771664,395	40,904			3002	612916,930	5771720,778	186,340	-3,0236	2,3379	185,2231	
7		6	612935,224	5771727,303	40,909			3003	612911,587	5771684,304	184,306	-2,6083	-0,0728	189,3005	
8								3004	612905,417	5771648,347	182,929	-0,0115	0,0470	190,1956	
9		Correctie op checkpoints						3005	612900,370	5771612,691	182,638	-1,4269	-0,0980	191,1500	
10		Checkpoint	X	Y	Z			3006	612895,984	5771577,079	182,645	-0,9014	0,2896	191,4965	
11		3	0,425	0,186	1,798			3007	612891,926	5771541,174	184,395	-2,2473	-1,0116	191,3395	
12		5	0,309	0,196	1,210			3008	612887,658	5771505,719	187,393	-2,0398	0,1930	190,7601	
13		6	0,321	0,197	1,346										
14								Foto nr.	Easting	Northing	Ell. Hoogte	Phi	Omega	Kappa	
15								3001	-0,018	0,021	-0,128	-0,4210	-0,5494	-0,0008	
16								3002	-0,025	-0,028	-0,105	-0,3870	-0,5711	0,1020	
17								3003	-0,033	-0,033	-0,046	-0,4532	-0,5570	-0,0348	
18								3004	-0,041	-0,050	-0,026	-0,4544	-0,5489	0,0386	
19								3005	-0,015	-0,042	0,019	-0,4645	-0,5439	-0,0099	
20								3006	-0,010	-0,059	0,002	-0,4824	-0,5429	0,0177	
21								3007	0,039	-0,029	0,064	-0,4944	-0,5463	-0,0487	
22								3008	0,039	0,025	0,026	-0,4977	-0,5248	0,0378	
23															
24															
25															

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	
1		Controle van de paspunten met behulp van FLIP 7													
2															
3		Meting in FLIP-7						06-GPS							
4		paspunt nr.	Easting	Northing				paspunt nr.	Easting	Northing	hoogte				
5		1	104325,210	455213,350				1	104327,369	455213,855	-1,893				
6		2	104305,840	455268,570				2	104305,732	455268,721	-0,066				
7		3	104253,460	455250,510				3	104253,374	455250,471	-0,787				
8		4	104289,180	455362,080				4	104289,290	455361,953	-1,639				
9		5	104345,760	455341,030				5	104345,579	455341,089	-1,323				
10		6	104350,370	455403,890				6	104350,470	455403,882	-1,181				
11		7	104358,800	455458,230				7	104358,885	455458,150	-1,334				
12		8	104337,280	455150,280				8	104337,294	455150,270	-1,648				
13		9	104226,800	455168,420				9	104226,782	455168,371	-1,520				
14		10	104274,150	455434,120				10	104274,155	455433,966	-1,994				
15															
16															
17		Paspunt nr.	Easting	Northing											
18		1	2,159	0,505											
19		2	-0,108	0,151											
20		3	-0,086	-0,039											
21		4	0,110	-0,127											
22		5	-0,181	0,059											
23		6	0,100	-0,008											
24		7	0,085	-0,080											
25		8	0,014	-0,010											
26		9	-0,018	-0,049											
27		10	0,005	-0,154											
28															
29															

