

# Geologie vanuit de lucht

## SUMMARY:

In this article the use of aerial photographs in geology is discussed. In the first part, a brief introduction on aerial photography is presented.

It deals with the historical aspects, a comparison between aerial photographs and maps, specifications in order to arrive at a three-dimensional image, and specific features of the photograph proper.

In the second part, the application of aerial photographs in geology is treated. Out of the many surface-expressions which are recognisable on the photographs, the landforms and drainage pattern have been selected to be used as illustrations out of the author's own experience in Surinam and New Guinea (West Irian).

## INLEIDING

Voor de exploratie van het aardoppervlak wordt sinds enige decennia een intensief gebruik gemaakt van luchtfoto's. Zij hebben thans in vele soorten en op verschillende schalen hun weg gevonden in instituten en organisaties die zich bezig houden met het onderzoek en de directe toepassing van dit hulpmiddel.

In dit artikel willen de beide auteurs U inleiden en kennis laten maken met de luchtfotografie en haar toepassingen in het geologisch onderzoek van de aardkorst.

Het gebruik van luchtfoto's is natuurlijk niet alleen beperkt tot de geologie. Ook in vele andere vakgebieden maakt men gebruik van luchtfoto's. Wij noemen er hier enkele om U een idee te geven: bodemkunde, bosbouw, hydrologie, geomorfologie, planologie en laten wij vooral de kartografie niet vergeten, die zorgt voor de vervaardiging van de topografische kaarten. De specialisten uit de eerder genoemde vakgebieden komen na luchtfoto-interpretatie en veldcontrôles tot een ander type kaart: een thematische kaart, een kaart welke het voorkomen en de spreiding van bepaalde verschijnselen aangeeft.

Alvorens over te gaan tot de bespreking van het gebruik van luchtfoto's in de geologie vragen wij eerst uw aandacht voor de luchtfoto zelf.

## I. DE LUCHTFOTO

Th. F. Rijnberg\*

### 1. Historisch overzicht

Twee belangrijke ontwikkelingen, met betrekking tot de luchtfotografie, staan historisch gezien centraal.

In de eerste plaats is dat de ontdekking van de fotografie zelf en in de tweede plaats het feit, dat de mens erin is geslaagd zich door de lucht voort te bewegen. De combinatie van beide is de tastbare luchtfoto.

\* Internationaal Instituut voor Luchtkartering en Aardkunde, Enschede.

Voor wat betreft de fotografie, kunnen wij reeds teruggaan tot de dagen van Aristoteles (384-322 vC). Hij heeft zich al intensief bezig gehouden met het karakter en de eigenschappen van het licht. Van hem is zelfs een principebeschrijving van de camera obscura bekend. Na Aristoteles kwamen vele andere geleerden, die voortgingen met dit onderzoek. Namen zijn in dit verband die van Ibn al-Haitam, Levi ben Gerson, Leonardo da Vinci, Johannes Keppler, Herschel (de ontdekker van het natrium thiosulfaat-'hypo'-) en William Henry Fox Talbot, die in 1841 erin slaagde om een afdruk te maken op papier dat was ingesmeerd met zilver jodide.

Het ontwikkelen deed hij met zilver nitraat en gallisch zuur. Het eerste boek, dat fotografische illustraties bevatte, was van Talbot's hand (Pencil of Nature, 1844). In dezelfde tijd werden enorme vorderingen gemaakt op optisch gebied (Guinand, Fraunhofer, Petzval en Steinheil).

Wij zijn inmiddels in de tweede helft van de negentiende eeuw aangekomen. De luchtvaart is haar experimenteer stadium met luchtballonnen reeds gepasseerd en reeds in 1858 maakte de Franse fotograaf Tournachon foto's van het dorpje Petit Bicetre vanuit een luchtballon. De eerste echte successen werden echter behaald door de Amerikanen King en Black in 1860. In het kader van de Burgeroorlog maakten zij luchtfoto's van de stellingen van de Confederatieve troepen vanuit een luchtballon.

In feite lagen de toepassingen van luchtfoto's reeds vanaf het eerste uur voornamelijk in het militaire vlak. De verdere ontwikkeling ging op deze voet verder en in de Eerste Wereldoorlog werd al op redelijk grote schaal gebruik gemaakt van luchtfoto's, waarmee inlichtingen werden gekregen van vijandelijke posities en bewegingen. Met het ter beschikking staan van de luchtfoto's ontwikkelde zich ook het interpreteren van deze foto's. Een kunst op zich welke een intensieve training vereist. Daarnaast is een grote kennis van fysische eigenschappen van het aardoppervlak onontbeerlijk.

Tussen de beide Wereldoorlogen gingen ook de wetenschapsmensen zich voor de luchtfoto interesseren en in deze tijd werd de grondslag voor haar toepassingsmogelijkheden gelegd. Welke vlucht de luchtfotografie in de laatste twee decennia heeft genomen is meer dan alleen het vermelden waard. Fotografisch materiaal, camera's, reproductie apparatuur, analyse methoden, enz. kwamen in een staat van uiterste perfectie. Bovendien verhief de mens zich hoger en verder van het aardoppervlak af. Dit alles heeft nu als resultaat, dat wij kunnen beschikken over kleuren-, infrarood-, radar-, thermische- en z.g. false-colour foto's, welke niet alleen uit vliegtuigen zijn genomen, doch ook uit satellieten.

## 2. Kaart en luchtfoto vergeleken

Teneinde de luchtfoto wat beter te kunnen plaatsen zullen wij eerst eens nagaan welke verschillen er tussen beide bestaan.

K a a r t	L u c h t f o t o
1. Geeft een geometrisch correcte weergave van het terrein.	Geeft doorgaans geen geometrisch correcte weergave van het terrein (vertekingen en verplaatsingen).
2. Is een orthogonale projectie.	Is een centrale projectie.
3. Geeft alleen geselecteerde gegevens weer.	Geeft alle zichtbare gegevens weer.

4. Een legende verklaart tekens en verschijnselen.
5. Geeft ook niet zichtbare verschijnselen weer (grenzen, namen, wegen classificatie, enz.)
6. Geeft slechts een geabstraheerde weergave van het aardoppervlak.
7. Ingedrukte tekst is onmisbaar.
8. Vergroting of verkleining van schaal vereist het opnieuw concepiëren en tekenen.
9. Reproductie in grote aantallen.
10. Reproductie is relatief goedkoop.

Verklaring van het zichtbare door middel van luchtfoto-interpretatie.

Geeft alleen, maar dan ook alle, zichtbare verschijnselen weer.

Geeft de werkelijke structuur van het aardoppervlak.

Ingedrukte tekst vermindert de waarde (hindert het stereoscopisch zien).

Vergroten of verkleinen geschiedt fotografisch.

Reproductie in kleine aantallen.

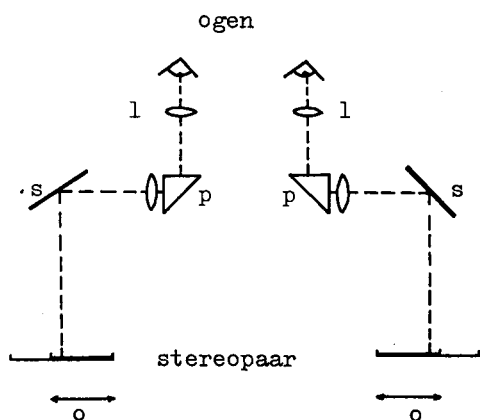
Reproductie is duur.

### 3. Karakteristieken van de luchtfoto

Wij zullen hier niet gaan praten over emulsies, korrelgrootte en dergelijke. Dat staat buiten onze competentie en wij willen ons uitsluitend bezighouden met de meer fotogrammetrische aspecten van de luchtfoto en met de problematiek, welke samenhangt met de opnametechniek vanuit het vliegtuig.

Centraal staat hier de vraag: 'wat willen wij met de luchtfoto bereiken'?

Het antwoord op deze vraag luidt: 'wij willen ons een drie-dimensionaal beeld van het gefotografeerde deel van het aardoppervlak verschaffen'. Dit kan zonder meer verwezenlijkt worden zolang er voor gezorgd wordt, dat wij over een fotopaar (een zogenaamd 'stereopaar') beschikken. Een fotopaar is in dit verband een tweetal luchtfoto's, welke direct na elkaar worden genomen en die elkaar voor  $\pm 60\%$  overlappen. Het aldus verkregen fotopaar wordt onder een stereoscoop bekeken. Met behulp van dit instrument, dat uit een stelsel van spiegels, lenzen, prisma's en een kijker bestaat, wordt een drie-dimensionaal beeld verkregen. Figuur 1 geeft schematisch een spiegel-stereoscoop weer. Bovendien ziet U dat onder de linker spiegel een foto ligt (de foto die op tijdstip 't' genomen is) en onder de rechterspiegel de foto welke op tijdstip 't + a' genomen is. Samen vormen deze foto's het stereopaar.



Verklaring der tekens:

l = lens

s = spiegel

p = prisma

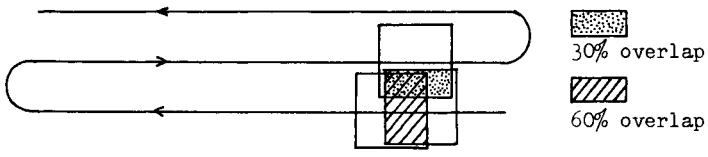
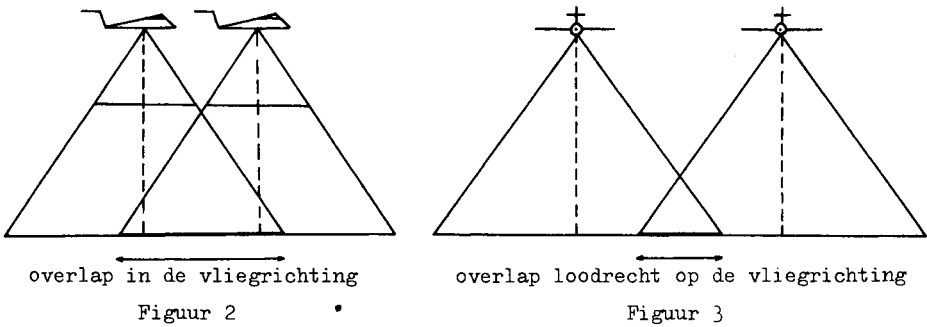
o = overlap à 60%

Figuur 1.

De met 'o' gemerkte lijnstukjes, op zowel de linkerfoto als de rechterfoto, stellen de overlap voor. Het linker oog neemt het twee-dimensionale beeld van de linkerfoto waar, het rechteroog het twee-dimensionale beeld van de rechterfoto. In de hersenen worden beide twee-dimensionale beelden omgezet in één drie-dimensionaal beeld.

Figuur 2 laat een doorsnede in de vliegrichting zien, figuur 3 een doorsnede loodrecht op de vliegrichting. Bij de laatste ziet U dat er tussen de vliegstroken een overlap van  $\pm 30\%$  ontstaat. Figuur 4 geeft U een schematische weergave van een luchtfoto bedekking van een bepaald stuk van het aardoppervlak. Let hierbij goed op de overlappen in de vliegrichting en op de overlappen tussen de vliegstroken (dus loodrecht op de vliegrichting).

De schaal van de luchtfoto's is vanzelfsprekend direct afhankelijk van het doel waarvoor wij de foto's willen gebruiken, dus in feite van de mate van detail, waarin wij ons onderzoek willen uitvoeren. Een stadsplanoloog zal, b.v. voor de analyse van de stedelijke functies op zeker moment gebruik maken van grote schaal foto's (b.v. 1:



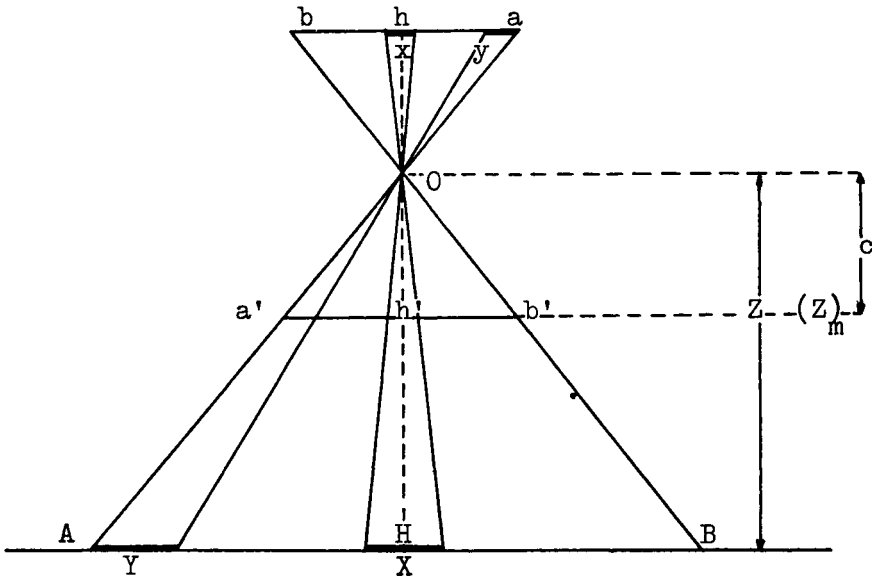
Figuur 4

5,000), terwijl hij bij het bepalen van de macro-structuur van de stad en haar omgeving eerder naar foto's van kleinere schaal (b.v. 1: 20.000) zal reiken.

Heeft de opdrachtgever een besluit genomen omtrent de door hem gewenste schaal, dan belanden wij bij de technische uitvoering van deze opdracht. Het type camera, en met name zijn brandpuntsafstand, gaat nu een belangrijke rol spelen. Afhankelijk van de gevraagde schaal en brandpuntsafstand van de camera kan de vlieghoogte worden bepaald. In figuur 5 ziet U hoe de relatie ligt tussen brandpuntsafstand, vlieghoogte en schaal voor een verticale luchtfoto. Onder een verticale luchtfoto verstaan wij een luchtfoto waarvan het vlak van het negatief tijdens de opname maximaal een hoek van 4 graden (tilt) met het vlakke terrein maakt. Indien deze hoek groter is dan 4 graden dan spreken wij van scheve foto's (oblique's). Is op een oblique-foto de horizon zichtbaar dan hebben wij met een z.g. hoge-oblique foto te maken, is de horizon op de luchtfoto niet te zien dan spreken wij

van een lage-oblique luchtfoto. Vertikale foto's en oblique's kunnen elkaar bij het onderzoek zeer wel aanvullen. Spreken wij bij de behandeling van het schaal-begrip over vlak of horizontaal terrein dan bedoelen wij dat als zodanig of, in bergachtig terrein, het horizontale referentie vlak ten opzichte waarvan de foto's werden gemaakt.

In figuur 5 stelt b-a het negatief voor, b'-a' het positief, B-A het gefotografeerde stuk aardoppervlak, O het centrum van de lens (het perspectief punt), c de brandpuntsafstand van de camera, Z ( $Z_m$ ) de vlieghoogte boven het gemiddeld grondvlak, x een stukje van het negatief, y eveneens een stukje van het negatief (dat gelijk is aan x), Y het bij y behorende deel van het aardoppervlak en X het bij x behorende deel van het aardoppervlak.



Figuur 5

Uit de figuur valt nu het volgende af te leiden:

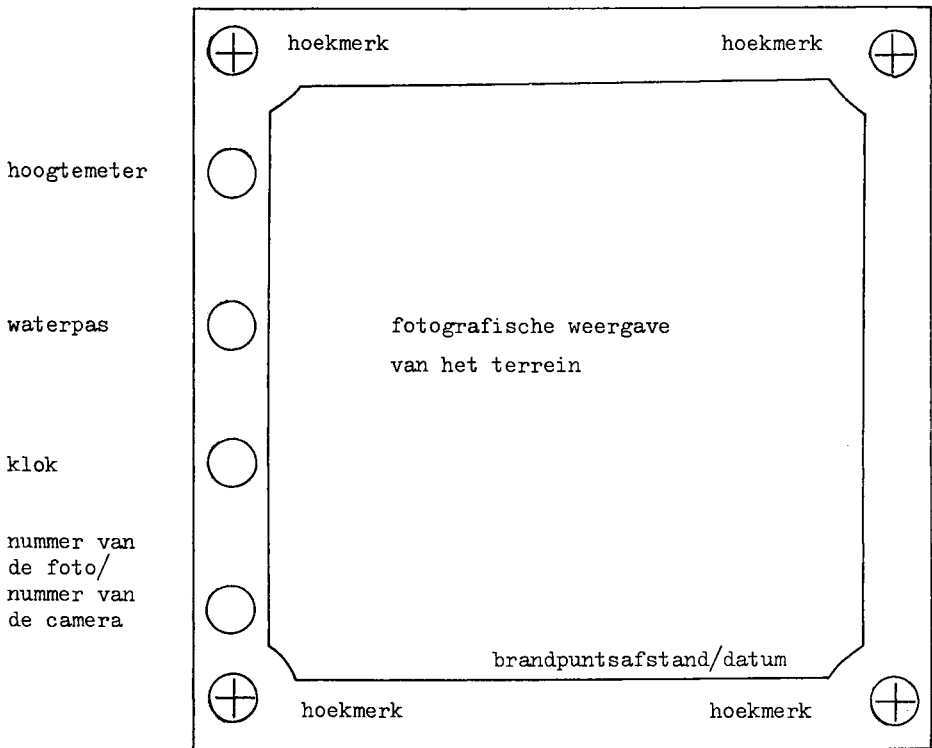
De *schaal* =  $ab/AB = a'b'/AB = Oh'/OH = c/Z$ . De schaal is derhalve gelijk aan de brandpuntsafstand gedeeld door de vlieghoogte boven het gemiddeld grondvlak. Bovendien zien wij dat naar de randen van de foto de schaal kleiner wordt (dan die in het middelpunt van de foto). Immers, op de foto zijn x en y even groot. Op het aardoppervlak echter is Y groter dan X. Of:  $y/Y$  is kleiner dan  $x/X$ . Het blijkt nu dat de schaal radiaal vanuit het middelpunt kleiner wordt, een verschijnsel waarmee bij het werken op de foto terdege rekening gehouden moet worden.

Met deze vertekening zijn wij er helaas nog niet. Ook het reliëf is verantwoordelijk voor een discontinuïteit in de luchtfoto. Het veroorzaakt de z.g. reliëf-parallax. Hieronder verstaan wij de afstand tussen de positie van een punt in de foto ware het gelegen in het referentievlak en zijn werkelijke positie t.g.v. het reliëf. In andere

woorden: stel dat U precies in het middelpunt van de foto een kerktoren waarneemt. U kijkt dus precies boven op de punt van de spits. Een kerktoren, ergens aan de rand van de foto ziet U alsof U er van boven schuin tegenaan kijkt. De punt van de spits ligt dan buiten het grondvlak van de toren; het is net alsof de toren t.o.v. haar grondvlak naar buiten is gevallen (wederom: radiaal vanuit het middelpunt van de foto). Deze parallax t.g.v. het reliëf is er eveneens voor verantwoordelijk dat wij alle hoogten in de luchtfoto overdreven zien voorgesteld. Alle reliëf-verschillen (bergen, hellingen, ravijnen, etc.) geven in de foto een veel steiler karakter dan zij in werkelijkheid zijn. Eigenlijk is dat wel goed, het geeft ons n.l. de kans ook zeer flauwe gradiënten in het terrein met behulp van de luchtfoto waar te nemen.

Een derde vertekening moet thans nog genoemd worden, n.l. die, welke ontstaat t.g.v. de verandering van de positie van de camera (het vliegtuig verplaatst zich immers tussen de opéénvolgende opnamen). Door deze verandering verandert n.l. tevens de positie van het beeld van een punt in twee opéénvolgende foto's. Dit verschijnsel staat bekend als de stereoscopische parallax. Bekendheid met deze stereoscopische parallax is van belang, omdat deze een maat is voor de hoogte van een punt waarvan de stereoscopische parallax is gemeten.

Het meten van de parallax geschiedt met een parallax-meter, een zeer fijn instrument met micro-meter instelling. In de praktijk komt het er op neer dat wij, willen wij de hoogte van een zeker object berekenen, het parallax verschil tussen bases en toppen van hetzelfde object in beide foto's van het fotopaar meten. Met behulp van



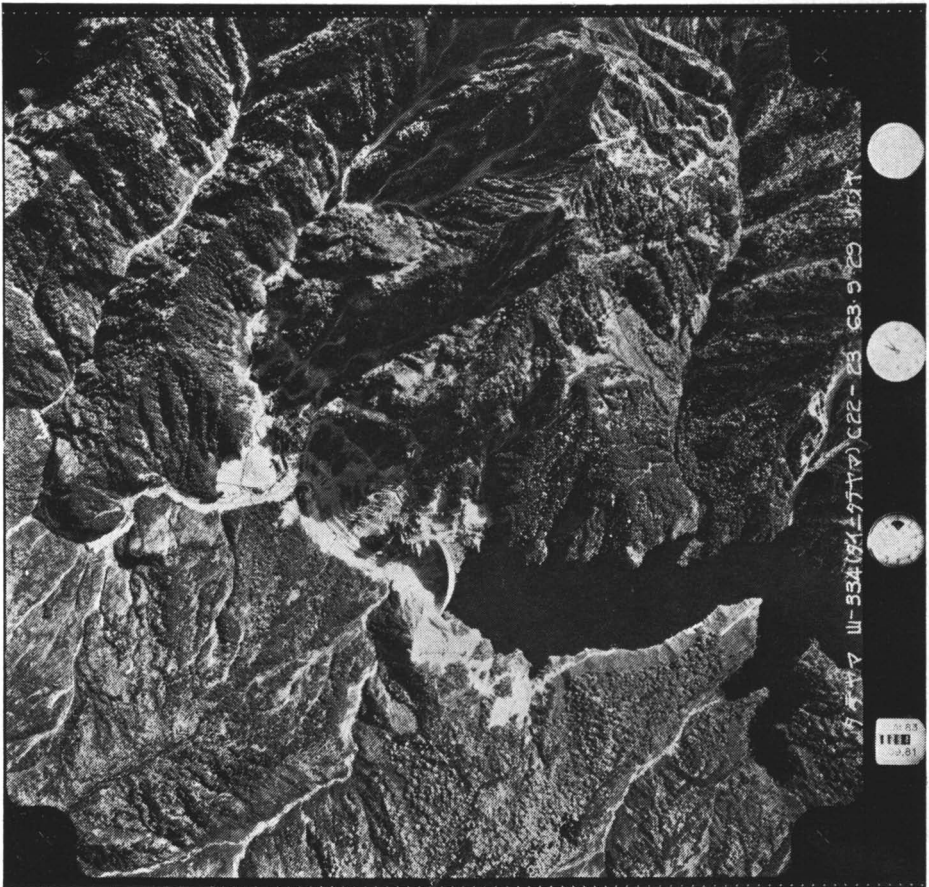
Figuur 6.

een zogenaamde parallaxformule wordt dan het hoogteverschil tussen basis en top van het object berekend.

Tijdens de opnamen zal het vliegtuig maar zelden een positie kunnen handhaven welke evenwijdig is aan het horizontale terrein. Hierdoor ontstaan eveneens vertekeningen op de foto welke echter door middel van een fotogrammetrisch instrument opgeheven kunnen worden. Deze handeling staat bekend als het ontschranken of onthoeken van de luchtfoto.

Het spreekt vanzelf, dat er op mathematisch gebied veel meer over de luchtfoto gezegd kan worden. Dat valt echter ver buiten het bestek van dit artikel.

Tot slot van deze paragraaf zullen wij nog even een blik werpen op de foto om eens na te gaan welke informatie er, behalve de representatie van een stuk terrein, nog meer op staat. Figuur 6 en de foto geven U hiervan een idee.



Als voorbeeld van een verticale luchtfoto geven wij hier een overzichtsfoto van een uit beton opgebouwde stuwdam (boogdam van het type cupula) met een deel van het daarachter liggende stuwmeer in een gebergte ergens in Japan. Stroomafwaarts

(links) van de dam is de droge bedding van de rivier zichtbaar met daarnaast de slingerende weg welke naar de dam leidt.

Op deze foto komt tevens het drainage-patroon van dit gebied goed tot uitdrukking. De verdere gegevens van deze foto zijn:

1. Vlieghoogte tijdens de opname : 4585 meter
2. Tijd van opname : 09.53 uur
3. Nummer van het negatief : 8294
4. Nummer van de camera : 21 At 83
5. Brandpuntsafstand van de camera : 209.81 mm

De uit vlieghoogte en brandpuntsafstand berekende schaal is dan  $\pm 1 : 17.000$ .

Noot: door de hoekmerken diagonaalsgewijs te verbinden verkrijgt men, op het snijpunt der diagonalen, het middelpunt van de foto.

#### 4. De interpretatie

Alvorens tot een interpretatie van een luchtfotopaar over te kunnen gaan, dienen de foto's op de juiste manier onder de stereoscoop gelegd te worden. Het oriënteren van de foto's zal na enige oefening geheel 'uit het handje' kunnen geschieden, maar voor men zover is, is het natuurlijk beter om gebruik te maken van een standaard procedure.

Daartoe bepalen wij eerst het middelpunt van de twee foto's, welke samen een stereopaar vormen. Vervolgens brengen wij de aldus gevonden punten over naar de andere foto waarin zij het getransformeerde middelpunt heten. Elke foto heeft nu een middelpunt en een getransformeerd middelpunt. Door deze twee punten in elke foto te verbinden verkrijgen wij een stukje van de vlieglijn (grondkoers) van het vliegtuig van waaruit deze foto's werden gemaakt. Onder de linkerspiegel van de stereoscoop leggen wij nu de linkerfoto vast. De rechterfoto wordt onder de rechterspiegel zodanig gemanoeuvreerd dat de beide lijnen geheel samenvallen.

Hierbij hebben wij niets anders gedaan dan de lijn tussen de pupillen van onze ogen, dus de verbindingslijn tussen de centra der lenzen van de stereoscoopkijker, evenwijdig te leggen aan de vlieglijn. De foto's zijn nu gereed om geïnterpreteerd te worden.

Zoals al eerder werd opgemerkt vereist een luchtfoto interpretatie een grondige opleiding. Zoiets als een algemene opleiding in dit verband bestaat niet omdat er een zeer duidelijk accent gelegd (moet) worden op het doel van de interpretatie. Het zal U duidelijk zijn dat een bosbouwer geheel andere zaken uit zijn foto's wil halen dan b.v. een geograaf. De eerste is b.v. geïnteresseerd in alle aspecten van het houtbestand, de laatste b.v. in het grondgebruik. Beide dienen echter te beschikken over voldoende technische kennis op het gebied der fotografie (opname techniek, emulsiënkennis, enz.), optiek en vanzelfsprekend dienen zij geheel 'los' te zijn op hun eigen vakgebied.

Daar wij thans zijn aangeland op het zuiver technische vlak van de interpretatie bin-  
nen de disciplines geef ik graag het woord aan de geoloog.

#### Literatuur:

Manual of photographic interpretation (American Society of photogrammetry, 1960).



## II. HET GEBRUIK VAN LUCHTFOTO'S IN DE GEOLOGIE

R. J. Elsinga\*

### 1. Introductie:

De luchtfoto maakt het mogelijk de geologie van een gebied te bestuderen alvorens er naar toe te gaan. Vooral in het geval dat bestaande, doch onvolledige, veldgegevens ter beschikking staan, kan de geologische interpretatie van luchtfoto's reeds een betrouwbaar beeld geven van de geologie van het betreffende gebied. Het zal echter duidelijk zijn, dat zowel de aard van het gebied, als de geologische gesteldheid in dat gebied, een rol spelen in de doelmatigheid van het gebruik van luchtfoto's. Het dichtbevolkte Nederland, bijvoorbeeld, waar natuurlijke landschappen schaars zijn en waar de ontrafeling van de geologie het werk is van specialisten, is in het algemeen geen geschikt gebied om foto-geologie op toe te passen. Desalniettemin is het zeker niet uitgesloten, dat met de interpretatie van luchtfoto's plaatselijk goede resultaten kunnen worden geboekt. Daarentegen leent de luchtfoto-interpretatie zich heel goed voor een overzichtskartering van het binnenland van bijvoorbeeld Brazilië.

Het gebruik van de luchtfoto voor geologische doeleinden stamt uit de dertiger jaren. Olie- en mijnbouw maatschappijen zagen toen de kans om met behulp van luchtfoto's uitgestrekte en onbetreden gebieden op een snelle en relatief goedkope manier te onderzoeken en geologisch in kaart te brengen. Een van de eerste grote foto-geologische projecten in de wereld was de geologische exploratie naar aardolie door de N.N.G.P.M. in de zuidelijke Vogelkop van Nieuw Guinea (West-Irian). Hier werd een zeer moeilijk toegankelijk gebied, dat nog nauwelijks bekend was, in enkele jaren geologisch gekarteerd met behulp van luchtfoto's. Het resultaat van deze manier van exploratie was een stimulans om hiermee door te gaan en heden ten dage worden bijna alle belangrijke geologische karteringen voorafgegaan door een foto-geologisch onderzoek. Ook bij geologische studies van kleinere omvang kan het gebruik van luchtfoto's groot nut hebben.

Er bestaan tegenwoordig van uitgestrekte gebieden in de wereld luchtfoto's. Aangezien een vernieuwing van een oude luchtfoto-bedekking bijzonder kostbaar is, worden de luchtfoto's niet frequent vervangen door nieuwe. Dit heeft tot gevolg, dat veel gebieden op aarde een verouderde luchtfoto-bedekking hebben. Voor de geoloog, denkende in perioden van duizenden of miljoenen jaren, is dit geen onoverkomelijk bezwaar. De geologie van een gebied zal in een periode van 5 à 10 jaren nauwelijks aan verandering onderhevig zijn, dit in tegenstelling met de ingrijpende veranderingen, die de mens zelf teweeg brengt. De planning van huisvesting en transport gedurende geologisch veldwerk in een vreemd gebied, gebaseerd op gegevens van oude luchtfoto's, is echter riskant.

Bij een foto-geologisch onderzoek speelt de ouderdom van de foto's geen rol van betekenis. De kwaliteit van de foto's en de foto-schaal zijn echter wel belangrijk. Voor geologische studies is een foto-schaal van 1 : 30.000 tot 1 : 50.000 het meest geschikt. De geologische verschijnselen zijn op deze foto's duidelijk te onderscheiden en de geologische structuren (anticlinale- en synclinale plooiingen, overschuivingen en breuken) kunnen worden overzien. Bij een grotere foto-schaal, zoals bijvoorbeeld 1 : 10.000, wordt een veel kleiner gebied door de foto bedekt, waardoor we de geolo-

\* Internationaal Instituut voor Luchtkartering en Aardkunde, Enschede.

gische structuren niet meer kunnen overzien, terwijl de details van de vegetatie storend gaan werken. Bij een kleinere foto-schaal, zoals bijvoorbeeld 1 : 80.000, worden de te bestuderen objecten veelal te klein om te worden geïnterpreteerd. In enkele speciale gevallen kunnen foto's, gemaakt uit kunstmanen, die om de aarde cirkelen, van nut zijn. De foto-schaal van deze foto's varieert, maar is in de orde van grootte van 1 : 4.000.000.

Alhoewel grote delen van het aardoppervlak regelmatig vanuit kunstmanen worden gefotografeerd, is de normale luchtfoto in sommige landen nog steeds gebonden aan restricties, opgelegd door de militaire autoriteiten. Dit heeft tot gevolg, dat in het gunstige geval de luchtfoto's van beperkte gebieden, die strategische waarde hebben, niet beschikbaar zijn.

Na deze inleiding, zullen we gaan kijken wat de geoloog met luchtfoto's kan doen.

## 2. De luchtfoto gebruikt als kaart:

Een enkele luchtfoto en een foto-plakkaart (mozaïek) kunnen worden beschouwd als een gedetailleerde topografische kaart. De foto geeft alle informatie over het voorkomen van wegen, rivieren, bergen, natuurlijke begroeiing, landbouwgronden, huizen en andere door de mens geconstrueerde bouwwerken. Deze gegevens zijn van veel belang, omdat de geoloog zich hiermee een oordeel kan vormen over de begaanbaarheid van het terrein en over de staat van ontwikkeling van het gebied, hetgeen hem van pas komt bij de planning van het veldwerk. Tijdens het veldwerk verschafft de luchtfoto de mogelijkheid zich in het terrein te oriënteren. Aangezien iedere boom en zelfs de geringste bocht in weg of rivier op de foto te zien zijn, verdient de luchtfoto wat dit betreft de voorkeur boven de meeste topografische kaarten. Bovendien kan de geoloog van deze gedetailleerde gegevens een nuttig gebruik maken door zijn in het veld verzamelde gegevens direkt op de luchtfoto in te tekenen. Door de veelheid van herkenningpunten kan dit in vele gevallen veel nauwkeuriger gebeuren dan op een topografische kaart. Deze, op de luchtfoto ingetekende, gegevens kunnen later met behulp van speciale instrumenten, zoals bijvoorbeeld de optische pantograaf, op een topografische kaart worden overgebracht.

De enkele luchtfoto kan echter nog veel meer gegevens leveren, die van belang zijn voor een geologisch onderzoek. Zo kunnen de gebieden waar vast gesteente ontsloten is, vaak uit de foto worden afgelezen, hetgeen voor de geoloog een belangrijke aanwijzing is waar hij zijn veldwaarnemingen met de meeste kans op succes dient te verrichten. De algemene strekkingsrichting van de gesteenten kan dikwijls in één oogopslag van de foto worden afgelezen. Dit is van groot belang voor de geoloog, die zijn veldtochten zo efficiënt mogelijk wil plannen, dat is loodrecht op de strekkingsrichting van de gesteenten. Het in staat zijn een luchtfoto te lezen, zoals ook een kaart wordt gelezen, is voor de geoloog, beroeps of amateur, van groot belang.

## 3. De luchtfoto gebruikt voor het verrichten van metingen:

Het gebruik van luchtfoto's voor het uitvoeren van metingen en berekeningen met het doel betrouwbare topografische kaarten te maken, is het vakgebied van specialisten, de zogenaamde fotogrammeters. De geoloog is in het algemeen alleen geïnteresseerd in het eindresultaat van dit specialistische werk, de topografische kaart. Toch kan het nuttig zijn als hij enkele eenvoudige metingen zelf kan verrichten, zoals bijvoorbeeld het meten van hoogteverschillen en hellingen van geologische eenheden. Een eerste vereiste is hierbij echter, dat de geoloog de beschikking krijgt over een

foto-paar, waarmee hij met een stereoscoop een stereoscopisch beeld kan verkrijgen. Met het aldus verkregen drie-dimensionele model van een gebied, waarin de hoogteverschillen en hellingen sterk overdreven weergegeven zijn, kunnen eenvoudige metingen worden verricht, die na enkele dagen van training tot vrij betrouwbare gegevens omtrent hoogteverschillen kunnen leiden. Weten we ook de horizontale afstand tussen twee meetpunten, dan kan de hellings-hoek worden berekend. Alhoewel de plaats van het vliegtuig, van waaruit de luchtfoto genomen werd, ten opzichte van de locatie van de hellende gesteentelagen, van grote invloed is op de verschijningsvorm van de helling in het stereobeeld, kan een ervaren fotogeoloog zeer betrouwbare schattingen maken van de grootte van de hellingshoek van gesteentelagen.

#### 4. De luchtfoto gebruikt voor interpretatie.

Verreweg de belangrijkste toepassing van luchtfoto's in de geologie is de foto-interpretatie. De geoloog dient hierbij de beschikking te hebben over één of meerdere series van luchtfoto's, die een overlap hebben van ongeveer 60%, en een stereoscoop. Ieder foto-paar geeft nu onder de stereoscoop een drie-dimensionaal beeld waarin het gehele complex van landschapsvormen, gesteenten, bodem, water, begroeiing, en de invloed van de mens hierop, bestudeerd kan worden.

Al deze oppervlakte-verschijnselen zijn herkenbaar voor de foto-geoloog, die moet trachten hiervan een mogelijke geologische betekenis af te leiden. Het zal zonder meer duidelijk zijn, dat een ervaren veldgeoloog, die in het terrein het verband tussen oppervlakte-verschijnselen en geologie bestudeerd en herkend heeft, de geschiktste man is om zich de techniek van foto-interpretatie eigen te maken. Dit kan hij alleen bereiken door zichzelf langdurig te trainen in foto-interpretatie. Het bestuderen van boeken, hoe mooi ook uitgevoerd, is ten enenmale onvoldoende om zich deze techniek eigen te maken.

Het probleem van de foto-geoloog is tweevoudig:

- a. wat kan hij op de luchtfoto onderscheiden.
- b. hoe vertaalt hij het waargenomen verschijnsel in de geologische taal.

Het mag misschien ongeloofwaardig klinken, maar het is een feit, dat de meeste geologische verschijnselen niet op luchtfoto's kunnen worden waargenomen. Zelfs een ervaren fotogeoloog kan in het algemeen geen lithologische eenheden herkennen, laat staan daten, zonder dat aanvullende veldgegevens beschikbaar zijn. Fossielen, mineralen, de metamorfose-graad van gesteenten, top-bottom criteria, en andere studie-objecten, die in het veld van essentieel belang zijn om de geologie te begrijpen, kunnen op de luchtfoto nooit worden waargenomen.

De fotogeoloog heeft echter tal van andere aanknopingspunten, die hem indirect gegevens verschaffen over de geologische gesteldheid van het betreffende gebied. Dit zijn achtereenvolgens de landschapsvormen, het afwateringspatroon, de erosie-verschijnselen, de grijstinten van de foto, anomaal rechtlijnige structuren, vegetatie verschillen, verschillen in bodemgebruik, en tenslotte de locatie van de door de mens geconstrueerde bouwwerken.

Het voert te ver om hier het mogelijke verband tussen al deze oppervlakte-verschijnselen en de geologische gesteldheid van de ondergrond, in extenso te behandelen. Laten we ons beperken tot een bespreking van enkele van de meest belangrijke oppervlakte-verschijnselen en hun relatie tot de geologie.

#### a. De landschapsvormen.

De grootte, vorm en verspreiding van bepaalde landschapsvormen kunnen een belangrijk aanknopingspunt vormen om tot een zekere kennis van de geologie te komen. Het relief, dat gekarakteriseerd wordt door de verschillende landschapsvormen, staat in nauw verband met de verspreiding van de verschillende gesteenten. Harde gesteenten, die minder snel door erosie worden aangetast, zullen heel andere landschapsvormen vertonen dan minder harde gesteenten, terwijl oplosbare kalksteen weer een andere landschapsvorm zal vertonen. Het zal duidelijk zijn, dat een ervaren fotogeoloog reeds tot vergaande conclusies kan komen aangaande de verspreiding van de verschillende gesteenten, gebaseerd op de studie van de landschapsvormen.

Welke die gesteenten zijn, is niet direct uit de landschapsvormen af te leiden. De enige uitzondering hierop is kalksteen, dat vaak gekarakteriseerd wordt door het voorkomen van dolinen, die duidelijk op de luchtfoto's zijn waar te nemen.

Er is echter nog een tweede verschijnsel, dat het relief sterk beïnvloedt, namelijk de geologische structuur. Een opgeheven deel van de aardkorst zal een totaal ander relief vertonen dan het in rust gebleven deel aan de andere zijde van de breukzone, waarlangs de beweging plaatsvond. Wordt dezelfde geologische eenheid door plooi-tectoniek beïnvloed, dan zal er weer een ander relief ontstaan. De verschillende typen van landschapsvormen, die hierbij ontstaan, zijn niet alleen het gevolg van de wijze van deformatie van de aardkorst, maar vooral uit de hieruit voortvloeiende verhevigde erosie. Bovendien speelt de helling van de laagvlakken van de geologische eenheden een belangrijke rol in de differentiëring van de landschapsvormen. Het zal duidelijk zijn, dat een horizontaal gelaagd gesteente-pakket een heel ander relief zal vertonen dan een sterk hellend pakket van hetzelfde gesteente.

Het binnenland van Suriname is een mooi voorbeeld van een gebied, waar de foto-geologische kartering grotendeels gebaseerd is op de interpretatie van landschapsvormen. Geologisch gezien, bevinden we ons hier in het precambriësche Guyana Schild, dat uit kristallijne gesteenten bestaat, zoals graniet, gneis en schist. Aangezien dit gebied reeds sinds het precambrium boven zee heeft gelegen, is het sterk gedenudeerd en tot grote diepte verweerd. Bovendien staat er tegenwoordig een dicht tropisch regenwoud op, zodat de kans op gesteente-ontsluitingen gering is. Een fotogeologische kartering, in combinatie met een geofysisch en geochemisch onderzoek, is de enige manier om dit gebied met succes geologisch te exploreren. Schrijver dezes maakte van het Coeroeni-gebied (zuidwest Suriname) een fotogeologische kaart waarop een tiental verschillende landschappen worden onderscheiden. Tijdens het hierna uitgevoerde veldwerk bleken slechts drie verschillende geologische eenheden in het gebied voor te komen, waarvan twee vertegenwoordigd werden door meerdere landschapsvormen. Deze konden worden geïnterpreteerd als verschillende erosie-vormen van dezelfde geologische eenheid. De ene geologische eenheid, een graniet-gneis complex, was dicht bij de Coeroeni-rivier sterker door erosie aangetast dan op grotere afstand van de rivier, terwijl de andere geologische eenheid, een graniet-granietporfier associatie, twee totaal verschillende landschappen vertoonde als gevolg van een gedeeltelijke opheffing. De derde geologische eenheid, een doleriet, was tijdens de foto-interpretatie reeds als zodanig geïnterpreteerd.

De langgerekte, smalle heuvelrug, die alle andere landschappen doorsneed, kan nauwelijks iets anders zijn dan een intrusief basisch ganggesteente.

Resumerend kan gezegd worden, dat de bestudering van de landschapsvormen een grote hoeveelheid geologische informatie kan opleveren, mits de fotogeoloog een juiste interpretatie van de landschapsvormen kan geven. Hiervoor is het in het

algemeen noodzakelijk, om de foto-interpretatie in het veld te controleren. Dit kan snel en efficiënt gebeuren doordat reeds tijdens de foto-interpretatie de geschikteste controle-punten kunnen worden geselecteerd.

b. Het rivierpatroon.

Een ander belangrijk oppervlakte-verschijnsel, waarmee de foto-geoloog gegevens kan verzamelen, is het drainage- of rivier patroon. De dichtheid van het rivierstelsel is een indicatie voor de verhouding tussen de hoeveelheid water, die in de bodem infiltreert, en de hoeveelheid water, die via de rivieren als oppervlaktewater wordt afgevoerd. Het zal duidelijk zijn, dat de hoeveelheid water, die in de bodem infiltreert, behalve van het klimaat en het relief, voornamelijk afhankelijk zal zijn van de permeabiliteit van de gesteenten in de ondergrond. Het rivierpatroon kan dus een aanwijzing geven omtrent de aard van het gesteente in de ondergrond. Dit rivierpatroon kan tot in detail op de luchtfoto's worden waargenomen en de foto-geoloog kan gebruik maken van dit oppervlakte-verschijnsel bij de interpretatie van de luchtfoto's. Hij dient hierbij uit te gaan van het feit, dat de grootste dichtheid van de rivierenstelsel samengaat met de laagste permeabiliteit van de bodem. Zo zal een gebied, waar veel klei voorkomt, gekarakteriseerd worden door een zeer dicht rivierstelsel, terwijl een zandsteen-gebied zal opvallen door een slecht ontwikkeld rivierstelsel.

Naast de dichtheid van het rivierpatroon, speelt ook de vorm een belangrijke rol bij de foto-interpretatie. Omdat rivieren de neiging vertonen, de zwaktezones in de aardkorst te volgen, vallen vele rivierlopen samen met breukzones. Aldus bestaat er een nauw verband tussen de vorm van het rivierpatroon en de geologische structuren in de ondergrond. De fotogeoloog moet weten, dat een anomaal rechte rivierloop en een plotselinge haakse bocht, een indicatie kunnen zijn voor geologische structuren.

In gebieden, waar bewegingen in de aardkorst voorkomen, geeft het rivierstelsel vaak aanwijzingen omtrent de aard en de richting van de beweging. In Californië komt de beruchte, noord-zuid gerichte, San Andreas breuk voor, waarlangs sinds het mesozoïcum het westelijke blok in noordwaartse richting beweegt. Deze beweging is duidelijk te zien op de luchtfoto's, aangezien de benedenloop van alle rivieren, die de breukzone doorsnijden, als het ware in noordwaartse richting wordt meegesleurd door het westelijk blok.

Bij verticale bewegingen in de aardkorst zullen de rivieren zich aan de nieuwe omstandigheden moeten aanpassen. Kan een rivier een plaatselijke opheffing niet door middel van eigen erosieve kracht compenseren, dan zal de stroombedding verlegd moeten worden. Er blijft dan een verlaten stroombed over, dat duidelijk zichtbaar is op de luchtfoto, en waaruit de fotogeoloog zijn conclusies kan trekken. Een mooi voorbeeld van een stroombedverlegging tengevolge van een plaatselijke opheffing van de bodem komt voor in de zuidelijke kustvlakte van Nieuw Guinea (West-Irian). Hier stroomen een aantal vrij grote rivieren (Digoel-, Bian-, Koembe- en Merauke rivier) zuidwaarts naar de Arafoera Zee. Bij een bestudering van de luchtfoto's van dit gebied blijkt, dat al deze rivieren de tendens vertonen naar het westen af te buigen, terwijl ten zuiden van deze ombuiging verlaten rivierlopen zichtbaar zijn. Dit wijst er op, dat deze rivieren in een recent verleden wel degelijk een zuidelijker koers hebben gevolgd. Bovendien komt ten noorden van de ombuiging veelal een overstromd gebied voor, wijzende op een stagnatie in de afvoer van het rivierwater. Nadat zowel de verlaten rivierlopen, als de overstromde gebieden van de luchtfoto's op een topografische kaart waren ingetekend, bleek, dat er een aantal oost-

noordoost - westzuidwest gerichte opheffingszones konden worden aangegeven als een mogelijke verklaring voor de waargenomen oppervlakte-verschijnselen. Ter bevestiging van deze veronderstelde opheffingszones, beschrijft Sperling (1936) klifkusten op die plaatsen aan de zuidkust van Nieuw Guinea, waar de veronderstelde opheffingszone de kust raken. Hier kan dus uit een studie van de morfologie van een gebied, een aanwijzing worden gevonden voor geologische processen, die in een zeer recent verleden in de ondergrond gewerkt hebben en die mogelijk nog heden ten dage doorwerken.

Alhoewel nog vele andere oppervlakte-verschijnselen gebruikt kunnen worden bij de geologische interpretatie van luchtfoto's, lijkt het mij, dat de behandelde voorbeelden reeds duidelijk demonstreren wat een geoloog met luchtfoto's kan doen en dit was de bedoeling van dit artikel.

**Literatuur:**

- R. J. ELSINGA, 1958, Korte toelichting op de foto-geologische kaart van het zuiden van Nieuw Guinea. (Rapport).
- R. J. ELSINGA, 1966, Geologie en petrografie van het Coeroeni-gebied. Informatie 66/4 Geol. Mijnbouw. Dienst Suriname.
- I. SPERLING, 1936, Beiträge zur Länderkunde von Niederländisch-Neuguinea. Frankfurter Geographische Hefte, 10. Jahrgang, Heft 1.