

## Luchtopnametechnieken toegepast bij vitaliteitsonderzoek aan bomen

D. A. Stellingwerf

Internationaal Instituut voor Luchtkartering en Aardkunde, ITC, Delft.

Vele toepassingen van luchtfoto's bij de bosbouw zijn uit de praktijk bekend. De praktijk leerde dat luchtfoto's bepaalde terreinwerkzaamheden niet volledig kunnen vervangen, maar meer als een technisch hulpmiddel ter aanvulling van deze terrestrische activiteiten moeten worden gezien, waarbij een meer economische werkwijze mogelijk wordt. Als voorbeelden mogen hier o.m. genoemd worden dat bij de bosinrichting in Duitsland opstandsuitscheidingen en beschrijvingen met behulp van luchtfoto's 30 tot 60 procent tijdsbesparing gaven vergeleken met veldmethodes en dat bij aanvullende of corrigerende kartering de luchtfoto tot 70 procent en bij nieuwkarteringen dit hulpmiddel tot 50 procent tijdsbesparing gaf.

De luchtfoto heeft het grote voordeel dat niet alleen een overzicht mogelijk is, maar dat bovendien kleinere eenheden kunnen worden bestudeerd. De registratie van meer details van de bossen op het fotobeeld wordt mogelijk door de toepassing van grotere schalen, tot ca. 1 : 1500, bij welke schaal delen van boomkronen kunnen worden bekeken. De stereoskopie, die door een langsoverlap van de foto's in de vliegrichting wordt verkregen, maakt de bestudering van de bossen in verticale richting mogelijk voor zover de sluiting van de bomen dit toelaat. Door de zogenaamde reliëfverplaatsing van de bomen, ten gevolge van de centrale opnameprojectie, kunnen ook op vele plaatsen op het beeld boomkronen op verschillende niveaus worden bekeken. Eenmalige opnamen geven een statisch beeld van de bossen; herhaalde opnamen laten een bestudering van de plaatsgevonden veranderingen toe.

Filmtypen afwijkend van de conventionele en voorts warmtestraling registrerende technieken, die tot de niet-fotografische behoren, maken het in vele gevallen mogelijk een uitspraak te doen betreffende de fysiologische gesteldheid van de bomen.

Alvorens enige registratiemogelijkheden vanuit de lucht te behandelen, wordt eerst nader ingegaan op enige fysische en fysiologische eigenschappen van de plant in verband met een registratie van de vegetatie op film of door middel van andere methodes.

In gezonde groene vegetatie wordt de groene component (0,5-0,6  $\mu$ ) van het licht voor 10-20 procent gereflecteerd door het chlorofyl van de chloroplasten

van de cel. Alhoewel dit bedrag klein is, ziet de mens het licht van deze golflengte met groot contrast door de enorme gevoeligheid van het oog in dit groene gebied. Het blauwe deel (0,4-0,5  $\mu$ ) en het rode deel (0,6-0,7  $\mu$ ) worden praktisch geheel geabsorbeerd door chloroplasten en gebruikt bij de fotosynthese. Afhankelijk van de soort wordt een meer of minder klein percentage van de laatste twee componenten van het licht teruggekaatst; zo bedraagt de reflectie van het blauwe deel van het spectrum door coniferenaalden slechts 4 à 5 procent. Het infrarood in het gebied van 0,7 tot 1,3  $\mu$  (het z.g. nabije infrarood) wordt niet gebruikt door de plant en voor ongeveer 80 procent vnl. door de wanden van de intercellulaire holten van het mesofyl of sponsparenchym teruggekaatst; de rest wordt doorgelaten (zie figuur 1; fig. op p. 279-286). Alle gezonde groene bladeren vertonen een sterke toename en een tamelijk sterke afname in de reflectie bij respectievelijk 0,7 en 1,3  $\mu$ . Maxima in de absorptie treden op bij 1,4 en 1,9  $\mu$ , die overeenkomen met de absorptiebanden van water. De geringe waterabsorptie bij 0,7 en 1,3  $\mu$  heeft slechts geringe invloed op de reflectie (zie figuur 2).

Tot ongeveer 3  $\mu$  hebben we bij de plant te doen met reflectieverschijnselen. Tot 3  $\mu$  kan men dus drie gebieden onderscheiden: 0,3-0,38  $\mu$  (ultraviolet), 0,39-0,72  $\mu$  (zichtbaar) en van 0,73-3  $\mu$  het reflectief infrarood. Buiten dit gebied, voor de golflengten van 3  $\mu$  tot 15  $\mu$ , wordt de te registreren energie voornamelijk uit emissie in plaats van reflectie verkregen. Deze emissie is een functie van de absolute temperatuur van het object. In het gebied met golflengten > 3  $\mu$  zijn bij ongeveer 2,7  $\mu$  en 6,3  $\mu$  belangrijke waterabsorptiebanden aanwezig. In figuur 3 zijn de percentages spectrale reflectie, transmissie en absorptie van *Populus deltoides* weergegeven.

Een klein percentage van het licht wordt direct door de cuticula van het blad teruggekaatst en de rest van het licht vervolgt zijn weg zoals boven beschreven. Door de reflectie tegen een groot aantal celwanden kan men aannemen dat ongeveer een gelijk aantal stralen gereflecteerd als doorgelaten wordt bij niet te dikke bladeren. Cacti en xerofytische planten reflecteren de nabij-infrarode stralen zeer sterk. Was en haren op de cuticula kunnen de reflectie versterken. Reflecties bij planten kunnen worden geme-

ten aan de bovenzijde van de bladeren met een z.g. spectrofotometer, waarbij de golflengte-intervallen kunnen worden ingesteld. In figuur 4 zijn de reflectielijnen van enige boomsoorten voor het zichtbare en nabije infrarode deel van het spectrum weergegeven. Uit de gegeven waarden blijkt duidelijk dat de reflectie voor naaldhout in het algemeen sterk verschilt van die van loofhout en dat ook tussen soorten binnen deze groepen verschillen optreden, zowel in het zichtbare deel als in het nabij-infrarode gebied. Indien deze verschillende reflecties op film geregistreerd zouden kunnen worden zou een onderscheid tussen deze soorten en tussen naald- en loofhout op film mogelijk worden.

Het effect van pigment in het blad wordt duidelijk geïllustreerd door de reflectielijnen van een groen en een rood blad van *Acer sacharinum* (figuur 5). De rode kleur wordt veroorzaakt door anthocyaan dat wordt geproduceerd in de herfst en de reflectie ervan is hoog in het gebied van 0,6-0,7  $\mu$ . Figuur 6 toont de reflectiekrommen van een groen en een geel blad van *Liriodendron tulipifera*. De gele kleur wordt veroorzaakt door de afbraak van chlorofyl in de herfst, waardoor de aanwezigheid van caroteen en xantofyl zichtbaar wordt. Het gele blad geeft een abrupte toename te zien bij 0,5  $\mu$  en een blijvend hoge reflectie in het groene en rode gebied van het zichtbare spectrum. In het infrarode is de reflectie ongeveer 2,5 procent lager dan die van het groene blad. Een sterke uitdroging van bladeren heeft een sterke verlaging van het percentage spectrale reflectie tengevolge, waarbij de afname afhankelijk is van de soort, de golflengte (speciaal in het gebied van 1,3-2,6  $\mu$ ) en het vochtgehalte van de plant. Veranderingen in de structuur van het blad zoals een dikkere cuticula, die een gevolg kunnen zijn van uitdroging, beïnvloeden de reflectie ook.

Een volledig droog blad vertoont, vergeleken met een normaal blad een verminderde reflectie in het nabij-infrarode en een toename van de reflectie bij langere golflengten ten gevolge van een reductie van de waterabsorptie. Een blad aan het einde van de vegetatieperiode, voordat het verdord is, kan door de vermindering van het chlorofyl en de aanwezigheid van b.v. anthocyaan een sterke absorptie in het blauw vertonen, waarbij ook de reflectie in het geel groter kan worden. Verder uitdrogen gaat gepaard met verdere vernietiging van de pigmenten en een toename van de absorptie in het blauw en groen. Bij jonge bladeren is de reflectie van groen en blauw gering, die van geel en rood relatief sterk en die van het nabij-infrarode zeer sterk.

Zoals boven is vermeld, stralen planten ook in het gebied  $> 3 \mu$  uit. Uitgestraalde infrarode energie ondergaat verliezen in de atmosfeer die afhankelijk zijn van de temperatuur, relatieve vochtigheid en uur van de dag. De mate van absorptie door waterdamp, koolzuur en ozon is afhankelijk van de specifieke golf-

lengte van de straling. Gebieden met een hoge doorlatendheid liggen tussen 3,3 en 4,2  $\mu$  en tussen 8 en 14  $\mu$ , de zgn. infrarode vensters van de atmosfeer. Bomen kunnen warmer of kouder zijn dan hun omgeving afhankelijk van het feit of meer energie opgenomen wordt of meer energie door straling verloren gaat. Belangrijke processen, die invloed hebben op de energiebalans zijn zonne- en thermische straling, convectorie en transpiratie. Bomen die te lijden hebben van ernstig watertekort, kunnen soms niet zo snel transpireren als gezonde bomen en kunnen daardoor warmer zijn. Fysiologisch verzwakte bomen ten gevolge van zout, fungi en dergelijke, zouden mogelijk niet in staat zijn vocht te transporteren via wortel en stammen naar de kronen, waardoor de temperatuur van de bomen beïnvloed kan worden. De energie die door de kronen wordt uitgestraald in het thermisch infrarode kan gemeten worden met behulp van een infrarode radiometer. Dergelijke metingen aan gezonde en fysiologisch verzwakte bomen kunnen met gebruik van een helicopter, ladderwagen of andere hulpmiddelen gerealiseerd worden. Veelal worden bij dergelijke testmetingen ook waarnemingen verricht betreffende regenval, windsnelheid, omringende luchttemperatuur en relatieve vochtigheid om zo gunstig mogelijke omstandigheden te vinden waaronder een hogere temperatuur optreedt. Een stijging van 2-5° C van de bladtemperatuur door vermindering van transpiratie ten gevolge van wateronthouding is mogelijk.

Tot de hulpmiddelen waarvan gebruik gemaakt wordt bij het zichtbaar maken van de reflectie-energie behoren o.a. diverse films en de bekendste is wel de panchromatische film die een spectrale gevoeligheid heeft in het gebied van 0,36 tot 0,72  $\mu$ . Afhankelijk van de verschillende typen kan de gevoeligheid wisselen voor de golflengte binnen dit gebied. De film wordt gebruikt in combinatie met een geel filter ten einde het blauwe licht beneden 0,5  $\mu$  dat sterk verstrooid wordt uit te schakelen. De infrarode film die ook vaak gecombineerd wordt met een geelfilter, is gevoelig in het gebied van 0,35-0,9  $\mu$  en deze film vertoont een geringere gevoeligheid voor het groen dan de panchromatische film maar registreert het rood en een deel van het reflectieve infrarode. Voorbeelden van de gevoeligheden van een panchromatische en een infrarode film met de beperkende werking van een geelfilter is gegeven in figuur 7. Deze film heeft voor- en nadelen zoals respectievelijk betere doordringing van lichte nevel en te geringe schaduwdoordringing. De betere onderscheidingsmogelijkheid tussen loofhout (lichtgrijs-wit) en naaldhout (donkergrijs) en tussen soorten binnen deze groepen is ook een voordeel. Deze film is met succes gebruikt om het effect van een twee- resp. vierjarige stikstofbemesting bij zestig- resp. twintigjarige pijnopstanden in Oost-Duitsland weer te geven. De bemesting had tengevolge dat de naalden groter werden en anatomische

veranderingen vertoonden waardoor een stijging van ongeveer 25 procent werd verkregen van de reflectie in de infrarood band (0,74-0,75  $\mu$ ) en tot 20 procent in het groen-geel (0,55-0,65  $\mu$ ). Het was vooral de stijging van de reflectie in het infrarood die kon worden geconstateerd op infrarood zwartwit film. Het effect van de bemesting (37-75% toename in massa-aanwas na drie jaar) is op deze wijze gemakkelijk te constateren en de duurzame werking kan door herhaalde luchtopnamen worden vastgesteld (Wolff, 1967, 1970). De normale kleurenfilm en de Ektachrome Infrarod kleurenfilm bezitten elk drie lagen, waarin kleurstoffen gekoppeld zijn, die gevoelig zijn voor bepaalde golflengten van het spectrum. Tabel 1 geeft een overzicht van de normale kleurenfilm (N.K.) en de Ektachrome infrarod film (E.I.). De spectrale gevoeligheid ligt voor beide films in het gebied van 0,35 tot 0,7  $\mu$ .

Indien gezonde groene vegetatie wordt gefotografeerd op N.K. film zal de magenta vormende laag voor een groot deel worden belicht en de cyaan vormende laag slechts voor een gering deel. Bij de E.I. film zal het groene licht de geelvormende laag voor een deel belichten, terwijl hier het rode licht een geringe belichting van de magentavormende laag veroorzaakt. De reflectie van het nabije infrarood belicht het grootste deel van de cyaanvormende laag bij de E.I. film. Bij de behandeling in het laboratorium worden in de beide films kleurstoffen gevormd in een hoeveelheid die omgekeerd evenredig is met de belichting van de respectievelijke lagen. Dit betekent dat bladeren van groene bomen op de N.K. film een groene kleur krijgen en dat ze op de E.I. film met een rode tot roodmagenta kleur te zien zijn. Bij de laatste film worden nl. magenta en geel in de lagen gevormd. De geringe cyaankleur kan een donkere tint aan de rode kleur geven. In de bovenste laag die gevoelig is voor het nabije infrarood, wordt door het omkeerprocédé geen kleur gevormd, in de tweede laag wordt geel gevormd en in de derde groen. In de bovenste laag wordt niets geabsorbeerd en blauw (bl), groen (gr) en rood (rd) doorgelaten. In de middelste laag wordt bl. geabsorbeerd en gr. plus rd. doorgelaten, in de onderste laag wordt gr. geabsorbeerd en bl. plus rd. doorgelaten. Met doorlatend wit licht bekeken, geeft dit totaal een rode kleur.

Wat gebeurt er nu indien een boom fysiologisch verzwakt is door een of andere oorzaak? De veranderingen in de reflectie van het blauwe licht zijn gering en die van het groen zijn groter dan die van het rood. Belangrijk is verder dat vóórdat er een verandering optreedt in de reflectie van het zichtbare deel van het spectrum, de nabij infrarode straling afneemt. Dit betekent dat de belichting van de emulsie die gevoelig is voor deze nabij-infrarode straling, nl. de cyaanvormende bovenste laag zál afnemen. De belichting van de tweede en derde laag wordt dan niet beïnvloed. Dit heeft tot gevolg dat het beeld van de

bladeren rood tot rood-magenta blijft, maar er minder of meer cyaan bijkomt. Indien de groene kleur in geel verandert, wordt dit op de E.I. film zichtbaar als mauve of purper. Gele bladeren die nog een hoge infrarode reflectie hebben worden op deze film gezien met een wit-gele kleur en dode bladeren met gele tot groen-blauwe kleur. De uiteindelijke kleur hangt af van de zichtbare kleur van de dode bladeren en de hoeveelheid groen en mogelijk infrarood licht dat nog wordt gereflecteerd. De kleurresultaten op de film zijn met het blote oog te beoordelen maar het is ook mogelijk de densiteit \* van de gevormde kleurstof te meten met behulp van een optische densitometer. Speciaal bij de cyaankleurstor is dit van belang indien de nabij-infraroodstraling afneemt in het eerste stadium van verzwakking. Geringe hoeveelheden cyaan zullen geen zichtbare maar wel een meetbare verhoging van de densiteit geven. De maximale densiteit van de cyaankleur in de film ligt bij 0,66-0,68  $\mu$  en daarom wordt bij de E.I. film een rood filter in de densitometer gebruikt. Hoe meer/minder infrarood de film raakt, des te minder/meer dicht is de cyaankleur. Hoe groter de mate van de afzwakking van de plant, des te groter de densiteit.

Indien een boom sterft, is een van de eerste zichtbare symptomen een geel worden van de bladeren. Dit wordt veroorzaakt door een afname van het chlorofyl en een daardoor ontstane toename van de gele en oranje pigmenten (carotenoïde en xantofyl) in de chloroplasten van de cel. Hierdoor wordt minder groen gereflecteerd, waardoor bij de N.K. film de bl-rd (magenta) laag minder wordt belicht. Na ontwikkelen van de film heeft de magentakleur dus een grotere dichtheid. Ook bij deze film kan men naast visuele kleurwaarnemingen ook de mate van de densiteit van de kleur met een optische densitometer vaststellen maar nu met een groenfilter. Analooq aan de bovenbeschreven gang van zaken bij de E.I. film worden op de N.K. film gele kleuren met doorvallend licht als geel gezien etc.

Voorbeelden van het gebruik van N.K. en E.I. films voor registratie van schade vanuit de lucht zijn bekend uit de Verenigde Staten van Noord-Amerika zoals b.v. douglasbastkever (*Dendroctonus pseudotsuga* (Hopk) schade aan douglas, *Dendroctonus brevicornis* (Lec) aan ponderosa pijnbomen, *Adelges Piceae* aantastingen aan *Abies amabilis* etc.

Ook voor de schaderegistratie aan loofbomen door rupsen kunnen de films worden gebruikt. In België werd op E.I. film vraat van *Hibernia defolaria* en *Operophtera boreata* op resp. beuk en eik duidelijk in

\* De densiteit is een uitdrukking van de hoeveelheid licht door een dia doorgelaten. Deze hoeveelheid wordt gewoonlijk in procenten uitgedrukt. Densiteit is de logaritme van het omgekeerde van de hoeveelheid doorgelaten licht.

diverse stadia van aantasting (zelfs op de enkele boom) zichtbaar geregistreerd. Praktisch kale delen toonden een blauwe kleur, minder aangevreten lagere delen van de kroon zagen er grijs-wit uit en een licht aangevreten loof gaf een roze kleur en niet aangetaste een rode kleur. Andere voorbeelden in België toonden duidelijk door *Rhopalosiphum abietinum* aange-taste *Picea sitchensis* en andere coniferen en door wateroverlast kwijnende douglasbomen. In vele gevallen zijn fysiologisch verzwakte bomen in hun beginstadium moeilijk in het terrein te ontdekken. Ook de N.K. film toont dit niet. De E.I. film echter kan dit stadium in vele gevallen weergeven, zodat tijdig maatregelen kunnen worden genomen. Bij recente 1 : 4000 schaal luchtfoto's met E.I. film in Oostenrijk bleken in de oudste leeftijdsklasse vele fijnsparren en dennen een afwijkende kleur te geven, die duidde op een verzwakking van de bomen, zodat deze exemplaren in de eerste plaats voor kap in aanmerking kwamen. In Amsterdam is de afdeling Beplantingen van P.W. er zeer recent toe overgegaan deze film te gebruiken bij de inventarisatie van door aardgaslekken, zout en asfaltering verzwakte en stervende bomen in de stad en in de parken. Een snelle inventarisatie van de verzwakte bomen bleek alleen mogelijk met luchtopname met E.I. film. In samenwerking met het I.T.C. konden op proefopnamen van KLM-Aerocarto diverse stadia van vitaliteit bij de bomen worden gezien, waardoor een gerichte behandeling van het groen mogelijk werd. Een twee- à drietal vluchten per jaar boven grote delen van Amsterdam met daaruit resulterende 1 : 5000 schaal E.I. luchtfoto's bleken nog economisch verantwoord. Onderzoekingen in Canada hebben aangetoond dat de E.I. film door *Fomes annosus* (Fr.) aangetaste *Pinus resinosa* aanplantingen registreerde. Door middel van optische dichtheidsmetingen op een E.I. luchtfoto bleek het mogelijk een overzicht te krijgen van de geïnfecteerde gebieden. In figuur 8 is het resultaat van dit onderzoek weergegeven waarbij te zien is dat de dichtheidswaarden afnemen met een toenemende afstand tot de haarden.

Een soortgelijke film als de E.I. film is de Russische spectrozonaal film, die uit twee lagen bestaat, een panchromatische onderste en een infrarood gevoelige bovenste laag. Ook hier produceren kleurstoffen gedurende de negatief ontwikkeling van de film beelden in diverse kleuren, die echter afwijken van die van de E.I. film. Op deze Russische films (SN2m en SN16) worden loofbomen geel-oranje en coniferen rood tot geel-bruin. Ook hiermede, net als met de E.I. film, zijn o.m. door industriegassen veroorzaakte schaden aan fijnsparren en pijnbomen vastgelegd. Spectrofotometer metingen aan naalden en twijgen werden geanalyseerd in zones 1,5; 3; 4,5 en 7 km verwijderd van de haard (zie figuren 9 en 10). Vooral de reflecties in het gebied 0,7-0,8  $\mu$  van de oudere beschadigde naalden vertonen een vermindering die toeneemt bij sterkere beschadiging. Deze reflectiever-

mindering kan gedeeltelijk verklaard worden uit optredende anatomische veranderingen en gedeeltelijk uit een geringer aantal naalden (Wolff, 1967).

Interessant zijn de onderzoekingen in de Verenigde Staten van Amerika met E.I. film voor de registratie van *Dendroctonus ponderosae* op *ponderosa* pijnbomen. In de periode 1968-1969 werden 22000 bomen gekapt en verkocht of verbrand teneinde de bomenpopulatie te verminderen. Een bedrag van \$ 190.000 werd uitgegeven voor controle in de meest toegankelijke gebieden. Men schat dat onder gunstige omstandigheden voor de keverontwikkeling een twee- à drieduidige toename in houtverlies en controlekosten kan optreden. In samenwerking met de NASA (National Aeronautics and Space Administration) werd vastgesteld dat de luchtfotoschaal 1 : 8.000 nodig was, hetzij met E.I. film of N.K. film, voor een 70 procent succes bij het lokaliseren van een infectiehaard van één tot drie bomen. De beste resultaten werden verkregen met opnamen gemaakt in augustus (zie figuren 11 en 12). De gemiddelde afmetingen van de groepen 1-3 bomen, 4-10 bomen, 11-20 bomen, 21-50 bomen, 51-100 bomen en > 100 bomen waren respectievelijk 5, 15, 25, 55, 85 en 135 m. Voor luchtfoto's met een schaal 1 : 31 680 wordt het percentage treffers voor de kleinste groep 50%, voor een schaal 1 : 63 360 7%. Uit dezelfde figuur blijkt dat voor de groep 4-10 bomen de detectie voor beide filmtypen toeneemt voor alle schalen. Bij gebruik van een zoomstereoscoop met tien tot twintig maal vergrotingsmogelijkheid stijgt het trefsucces aanzienlijk, speciaal voor de kleinere groepen.

Zou men vanuit satellieten waarnemingen willen verrichten, dan dient het registrerend systeem een oplossend vermogen van 5 m te hebben om de kleinste groepen te kunnen waarnemen. Aangezien het oplossend vermogen ongeveer 30 m bedraagt kunnen alle groepen met zo'n 25 of meer bomen worden "gezien". Een grote trekfens treedt dan waarschijnlijk pas op bij groepen van meer dan 100 bomen (Heller, 1968, 1969).

Voor het met een vliegtuig registreren van emissie-energie door de planten uitgestraald en doorgelaten door de atmosferische vensters, zijn optisch-mechanische infrarood "scanners" geconstrueerd. De beschrijving van zulk een systeem door Smit (1969) wordt hier aangehaald: "De ontvangen infraroodstraling wordt in het vliegtuig opgevangen door een snel roterende spiegel, die deze straling op een parabolische spiegel reflecteert. Vandaar wordt de straling op een reflectorspiegel geprojecteerd, die de straling op een gekoelde detector richt. Deze laatste vormt de thermische straling om tot een elektrisch signaal, dat versterkt wordt en door een lamp zichtbaar gemaakt als lichtflitsen van verschillende helderheid. Deze lamp, gemonteerd op dezelfde as als waarop de draaiende spiegel is bevestigd, belicht een film zo-

danig, dat registratie van de zichtbaar gemaakte infraroodstraling van een object op een film, qua positie overeenkomt met de positie van het desbetreffende object op de grond. De snelheid van de films is variabel". Figuur 12 is een vereenvoudigde schets van zo'n scanner. In figuur 13 is het aftastpatroon van de scanner vanuit een vliegtuig gegeven. De kwaliteit van het beeld wordt o.a. bepaald door de openingshoek van de detector. Een detector met een openingshoek van 1 milliradiaal op een hoogte van ca. 3000 m boven de grond, neemt op de grond oppervlakken van 30 x 30 cm<sup>2</sup> waar. Temperatuurverschillen tot 0,3° C kunnen worden gemeten. Objecten als boomkronen of delen van kronen die uiteraard kleiner zijn dan de gezichtshoek van de detector, worden alleen dan geregistreerd, indien de kroon zo'n hoge temperatuur heeft, dat de gemiddelde ontvangen straling een temperatuurverschil heeft met de achtergrond dat groter is dan de thermische resolutie van de detector. Voor identificatie van een object – dus niet de detectie – dient het object groter te zijn dan de gezichtshoek. Gebruikte detectors zijn: indium-antimonide kristallen voor het gebied van 3-5  $\mu$  en met kwik verontreinigde germaniumkristallen voor het gebied van 10-14  $\mu$ .

Het op de film zichtbare beeld bestaat dus uit warmtebeelden. Warmere objecten geven op een positief afdruk van de film witte vlekken en koudere objecten geven donkere vlekken. Er zijn verschillende factoren die een belangrijke rol spelen bij het tot stand komen van een beeld. Zo is aangetoond dat windsnelheden boven boomtoppen > 4 m/sec het warmte-effect sterk verdoezelen. Ook de tijd van opname is belangrijk. Thermische beelden nabij Ottawa van door *Cercospora ulmi* (Buism.) aangetaste iepen gaven alleen 's nachts duidelijk wittere (dus warmere) beelden dan niet aangetaste bomen. Deze beelden werden met een Reconofax IV infrared line scanner verkregen in het 3-5  $\mu$  gebied. Uitgebreide onderzoeken in de Verenigde Staten van Amerika zijn nog steeds gaande om met behulp van thermische infrarood scanners schade door Poria weirii in een vroeg stadium aan douglasbomen (*Pseudotsuga menziesii*) aangebracht te registreren. E.I. en N.K. films bleken hierbij geen duidelijke aanwijzingen te kunnen geven. In de Verenigde Staten van Amerika is door deze wortelrot aan douglas een verlies geleden van ongeveer 170 miljoen board feet.

Ook in Nederland is men er toe overgegaan het nut van thermografische beelden en E.I. luchtfoto's te onderzoeken. Door samenwerking van het Staatsbosbeheer, het Bosbouwproefstation, KLM-Aerocarto, NIWARS en het ITC werd de uitvoering mogelijk van een aantal vluchten in Drenthe. Deze vluchten hebben ten doel de daar optredende fljnsparensterfte te registreren. De eerste E.I. luchtfoto's gaven reeds positieve resultaten te zien en een inventarisatie lijkt mogelijk. Herhaalde veldwaarnemingen zullen

verder misschien een uitspraak mogelijk maken over de kans van herstel of sterfte van bomen die met een bepaalde kleur op de foto's te zien zijn.

Door de vele positieve resultaten die werden verkregen met het gebruik van deze waarnemingsmethoden vanuit de lucht bij het vitaliteitsonderzoek van bomen, kan men verwachten dat het gebruik ervan in de nabije toekomst sterk zal toenemen. Niet alleen zal dat het geval zijn in slecht toegankelijke gebieden, maar ook elders, aangezien de toegankelijke methode bij de inventarisatie arbeidsbesparend werkt en een mogelijk meer objectieve beoordeling mogelijk maakt dan een beschrijving in het terrein. Er moge hier nog in 't kort op gewezen worden dat in de huidige "remote sensing" ontwikkeling reeds onderzoeken gaande zijn met niet-fotografische multispectrale sensing methoden. Door speciale "line scanners" geregistreerde beelden worden opgesplitst in diverse bandbreedtes en op een magnetische band vastgelegd. Naderhand kan met behulp van een computer b.v. een kartering volgen van de gewenste objecten. Dit is een ontwikkeling die vooral ook op het gebied van de landbouw grote toepassingsmogelijkheden biedt. Alhoewel de registratie op magnetische band in 12, 18 of 24 golflengtegebieden mogelijk is en herhaling met eventuele simulaties van willekeurig gekozen gebieden een voordeel is, heeft het systeem nadelen, zoals het geringe oplossend vermogen (5 meter voor elke 1000 meter afstand van scanner tot object) en de zeer hoge kosten van opname en interpretatie-apparatuur. Hierdoor is een economisch gebruik van dit systeem niet altijd mogelijk.

#### Literatuur

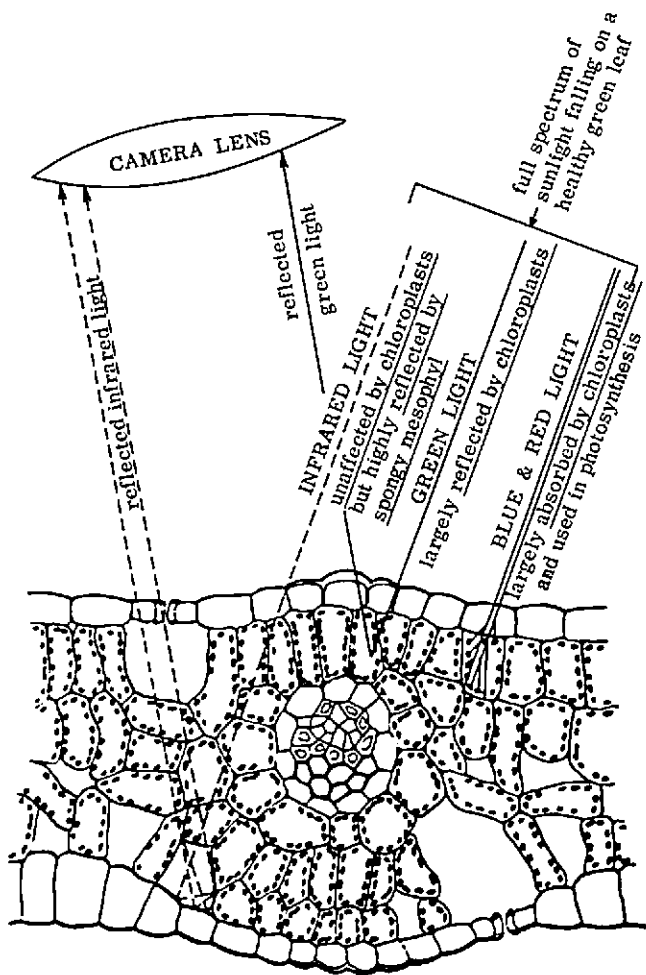
- 1 Aldrich, R. C. and Drooz, A. T. 1967. Estimated fraser fir mortality and balsam woolly aphid infestation trend using aerial color photography. For. Science 13 (3): 300-313.
- 2 Ciesla, W. M., Bell, J. C., Jr., and Curl, J. W., 1967. Color photos and the southern pine beetle. Photogr. Eng., Aug.: 883-888.
- 3 Cochrane, G. Ross, 1968. False color film fails in practise. Photogr. Eng., Nov.: 1142-1146.
- 4 Colwell, Robert N., 1956. Determining the prevalence of certain cereal crop diseases by means of aerial photography. Hilgardia 26 (5): 223-286.
- 5 Colwell, Robert N., 1969. Analysis of remote sensing data for evaluating forest and range resources. School of Forestry and Conservation, Univ. of California, Annual Progr. Rep., 30 Sept.: p. 207.
- 6 Croxton, Ralph, J., 1966. Detection and classification of ash dieback on large-scale color aerial photographs. U.S. Forest Service Res. Pap. PSW-35 : p. 13.
- 7 Fritz, Norman L., 1967. Optimum methods for using infrared-sensitive color films. Photogr. Eng., 33 (10): 1128-1138.

- 8 Gates, David, M., 1970. Physical and physiological properties of plants. Remote Sensing, Comm. on Remote Sensing for agric. purposes, Agric. Board, Nat. Res. Council, USA, Stand. Book nr. 309-01723-8: 224-252.
- 9 Heller, R. C., Aldrich, R. C., Mc-Cambridge, W. F., Weber, F. P., Wert, S. L., 1968, 1969. The use of multi-spectral sensing techniques to detect ponderosa pine trees under stress from insect or pathogenic organisms. Pac. Southw. For. and Range Exp. Stat., For. Serv., US Dept. of Agr. Annual Progr. Rep., 30 Sept.: resp. p. 44 and p 58.
- 10 Heller, Robert C., 1970. Imaging with photographic sensors. Remote Sensing, Comm. on Remote Sensing for agric. purposes, Agric. Board, National Res. Council USA, Stand. Book nr. 309-01723-8: p. 35-72.
- 11 Hoffer, R. M. and Johannsen, C. J., 1969. Ecological potentials in spectral signature analysis. Remote Sensing in Ecology, nr. 1: 1-16.
- 12 Knipling, E. B., 1967. Physical and physiological basis for differences in reflectance of healthy and diseased plants. Proc. Workshop on Infrared Col. Photography in Plant Sciences, Fla. Dept. Agr.: Div. Plant Industry, Winter Haven, Florida.
- 13 Meyer, M. P., French, D. W., 1967. Tree disease detection. Presented paper at Photo Interpretation Session of Ann. Meeting of the Am. Soc. of Photogr., March: 1-7.
- 14 Murtha, Peter, Alexander, 1968. Near-infrared detection of simulated animal damage on conifers. Cornell University, Thesis, June: p. 85.
- 15 Murtha, P. A., Kippen, F. W., 1969. Fomes annosus infections. Centers are revealed on false color aerial photographs. Bi-monthly research notes: Dept. of Fisheries and Forestry, Ottawa, 25 (2): 15-16.
- 16 Olson, Charles E., Jr., Ward, J. M., 1968, 1969. Remote Sensing of changes in morphology and physiology of trees under stress. School of Nat. Res. Univ. of Michigan. Ann. Progr. Rep., 30 Sept.: resp. p. 35 and p. 43.
- 17 Pollanschütz, Josef, 1968. Erste Ergebnisse über die Verwendung eines Infrarot-Farbfilmes in Österreich für die Zwecke der Rauchschaadenfeststellung. Centrallbl.ges. Forstw., 85 (2): 65-79.
- 18 Slaney, V. R., Gross, H. and Morley, L. W. 1967. Airborne infrared scanning survey along the shorelines of the lower great lakes. Proceedings - 2nd Seminar on Airphoto interpretation in the development of Canada, Ottawa, March 13: 76-86.
- 19 Smit, Y. W., 1968. Tactische luchtverkenning door middel van infraroodstraling. De Militaire Spectator, 137 (6): 285-297.
- 20 Stellingwerf, D. A., 1969. Kodak Ektachrome Infrared Aero film for forestry purposes. ITC Publication, Serie B, nr. 54: p. 17.
- 21 Wear, J. F., Pope, R. B. and Orr, P. W., 1966. Aerial photographic techniques for estimating damage by insects in Western Forests. Pac. Northw. For. and Range Exp. Stat. US Dept. of Agric. For. Serv., 79 p.
- 22 Wear, John F., 1967, 1968. The development of spectro-signature indicators of root disease on large forest areas. Pacif. Southw. For. and Range Exp. Stat., US Dept. of Agric., Am. Progr. Rep., 30 Sept.: resp. p. 22 and p. 27.
- 23 Wear, John F., Weber, F. P., 1969. The development of spectro signature indicators of root disease impacts on forest stands. Pac. Southw. For. and Range Exp. Stat., For. Serv., US Dept. of Agr., Annual Rep., 30 Sept.: p. 58.
- 24 Wolff, G., 1967. Aerial photography in the assessment of fertilizing results in forestry and in detecting diseases of trees. Agricultural Aviation. Intern. Agric. Aviat. Centre, The Hague, 9 (4): 114-122.
- 25 Wolff, G., 1970. Luftbilder zum Nachweis forstlicher Düngungsmassnahmen. Beiträge für die Forstwirtschaft: Komplexe Nutzung moderner Luftbilder in der Forstwirtschaft der DDR. Heft III/1970 4 Jg.: 10.

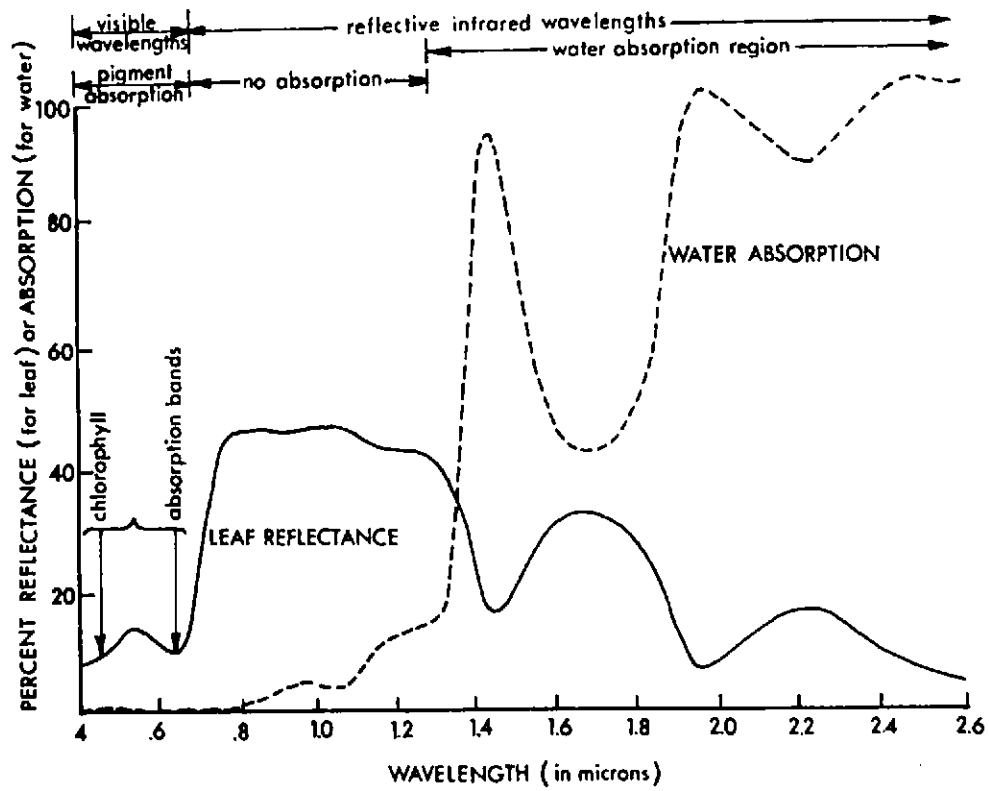
Tabel 1 Vergelijking van normale kleurenfilm (N.K. film) met Kodak Ektachrome Infrared (E.I. film).

	1	2	3	
Spektraal gebied	blauw	groen	rood	infrarood
Gevoeligheid N.K. film	blauw	groen	rood	
Kleur van kleurstofflagen	geel	magenta (= blauwrood)	cyaan (= blauwgroen)	
Resulterende kleur in foto	blauw	groen	rood	
Gevoeligheid E.I. film	blauw	groen	rood	infrarood
idem met geel filter		groen	rood	infrarood
Kleur van kleurstofflagen		geel	magenta (= blauwrood)	cyaan (blauwgroen)
Resulterende kleur in foto		blauw 2	groen 3	rood 1

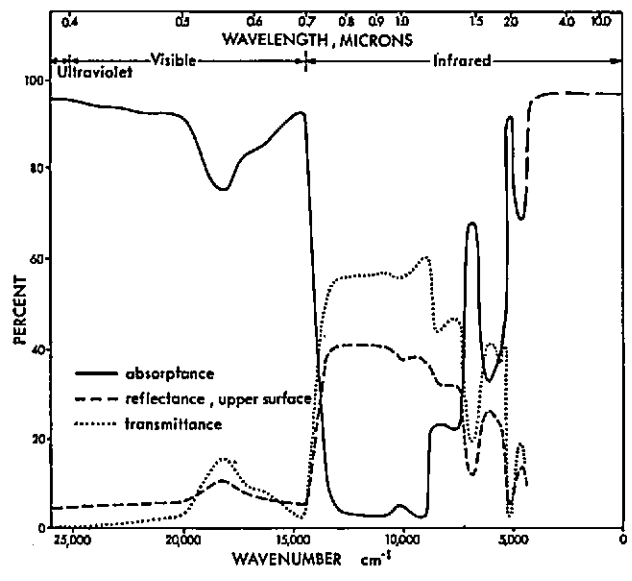
De cijfers 1, 2 en 3 geven respectievelijk de bovenste, middelste en onderste laag van de films aan (Zie Fritz 1967).



Figuur 1 Schematische doorsnede van een haverblad (volgens Eames en McDaniels 1947) en de invloed van enkele organen bij de reflectie van de diverse golflengten van het licht naar de camera lens (zie Colwell 1956).

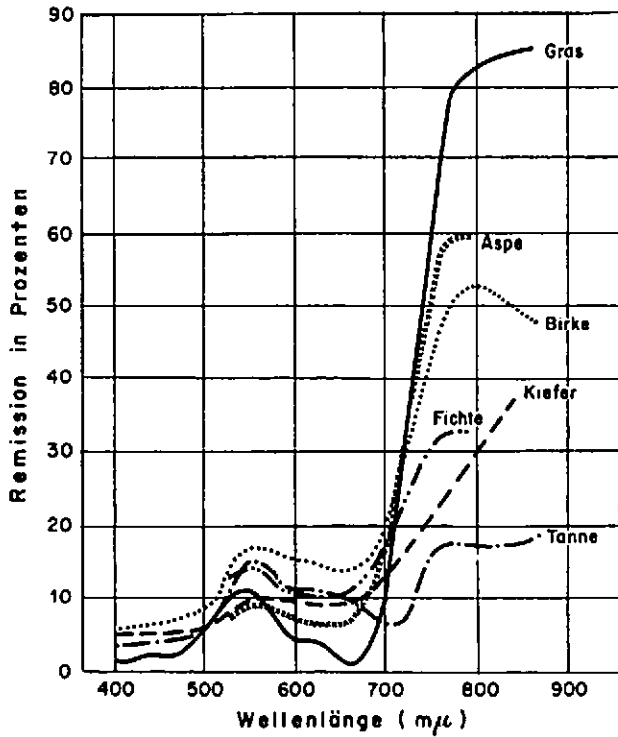


Figuur 2 Betrekking tussen bladreflectie en water-absorptie in het gebied 0,4-2,6  $\mu$  (zie Hoffer and Johansen 1969).

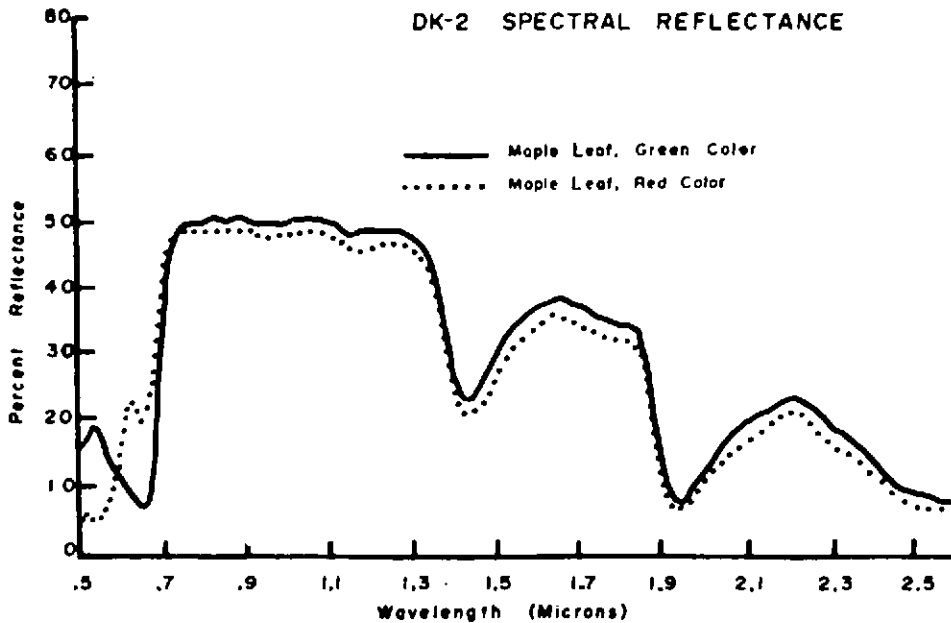


Figuur 3 Spektrale reflectie, transmissie en absorptie voor *Populus deltoides* (zie Gates 1970).

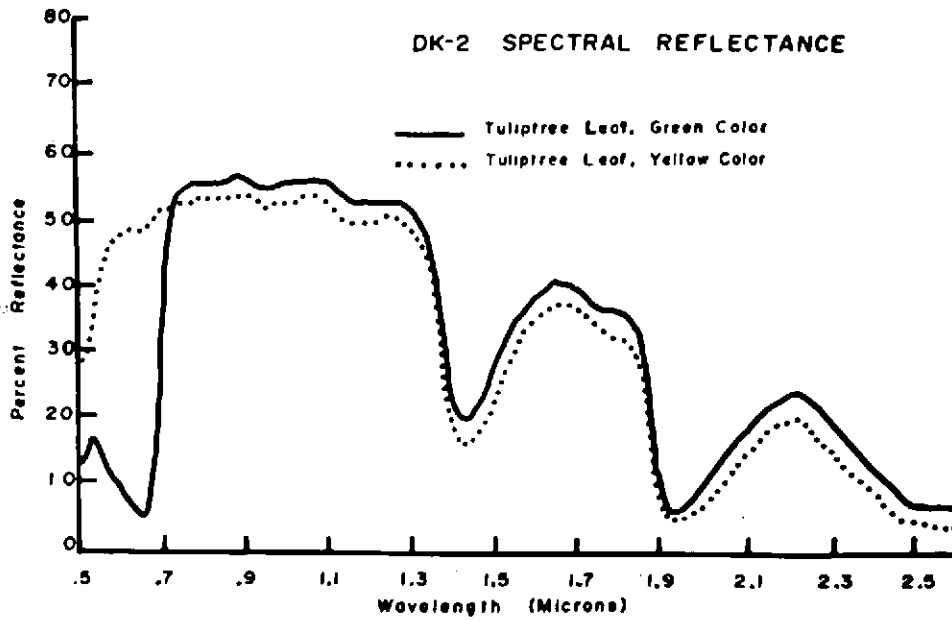




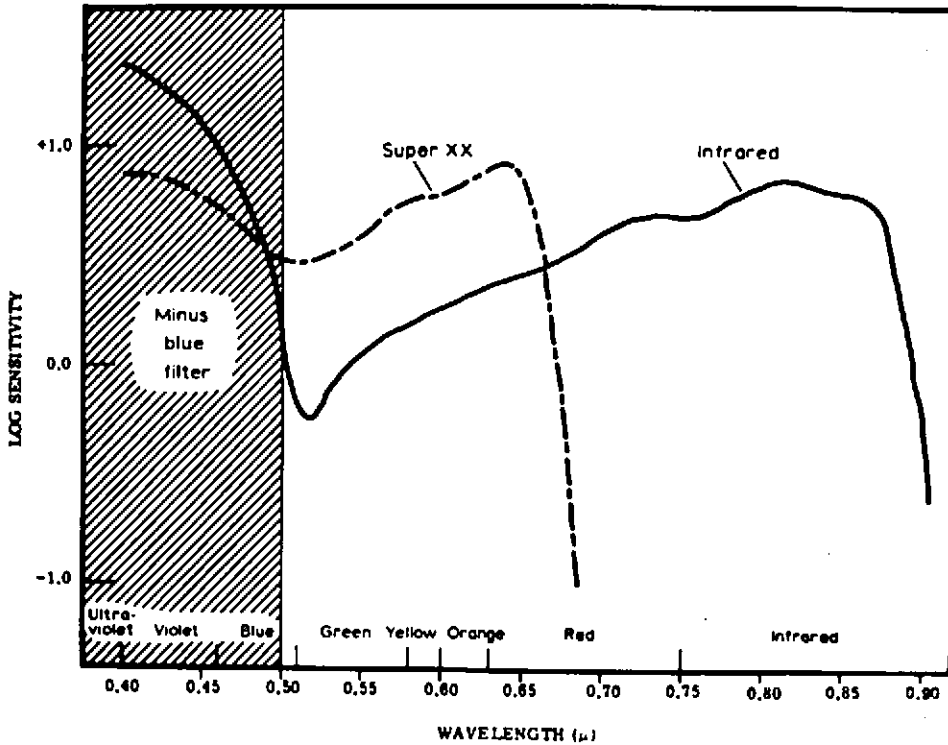
Figuur 4 Reflectiekrommen voor enige houtsoorten en gras (zie Pollanschütz 1968).



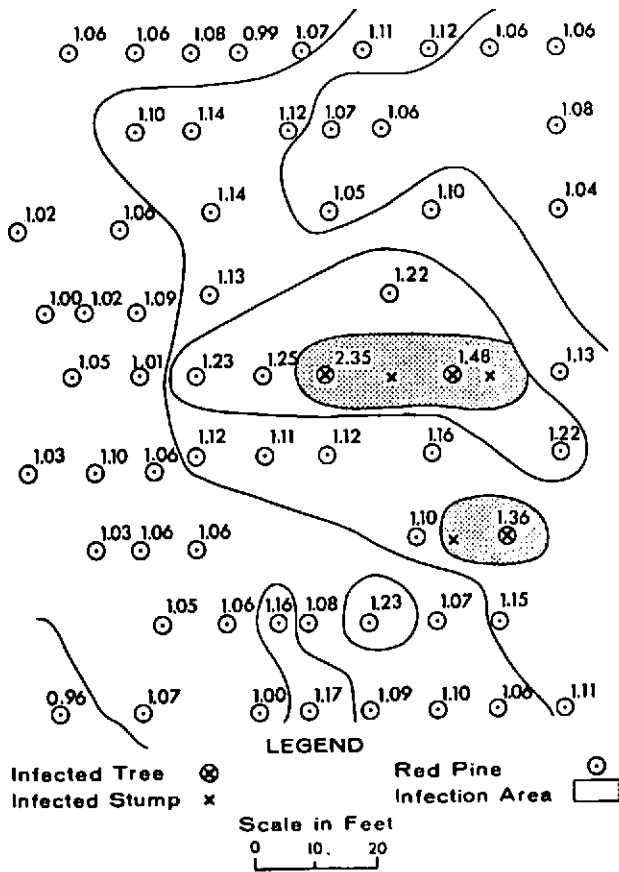
Figuur 5 Spectrale reflectielijnen voor een groen en een rood blad van *Acer saccharinum* (zie Hoffer and Johannsen 1969).



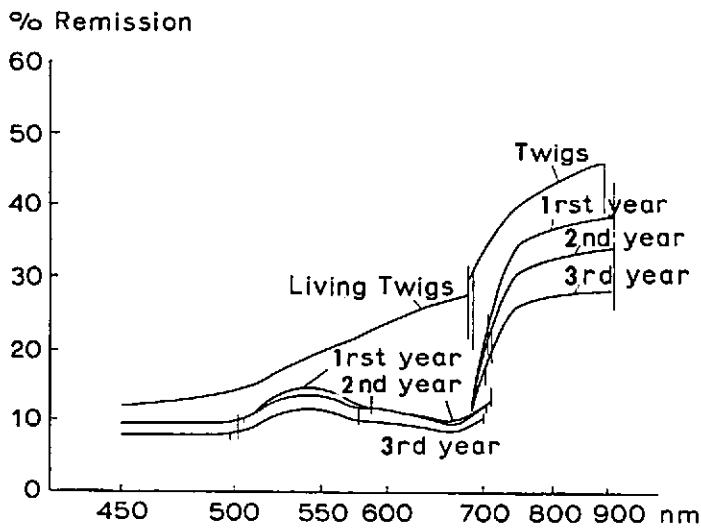
Figuur 6 Spectrale reflectielijnen van een groen en een geel blad van *Liriodendron tulipifera* (zie Hoffer and Johannsen 1969).



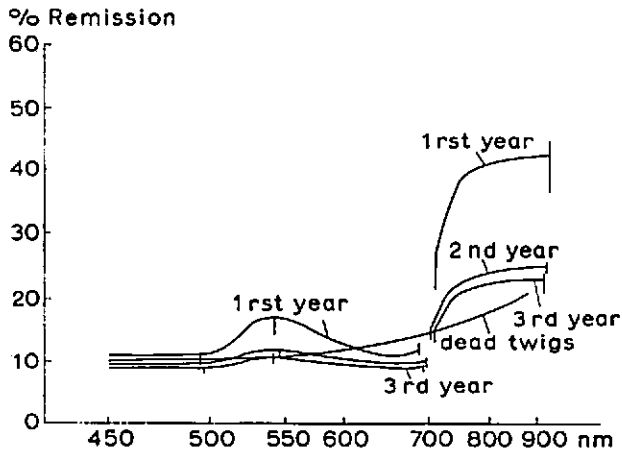
Figuur 7 Spectrale gevoeligheid van Kodak Infrared Aero graphic film (type 5424) en Kodak Super XX Aero graphic film (type 5425) bij verschillende golflengten. Het gebruik van een geel (= minus-blue) filter beperkt de gevoeligheid van de films van 0,5 tot 0,9 resp. tot 0,7 (zie Heller 1970).



Figuur 8 *Fomes annosus* infectiehaarden in een *Pinus resinosa* ("red pine") aanplanting. De getallen geven een gemiddelde van vijf optische densiteitswaarden van een red pine zoals afgebeeld op een E.I. film. Binnen de lijnen bevinden zich bomen met ongeveer dezelfde densiteitswaarden die een aanduiding zijn van de mate van aantasting (zie Murtha and Kippen 1969).



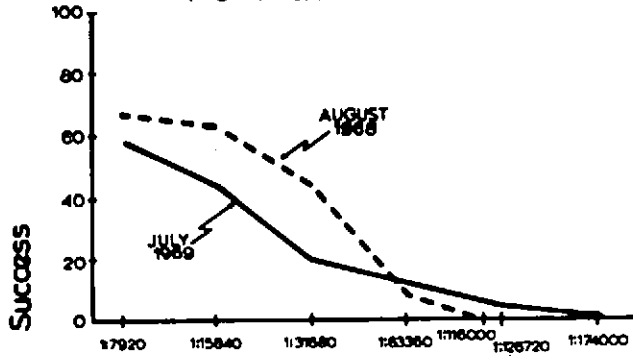
Figuur 9 Reflectiewaarden van naalden en twijgen van gezonde fijnsparren (zie Wolff 1967).



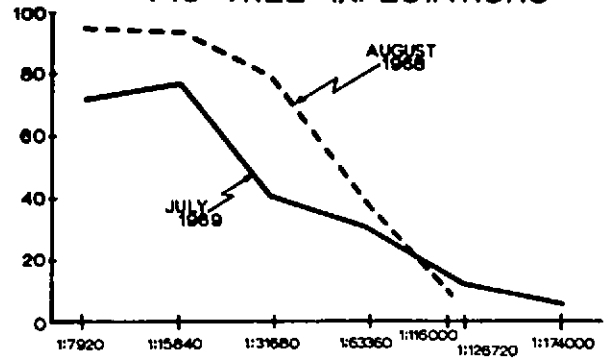
Figuur 10 Reflectiewaarden van naalden en dode twijgen van fijnspar aangetast door industriegas. Speciaal de 2e en 3e jaars naalden en de dode twijgen vertonen een sterke daling van de reflectiewaarden in het nabije infrarood (zie Wolff 1967).

**ANSCOCHROME D-200**

**1-3 TREE INFESTATIONS**

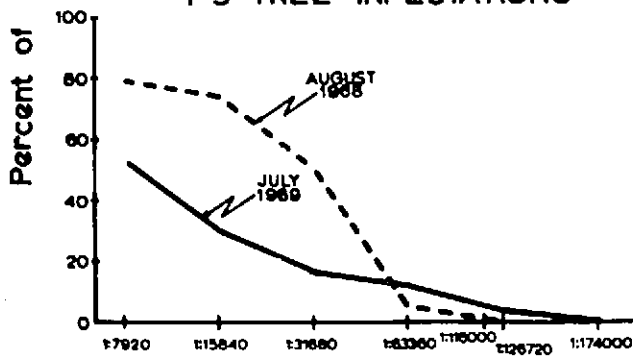


**4-10 TREE INFESTATIONS**

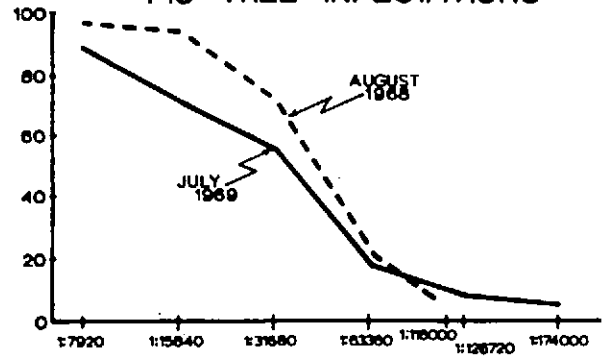


**EKTACHROME INFRARED**

**1-3 TREE INFESTATIONS**



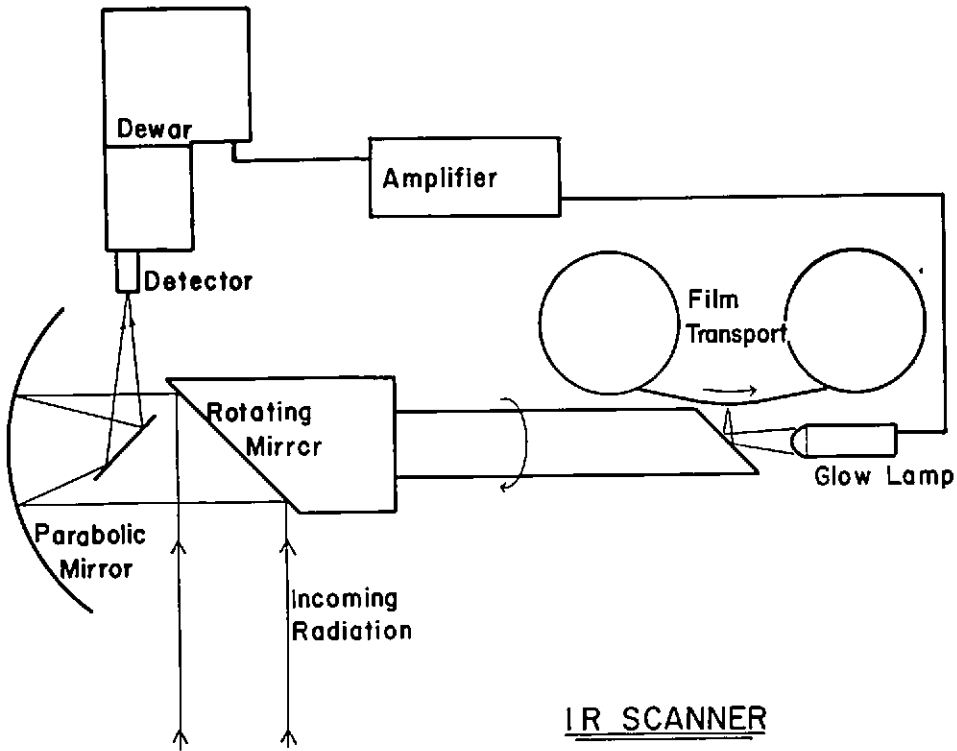
**4-10 TREE INFESTATIONS**



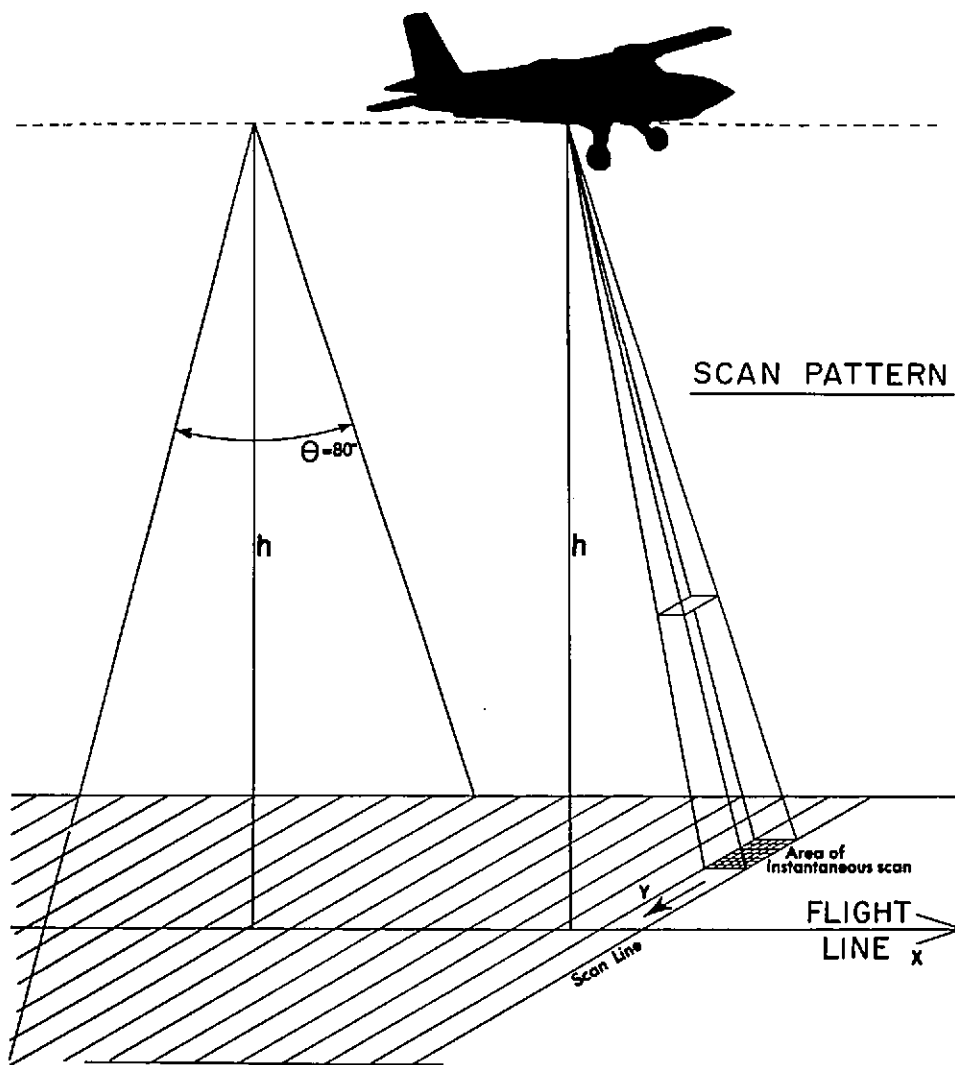
**Photographic Scale**

Figuur 11 Een vergelijking tussen in 1968 en 1969 verkregen succes in detectie van door *Dendroctonus ponderosae* aangetaste Pinus ponderosa in groepen van 1-3 en 4-10 bomen. De resultaten zijn gemiddelden van resp. 3 en 2 waarnemers. De gegevens zijn uitgedrukt als percentages

van het totaal aantal aanwezige aantastingen. De twee bovenste figuren zijn de resultaten verkregen met N.K. luchtfoto's en de onderste met E.I. luchtfoto's (Zie Heller, Aldrich, Cambridge, Weber, Wert 1968).



Figuur 12 Schematische voorstelling van een thermische infrarood scanner (zie Slaney, Gross and Morley 1967).



Figuur 13. Aftast (scan) patroon van een in een vliegtuig geplaatste thermische infrarood scanner (zie Slaney, Gross and Morley 1967).