

Remote sensing methoden voor het beoordelen van de gezondheidstoestand van vegetaties

**(Remote sensing methods to determine the vitality of
vegetation)**

B. van de Lustgraaf



Pudoc Wageningen 1984

Inhoud

Woord vooraf	6
1 Inleiding	9
2 Fotografische technieken	11
2.1 Toepassingen	11
2.2 Fotografische apparatuur	13
2.2.1 Camera's	13
2.2.2 Films	15
2.2.3 Filters	15
2.2 Camera's, films en filters	13
2.3 Vliegtuig, helikopter of satelliet	16
2.4 Navigatiegegevens en vluchtdatum	17
2.5 Opnameschaal	19
2.6 Beeldinterpretatie	21
2.6.1 Apparatuur	21
2.6.2 Calibratie	22
2.6.3 Methoden	24
2.7 Resultaten	28
2.7.1 Bossen	28
2.7.2 Straatbomen	29
2.7.3 Landbouwkundige gewassen	30
2.8 Evaluatie en conclusie	31
3 Overige technieken	35
3.1 Multispectrale scanning	35
3.2 Spectroradiometer	37
3.3 Evaluatie en conclusie	38
4 Stand van zaken in de diverse landen	41
5 Kosten en baten	45
6 Aanbevelingen	47
Samenvatting	50
Summary	51
7 Literatuur	52
Appendix	58

Woord vooraf

Dit literatuuroverzicht kwam tot stand als resultaat van een opdracht van de afdeling Fytotoxicologie van de Luchtverontreiniging, Instituut voor Plantenziektenkundig Onderzoek te Wageningen.

Centraal stond de doelstelling literatuur te verzamelen over het detecteren en evalueren van luchtverontreinigingsschade aan planten met behulp van remote sensing technieken. Indien literatuur over andere schadeorzaken (ziekten, plagen, droogte, verkeersoverlast) of over veelbelovende technieken (spectroradiometer) betekenis had voor dit project, werden deze gegevens ook opgenomen. Er bestond geen afbakening op taalgebied: enkele Zweedse en Japanse publikaties zijn speciaal voor dit project vertaald.

Veel artikelen en rapporten bleken niet ter inzage in de Nederlandse bibliotheken. Door auteurs aan te schrijven en het inschakelen van buitenlandse documentveranschaffingsdiensten kon desondanks veel literatuur achterhaald worden.

Het was niet mogelijk om de na 15 oktober 1983 binnenkomende literatuur in te voegen.

Er is getracht om het gebruik van vakjargon tot een minimum te beperken. Sommige (meestal) Engelse termen zijn onvertaald gelaten, omdat geen gangbaar Nederlands equivalent opgespoord kon worden. De stijl en terminologie van het rapport veronderstellen een zekere deskundigheid op het gebied van remote sensing bij de lezer. Er is bijvoorbeeld geen verklarende woordenlijst toegevoegd. Een bruikbare lijst treft u aan bij Bouwmans (1982).

Bijna alle auteurs verzuimen volledige informatie te geven over de gekozen techniek en methode. Bij de één ontbreken details waar een ander vollediger is. Soms bekwam mij tijdens het beschrijven van deze verzameling literatuur het gevoel met een lappendeken bezig te zijn. Het bij elke auteur aangeven welke essentiële gegevens ontbreken, was een ondoenlijke opgave, het rapport zou te omvangrijk worden. Hopelijk heeft desondanks het aaneenrijgen van details tot een samenhang geleid die de lezer zonder noemenswaardige onderbreking voert naar de gegevens die hem/haar interesseren.

De tekst van deze uitgave is op enkele details na gelijk aan die van het rapport, dat verscheen op 15 oktober 1983. De belangrijkste wijzigingen betreffen het weglaten van 4 appendices over de manier van literatuur opsporen.

Tenslotte ben ik dank verschuldigd aan: G.C. Adriaanse voor het verrichten van administratieve werkzaamheden; drs. R. Belz en drs. T. Brugge voor de hulp bij het vertalen van respectievelijk Japanse en Zweedse artikelen; ir. J.H.D. Brouwer en medewerkers voor de hulp bij het aanvragen van literatuur; I.R.C. Cressie,

A. Elzenga, A.Y. Liem, C.R.W. Welgraven en N. Willijns voor de hulp bij het typen en corrigeren van het rapport; ir. L.J.M. van der Eerden voor het verlenen van deskundige adviezen in alle fasen van dit project.

B. van de Lustgraaf

7 februari 1984

1 Inleiding

"Toen begreep hij, dat de grote geruite doek de plattegrond van Skaane was, waar hij nu over heen vloog. En hij begon te begrijpen waarom die er zo geruit uitzag en zoveel kleuren had. De lichtgroene ruiten herkende hij het eerst, dat waren de roggeakkers, die in het vorige najaar bezaaid waren en onder de sneeuw waren groen gebleven. De geelgrijze waren de stoppelvelden, waar de vorige zomer koren gestaan had, de bruinachtige waren oude klavervelden en de zwarte waren lege weilanden of opgehoogde tuinbedden. De ruiten, die bruin waren met gele randen, waren zeker beukenbossen, want daartussen staan de grote bomen, die midden in 't bos groeien, kaal in de winter, maar de kleine beukjes aan de rand van het bos behouden hun dorre gele blaadjes tot aan 't voorjaar. Daar waren ook donkere ruiten met grijs in het midden: dat waren de grote hoeven in het vierkant gebouwd, met de zwart geworden strodaken en de stenen plaatsjes in 't midden. En dan waren er ruiten, groen in 't midden en met bruin omzoomd: dat waren de tuinen, waar 't gras al begon groen te worden, terwijl de struiken en bomen er om heen nog naakt in hun bast stonden.

*De jongen kon niet laten te lachen, toen hij zag, hoe alles geruit was."
(Selma Lagerlöf. Niels Holgerssons wonderbare reis. Becht, Amsterdam)*

*"It is not too difficult to separate the wheat from the chaff in remote sensing literature - and there is a lot of chaff filtering in, unfortunately."
(Heller, 1978)*

*"One final note is to encourage literature searches and/or use a bibliography such as that by Henninger and Hildebrandt (1980), as they can be of tremendous value in the preparatory stages of a project when developing methodology."
(Hall, 1981)*

Ongetwijfeld was Niels Holgersson één van de eerste personen die zich bezig hield met wat later remote sensing genoemd zou worden: het "van afstand waarnemen" van het aardoppervlak. Hij bestudeerde, gezeten op een rondtrekkende gans, het Zweedse landschap, onderscheidde bossen, weiden en akkers en merkte de invloed van het seizoen op.

Uit deze passage van "Niels Holgerssons wonderbare reis" laten zich onmiddellijk enkele voordelen van luchtanalyse afleiden. Luchtanalyse geeft snel en overzichtelijk een indruk van het landschap, het aantal planten (bomen) en eventuele beschadigingen. Gegevens kunnen op één dag met weinig personeel verzameld worden. Gegevens, die in foto's of computergeheugens vastgelegd zijn, hebben documentaire waarde en kunnen voor meerdere doeleinden gebruikt worden. Er zijn geen problemen om privé-terreinen te analyseren.

Maar zo eenvoudig als het er in het sprookje van Selma Lagerlöf toegaat, is de werkelijkheid niet. Daarvan getuigen talloze buitenlandse publikaties, en nu ook enkele Nederlandse. Bouwmans (1982) bijvoorbeeld geeft een overzicht van de ter beschikking staande technieken, de toepassingsmogelijkheden en organisaties, die zich in Nederland met remote sensing bezighouden. Herinckx (1983) en Eikenaar &

Loedeman (1983a, b) laten enkele moeilijkheden zien, welke zich in de praktijk voordoen.

Remote sensing technieken leveren spectrale informatie op van het bestudeerde object, bijvoorbeeld een vegetatie. Elke plant heeft een eigen "spectrale signatuur", dat is een specifiek patroon van teruggekaatste elektromagnetische straling. Het patroon van de teruggekaatste straling ontleent zijn specificiteit aan de soort, groeifase en gezondheidstoestand van de plant.

Toepassingen van remote sensing berusten op de hypothese dat er een verband bestaat tussen de spectrale signatuur en bijvoorbeeld de vitaliteit van de vegetatie.

De literatuurstudie van Puritch (1981) toont aan dat er geen unieke spectrale indicator van stress bij planten is. De meeste remote sensing toepassingen hebben betrekking op een klein deel van het elektromagnetisch spectrum: zichtbaar, nabij-infrarood en thermisch infrarood. Het thermische infrarood gebied is vooral belangrijk om stress ten gevolge van watertekort te selecteren en wordt ook wel onderzocht om gewasopbrengst te bepalen. Het zichtbare en nabij-infrarood gedeelte van het spectrum is gebruikt om stress ten gevolge van de overige biotische en abiotische factoren te bepalen. Het overige deel van het spectrum, bijvoorbeeld het UV gebied en de langere golflengten, is niet onderzocht. Fundamenteel onderzoek naar het spectrale gedrag van gezonde vegetatie is nog in een beginstadium (Reichert et al., 1980).

Dit rapport geeft een overzicht van het remote sensing onderzoek ter vaststelling van de gezondheidstoestand van vegetaties. Nadruk valt hierbij op luchtverontreiniging als schadeoorzaak, op technische en methodische details, en op zich manifesterende foutenbronnen en valkuilen. Een eerste opgave is het uitzeven van de kwalitatief goede onderzoeken. Er steekt, zoals Heller (1978) het uitdrukt, veel kaf onder het koren. Dit literatuuronderzoek beoogt geen volledigheid, het is een wegwijzer langs bruikbare gegevens en publikaties, een instrument om het opzetten van een experimenteel programma te ondersteunen. Voor een compleet beeld van de verschenen literatuur is er de uitgebreide bibliografie (806 titels) van Henninger & Hildebrandt (1980), die zich ten doel stellen om alle literatuur over de analyse van vegetatieschade met behulp van remote sensing te verzamelen.

2 Fotografische technieken

Luchtfotografie werd al in de vijftiger jaren (met kleurenfilm) en zestiger jaren (met kleureninfrarood film) in de Verenigde Staten toegepast om vegetatieschade ten gevolge van luchtverontreiniging te analyseren (zie bijv. Wert, 1969, Zeale et al. 1971). Sindsdien heeft deze techniek over de gehele wereld navolging gevonden. Een variant op de luchtfotografie is de dichtbij-fotografie (close-up fotografie). Door van korte afstand (1 m) planten uit diverse hoeken te fotograferen verkrijgt men een driedimensionaal beeld van de beschadiging (Lillesand et al., 1976).

2.1 Toepassingen

Tabel 1 geeft een overzicht van de onderzoeksgebieden waarop fotografische technieken zijn toegepast:

- a. *Afbakenen van een aangetast gebied (meestal een door industriële immissie aangetaste bosvegetatie) en vaststellen van de ernst van de aantasting.* Zoals tabel 1 aangeeft zijn meestal naaldbomen als indicator gebruikt. De auteurs volstaan nogal eens met het noemen van niet-botanische namen, zodat onduidelijk is met welke soort zij werkten (bijv. Scotch pine, Fichte). Een nadere omschrijving van de aard van de luchtverontreiniging (componenten, concentraties) ontbreekt vaak.
- b. *Vaststellen van schade aan straat- en parkbomen ten gevolge van vooral verkeersbelasting.* Tabel 1 laat zien dat ook hier vaak de botanische namen ontbreken. Het voorkomen van veel variëteiten of van veel soorten weerhoudt een auteur er soms van om een volledige lijst te publiceren (bijv. Kenneweg, 1980). Voor de interpretatie van luchtfoto's is dergelijke informatie echter zeer belangrijk.
- c. *Proefveldjes met indicatorplanten.* Deze manier om fotografische technieken toe te passen is merkwaardig genoeg weinig gebruikt; slechts Sapp (1978) bediende zich ervan. In een volgende fase van het project richtte Sapp zich meer op de toepassing van de multispectraal scanner en de spectroradiometer (Sapp, 1981a, b).
- d. *Fotograferen van testplanten in het laboratorium.* Ook deze wijze van toepassen is weinig gebruikt. Opvallend is dat twee van de schaarse publikaties, waarin men schade aantoonde alvorens deze zichtbaar werd (pre- of extra visuele schade) afkomstig zijn van onderzoek met luchtverontreiniging als schadelijk agens (Puritch, 1981; Lillesand et al., 1976; Gausman et al., 1978). Sapp had deze techniek ook op zijn programma, maar heeft later nooit resultaten gepubliceerd (Sapp & Jones, 1977).
- e. *Onderzoeken die ten doel hebben om de fotografische techniek en toepassing ervan te perfectioneren.* Deze uiterst belangrijke studies, waarbij de geloofwaardigheid op het spel staat, zijn weinig verricht. In de eerste plaats moeten als

Tabel 1. Door luchtverontreiniging aangetaste vegetaties, die met fotografische technieken bestudeerd zijn.

<u>Vegetatie</u>				
Plantensoort	Standplaats	Bestudeerd oppervlak (in ha)	Luchtverontreiniging	Auteur
Pinus silvestris	bos	43.000	fluoride	Scherrer et al. (1981)
Pinus silvestris	bos	200	"rook"	Tomiczek (1981)
Pinus silvestris	bos	2.200	"rook"	Larcher & Boullard (1981)
Pinus strobus	bos	5	SO ₂	Fritz & Pennypacker (1975)
Pinus ponderosa en P. jeffreyi	bos	100.000	SO ₂	Wert (1969)
Pinus monticola	bos	75.000	fluoride	Carlson (1978)
"den", Ginkgo en "kers"	park	-	SO ₂ ³	Kanagawa prefecture (1975)
"Fichte" ¹	bos	300.000	"rook"	Pollanschutz (1981)
"Fichte"	bos	- ²	"rook"	Kenneweg (1980)
"Fichte"	bos	-	fluoride	Kenneweg (1980)
"Fichte"	bos	-	"rook"	Pelz et al. (1977)
Pseudotsuga menziessii en P. Contorta	bos	75.000	fluoride	Carlson (1978)
Acer sp.	straat	-	verkeersbelasting	Lillesand et al. (1979)
Aesculus hippocastaneum	straat	-	verkeersbelasting	Johansen (1982)
Tilia	straat	-	" + fluoride	Baum (1974)
Quercus ilex	bos	-	-	Yabriki & Aoki (1973)
Fagus sp., Quercus sp., en Betula sp.	bos	1.850	"rook"	Larcher & Boullard (1978)
Acer sp., Populus sp. en Betula sp.	-	150.000	fluoride, zwavel, chloor	Krause et al. (1980)
Acer sp., Aesculus hippocastaneum, Crataegus, Robinia en Tilia	straat	-	verkeersbelasting	Kenneweg (1980)
Grasveld, struiken, en "straatbomen"	straat, park	-	verkeersbelasting	Katzmann (1980)
Sojaboon, tarwe	proefveld	-	SO ₂	Sapp (1978, 1981a, b)
Populus deltoides	laboratorium	-	O ₃ ⁴	Lillesand et al. (1976)
Cucumis melo	laboratorium	-	O ₃ ⁵	Gausman et al. (1978)
<u>Onderzoeken met een methodisch oogmerk</u>				
Pinus silvestris			fluoride	Oester et al. (1981)
Pseudotsuga menziessii (o.a.)			SO ₂	Murtha (1972, 1976, 1978, 1983)
Pseudotsuga menziessii			-	Murtha & McLean (1981)

¹ Vermoedelijk bedoelt men *Picea Abies*

² Ca 1500 opstanden

³ Chronische belasting met 1-2, 2-3, 3-4 of >4ppm

⁴ Begassing 300 ppb per 4 uur

⁵ begassing met 0,18 ppm per 3 uur

gunstige uitzondering Murtha en medewerkers genoemd worden, die aan de hand van luchtfoto's beschadigingen aan vergetaties klasseerden, determinatiesleutels opstelden, visuele interpretatie vergeleken met fotometrische interpretatie (zie hoofdstuk "Beeldinterpretatie: methoden") en het gevaar van een te kleine opname-schaal aantoonde. Murtha is een der weinigen die met recht kan verkondigen dat de luchtfotografie nu in een stadium is dat het op routineschaal toegepast kan worden (Murtha, 1981). Ook Pelz et al. (1977) en Oester et al. (1981) onderscheidden zich in dit verband door correlaties te vinden tussen resultaten van veld- en luchtanalyses. Kanagawa prefecture (1975) en Lillesand et al. (1979) slaagden erin om correlaties te vinden tussen terrestrische metingen aan bomen en densitometrische analyse van luchtopnamen.

f. *Oriëntaties op nieuwe technieken.* Hiertoe kunnen we rekenen het onderzoeken van de mogelijkheden van luchtfotografie in het algemeen (Baum, 1974; Harney et al., 1973; Van Genderen, 1974; Radström, 1979; Krause et al., 1980 etc.), van satellieten (Murtha, 1973; Fritz & Pennypacker, 1975) en van beeldverwerkingstechnieken (Lillesand et al., 1976; Sapp, 1978).

Tabel 1 gaf een indicatie, dat bij veel publikaties belangrijke details ontbreken. In de latere hoofdstukken zal blijken dat dit helaas ook geldt voor gegevens over gekozen materiaal, techniek en methoden.

2.2 Fotografische apparatuur

2.2.1 *Camera's*

Camera's met 35 of 70 mm opnameformaat voldoen, maar voor interpretatiedoeleinden zijn camera's met grotere formaten geschikter, ook indien grootschalige opnamen vereist zijn. Het is van belang om bij een bepaald formaat een lens te kiezen met een niet te kleine brandpuntsafstand. Minimale brandpuntsafstanden zijn vermeld in tabel 2. Voor grootschalige opnamen (1:4000 of groter) is de keuze van een cameraformaat afhankelijk van de traagheid van de lens. Kiest men bijvoorbeeld voor een 230 mm formaat, dan vereist de gedwongen combinatie met een bijvoorbeeld 300 mm lens een belichtingstijd die te lang is om opnamen van geringe hoogte mogelijk te maken. Na enkele jaren experimenteren kwamen Bradshaw & Chandler (1978) uit op het 70 mm systeem, waarvan enkele gegevens in tabel 3 vermeld staan. De in tabel 3 opgegeven camerasystemen zijn nauwkeurig beschreven. Bij andere auteurs ontbreekt elk detail (bijvoorbeeld Pelz et al., 1977; Krause et al., 1980; Katzmann, 1981). In de overige gevallen vermeldt men wel enkele gegevens maar is geen volledigheid nagestreefd.

Tabel 2. Minimale brandpuntsafstand behorend bij camera's met verschillend frame-formaat (naar Jano, 1981).

frame-formaat van de camera (in mm)	minimale brandpuntsafstand (in mm)
35	35
70	61
230	253

Tabel 3. Technische gegevens van enkele nauwkeurig beschreven camerasystemen.*

merknaam van de camera	frame formaat (in mm)	brandpuntsafstand van de lens (in mm)	sluittijd (in sec)	Auteur
Vinten 492 reconnaissance	70	101	1/500	Bradshaw & Chandler (1978)
Vinten 492 reconnaissance	70	76	1/1000	Murtha (1983)
Zeiss RMKA 30/32	230	305	1/400	Murtha (1983)

* Bradshaw & Chandler (1978) gebruikten het camerasysteem voor 1:4000 opnamen, Murtha (1983) voor 1:1000 (70 mm systeem) en 1:4000 (230 mm systeem) opnamen.

Een camerasysteem, waarbij aan beide uiteinden van de vleugels (of aan de uiteinden van een montagebalk aan een helikopter) een camera is bevestigd, biedt veel voordelen ten opzichte van traditionele verticale fotografie met behulp van één camera:

- men kan volstaan met een goedkoop vliegtuig en camerasysteem;
 - er is geen ruimtehoekvertekening. Dit is een groot voordeel als het objectveld gelaagd is, bijvoorbeeld indien zowel de toppen van bomen als de ondergrond bestudeerd moeten worden;
 - het stereobeeld wordt niet vertekend door onregelmatigheden tijdens het vliegen, bijv. scheefvliegen;
 - de fotoschaal kan op eenvoudige wijze vergroot worden door lenzen met een grotere brandpuntsafstand te gebruiken; omdat de ruimtehoek onder controle is, heeft de brandpuntsafstand geen invloed op de mate van vertekening.
- Aangezien er een analogie bestaat tussen plaatsing van de ogen en de plaatsing van camera's aan vleugeluiteinden, heeft stereopaarfotografie veel voordelige eigenschappen gemeen met visuele waarneming. Williams (1978) verdedigt dan ook de

stelling dat de beeldkwaliteit van 30 m hoge bomen gefotografeerd op 300 m hoogte met stereopaar-camera's hetzelfde is als de beeldkwaliteit van een voorwerp op 1,5 m afstand geobserveerd door het menselijk oog. Stereopaarfotografie is in gebruik in Zwitserland (Oester et al., 1981; Scherrer et al., 1981) en Canada (Murtha & McLean, 1981; Murtha, 1983).

2.2.2 Films

Zowel kleuren- als kleureninfrarood films zijn gebruikt om schade aan vegetatie te onderscheiden. Wert (1969) vergeleek diverse films en gaf aan Anscochrome D/200 kleurenfilm de voorkeur. Vergelijkt men echter de resultaten kwantitatief, dan blijkt Ektachrom Infrared film evenwaardig en berustte Wert's voorkeur uitsluitend op de natuurlijke weergave van kleuren op de Anscochrome-film (geen false colour). Murtha (1972) testte films en filters opnieuw uit en vond dat plantbeschadigingen zich beter aftekenen op kleureninfrarood films dan op kleurenfilms. Bovendien zijn kleureninfrarood films gevoelig voor straling, die in staat is door atmosferisch stof, rook en waterdamp heen te dringen. Ook hebben kleureninfrarood films het voordeel pre- (of extra-)visuele schade te kunnen detecteren. Deze eigenschap zou kleureninfrarood films een doorslaggevend voordeel geven omdat ermee schade in een vroeg stadium gesignaleerd kan worden, zodat maatregelen kunnen volgen alvorens de schade visueel wordt. De discussie over de detectie van onzichtbare schade, die waarneembaar zou zijn op kleureninfrarood films, is nog niet afgesloten (Puritch, 1981). Met name in Australië plaatst men vraagtekens, terwijl men bovendien de nadruk legde op de moeilijk af te stellen belichtingsprocedure ter verkrijging van een optimale beeldkwaliteit (Benson & Sims*; Myers & Bird, 1978; Bradshaw & Chandler, 1978). Ondanks deze onzekerheden en moeilijkheden gebruikt nu vrijwel iedereen kleureninfrarood films (Tabel 4). Vrijwel in alle studies koos men films van de firma Kodak, mede door de uitgebreide voorlichting en handleiding (Kodak, 1981, 1982). Overigens verzuimden verschillende auteurs om firmanaam en type van de gebruikte film te geven (Yabriki & Aoki, 1973; Krause et al., 1980; Oester et al., 1981; Scherrer et al., 1981 etc.).

2.2.3 Filters

Jano (1981) adviseert om bij een kleureninfrarood film altijd een antivignetteringsfilter te gebruiken en een blauwfilter. Een didymium filter accentueert groene en rode kleuren en wordt aanbevolen voor kleurenfilms door Wert (1969). Kodak (1981) biedt een rijk assortiment filters aan voor vele doeleinden. Slechts enkele

* jaartal van de publikatie niet bekend

Tabel 4. Films gebruikt ter onderscheiding van beschadigingen aan planten, in het bijzonder veroorzaakt door luchtverontreiniging.

firma	type	auteur
Kodak	Aerochrome Infrared 2443*	Murtha (1983); Murtha & McLean (1981); Sapp (1981b); Lillesand et al. (1979); Johansen (1982); Pollanschütz (1981); Tomiczek (1981); Katzmann (1981); Zirm (1981); Kenneweg (1980); Carlson (1978); Myers & Bird (1978); Gausman et al. (1978)
Kodak	Ektachrome Color 2448	Sapp (1981b); Lillesand et al. (1979, 1976); Bradshaw & Chandler (1978)
Kodak	Ektachrome Infrared 2424	Lillesand et al. (1976); Kanagawa prefecture (1975)
Polaroid	Pola-color type 108	Gausman et al. (1978)
Russische makelij	Spectro-Zonal Infrared film SN-6M	Pelz et al. (1977)

* Komt overeen met Ektachrome Infrared type 8443.

auteurs geven nauwkeurig de gebruikte film/filter-combinatie aan. Zeer recent behaalden Murtha (1983), Murtha & McLean (1981) uitstekende resultaten met Wratten no.12 (minus) blauwfilter en CC 20 M filters.

2.3 Vliegtuig, helikopter of satelliet

Succesvolle remote sensing studies zijn verricht met zowel vliegtuigen als helikopters. Samenwerking met ervaren luchtvaartmaatschappijen is noodzakelijk. Zonder gedetailleerde voorbereiding is de kans op een geslaagde vlucht gering. Herinckx (1983) geeft een opsomming van punten, die een rol spelen bij de voorbereiding. De keuze van het type vliegtuig of helikopter is o.a. afhankelijk van het camera-systeem. De minimale vliegsnelheid mag niet groter zijn dan de sluitertijd en de schaalgrootte toelaten. Bij stereopaarfotografie (zie hoofdstuk "Camera's, films en filters") voldoet een eenvoudig vliegtuig- of helikoptertype. Murtha (1983) gebruikte een Cessna 180 en Lillesand et al. (1979) een Cessna 172 toestel. Deze vliegtuigen hebben hun geschiktheid bewezen. Het aanbod van vliegtuigtypen, waarmee incidenteel ervaring opgedaan is, is groot: 'Pilatus Porter' (Katzmann, 1981), 'Britten Norman Islander BN/2A' (Bradshaw & Chandler, 1978) etc. Er zijn ook onderzoekers die geen vliegtuigtype noemen of die volstaan met het noemen van de luchtvaartmaatschappij die de vluchten uitvoerde.

Helikopters worden ook regelmatig ingezet (bijv. Larcher & Boullard, 1976; Rädstrom, 1979; Sapp, 1981a, b; Oester et al., 1981), maar de namen van de gebruikte typen ontbreken. Een volledige, kritische vergelijking van vliegtuig- en helikopterprestaties ontbreekt in de literatuur.

Satellieten (Erts, Landsat) leveren tot nu toe te kleinschalig opnamemateriaal om abiotische schade te kunnen detecteren (Reichert et al., 1980; Sapp, 1981a, b). Wel gelukte het om met een camera aan boord zeer zware schade in een groot gebied (ca 10 x 10 km) waar te nemen (Murtha, 1973). Satellieten met multispectrale scanners aan boord kunnen zich in de toekomst tot nuttige technieken ontwikkelen indien het spectrale en ruimtelijke scheidend vermogen toeneemt (Jano, 1981; Murtha, 1981; zie hoofdstuk "multispectrale scanning").

2.4 Navigatiegegevens en vluchtdatum

De meest gekozen vluchtrichting is noord-zuid en vice versa: de opnamen ondergaan geen invloed van mee- of tegenlicht (Kenneweg, 1979). Vlieglijnen verlopen evenwijdig aan elkaar met een zijwaartse overlapping variërend van 20% (Bradshaw & Chandler, 1978) tot 90% (Murtha, 1983). De mate van overlapping is o.a. afhankelijk van de schaalgrootte (en dus de vlieghoogte): Murtha (1983) werkte met 90% overlapping ten behoeve van 1:1000 en met 60% ten behoeve van 1:4000 opnamen. Dergelijke vliegschema's bij grootschalige opnamen (1:5000 of groter) laten weinig ruimte over voor navigatiefouten. Om de navigatie te vereenvoudigen ontwikkelden men in Australië het PA-CNAV systeem (Bradshaw & Chandler, 1978).

De gekozen schaalgrootte bepaalt de vlieghoogte. Aangezien het vervloeien van details op transparanten tot verkeerde interpretatie leidt (zie hoofdstuk "opnameschaal"), is het raadzaam om een zo gedetailleerd mogelijk beeld te verkrijgen door beperking van de vlieghoogte. In het oog valt de prestatie van Murtha (1983) die op 76 m hoogte met een Cessna 180 1:1000 opnamen maakte. Met helikopters zijn ook successen bij geringe hoogte behaald: 150 m (t.b.v. 1:2000 opnamen (Oester et al., 1981)).

Het is duidelijk dat satellieten met een vlieghoogte van ca 900 km voorlopig niet de gedetailleerde informatie kunnen verschaffen die laagvliegende vliegtuigen en helikopters kunnen leveren.

De vluchtdatum behoort gekozen te worden in het seizoen waarin de schade aan de plant zich het duidelijkst manifesteert. Is het seizoen optimaal gekozen, dan volgt een nadere vastlegging van de opnamedag. De belangrijkste overweging voor nadere vastlegging is de weerstoestand. Indien men meerdere overwegingen combineert, blijken in West-Europa slechts enkele dagen per jaar (5 à 6 volgens Larcher &

Boullard, 1976) in aanmerking te komen. Gunstig weer houdt in helder en bewolkt (bijv. Bradshaw & Chandler, 1978) of helder en zonnig (bijv. Larcher & Boullard, 1976). Het is mogelijk dat het verschil in voorkeur voor bewolking samenhangt met de keuze van de film: Bradford & Chandler gebruikten kleuren- en Larcher & Boullard kleureninfrarood film. De korte duur van de periode die geschikt is om opnamen te maken en de onvoorspelbaarheid van het tijdstip van optreden zet de tijdsplanning van de vlucht onder zware druk. Toch behoort een luchtvaartmaatschappij alert te kunnen reageren, zodat op zo geschikt mogelijke data gevlogen kan worden (Herinckx, 1983). Een frequentie van één analyse in 5 jaar is voor straatbomen voldoende (Kenneweg, 1980).

Onderzoekers zijn het oneens in welk seizoen schade ten gevolge van luchtverontreiniging het beste beoordeeld kan worden. Larcher & Boullard (1976) pleiten voor einde mei-begin juni. In deze tijd is de fysiologische activiteit van de plant het grootst, dus (volgens de auteurs) ook de infraroodreflectie. Kenneweg (1979) kiest voor een datum in juli-augustus. Hij vindt van betekenis dat in mei-juni de schade (chlorose, necrose) nog onvoldoende tot expressie is gekomen. Na augustus zijn de schadesymptomen slecht te onderscheiden van herfstverkleuringen. Schnopfhagen (1980) heeft voorkeur voor de tweede helft van augustus. Op een vroegere datum is de plantengroei nog niet afgesloten en zijn de kronen "te helder" op de foto's. Wel is fotograferen op een vroeger tijdstip in de zomer gunstiger in verband met de zonnestand en de sterkte van het zonlicht. Volgens Schnopfhagen (1980) is de expressie van immisatiebelasting het grootst na augustus, maar daarentegen is er in het najaar door de lage zonnestand veel hinderlijke schaduwwerking.

Onder Amerikaanse omstandigheden vonden Lillesand et al. (1979) met stadsbomen in juli de hoogste correlatie tussen filmdensiteitsmetingen en terrestrisch bepaalde boomkenmerken ("stress indices"). Ook juni gaf hoge correlaties te zien. In een natter en kouder jaar - 1976 - gaf augustus de hoogste correlaties: de voortdurende aanwas van jong en fris groen maskeerde wekenlang het optreden van schade. Hierdoor waren de correlaties in 1976 in het algemeen lager dan in 1975. Deze resultaten geven aan dat een vluchtdatum niet te lang van tevoren vastgesteld kan worden in verband met onvoorspelbare weersomstandigheden. Soms kan een hele zomer ongeschikt zijn om opnamen te maken, bijvoorbeeld indien andere schade-factoren overheersen (de droogte in West-Europa van 1976 bijvoorbeeld (Kenneweg, 1980)).

Onderzoekers verkiezen op de dag 12.00 (11.00-13.00) als opnametijdstip, omdat de zonnestand en hoeveelheid zonlichtenergie het gunstigst zijn.

Cverigens verstreken veel auteurs geen of summiere gegevens over de vluchtcondities tijdens de opnamen.

2.5 Opnameschaal

Uit een literatuuroverzicht van Murtha (1983) blijkt dat opnamen van zeer uiteenlopende schaal gebruikt zijn om schade aan planten te bestuderen. Hij berekende dat in 55,5% van de onderzoeken een kleine schaal (1:5000 en kleiner) gekozen is om details zoals stress detectie, verlies van blad, bladverkleuring en mortaliteit te onderscheiden. Murtha (1983) voerde een experiment uit, waarbij hij 1:4000 en 1:1000 opnamen van hetzelfde bosgebied tot 1:500 vergrootte en details van de 1:500 vergrotingen vergeleek. Significant toonde hij aan dat 1:4000 opnamen slechts geschikt zijn om dode van levende bomen te onderscheiden. Alle overige, minder in het oog springende symptomen als chlorose, necrose, dichtheid van het bladerdek, alsmede het in het algemeen onderscheiden van beschadigde en onbeschadigde bomen kunnen wel op betrouwbare wijze van 1:1000 maar niet van 1:4000 opnamen afgeleid worden. Indien per boom bij 1:4000 al onaanvaardbaar veel verkeerde interpretaties voorkomen, lijkt het globaal beoordelen van volledige bosopstanden op grond van de vlakkleuring op kleinschalige opnamen (1:8000 à 1:12.000) vrijwel onmogelijk. Schalen van 1:8000 à 1:12.000 zijn bijvoorbeeld in Oostenrijk veel gebruikt (Schnopfhagen, 1980; Zirm, 1981; Pollanschütz, 1981; Tomiczek, 1981). In het tussenliggende gebied 1:4000 à 1:8000 hebben sommigen (Kanagawa prefecture, 1975; Kenneweg, 1980, 1981; Lillesand et al., 1979) studies uitgevoerd op basis van beoordeling van individuele bomen. Ofschoon dit volgens Murtha's resultaten onmogelijk is, kwamen Kanagawa prefecture (1975) en Lillesand et al. (1979) tot significante correlaties tussen terrestrische en remote sensing parameters. Misschien zijn de tegengestelde bevindingen terug te voeren op verschillen in vegetatie waarmee gewerkt is: Kanagawa prefecture (1975) werkte met diverse soorten parkbomen, Lillesand et al. (1979) met straatbomen (Esdoorn) en Murtha (1983) met een bos van Douglas sparren - *Pseudotsuga menziessii*. Myers & Bird (1978) vergeleken vijf schalen: 1:2000, 1:3000, 1:4000 en 1:6000. Zij kozen *Eucalyptus* bomen als indicatorplant en beoordeelden de kruinen op symptomen als bladverkleuring, dichtheid van het bladerdek, dode/levende takken. Bij 1:6000 blijkt de helft van de als ziek beoordeelde bomen gezond te zijn. Bij 1:4000 zijn de resultaten goed (78% goede interpretaties), maar de beoordeling verliep veel moeizamer dan bij grotere schalen. Schaal 1:3000 gaf 81% en schaal 1:2000 79% goede interpretaties. Myers & Bird (1978) concludeerden hieruit dat 1:2000 groter is dan noodzakelijk en dat voor hun doeleinden 1:3000 voldoet.

Tabel 5. Betrouwbare opnameschalen gebruikt voor waarneming van de schade* ten gevolge van luchtverontreiniging aan afzonderlijke planten.

schaalgrootte	vegetatie	auteur
1:750	vrnl. naaldbos	Larcher & Boullard (1976)
1:1000	naaldbos	Murtha (1983)
1:1200	naaldbos	Murtha & McLean (1981)
1:1584	naaldbos	Wert (1969)
1:2000	naaldbos	Oester et al. (1981)
1:2500	straatbomen	Johansen (1982)
1:3200	naaldbos	Pelz et al. (1977)
1:5000	parkbomen	Kanagawa prefecture (1975)
1:5000 à 8000	naaldbos, loofbos, straatbomen	Kenneweg (1980, 1981)
1:6000	straatbomen	Lillesand et al. (1979)

* exclusief mortaliteit. Mortaliteit is als schadeparameter slechts betrouwbaar in uitgestrekte bossen met een verwaarloosbaar onderhoud.

Tabel 5 geeft een selectie van gebruikte schalen. Uitgesloten zijn onderzoeken, waarbij een zodanig kleine schaal gebruikt is, dat een correcte beoordeling van een boom of bosopstand onmogelijk geacht mag worden. Als richtlijn gelden hierbij de bovenvermelde bevindingen van Myers & Bird (1978) en Murtha (1983). In Oostenrijk, waar men veel met schalen van 1:8000 en kleiner werkte om schade aan straatbomen en naaldbossen te bepalen, bekende Pollanschütz (1981) dat bij dergelijke schalen de interpretaties alleen gelukten indien de beoordelaars een zekere "flexibiliteit" in acht namen en een sterk beroep deden op terrestrische verificaties. Er kwam dus veel giswerk voor, de analyse kon niet tot in detail kwantitatief doorgevoerd worden. De geloofwaardigheid van de resultaten hangt in zulke gevallen af van de reputatie van de onderzoeker ("expert judgement"). Uiteraard zijn ook de publikaties uitgesloten van tabel 5, die in het geheel geen schaal vermelden. Tabel 5 is niet nader opgesplitst naar te onderscheiden schadeklassen (zie hoofdstuk "Beeldinterpretatie: methoden"). Het spreekt echter vanzelf dat de interpretatie van boomschade op grond van een beoordeling per blad of per jaargang naalden (Oester et al., 1981; Murtha & McLean, 1981; Murtha, 1983) een veel grotere schaal behoeft dan de interpretatie van boomschade op grond van globale schadeklassen als gezond/enigszins aangetast/zwaar aangetast/stervend of dood (Kenneweg, 1980, 1981). Naarmate de schaal van de opname groter is vermindert niet alleen het aantal foutieve interpretaties, maar ook de hoeveelheid tijd die nodig is voor terrestrische observaties ter ondersteuning van de luchtanalyse. Wellicht verdient daarom de conclusie van Murtha (1981) de grootste steun om nagevolgd te worden: bij 1:1200 zijn alle onderdelen van het schadebeeld zichtbaar, bij 1:4000

verdwijnt de zichtbaarheid van belangrijke details zoals chlorose, necrose van individuele bladeren en beschadigingen aan de toppen van kleine takken, bij 1:2000 is het scheidend vermogen van de kleureninfrarood film nog juist voldoende (geen risico's door samenklontering van details in de magenta filmlaag). De schaalgrootte van satellietbeelden tenslotte varieert van 1:25.000 tot 1:1.000.000; dat is voorlopig te klein om te benutten voor de detectie van luchtverontreinigingsschade (Murtha, 1981).

2.6 Beeldinterpretatie

2.6.1 Apparatuur

Een stereoscoop is onmisbaar bij visuele beoordeling van fototransparanten. Zakstereoscopen, die ca 2x vergroten, zijn veel in gebruik. Ook binoculaire stereoscopen met ca 8x vergroting bewijzen belangrijke diensten. Twee recentelijk gebruikte typen zijn: Wild ST4 (Oester et al., 1981; Tomiczek, 1981) en Bausch & Lomb Zoom 240 (Lillesand et al., 1979; Murtha, 1983).

De autograaf, die Oester et al. (1981) gebruikten (een Wild B8 "stereoplotter") en het "return beam vidicon systeem" van Murtha & McLean (1981) kunnen behulpzaam zijn bij het vanuit de lucht opzoeken van details in het veld.

Met densitometers is een objectieve spectrale meting uit te voeren aan transparanten, zodat bijvoorbeeld opnamen uit verschillende jaren vergeleken kunnen worden. Evenals bij visuele beeldinterpretatie kunnen transparantdetails vergroot worden met het stereoscoop. Calspan Corporation ontwierp een zgn. microdensitometer bestaande uit een doorzichtigtafel, stereoscoop en een densitometer (Lillesand et al., 1979; Lillesand et al., 1981; Lillesand & Meisner, 1982). In gebruik zijnde densitometers zijn: MacBeth TR504 (Lillesand et al., 1979; Debrock & Verduyn, 1980; Johansen, 1982) en MacBeth TR524 (Murtha & McLean, 1981). Het nadeel van conventionele densitometers is het geringe scheidend vermogen: Johansen (1982) berekende dat bij 1:2500 opnamen een densitometeropening van 0,5 mm doorsnede overeenkomt met een aardoppervlak van 1,2 m doorsnede. Achtergrondkleuren en schaduwvlakken aan de rand van het te meten object (de boomkruin meestal) beïnvloeden de meting. Om de grote spreiding en geringe nauwkeurigheid van het meetresultaat te verminderen, ontwierpen Debrock & Verduyn (1980) een aanpassing, waarbij de meting niet direct plaatsvindt op de emulsielagen van de film, maar op een geprojecteerd en daardoor vergroot beeld. Het is nu mogelijk om een groter gebied van het object te bestuderen,

zodat in sommige gevallen zelfs met kleinschaliger foto's volstaan kan worden. Debrock & Verduyn berekenden dat door deze aanpassing de nauwkeurigheid van de meting toenam van 10-15% tot 5%.

Met beeldverwerkingstechnieken (image enhancement) kunnen spectrale data (verkregen met fotografische technieken of multispectrale scanning) in een zichtbare vorm op beeldscherm of kaartafdruk weergegeven worden. Lillesand et al. (1976) gebruikten een "image analyzer" van Interpretation Systems Incorporated in combinatie met een densitometer. Lillesand en medewerkers (Lillesand et al., 1981; Lillesand & Meisner, 1982) geven enkele voorbeelden van succesvolle toepassing van dergelijke apparatuur. Sapp (1981a, b) visualiseerde multispectrale scanning beelden met behulp van het "I2S image processing" systeem en "density slicing". Meer toepassingen van beeldverwerkingstechnieken om luchtverontreinigingsschade aan planten zichtbaar te maken zijn niet uit deze literatuurstudie naar voren gekomen. Murtha (1981) merkte op dat er wel enige toepassing is om schade ten gevolge van plagen te analyseren, maar noemde geen voorbeelden.

2.6.2 Calibratie

Aangezien kleurverschillen op de film ten gevolge van vitaliteitsverschillen tussen planten relatief klein zijn ten opzichte van kleurverschillen ten gevolge van andere factoren (zonnestand, bewolkingsgraad, atmosferische condities, mate van bestoffing van het blad, positie van de boom op de foto, filmeigenschappen en het verloop van het ontwikkelproces) heeft vergelijking van foto's van verschillende datum geen zin zonder correcties aan te brengen (Sapp, 1981a, b; Eikenaar & Loedeman, 1983a). Wel is enige vergelijking mogelijk door per opnamedatum een indeling in schadeklassen op te stellen (zie hoofdstuk "Beeldinterpretatie: methoden"). Er zijn niet veel onderzoekers die vermelden dat zij correctie (calibratie)maatregelen namen. Baum (1974) komt er eerlijk voor uit: hij vindt calibrering een te ingewikkeld proces, waarbij veel apparatuur nodig is en liet het daarom achterwege. Johansen (1982) had transparanten van zulke wisselende kwaliteit tot zijn beschikking, dat hij nauwelijks in staat was om beschadigde van onbeschadigde kastanjebomen te onderscheiden. Voldoende reden voor Johansen (1982) om een pleidooi te houden voor de noodzaak van calibratie. Hij onderscheidt 3 aspecten waarvoor gecorrigeerd moet worden:

- a. variaties in kleurdekking ten gevolge van verschillen in filmgevoeligheid en in het ontwikkelproces,
- b. variaties in kleurdekking ten gevolge van verschillen in atmosferische omstandigheden en hoeveelheid zonnestraling,

c. camera- en filtereigenschappen.

Terwijl Johansen (1982) ingaat op de theoretische aspecten van calibratie, geven de Kodak-publikaties (1981, 1982) gedetailleerd verslag van de praktische uitvoering van calibratieprocedures.

Tot de onderzoekers die wel calibratiemaatregelen namen, behoort Sapp (1981a, b). Sapp gebruikte de "scene color standard technique" om de kleurdekking op de foto's te corrigeren. Voordeel van de scs-techniek is dat alle gegevens die nodig zijn voor calibratie, op de foto aanwezig zijn. De procedure bestaat uit de volgende onderdelen:

a. metingen van asfaltoppervlakken en kale grond,

b. ontwikkelen van een sensitometrische strip (een soort grijstrap) met behulp van een gecalibreerde lichtbron,

c. vaststellen van een ontwikkelcurve (DlogE) per filmlaag.

Indien deze stappen voltooid zijn, is men in staat om de gemeten fotodensiteiten (D) te corrigeren en daarna om te zetten in een maat voor de hoeveelheid licht, die teruggekaatst wordt door de plant en daarna de film bereikt. De reflectiewaarden (E) van de afzonderlijke spectrale banden (blauw, groen, rood en infrarood) drukt men absoluut en als ratio uit. Heel gevoelig om een plantenbeschadiging te registreren is bijvoorbeeld IR/R-ratio (zie hoofdstuk "Resultaten").

Bij Lillesand et al. (1979) verliep de calibratie met behulp van een "calibration step tablet" en filters van het American National Standards Institute (ANSI status A filters). Ook in deze procedure komen sensitometrische strips en ontwikkelcurves voor, en wordt de hoeveelheid door de plant teruggekaatste straling absoluut en als ratio uitgedrukt. Eerder ontwikkelden Lillesand et al. (1976) het EPIC-systeem. Dit is een systeem dat opgebouwd is rond een microdensitometer en waarmee men de fotografische opname kan calibreren (zie ook hoofdstuk "Beeldinterpretatie: apparatuur").

Zowel Sapp (1981a, b) als Lillesand et al. (1976, 1979) poogden de hoeveelheid door planten teruggekaatste straling vast te leggen door middel van densitometrische analyse van kleureninfrarood transparanten. Een dergelijke semi-kwantitatieve methode is riskant, omdat er nog vaak oncontroleerbare factoren (bijv. achtergrond- uiterlijk) resteren (Gaucher et al., 1978). De tweede manier om transparanten te beoordelen is met behulp van het menselijk oog. Murtha (1983) beschrijft een visuele methode, waarbij details werden beoordeeld die densitometrisch onmogelijk onderscheiden kunnen worden. Nadeel van de visuele analyse is het subjectieve element van de menselijke beoordeling. De procedure van Murtha (1983) is echter

zodanig opgezet, dat de invloed van menselijke subjectiviteit op de resultaten tot een minimum beperkt is. Essentieel onderdeel ervan is de keuze in een foto of fotoreeks van een "normale" boom (een op het oog gezonde boom), waarmee de overige bomen vergeleken worden (zie hoofdstuk "Beeldinterpretatie: methoden" en in het bijzonder Murtha & McLean, 1981).

In het door de Europese remote sensing laboratoria (Earsel) voorgestelde project om schade aan vegetaties door middel van remote sensing te analyseren, is veel ruimte opengelaten om apparatuur op gelijke wijze te calibreren en onderzoeksmethodieken op elkaar af te stemmen (Reichert et al., 1980). Het onderstreept het belang om bij interdisciplinaire en internationale samenwerking instrumenten en methoden te gebruiken die op elkaar afgestemd zijn, zodat de op andere plaats en tijd verkregen resultaten onderling vergelijkbaar zijn.

Voor wie zich op de hoogte wil stellen van de problematiek van het calibreren is het kortgeleden verschenen artikel van Eikenaar en Loedeman (1983b) aan te bevelen.

2.6.3 Methodes

Om de vitaliteit van een vegetatie te bepalen met behulp van fotografische opnamen, staan visuele en fotometrische interpretatiemethoden ter beschikking. Aantasting van een plant gaat gepaard met fysiologische en morfologische veranderingen. Fysiologische veranderingen laten zich het beste beschrijven op basis van spectrale analyse, morfologische veranderingen op basis van structureigenschappen, zoals de dichtheid van het bladerdek, de aanwezigheid van dode takken en de vorm van de boomkruin (Murtha, 1972, 1981).

Visuele interpretatie van foto's kan zowel de analyse van fysiologische als morfologische veranderingen omvatten. Fotometrische interpretaties berusten op spectrale metingen van beeldpunten van het object (de boomkruin bijvoorbeeld) waarbij structureigenschappen geen rol kunnen spelen. Indien het beeldpunt kleiner is dan het object, kunnen beeldpunten met "gemengde" informatie beter uitgesloten worden (Reichert et al., 1980). De kleurmeting verliest aan representativiteit en reproduceerbaarheid naarmate de vorm en kleur van de vegetatie-eenheid heterogener is. Gebruikers van fotometrische interpretatiemethoden neigen er dernalve toe om de voorkeur aan een opnameschaal te geven waarbij details van een vegetatie-eenheid vervloeien tot een homogeen beeld. Op het gevaar van misinterpretatie ten gevolge van detailvervloeiing wijst Murtha (1983); zie ook het hoofdstuk "Opnameschaal".

Visuele interpretatie van fotografische opnamen is in bijna alle gevallen verricht aan bomen. Vanaf de grond is vaak geen beoordeling van boomtoppen mogelijk. Met

behulp van luchtopnamen verkrijgt men wel een beeld van de boomtop; deze informatie is uiterst belangrijk voor het vaststellen van de gezondheidstoestand (Murtha, 1983).

Gewoonlijk deelt men bomen op grond van fysiologische en morfologische schade in een stelsel van schadeklassen in. De classificatie verloopt in uitgebreidste zin van lichte - voor het oog onzichtbare - schade tot zware schade in de vorm van complete ontbladering en afsterving van de boom. De classificatie kan toegankelijk gemaakt worden door het opstellen van een determinatiesleutel. Deze sleutel biedt het middel om de bij een zieke boom behorende schadeklasse op te sporen. Murtha (1972) verrichtte het baanbrekende werk op dit gebied. De sleutel die hij construeerde berust, behalve op morfologische en fysiologische kenmerken, ook op topografische en seizoensgegevens (analyse van dennenaalden uit diverse jaargangen etc.) De classificatie waarnaar de sleutel verwijst, volgt een hoofdlijn:

- a. bomen geheel of bijna geheel ontbladerd,
- b. bomen enigszins ontbladerd door de aanwezigheid van kale takken,
- c. bladeren zichtbaar verkleurd,
- d. geen zichtbare, wel extravisuele schade (meestal een wijziging in infraroodreflectie).

De beoordeling van een bosopstand berust, zoals hiervoor in het hoofdstuk "calibratie" genoemd, op vergelijking met een "normale" boom uit de fotoreeks.

Kenneweg (1980) geeft een nog nauwkeuriger opsomming van schadeklassen dan Murtha (1972). Hij beschrijft bovendien 9 vereenvoudigde manieren om bomen in te delen. Tabel 6 geeft classificatiesystemen weer die gebruikt zijn om door luchtverontreiniging beschadigde bomen in te delen. Het valt op dat meestal niet de classificatie van Murtha (1972) gevolgd wordt, maar een eenvoudiger toe te passen versie. Het spreekt voor zich dat met eenvoudiger classificaties vaker arbitraire beslissingen genomen moeten worden, er vaker een beroep gedaan wordt op de menselijke subjectiviteit, er kortom een grotere nadruk komt op het "expert judgement".

Het visueel beoordelen van luchtopnamen vereist een intensieve interpretatietraining, waarbij ook veldstudie behoort. De fotokwaliteit verschilt meestal zodanig per opnamedatum, dat aanpassing van de determinatiesleutel nodig is (zie hoofdstuk "Calibratie"). Terrestrische waarnemingen zijn onontbeerlijk om boomsoort en -leeftijd te bepalen, om de omstandigheden waaronder de boom groeit in ogenschouw te nemen en om onduidelijke fotografische details te verklaren.

Als de bomen ingedeeld zijn naar ernst van de beschadiging, laat zich de omvang van de schade in een gebied afleiden uit de frequentie waarmee de verschillende schadeklassen voorkomen. Pollanschütz (1981) bijvoorbeeld gebruikte de frequentie

Tabel 6. Methoden om bomen met schade ten gevolge van luchtverontreiniging met behulp van fotografische technieken te beoordelen.

Interpretatiemethode	Auteur
<u>Visuele interpretatie</u> dood/levend of wel/niet beschadigd	Carlson (1978); Scherrer et al. (1980, 1981); Wert (1969); Krause et al. (1980); Kenneweg (1980); Tomiczek (1981); Croft et al. (1982); De Mars et al. (1982)
dood of stervend/zwaar-/ licht-/onbeschadigd	Larcher et al. (1976); Pelz et al. (1977); Kenneweg (1980); Pollanschütz (1981)
gedetailleerd classificatie- systeem	Murtha (1972, 1983 etc.); Murtha & McLean (1981); Oester et al. (1981)
<u>Fotometrische interpretatie</u> ratiotechniek	Yabriki & Aoki (1973); Kanagawa prefecture (1975); Lillesand et al. (1979); Murtha & McLean (1981); Sapp (1981a, b)*
image enhancement	Lillesand et al. (1981)**; Lillesand & Meisner (1982)***

* metingen aan sojaboovelden

** metingen aan *Ulmus* sp. in verband met de iepenziekte

*** metingen aan o.a. maisvelden met verschillende concentraties stikstofbemesting

van voorkomen van zwaar beschadigde bomen voor een indeling in 5 klassen:

- a. 0 - 5%: een gebied zonder immissieschade,
- b. 5 - 15%: een gebied met zeer lichte schade,
- c. 15 - 50%: een gebied met lichte tot matige schade,
- d. >50%: een zwaar aangetast gebied,
- e. slechts "enkele" sparren in leven: zeer zwaar aangetast gebied.

Gebieden laten zich op een dergelijke wijze karteren met behulp van planimeters (Larcher & Boullard, 1976; Scherrer et al., 1981; Kenneweg, 1980; Pollanschütz, 1981), gridraster (Pelz et al., 1977; Vick & Hardley, 1977; Krause et al., 1980; Kenneweg, 1980; Scherrer et al., 1980, 1981), speciale "at random sampling designs" (Wert, 1969) of met behulp van een zorgvuldig gekozen vluchtlijn ("transect", Carlson, 1978). Scherrer et al. (1981) vergeleken per gridraster en planimeter gemaakte karteringen en hadden de volgende bevindingen:

- a. rastereenheden zijn moeilijk in het veld af te bakenen,
- b. verband tussen parameters per rastereenheid is eenvoudig vast te stellen door middel van regressie- en principal-componentanalyse,
- c. schadeontwikkeling is met behulp van rastereenheden eenvoudiger te volgen,

d. rasterkaarten zijn minder illustratief.

Tenslotte kunnen er parameters met voorspellende en economische waarde afgeleid worden van luchtopnamen, zoals het verlies aan verhandelbaar hout in kubieke meters (Carlson, 1978), het toekomstig verloop van de groei in een bos (Kenneweg, 1980; Murtha & McLean, 1981) en de te verwachten ontwikkeling van stress bij straatbomen (Lillesand et al., 1979).

Informatie uit luchtopnamen is met bovenvermelde bewerkingen bruikbaar gebleken om onderhoud- en beheersmaatregelen op af te stemmen.

Luchtfoto's zijn behalve visueel ook fotometrisch interpreteerbaar (zie tabel 6). Variantie-analyse van densiteitsratio's (zie hoofdstuk "Calibratie") en visuele interpretaties laat zien dat een indeling van beschadigde bomen op grond van de signatuur van de gereflecteerde nabij-infraroodstraling (uitgedrukt als rood/groen en rood/blauw ratio) overeenkomt met de indeling op grond van visuele interpretatie (Murtha & McLean, 1981). De signatuur van het nabij-infrarood gebied (gemeten aan de densiteit van de magenta-rode-kleurlaag van de film) van een "normale" boom wijkt significant af van dat van een boom met extra-visuele schade (donkere of lichte verkleuring van de magenta-kleurlaag).

Tabel 6 toont ook enkele geslaagde toepassingen van de ratiotechniek, die alle berusten op densiteitsmetingen aan de filmlagen. Lillesand et al. (1979) vond uitstekende correlaties tussen densiteitsmetingen van de drie filmlagen en de grondwaarnemingen van straatbomen (uitgedrukt als "stress indices"). De correlatiecoëfficiënt wat betreft de kleurenfilm was 0,884 en die wat de kleureninfrarood film betreft 0,906. De kleureninfrarood film bleek geschikter dan de kleurenfilm door de gevoeligheid van de IR/R ratio voor het aantonen van plantenschade.

Lillesand et al. (1976) visualiseerden de beeldpuntsmetingen van een foto met chlorotische naaldbomen door middel van beeldverwerkingstechnieken ("color enhancement" en "density slicing"). Het resulterende beeld is een kaart of beeldschermafdruk. Volgens Lillesand et al. (1976) zijn er met deze technieken beschadigingen af te bakenen die met het oog niet zichtbaar zijn. Zeer recent gaven Lillesand en medewerkers voorbeelden van geslaagde toepassingen (Lillesand et al., 1981; Lillesand & Meisner, 1982; zie ook de hoofdstukken "Beeldinterpretatie: apparatuur"). Deze recent gepubliceerde resultaten wekken de indruk dat beeldverwerkingstechnieken nu in een stadium van ontwikkeling zijn, dat ze ook gebruikt kunnen worden om luchtverontreinigingseffecten te traceren.

De in tabel 6 genoemde auteurs verrichtten metingen aan elke filmlaag en bepaalden

meerdere ratio's. Achteraf bekeken ze welke filmlaag of ratio het gevoeligst reageerde op plantenbeschadigingen. Uit het feit dat de keuze van geschikte fotometrische parameters achteraf gedaan wordt, kan men afleiden dat er nog weinig kennis is van de spectrale signatuur van planten en de invloed van luchtverontreiniging hierop. Overigens zal in het hoofdstuk "Resultaten" blijken dat de IR/R ratio in de meeste gevallen de gevoeligste indicator is.

2.7 Resultaten

2.7.1 Bossen

Pelz et al. (1977) vonden een correlatie tussen het aantal in het veld getelde bomen (*Picea abies*) en het aantal op luchtfoto's getelde bomen (correlatiecoëfficiënt 0,85). Er was ook een dergelijke correlatie wat betreft het aantal zwaar beschadigde of dode bomen (coëfficiënt in beide gevallen 0,88). Helaas was er geen melding over een eventueel verband in de klassen lichtbeschadigde en gezonde bomen: betekent dit dat Pelz et al. (1977) voor deze klassen geen correlatie tussen veld- en luchtwaarnemingen konden aantonen? Helaas geeft hierop de publicatie geen antwoord. Oester et al. (1981) vonden wel voor bomen uit alle schadeklassen een significant verband tussen veld- en luchtwaarnemingen. Met behulp van het "three stage varied probability design" kon Wert (1969) een schatting maken van het aantal beschadigde bomen in een groot gebied (n.l. 1.298.073 exemplaren in 100.000 ha bos). De standaardfout was wel groot: $\pm 25\%$. Door het beter trainen van het personeel dat de tellingen uitvoerde en door gebruik te maken van een grotere schaal (groter dan 1:1584) denkt Wert in het vervolg een standaardfout van dergelijke omvang te kunnen vermijden. Kenneweg (1980) kon uit luchtopnamen van ruim 1300 naaldbosopstanden niet een gebied afgrenzen dat te lijden had van Ruhrgebied-immissies. Wel kon hij aantonen dat van noord naar zuid de schade significant toenam en dat lager gelegen opstanden significant zwaarder beschadigd waren dan hoger gelegen opstanden. Kenneweg (1980) heeft meer dan 10 jaar ervaring met luchtfotografie. In de loop der jaren bleken per luchtfoto beoordeelde, in slechte conditie verkerende bomen langzamer te groeien dan goeduitziende bomen. In de droge zomer van 1976 analyseerde Kenneweg (1980) vanuit de lucht een beukenbos. In 1977 bleek 37% van de door hem in het voorafgaande jaar als zwaarbeschadigd gediagnostiseerde bomen doodgegaan te zijn. Voor de toekomst wil Kenneweg (1980) trachten om luchtfotoparameters in verband te brengen met dendrologische, opdat uit de lucht schattingen gemaakt kunnen worden van de omvang van de aantasting, bijvoorbeeld uitgedrukt in eenheden verminderde houtproductie. Vermoedelijk staat Kenneweg (1980) een

regressie-analyse voor ogen van een type dat in 1979 door Lillesand et al. beschreven is (zie hieronder).

Jaarringmetingen toonden dat naaldbomen met een afwijkende spectraal reflectiepatroon in het nabij-infrarood gebied langzamer groeien. Deze spectrale afwijking werd geregistreerd als een verkleuring (donker, lichter) van de magenta(rood)laag in de kleureninfrarood film. Bomen op de foto's met de gelijkmatigste magentakleur blijken het snelst te groeien. Deze resultaten van Murtha & McLean (1981) zijn belangrijk, omdat er tot nu toe slechts twee publikaties zijn waarin het waarnemen van extravisuele schade aan planten is aangetoond (zie het literatuuroverzicht van Puritch (1981); de twee meldingen zijn van Lillesand et al. (1976) en Gausman et al. (1978)).

2.7.2 Straatbomen

Lillesand et al. (1979) waren in staat om door middel van fotometrische analyse van luchtopnamen uit juni het optreden van stress in juli ten gevolge van droogte te voorspellen. Zij lazen de voorspelling af uit een "stress prediction model", dat opgebouwd is uit terrestrisch bepaalde boomkenmerken (stress indices) enerzijds en absolute densiteitsmetingen aan filmlagen en de afgeleide ratio's anderzijds. De voorspellingswaarde van luchtopnamen is sterk afhankelijk van de weersomstandigheden: is een seizoen kouder en natter dan normaal, kunnen stresssymptomen maanden later optreden. Van de verschillende fotometrische parameters reageert de IR/R-ratio het gevoeligst op het voorkomen van stress. Eerder dan Lillesand et al. (1979) publiceerde Kanagawa prefecture in Japan een geslaagde toepassing van de ratio-techniek. Ook zij relateerden terrestisch bepaalde boomkenmerken ("vitaliteitsindices") aan densiteitswaarden van luchtopnamen en de afgeleide ratio's. Correlatiecoëfficiënten werden berekend uit de indices en ratio's. Het onderscheiden van boomscorten (diverse straat- en parkbomen, zie hoofdstuk "Toepassingen") gelukte met geen van de ratio's: de densiteitsspreiding binnen een soort was vaak groter dan tussen soorten. Het onderscheiden van standplaatsen gelukte in het bijzonder met de R/IR en B/IR ratio's. Augustus-data bleken hiervoor het geschiktst. Er bleek een nauwe relatie te bestaan tussen de vitaliteit van bomen en de mate van luchtverontreiniging. Met name de R/IR ratio correleert in hoge mate met de vitaliteit van de bomen (nl. variërend van 0,5 wat betreft de "den" en tot 0,928 wat betreft de "kers", met een gemiddelde van 0.805 voor alle boomsoorten). Merkwaardigerwijze verwijzen Lillesand et al. (1979) niet naar deze belangrijke Japanse publikatie. Een tweede, zeer beknopt beschreven Japanse studie is van Yabriki & Aoki (1973). Ook zij gebruikten de ratiotechniek en vonden dat wilgenbossen in een gebied met luchtverontreiniging een R/B ratio hebben die afwijkt van die van bossen in een

gebied met zuivere lucht. Helaas bleef de poging om meer Japanse publikaties op te sporen zonder succes. In de westerse literatuur worden Japanse publikaties nooit aangehaald. Bovenstaande studies uit het begin van de zeventiger jaren zijn echter veelbelovend en doen vermoeden dat de Japanners momenteel wel eens heel ver zouden kunnen zijn met de routinematige toepassing van remote sensing technieken.

2.7.3 *Landbouwkundige gewassen*

Sapp (1978) stelde sojaboovelden bloot aan SO₂-begassing en nam op kleureninfrarood foto's (genomen op 500 m hoogte met een 35 mm camera uit een helikopter) waar, dat velden met chlorose verkleurd waren van rood naar rose. Voorwaarde voor het onderscheiden van schade was dat het gewas gelijkmatig van hoogte, plantdichtheid en groeistadium is en dat de grond een gelijkmatige samenstelling heeft. Het berekenen van het aantal m² met chlorotische planten bleek niet mogelijk evenmin als het onderscheiden van schade in een katoenveld. Wel kon een katoenveld onderscheiden worden van een sojabooveld.

Enige jaren later blijkt Sapp (1981a, b) bovenstaande experimenten voortgezet te hebben met fotometrische in plaats van visuele interpretatiemethoden. De lucht-opnamen waren dermate wisselend van kwaliteit, dat fotometrische calibratie noodzakelijk was om de opnamen te kunnen vergelijken. Desondanks kon hij geen relatie vaststellen tussen de rood, groen of nabij-infrarood reflectie van het sojabooveld en de met het oog geconstateerde chlorose. De IR/R ratio echter reageerde op de aanwezigheid van chlorose en nam af als de schade toenam. Wel vertoonde de IR/R ratio veel spreiding op plaatsen met onkruid en op plaatsen met een onderbroken gewasbedekking. Op een ander proefveld vond Sapp (1981a, b) eveneens geen relatie tussen de absolute densiteitswaarden en het voorkomen van schade. Hier correleerde de IR/R ratio ook met de schade, maar de richting was omgekeerd als verwacht mocht worden op grond van het andere experiment.

Bij veldexperimenten met tarwe correleerde de reflectie van de totale hoeveelheid licht, en groen, rood en nabij-infrarood afzonderlijk met necrose in het veld (helaas kwam bij tarwe in het veld geen chlorose voor).

In het laboratorium correleerde de totale hoeveelheid zichtbaar licht + nabij-infrarood, rood, groen en de IR/R ratio significant met necrose bij de sojaboon. Bij tarwe correleerde de reflectie van de totale hoeveelheid zichtbaar licht, rood en groen met zowel chlorose als necrose (IR-metingen zijn niet verricht!). Sapp's veldexperimenten toonden dus andere verbanden aan dan de laboratoriumexperimenten, of tonen helemaal geen verband aan. Sapp geeft geen opsomming van factoren die tot de minder geslaagde resultaten geleid hebben. De zeer wisselende kwaliteit van het fotomateriaal zal zeker een rol van betekenis hebben gespeeld.

2.8 Evaluatie en conclusie

Alle technische en methodische problemen om fotografisch van afstand de gezondheidstoestand van planten vast te leggen zijn oplosbaar (Jano, 1981). De tijd om te experimenteren is voorbij, luchtfotografie is beschikbaar voor toepassing op routineschaal (Murtha, 1981). Kleureninfrarood films hebben een bruikbaar contrasterend vermogen en lenen zich bovendien voor het detecteren van schade alvorens deze met het oog zichtbaar wordt. Het aantal publikaties die deze eigenschap van kleureninfrarood films bevestigen, is nog steeds gering.

Vorbereidingen van geslaagde toepassingen mogen niet onderschat worden: het afstemmen van apparatuur en methodiek op het specifieke doel vraagt tijd en deskundigheid (Murtha & McLean, 1981; Murtha, 1983 etc.). Talrijk zijn de publikaties, waarin enkele of vele gegevens over gevolgde methode en gebruikte apparatuur ontbreken, zodat er grond is om te twijfelen aan een gedegen proefopzet en de betrouwbaarheid van de resultaten.

Luchtanalyse is even betrouwbaar of betrouwbaarder als middel om goed van minder goed groeiende bomen te onderscheiden en om schade vast te stellen als terrestrische analyse. Zowel visuele als fotometrische interpretatiemethoden hebben tot goede resultaten geleid. Ondersteunende veldwaarnemingen blijven onmisbaar, al kan de frequentie waarin deze plaatsvinden sterk verminderen door een weloverwogen uitvoering van het project.

Een volgende voorwaarde voor een succesvolle toepassing is het corrigeren van de kwaliteit van de opnamen door de invloed van omgevingsfactoren uit te schakelen. Ten behoeve van correcties bestaan er sensitometrische methoden (ten dienste van fotometrische interpretaties) en kunnen schadeclassificaties aangepast worden (op basis van de definitie van een "normale" boom).

Ondanks accurate voorbereidingen blijft de kans op mislukkingen aanwezig. Sapp (1978) had weinig succes met visuele interpretatie van vegetatieschade op luchtfoto's. Nadat hij in een latere fase van het project gekozen had voor fotometrische calibratie en analyse, bleef ook hiermee gedetailleerd resultaat uit en kon hij slechts duidelijke, ook met het oog goed zichtbare, schade aan bepaalde gewassen detecteren (Sapp, 1981a, b).

Indien de wijze waarop de analyse is uitgevoerd optimaal is, kunnen de resultaten bruikbaar zijn voor veel doeleinden:

- a. bepalen van de mate van beschadiging van een boom,
- b. bepalen van de mate van beschadiging van een bosopstand en het karteren van een aangetast gebied,
- c. voorspellen van de te verwachten groei-afname, zodat onderhoudsmaatregelen te treffen zijn,

d. berekenen van afgeleide parameters, zoals door de schade veroorzaakte verminderde houtproduktie,

e. gebruik van luchtfotografie als instrument bij het beheer van bosopstanden en straatbomen.

De oorzaak van de plantenbeschadiging laat zich onder ideale omstandigheden (uitgestrekte homogene bossen, geen complexe stressfactor) uit luchtopnamen afleiden, maar in de meeste gevallen is voor dit doel terrestrische ondersteuning onmisbaar. Merkwaaardigerwijze zijn fotografische technieken uitgebreid in de bosbouw toegepast en slechts incidenteel in de akkerbouw. Is dit een weerspiegeling van het feit dat luchtverontreinigingseffecten vooral aan bomen bestudeerd zijn en minder aan landbouwkundige gewassen?

Luchtfotografie met kleureninfrarood films wordt praktisch algemeen aanvaard als de bruikbaarste remote sensing methode om vegetatieschade te beoordelen. Kleureninfrarood films hebben enkele nadelen, waarvan de belangrijkste zijn het geringe ruimtelijk scheidend vermogen en de slechts moeizaam te controleren beeldkwaliteit. Al bij relatief grote schalen kunnen details vervloeien door kleurenmenging (Murtha, 1983). Misschien verdient in dit licht de suggestie van Johansen (1982) om de toepassingsmogelijkheden van zwart-wit multispectrale fotografie na te gaan nadere aandacht.

De weg naar een geslaagde toepassing van fotografische technieken ligt bezaaid met voetangels en klemmen. Soms worden deze breedvoerig, meestal echter terloops of niet vermeld. Hier volgt een opsomming, in tamelijk willekeurige volgorde:

a. Ook bij gunstige schaalgrootte zijn niet alle bomen uit de lucht waarneembaar: het aantal uit de lucht waargenomen bomen varieerde bij Pelz et al. (1977) van 50-70% en bij Oester et al. (1981) van 70-100%. Dit percentage verschilt van geval tot geval en is bijvoorbeeld afhankelijk van het aantal bomen per oppervlakte-eenheid;

b. Deskundigen kunnen onderling aanzienlijk van mening verschillen wat betreft de indeling van bomen in schadeklassen. Genoemde percentages zijn 7,9 (Scherrer et al., 1981) en 8,7 (Kenneweg, 1980). Wert (1969) vond een spreiding van 25% en schreef dit hoge percentage onder andere toe aan beoordelingsverschillen tussen onderzoekers;

c. Mortaliteit is een onbetrouwbare schadeklasse, omdat het aantal dode bomen in een opstand in de eerste plaats afhangt van het bosonderhoud;

d. Een groot aantal eigenschappen van de te beoordelen bomen kan tot verkeerde interpretaties leiden indien zij over het hoofd worden gezien: *Viscum* parasitering (Oester et al., 1981), fructificaties (Kenneweg, 1980), soort- of variëteitsverschillen (Kenneweg, 1980; Katzmann, 1981 e.a.), verschillen in de struik en kruidlaag,

de snoeiwijze (Lillesand et al., 1979), verdroogd maar groen gebleven bladerdek (Murtha, 1981), leeftijd (jonge bomen reflecteren sterker dan oudere, in het bijzonder in het infrarood gebied), dichtheid van het bladerdek, wijze waarop bladeren gerangschikt zijn, jonge (jaargangen) denne- en sparrenaalden zijn ongeschikt om schade aan waar te nemen (Wert, 1969), jonge naalden (en bladeren) kunnen schade maskeren (Lillesand et al., 1979);

e. Het uiterlijk van een beschadiging wordt beïnvloed door het weer (veel/weinig regen, veel/weinig wind), concentratie van de luchtverontreinigingscomponenten en de interactie met andere schadelijke agentia, de standplaats van de boom, gebruik van bestrijdingsmiddelen (Murtha, 1981; Lillesand et al., 1979; Casalnuovo & Sawan, 1976 e.a.). Door slecht weer kan een vlucht vervallen of kan zelfs een hele zomer ongeschikt zijn (bijv. de droge zomer van 1976 (Kenneweg, 1980));

f. Fotografische en atmosferische factoren kunnen opnamen onbruikbaar maken: film-emulsieverschillen, leeftijd van de film en de wijze van bewaren en ontwikkelen, belichtingsverschillen, atmosferisch stof, nevel, hoeveelheid en invalrichting van direct zonlicht, schaduwwerking. De kwaliteit verschilt per opname; bij elke opname is een nieuwe interpretatietraining nodig (Schnopfhagen, 1980 e.a.) of fotometrische calibratie. Er is te weinig kennis over het verband tussen de spectrale samenstelling van het licht dat de film bereikt en de resulterende dichtheitsverschillen (Sapp, 1981a, b; Johansen, 1982). Beeldhoekverschillen in een opnamereeks kunnen tot verkeerde interpretaties leiden (Oester et al., 1981);

g. Veldanalyse ter ondersteuning van fotografische analyse neemt soms teveel tijd in beslag door een slechte kwaliteit van de opnamen of door een te omvangrijke veldwerkprocedure (Schnopfhagen, 1980; Krause et al., 1980). Te overvloedig beeldmateriaal kan beter vermeden worden, het bijbehorende veldwerk zou zoveel tijd vragen, dat het schadebeeld ondertussen verandert (Kenneweg, 1980);

h. Het scheidend vermogen van met name kleureninfrarood films is niet berekend op kleine opnameschalen (afhankelijk van het object: kleiner dan 1:2000 à 1:6000). Ten gevolge van een te kleine schaal treedt detailverlies en kleurmenging op, waardoor interpretaties onzuiver worden (Wert, 1969; Pelz et al., 1977, Myers & Bird, 1978, en vooral Murtha, 1983);

i. Schade blijkt soms niet met de gebruikte apparatuur te kunnen worden opgemerkt, waardoor de projectdoelstelling aangepast moet worden. Sapp (1981a, b) moest om deze reden naaldbomen en eiken van zijn onderzoeksprogramma schrappen. Ook kon hij uit de lucht geen schade aantonen in aangetaste tarwe- en katoenvelden;

j. Bepaalde technieken of methoden zijn toegepast en veelbelovend bevonden, bijv. "three stage varied probability sampling design" (Wert, 1969), dichtbij-fotografie (Lillesand et al., 1976; Gausman et al., 1978; Sapp, 1977) en "band masking"

(Lillesand et al., 1976). Uit recentere literatuur bleek dat deze technieken hun belofte nooit geheel ingelost hebben en met succes nagevolgd zijn. De redenen hiervan zijn niet met literatuurstudie te achterhalen, maar zijn wel belangrijk en zouden overwogen moeten worden alvorens men opnieuw tot toepassing overgaat.

Deze lijst van voetangels en klemmen is geëxtraheerd uit de literatuur en vermoedelijk niet volledig. Dat dergelijke opsommingen belangrijk zijn, geeft het initiatief van de overkoepelende Europese organisatie van remote sensing laboratoria (Earsel) aan. Earsel werkt aan een lijst van parameters die de kwaliteit van remote sensing beelden beïnvloeden (Reichert et al., 1980). Om remote sensing als instrument om vegetatieschade te beoordelen acceptabel te maken voor niet-gebruikers, zouden er richtlijnen moeten komen die een nauwkeurige wijze van toepassing garanderen, inclusief een foutenanalyse en het aangeven van betrouwbaarheidsgrenzen (Murtha, 1976).

3 Overige technieken

3.1 Multispectrale scanning

Multispectrale scanners kunnen gebruikt worden in vliegtuigen en satellieten. De opnamesnelheid is afstembaar op de vliegsnelheid. Elke spectrale band levert een beeld op. Beelden bestaan uit puntwaarnemingen. Ter calibratie van beelden is het wenselijk om onder diverse hoeken een referentie-object af te tasten (Reichert et al., 1980).

Al in 1975 beschreven Fritz & Pennypacker ervaringen met een multispectrale scanner aan boord van een satelliet (Erts-1). Het gelukte om met de 0,7-0,8 μ m en 0,8-1,1 μ m banden een naaldbomenvegetatie van ca 100 km² met zware schade ten gevolge van lucht- en bodemverontreiniging (afkomstig van een zinkfabriek) af te bakenen. De aangrenzende vegetatie, die wel ernstig beschadigd was door luchtverontreiniging maar niet door bodemverontreiniging, kon niet met behulp van de scanner onderscheiden worden. Spectrale verschillen ten gevolge van de beschadiging van naaldbomen werden soms gemaskeerd door in de nabijheid voorkomende loofbomen. Metingen in de winter genoten in dergelijke gevallen de voorkeur. Fritz & Pennypacker (1975) noteerden bovendien beeldafwijkingen ten gevolge van schaduwwerking door een berg-helling bij een lage zonnestand.

Tabel 7 geeft een lijst van sindsdien in gebruik genomen multispectrale scanners. De Daedalus DS-1250, waar Marszalek (1976) mee werkte, heeft 11 spectrale kanalen en is in staat om elektromagnetische straling van 0,38 tot 1,4 μ m te meten. Marszalek (1976), die deze scanner in Oostenrijk aan boord van een vliegtuig gebruikte, meldde tamelijk spectaculaire successen, zoals het onderscheiden van naald- en loofbossen, leeftijdsverschillen (jorge/oude opstanden) en schadeklassen (gezond/licht-/zwaarbeschadigd/dood). Helaas ontbreken er in de publikatie teveel details, zodat aan de betrouwbaarheid en reproduceerbaarheid van de resultaten getwijfeld kan worden. Zirm (1981) gebruikte vermoedelijk ook een Daedalus-1250 en publiceerde een beeld, waarop door SO₂ zwaarbeschadigde naaldbomen gediscrimineerd ten opzichte van minder beschadigde exemplaren staan aangegeven.

Tabel 7. Multispectrale scanners, die beproefd zijn om beschadigde van onbeschadigde vegetaties te onderscheiden.

multispectrale scanners	auteur
Daedalus DS-1250	Marszalek (1976)
Daedalus DS-1260	Sapp (1978, 1981a, b)
Bendix M2S	Reichert et al. (1980)

Een andere Daedalus, type DS-1260, heeft eveneens 11 kanalen. Hieruit kunnen er 4 gekozen worden in het zichtbare en nabij-infrarood gebied. Kanalen in het blauwe en thermische infrarood spectrumgedeelte werden uitgesloten in verband met het geringe contrasterende vermogen om beschadigde vegetaties af te bakenen. Sapp (1981a, b) monteerte de Daedalus DS-1260 in een vliegtuig en maakte opnamen van 500, 1800 en 4000 m hoogte. Op 500 m hoogte kwam één beeldpunt overeen met 1 m² grondoppervlak en op 1800 m hoogte met 4 m². SO₂-effecten waren visueel zichtbaar in een sojaboonproefveld, de schade varieerde van licht tot zwaar. De met de scanner verkregen beelden van dit veld werden geïnterpreteerd met behulp van computerprogrammatuur die niet, gedeeltelijk of maximaal gebruikmaakte van data uit veldwaarnemingen. Deze interpretatieprocedures noemde Sapp (1980a, b) respectievelijk "unsupervised", "pseudosupervised" en "supervised data classification". De beste resultaten werden behaald met het "pseudosupervised" interpretatieprogramma:

- a. het afbakenen van het sojaboonveld ten opzichte van de omgeving leverde slechts 0,6-5,1% overclassificatie op (error of commission),
- b. het onderscheiden van middel- tot zwaarbeschadigde en onbeschadigde sojaboonvelden leverde 11,3-24,4% overclassificatie op. (Helaas vermeldde Sapp geen resultaten behaald in velden met lichte schade.)

Tijdgebrek verhinderde Sapp (1981a, b) om interpretatie door middel van "supervised data classification" uit te voeren; met meer tijd was dit programma mogelijk het beste gebleken van de drie die vergeleken werden.

Sapp (1981a, b) gebruikte het "I²S image processing system" om een kaart uit de beeldpuntinformatie te construeren. Met behulp van "density level slicing" werd het door SO₂ aangetaste gedeelte van het proefveld in oranje weergegeven. Gedeelten van het veld met lichte chlorose konden niet afgebakend worden. Zelfs het afbakenen van matig/zwaar- tot zwaarbeschadigde gedeelten gelukte niet tot in alle details. Sapp (1981a, b) vermeldde enkele foutenbronnen. Allereerst selecteerde de scanner tijdens een bepaalde vlucht het blauwe spectrale kanaal. Bij nadere beschouwing van het proefgebied bleek deze onverwachte selectie te berusten op de aanwezigheid van open water in de vlieglijn. Een tweede foutenbron blijkt uit vergelijking van beelden van verschillende vlieglijnen: de mate van over-/onderclassificatie verschilde per vlieglijn met 0,6-5,1%. De scanner maakte vergissingen in gebieden waar het gewas geen aaneengesloten geheel vormde.

Tenslotte trachtte Sapp (1981a, b) ook satellietbeelden te gebruiken. De beelden gaven geen scheiding aan tussen beschadigde en onbeschadigde gedeelten van het sojaboonveld. Sapp (1981a, b) besloot naar aanleiding hiervan om niet nader gebruik te maken van satellietbeelden.

Reichert deed ervaringen op met de Bendix M2S (zie tabel 7, Reichert et al., 1980).

Deze scanner neemt van 300 m hoogte per beeld een stuk aardoppervlak met een diameter van 720 m waar. Er was een vlieglijnoverlapping van 10-25% nodig in verband met beeldrandvertekening. De Bendix M2S is afstelbaar op een smallere bandbreedte dan de Daedalus. Daarentegen hebben Daedalus-scanners het voordeel dat er Landsat-experimenten mee uitgevoerd zijn, zodat algorithmen ter beschikking staan om data te corrigeren voor bijvoorbeeld geometrische factoren. Ook zijn Daedalus-scanners meer getest in vliegtuigen en helikopters.

3.2 Spectroradiometer

Spectroradiometers zijn geschikt voor gebruik in het laboratorium en in het veld. Het observeren van bomen of andere objecten met een groot oppervlak stuit op problemen in verband met het beperkte waarnemingsveld.

Tabel 8 geeft een lijst met gebruikte spectroradiometers. Al in 1978 vermeldden Gausmann et al. het gebruik van een Exotech 20, maar zij gaven nauwelijks details. Sapp (1981b) geeft wel technische details, afbeeldingen en een gebruiksaanwijzing. Men kan zelf banden uit het elektromagnetische spectrum kiezen. Eenheden stralingsenergie kunnen geconverteerd worden naar eenheden gereflecteerde energie. Voor opslag en bewerking van data gebruikte Sapp een DEC LSI-11 computer. Normalisatie van data door calibratie bleek mogelijk. Sapp gebruikte de spectroradiometer in het veld door montage op het dak van een bestelbusje.

Sapp (1981a, b) vond dat in laboratoriumexperimenten het optreden van necrose bij sojaboonplanten significant correleerde met zowel de reflectie van het totale zichtbare spectrum (inclusief nabij-infrarood) als de reflectie in het rode en in het groene gebied. Hoewel de infrarood-response nogal variabel was, correleerde ook de IR/R ratio met de necrose. Deze verbanden konden niet in het veld aangetoond worden, kennelijk was de natuurlijke variatie van de spectrale signatuur in het gewas groter dan de variatie ten gevolge van SO₂-aantasting.

In laboratoriumexperimenten met tarwe vond Sapp (1981a, b) correlaties zowel met

Tabel 8. Spectroradiometers, die beproefd zijn om beschadigde* van onbeschadigde planten of plantendelen te onderscheiden.

spectroradiometer	auteur
Gamma scientific	Sapp (1978)
OMA nr.2	Sapp (1981b)
EC - G model 555	Oester (1981)
Exotech 20	Gausman et al. (1978)
Exotech 20 C*	Walburg et al. (1982)

* gebruikt om goed groeiend van minder goed groeiend gewas (mais) te onderscheiden.

reflectie in het totale zichtbare gebied (exclusief nabij-infrarood: IR-metingen waren mislukt ten gevolge van "calibratieproblemen"), als met reflectie in het rode en in het groene gebied. De correlaties golden voor zowel chlorose als necrose. In het veld werden bij tarwe de in het laboratorium gevonden verbanden wél bevestigd, ditmaal ook voor de infrarood-reflectie (en de IR/R ratio). De verbanden in het veld golden slechts voor necrose, omdat geen chlorose voorkwam. Er waren "technische problemen" tijdens de metingen aan katoenplanten, waardoor geen resultaten behaald konden worden. Sapp (1981a, b) vond ook dat de infrarood-reflectie niet in alle gevallen significant correleerde met chlorose of necrose. De prestaties van de spectroradiometer zijn afhankelijk van de gekozen proefplant: in bovenstaande experimenten voldeed tarwe beter dan sojaboon. Sapp (1981a, b) adviseert om eerst gedetailleerd de spectrale signatuur van de aangetaste vegetatie en de omgeving (niet aangetaste vegetatie) vast te stellen alvorens over te gaan tot de uitvoering van een experiment. Ten tweede adviseert Sapp vooronderzoek, ten einde tot de keuze van de juiste apparatuur en de afstemming ervan te komen. Oester (1981) verzamelde naalden van beschadigde (o.a. immissieschade) en onbeschadigde dennebomen (*Pinus silvestris*) en analyseerde de spectrale verschillen in het laboratorium met een EG+G model 555. Hij vond dat groene uiteinden van beschadigde naalden dezelfde spectrale signatuur (zichtbaar licht en nabij-infrarood) hebben als geheel onbeschadigde exemplaren. Verschillen tussen naalden van verschillende jaargang waren veel groter dan die tussen beschadigde en onbeschadigde naalden. Door droogte aangetaste naalden lieten zich (in het infraroodgebied) niet van gezonde onderscheiden, evenals zichtbaar in de herfst verkleurde exemplaren. De spectrale signatuur veranderde slechts indien de gehele naald geel of bruin was. Oester (1981) concludeerde dat dennen met verminderde vitaliteit zich niet laten detecteren door een spectroradiometrische analyse van naalden in het laboratorium. Vitaliteitsverlies laat zich beter vaststellen door waarnemingen aan de boomkruin met behulp van luchtfotografie (zie bijvoorbeeld Oester et al., 1981).

3.3 Evaluatie en conclusie

Publikaties over de toepassing van multispectrale scanners om luchtverontreinigings-effecten aan planten te analyseren zijn niet talrijk, maar leveren toch enkele foutenbronnen op:

- a. Heterogene samenstelling van de vegetatie (onkruid, loofbomen in een te beoordelen naaldbomenopstand, aanwezigheid van open water in de vlieglijn),
- b. Grondbewerkingsmethode,
- c. Groeistadium van het gewas,
- d. Te geringe schade wordt niet gedetecteerd (bijvoorbeeld lichte chlorose),

e. Positie van de scanner ten opzichte van het aardoppervlak, zonnestand, geometrische factoren, atmosferisch stof en nevel. Dave (1980) toonde aan dat dit soort variabelen de beeldinformatie zeer significant beïnvloedt. Hij analyseerde voor dit doel het watergehalte van een grasvegetatie met scannergegevens afkomstig van de Landsat-D satelliet. Software om de gegevens te corrigeren ontbreekt of is niet geschikt voor Europese omstandigheden (Reichert et al., 1980).

Multispectrale scanning is momenteel in een stadium dat slechts vegetaties met duidelijk zichtbare schade die scherp is afgegrensd ten opzichte van de omgeving, getraceerd kunnen worden. Er is (nog) geen stereo-observatie mogelijk. De scanners van de huidige generatie satellieten hebben nog geen optimaal scheidend vermogen: de bandbreedte is te groot en een beeldpunt beslaat een te groot deel van het aardoppervlak. Er is nog te weinig fundamentele kennis over "normale" reflectie van een gezonde plant en afwijkingen ervan ten gevolge van beschadiging (Reichert et al., 1980; Murtha, 1981). Scannerapparatuur en de calibratie ervan is ingewikkeld en de te verwerken hoeveelheid gegevens groot. Deze factoren maken de toepassing veel duurder dan die van traditionele lucht fotografie (Herinckx, 1983). Multispectrale scanning bevindt zich nog in een experimentele fase. De meeste problemen kunnen opgelost worden, zodat "in de toekomst" (vermoedelijk niet binnen 2 à 5 jaar) de techniek een plaats zal veroveren naast, of misschien ten koste van fotografische technieken.

Er zijn nog weinig successen behaald met spectroradiometers. Hoewel de eerste kennismaking een gunstig perspectief bood (zie Sapp, 1977), lost de spectroradiometer de belofte niet geheel in, gezien de later beschreven resultaten (Sapp, 1981a, b). Uit de laatstgenoemde publikaties van Sapp kunnen 3 factoren afgeleid worden die een mislukte toepassing tot gevolg kunnen hebben.

- a. keuze van een ongeschikte (ongevoelige) testplant,
- b. te weinig voorkennis van spectrale signaturen,
- c. "technische" problemen o.a. met het calibratieproces.

Spectroradiometrie blijkt tot nu toe nuttig om relatief zware schade te analyseren. Spectroradiometrie bleek tevens een dienst te kunnen bewijzen tijdens de voorbereidingen van helikopter- of vliegtuigvluchten ten behoeve van remote sensing opnamen. Toch zijn, ondanks de weinig geslaagde toepassingen tot nu toe, de vooruitzichten gunstig. Veelbelovend onderzoek vindt o.a. plaats aan de Purdue universiteit te West Lafayette (USA). Met een spectroradiometer kan de invloed van allerlei omstandigheden (bemesting, plantdatum, rijafstand, vochtgehalte van de bodem, gewasvariëteit) op de spectrale signatuur van het gewas (tarwe, mais, sojaboon) vastgesteld worden. Deze spectrale veranderingen blijken bovendien gecorreleerd te zijn met gewaseigenschappen als de bladoppervlakte-index (LAI), opbrengst en drogestofgehalte (Daughtry

et al., 1980; Kollenkark et al., 1982; Walburg et al., 1982). Ongetwijfeld dwingen deze resultaten tot grotere aandacht voor de spectroradiometer als middel om schadelijke invloeden van luchtverontreiniging op planten te analyseren.

Het is niet te verwachten dat andere remote sensing technieken (thermische scanner, radar sensor, "video cassette recording") in de toekomst benut zullen kunnen worden. Er is nog veel fundamenteel onderzoek nodig, waarna de kans groot is dat ze ongeschikt zullen blijken. "Video cassette recording" is volgens Jano (1981) misschien geschikt om onkruidverspreiding te bestuderen, gewassen te identificeren en schade te detecteren. Er is nog geen alternatief gevonden voor de fotografische technieken. Er zijn nog veel problemen op te lossen alvorens de spectroradiometer en de multispectrale scanner als gelijkwaardige routinematig toepasbare technieken geïntroduceerd kunnen worden (Murtha, 1981; Sapp, 1981a, b).

4 Stand van zaken in diverse landen

Het zwaartepunt van het remote sensing onderzoek heeft vanaf het begin in de VERENIGDE STATEN gelegen. Het Amerikaanse onderzoek heeft deze voorsprong tot op heden behouden. Men deed met allerlei vegetatietypen (bossen, straatbomen, landbouwkundige gewassen) en technieken (luchtfotografie, multispectrale scanning, spectroradiometer, satellietbeelden) ervaring op (tabel 9). Met name zijn belangrijke resultaten geboekt bij de Forestry Service (in Berkeley; zie o.a. Wert, 1969 en in Missoula; zie Carlson, 1978), de Tennessee Valley Authority (in Chattanooga; zie Sapp, 1981a, b) en bij de Universiteit van Minnesota (in St. Paul; zie Lillesand et al., 1979).

In CANADA heeft Murtha veel onderzoek gecoördineerd. De nadruk viel hierbij op de analyse van schade aan de uitgestrekte, tamelijk eenvormige bossen van British Columbia. Onder deze omstandigheden voldeed luchtfotografie uitstekend en is voor routinetoepassing beschikbaar.

De stand van zaken in JAPAN is moeilijk te achterhalen. Het literatuuronderzoek leverde een tiental referenties van oudere, Japanstalige publikaties op. Slechts van een drietal kon de volledige tekst verkregen worden. De vertalingen leverden een verrassing op: in Japan blijkt men eerder succes te hebben gehad met de ratiotechniek (zie hoofdstuk "Beeldinterpretatie: methoden") dan elders. In de westerse literatuur ontbreken verwijzingen naar Japanse literatuur. Door dit vroege succes van de Japanners rijst de vraag hoe momenteel de stand van zaken in Japan is: gezien het vroege succes zou de toepassing van remote sensing er wel eens vergevorderd kunnen zijn.

In Europa is remote sensing per traditie veel toegepast in bergachtige landen met moeilijk toegankelijke bossen, zoals ZWITSERLAND en OOSTENRIJK. Bekende instituten zijn: Eidgenössische Anstalt für das Forstliche Versuchswesen in Birmensdorf en Forstliche Bundesversuchsanstalt in Wenen. Verscheidene bosgebieden in de buurt van zware industrieën in WEST- en OOST-DUITSLAND hebben te lijden gehad van immissies. Straatbomen ondergaan veel verkeersoverlast en zijn onderzocht in steden als Freiburg, Hamburg en Kiel. In WEST-DUITSLAND verrichtte men veel onderzoek aan de Afdeling Bosbouw van de Universiteit van Göttingen (Kenneweg, 1980, 1981).

In enkele andere Europese landen vond ook onderzoek plaats, maar op incidentele en minder systematische schaal (tabel 9). FRANKRIJK verwierf van deze landen de grootste bekendheid door onderzoek aan een gemengd bos bij Rouen (Larcher & Boullard, 1976). In ENGELAND lijkt men niet verder gekomen te zijn dan een vluchtige toetsing van de mogelijkheden (Van Genderen, 1974). In ZWEDEN viel de vergelijking met klassieke methoden (waarneming vanaf de grond en visuele waarneming

Tabel 9. Remote sensing onderzoek in de diverse landen ter analyse van schade aan planten als gevolg van luchtverontreiniging. De volgorde van de opgesomde landen is niet geheel willekeurig: eerst genoemd zijn de landen waar de meeste ervaring is opgebouwd.

Land	onderzoek verricht		bestudeerde vegetatie			remote sensing technieken		
	voor 1970	na 1970	bos	straat- bomen	landbouw- kundige gewas.en	luchtfo- tografie	spectro- radio- metrie	multi- spectrale scanning
<u>Buiten Europa:</u>								
Verenigde Staten	+	+	+	+	+	+	+	+
Canada	+	+	+			+		
Japan		+	+	+		+		
<u>Europa</u>								
Zwitserland		+	+			+	+	
West-Duitsland	+	+	+	+		+	+	
Oost-Duitsland	+	+	+			+		
Oostenrijk		+	+	+		+		+
Frankrijk		+	+			+	+	
Ver. Koninkrijk		+	+			+		
Zweden		+	+			+		
België		+				+		
Italië		+		+		+		
Nederland		+		+		+		

vanuit een helicopter) zowel wat kosten als wat prestatie betreft ongunstig uit (Radström, 1979). Ook in BELGIË en ITALIË (Locci & Galetto, 1980) is de toepassing van remote sensing in een pril stadium. Nederland sluit de rij. Luchtfoto's zijn gemaakt vanaf 1973 van straatbomen in o.a. Den Haag. Slecht geconditioneerde opnameomstandigheden bemoeilijkten de vergelijking van de foto's (Johansen, 1982). Gemeentelijke plantsoenendiensten zijn nog niet overgegaan tot een algemeen gangbare, eventueel gemeenschappelijke aanpak (Eikenaar & Loedeman, 1983a).

Op landelijk niveau zijn Zwitserland, Oostenrijk en West-Duitsland vergevorderd met de nationale coördinatie van remote sensing onderzoek. Erg belangrijk voor de voortgang in West-Europa is de internationale bundeling van instellingen tot de European Association of Remote Sensing Laboratoria (Earsel). Twee initiatieven van Earsel zijn vermeldenswaardig:

- a. Een enquête onder Europese instellingen met vragen over de toegepaste remote sensing technieken en over de oorzaak van de waargenomen aantastingen;
- b. Indienen van een subsidieaanvraag bij de Europese Commissie voor een gemeenschap-

pelijk project ter voorbereiding op de lancering in de "tachtiger jaren" van satellieten waarmee de vitaliteit van vegetaties vastgesteld kan worden. Omdat deze satellieten uitgerust zullen zijn met multispectrale scanners is het project vooral op deze techniek gericht. Maar ook vraagt men om ondersteuning van onderzoek naar de mogelijkheden van fotografische technieken en de spectroradiometer. Vraagstellingen van het project zijn:

- a. Wat zijn de verschillen tussen gezonde en aangetaste planten wat betreft spectrale signatuur;
- b. Op welk tijdstip treden verschillen op, en hoe zijn deze te detecteren;
- c. Wat is de fysiologische/morfologische oorzaak van het verschil in spectrale respons;
- d. Hoe moet een monitoring systeem ten behoeve van de gezondheidstoestand van vegetaties opgezet worden, en aan welke eisen moet het voldoen? Wat zijn de kosten van een dergelijk systeem;
- e. Welke methoden zijn het geschiktst om de data te interpreteren? Welke graad van nauwkeurigheid kan bereikt worden?

De grootste kans van slagen heeft het project indien er interdisciplinair en internationaal samengewerkt wordt. Nederlandse onderzoekers lijken marginaal of niet betrokken te zijn bij het voorlopige raamwerk van het project. Wel zijn er enkele Nederlandse laboratoria geregistreerd bij Earsel:

- a. ITC (International Institute for Aerial Survey & Earth Science) te Enschede (Kannegieter). Kannegieter en medewerkers houden zich bezig met o.a. luchtfotografie ter detectie en inventarisatie van gewasschade. Er schijnen enkele veelbelovende, maar voorlopige resultaten geboekt te zijn;
- b. Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium te Amsterdam (Bunnik en Verhoef). Bunnik en Verhoef houden zich bezig met o.a. de analyse van de spectrale signatuur van gewassen en de correlatie met biologische parameters. Zij maken hierbij gebruik van multispectrale scanning.

Overige instituten, die aangemeld zijn bij Earsel komen uit West-Duitsland, Oostenrijk, Frankrijk, Verenigd Koninkrijk, België en Italië. Opvallende afwezigen bij de Earsel registratie zijn Zwitserland, het land dat vergevorderd is met routinematige toepassing van remote sensing, en de Wageningse instellingen, waar remote sensing onderzoek plaatsvindt (Zie de appendix).

Bovenstaande gegevens zijn ontleend aan een Earsel rapport (Reichert et al., 1980) en dateren uit 1979. Mogelijk zijn deze gegevens al enigszins verouderd. Ondertussen heeft het bij de EG ingedierde Earsel voorstel een grote kans gehonoreerd te worden. Dit antwoordde de Europese Commissie op vragen van het Europese Parlement. Wel is als voorwaarde gesteld, dat eerst aangetoond moet worden dat infraroodfotografie de ver-

eiste betrouwbaarheid bezit (aldus een bericht in de dagbladen, bijv. "de Nieuwe Krant" van 11 augustus 1983).

Bij de EG staan momenteel 48 remote sensing projecten geregistreerd, waarvan er 28 de analyse van straatbomen, bossen of landbouwkundige gewassen ten doel hebben. Een beknopte beschrijving staat in de appendix. In de Verenigde Staten lopen minstens 175 remote sensing projecten met planten als onderzoeksobject. In de appendix is een selectie opgenomen en vermeldt projecten waarin de invloed van schadelijke factoren onderzocht wordt. Zeer interessante Amerikaanse projecten, bijvoorbeeld om inzicht te verkrijgen in factoren die de groei van gewassen bepalen en om oogstvoorspellingen te doen, zijn buiten de appendix gebleven. De appendix laat zien dat er momenteel in de Verenigde Staten twee en in West-Europa een remote sensing project is waarin het onderzoek naar de invloed van luchtverontreiniging op planten centraal staat. De overige projecten hebben vaak een ruimere omschrijving en kunnen interessante doelaspecten hebben. Nederland is binnen de EG zeer goed vertegenwoordigd met 11 beschrijvingen. De magere indruk, die van de Nederlandse inbreng verkregen is op grond van het geringe aantal publikaties (tabel 9) en het Earsel rapport (Reichert et al., 1980), wordt niet weerspiegeld in de appendix.

5 Kosten en baten

Er zijn geen nauwkeurige kosten-baten analyses verricht om met behulp van remote sensing methoden schade aan planten te evalueren (Watkins, 1978). Het vergelijken van remote sensing en traditionele methoden is zeer moeilijk omdat de uit deze methoden verkregen informatie sterk verschilt (Jano, 1981). Desondanks zijn er enkele publikaties die meer bijzonderheden geven dan bijvoorbeeld "hoge kosten" (Baum, 1974) of "te duur" (Stratmann, mededeling per brief, 1983).

Heller (1978) ondervond, dat de kosten van kleuren en kleureninfrarood luchtfotografie 5 à 20 X duurder waren dan van een analyse op grond van visuele waarneming uit een helicopter ("sketch mapping"). Ook Radström (1979) berekende een verschil in kosten tussen beide methoden, namelijk 0,81 Zweedse Kronen/ha voor fotografische luchtanalyse en 0,36 Zweedse Kronen/ha voor visuele luchtanalyse. Naar de mening van Radström (1979) waren de prestaties van de fotografische methode te pover om het verschil in kosten te rechtvaardigen.

Vollediger berekeningen zijn gepubliceerd door Wert (1969), Myers (1978) en Bradshaw & Chandler (1978). Zij geven een kostenlijst per projectonderdeel (huur vliegtuig, film + ontwikkelen, personele kosten van het veldonderzoek en van de fotointerpretatie, reken- en tekenwerk, etc.) en komen uit op 0,0033 Amerikaanse Dollar/ha, 0,39 \$/ha en 0,60 \$/ha respectievelijk. Dergelijke bedragen zijn uiteraard afhankelijk van de complexiteit van de schadeklassering, de opnameschaal en de grootte van het bestudeerde oppervlak. Slechts Bradshaw & Chandler (1978) vergeleken de kosten met die van een volledige terrestrische analyse. Een analyse, die volledig op veldstudie berustte, kwam op \$ 0,70/ha. Wel vermeldden Bradshaw & Chandler (1978) erbij dat een exacte kostenvergelijking moeilijk te maken is op grond van de verschillende graad van nauwkeurigheid (die van de luchtanalyse is groter dan die van veldanalyse, namelijk 88% ten opzichte van 33%). Scherrer et al. (1981) geven een schatting van de hoeveelheid tijd die een ervaren onderzoeker nodig heeft om met behulp van de grid-raster methode (zie hoofdstuk "Beeldinterpretatie: methoden") de schade (uitgedrukt in mortaliteit) in een bebost gebied te karteren. Zij kwamen uit op 6 à 10 dagen per 100 ha.

Kenneweg (1981) gaf een opsomming van de kosten om de schade van straatbomen te analyseren. De minimum kosten van één vlucht met aansluitende fotointerpretatie komen op 10.000 DM. Kenneweg (1981) berekende op grond van een aantal aannamen (een stadsboom is 1500 à 4000 DM waard, per jaar moet een stad 1% van dit bedrag per boom aan onderhoudskosten besteden. Hiervan is 3 à 8% ten behoeve van controle op schade. Stel dat 50% van deze controle per luchtfoto kan), dat steden met 200.000 of meer inwoners zich 1x per 5 jaar een luchtanalyse kunnen veroorloven.

De kostenberekening van het Earsel project om op Europees niveau met behulp van remote sensing vegetatieschade te detecteren omvat in totaal 981.000 DM.

Hierbij zijn inbegrepen salarissen en ondersteunend veldonderzoek. Niet alle te maken kosten zijn opgenomen, omdat er ook andere fondsen zijn, bijvoorbeeld afkomstig van de instituten waar de betrokken onderzoekers aangesteld zijn). Deze berekening omvat de eerste fase van het project, bedoeld om instrumentarium en procedures te standaardiseren ten behoeve van de tweede fase: het opzetten van een volledig monitoring systeem. De kosten, die de uitvoering van de tweede fase met zich meebrengt, worden niet genoemd (Reichert et al., 1980).

Hoewel multispectrale scanning nog in een experimenteel stadium verkeert, heeft Herinckx (1983) al ondervonden, dat deze techniek ten opzichte van luchtfotografie duur is. Hij komt, zonder bedragen te noemen, tot deze inschatting op grond van de veel ingewikkelder apparatuur en de veel grotere hoeveelheid gegevens, die geïnterpreteerd moeten worden.

Bovenstaande gegevens zijn nuttig, maar helaas onvolledig of verouderd. Zonder recente, gedetailleerde kosten-baten analyse kunnen we wellicht gebruik maken van berekeningen afkomstig van remote sensing toepassingen uit andere vakgebieden, zoals het voorspellen van oogstresultaten of het uitkiezen van bosopstanden met verhandelbaar hout (Watkins, 1978).

6 Aanbevelingen

Het aanbod van remote sensing publikaties met een onvolledige vermelding van technische en methodische bijzonderheden is groot. In veel gevallen zijn dit beschrijvingen van onvoldoende voorbereide experimenten met niet reproduceerbare resultaten en conclusies die slecht of niet onderbouwd zijn. Dit zijn voorbeelden hoe het niet moet. Het zou jammer zijn indien slecht uitgevoerde experimenten de weg afsluiten naar routinematige toepassing van remote sensing technieken. Er zijn namelijk ook zeer gedetailleerde en kritische rapportages, waaruit blijkt dat met remote sensing goede resultaten te behalen zijn. Met name kunnen de publikaties van enkele Amerikanen (Lillesand, Murtha en Sapp) en een Zwitser (Oester) aanbevolen worden.

Veel remote sensing literatuur is moeilijk op te sporen omdat gepubliceerd is in rapportvorm of in semiwetenschappelijke tijdschriften. Het is af te raden om de ontwikkelingen bij te houden uitsluitend door literatuurstudie. Aansluiting bij overkoepelende verenigingen zoals de European Association of Remote Sensing Laboratoria of the American Society of Photogrammetry en correspondentie met vooraanstaande onderzoekers of laboratoria (Remote Sensing Laboratory van de Universiteit van Minnesota, Institute for Application of Remote Sensing Techniques van de Purdue Universiteit, etc.) bieden extra waarborgen om op de hoogte te zijn van de laatste ontwikkelingen. De aan dit rapport toegevoegde appendix met namen en adressen kan hierbij behulpzaam zijn. Er zijn minstens drie onmisbare tijdschriften: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing (uitgegeven door de American Society of Photogrammetry), Remote Sensing of Environment, en de Remote Sensing Nieuwsbrief (uitgegeven door de Begeleidingscommissie Remote Sensing en de Kring voor Remote Sensing. De bibliotheekbijlage geeft een overzicht van veel nieuw verschenen literatuur). Het is te hopen, dat in de toekomst de rapportages van remote sensing studies terecht komen in beter toegankelijke kanalen dan tot nu toe het geval is.

Fotografische technieken zijn diepgaand onderzocht en er is veel ervaring mee opgebouwd. Fotografische technieken zijn nu op routineschaal toepasbaar. Zowel visuele als fotometrische methoden om opnamen te beoordelen zijn betrouwbaar gebleken. Kleureninfrarood films zijn favoriet, al zijn er enkele nadelen. Meestal vertonen de opnamen een schadebeeld, dat ook met het oog zichtbaar zou zijn geweest (chlorose, necrose, bladverlies, etc.). Het fotografisch vastleggen van pre- of extravisuele schade met behulp van kleureninfrarood film is mogelijk, maar er zijn weinig bevestigende rapportages (Puritch, 1981; Murtha & McLean, 1981). Het gebruik van een densitometer is onmisbaar voor het aantonen van niet-zichtbare schade en voor het cali-

breren en vergelijken van kleureninfrarood opnamen met een wisselende kwaliteit. Rood/infrarood blijkt de meest succesvolle ratio om luchtverontreinigingsschade aan planten aan te tonen. Spectrale kleurverschillen op foto's, die met het oog niet of nauwelijks zichtbaar zijn en ratio's kunnen met beeldverwerkingstechnieken (image enhancement techniques) geaccentueerd worden. Er zijn onlangs door Lillesand en medewerkers goede resultaten met beeldverwerkingstechnieken behaald (Lillesand et al., 1981; Lillesand & Meisner, 1982).

Het succes van spectroradiometers hangt in eerste instantie af van het gewas, hoe groter de spectrale gevoeligheid hoe groter de kans op succes. Economische motieven mogen niet uitsluitend bepalend zijn voor de keuze van de proefplant. Multispectrale scanners (aan boord van vliegtuigen of satellieten) zijn evenals spectroradiometers toegepast met wisselend succes. Technische verbeteringen, fundamentele onderzoeken naar de spectrale signatuur van planten en prijsverlagingen zijn nodig alvorens deze apparatuur een alternatief vormt voor camerasystemen.

De meeste remote sensing resultaten zijn behaald in landen met uitgestrekte bosgebieden zoals Canada, Verenigde Staten, Zwitserland, West-Duitsland en Oostenrijk. De bossen hadden vaak een homogene samenstelling en uniforme standplaatscondities. Nederland kent weinig uitgestrekte homogene bossen, zodat de in andere landen gebruikte apparatuur en methoden er niet zonder meer toepasbaar zijn. Een ervaren onderzoeker als Kenneweg (1980) vindt, dat remote sensing zelfs geen voorkeur geniet boven traditionele methoden in gebieden met kleine en goed ontsloten bosopstanden. Tenzij snel een overzicht van de schadetoestand, of een indruk van de schadeontwikkeling in de tijd vereist is of indien de schadeoorzaak complex en abiotisch van aard is.

In verreweg de meeste remote sensing projecten zijn straatbomen en bossen als studieobject gekozen. In gevallen waarin men een landbouwkundig gewas bestudeerde, was de rapportage te summier (Casalinuovo & Sawan, 1976 bijvoorbeeld) of waren de resultaten te mager (Sapp, 1981a, b). Men mag uit deze schaarse gegevens niet afleiden dat bomen geschikter zijn als proefobject. De magere resultaten van Sapp (1981a, b) berusten vooral op technische problemen met het film- en fotomateriaal en op de keuze van relatief ongevoelige testplanten. Dat veldgewassen goede proefobjecten kunnen zijn toonden experimenten met spectroradiometers aan (Walburg et al., 1982 bijvoorbeeld). Het bleek moeilijk om de vitaliteit van gewassen te bepalen en een schatting te geven van de te verwachten opbrengst. Ofschoon er tot nu toe nauwelijks remote sensing experimenten ter evaluatie van luchtverontreinigingsschade mee uitgevoerd zijn,

lijken veldgewassen voor een land als Nederland met weinig bos en veel cultuurgrond uitstekende proefobjecten.

Het aanwijzen van een schadeoorzaak uit remote sensing beelden is meestal niet mogelijk, tenzij er schade is aan een uitgestrekte, homogene vegetatie. Een remote sensing opname constateert dat er schade is, aanvullende veldwaarnemingen zijn noodzakelijk om het oorzakelijke agens te identificeren.

De schadeoorzaak is meestal complex door een wisselwerking van biotische en abiotische factoren (bodemgesteldheid, klimaat, ziekten, plagen en luchtverontreiniging). Het is een van de argumenten om de toepassing van remote sensing gemeenschappelijk en interdisciplinair aan te pakken. Andere argumenten zijn :

- a. Een kosten-baten analyse is moeilijk te maken en is bovendien niet geheel vergelijkbaar met die van andere methoden. Financiële risico's kunnen beter gedragen worden door een groter aantal projectdeelnemers;
- b. Om remote sensing beelden van verschillende plaatsen of uit verschillende jaren te kunnen vergelijken zijn afspraken noodzakelijk ter standaardisatie van de opnamen;
- c. De met behulp van remote sensing te bestuderen objecten kunnen onder de verantwoordelijkheid van verschillende autoriteiten vallen: gemeente, provincie, staatsbosbeheer, particulieren etc.);
- d. De analyse van remote sensing opnamen vraagt een uitgebreide kennis van de plantenmorfologie, fysiologie en de afwijkingen hiervan ten gevolge van schadelijke agentia. Een bundeling van botanische expertise zal de evaluatie van de resultaten vergemakkelijken.

Evaluatie van luchtverontreinigingsinvloeden op planten met behulp van Remote Sensing technieken

Samenvatting

In dit literatuuroverzicht valt de nadruk op technische en methodische details van remote sensing toepassingen in het bijzonder om ernst en omvang van luchtverontreinigingsschade aan planten te bepalen. De sterke en zwakke kanten van gebruikte technieken en methoden komen hierbij aan de orde, evenals de identificatie van valkuilen en foutenbronnen. Veel relevante publikaties zijn verschenen in rapportvorm of obscure tijdschriften. Het bemoeilijkt het vergaren van literatuurgegevens aanzienlijk. Een volledige opsomming van technische details ontbreekt meestal, conclusies zijn vaak onvoldoende experimenteel onderbouwd.

Wel grondig voorbereide en uitgevoerde experimenten tonen aan, dat remote sensing even betrouwbaar is als traditionele methoden (berustend op veldwaarnemingen) om vegetatieschade te beoordelen. Enkele veldwaarnemingen blijven noodzakelijk omdat de schadeoorzaak meestal niet afleesbaar is van de remote sensing opnamen. Tot nu toe zijn de enige succesvolle studies verricht met fotografische technieken. Groot-schalige (1:500 à 1:6000) stereopaar opnamen met 70 à 230 mm camerasystemen en kleureninfrarood films leveren betrouwbare gegevens op over de vitaliteitstoestand van de vegetatie. Analyse van het opnamemateriaal gelukte met zowel visuele als fotometrische interpretatiemethoden. Beeldverwerkingstechnieken (image enhancement techniques) zijn weinig gebruikt, maar zeer recent met succes ingezet. Als onderzoeksobject koos men meestal naaldbossen of straatbomen, slechts bij uitzondering veldgewassen. De overige remote sensing technieken overziend biedt de spectroradiometer de beste vooruitzichten: veelbelovend onderzoek is verricht ter analyse van de groei van veldgewassen. Multispectrale scanners aan boord van vliegtuigen of satellieten zijn voorlopig niet gelijkwaardig aan camerasystemen.

Er zijn geen volledige kosten-baten analyses gepubliceerd. Berekeningen tonen aan dat fotografische remote sensing analyses goedkoper zijn dan die welke berusten op veldwaarnemingen.

Summary

This report reviews technical and methodical details of remote sensing to assess damage to vegetation particularly caused by air pollution. Special emphasis is given to the weak and strong points of the technique, as well as to pitfalls and bias factors.

Many relevant articles have been published in obscure journals or in report form. This complicated considerably the retrieval of relevant literature. Most publications lack a complete compilation of technical and methodical details, moreover conclusions are often based on insufficient experimental evidence.

Well prepared and well executed experiments show that remote sensing is as reliable as traditional methods, which are based on field survey. Some field observation remains necessary, however, as the causal agent usually cannot be identified from the remote sensing image. Until now, successful studies have only been performed with the aid of photographic techniques. Large scale (1:500 to 1:6000) stereopair photo's from 70 to 230 mm camera systems using colour infra-red films give a reliable indication of the vitality of vegetations. Both visual and photometric methods used in support of the photointerpretation have shown significant results. Image enhancement techniques have not been applied frequently, but have recently shown good performance. Coniferous woods and trees of urban areas were frequently chosen as objects of study; field crops were rarely chosen. Of the remaining remote sensing techniques, spectroradiometry is the most promising: results include the analysis of the growth status of field canopies. Multispectral scanners on aircraft or satellites cannot yet compete with photographic techniques. No detailed cost-benefit analyses have been published. Calculations show that photographic remote sensing methods are cheaper than field-based methods.

7 Literatuurlijst

- Baum, F. Ermittlung von Fluorschädde an einer Lindenallee in unmittelbarer Nähe einer Ziegelei bei Ismaning durch Blattanalysen und Luftaufnahmen in Falschfarbentechnik. Gesundheits-Ingenieur 95(1974)9, p. 259 - 261, 5 afb.
- Benson, M.L.; Sims, W.G. False color film fails in practice. Journal of Forestry, p. 904, volume en jaartal onbekend.
- Bouwmans, J.M.M. Remote sensing, wat is het en wat heeft de HBCS-er er aan. Nota nr. 1346 van het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (1982), 73 p., afbn.
- Bradshaw, F.J.; Chandler, R.J. Full scale coverage at large scale. Proceedings of the symposium on Remote Sensing for Vegetation Damage Assessment (1978), p. 267 - 290.
- Carlson, C.E. The use of infrared aerial photography in determining fluoride damage to forest ecosystems near an aluminium plant in Northwestern Montana, USA. Fluoride 11(1978)3, p. 135 - 141, 3 afb.
- Casalinuovo, A.F.; Sawan, A. Infrared photography as an air pollution surveillance instrument. Journal of the Air Pollution Control Association 26(1976)6, p. 585 - 587.
- Croft, F.C.; Heller, R.C.; Hamilton, D.A. How to interpret tree mortality on large-scale color aerial photographs. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT 84401. General Technical Report INT-124 (1982), 13 p.
- Dave, J.V. Effect of atmospheric conditions on remote sensing of vegetation parameters. Remote sensing of environment (1980)10, p. 87-99.
- Daughtry, C.S.T. et al. Effects of management practices on reflectance of spring wheat canopies. Agronomy Journal 72(1980) nov.-dec., p. 1055-1060.
- Debrock, K.; Verduyn, G. Densitometric analysis of colour aerial photographs - a new approach. Photogrammetria 35(1980), p. 163 - 177.
- DeMars, C.J.; Slaughter, G.W.; Greene, L.E.; Ghent, J.H. Mapping pine mortality by aerial photography, Umstead State Park, North Carolina. USDA Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station. Research Paper PSW-158 (1982), 14 p.
- Eikenaar, G.J.; Loedeman, J.H. Remote sensing en straatbomen (II). NGT Geodesia 25 (1983a)7/3, p. 221 - 226, afbn.

* Namen van tijdschriften, indien bekend, zijn voluit geschreven.

- Eikenaar, G.J.; Loedeman, J.H. Remote sensing en straatbomen (III). NGT Geodesia 25 (1983b)9, p. 266 - 281.
- Fritz, E.L.; Pennypacker, S.P. Attempts to use satellite data to detect vegetative damage and alteration caused by air and soil pollutants. *Phytopathology* 65(1975), p. 1056 - 1060, afb.
- Gaucher, D.; Walker, J.E.; Schott, J.R. Applications of photometric process in monitoring vegetation damage due to external stress. Proceedings of symposium on Remote Sensing for Vegetation Damage Assessment (1978), p. 135 - 159.
- Gausman, H.W. et al. Ozone damage detection in cantaloupe plants. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 44(1978), p. 481 - 485.
- Genderen, J.L. van. Remote Sensing of environmental pollution on Teesside. *Environmental Pollution* 6(1974), p. 221 - 234.
- Hall, R.J. Summary and discussion. In: Uses of remote sensing in forest pest damage appraisal. Report NOR-X-238 of Northern Forest Research Centre, Edmonton (1981), p. 54 - 60.
- Harney, B.M.; McCrea, D.H.; Forney, A.J. Aerial detection of vegetation damage utilizing a simple 35 mm. camera system. *Journal of the Air Pollution Control Association* 23(1973)9, p. 788 - 790.
- Heller, R.C. Case applications of remote sensing for vegetation damage assessment. Proceedings of symposium on Remote Sensing for Vegetation Damage Assessment (1978), p. 231 - 252.
- Henninger, J.; Hildebrandt, G. Bibliography of Publications on Damage Assessment in Forestry and Agriculture by Remote Sensing Techniques. 2nd enlarged edition. Freiburg (1980), 280 p.
- Herinckx, L.C. Remote sensing en straatbomen (I). NGT Geodesia 25(1983)6, p. 188 - 192.
- Johansen, H.L. False color and urban tree stress. Assessment by means of density measurements. Uitgegeven door de auteur (1982), 133 p.
- Jano, A.P. Practical applications of remote sensing for forest pest damage appraisal. Proceedings of a seminar on 8 Mai 1981 in Edmonton (Alberta, Canada). Report NOR-X-238 of Northern Forest Research Centre, Edmonton (1981), p. 30 - 39.
- Kanagawa Prefecture Environmental Pollution Counter-Measures Bureau. Local evaluation of air pollution by remote sensing. Rep. Invest. Res. Air Pollution Kanagawa Prefecture no. 17(1975), p. 88 - 102, afbn.
- Katzmann, W. Die Stadsvegetation im Infrarotbild. Mitteilungen der forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien 135(1981), p. 141 - 146.

- Kenneweg, H. Das Infrarot-Luftbild und seine Anwendung bei der Invertur des städtischen Grüns und der Ermittlung seines Vitalitätszustandes. Diskussionsbeiträge bei der Informationsveranstaltung am 20. November 1978 in Wiesbaden (1979), p. 28 - 38.
- Kenneweg, H. Luftbildinterpretation und die Bestimmung von Belastung und Schäden in vitalitätsgeminderten Wald- und Baumbeständen - Verfahren, Möglichkeiten und Grenzen des operationellen Luftbild-Einsatzes. Schriften aus der Forstlichen Facultät der Universität Göttingen Band 62(1980), 223 p. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a/M.
- Kenneweg, H. Luftbildinverturen und Zustandsveränderungen von belasteten Stadtbaumbeständen. 10. Ökologie-Forum (1981), p. 14 - 27. Hamburg.
- Kodak data for aerial photography (1982), 137 p. Kodak publication no. M-29, 5th edition, ISBN 0 - 87985 - 298 - 4.
- Kodak filters for scientific and technical uses (1981), 92 p. Kodak publication no. B - 3. ISBN 0 - 87985 - 282 - 8.
- Kollenkark, J.C. et al. Effects of cultural practices on agronomic and reflectance characteristics of soybean canopies. Agronomy Journal 74(1982), jul.-aug., p. 751 - 758.
- Krause, G.H.M.; Prinz, B.; Adamek, K. Falschfarbenfotografie - Ein Mittel zur Erkennung von Pflanzenschäden. LIS Berichte 7(1980), 22 p., afbn., tabn., grafn., fign.
- Larcher, G.; Boullard, B. Photography aerienne fausse couleur - carte phytosanitaire d'un massif forestier. Paper presented at the XIVth IUFRO World Congress. Oslo, june 1976, 7 p., 1 kaart.
- Lillesand, T.M.; Brock, R.H.; Roberts, J.L.; Johnson, W.L. Tree stress detection through spectral ratioing of color film records. In: Proceedings 5th Biennial Workshop Color Aerial Photography of Plant Sciences. American Society for Photogrammetry, Falls Church (1976), p. 79 - 107.
- Lillesand, T.M.; Eav, B.B.; Manion, P.D. Quantifying urban tree stress through microdensitometric analysis of aerial photography. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 45(1979)10, p. 1401 - 1410.
- Lillesand, T.M.; Meisner, D.E. Application of scanning microdensitometer data in selected plant-science case studies. Journal of Applied Photographic Engineering 8(1982)1, p. 40-45. Bevat kleurenfoto's.
- Lillesand, T.M.; Meisner, D.E.; French, D.W.; Johnson, W.L. Evaluation of digital photographic enhancement for Dutch Elm Disease detection. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 48(1981)11, p. 1581 - 1592.

- Locci, R.; Galetto, R. Investigations on the pathology of trees V. Use of "false colour" aerial photography on *Platanus* lined streets in Milan. *Rivista di Patologia Vegetale* 16(1980)3/4, p. 145 - 159. (Abstract + titel beoordeeld).
- Marschalek, H. Measurement of vegetation stress by a multispectral scanner as a basis for air quality maps. *Proceedings of the 10th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. Ann Arbor (1975)1, p. 283 - 291.
- Murtha, P.A. Detection and Analysis of Vegetation Stress. *Proc. of a seminar on 8 mai 1981 (Edmonton Alberta)* Published as Report NOR-X-238 of Northern Forest Research Centre, Edmonton. tabn., afbn.
- Murtha, P.A. ERTS records SO₂ fume damage to forests, Wawa, Ontario. *The Forestry Chronicle* 49(1973)6, 2 p., afb.
- Murtha, P.A. A guide to air photo interpretation of forest damage in Canada. *Canadian Forestry Service Publication no. 1292, Ottawa (1972), 63 p., afbn., (kleur)*.
- Murtha, P.A. Some air photo scale effects on Douglas-fir damage type interpretation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 49(1983)3, p. 327 - 335, afbn. (kleur).
- Murtha, P.A. Vegetation damage and remote sensing: principal problems and some recommendations. *Photogrammetria* 32(1976), p. 147 - 156.
- Murtha, P.A.; McLean, J.A. Extravisual damage detection ? Defining the standard normal tree. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 47(1981)4, p. 515 - 522.
- Myers, B.J. Remote sensing of vegetation damage to assess the effectiveness of prescribed burning in Australia. *Proceedings Symposium on Remote Sensing for Vegetation Damage Assessment (1978)*, p. 497-509.
- Myers, B.J.; Bird, T. Detection of a crown dieback in Australian eucalypt forests on large scale aerial photographs. *Proceedings Symposium on Remote Sensing for Vegetation Damage Assessment (1978)*, p. 291 - 297.
- Oester, B. Signatures spectrales des aiguilles de pins sylvestres. *Proceedings of a teledetection conference. Avignon 8-11 september (1981), paper 1.12, p. 191-199.* 199.
- Oester, B.; Flühler, H.; Scherrer, H.U. Beurteilung der Föhren Vitalität (*Pinus Silvestris*) anhand von großmaßstäblichen Infrarot-Luftbildern. *Mitteilungen des Eidgenössische Anstalt für das Förstliche Versuchswesen* 57(1981)4, p. 453-477, afbn. (kleur).
- Pelz, E.; Perlwitz, W.; Haberman, R. Rationelle Intensivinventuren dew Schädigungszustandes rauchgeschädigter Fichtenbestände mit falschfarbigen Luftbildern. *Beiträge für den Forstwirtschaft (1977)1, p. 1-7.*

- Pollanschütz, J. Grossräumige Immissionskartierung in Steiermark und Tirol mit Falschfarbenluftbilder. Mitteilungen der Förstlichen Bundesversuchsanstalt Wien 135(1981), p. 125-133, fig.
- Puritch, G.S. Nonvisual remote sensing of trees affected by stress. Forestry Technical Report nr. 30(1981), 38 p., Canadian Forestry Service. ISBN 0 - 662 - 10900 - 7.
- Radström, L. Skadeinventering fran luften svarare än väntet. Skogen 6(1979), p. 44 - 45.
- Reichert, P. et al. (eds). Potential of multispectral remote sensing systems (visible and IR) for the detection of vegetation stresses. Report of the EARSEL working group V, sponsored by the Joint Research Center of the Commission of the European Communities (1980), 134 p., afbn.
- Sapp, C.D. Detecting the effects of sulfurdioxide emissions on vegetation by remote sensing. Proceedings of the Symposium on Remote Sensing for Vegetation Damage Assessment (1978), p. 381 - 400, afbn.
- Sapp, C.D. Remote Sensing of sulfurdioxide effect on vegetation. Final report I summary, 24 p., (1981a), NTIS report TVA/ONR/ARP-81/5.
- Sapp, C.D. Remote Sensing of sulfurdioxide effects on vegetation. Final report II data, 269 p., (1981b), NTIS report TVA/ONR/ARP-81/6. afbn. (kleur).
- Sapp, C.D.; Jones, H.C. Remote Sensing of sulphurdioxide effects on vegetation. Presented at EPA Energy/Environment II Conference, Washington DC (1977), p. 417 - 421.
- Scherrer, H.U.; Flühler, H.; Mahrer, F. Alternative Verfahren für die Interpretation von Föhrenschäden (*Pinus Silvestris L.*) auf Mittelmäßstäblichen Infrarot-Farbaufnahmen. Mitteilungen des Eidgenössische Anstalt für das Förstliche Versuchswesen 57(1981)4, p. 433 - 452.
- Scherrer, H.U.; Flühler, H.; Mahrer, F.; Bräker, O.U. A sampling technique to assess site, stand and damage characteristics of pine forest on CIR aerial photographs. Proceedings XIV Congress International Society for Photogrammetry Hamburg (1980), p. 1 - 8.
- Schopfhausen, K.S. Grossräumige Erhebung von Immissionszonen mit Infrared-Film in der Steiermark. Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien 131 (1980), p. 33 - 43, tab.
- Tomiczek, C. Untersuchungen über Ausdehnung und Intensität des Kiefernsterbens mittels IR-Film. Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien 135 (1981), p. 135 - 139.

- Vick, C.M.; Handley, J.F. Survey of damage to trees surrounding a chemical factory, emitting phosphoric and hydrochloric pollution. *Environmental Health* (1977) mei, p. 115 - 117.
- Walburg, G. et al. Effect of Nitrogen nutrition on the growth, yield and reflectance characteristics of corn canopies. *Agronomy Journal* 74(1982), jul-aug., p. 677 - 683.
- Watkins, T. A survey of two conferences on the economics of remote sensing with special emphasis on remote sensing of vegetation. *Proceedings Symposium on Remote Sensing for Vegetation Damage Assessment* (1978), p. 401 - 415.
- Wert, S.L. A system for using remote sensing techniques to detect and evaluate air pollution effects on forest stands. *Proceedings 6th International Symposium on Remote Sensing of Environment vol. II. Ann Arbor* (1969), p. 1169 - 1178.
- Williams, P.G. Wingtip stereo photography. *Proceedings of Symposium on Remote Sensing for Vegetation Damage Assessment* (1978), p. 127 - 134, afb.
- Yabriki, K.; Aoki, M. Ecological survey of plant activity by aerial infrared colour photography. *Journal of Japanese Society of Air Pollution* 8(1973)3, p. 596, afbn.
- Zirm, K.L. Fernerkundungsverfahren im Umweltschutz. *Proceedings Symposium Osterreichisches Symposium Fernerkundung. Mitteilungen der Forstlichen BundesVersuchsanstalt Wien* 135(1981), p. 51-59, 2 foto's, 1 kaart.
- Zealear, K.A.; Heller, R.C.; Norrick, N.X.; Wilkes, M. The feasibility of using color aerial photography to detect and evaluate sulphurdioxide injury to timber stands. *USDA Forestry Service, Pacific Southwest and Range Experiment Station, Berkeley, California. Progress Report* (1971), 35 p., bevat originele foto's (kleur en zwart/wit).

Appendix. Lijst van remote sensing projecten die een raakvlak hebben met onderzoek ter analyse van luchtverontreinigingseffecten op planten.*

Verenigde Staten

- Manion, P.D., T.M. Lillesand & R.H. Block: Multispectral photographic remote sensing system to expedite detection of tree stress in urban environment. College of Environmental Science & Forestry, Syracuse, New York 13210.
(*multispectrale scanning, luchtfotografie, kleureninfrarood films, microdensitometer, straatbomen, Esdoorn, verkeersoverlast*).
- Colwell, R.N.: Aerial photo specifications for forestry. Agricultural Experiment Station, Berkeley, California 94720.
(*luchtfotografie, zwart-wit film, kleurenfilm, spectrofotometrie, satelliet-beelden, bossen, onkruid- en plaagbestrijding*).
- Taylor, J.E.: Monitoring plant community changes due to fossil fuel power plants in Eastern Montana. Montana State University Dept. of Animal and Range Science, Bozeman, Montana 59715.
(*luchtfotografie*).
- Sapp, C.D. & H.C. Jones: Remote sensing of SO₂ effects on vegetation. Tennessee Valley Authority, 401 Chestnut Street, Room 268-248, 401 Building, Chattanooga, Tennessee 37401.
(*luchtfotografie, kleuren- en kleureninfrarood films, calibratie, bossen, gewassen*).
- Schreuder, G.F.: Forest protection. University of Washington, Seattle, Washington.
(*o.a. luchtfotografie, effect luchtverontreiniging*).
- Curry, G.L.: Development of a stress warning model for soybean crops. Texas A & M University, College Station, Texas.
(*o.a. remote sensing*).
- Gausman, H.W.: Remote sensing for improved soil and crop management. USDA-ARS subtropical Agricultural Laboratory, P.O. Box 267, Weslaco, Texas.
(*o.a. effect van verontreiniging*).
- Leone, I.A.: Injury to vegetation by air pollutants. Rutgers University, New Brunswick, New Jersey.
(*o.a. remote sensing, groenten, siergewassen, houtige gewassen, ozon, zwavel-dioxide*).
- Abrahamson, L.: Evaluation of New York's integrated pest management system for gypsy moth. College of Environmental Sciences and Forestry, Syracuse, New York 13210.
(*o.a. remote sensing*).
- Hedden, R.L.: Integrated pest management program for bark beetles of southern pines. Clemson University, Clemson.
(*luchtfotografie*).
- Blasquez, C.H.: Application of remote sensing technology to florida citrus production and other crops. Agricultural Research & Education Institute, Quincy, Florida.
(*luchtfotografie, kleureninfrarood films*).
- Dively, G.P.: Decision making and biological monitoring methodology for field crop pest management. University of Maryland, College Park, Maryland.
(*o.a. remote sensing*).
- Morton, H.L.: Diseases of shade and ornamental trees in urban forests. University

* Bronnen: Current Research Information System of the United States Department of Agriculture en Agricultural Research Projects in the European Communities. Alle beschrijvingen bevatten de naam van de onderzoeker(s) en de projecttitel. Indien bekend zijn adressen en verduidelijkende trefwoorden (cursief) toegevoegd.

of Michigan, Ann Arbor, Michigan.

(o.a. *remote sensing*).

Peterson, G.W.: Interdisciplinary applications and interpretations of remotely sensed data. Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania.

(o.a. *per vliegtuig, satelliet, gewassen, bossen*).

Cobb, F.W.: Ecology, Impact and Control of Root pathogenic fungi of forest trees. University of California, Berkeley, California.

(o.a. *remote sensing*).

Paul, J.T.: Forestry weather data systems. Southern Forest Fire Laboratory, Macon, G.A.

(o.a. *remote sensing, luchtverontreiniging*).

Kulman, H.M.: Management of the Yellowheaded spruce sawfly in white spruce plantations. University of Minnesota, St. Paul, Minnesota.

(o.a. *remote sensing*).

België

D'Hoore, J, R. Gombeer, N. Sougnez, H. Gulinck & A.M. Ceusters: Landbouwkundige en ecologische interpretatie van teledetectie-gegevens.

Faculteit der Landbouwwetenschappen van de Katholieke Universiteit te Leuven.

Kardinaal Mercierlaan 92, 3030 Leuven.

Bondsrepubliek Duitsland

Hildebrandt, G & J. Schaden: A multistage sampling design for large area forest inventories using remotely sensed data. Universität Freiburg, Institut für Forsteinrichtung und Forstliche Betriebswirtschaft, Abteilung Luftbildmessung und -interpretation, 7800 Freiburg, Erbprinzenstrasse 17A.

Hildebrandt, G. & J. Henninger: Time series of forest stand development from aerial photo interpretation. Adres: zie hierboven.

Kramer, H. & A. Akca: Methodical improvements of forest stand mapping and forest inventory by means of computer aided photogrammetric methods and remote sensing data. Universität Göttingen, Institut für Forsteinrichtung und Forstliche Ertragskunde, 3400 Göttingen, Büsgenweg 5.

Kenneweg, H. & E. Kuersten: Sequential inventories by aerial photography of urban tree and vegetation stands and their relevance to research and planning in urban ecology. Adres: zie onder Kramer, H.

Kramer, H. & A. Akca: Survey of stock and increment in Norway spruce with the help of aerial photographs. Adres: zie onder Kramer, H.

Kramer, H. & H. Spellmann: Forest inventory in scotch pine stands with the help of aerial photographs. Adres: zie onder Kramer, H.

Denemarken

Jensen, H.E., S.E. Jensen & U.O. Mogensen: Evapotranspiration and biomass production models developed for remote sensing. Royal Veterinary and Agricultural University, Buelowsvej 13, 1870 Kopenhagen.

Frankrijk

Guyot, G.: Study of apparatus and experiment methods for ground tests of remote sensing. INRA, Centre de Recherches d'Avignon. Station de Bioclimatologie, Domaine Saint Paul, 84140 Montfavet, Vaucluse.

- Malet, P., G. Guyot & B. Sequin: Use of remote sensing data in yield forecasting models. Adres: zie onder Guyot, G.
- Verbrugge, M., R. Antonioletti, G. Guyot, B. Sequin, P. Boissard & C. Goillot: Crop radiometric properties in relation to possible use of remote sensing for following phenology in relation with climate. Adres: zie onder Guyot, G. (*druif*).
- Guyot, G., G. Saint, A. Killmayer, G. Flouzat, T. Le Toan & M. Huet: Relations between crop canopies structure and remote sensing data. Adres: zie onder Guyot, G.
- Guyot, G., E. Pochard, M.C. Daunay, P. Delabreze, A. Panis & C. Baldy: Optical properties of leaves in the visible and near infrared. Adres: zie onder Guyot, G.
- Riom, J., G. Guyot & P. Boissard: Remote sensing of vegetation damage in forests. INRA, Centre de Recherches de Bordeaux, Laboratoire de Sylviculture et d'Ecologie de la Pinede Landaise. Domaine de la Grande Ferrade, Point de la Maye, 33140, Villenave d'Ornon, Gironde.
- Andrieu, B. & N. Decourt: Evaluation of informational content of remotely sensed data in forestry. INRA Centre National de Recherches Agronomiques. Station de Bioclimatologie. Etoile de Choisy, Route de Saint Cyr, 78000 Versailles, Yvelines.

Italië

- Paganucci, L., L. Hermanin, O. La Marca & M. Massei: Aerial and ground photogrammetry in forest inventory. Università Degli Studi di Firenze, Istituto di Assestamento Forestale, Piazzale delle Casine 18, 50144 Firenze.

Nederland

- Dulk, J.A. den.: Software ontwikkeling betreffende oogstvoorspellingen met behulp van remote sensing informatie. Centrum voor Agrobiologisch Onderzoek, Postbus 14, 6700 AA Wageningen en Landbouwhogeschool, Vakgroep Theoretische Teeltkunde, Postbus 8071, 6700 EN Wageningen.
- Lebouille, M.F.M.; Nies, N. de.: Vegetatiekartering en de schatting van hoeveelheid gewas op stam. Centrum voor Agrobiologisch Onderzoek, Postbus 14, 6700 AA Wageningen.
- Kasteren, H.W.J. van.: Inschakeling van beeldverwerkingstechnieken bij de interpretatie van remote sensing gegevens. Adres: zie Lebouille, M.F.M.
- Lamers, J.G.: Onderzoek naar de mogelijkheden van remote sensing technieken ten behoeve van het landbouwkundig onderzoek. Proefstation voor de Akkerbouw en de Groenteteelt in de Vollegrond, Postbus 430, 8200 AK Lelystad.
- Nieuwenhuis, G.J.A.: Droogteschade indicatie aan bosopstanden en laanbeplanting met behulp van remote sensing technieken in verband met een bronbemaling bij de aanleg van een tunnel in de Goorstraat onder rijksweg 15 nabij Doetinchem. Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Postbus 35, 6700 AA Wageningen.
- Wirdum, G. van.: Remote sensing bij onderzoek ten behoeve van het natuurbeheer. Rijks Instituut voor Natuurbeheer, Kemperbergerweg 67, 6816 RM Arnhem.
- Hoekman, D.H.: Radar remote sensing als hulpmiddel bij bosinventarisatie. Landbouwhogeschool, Vakgroep Boshuishoudkunde, Postbus 342, 6700 AH Wageningen.
- Loedeman, J.H.: Multispectrale luchtfotografie met niet-metrische camera's. Landbouwhogeschool, Vakgroep Landmeetkunde, Postbus 339, 6700 AH Wageningen.
- Corsten, L.C.A.: Teledetectie bij akkerbouwveldproeven. Landbouwhogeschool, Vakgroep Wiskunde, Postbus 8003, 6700 EB Wageningen.
- Damste, B.R.: Berekening van reflectie van microgolven door bomen. Adres: zie Corsten, L.C.A.

Eerden, L. van der.: Evaluatie van luchtverontreinigingsinvloeden op planten met behulp van remote sensing technieken. Instituut voor Plantenziektenkundig Onderzoek, Postbus 9060, 6700 GW Wageningen.

Verenigd Koninkrijk

Robertson, R.A.; Stove, G.C.: Contractual applications of remote sensing for natural resource surveys and environmental monitoring. Department of Agriculture and Fisheries for Scotland. Chesser House, 500 Gorgie Road, Edinburgh, EH11 3AW.

Hooper, A.J.: Development of aerial photography for agricultural research purposes. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food. Agricultural Development and Advisory Service, Room 201. Great Westminster House, Horseferry Road, London SW1P 2AE.