432-B/1990-01

H.J. Buiten, J.G.P.W. Clevers (red.)

BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW

# Remote Sensing, theorie en toepassingen van landobservatie

Dynamiek, inrichting en beheer van landelijke gebieden 2

**Pudoc** Wageningen 1990

20 APR. 1990

CIP-Gegevens Koninklijke Bibliotheek, Den Haag

Remote sensing, theorie en toepassingen van landobservatie / H.J. Buiten, J.G.P.W. Clevers (red.). - Wageningen : Pudoc. – ill. – (Dynamiek, inrichting en beheer van landelijke gebieden ; 2)
Met reg.
ISBN 90-220-1021-X geb. ISSN 0924-5758
SISO 519.2 UDC 528.8 NUGI 672
Trefw.: remote sensing.

© Pudoc, Centrum voor Landbouwpublikaties en Landbouwdocumentatie, Wageningen, 1990.

Niets uit deze uitgave, met uitzondering van titelbeschrijving en korte citaten ten behoeve van een boekbespreking, mag worden gereproduceerd, opnieuw vastgelegd, vermenigvuldigd of uitgegeven door middel van druk, fotokopie, microfilm, langs elektronische of elektromagnetische weg of op welke wijze ook zonder schriftelijke toestemming van de uitgever Pudoc, Postbus 4, 6700 AA Wageningen. Voor alle kwesties inzake kopiëren uit deze uitgave: Stichting Reprorecht, Amstelveen.

## Abstract

Buiten, H.J., & J.G.P.W. Clevers (eds), 1990. Remote Sensing, theorie en toepassingen van landobservatie (Remote Sensing, theory and applications of land observation), Series 'Dynamiek, inrichting en beheer van landelijke gebieden', part 2.
ISBN 90 220 1021 X, ISSN 0924-5758, 504 pp.: 212 figs, 38 tables, 22 colour plates, 10 supplements, glossary.

This textbook is composed of contributions by 25 authors. It is an introduction to remote sensing at university level.
In part A, the theory and philosophy of remote sensing are described: remote sensing as a source of land information, physical aspects, instrumentation, data acquisition, modelling of object-sensor relationships, digital image processing, structural pattern recognition, image-matching techniques and geographical information systems.
In part B, applications of remote sensing are described, with special attention to land inventory and monitoring of land dynamics in the field of:
agriculture, forestry, land evaluation, agrohydrology and irrigation, nature management and pollution control.

Free descriptors: image processing, pattern recognition, geographical information systems, monitoring of land use and environmental pollution.

# Woord vooraf

De inhoud van het boek stoelt op een postacademische cursus die in 1987 en herhaald in 1988 te Wageningen werd gegeven voor afgestudeerden van het hoger beroeps- en het wetenschappelijk onderwijs. De waardering voor deze cursus lag zo hoog en de vraag naar het cursusmateriaal was zo algemeen, dat besloten werd tot een grondige redactionele bewerking van de cursusvoordrachten en tot uitgave als handboek. Ook internationaal is er geen boek aan te wijzen dat zo toegesneden is op de verbinding van de theorie van Remote Sensing en de praktijk van toepassingssectoren. Op de niveaus van hoger en universitair onderwijs mag dit boek als het eerste Remote Sensing boek worden beschouwd dat in het Nederlandse taalgebied wordt uitgegeven.

Het boek biedt, vanuit een wetenschappelijke achtergrond, een introductie in de begrippenwereld van de Remote Sensing voor een ieder die (nationaal of internationaal) in de 'land'-sector in het onderzoek, bij de uitvoering van ingenieursprojecten of bij andere werkzaamheden van zijn of haar dienst, schap of instelling, Remote Sensing als hulpmiddel wil gebruiken of geïnteresseerd is in de resultaten ervan. Niet in 't minst ook zij die bij de beleidsvorming in de sectoren van landbouw, landgebruik, natuurbeheer en milieu-beleid betrokken zijn, zullen hun winst kunnen doen met dit boek.
Het boek is zodanig geredigeerd dat het als handboek of leerboek op verschillende niveaus van onderwijs kan worden gebruikt, hetzij in detail hetzij in grote lijnen, naar gelang de gewenste diepgang of de didactische gerichtheid van de onderwijsinstelling.

Aan reeds afgestudeerden die zich alsnog in de Remote Sensing willen inwerken, biedt het boek alle gelegenheid dit te doen. Op basis van dit boek zullen zij in staat zijn de Remote Sensing vakliteratuur te verstaan. Ook zij die al gespecialiseerd zijn in een beperkt deel van het brede veld van de Remote Sensing, zijn met dit boek in de gelegenheid hun kennis te verbreden, zodat meer visie kan worden verworven.

De aardobservatie is één van de *speerpunten* in het Nederlandse wetenschapsbeleid. Internationaal is er veel beweging en ontwikkeling op dit vlak. In het groeistadium waarin de Remote Sensing zich thans bevindt, is er dringend behoefte aan mensen die constructieve en creatieve bijdragen kunnen leveren aan de ontwikkeling van de Remote Sensing tot een algemeen aanvaarde, operationele aanpak van doelgerichte informatieverkrijging, geïntegreerd met andere bronnen van kenniswerving voor de objecten van het aardoppervlak. Het boek beoogt daartoe een handreiking te geven en de basis te leggen voor een goede denkhouding bij het gebruiken van Remote Sensing.

Tenslotte is het een genoegen hier het aandeel van anderen in de produktie van het boek te verantwoorden.
Allereerst gaat onze dank uit naar de mede-auteurs die in het kader van de postacademische cursus 'Remote Sensing in landbouw, natuur- en milieubeheer' met hun deskundigheid en hun enthousiasme hebben bijgedragen aan het basismateriaal voor dit boek. Mede dankzij de organisatorische talenten van directeur en medewerkers van het Bureau PHLO te Wageningen werd de cursus-syllabus een goede start voor de (bewerkelijke) stap naar de boekuitgave.
De tekst van het manuscript werd op computer gezet door de Afdeling Tekstverwerking van de LUW, die met groot geduld en inzet de opeenvolgende revisies hebben uitgevoerd. Vrijwel alle tekeningen werden in hun definitieve vorm getekend door medewerkers (met name A. Bergwerff) van de tekenkamer van de Centrale Dienst De Dreijen van de LUW.
Het redigeren, schaven, beitelen en afwerken van de inhoud van het boek zou niet mogelijk zijn geweest zonder de financiële bijdrage van de BCRS (Beleids Commissie Remote Sensing in Nederland) die de boekuitgave in het kader van het Nationaal Remote Sensing Programma als een infrastructuur-project daadwerkelijk ondersteunde.
Op de weg van syllabus naar boek werden de stimulerende contacten met leden van de Kring voor Remote Sensing, de WRSLN (Werkgemeenschap voor Remote Sensing in Landbouw en Natuurbeheer), de ROVE (commissie Radar Onderzoek Vegetatie) en de ORLA (werkgroep Optische Remote Sensing Land) als een gewaardeerde mentale steun ondervonden. Veel van hun activiteiten en aspiraties zullen in het boek hun weerslag hebben gekregen.

De redacteuren,

H.J. Buiten
J.G.P.W. Clevers

# Inhoud

Woord vooraf vii
Summary xvii
Algemene inleiding 1

Deel A. Theorie 5

Thema 1 Remote sensing als informatiebron 7

1 **Remote sensing als informatiebron** 9
Literatuur 20

2 **'Remote sensing' een beeldvorming** 21
2.1 Van plaatje tot beeld 21
2.2 Van object tot plaatje en wat voor plaatje 22
2.3 Fysische achtergronden 23
2.4 De tijd 27
2.5 Ruimtelijke informatie 29
2.6 Het remote sensing-concept 30
2.7 Literatuur 33

3 **Fysische aard van de remote-sensing informatie** 35
3.1 Inleiding 35
3.2 De vensters 37
3.3 Stralingsbronnen 39
3.4 De fysica van de beeldvorming 44
3.5 Overige problemen 48
3.6 Literatuur 49

4 **Algemene aspecten van beeldvorming en van vastlegging van remote sensing-gegevens** 51
4.1 Detectie en registratie van straling; beeldvorming algemeen 51
4.2 Beeldvorming 60

4.3 Beeldvastlegging en bemonstering 61
4.4 Beeldweergave in kleur 66
4.5 Resolutie-afweging bij keuze van sensorparameters 68
4.6 Literatuur 70

5 **Botanische objectkenmerken van vegetatie en hun invloed op de remote sensing** 73
5.1 Inleiding 73
5.2 Zichtbaar licht en botanische kenmerken 74
5.3 Nabij-infrarode straling en botanische kenmerken 78
5.4 Midden-infrarood en botanische kenmerken 80
5.5 Conclusie t.a.v. remote sensing voor zichtbaar licht en reflectief-infrarode straling 81
5.6 Emissie van thermisch-infrarood en botanische kenmerken 83
5.7 Terugkaatsing van microgolven en botanische kenmerken 83
5.8 Literatuur 83

Thema 2 Remote sensing-opnametechnieken 85

6 **Luchtfotografie** 87
6.1 Inleiding 87
6.2 Afbeelden en verbeelden (beeldkwaliteit) 87
6.3 Fotografische receptoren 91
6.4 Fotografische luchtopnamen 98
6.5 Literatuur 108

7 **Multispectrale aftasting** 111
7.1 Inleiding 111
7.2 Instrumentatie 112
7.3 Signaal-behandeling 116
7.4 Bijzondere problemen 117
7.5 Multispectrale opnamesystemen 119
7.6 Literatuur 124

8 **Remote sensing in het microgolfgebied** 125
8.1 Inleiding 125
8.2 Grondbeginselen van de radarobservatie 126
8.3 Aardobservatie gebaseerd op het gebruik van radar 131
8.4 Beeldvormende radarsystemen 135
8.5 Middelingsproces en pixelvorming 139
8.6 Literatuur 141

Thema 3 Remote sensing-objectkarakteristieken 143

9 **Spectrale signatuur en modelvorming in het reflectief-optische venster** 145
9.1 Inleiding 145
9.2 Opname- en verwerkingssysteem 146

9.3 IJking van de luchtfotografie 150
9.4 Signatuur 151
9.5 Modelleren van de gewasreflectie 154
9.6 Literatuur 161

**10 De radarreflectie van gewassen** 163
10.1 Inleiding; definities 163
10.2 De radarreflectie 164
10.3 Modellen 170
10.4 Enkele opmerkingen over beeldanalyse en classificatie 172
10.5 Literatuur 172

**11 Radarsignatuur en bosvegetatie** 175
11.1 Inleiding 175
11.2 Radarsignaturen van bosopstanden 176
11.3 Experimenten ter ondersteuning van het modelonderzoek 183
11.4 Literatuur 187

**12 De radarreflectie van bodems** 189
12.1 Inleiding 189
12.2 De radarreflectie van de bodem 192
12.3 Radarreflectiemodel voor bodem 198
12.4 Verslemping 200
12.5 Relatie vocht-bodem-gewas 201
12.6 Slotbeschouwing 201
12.7 Literatuur 202

Thema 4 Beeldanalyse-technieken en geografische informatiesystemen voor de remote sensing 203

**13 Digitale beeldinterpretatie** 205
13.1 Inleiding 205
13.2 Thematische beslisregels 206
13.3 Topologische beslisregels 212
13.4 Slotopmerkingen 216
13.5 Literatuur 216

**14 Digitale beeldverwerking** 219
14.1 Inleiding 219
14.2 Beeldrepresentatie 220
14.3 Discretisatie-aspecten 220
14.4 Beeldverbetering 221
14.5 Beeldsegmentatie 224
14.6 Literatuur 227

**15 Structurele patroonherkenning** 229
15.1 Inleiding 229
15.2 Structurele bouwstenen 230

15.3 Het genereren van binaire bouwstenen 232
15.4 Klasse-indeling t.b.v. segmentatie 232
15.5 Enige toepassingen van de structurele patroonherkenningsmethode 234
15.6 Literatuur 235

16 **Geometrische en plaatsbepalingsaspecten van remote sensing** 237
16.1 Inleiding 237
16.2 Meetkundig verband tussen voorwerp en afbeelding 237
16.3 Combineren van RS-beelden 244
16.4 Literatuur 252

17 **Technieken voor het koppelen van RS-beelden aan andere ruimtelijke gegevens met behulp van geografische informatiesystemen** 255
17.1 Inleiding 255
17.2 Geometrische aspecten van data-integratie 255
17.3 Inhoudelijke aspecten van data-integratie 262
17.4 Data-integratie door middel van ruimtelijke statistiek 263
17.5 Evaluatie 265
17.6 Literatuur 265

Deel B Toepassingen 267

Thema 5 Remote sensing en de inventarisatie en monitoring van landbouwgebieden 269

18 **Remote sensing en gewasopbrengstschatting** 271
18.1 Inleiding 271
18.2 NOAA/AVHRR-satellietgegevens 273
18.3 De gewasconditie-bepalingsmethode ontwikkeld door CIAM/AISC 275
18.4 Surveillance-systeem gebaseerd op satellietgegevens voor de Sahel- en Hoornlanden van Afrika 276
18.5 Resultaten 276
18.6 Conclusie 283
18.7 Literatuur 283

19 **Gewasclassificatie met radargegevens** 287
19.1 Inleiding 287
19.2 Enkele eigenschappen van de radarreflectie van landbouwgewassen 287
19.3 Enkele eigenschappen van radarbeelden 289
19.4 Aanpak van het classificatieprobleem bij radar 291
19.5 Toekomstperspectieven 297
19.6 Literatuur 297

20 **Toepassing van remote sensing in de landbouw-waterhuishouding** 299

20.1 Inleiding 299
20.2 Fysische betekenis van de oppervlaktetemperatuur 300
20.3 Ervaring met verdampingskartering in Oost-Gelderland 302
20.4 Perspectieven van vliegtuig- en satelliet-remote sensing 305
20.5 Literatuur 306

21 **De bijdrage van remote sensing aan het waterbeheer in aride gebieden** 309
21.1 Inleiding 309
21.2 Methodieken 310
21.3 Toepassingen 314
21.4 Perspectieven 321
21.5 Literatuur 322

Thema 6 Remote sensing m.b.t. landevaluatie en landgebruik 323

22 **Remote sensing en landevaluatie** 325
22.1 Inleiding 325
22.2 Landevaluatie 325
22.3 Rol van de remote sensing 327
22.4 Voorbeelden 328
22.5 Conclusie 329
22.6 Literatuur 330

23 **Remote sensing bij ingenieursprojecten** 331
23.1 Inleiding 331
23.2 Remote sensing-gebruik tot nu toe 332
23.3 Remote sensing-gebruik vanaf heden 336
23.4 Literatuur 336

Thema 7 Remote sensing en de inventarisatie en monitoring van natuurlijke vegetatie 339

24 **Remote sensing ten dienste van de natuurbescherming in Nederland** 341
24.1 Natuurbescherming 341
24.2 De objecten 342
24.3 Objectkenmerken en beeldinhoud; fysische en fenomenologische denkwijzen 343
24.4 Automatisering van de foto-interpretatie 345
24.5 Beeldverwerving 346
24.6 Beeldverwerking 347
24.7 Conclusies en perspectieven 347
24.8 Literatuur 348

25 **Remote sensing van natuurlijke vegetatie in (semi-)aride gebieden** 351
25.1 De (semi-)aride gebieden op aarde 351

25.2 De vegetatie van (semi-)aride gebieden 352
25.3 De vegetatie als indicator en als natuurlijke hulpbron 352
25.4 De vraagkant: de informatiebehoefte 354
25.5 De aanbodkant: remote sensing en andere technieken 355
25.6 Vraag en aanbod geconfronteerd 357
25.7 Complementariteit en integratie 357
25.8 Een inventarisatie van de Kalahari (Botswana) als praktijkvoorbeeld 361
25.9 Conclusies 361
25.10 Literatuur 362

Thema 8 Remote sensing en de inventarisatie en monitoring van bossen 365

**26 Bosproblematiek en remote sensing** 367
26.1 Inleiding 367
26.2 Luchtfoto's 368
26.3 Radarbeelden 368
26.4 Multispectrale aftasting vanuit satellieten 370
26.5 Conclusies 371
26.6 Literatuur 371

**27 Inzet van digitale radargegevens op Nederlandse en tropische bosgebieden** 373
27.1 Inleiding 373
27.2 Geautomatiseerde interpretatie met behulp van textuuranalyse 375
27.3 Een classificatie-simulatie gebaseerd op X-band SLAR-data van het Roggebotzand (Oost-Flevoland) 377
27.4 Potentiële toepassingsgebieden van radar remote sensing in de bosbouw 378
27.5 Literatuur 382

Thema 9 Remote sensing en de monitoring van milieu-aspecten 383

**28 Remote sensing en de invloed van luchtverontreiniging op planten** 385
28.1 Inleiding 385
28.2 Verandering in de spectrale signatuur als gevolg van een verminderde gezondheidstoestand 386
28.3 Operationele toepassingen 388
28.4 Literatuur 391

**29 Remote sensing en schade aan stadsbomen** 393
29.1 Inleiding 393
29.2 Veldopnamen en schadetypen 394
29.3 Luchtfotografie en schade 397
29.4 Resultaten en nabeschouwing 401

29.5 Literatuur 405

30 **Remote sensing en de opsporing van stortplaatsen** 407
30.1 Inleiding 407
30.2 Afvalstortplaatsen 407
30.3 Stortplaatsonderzoek in Nederland met behulp van Remote sensing 408
30.4 Luchtfoto's en hun interpretatie 410
30.5 Toepassingsmogelijkheden, beperkingen en perspectieven 411
30.6 Literatuur 413

**Supplementen** 415
1 Beeldinterpretatie: visueel of digitaal? 417
2 De 'color additieve viewer' ter ondersteuning van de visuele interpretatie van multispectrale zwart-wit luchtfoto's 423
3 Stereoscopie 425
4 'Ruis' van fotografische receptoren 433
5 Specificaties van de voornaamste remote sensing opname-instrumentaties in het optische venster 437
6 Algemene spectrale reflectiekarakteristieken (spectrale signatuur) en de positie van de spectraalbanden van enige remote sensing sensorsystemen in het optische venster 441
7 Specificaties van enkele microgolf-satellietsystemen en de nomenclatuur van radar-frequentiebanden 443
8 Veldspectrometer voor onderzoek in het veld naar het spectrale gedrag van gewas of bodem in het optische venster 453
9 Handspectrometer voor het verzamelen van reflectie-waarden in het veld 455
10 Hoofdcomponenten-transformatie en datareductie 459

**Platen** 463

**De auteurs** 479

**Verklarende woordenlijst** 487

**Trefwoordenregister** 507

# Summary

Remote sensing (also called earth observation or teledetection) meets the strong need nowadays for information about the changing world, for observing earth surface features and monitoring the processes concerning them.
This book has been focussed on worldwide landsurface objects, and describes both the fundamentals of the theory concerning remote sensing as well as the application of this approach to the fields of agriculture, forestry, landevaluation, agrohydrology and irrigation, nature management and environmental pollution control.
The purpose of the book is to provide systematically a structured survey of the theoretical background knowledge which is necessary in the described application fields. Contributions of twenty-five experts have been integrated to an introductory textbook, divided into nine themes.
A special point of view is the 'object' approach as the focal point of the book, leaving the remote sensing sensor approach at a second stage, though the fundamentals of the physics of electromagnetic waves and the sensor instrumentation is enunciated at university level. Also it has been tried to bridge the historical gap between the conceptions in the field of the optical and those of the microwave wavelength regions.
In the first and the second theme particular attention is given to the philosophy of remote sensing data gathering for serving as a source of landinformation, and of the definition and the weighing of the set of remote sensing resolutions while choosing instrumentation matching the user requirements.
The third theme gives a basic discussion on object-sensor relations in remote sensing detection, based on experimental research efforts and leading to the formulation of models, the development of which is under construction nowadays at several research centres of the world.
In the appreciation of visual versus digital interpretation of remote sensing data emphasis has been laid in the fourth theme on a digital approach because the difference has been proved to be essential no more. Description is given of the philosophy and the image processing

and structural pattern recognition possibilities for digital interpretation of data into object information. Typical problems arising when images of different data, stage or sensor have to be matched and registered in order to have a multi-source interpretation, are treated basically. Especially there is a need for this kind of interpretation in the context of *a priori* knowledge about the land features. So, comprehensive but thorough attention is given to geographical information systems. The integration of remote sensing data and these systems will be of great importance in future.
A unique survey of the above mentioned application fields is given by the themes 5 to 9. Before going into detail each chapter is introducing the reader into the typical terms of the discipline concerned. Then the confrontation of remote sensing and the activities of the application field is illuminated, both-discussing the constraints and the possibilities for now and the future. In this sense it is the aim of the book to develop a proper mental approach when using remote sensing as a source of information for land characteristics in a broad sense.
Besides 30 chapters, 10 supplements are providing additional information and general outlines of the instrumentations. A great number of figures and colour plates illustrate the text of the book. An extended glossary has been added, also including redefinition of terms and conceptions. In this way it offers an up to date list of remote sensing terms in connection with adjacent fields of knowledge.

Through this book the authors are hoping for a stimulating contribution to the implementation of earth observations as a central issue within the national science policy.

# Algemene inleiding

H.J. Buiten
J.G.P.W. Clevers

Het aardoppervlak is voortdurend aan verandering onderhevig, of het nu veroorzaakt wordt door de wisseling der seizoenen, door de invloed van krachten die op en in de aarde werkzaam zijn, of door de eigen activiteiten van de mens. Zij hebben gemeen dat het aardoppervlak in de loop van de tijd onafgebroken een veranderend beeld vertoont van de objecten op aarde waarin wij als bewoners geïnteresseerd zijn. Sommige veranderingen verlopen snel, andere daarentegen traag alsof het de schijn heeft dat het beschouwde object in omvang, plaats en aard statisch is. In deze soms verwarrende hoeveelheid veranderingen is de moderne *informatiebehoefte* van de mens sterk toegenomen. Het zal sterk afhangen van de gedetailleerdheid van ons kijken naar de aarde – mondiaal, regionaal, lokaal – en wat wij als 'objecten' definiëren, hoe de veranderingen gekarakteriseerd zullen worden. Voor het beschrijven van actuele *toestanden* en voor het ontdekken, dus *detecteren*, van *veranderingen* is het noodzakelijk uitgebreid en doelgericht het aardoppervlak te *observeren* en in meetgegevens vast te leggen. Voorheen konden deze gegevens alleen in het veld worden verzameld. Door de komst van de *Remote Sensing* is hierin verandering gekomen. Werden de eerste observatiemogelijkheden grotendeels bepaald door de luchtfotografie, nu zijn verscheidene detectietechnieken toepasbaar zowel vanuit vliegtuigen als vanuit satellieten. Dit betrekkelijk jong en sterk groeiend kennisgebied (ook wel aardobservatie of teledetectie genoemd) biedt de mens een waardevol 'gereedschap' om *op afstand* informatie te verkrijgen over het aardoppervlak. Dit boek zal zich beperken tot de observatie van het *land*-gedeelte, met name landgebruik, landbouw, natuurbeheer en enkele milieu-aspecten; de zee-observatie en de operationele, zelfs dagelijkse toepassing van Remote Sensing in de meteorologie blijven buiten beschouwing. Informatie over 'land' en daarin optredende veranderingen is essentieel voor het voeren van een doelgericht beleid ten aanzien van natuurlijke hulpbronnen.

Remote Sensing is wat anders dan 'plaatjes kijken'. Om aardobservatie-

beelden te kunnen begrijpen is systematisch opgebouwde achtergrondkennis nodig, te meer als men voor een bepaalde gebruikssituatie zélf de aard van de opname gaat kiezen. Het boek is dan ook niet opgezet en geschreven voor experts – voor hen is er inmiddels een uitgebreide internationale vakliteratuur ontstaan – maar beoogt een inleidende totaalvisie te geven op het kennisgebied van de Remote Sensing in relatie tot de eerdergenoemde toepassingssectoren. Hierbij worden theorie (deel A) en toepassingen (deel B) met elkaar verenigd. Het boek is zo gestructureerd dat niet, zoals veelal gebeurt, de 'techniek' als zodanig de inhoud bepaalt. De centrale gedachte voor de opzet van het boek is de *informatiebehoefte* op de terreinen van landbouw, landgebruik, natuur- en milieubeheer, die de vragen stelt aan de Remote Sensing-technieken en -verwerkingsmethodieken. In deze optie vormt dus niet de opnametechniek maar het '*object*' de spil van de thema-indeling van het boek. Zowel in de thema's van het theoretische deel als in die van het toepassingsdeel wordt de lezer in kennis gebracht met de gedachtengang en de grondliggende begrippen zowel van de geaardheid van de met Remote Sensing verkregen objectinformatie (thema's 1 t/m 4) als van elk van de besproken toepassingsgebieden: gewasteelt, agrohydrologie, irrigatie, landgebruik, landevaluatie, bosbouw, natuurbeheer en milieuvraagstukken met betrekking tot vegetatieschade, stadsbomenbeheer en stortplaatsdetectie (thema's 5 t/m 9). Uit de ervaringen die zijn opgedaan met het gebruik van Remote Sensing in die toepassingen wordt, waar mogelijk, getracht een toekomstvisie te geven of worden aanbevelingen geuit.

Het eerste hoofdstuk biedt de lezer een vogelvlucht over de Remote Sensing in zijn totaliteit. Uniek is in het boek dan de wijze waarop, uitgaande van een concept over de plaats en de aard van de Remote Sensing in de dimensies van de informatieverkrijging, gevolgd door een uiteenzetting van de algemene fysische en technische uitgangspunten (thema's 1 en 2), ruim aandacht wordt gegeven aan de analyse van objectkarakteristieken en op een aanzet tot modelvorming, een aanpak die past in de Nederlandse traditie (thema 3).

Waar het gaat om de *interpretatie* van de Remote Sensing-beelden mede in samenhang met Geografische Informatiesystemen (thema 4) verschaft hoofdstuk 13 een beeldinterpretatie-concept dat theorievormend van opzet is. Tezamen met een beschouwing over de komende grens-vervaging tussen visuele en digitale beeldinterpretatie (supplement 1) wordt bijgedragen tot bovengenoemde denkhouding. Gelet op dit doel en op het introductiekarakter wordt geen uitputtende behandeling van de verschillende beeldanalyse-technieken gegeven; voor gedetailleerde studie dienen de literatuurverwijzingen. Dit geldt trouwens voor alle hoofdstukken van het boek.
Met het oog op de *integratie* van Remote Sensing-informatie met andere bronnen van informatieverkrijging, wordt op verschillende plaatsen, maar in 't bijzonder in thema 4, de relatie gelegd met het kennisgebied

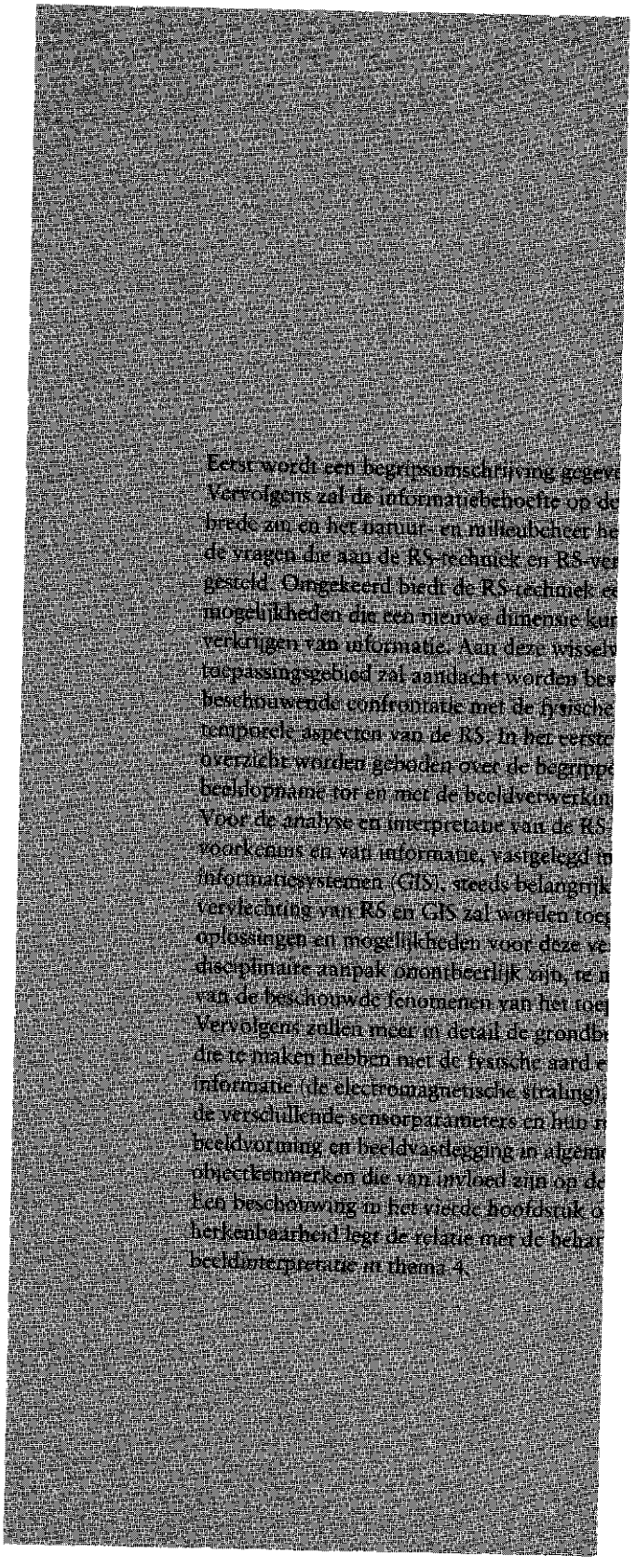
van de Geografische Informatiesystemen.

In het tweede deel (thema's 5 t/m 9) worden een aantal toepassingsgebieden op doordachte manier samengebracht en geïntroduceerd. Een dergelijke bundeling van vakgebieden mag wel bijzonder genoemd worden. In elk van de toepassingen wordt de confrontatie met Remote Sensing belicht waarbij niet geaarzeld wordt naast de mogelijkheden en perspectieven ook de onmogelijkheden te noemen.

Remote Sensing is *multidisciplinair* van karakter, zowel inhoudelijk als in zijn betekenis voor een groot aantal vakgebieden.
Niet in 't minst komt dit tot uiting in de samenwerking van de verscheidene deskundigen die Nederland rijk is. Remote Sensing verbindt tal van vakgebieden zoals fysica, wiskundige en statistische analyse, beeldverwerking, patroonherkenning, geografische informatiesystemen, landbouwwetenschappen en geografie.

Het boek bevat een dertigtal hoofdstukken. Door de redacteuren zijn een tiental *supplementen* toegevoegd die de tekst ondersteunen. De toevoeging van een *Verklarende Woordenlijst* maakt het boek beter geschikt als handboek. Een aantal termen zijn geheel nieuw geformuleerd of up to date gemaakt. Een leidende gedachte voor de opstellers was dat er een brug geslagen diende te worden tussen de historisch gescheiden Remote Sensing 'pijlers' van het (in het boek nader beschreven) optische venster en het microgolf-venster. Het boek laat dan ook zowel de verwantschappen als de specifieke verschillen zien, en zal hopelijk de eenduidigheid van de begripsvorming en de begripshantering in de Remote Sensing versterken. Alleen al in dit opzicht mag het boek niet op tafel ontbreken bij een ieder die van Remote Sensing gebruik maakt!

# Deel A : Theorie



# 1 Remote sensing als informatiebron

H.J. Buiten

Wat is Remote Sensing (RS)?
Remote Sensing (in het vervolg afgekort met RS), ook wel teledetectie of aardobservatie genoemd, omvat in brede betekenis de instrumentele middelen, technieken en methoden om *op afstand* (Gr. 'tele'; Eng. 'remote') het aardoppervlak (land, zee, atmosfeer) *waar* te *nemen* (detectie; observatie; Eng. 'sensing'), als beeld vast te leggen en naderhand te analyseren. Laten we voor een beter begrip van RS het menselijk zien, horen, ruiken en op afstand voelen, kortom het waarnemen, vergelijken met termen uit de RS (tussen haakjes geplaatst). De menselijke functies van het waarnemen zijn in wezen organische vormen van RS. Met onze zintuigen (*sensoren*) nemen we de omgeving waar. Bij het zien (de *opname*) is het oog de sensor die het beeld vormt ('*beeldvorming*'). Het netvlies dat met een netwerk van stralingsgevoelige elementen (*detectoren*) het ontvangen licht registreert, staat in verbinding met de hersenen als verwerkingsorgaan (*patroonherkenningsstelsel*).
De ruimtelijke heldersheidsverdeling en de kleuren van het waargenomen object (de omgeving) dat licht, dat is electromagnetische (EM) straling, naar ons weerkaatst, geven gecombineerd met onze ervaring (cognitieve en associatieve functies) een bepaalde (beeld-) *informatie* over onze omgeving. We verkrijgen steeds informatie over onze omgeving via een *drager*: licht (EM-straling) bij het zien, geluidsgolven bij het horen, moleculen of deeltjes bij het ruiken, warmtestraling (ook EM-golven) bij het voelen. Is er bij voelen sprake van fysiek contact, dan is de term sensing in situ op z'n plaats, vergelijk vochtspanningsmeting of temperatuurmeting bij bodemonderzoek.
Het waarnemen op afstand voorziet in de behoefte om het geobserveerde in relatie tot zijn omgeving te zien en daardoor overzicht ('synopsis') te verkrijgen.
Een veel gehoorde toevoeging aan de term RS is het woord *non-destructief*, afkomstig uit de sfeer van het materialenonderzoek. Alhoewel sensing in situ niet destructief (materiaal beschadigend,

omgeving verstorend) behoeft te zijn, heeft RS onmiskenbaar het voordeel de waargenomen objecten onaangeraakt (intact) te laten, doordat het opname-instrument géén fysiek contact heeft met de waar te nemen objecten.
Het werkveld van RS beperken we in deze inleiding tot observatie van het landoppervlak die we met instrumentele middelen willen bemonsteren onder natuurlijke omstandigheden.
Het menselijk zien is een organisch gebeuren dat gebonden is aan subjectieve beleving en dat momentaan ('real-time') waarneemt en verwerkt. De oproep van de in het geheugen geregistreerde beelden is eveneens persoons- en tijdgebonden.
In vergelijking daarmee en mede ten opzichte van traditionele informatie-verkrijging kunnen we nu een aantal eigenschappen van de RS op een rij zetten:

- RS-opnamemiddelen maken het de mens mogelijk om ook buiten het zichtbare EM-spectrum de omgeving waar te nemen; het *onzichtbare* kan zichtbaar worden gemaakt.
- RS levert fysisch meetbare gegevens, waardoor van *objectiviteit* sprake kan zijn. Hierdoor is het mogelijk naast *kwalitatieve* kenmerken van de waargenomen objecten van het aardoppervlak ook *kwantitatieve* gegevens te verkrijgen.
- Met RS verkrijgen we *positiegebonden* thematische informatie met de grootheden, waar, wat, wanneer en in welke hoedanigheid, die het mogelijk maken bestaande karteringen te verbeteren en aan te vullen.
- RS gegevens zijn *reproduceerbaar*. De analoge of digitale vastlegging maakt het ons mogelijk de door RS geregistreerde beelden op te roepen, op ons gemak te bekijken, te bewerken met instrumentele middelen of met een beeldverwerkingssysteem, te interpreteren en te analyseren mede met behulp van voorkennis en in combinatie met andersoortige gegevens. Dit laatste geeft vooruitzichten voor de koppeling van RS en GIS (geografische informatiesystemen) waarover elders in dit boek wordt gesproken.
- RS opname-instrumenten bieden in vergelijking met het menselijk zien *keuzemogelijkheden* om met meer details, contrast, onder een andere inkijkhoek, op gevarieerde afstand de aardse objecten te beschouwen.
- Het *synoptisch* element van RS is ongeëvenaard, waardoor de samenhang en de begrenzingen van de componenten van een gebied kunnen worden onderkend; een samenhang die voordien meestal alleen uit theoretische overwegingen afgeleid kon worden of uit andere gegevens kon worden vermoed.
- RS maakt *vlaksgewijze informatie*-verkrijging mogelijk, zodat de traditionele puntsgewijze bemonstering van het aardoppervlak selectiever kan plaatsvinden, geëxtrapoleerd kan worden en betrouwbaarder kan worden benut.
- Met RS-opnamen kan een *uitgestrekt gebied* in *korte tijd* als beeld worden geregistreerd (vastgelegd). Dit bevordert de interne correspondentie van de thematische informatie die met de opname wordt beoogd. Ook in vergelijking met de traditionele

kaartproduktiemethoden is er een grote vooruitgang in actualiteit van de geboden informatie.

- RS-gegevens 'ontsluiten' processen aan het aardoppervlak, zowel m.b.t. de weergave op één moment als de veranderingen die in de tijd kunnen optreden ('change detection'). In dit licht bezien is RS *dynamisch* van karakter.
- RS-satellietbeelden kunnen ontoegankelijke gebieden openleggen, althans de basis leggen voor verdere *ontsluiting* van de kennis daaromtrent.
- RS als waarnemingsmethode heeft de mogelijkheid in zich om de analyse van de beelden te variëren of te herhalen zodra onze voorkennis is verbreed of verdiept. De (al of niet bewerkte) afbeeldingen van de waargenomen objecten kunnen worden *opgeslagen* en in de tijd worden vergeleken met nieuwe beelden.
- RS verschaft op grond van bovengenoemde eigenschappen in vele gevallen voorheen niet te verkrijgen informatie. Mede hierdoor en door de eigen (fysische) aard van de RS-informatie biedt de RS-techniek kansen om een *nieuwe dimensie* toe te voegen aan het verkrijgen van informatie op ondermeer de terreinen van landbouw, natuur- en milieubeheer.

  Aangezien echter deze informatie-'taal' veelal anders is dan de gebruikelijke, is een vertaling nodig van de fysische en ruimtelijke grootheden naar de gangbare kenmerken in de toepassingssectoren van RS. Ook een herbezinning op de keuze van de kenmerken voor de activiteiten in deze sectoren is belangrijk. In deze vertaling ligt het knelpunt voor de toepassingen van de RS.

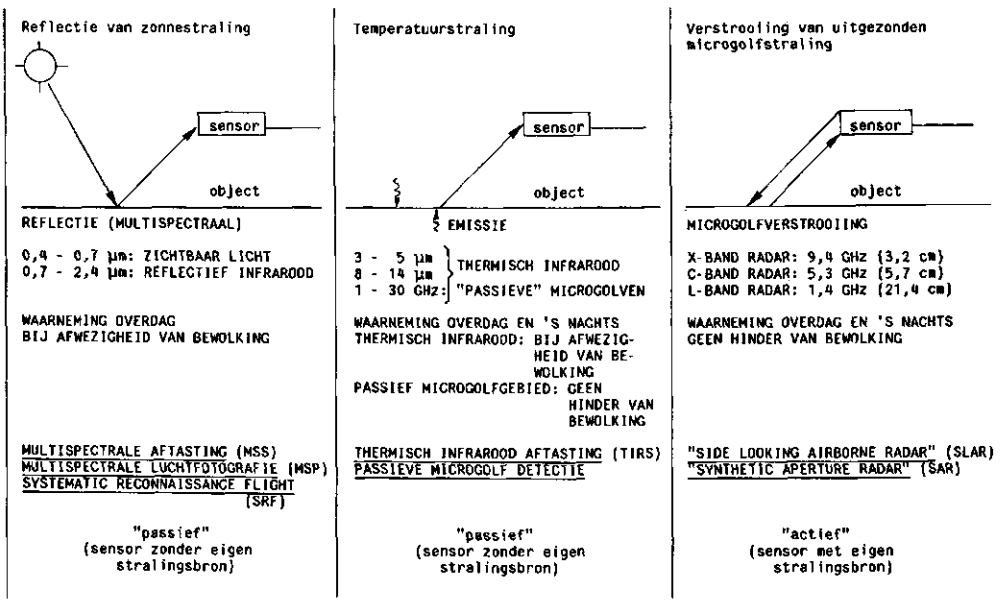
Conceptuele kennis van RS is daarom noodzaak om deze te kunnen integreren in de totale informatiebehoefte van de toepassingssectoren. In de wisselwerking tussen de vraagstelling vanuit een toepassingsgebied en het aanbod van de RS-techniek kan men onderscheiden tussen *toestanden* en *processen*. In de sfeer van landbouw en natuurbeheer kunnen we denken aan fysische toestanden (temperatuur en vochtgehalte van bodem en plant), fysiologische en pathologische toestanden van planten als gezondheidstoestand, resistentie, stress, textuur, bladverdeling en andere gewaskarakteristieken, maar ook aan de thematische inhoud van het grondgebruikspatroon: classificatie of inventarisatie van gewassen en gewasvariëteiten onder verschillende omstandigheden, van vegetatie in de ruimste zin, van landgebruik, van bodemtypen, van hydrologische patronen, etc. in binnen- en buitenland. Daarnaast zou RS kunnen helpen bij het waarnemen van verschijnselen en processen bijv. groeistadia van planten, opbrengstvoorspelling; bij milieubewaking en milieubescherming als onderzoek naar invloed van milieu op bomen in steden en langs wegen; bij het opsporen van stress-gevoelige plaatsen met betrekking tot droogte, nachtvorst; bij het opsporen van bodem- en waterverontreiniging; bij het volgen van veranderingen in landgebruik of in het vegetatiedek en van processen als verzilting en bodemerosie; bij het onderzoek naar de invloed van kunstmatige wateronttrekking en andere hydrologische aspecten. Op

deze wijze kan RS een functie vervullen bij het volgen ('monitoring') van veranderingen in ons leefmilieu en het voeren van een beleid daaromtrent.
Door vervlechting van RS met akkerbouwproefvelden wordt een grotere betrouwbaarheid van de uitspraken verwacht die de landbouw-voorlichting ten goede komt.
Ook kan de RS hulp zijn bij planvorming en beheer als schakel in de streekontwikkeling en de voedselsituatieverbetering. De 'monitoring' met RS komt vooral in ontwikkelingslanden tot gelding bij de kartering van ontbossing, zwerfbouw en verwoestijning waarvoor nauwelijks andere observatiemogelijkheden voor een beleidsvoering aanwezig zijn.

In dit boek wordt RS in een beperkte betekenis gehanteerd. De waarneming van statische krachtenvelden van de aarde als gravitatie en aardmagnetisme (meting met gravimeters resp. magnetometers) en van aardse mechanische grootheden (meting met gyrokompassen of met versnellingsmeters) wordt buiten beschouwing gelaten. Ook het gebruik van sonar (acoustische golven, 30 à 40 kHz), toegepast vanaf een schip voor het karteren van de zeebodem is in wezen RS, maar wordt in dit boek over het landoppervlak niet besproken.
Wij willen ons in dit boek beperken tot het gebruik van EM-straling die kenmerk is van tal van fysische processen. Alle materie met een temperatuur boven het absolute nulpunt (-273° C) heeft het vermogen tot EM-energie-afgifte (emissie). Objecten op of nabij het aardoppervlak hebben de eigenschap de op de objecten vallende EM-straling van een bron te reflecteren (in meer algemene zin: te verstrooien), hetzij van een kunstmatige bron zoals flitser, laser of microgolfstraler, hetzij van een natuurlijke bron zoals de zon.
Instrumenten die EM-straling meten worden sensors genoemd. Deze kunnen ingedeeld worden in:

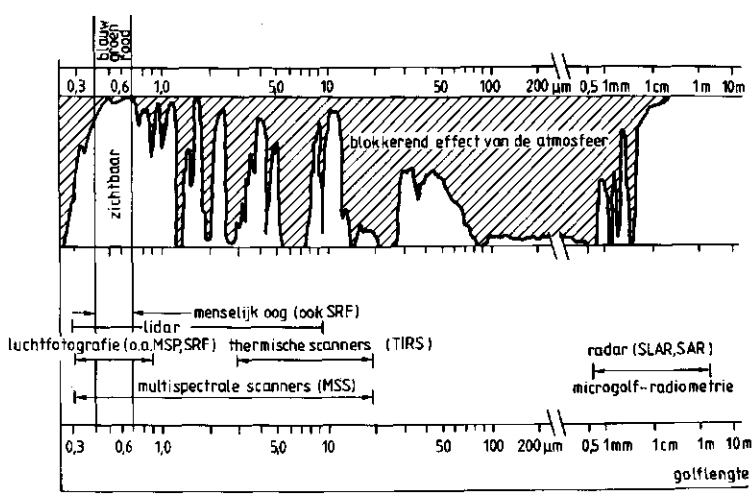
1) *Passieve sensors* (sensors zonder eigen stralingsbron) die alleen gevoelig zijn voor straling van natuurlijke afkomst: meestal reflectie van zonnestraling. Het klassieke voorbeeld van een passieve beeldvormende sensor is de camera, waarmee de stralingsverdeling van een object wordt geregistreerd in een lichtgevoelige emulsie die gespreid is op een film. Zowel de sensor als het object zijn passief.
2) *Actieve sensors* die hun bron van straling ingebouwd hebben en waarbij het bestraalde object 'lijdelijk' is. Voorbeelden zijn de Radar ('Radio detection and ranging') en de Lidar ('Light detection and ranging').

Figuur 1-1 geeft een schematisch overzicht van deze begrippen en van de voornaamste detectiemiddelen voor landgebruik. Figuur 1-2 laat de plaats zien die de RS-instrumentatie inneemt in het electromagnetisch spectrum. In het verloop van dit boek wordt op beide aspecten nader ingegaan.




1-1 Detectie van door het aardoppervlak uitgezonden of gereflecteerde (verstrooide) electromagnetische straling

(bron: tentoonstelling Landbouw '82, Flevohof).

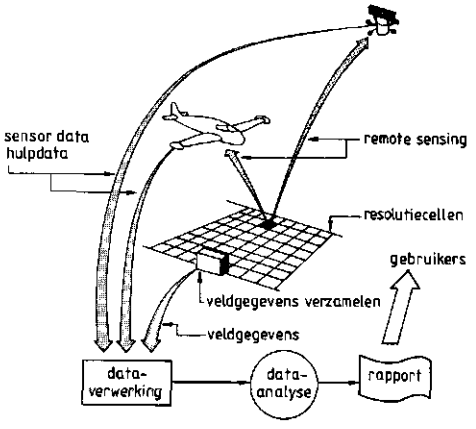



1-2 Electromagnetisch spectrum en remote sensing-instrumenten (bron: Lillesand & Kiefer, 1987).

In de fotogrammetrie en radargrammetrie wordt voor de kaartproduktie in het bijzonder gebruik gemaakt van de voortplantingsrichting van EM-golven, dus nadruk op de *geometrische* (ruimtelijke) *aspecten* van het beeld.

Daarentegen legt de natuurwetenschapper in de geografie, geomorfologie, landbouw, natuurbeheer, bodemkunde, hydrologie, etc, zich toe op de interpretatie van de intensiteitsverdeling over het beeld,

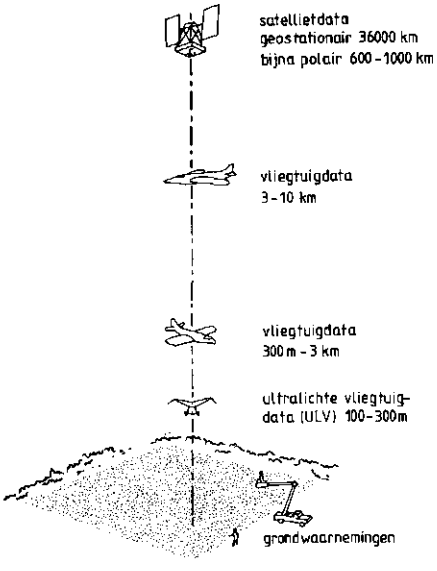
dus nadruk op de *thematische inhoud* van het beeld (bijv. gewaskarakteristieken, landgebruik, vegetatiekartering, bodemvochthuishouding). Hij zal daartoe veelal gebruik maken van een multispectrale of multivariabele RS-stralingsdetectie.
RS is, nader bepaald, een waarnemings- en verwerkingstechniek van EM-golven m.b.t. op afstand waargenomen objecten (materialen, gebieden, verschijnselen of processen) aan het aardoppervlak (figuur 1-3), waarbij stralingsinformatie wordt verkregen van gedeelten van het aardoppervlak met behulp van sensors, opgesteld op al of niet bewegende platforms (meetmasten, vliegtuigen, satellieten). Van de waar te nemen objecten worden fysische grootheden opgenomen als reflectie en emissie, waaraan veldgegevens van beschrijvende en fysische aard worden toegevoegd. Door (beeld)verwerking en interpretatie worden de op afstand verkregen grootheden geanalyseerd op hun ruimtelijke samenhang in het beeld en omgezet in nuttige informatie ten behoeve van het kwalificeren, kwantificeren en karteren van de aarde en de daarop plaatsvindende verschijnselen en processen.




**1-3** Het remote sensing-systeem.

De afstand waarop de objecten van het aardoppervlak worden waargenomen, kan in afhankelijkheid van de doelstelling, variëren van klein tot groot naar gelang het gekozen platform (figuur 1-4). Het blijkt in de praktijk zinvol te zijn om eenzelfde gebied op verschillende niveaus op te nemen, zodat een versterking van de informatieverkrijging optreedt ('multistage' RS).
Door gebruik te maken van verschillende sensorsystemen (bijv. multispectrale aftasting èn luchtfotografie) kan eveneens het informatiemateriaal worden verrijkt en de interpretatiemogelijkheden van elk onderdeel worden vergroot ('multisensor' RS).

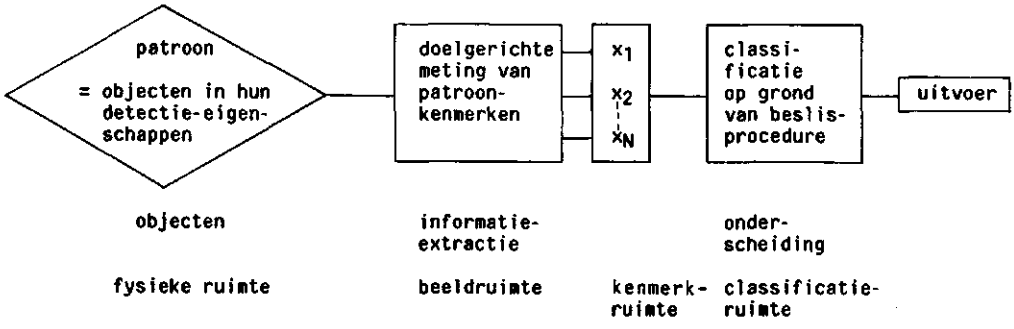
De registratie van de stralingsgrootheden vindt plaats in *analoge* vorm (de luchtfoto is hiervan het voorbeeld bij uitstek) of in *digitale* vorm (een reeks signaalwaarden op een magneetband zoals bij de meeste RS-




1-4 Remote sensing op verschillende hoogten (multistage RS) (bron: Lillesand & Kiefer, 1987).

opnamen thans het geval is). Uit de digitale gegevens kunnen beelden worden afgeleid (zie hoofdstuk 4 en thema 2).
Het in het oog springende voordeel van een digitale registratie is, dat op de waarnemingsgegevens tal van bewerkingen kunnen worden toegepast volgens de methoden van het vakgebied van de beeldverwerking en de patroonherkenning.
*Beeldverwerking* omvat optische, fotografische, analoog-electronische en vooral ook digitale technieken, welke als hulpmiddel dienen om de informatie-inhoud van de beelden zo duidelijk mogelijk te doen uitkomen. Beeldverwerking is voor veel toepassingen een essentiële en noodzakelijke voorbewerkingsstap voor de visuele interpretatie of de automatische beeldanalyse. *Patroonherkennende systemen* zijn informatieverwerkende digitale systemen, welke ontworpen zijn om invoergegevens in een aantal klassen onder te brengen. Een patroonherkenningsstelsel kan in twee delen worden verdeeld (zie figuur 1-5), namelijk het meten van de voornaamste *patroonkenmerken* en het indelen in klassen ('classificatie'), waarbij een beeldverwerkende computer met randapparatuur een belangrijke rol speelt.

Bij het waarnemen van bijvoorbeeld vegetatie in zijn detectie-eigenschappen moet men letten op tal van variabelen: de belichtingssterkte, de richting van de stralingsbron, de toestand van de atmosfeer en de invloed ervan op de gedetecteerde straling, de aanwezigheid van omringende voorwerpen, de inkijkhoek van de sensor en last but not least de eigen variaties in de vegetatie zelf. Volgende hoofdstukken zullen hierover handelen.
Samengevat kan men informatie over het aardoppervlak en de objecten daarop trachten te verkrijgen door detectie op grond van *spectrale*




1-5 Patroonherkenningsstelsel.

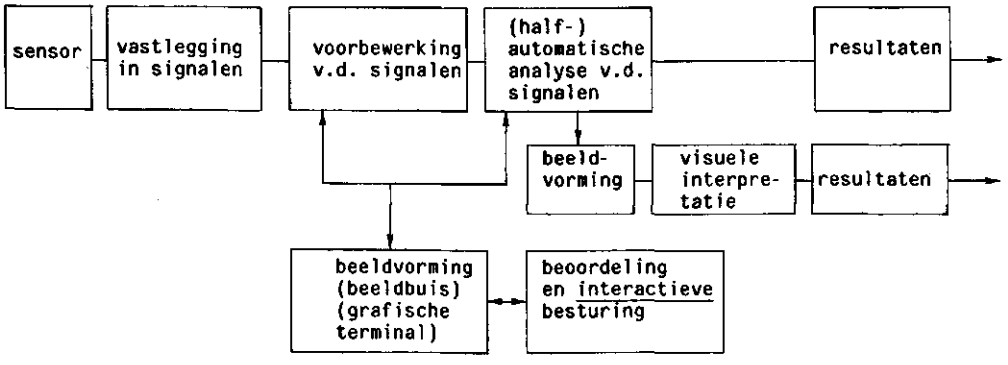
kenmerken (golflengte, frequentie, reflectie- en emissie-eigenschappen), *ruimtelijke* ('spatiale') kenmerken (inkijkhoek van de sensor, vorm en afmetingen van het object, ligging, verdeling, textuur), *temporele* kenmerken (veranderingen in tijd en plaats) en *polarisatie*-kenmerken (effecten van polarisatietoestanden van zenden en ontvanger).

In de verwerking van RS-gegevens kan er onderscheid gemaakt worden tussen de *visuele beeld-interpretatie-techniek* en *digitale beeld-analyse-techniek* (figuur 1-6). In het eerste geval bevindt de menselijke interpretatie zich in de informatiestroom van sensor naar resultaat; in het tweede geval bestuurt de mens terzijde van de informatiestroom de automatische beeldanalyse (zie verder Supplement 1, mede als inleiding op thema 4).

Aan de eigenlijke digitale informatieverwerking zal meestal een voorbewerking ('preprocessing') moeten voorafgaan. Deze heeft tot doel het waarnemingsmateriaal ondermeer op meetbare afwijkingen te corrigeren zoals sensorsysteem-correcties, correctie voor stralingintensiteiten (radiometrische waarden) en geometrische correcties. Op deze wijze worden de ruwe RS-gegevens geschikt gemaakt voor de gewoonlijk interactief bestuurde hoofdbewerkingen ('data processing'). In deze laatstgenoemde verwerking is de digitale beeldanalyse van verschillende patroonherkenningsalgoritmen ingebouwd.

*Patroonherkenning* zoals hier gebruikt, is in feite de toekenning van een label (objectnaam of klasse) aan een te herkennen (te onderscheiden of te classificeren) pixel ('picture element' ofwel beeldelement) op grond van zijn gedetecteerd spectraal patroon, al dan niet door vergelijking met een bekend spectraal patroon van oefengebieden ('training areas'). Van deze gebieden moeten veldgegevens in voldoende mate bekend zijn. Daarnaast kan men trachten met behulp van technieken als segmentatie, filtering en textuuranalyse ruimtelijke patronen te onderkennen. Dan wordt in het bijzonder gekeken naar de topologische samenhang in het

VISUEEL-geöriënteerde BEELDINTERPRETATIEtechniek



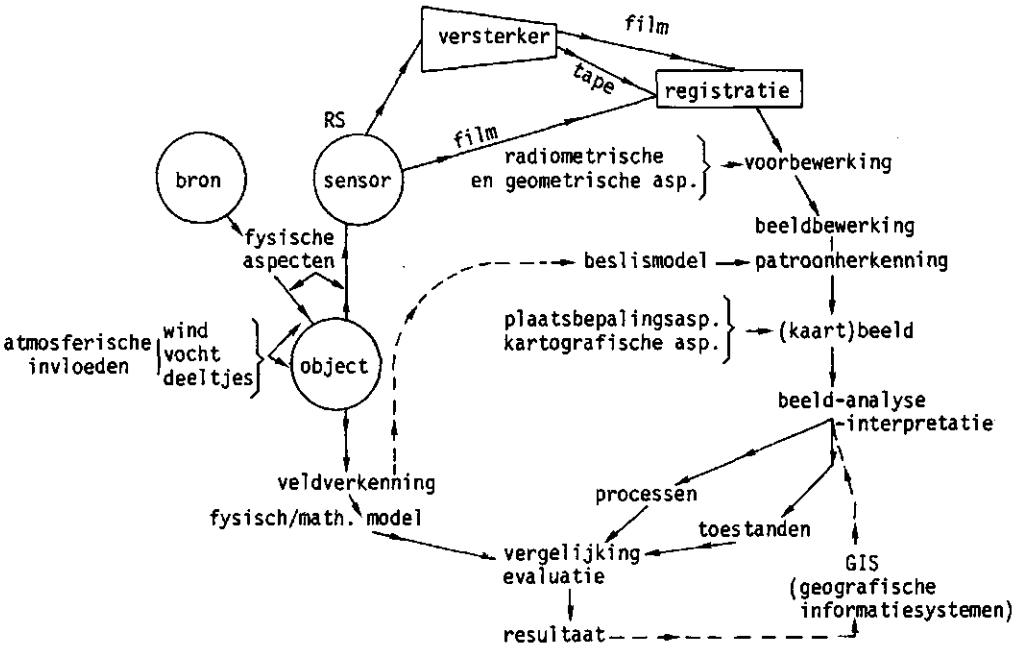

DIGITAAL-geöriënteerde interactief-automatische BEELDANALYSEtechniek

1-6 Overzicht van visuele en van digitale verwerking van remote sensing-gegevens.

beeld. Het analyseren van landgebruikspatronen, objectvormen, texturen en structuren in het beeld kan dan het oogmerk van de beeldgebruiker zijn. Uiteraard is de eigen vakkennis en de menselijke vermogens tot keuze, associatie en integratie bij deze beeldanalyse onmisbaar.

Alle toepassingsgebieden hebben gemeen dat het daarvoor bedoelde patroonherkennend systeem als invoergegevens uiteenlopende meetbare signalen, beschrijvingen van objecten of toestanden krijgt aangeboden welke *dié eigenschappen dienen te bevatten die karakteristiek zijn* voor het classificatiedoel dat beoogd wordt.
Het is dus erg belangrijk doelgerichte RS-opnamen te maken in samenhang met de veldverkenning ('ground truth collection') die de gebruiker zelf uitvoert ten tijde van de opname, en met de fysisch-mathematische modellen waarvoor de RS-gegevens invoerdata zijn.

In de informatieketen van object, sensor, gegevensverwerking, gebruiker (figuur 1-7) heeft de gebruiker een belangrijke functie. Een terugkoppeling van de ervaringen bij de visuele of de digitale gegevensverwerking naar de wijze waarop de gegevens werden verkregen (dus een confrontatie van het doel van de RS-opnamen met het resultaat) betekent een voorname factor in het welslagen van een RS-opnamesysteem.
De gebruiker dient meer te bepalen hoe de instrumentatie en de opname-methodiek door de betreffende vakspecialist zou moeten worden




1-7 Schematische weergave van de fasen die bij remote sensing (RS) een rol spelen, in samenhang met geografische informatiesystemen (GIS).

gekozen en aangepast om het specifieke doel van de opname te bereiken. Dit geldt des te meer nu de inspanningen er niet alleen op gericht zijn kwalitatieve, maar ook kwantitatieve informatie als eindprodukt te verkrijgen. Hiertoe zijn zowel instrumentele ijkingen als referentiemetingen op de grond (bijvoorbeeld met spectrometers, vochtmeters etc.) noodzakelijk. Moest voorheen de gebruiker genoegen nemen met het instrumentarium dat op de markt was volgens algemene inzichten van fysici en industrie, thans wordt in de bouw van toekomstige sensorsystemen rekening gehouden met de wensen en behoeften van gebruikers in de specifieke toepassingssectoren (voorbeelden: Landsat Thematic Mapper en CCD-multispectrale aftastsysteem; zie hoofdstuk 7). Dit is een gelukkige ontwikkeling. Keuze uit een reeks van goede films en filters maakt het de gebruiker mogelijk luchtfotografie in specifieke golflengtebanden te maken (MSP: multispectrale fotografie). Ook ten aanzien van de ontwikkeling van hulpmiddelen bij de visuele of de interactieve digitale verwerking van remote sensing beelden wordt meer en meer op een flexibele wijze ingespeeld op de verlangens van de afzonderlijke gebruiker.

Bij het zoeken naar oplossingen en mogelijkheden is een *multidisciplinaire aanpak* van groot belang.
De sector landbouw, natuur- en milieubeheer kent vele vakgebieden;

voor verscheidene ervan is RS van betekenis. Het gebruik van luchtfoto's heeft daarin een vaste plaats verworven; andere soorten RS-beelden komen meer en meer in studie en in gebruik.
Men kan in deze RS-activiteiten de volgende thema's onderscheiden (zie ook figuur 1-7):

a) kennis van RS-opnametechnieken;
b) bestudering van fysische relaties object-straling;
c) fysisch/mathematische modelvorming van het bestudeerde object;
d) geometrische en plaatsbepalingsaspecten; kartering;
e) verwerkingsmethoden van verkregen (analoge of digitale) gegevens, beeldverwerking en patroonherkenning; bijdrage van eigen vakkennis;
f) koppeling met gegevens uit andere bronnen met behulp van geografische informatiesystemen (GIS).

Bij het kiezen van technieken en methoden lijkt het niet verstandig de ene tegen de andere uit te spelen. Eerder zal blijken dat verschillende mogelijkheden elkaar aanvullen en samen beter in staat zijn het doel van de RS-opname te dienen.
RS is geen wondermiddel maar wel een waardevol hulpmiddel. RS maakt veldwaarnemingen niet overbodig, maar maakt ze wel specifieker en biedt de kans puntsgewijze bemonsteringen te extrapoleren. Een RS-opname op grote hoogte kan gepaard gaan met ondervluchten op lage hoogte, als referentie en in verbinding met veldbemonstering. Multispectrale aftasting kan hand in hand gaan met gelijktijdige luchtfotografie, naast radar kan andersoortige detectie als thermografie van waarde zijn. Digitale gegevensverwerking sluit het menselijk brein niet uit, maar versterkt deze juist.
Visuele interpretatie is anders, maar niet a priori beter, dan digitale beeldanalyse, en omgekeerd (zie ook de overwegingen in Supplement 1). Met betrekking tot landbouwkundige toepassingen van RS zal in eerste instantie een algemene basiskennis van plant, bodem, water en atmosfeer noodzakelijk zijn. Daarnaast is een specifieke bovenbouw nodig die alleen door de betrokken discipline van de RS-gebruiker geleverd kan worden. Op alle punten is samenwerking met technici, fysici, informatici, geodeten en wiskundigen nodig om tot een succesvolle groei van de RS in elk van de disciplines in landbouw, natuur- en milieubeheer te komen.

Bij de vraag wat met de huidige stand van zaken in concreto onder *RS als informatiebron* moet worden verstaan, is het primair noodzakelijk de vraagstelling aan en de ontwikkeling van RS-technieken te ontlenen aan de specifieke informatiebehoefte in mogelijke toepassingssectoren. Het zal daarbij duidelijk moeten worden hoe de informatiestromen in zo'n toepassingssector verlopen en op welke plaatsen de RS zijn eigen geaarde informatie kan inbrengen. Dit laatste vereist zowel een conceptuele kennis van de RS als een 'vertaalkunst' om de gemeten grootheden om te zetten naar hanteerbare informatie in de

toepassingssector. Eens te meer onderstreept dit de behoefte aan samenwerking bij de inzet van de nieuwe mogelijkheden die de remote sensing biedt.

## Literatuur


1 Bunnik, N.J.J., 1984. Aardobservatie als techniek volop in ontwikkeling. TNO Project, Maandblad voor toegepaste wetenschappen, themanummer 'Aardobservatie', 12e jr., nr. 3, blz. 89-94.

2 Curran, P.J., 1985. Principles of remote sensing. Longman, London and New York, 282 blz.

3 Lillesand, T.M. & R.W. Kiefer, 1987. Remote sensing and image interpretation. Second edition. J. Wiley & Sons, Inc., New York, 721 blz.

4 Manual of Remote Sensing, 1983. Second edition. (R.N. Colwell, ed.), American Society of Photogrammetry, Falls Church, Virginia.

5 Nationaal Remote Sensing Programma (NRSP), 1986. Tweede Kamer der Staten Generaal, vergaderjaar 1985-1986, 19442, nrs. 1-2, 39 blz.

6 Richards, J.A., 1986. Remote sensing digital image analysis, An introduction. Springer-Verlag, Berlin, 281 blz.

7 Sabins Jr., F.F., 1987. Remote sensing principles and interpretation. Second edition. W.H. Freeman & Co., New York, 449 blz.

8 Swain, P.H. & S.M. Davis, 1978. Remote sensing: The quantitative approach. McGraw-Hill, New York, 396 blz.

9 Niwars-bibliotheek, postbus 248, 6700 AE Wageningen, tel. 08370-19100 (breed scala van boeken en tijdschriften op remote sensing gebied; zie ook de bibliotheek-bijlage in de Remote Sensing Nieuwsbrief, uitgave van de BCRS, postbus 5023, 2600 GA Delft).

# 2 'Remote sensing' een beeldvorming

M. Molenaar

## 2.1 Van plaatje tot beeld

'Remote sensing' helpt de mens zich een beeld te vormen van de wereld om hem heen. Het begrip 'wereld' moet in dit verband beperkt worden tot de zichtbare of bijna zichtbare wereld aan het aardoppervlak. De *beeldvorming* vindt plaats door afstand te nemen ten opzichte van het te beschouwen object. Ook hier moet het begrip 'afstand nemen tot' weer in beperkte letterlijke betekenis genomen worden in die zin dat het aardoppervlak vanuit vliegtuigen of satellieten wordt waargenomen. Ook het begrip 'beeldvorming' heeft hier in eerste instantie een concrete betekenis, in de zin dat er meestal een plaatje wordt gevormd van het waargenomen deel van het aardoppervlak. De techniek die voor het tot stand komen van zo'n plaatje, dat wil zeggen het hele proces van opname tot beeld, gebruikt wordt, is door mensen ontwikkeld en daarom goed begrijpbaar. De verschillende fysische en technische principes die hierbij een rol spelen zijn in leerboeken over remote sensing te vinden. Een aantal zal ook in dit boek de revue passeren.

In de aanhef van deze paragraaf werd gesteld dat remote sensing (RS) de mens 'helpt' om zich een beeld te vormen van de wereld om hem heen. Dat betekent dat het door RS verkregen plaatje slechts een hulpmiddel is bij deze beeldvorming, waarbij nu het begrip 'beeld' veel ruimer genomen moet worden. Het is juist het *proces* dat tot deze beeldvorming leidt dat moeilijk te doorzien is. Het analyseren van dit proces is een van de belangrijke opdrachten aan de onderzoekers op het veld van de RS en beeldverwerking. Dit onderzoek is in deze periode volop aan de gang. We zijn echter nog in een vroeg stadium van dit onderzoek, dat een complex veld van disciplines en activiteiten bestrijkt. Het kan namelijk slechts tot goede resultaten leiden als de onderzoekers die zich er mee bezighouden gezamenlijk een goed overzicht hebben over de technieken en principes die aan de RS-techniek ten grondslag liggen, maar ook een goed inzicht hebben in de toepassingsgebieden van de RS en daarnaast

in de moderne ontwikkelingen in de informatica, artificial intelligence, kennistheorie, psychologie en vele andere terreinen. Het is duidelijk dat het hier gaat om een breed veld van onderzoek en dat succes alleen haalbaar is als onderzoekers uit vele verschillende disciplines samenwerken. In het vorige hoofdstuk werd hier al op gewezen.

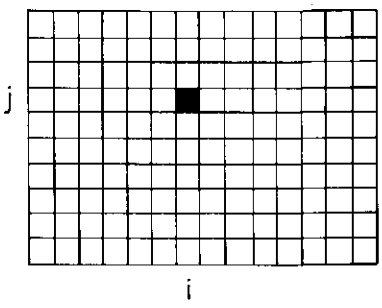
Hoewel we nog geen goed inzicht hebben in het proces waarmee men van plaatje tot beeld komt, lijkt het toch al mogelijk om een aantal hoofdkarakteristieken van dit proces te schetsen. Daartoe zullen we de RS wat afstandelijk bezien, dus we bedrijven een remote sensing van de remote sensing ofte-wel: 'meta-teledetectie'. In deze meta-teledetectie wordt grofweg aangegeven wat voor type gegevens of informatie een RS-plaatje bevat en hoe deze informatie gebruikt wordt om het wereldbeeld van de onderzoekers in te kleuren of soms zelfs vorm te geven.

## 2.2 Van object tot plaatje en wat voor plaatje

Alle RS-technieken die in dit boek behandeld worden betreffen de registratie van electromagnetische (EM) straling. De hoeveelheid straling die in een bepaald deel van het EM-spectrum in een sensor binnenkomt wordt gemeten. Laten we die hoeveelheid aanduiden met Q of eventueel $Q_\lambda$, waarbij $\lambda$ aangeeft om welk deel van het EM-spectrum het gaat. De gemeten grootheden Q worden geordend tot beeld; in deze *ordening* wordt voorzien door de aard van het opnamesysteem waarvan de sensor deel uitmaakt.

Daar RS over het algemeen betrekking heeft op waarneming van het aardoppervlak, ligt het voor de hand dat de grootheden Q in eerste instantie ruimtelijk geordend worden. Idealiter zou men aan iedere Q onmiddellijk een geografische positie (x,y) willen koppelen om te weten over welke *positie* op het aardoppervlak Q informatie bevat. Dit is meestal niet direct mogelijk; de grootheden Q worden dan in een voorlopig systeem geordend met coördinaten i en j (in bijv. bovengenoemd beeldsysteem). We schrijven daarom Q(i,j) (zie figuur 2-1).
De verzameling van alle grootheden Q(i,j) voor alle beschikbare waarden van i en j geeft dan een latent (= onzichtbaar) RS-beeld, dat via een stel technische kunstgrepen tot een plaatje gevisualiseerd kan worden. Over het algemeen is het wel mogelijk om, zij het met beperkte nauwkeurigheid, de lokale coördinaten i en j te transformeren naar een geografische positie (x,y).

We beschouwen nu het aardoppervlak als een verzameling van objecten welke gekarakteriseerd worden door fysische eigenschappen en ruimtelijke uitgebreidheid. Een plaatje opgebouwd uit Q(i,j) is dan een weergave van de toestand van het aardoppervlak. Informatie over de fysische eigenschappen van de objecten moet worden afgeleid uit de




2-1 Weergave van gemeten stralingswaarden (stralingsenergie, digitale pixelwaarden) als een 2-dimensionaal beeld.

waarde Q. Informatie over de ruimtelijke karakteristieken wordt mede afgeleid door Q in samenhang met de coördinaten i en j (of x en y) te beschouwen.
Vele objecten vertonen echter een zekere dynamiek, dat wil zeggen dat hun fysische en soms ook ruimtelijke eigenschappen met de tijd veranderen. Dan is het zinvol om remote sensing-opnamen op verschillende tijdstippen te maken, zodat de gemeten waarden Q niet alleen ruimtelijk maar ook afhankelijk van de tijd (t) geordend moeten worden. We schrijven dan Q(i,j,t).

Het is nu mogelijk om op verschillende *niveaus* informatie uit RS-gegevens af te leiden. Met 'niveaus' wordt hier een indeling naar *complexiteit* bedoeld. Complexiteit verwijst meestal naar het aantal aspecten dat in de beschouwingen wordt meegenomen, waarbij met de toename van het aantal aspecten, de aard van de gezochte samenhangen vaak ingewikkelder wordt. Deze aspecten worden in drie hoofdgroepen verdeeld, te weten de *fysische*, de *temporele* en de *ruimtelijke* aspecten. Zoals uit het voorgaande duidelijk mag zijn, betreffen de fysische aspecten de fysische toestand of chemische samenstelling van een object. De temporele aspecten betreffen de ontwikkeling daarvan in de tijd, dus hier gaat het om het beschrijven van processen. De ruimtelijke aspecten betreffen de positie en uitgebreidheid van objecten en hun ruimtelijke verdeling.
In de navolgende paragrafen wordt voor ieder van deze drie groepen van aspecten een overzicht gegeven van de rol die ze (kunnen) spelen bij het afleiden van informatie uit RS-gegevens.

## 2.3 Fysische achtergronden

In de RS wordt van het aardoppervlak afkomstige EM-straling geregistreerd, waaruit informatie over de fysische gesteldheid van het aardoppervlak of van objecten daarop wordt afgeleid. Daartoe is het nodig dat we inzicht hebben in de aard van de processen die er voor zorgen dat deze straling van het aardoppervlak naar een sensor gezonden wordt. We volstaan hier met een oppervlakkige beschrijving. Elders in dit boek wordt meer aandacht aan deze processen besteed. Het gaat nu om een overzicht.

De straling van het aardoppervlak die door een RS-sensor opgevangen wordt, betreft emissie danwel reflectie (zie hoofdstuk 1).

### 2.3.1 Emissie

Betreft de straling die door een sensor wordt opgevangen de door het aardoppervlak zelf uitgezonden straling, dan spreken we van *emissie* (zie figuur 1-2). De uitgezonden stralingsenergie is afhankelijk van de golflengte (frequentie), de temperatuur van het object en de emissiviteit van het object. De emissiviteit wordt gekarakteriseerd door de emissiecoëfficiënt ($\varepsilon$), die de verhouding van de uitgezonden stralingsenergie door een object met een bepaalde temperatuur bij een bepaalde golflengte aangeeft ten opzichte van de uitgezonden stralingsenergie door een *zwart lichaam* bij dezelfde temperatuur en golflengte. Een 'zwart' lichaam is een hypothetische, ideale straler die alle opvallende straling volledig absorbeert en bij iedere temperatuur voor elke golflengte maximaal emitteert. Voor zo'n lichaam geldt de *stralingswet van Planck*. Deze wet komt in de literatuur in twee versies voor. De reden hiervoor is dat in het optische gebied meestal gewerkt wordt met de golflengte, terwijl in het microgolfgebied meestal met de frequentie gewerkt wordt.
De wet van Planck geeft de radiantie (paragraaf 3.3) van een zwart lichaam per eenheid van oppervlak en per micrometer bandbreedte (Slater, 1980: hoofdstuk 9) of per Herz bandbreedte (Ulaby et al., 1981: hoofdstuk 4):

$$L = 10^{-6}\frac{2\cdot h\cdot c^2}{\lambda^5}\cdot\left[\exp\left\{\frac{h\cdot c}{\lambda\cdot k\cdot T}\right\}-1\right]^{-1} \quad \text{in } Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1} \qquad (2.1a)$$

$$L = \frac{2\cdot h\cdot \nu^3}{c^2}\cdot\left[\exp\left\{\frac{h\cdot \nu}{k\cdot T}\right\}-1\right]^{-1} \quad \text{in } Wm^{-2}sr^{-1}Hz^{-1} \qquad (2.1b)$$

c = lichtsnelheid: $3.10^8$ $ms^{-1}$
h = constante van Planck: $6{,}626.10^{-34}$ $Ws^2$
$\lambda$ = golflengte in meters
k = constante van Boltzmann: $1{,}38.10^{-23}$ $WsK^{-1}$
T = absolute temperatuur in K
$\nu$ = frequentie in Hz.

Beide vergelijkingen kan men in elkaar omrekenen via de relatie $\lambda = c/\nu$ en daarvan afgeleid $d\lambda = -c/\nu^2 \cdot d\nu$, waarbij het negatieve teken weggelaten wordt aangezien dit alleen weergeeft dat $\lambda$ en $\nu$ in tegengestelde richting toenemen en het geen invloed heeft op de grootte van $d\lambda$ of $d\nu$.
De relatie tussen de totale uitgezonden stralingsenergie in de hemisfeer boven een zwart lichaam en de temperatuur wordt verkregen via integratie van vergelijking (2.1) over het hele golflengte- of frequentiegebied (0 tot $\infty$). De uitkomst hiervan luidt:

$$M = \sigma\cdot T^4 \qquad (2.2)$$

M = stralingsemittantie in $Wm^{-2}$
$\sigma$ = constante van Stefan-Boltzmann: $5{,}67 \cdot 10^{-8}$ $Wm^{-2}K^{-4}$.

Voor het microgolfgebied, in combinatie met 'aardse' temperaturen, kan in de stralingswet van Planck (vergelijking 2.1) de benadering $h.\nu << k.T$ worden ingevoerd. Op grond van deze benadering kan uit vergelijking (2.1b) de radiantie in het microgolfgebied benaderd worden door (wet van Rayleigh-Jeans; vgl. Ulaby et al, 1981):

$$L = \frac{2 \cdot k \cdot T}{\lambda^2} \qquad \text{in } Wm^{-2}sr^{-1}Hz^{-1} \tag{2.3}$$

Er is dus in het microgolfgebied een lineaire relatie tussen de door een object geëmitteerde straling en zijn temperatuur. Werkelijke (natuurlijke) materialen of objecten emitteren minder dan een ideaal zwart lichaam. Vergelijking (2.3) moet voor een natuurlijk object nog vermenigvuldigd worden met de emissiecoëfficiënt om de werkelijke radiantie te krijgen. Uit dit resultaat wordt duidelijk dat bij 'passieve' microgolfopnamen de emissiecoëfficiënt wel een belangrijke rol speelt naast de temperatuur. Dat wil zeggen dat via de emissiecoëfficiënt informatie verkregen wordt over materiaaleigenschappen, met name over het vochtgehalte van materialen.

De radiantie in een golflengteband in het optische gebied van het EM-spectrum is een ingewikkelde niet-lineaire functie van de temperatuur èn de golflengte (vergelijking 2.1a). Indien een exponentiële relatie aangenomen wordt tussen radiantie en temperatuur voor een zwart lichaam:

$$L = a \cdot T^b \tag{2.4}$$

dan blijkt de exponent 4 te zijn bij golflengten van ongeveer 11-12 µm (thermisch-infrarood). Berekeningen hiervan staan in Slater (1980) op blz. 242-243. Door vermenigvuldiging met de emissiecoëfficiënt ($\varepsilon$) wordt de radiantie van natuurlijke objecten verkregen. De emissiecoëfficiënt wordt bepaald door de fysische materiaaleigenschappen van een object. Bij verschillende soorten bodems blijkt deze coëfficiënt in het thermisch-infrarode gebied van het spectrum relatief weinig te variëren ($\varepsilon$ = 0,89-0,98) (zie Menenti, 1984, blz. 86). Dan is de uitgezonden stralingsenergie bij een bepaalde golflengte (of in de praktijk in een golflengte-*interval*) voornamelijk afhankelijk van de temperatuur van het object (t.g.v. de vierde macht van T). Bij de registratie van door het aardoppervlak uitgezonden thermisch-infrarode straling spreekt men van een *warmtebeeld*. Het probleem is hoe men uit de geschatte temperatuurwaarden kan afleiden hoe de fysische toestand van het object is of welke processen er aan het aardoppervlak plaatsvinden. Men dient te weten welke factoren de temperatuur bepalen en hoe (zie de hoofdstukken 20 en 21).

We kunnen nu concluderen dat in thermisch-infrarode beelden de contrastverschillen overwegend veroorzaakt worden door temperatuursverschillen, terwijl bij thermische microgolfopnamen de contrastverschillen overwegend veroorzaakt worden door materiaal- (emissiecoëfficiënt-) verschillen daar de fysische temperatuurverschillen op een absolute schaal zelden meer zijn dan 10%.

### 2.3.2 Reflectie

Betreft de straling (stralingsenergie) die door een sensor wordt opgevangen de door het aardoppervlak *gereflecteerde* straling, dan zijn er twee mogelijkheden. Het betreft zonnestraling of het betreft straling van een aan de sensor verbonden zender zoals bij radar. Zonnestraling heeft een brede spectrale samenstelling. Voor de RS is echter voornamelijk het zichtbare en het nabij-infrarode gedeelte van het spectrum interessant.
Voor straling die een object treft zijn er drie interactie-mogelijkheden met dit object: een gedeelte $\rho$ wordt gereflecteerd, een gedeelte $\alpha$ wordt geabsorbeerd en een gedeelte $\tau$ gaat door het object heen. De onderlinge verhouding van deze hoeveelheden variëert meestal met de golflengte ($\lambda$) en daarom schrijven we:

$$\rho(\lambda) + \alpha(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \qquad (2.5)$$

hetgeen aangeeft dat de som van deze fracties de totale hoeveelheid invallende straling geeft. De waarden van $\rho$, $\alpha$ en $\tau$ zijn afhankelijk van de fysische toestand en de chemische samenstelling van het betreffende object. In dit geval is het de taak van de RS om uit de door de sensor geregistreerde hoeveelheid straling in verschillende spectrale banden, informatie over deze drie parameters af te leiden en dan daaruit conclusies te trekken over de waargenomen objecten.

In de RS wordt de door een object gereflecteerde stralingsenergie gemeten als functie van de golflengte, d.w.z. we zijn geïnteresseerd in de *spectrale reflectiecoëfficiënt*. Voor het optische gebied kan de reflectiecoëfficiënt (of reflectiefactor) gedefiniëerd worden als de radiantie (zie hoofdstuk 3) van een object in een bepaalde richting onder bepaalde bestralingsomstandigheden, relatief t.o.v. de radiantie van een ideaal, wit, diffuus oppervlak in dezelfde richting en onder dezelfde bestralingsomstandigheden (Verhoef & Bunnik, 1975). Meestal worden relatieve metingen uitgevoerd omdat $\rho$, $\alpha$ en $\tau$ de hoeveelheid straling, die gereflecteerd, geabsorbeerd of doorgelaten wordt, uitdrukt als een fractie van de hoeveelheid straling die het object treft (als percentage uitgedrukt spreekt men bijv. van een reflectiepercentage). Deze hoeveelheid wordt echter meestal niet gemeten. Vandaar dat men dan probeert bij de meting ook objecten te betrekken waarvan met name $\rho$ bekend is. Deze worden dan als *referentie-objecten* gebruikt.

Dit ligt anders als het niet om zonnestraling gaat, maar om een aan de ontvanger, of sensor, verbonden zender zoals bij radar (zie figuur 1-1).

Daar maken zender en ontvanger van dezelfde antenne gebruik. In dat geval is de uitgezonden hoeveelheid straling, het uitgezonden vermogen, bekend en kan het rechtstreeks vergeleken worden met het ontvangen vermogen via de radar-vergelijking (zie hoofdstuk 8). De *radardoorsnede* (paragraaf 8.2) is de grootheid die uit deze vergelijking berekend wordt en die de object-informatie bevat. De waarde ervan wordt bepaald door de aard van het object, dat wil zeggen de fysische en chemische eigenschappen (met name het vochtgehalte), en verder door de grootte, de oppervlakteruwheid en tevens de oriëntatie van het object ten opzichte van de radarantenne.

In het voorgaande is niet gesproken over de invloed van de atmosfeer op het geregistreerde signaal en ook niet over de invloed die de sensoren er zelf op hebben. Het gaat er in deze paragraaf om dat in hoofdlijnen wordt aangegeven wat de aard van de fysische informatie is die de verschillende typen sensoren geven over objecten op het aardoppervlak.

## 2.4 De tijd

Als met tussenpozen opnamen van eenzelfde gebied gemaakt worden dan krijgen we Q(i,j,t1), Q(i,j,t2),.....
Voor de volgende beschouwingen is het beter de lokale positie-aanduiding i,j te vervangen door bijv. coördinaten x en y. De bovenstaande reeks wordt dan Q(x,y,t1), Q(x,y,t2); zodoende kan de geregistreerde straling op de momenten t1 en t2 etc. vergeleken worden voor een gebiedje gesitueerd om de positie (x,y). Dit vereist de vertaling van de beeldcoördinaten i,j naar referentiecoördinaten x,y en de omzetting van pixelwaarden (hoofdstuk 1) in het beeld naar waarden voor een gebiedselement in het referentiesysteem (zie hoofdstuk 16). Als deze transformaties uitgevoerd zijn kan men uit de gemeten waarden Q op de tijdstippen t1, t2 etc. proberen te achterhalen wat voor ontwikkelingen zich in de tijd op positie (x,y) hebben afgespeeld.
Bij bijvoorbeeld warmtebeelden kunnen zowel de emissiecoëfficiënt ($\varepsilon$) als de temperatuur (T) in de tijd veranderen. Voor $\varepsilon$ kan dit een gevolg zijn van bijv. een veranderende samenstelling van de bodem, bijv. een veranderende vochttoestand of een zich ontwikkelende vegetatie. Er is al eerder gesteld dat de invloed van T die van $\varepsilon$ overheerst in warmtebeelden. De variabiliteit van warmtebeelden in de tijd zal dus in eerste instantie verklaard worden door veranderingen in temperatuur, in plaats van in emissiecoëfficiënt.
Deze temperatuursveranderingen kunnen het gevolg zijn van weersinvloeden zoals wind en regen, maar ook van de zonnestand. Ze kunnen ook het gevolg zijn van verdroging van de bodem of veranderingen in bodemstructuur en textuur door bewerking. Over langere perioden kan men de invloed van een zich ontwikkelende vegetatie waarnemen of de invloed van de seizoenen.
Bij de registratie van gereflecteerde straling van de zon (zie figuur 1-1) kan een verandering in de tijd op twee manieren verklaard worden. In eerste instantie treden er variaties op in de bestralingssterkte (hoofdstuk

3) van een object onder invloed van de atmosfeer die zich tussen zon en object bevindt en er treden variaties op t.g.v. de invloed van de atmosfeer die zich tussen object en sensor bevindt. Deze variaties zeggen niets over veranderingen van objecten als zodanig, dus zal men proberen deze invloeden te elimineren. Waar men wel in geïnteresseerd is zijn de veranderingen van $\rho$, $\alpha$ en $\tau$ met de tijd, deze zeggen iets over de ontwikkeling van het waargenomen object.
Bij kale bodem kan men hieruit afleiden hoe bijv. de vochttoestand in de tijd verandert. Bij vegetatie kan men eruit afleiden hoe bijvoorbeeld het groeistadium, de bodembedekkingsgraad en het aantal bladlagen zich ontwikkelen. In het afsterfstadium ziet men een verkleuring van de bladeren, hetgeen wijst op een afname van de hoeveelheid chlorofyl (Clevers, 1986).
Plotselinge veranderingen van $\rho$, $\alpha$ en $\tau$ kunnen wijzen op veranderingen in bodembedekking, waaruit men vaak een veranderd bodemgebruik kan afleiden.
In geval van radarbeelden zullen veranderingen in de tijd verklaard worden via de radardoorsnede. Deze is onder andere afhankelijk van de oriëntatie van het object ten opzichte van de antenne, een feit waarmee bij opeenvolgende opnamen rekening moet worden gehouden daar dergelijke variaties over het object zelf niets zeggen. Verder kunnen variaties verklaard worden door veranderingen van objecteigenschappen zoals fysische of chemische toestand, grootte en oppervlakteruwheid. Bij kale bodem heeft men zodoende te maken met effecten van bodemvocht en bewerking. Bij vegetatie meet men de invloed van toename in volume, dichtheid en verandering van geometrie.

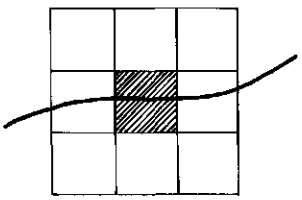
In het vorige hoofdstuk zagen we al dat geregistreerde stralingswaarden op een moment t gebruikt werden voor beeldclassificatie door ze te vergelijken met stralingswaarden van bekende objecten. Door nu ook veranderingen in de tijd hierbij te betrekken kan men vaak de precisie en de betrouwbaarheid van deze classificaties nog verbeteren. Een andere mogelijkheid is dat men onbekende processen met behulp van RS probeert te achterhalen, zoals bijv. bodemvervuiling of het optreden van ziekte in gewassen. Verder kan men ook bekende processen volgen en controleren of er geen afwijking van de normale procesgang optreedt, zoals het stoppen van gewasgroei door ziekte of droogte.

In dit hoofdstuk hebben we weliswaar waarnemingen op verschillende tijdstippen met elkaar vergeleken, dus Q als functie van t bezien, maar daarbij telkens voor iedere waarde van t, dus voor ieder opnamemoment, naar dezelfde positie verwezen. Dus de positie-informatie i,j in het beeld is alleen gebruikt om de positie x,y in een referentiesysteem te vinden. Een beeld bevat echter behalve positie-informatie ook andere *ruimtelijke informatie*. Daarom zullen we nu bezien hoe we die kunnen achterhalen door Q als functie van i en j te behandelen.

## 2.5 Ruimtelijke informatie

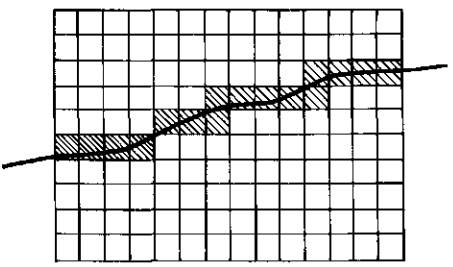
Allereerst zou men kunnen proberen Q als een analytische functie van i en j te behandelen, dus Q = f(i,j). Dit is tot nu toe nauwelijks of niet gedaan omdat over het algemeen de fenomenen die aan het aardoppervlak bestudeerd worden te ingewikkeld zijn om zich door een hanteerbare analytische functie te laten beschrijven. Wel wordt Q soms als een stochastische functie van i,j opgevat. De variatie van Q met de positie wordt dan geanalyseerd aan de hand van *textuurmaten* die gebruikt worden voor de classificatie van gebieden (Haralick, 1979). Vooral bij de analyse van radarbeelden wordt hiermee gewerkt. In dat geval kunnen variaties in de gemeten stralingswaarden vaak geïnterpreteerd worden als ruwheid van waargenomen objecten (Hoekman, 1985).

Verder bevat een RS-beeld nog ruimtelijke informatie in de vorm van *vlakobjecten* en *lijnobjecten*. Dat wil zeggen dat er in een beeld samenhangende gebieden zijn waarin pixels overeenkomstige stralingswaarden vertonen. Dit kunnen gebieden zijn met een bepaald type grondgebruik, of wateroppervlakken etc. Daarnaast komen er nog lijnobjecten voor zoals wegen en waterlopen. Deze geometrische informatie kan op verschillende niveaus van complexiteit beschouwd worden.
Op het laagste niveau wordt ieder pixel met zijn omgeving vergeleken in bijv. een 3x3 venster (figuur 2-2). Aan de hand van deze vergelijking wordt beslist of het beschouwde pixel, dus het centrale pixel in het venster, op een gebiedsrand ligt of dat het een onderdeel van een lijnobject is. Zo wordt voor iedere pixel afzonderlijk bezien of het op een bepaalde lijn ligt of niet, en zo ja op wat voor soort lijn.



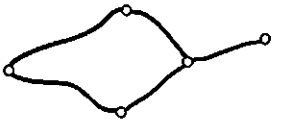
**2-2** Beslissing op pixelniveau.

Een niveau hoger wordt gezocht naar pixels die op eenzelfde lijn liggen (figuur 2-3). In dat geval kunnen ze samengevoegd worden tot een lijnsegment.



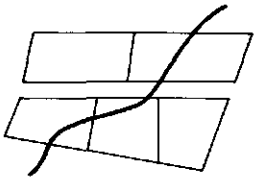
**2-3** Beslissing m.b.t. vlak- en lijnsegmenten.

Weer een niveau hoger worden lijnsegmenten samengevoegd tot topologische (samenhangende) gehelen die dan te identificeren zijn als objecten (figuur 2-4). Objecten worden beschreven door een samenhang in geometrie en semantiek (betekenis of waarde van pixels). Als het om randen gaat worden op deze manier gebieden geïdentificeerd. Als het om lijnobjecten gaat worden zo stelsels van wegen of waterlopen geïdentificeerd.



2-4 Beslissing m.b.t. topologische eenheden (objecten).

Nog weer een niveau hoger ontstaat dan een kaartbeeld waarin de ruimtelijke samenhang van geïdentificeerde objecten zichtbaar wordt (figuur 2-5). Op dit niveau heeft men de informatie beschikbaar voor ruimtelijke analyses, voor landschapsbeschrijving, morfologische studies etc.



2-5 Gebiedsanalyse.

De geometrische informatie wordt in deze paragraaf uit een beeld gehaald, dat wil zeggen dat het om de beschrijving van een toestand gaat. Door nu beelden van verschillende tijdstippen te bezien kan ook op de verschillende geometrische niveaus de dynamiek bestudeerd worden. Dit brengt ons dan tot een *integrale beschouwing* van de fysische, de ruimtelijke en de temporele aspecten van de RS, dus tot een totaal RS-concept.

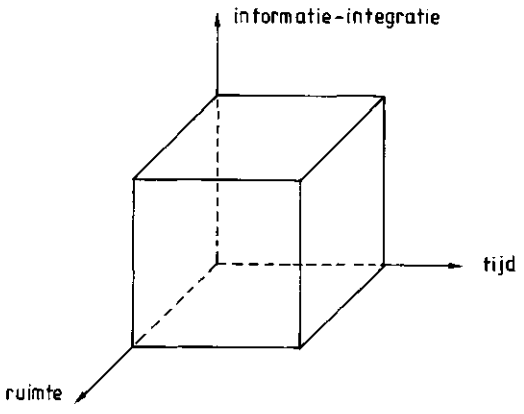
## 2.6 Het remote sensing-concept

We zullen allereerst proberen schematisch de betekenis weer te geven van een gezamenlijke beschouwing van ruimtelijke en temporele aspecten in de RS. Daarbij doen we alsof we een type RS-beeld ter beschikking hebben. Door voor beide aspecten ieder een as uit te zetten, ontstaat een schema als in figuur 2-6. Beweging langs de tijd-as geeft hier echter geen voortgang in de tijd aan, net zo min als beweging langs de ruimte-as een verandering van positie aangeeft. Beweging langs de assen geeft een toename van *complexiteit* aan van de beschouwde fenomenen (figuur 2-6). Langs de tijd-as zien we een verschuiving van het waarnemen van toestanden naar het volgen van processen. Langs de ruimte-as zijn de verschillende ruimtelijke niveaus aangegeven waarop gewerkt wordt.

2-6 Schema voor het remote sensing-concept.

In de blokken van het schema (figuur 2-6) zijn een aantal voorbeelden van activiteiten weergegeven die op de verschillende niveaus van complexiteit plaatsvinden. Op het laagste niveau, waar de toestand op pixelniveau wordt beschreven, steunt men nog het meest direct op de kennis hoe een RS-beeld tot stand komt. De kennis van de fysische achtergronden en de *sensorparameters*, zeg de beeldfysica, wordt in combinatie met enige voorkennis van de aard van de waargenomen objecten gebruikt om een bepaalde *objectparameter* te schatten zoals bijv. de bodembedekkingsgraad, het aantal bladlagen, de bodemtemperatuur etc. Het kan ook zijn dat men de beeldinformatie op pixelniveau gebruikt om de aard van de waargenomen objecten via *classificatietechnieken* vast te stellen (zie hoofdstuk 13).

Voor het volgen van processen is veel meer *extra kennis* nodig om de door RS geleverde informatie op de juiste manier te kunnen gebruiken. Bijvoorbeeld een goede kennis van gewasgroeimodellen is nodig om te bepalen wanneer en hoe vaak waarnemingen nodig zijn om bijtijds afwijkende ontwikkelingen te signaleren.
Naarmate de te analyseren fenomenen of processen ingewikkelder worden, zal meer voorkennis en aanvullende informatie nodig zijn. Voor bijvoorbeeld het vaststellen van de erosiegevoeligheid van een gebied moet kennis over het grondgebruik, de hydrologie en morfologie en de bodem gecombineerd worden. Bij het analyseren van het proces van verstedelijking van een streek moet men over kennis beschikken betreffende de maatschappelijke, economische en demografische




**2-7** Het remote sensing-concept als een kubus voorgesteld.

ontwikkelingen, over bestuurlijke structuren en vele andere zaken.

Voor zulke ingewikkelde processen kan RS slechts een deel van de totale benodigde informatie leveren. Deze informatie moet geïntegreerd worden met andere gegevens. Daar het over het algemeen gaat om gegevens die een ruimtelijke component hebben, dat wil zeggen ze zijn lokatiegebonden, spreekt men over 'geobased information', welke wordt verwerkt binnen zogenaamde 'geografische informatiesystemen' (GIS). Daarom moet het vorige schema uitgebreid worden met nog een derde as waarlangs dan de mate van *informatie-integratie* wordt aangegeven. Dus des te verder men van de oorsprong van het nu ontstane assenstelsel langs de derde as naar boven gaat, des te meer worden verschillende soorten van informatie gekoppeld (figuur 2-7).
In het grondvlak van de nu ontstane kubus werkt men alleen met door de RS geleverde gegevens. In het bovenvlak werkt men volledig op het niveau van GIS. In het grondvlak is het denken voornamelijk gericht op de techniek van de RS-opname en beeldverwerking, in het bovenvlak is het denken voornamelijk gericht op de toepassingssectoren.
Op elk niveau van complexiteit van de beschouwde fenomenen vindt integratie van verschillende gegevenssoorten en kennis plaats, maar over het algemeen zal men in de kubus stijgen naarmate de complexiteit toeneemt. Uit deze beschouwing moge duidelijk worden dat de wijze waarop men tegen RS aankijkt sterk afhangt van het gebruik dat men er van maakt. De weging van het belang van kennis van bepaalde facetten van de RS en het beoordelen van de aard van de RS wordt hiermee sterk afhankelijk van de toepassing. Vandaar dat het niet zinvol is te proberen een sluitende definitie voor dit vakgebied te vinden. Een wat minder strakke conceptuele zienswijze zoals in dit hoofdstuk, lijkt voldoende om het samenstel van technieken en werkwijzen, dat men vat onder de naam 'remote sensing', haar plaats te geven.

## 2.7 Literatuur

1 Clevers, J.G.P.W., 1986. Application of remote sensing to agricultural field trials. Agr. Univ. Wageningen Papers 86-4, 227 blz.
2 Haralick, R.M., 1979. Statistical and structural approaches to texture. Proceedings of IEEE, vol. 67, no 5.
3 Hoekman, D.H., 1985. Texture analysis of SLAR images as an aid in automazed classification of forested stands. ESA SP-227, blz. 99-109.
4 Menenti, M., 1984. Physical aspects and determination of evaporation in deserts applying remote sensing techniques. I.C.W., Report 10, Wageningen.
5 Slater, P.N., 1980. Remote sensing: optics and optical systems. Addison-Wesley Publ. Comp., Reading, Massachusetts, 575 blz.
6 Ulaby, F.T., R.K. Moore & A.K. Fung, 1981. Microwave remote sensing, active and passive. Vol. I. Addison-Wesley Publ. Comp., Reading, Massachusetts.
7 Verhoef, W. & N.J.J. Bunnik, 1975. A model study on the relations between crop characteristics and canopy spectral reflectance. Niwars-publ. 33, 89 blz.

Documentatie

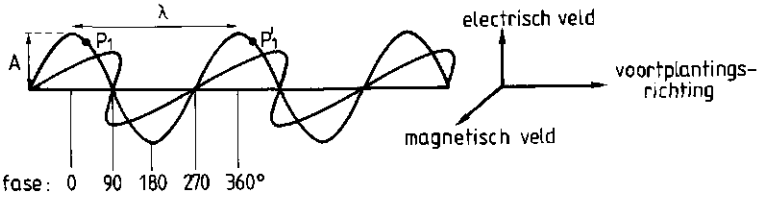
# 3 Fysische aard van de remote sensing-informatie

G.P. de Loor

## 3.1 Inleiding

Zoals in hoofdstuk 1 duidelijk werd, werken we met remote sensing (RS) *indirect* via de een of andere omzetting van terreinkenmerken naar stralingsgrootheden. Hiermee raken we één van de problemen in de RS: om tot goede, en bij voorkeur betere, resultaten te komen dan de klassieke, vaak zeer tijdrovende, procedures moeten we de aard van deze omzetting eerst goed kennen en dat betekent veelal dat inzicht in de fysica van de beeldvorming verkregen moet worden (zie ook Colwell, 1983).

Met onze zintuigen nemen wij op (kleinere) afstand dagelijks waar: wij kunnen horen, ruiken en zien. Met allerlei technische hulpmiddelen hebben wij de mogelijkheden van onze zintuigen uitgebreid. In de RS beperken wij ons tot het 'zien', maar dan wel zien in de ruimste zin. Zichtbaar licht is slechts een deel van het electromagnetisch (EM) golfspectrum, maar het volgende zal handelen over waarnemen met EM-golven in ruimere zin (zie o.a. Sears et al., 1982). EM-golven zijn *transversale golven*: electrisch veld en magnetisch veld staan loodrecht op de voortplantingsrichting en tevens loodrecht op elkaar ('golftheorie'). In figuur 3-1 is een EM-golf in perspectief weergegeven, waarbij het elektrisch veld verticaal is getekend en het magnetische veld horizontaal. Het trillingsvlak van het electrisch veld bepaalt de *polarisatierichting*: in figuur 3-1 is deze dus verticaal. Een EM-golf plant zich voort op een harmonische wijze (als een sinus) met lichtsnelheid, c. De golflengte, $\lambda$, is de afstand tussen twee golftoppen, en de frequentie,




3-1 Voorstelling van een EM-golf.
A = amplitudo; $\lambda$ = golflengte; E=A.cos$\phi$.

v, is het aantal toppen dat een bepaald punt per tijdseenheid passeert. De maximale uitslag A wordt de *amplitudo* van de electrische veldsterkte genoemd.
Een andere belangrijke golfparameter is de *fase*. Twee golven zijn 'in fase' als ze dezelfde frequentie hebben en hun fasehoek $\phi$ op elk tijdstip gelijk is, ook al kan de amplitudo verschillend zijn.
Volgens de fysica geldt de volgende vergelijking:

$$c = v \cdot \lambda \tag{3.1}$$

Aangezien c in principe constant is in vacuüm ($3 \cdot 10^8$ $ms^{-1}$), zijn de golflengte en de frequentie omgekeerd evenredig met elkaar. Eén van beide kan gebruikt worden om een golf te karakteriseren, met dit onderscheid dat de golflengte verandert als de voortplanting van de golf in een ander medium dan vacuüm plaats vindt (bijv. verschillende atmosferische lagen), terwijl de frequentie medium-onafhankelijk is. In de RS wordt in het optische gebied meestal gewerkt met de golflengte en in het microgolfgebied vaak ook met de frequentie.

Hoewel veel eigenschappen van EM-straling het eenvoudigst beschreven kunnen worden door de golftheorie, geeft een andere theorie bruikbare inzichten in hoe de wisselwerking tussen EM-energie en materie is. Deze 'deeltjes-theorie' is gebaseerd op de aanname dat EM-straling bestaat uit vele discrete eenheden, *fotonen* genoemd. De energie, Q, van een foton (in Joule) wordt gegeven door:

$$Q = h \cdot v \tag{3.2}$$

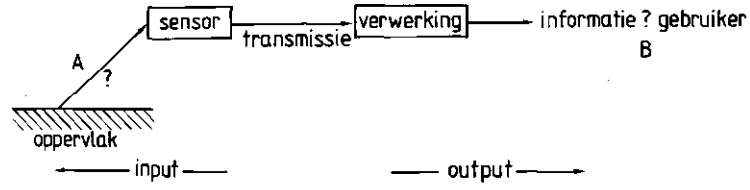
waarbij h de constante van Planck ($6{,}626 \cdot 10^{-34}$ Js) is. Hieruit kan tevens de volgende vergelijking afgeleid worden:

$$Q = \frac{h \cdot c}{\lambda} \tag{3.3}$$

Hieruit blijkt dat de energie van een foton evenredig is met de frequentie en omgekeerd evenredig is met de golflengte van de straling die het foton representeert. Hoe langer de golflengte is, des te kleiner is de hoeveelheid energie van het foton. Dit heeft ook consequenties voor de RS. Zo zal bij het waarnemen met zichtbaar licht vaak met vrucht gebruik gemaakt kunnen worden van de fotonen-interpretatie, terwijl in het microgolfgebied (fotonen van lage energie) de golf-interpretatie het belangrijkst is (de theorie van Maxwell).

De stralingsenergiestroom van een EM-golf (bijv. van zichtbaar licht) is evenredig met het kwadraat van de amplitudo van het electrisch veld en is ook evenredig met het aantal fotonen. Vaak zal in dit boek gesproken worden over een *hoeveelheid straling*, terwijl in feite een *fotonenstroom* bedoeld wordt. Voor passieve RS-systemen geldt dat de stralingssterkte (paragraaf 3.3) gemeten door de sensor omgekeerd evenredig is met het

kwadraat van de afstand van sensor tot object. Voor actieve systemen, waarbij stralingsbron en sensor één geheel vormen, geldt dat de stralingssterkte omgekeerd evenredig is met de vierde macht van de afstand van sensor tot object (vgl. hoofdstuk 8, vergelijking 8.8).

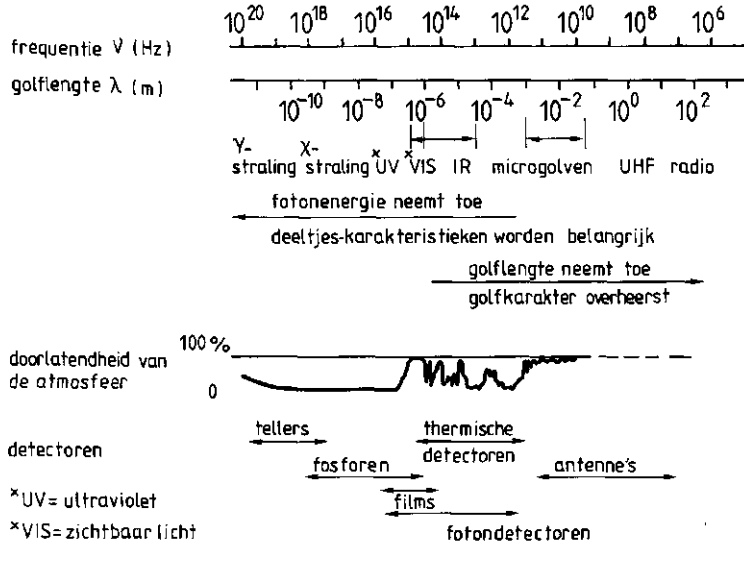



3-2 Overzicht van een RS-systeem.

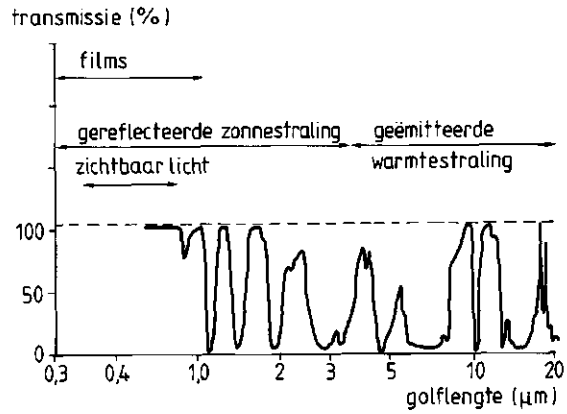
In figuur 3-2 wordt een schets gegeven van het totale remote sensing-complex. Allereerst is er het waarnemingsysteem zelf (tussen de vraagtekens A en B). Dit puur technische deel bestaat uit een sensor die het aardoppervlak waarneemt, deze waarnemingen vervolgens transporteert naar een verwerkingseenheid en het resultaat (de informatie) tenslotte aflevert. Dit stuk techniek is in de RS veelal niet het probleem, als je tenminste weet wat je er mee wilt doen. De echte problemen zitten voor en achter dit stuk techniek. Laten we daarom eerst eens aan de voorkant gaan kijken.

## 3.2 De vensters

Alle RS-apparatuur moet door de *atmosfeer* heen 'kijken'. Deze is alleen maar transparant voor EM-golven in het optische gebied van ultraviolet (UV) tot en met thermisch-infrarood (TIR) ($\lambda$ = 0,35 -14 µm) en in het microgolfgebied ($\lambda$ = 0,1 – 50 cm): de zgn. *'vensters'*. Figuur 3-3 geeft

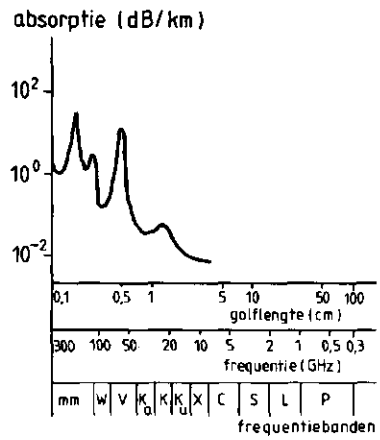



3-3 Het electromagnetische spectrum (bron: ASP, 1963).

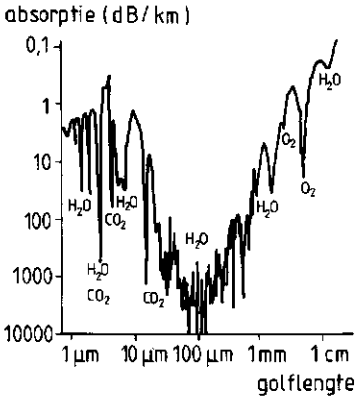



3-4 Het venster zichtbaar licht tot thermisch-infrarood (TIR). Doorlatendheid van de atmosfeer in %.

een overzicht van het gehele EM-spectrum, samen met de vensters. Deze vensters zijn nog eens vergroot weergegeven in de figuren 3-4 en 3-5. Figuur 3-4 geeft een overzicht van de transmissie van de (droge en schone) atmosfeer in het venster van zichtbaar licht (VIS) tot en met thermisch-infrarode straling (TIR): het *optische venster*. Binnen dit venster kunnen drie gebieden worden onderscheiden: het VIS ($\lambda$ = 0,4 – 0,7 μm) met daaraan grenzende gebieden waar ook films en camera's kunnen worden gebruikt, het reflectief-infrarood, resp. nabij-infrarood (NIR; $\lambda$ = 0,7 – 1,3 μm) en het midden-infrarood (MIR; $\lambda$ = 1,3 – 2,5 à 3,0 μm), waar de gereflecteerde zonnestraling overheerst en tenslotte het TIR ($\lambda$ = 3,5 – 14 μm) waar de door het aardoppervlak en door voorwerpen daarop geëmitteerde warmtestraling overheersend is. Figuur 3-5 geeft een overzicht van het *microgolfvenster*. Hier hebben we dus te maken met straling met golflengten van cm's. De meest gangbare coderingen voor de verschillende frequentie-banden zijn ook in de figuur aangegeven. Figuur 3-6 tenslotte geeft de absorptie door ('het dicht zijn van') de atmosfeer in het tussen de figuren 3-4 en 3-5 liggende gebied aan (gebied met hoge dempingen).

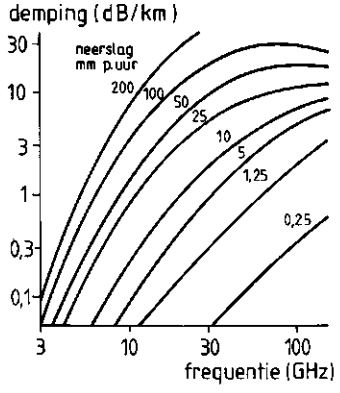



3-5 Het microgolf-venster. Absorptie door de atmosfeer in dB/km (deze is erg laag). In de figuur zijn de verschillende frequentie-banden aangegeven (zie voor de naamgeving ook Supplement 7).




3-6 Transmissieverlies in het gebied van 1 µm tot 1 cm voor een standaard atmosfeer.

Alle figuren geven de transmissie of absorptie voor een schone en droge atmosfeer. In het optische venster maken regen, mist en bewolking waarneming vrijwel onmogelijk. Ook is in dit venster zonder regen of mist de doorlatendheid van de atmosfeer nog afhankelijk van de golflengte van de straling waarmede met name bij RS vanuit satellieten rekening moet worden gehouden.
Voor het microgolfvenster is dit beter. Voor golflengten langer dan 3 cm (frequenties onder de 10 GHz) spelen mist, regen en bewolking maar een geringe rol. Pas als de golflengte kleiner wordt (naar het mm-gebied gaat) kan ook regen belangrijk worden (figuur 3-7).




3-7 Demping door regen in het microgolf-venster, voor neerslag, oplopend van motregen (0,25 mm/uur) via zware regen (25 mm/uur) tot tropische regenval (100 à 200 mm/uur)
(bron: Schanda, 1986).

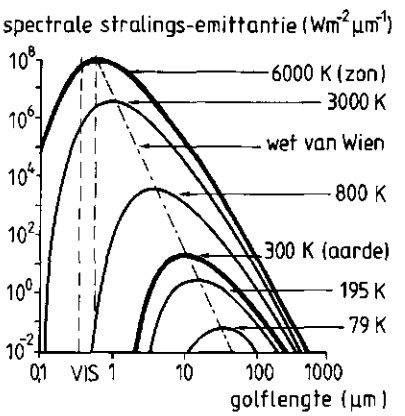
## 3.3 Stralingsbronnen

Zoals in hoofdstuk 1 gezien, kunnen RS-systemen zowel actief als passief worden gebruikt. In het eerste geval voeren ze dan een eigen stralingsbron mee (zoals bijv. bij de radar), terwijl in het tweede geval met externe bronnen wordt gewerkt (bijv. de zon) of met de eigen straling van de waargenomen objecten (zoals in het TIR).

Ook werd in hoofdstuk 1 gezegd dat alle lichamen met een temperatuur boven het absolute nulpunt voortdurend EM-straling uitzenden. Objecten op het aardoppervlak zijn dus ook bronnen van straling, hoewel deze straling afwijkend is van die van de zon in grootte en spectrale samenstelling. De hoeveelheid uitgezonden straling hangt o.a. af van de oppervlakte-temperatuur van het object. Deze eigenschap wordt uitgedrukt d.m.v. de *wet van Stefan-Boltzmann* voor een 'zwart' lichaam (zie paragraaf 2.3.1):

$$M = \sigma \cdot T^4 \tag{3.4}$$

Met M = totale stralingsemittantie (in $Wm^{-2}$)
σ = constante van Stefan-Boltzmann ($5{,}67 \cdot 10^{-8}$ $Wm^{-2}K^{-4}$)
T = absolute temperatuur (K) van het object.

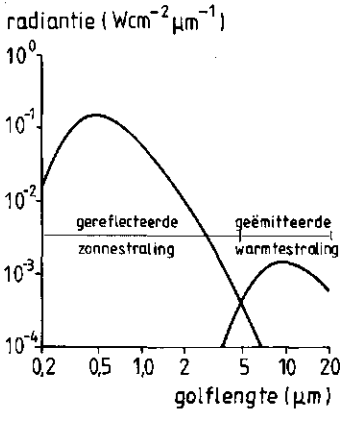



3-8 Warmtestraling door een 'zwart' lichaam bij verschillende temperaturen (bron: Wormser, 1968).

Figuur 3-8 geeft de geëmitteerde warmtestraling weer van een zwart lichaam bij verschillende temperaturen. Een zwart lichaam is een hypothetische, ideale straler die alle opvallende straling volledig absorbeert en weer emitteert (paragraaf 2.3.1). De geëmitteerde warmtestraling van de zon (maximum midden in het VIS) en die van de aarde (maximum rond $\lambda$ = 10 µm) zijn vet aangegeven. Zoals de totale stralingsemittantie met de temperatuur verandert, zo verandert ook de spectrale samenstelling (figuur 3-8). Met een toename in temperatuur treedt er een verschuiving op naar kortere golflengten. De golflengte (in µm) waarbij de stralingsemittantie van een zwart lichaam maximaal is ($\lambda_{max}$) is gerelateerd aan de temperatuur volgens de *verschuivingswet van Wien*:

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \tag{3.5}$$

Dus, voor een zwart lichaam variëert de golflengte waarbij maximale emittantie optreedt omgekeerd evenredig met de absolute temperatuur van het zwart lichaam.
In het optische venster (VIS-TIR) hebben we te maken met gereflecteerde straling van de zon (VIS-NIR) en met de eigen straling der objecten (TIR). Figuur 3-9 geeft de door een gemiddeld voorwerp gereflecteerde en geëmitteerde hoeveelheid straling grafisch weer. Tussen $\lambda = 3$ µm en 6 µm is er een overgangsgebied waar we zowel met gereflecteerde zonnestraling als met de eigen warmtestraling van objecten te maken hebben.




3-9 De door een gemiddeld object gereflecteerde zonnestraling en geëmitteerde warmtestraling.

Ook in het microgolfgebied kan de warmtestraling nog passief worden waargenomen: de curve van de geëmitteerde straling in figuur 3-9 loopt door tot in het microgolfgebied (paragraaf 2.3.1).

Niet elk lichaam is 'zwart'. Het kan minder energie emitteren dan overeenkomt met zijn (fysische) temperatuur. De verhouding (per eenheid van oppervlak) wordt bepaald door de emissiecoëfficiënt $\varepsilon$ (dus $\varepsilon = 1$ voor een zwart lichaam). Voor een ondoorschijnend voorwerp geldt: $\varepsilon = 1 - \rho$ ($\rho$ is de reflectiecoëfficiënt). $\varepsilon$ en dus ook $\rho$ zijn golflengte-afhankelijk. Een en ander betekent dat ook in het TIR (en in het microgolfgebied als we passief werken) rekening moet worden gehouden met gereflecteerde straling, omdat elk lichaam straling ontvangt uit zijn omgeving (en deze vervolgens reflecteert). Dit maakt het vaststellen van de temperatuur van een object uit de waargenomen stralingstemperatuur vaak erg gecompliceerd.
Naast de emissiecoëfficiënt wordt gebruik gemaakt van de absorptiecoëfficiënt $\alpha$: de verhouding van de door een lichaam (per eenheid van oppervlak) geabsorbeerde straling ten opzichte van de totale inkomende straling. De *wet van Kirchhoff* zegt nu dat bij thermisch evenwicht $\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$. Experimenteel is gebleken dat deze wet ook geldig blijft onder normale aardse omstandigheden zonder thermisch

evenwicht tussen het object en zijn omgeving. Men kan zeggen dat goede absorbeerders en stralers slechte reflectors zijn en omgekeerd.

Tenslotte moet de hoek van inzien (invalshoek) worden verdisconteerd. Alleen voor een zgn. *Lambertse* straler is de geëmitteerde (resp. gereflecteerde) radiantie (zie de definitie hierna) onafhankelijk van de hoek van inzien van de sensor. Een zwart lichaam is ook een Lambertse straler.

Wanneer de sensor zijn eigen stralingsbron meevoert zal deze vaak *coherent* zijn. Dit is onder meer het geval bij radar. In dat geval is er sprake van één frequentie (golflengte) waarbij de golf naar amplitudo èn fase (zie figuur 3-1) of in de tijd en/of naar de plaats bekend is. Uitwendige bronnen (de zon, de aarde in het TIR) zijn meestal *incoherent*. Er is dan sprake van een golflengteband(je) met wisselende fases. Tenslotte worden in tabel 3.1 nog een aantal veel gebruikte *fysische grootheden* gegeven met de bijbehorende eenheden. Hierbij is een onderscheid gemaakt tussen *stralingsgrootheden* (algemeen) en *lichtgrootheden* (vooral in de fotografie gangbaar). Index e duidt op stralingsgrootheden en index v duidt op lichtgrootheden.

De *stralingsenergie*, Q, is de energie in de vorm van electromagnetische golven of fotonen.
De *stralingsenergiestroom* (flux), $\phi = \delta Q/\delta t$, is de hoeveelheid stralingsenergie die zich verplaatst van een punt naar een ander punt per eenheid van tijd; ook vermogen P genoemd (zie hoofdstuk 8).
De *bestralingssterkte*, $E = \delta\phi/\delta A$, is de stralingsenergiestroom vallend op een oppervlak gedeeld door de oppervlakte van het betreffende vlak. Evenzo is de *stralingsemittantie*, M, de door een oppervlak uitgezonden stralingsenergiestroom per oppervlakte-eenheid.
De *bestralingsdosis*, H, is de totale bestralingssterkte geïntegreerd over de integratie- (of belichtings-) tijd van de sensor.
De *stralingssterkte*, $I = \delta\phi/\delta\Omega$, van een bron is de stralingsenergiestroom komende van die bron per eenheid van ruimtehoek ($\Omega$) in de beschouwde richting.
De *radiantie*, $L = \delta^2\phi/\delta\Omega\delta A\cos\theta$, van een waargenomen punt op een oppervlak in een gegeven richting ($\theta$) t.o.v. de normaal op het oppervlak, is de stralingsenergiestroom vanuit een element op het oppervlak dat het betreffende punt omgeeft en gaande in de richting gedefiniëerd door een kegel rondom de gegeven richting, gedeeld door het produkt van de ruimtehoek van de kegel ($\delta\Omega$) en de oppervlakte van de orthogonale projectie van het beschouwde element op een vlak loodrecht op de gegeven richting ($\delta A\cos\theta$).

Door straling te vervangen door licht krijgt men een analoge beschrijving voor de lichtgrootheden (fotometrische i.p.v. radiometrische eenheden). Zie tevens: Slater (1980), hoofdstuk 5.

Bij de omzetting van stralingsgrootheden naar lichtgrootheden of

Tabel 3.1 Veel gebruikte fysische grootheden met hun eenheden. Achtereenvolgens is steeds resp. een stralingsgrootheid en een lichtgrootheid vermeld.
Deze grootheden kunnen ook gedefiniëerd worden als spectrale grootheden, d.w.z. uitgedrukt per eenheid bandbreedte (µm of Hz). De gebruikte eenheden zijn:

s = seconde m = meter J = Joule W = Watt
lm = lumen lx = lux sr= steradiaal cd = candela

| symbool | benaming | | | | eenheid |
|---|---|---|---|---|---|
| | Nederlands | Engels | Duits | Frans | |
| $Q_e$, Q | stralingsenergie | radiant energy | Strahlungsmenge | énergie rayonnante | J = W.s |
| $Q_v$, Q | hoeveelheid licht | quantity of light | Lichtmenge | quantité de lumière | lm.s |
| $\Phi_e$, $\Phi$, P | stralings(energie) stroom | radiant flux/power | Strahlungsfluß | flux énergétique | W |
| $\Phi_v$, $\Phi$ | lichtstroom | luminous flux | Lichtstrom | flux lumineux | lm |
| $E_e$, E | bestralingssterkte | irradiance | Bestrahlungs-stärke | éclairement énergétique | $W.m^{-2}$ |
| $E_v$, E | verlichtings-sterkte | illuminance | Beleuchtungs-stärke | éclairement lumineux | $lx = lm.m^{-2}$ |
| $M_e$, M | stralings-emittantie | radiant exitance | spezifische Ausstrahlung | exitance énergétique | $W.m^{-2}$ |
| $M_v$, M | lichtemittantie | luminous exitance | spezifische Lichtausstrahlung | exitance lumineuse | $lx = lm.m^{-2}$ |
| $H_e$, H | bestralingsdosis | radiant exposure | Bestrahlung | exposition énergétique | $W.s{\cdot}m^{-2}$ |
| $H_v$, H | belichtingsdosis | light exposure | Belichtung | exposition lumineuse | $lm.s.m^{-2} = lx.s$ |
| $I_e$, I | stralingssterkte | radiant intensity | Strahlstärke | intensité énergétique | $W.\ sr^{-1}$ |
| $I_v$, I | lichtsterkte | luminous intensity | Lichtstärke | intensité lumineuse | $cd = lm.\ sr^{-1}$ |
| $L_e$, L | radiantie | radiance | Strahldichte | luminance énergétique | $W.m^{-2}.sr^{-1}$ |
| $L_v$, L | luminantie | luminance | Leuchtdichte | luminance lumineuse (luminance visuelle) | $cd.m^{-2} = lx.sr^{-1}$ |

omgekeerd binnen het VIS-golflengtebereik moet men gebruik maken van de ooggevoeligheidscurve, wetende dat bij de piek van deze curve m.b.t. overdag-zien (555 nm) er 683 lumens per Watt zijn (Slater, 1980). Er geldt:

$$\text{lichtgrootheid} = C \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V(\lambda) \cdot \text{stralingsgrootheid} \cdot d\lambda \qquad (3.6)$$

C = 683 lm/W
V(λ) = ooggevoeligheidscurve voor zien overdag (fotopische curve).

Een *fotometer* (lichtmeter) en een *radiometer* (stralingsmeter) zijn identiek geconstrueerd op één detail na: de spectrale gevoeligheid. Een fotometer voldoet aan de *fotopische curve*: een internationale standaardcurve die nauwkeurig de monochrome spectrale gevoeligheid van het menselijke visuele systeem voor daglicht benadert. Belichtingsmeters zoals die in de fotografie worden gebruikt zijn fotometers, tenzij anders aangegeven. Een ideale radiometer heeft een uniforme spectrale gevoeligheid over de spectrale bandbreedte waarvoor hij is gemaakt. Plaatst men voor de sensor van een radiometer een filter waarvan de transmissiecurve overeenkomt met de fotopische curve, dan is de meter constructief bezien veranderd in een fotometer.

## 3.4 De fysica van de beeldvorming

De fysica van de *beeldvorming* (afbeelding van het aardoppervlak; vraagteken A in figuur 3-2) is verschillend voor de verschillende vensters. Dit wordt in tabel 3.2 nader aangegeven.

Voor we verder gaan wordt het zinvol om aan te geven welke eigenschappen het mogelijk maken een voorwerp waar te nemen en te herkennen. Het volgende lijstje kan daartoe dienen:

1 Vorm en afmetingen (belangrijk bij de sensor: geometrisch scheidend vermogen (*ruimtelijke resolutie*, ook wel 'geometrische resolutie' genoemd).
2 Reflectie- en/of emissie-eigenschappen (belangrijk bij de sensor: dynamisch bereik en radiometrisch scheidend vermogen (*radiometrische resolutie*)).
3 Spectrale eigenschappen (golflengte, frequentie, 'kleur') (belangrijk bij de sensor: golflengte- of frequentiebanden; *spectrale resolutie*).
4 Polarisatie-effecten (belangrijk bij de polarisatiekeuze van de sensor: horizontale (HH, horizontaal gepolariseerd zenden resp. ontvangen), verticale (VV), 'kruis' polarisatie (HV of VH)).
5 Temporele effecten (veranderingen in de tijd of in de plaats) (belangrijk bij de RS: mogelijke tijdsafstand tussen opeenvolgende RS-opnamen van hetzelfde gebied: *temporele resolutie*).

Laten we dit lijstje wat meer in detail bekijken:

Tabel 3.2 De fysica van de beeldvorming (zie ook fig. 1-1)

| venster | specificatie golflengte | fysische kenmerken | problemen |
|---|---|---|---|
| optische venster | zichtbaar licht en reflectief-infrarood (0,35 – 3 μm) | reflectiecoëfficiënt, golflengte-interval, incoherentie | belichting niet regelbaar, verhouding directe/diffuse straling, richtingsafhankelijke reflectiecoëfficiënt |
| | thermisch infrarood (3 – 14 μm) | emissiecoëfficiënt<br>temperatuurverschillen | thermische eigenschappen van de objecten<br>thermische voorgeschiedenis |
| microgolf-venster | - passief 0,1-50 cm | emissiecoëfficiënt, materiaalverschillen | integratietijd |
| | - actief 0,8-25 cm | radardoorsnede, polarisatie, inkijkhoek, coherentie | geometrisch vs. radiometrisch scheidend vermogen |

*Ad. 1 Ruimtelijke resolutie.* Het theoretische *geometrisch scheidend vermogen* wordt bepaald door de afmetingen (opening of apertuur D) van bijvoorbeeld de lens of de antenne van de sensor. De openingshoek β waaronder het kleinste detail nog net door een lens (of antenne) kan worden waargenomen (de zgn. buigings-begrenzing) wordt gegeven door:

$$\beta = 1{,}22\frac{\lambda}{D} \quad \text{in radialen} \tag{3.7}$$

Daar λ sterk toeneemt gaande van het VIS naar de microgolven (maar liefst een factor $10^5$) (VIS in het groen $\lambda = 0{,}5$ μm; radar C-band $\lambda = 5$ cm) en D niet evenredig kan meegroeien zullen er grote verschillen zijn in haalbaar scheidend vermogen tussen de verschillende vensters. Tabel 3.3 geeft hiervan een voorbeeld.

Tabel 3.3 Verschillen in het waarnemen met een camera en met radar

| | Camera | Radar |
|---|---|---|
| ontvanger<br>diameter | lens<br><10.000 λ | antenne<br>60 λ tot 400 λ |
| ruimtelijke resolutie<br>(orde van grootte) | 0,01 mrad | mrad |
| object-afmeting | >>λ | λ |
| variaties in vlakheid<br>(bij oppervlakte-ruwheid <¼λ) | <0,1 μm | cm's |

*Ad. 5 Temporele effecten.* Bepaalde verschijnselen op aarde veranderen met de tijd volgens een vast patroon. De daarbij behorende reflectie- en emissie-eigenschappen van het waargenomen voorwerp (bijv. een gewas) veranderen dan ook (bijv. het spectrale patroon, de radarverstrooiing, enz). Hiervan kan bij bepaalde toepassingen gebruik gemaakt worden (bijv. voor monitoring).

We zien dus dat er voor het ontwerpen en gebruiken van RS-systemen een hele serie afwegingen moeten worden gemaakt, afhankelijk van de toepassing die men op het oog heeft. Het criterium 'ruimtelijke resolutie' (in de wandeling wel kortweg 'de resolutie' genoemd) alleen is veel en veel te beperkt.

## 3.5 Overige problemen

Keren we nu terug naar figuur 3-2: het overzicht van het RS-complex. We hebben nu een overzicht verkregen van de problemen rond het vraagteken A: de fysica rond de object-sensor interactie. Er is al opgemerkt dat het RS-systeem zelf, als puur technisch apparaat, niet zo problematisch is. Wel geldt dit voor wat er achteraan komt en zo komen we bij het vraagteken B: de output. Deze output wordt geheel bepaald door de input, die hierboven werd bekeken. We hebben gezien dat deze input fysisch van aard is: de sensor neemt een fysische grootheid waar (tabel 3.2). De gebruiker van de output echter is meestal in heel iets anders geïnteresseerd. Hij zoekt bijv. naar ziekten in een gewas, naar een bedekkingsgraad, naar de waterinhoud van de bodem. Of hij wil meer economische grootheden kennen zoals bevolkingsdichtheid, verwachte opbrengst van de oogst, areaalschattingen, enz. (vgl. hoofdstuk 2, figuur 2-6) en dat bij voorkeur in numerieke vorm compleet met de foutengrenzen. Al deze informatie is in bepaalde gevallen en onder bepaalde voorwaarden af te leiden uit de door het RS-systeem waargenomen fysische grootheden.
Welke zijn nu die gevallen en bepaalde voorwaarden? Om die vraag te beantwoorden zijn de transformaties nodig van de gebruikers-grootheden naar de relevante fysische grootheden die het RS-systeem kan waarnemen (de stap van B naar A in figuur 3-2 en weer terug). Pas met deze kennis kan het gehele technische systeem worden geoptimaliseerd, zowel de sensor input als de output (de juiste informatie) naar de gebruiker. Kortom er is, naast de beperkingen van het systeem en de beperkingen opgelegd door de omgeving waarin gewerkt wordt, een 'vertaal'probleem (vgl. slot hoofdstuk 1).
Verderop in dit boek zullen een paar van zulke 'vertaal'procedures en de daarvoor vereiste inspanning aan de orde komen.

## 3.6 Literatuur

1 ASP (American Society for Photogrammetry), 1963. Basic matter and energy relationships involved in remote reconnaissance. Photogramm. Engin. 29: 761-799.
2 Colwell, R.N. (editor), 1983. Manual of remote sensing. Deel 1. Am. Soc. Photogramm., Falls Church, Virginia, 1232 blz.
3 Fritz, N.L., 1967. Optimum methods for using infrared-sensitive color films. Photogrammetric Engineering 33: 1128-1138.
4 Schanda, E., 1986. Physical fundamentals of remote sensing. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 187 blz.
5 Sears, F.W., M.W. Zemansky & H.D. Young, 1982. University physics. Sixth Edition. Addison-Wesley Publ. Comp., Reading, Massachusetts, 929 blz.
6 Slater, P.N., 1980. Remote sensing: optics and optical systems. Addison-Wesley Publ. Comp., Reading, Massachusetts, 575 blz.
7 Swain, P.H. & S.M. Davis, 1978. Remote sensing: The quantitative approach. McGraw-Hill, New York, 396 blz.

Documentatie

# 4 Algemene aspecten van beeldvorming en van vastlegging van remote sensing-gegevens

H.J. Buiten

## 4.1 Detectie en registratie van straling; beeldvorming algemeen

De detectie van EM-energie blijkt te kunnen plaatsvinden op drie manieren:

1 fotografisch
2 electro-optisch
3 electronisch.

### 4.1.1 Fotografische (fotochemisch-optische) detectie

Luchtfotografische systemen (zie voor een uitvoerige beschrijving hoofdstuk 6) werken in het gehele zichtbare en in het nabij-infrarode gedeelte van het electromagnetische spectrum. Het fotografische golflengtegebied loopt in het algemeen van 0,3 – 0,9 μm. Via een optisch stelsel (camera) valt straling (licht) op een lichtgevoelige laag; deze straling wordt door een *foto-chemisch proces* op één tijdstip (namelijk de sluitertijd) gedetecteerd als latent beeld en door een chemisch ontwikkelproces vastgelegd als reëel beeld in de vorm van zichtbare grijstinten ('densiteiten') of kleuren en kleurtinten. Zilverhaloïde kristallen die door de inkomende straling worden geactiveerd, vormen de basissubstantie van de fotodetectie in een film. Bij een kleurenfilm zijn deze bovendien gekoppeld aan speciale kleurpigmenten. De zilverhaloïde kristallen met afmetingen in de orde van 1 μm zijn fijn verdeeld in een emulsie waarbij gelatine als bindmiddel fungeert. Een zeer lichtgevoelige emulsie bevat grote, een weinig lichtgevoelige emulsie kleine kristallen.
De film bestaat in het algemeen uit drie bestanddelen:

1) de filmbasis, meestal van polyester;
2) een of meer lichtgevoelige emulsie-lagen, ook wel fotografische *receptoren* genoemd;
3) een plaklaag die de emulsie op de basis vasthoudt.

Afbeelding van het origineel (terreinobjecten) met een fotografische film als detectiemiddel brengt de volgende twee stappen met zich mee:

1 De opslag van de objectgegevens tijdens de *opname* (bestraling) gebeurt in de zeer kleine zilverhaloïde kristallen door middel van het effect dat *fotonen* (lichtquanten) hebben op de ionentoestand van het kristal. Er treedt dan een proces op waarbij een electron van een halogeen-ion vrijkomt en via zgn. gevoeligheidskiemen in het kristal wordt overgedragen aan een beweeglijk zilver-ion, dat zich vervolgens ontlaadt tot onbeweeglijk metallisch zilver. Nadat minimaal vier à vijf fotonen op bovenstaande wijze zijn opgenomen in het kristal, is het kristal in 'aangeslagen' toestand en zegt men dat het kristal *belicht* is. De belichte kristallen vormen tezamen het *latente beeld* als replica van het origineel. Het latente beeld bestaat in feite slechts uit zilverkiemen, die zich op de sterker belichte plaatsen van de film in grotere getale hebben gevormd dan op de zwakker belichte.
2 Het chemisch *ontwikkel- en fixeerproces* zorgt er voor dat alle overige miljoenen zilver-ionen in het belichte kristal eveneens tot zilveratomen worden omgevormd en gefixeerd, dus tot zwart metallisch zilver dat zich vormt rond de zilverkiem van het latente beeld. Op deze manier vindt reductie plaats van zilverhaloïde tot beeldzilver door middel van een enorm versterkingsproces, vergelijkbaar met een electronische (fotonen-) versterker. Elk *belicht* kristal levert aldus een zilver*korrel*. De lokaal variërende hoeveelheid korrels per oppervlakte-eenheid film staat in verhouding tot de lokaal ontvangen hoeveelheid bestraling. Hierdoor wordt het fotografisch beeld tot een *reëel beeld* en zichtbaar voor het menselijk oog.

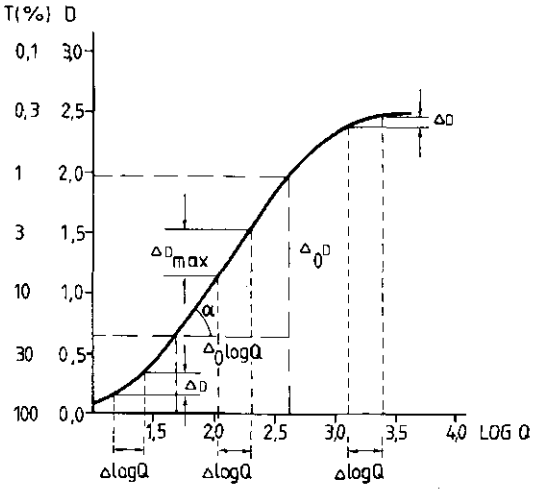
Hoe groter de kristallen in de onbelichte film zijn, des te 'sneller' is de film (des te korter de belichting om een latent beeld te verkrijgen), maar des te grover het beeld dat door het ontwikkelproces wordt opgeroepen. Bij zeer gevoelige emulsies waarvan de kristallen relatief groot zijn, zijn de samenballingen van de beeldzilverkorrels zonder vergroting al op het negatief waarneembaar.

Bij zeer lange en zeer korte belichting wordt de film bij ontwikkeling respectievelijk totaal zwart of blijft totaal transparant zonder enige contrasten. Tussen deze uitersten ligt een optimale belichting. Het verband tussen de densiteit (D) en de belichting (Q) wordt voorgesteld door de zogenaamde *karakteristieke curve*, de 'DlogQ-curve', die specifiek is voor elke soort film die door de fabrikant wordt uitgebracht (figuur 4-1). Onder '*densiteit*' (D) wordt de (film-) dichtheid verstaan, die wordt gedefiniëerd als:

$$D = -\log(T) \tag{4.1}$$

met transmissie T = doorlatendheid van de film voor licht (als fractie uitgedrukt).

Bij een zwart-wit film geeft de densiteit de mate van 'zwarting' aan. Bij een kleurenfilm kan men alleen van dichtheid spreken conform boven-




4-1 Karakteristieke curve van een fotografische film (negatief).
D = densiteit
T = transmissie
Q = belichting van de film in radiometrische eenheden
tgα = γ = gamma van de film = $\Delta_0 D/\Delta_0 \log Q$.

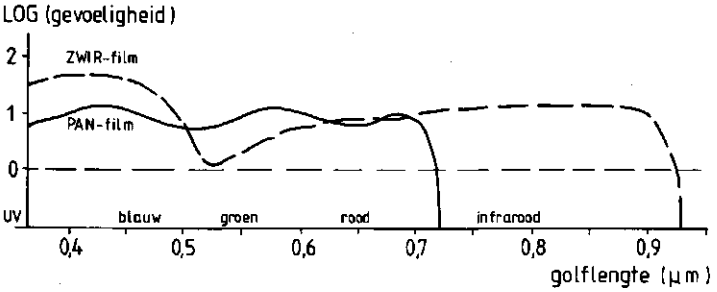
vermelde definitie. Het logaritmisch verband tussen stralingsenergie Q (of bestralingsdosis H, zie paragraaf 3.3 en hoofdstuk 6) en de densiteit D stemt overeen met het menselijk zien voor wat betreft de relatie tussen de verlichtingssterkte en de visuele helderheidsindruk. Op dit verband is ook een fotografische *grijstrap* gebaseerd.
In de curve is meestal een min of meer rechtlijnig gedeelte te zien; dit bepaalt de 'gamma' (γ) van de film (zie figuur 4-1). Hoe groter de gamma, des te groter wordt het densiteitsverschil ΔD in het beeld bij eenzelfde belichtingsverschil ΔlogQ op de film. Het beeld registreert dan kleine verschillen in gereflecteerde hoeveelheid straling van naast elkaar liggende terreinobjecten veel beter.
De betekenis van de karakteristieke curve wordt nader toegelicht in hoofdstuk 6, met name in paragraaf 6.3.3, waar inzicht wordt gegeven over de relatie met de begrippen *dynamisch bereik* en *contrast*.

Tegelijk met de *dichtheids-verdeling* van de densiteit wordt ook de *voortplantingsrichting* van de golven vastgelegd. De nauwkeurigheid waarmee deze richtingen geconstrueerd kunnen worden, kan door geen enkele andere sensor worden bereikt. Terwijl de interpreteur vooral van de zichtbaar gemaakte stralingsverdeling gebruik maakt, maakt de fotogrammetrie in het bijzonder gebruik van de voortplantingsrichting voor het produceren van een kaart.

Het *ruimtelijk scheidend vermogen* van een film (filmresolutie) wordt uitgedrukt in het aantal optische lijnen per millimeter; een optische lijn in een testpatroon bestaat uit een lijnpaar van één zwarte lijn met één witte tussenruimte van gelijke breedte. In vergelijking met niet-luchtfotografische RS-systemen wordt de volgende equivalentie aangehouden:

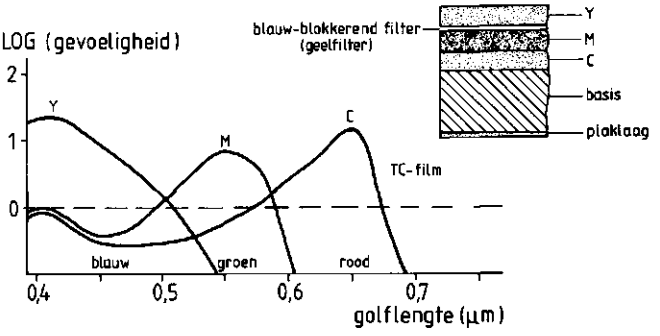
1 optische lijn ≈ 2,8 pixelafmeting

bij de vergelijking van fotografische filmresolutie met de ruimtelijke resolutie van een (multispectraal) aftastsysteem. Men zij echter




4-2 Spectrale gevoeligheid van panchromatische (PAN, doorgetrokken lijn) en zwart-wit infraroodfilm (ZWIR, onderbroken lijn) (bron: Kodak publ. M-29, 1982; Lillesand & Kiefer, 1987).

* (Overgenomen met toestemming van Eastman Kodak Company).



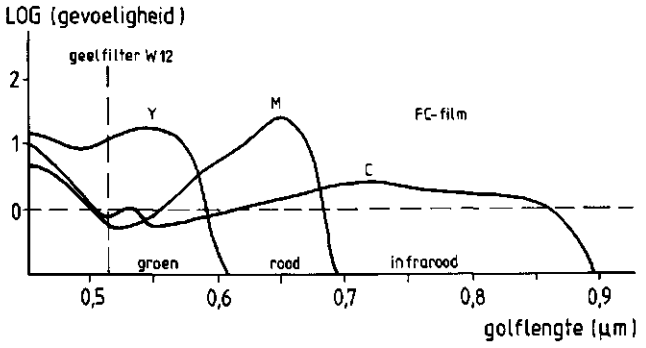

4-3 Spectrale gevoeligheid van normale kleurenfilm (TC); Y = blauwgevoelige laag (vormt kleurstof geel); M = groengevoelige laag (vormt kleurstof magenta); C = roodgevoelige laag (vormt kleurstof cyaan). Benadering spectrale banden luchtfotografie: Y: 0,40 – 0,51 µm M: 0,49 – 0,59 µm C: 0,57 – 0,67 µm. (Bron: Kodak publ. M-29, 1982; Lillesand & Kiefer, 1987).
(Overgenomen met toestemming van Eastman Kodak Company).

voorzichtig met het gebruik van het aantal optische lijnen per mm als resolutiecriterium; zie het commentaar in de paragrafen 6.2.1 en 6.3.4 en in Supplement 4 punt 8.

De voornaamste *filmtypen* in de luchtfotografie (zie figuur 4-2 t/m 4-4) zijn:
- panchromatische (zwart-wit) film (PAN); één emulsielaag;
- zwart-wit infraroodfilm (ZWIR); één emulsielaag;
- normale kleurenfilm (TC: 'true colour'); drie emulsielagen;
- kleureninfraroodfilm (FC: 'false colour'); drie emulsielagen.

De figuren 4-2 t/m 4-4 karakteriseren de *spectrale gevoeligheid* van elk filmtype met betrekking tot de golflengte van de op de film vallende straling (0,3 – 0,9 µm). Let op de karakteristieke verschillen van de filmtypen en hun spectrale banden. De opgave van de bandbreedte is slechts een benadering; deze is gebaseerd op een gevoeligheidsreductie met een factor 10 t.o.v. het maximale gevoeligheidsniveau (zie de horizontale gestreepte nullijn in de figuren).

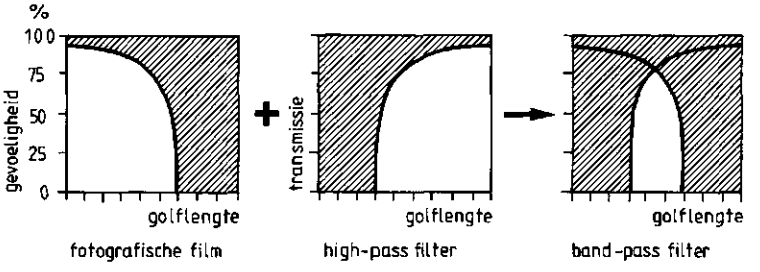
Het belangrijkste voordeel van het gebruik van kleuren is dat het menselijk oog in staat is veel meer kleurschakeringen te onderscheiden dan grijstonen.




**4-4** Spectrale gevoeligheid van kleureninfraroodfilm (FC); Y = groengevoelige laag (vormt kleurstof geel); M = roodgevoelige laag (vormt kleurstof magenta); C = infraroodgevoelige laag (vormt kleurstof cyaan). Benadering spectrale banden luchtfotografie: Y: 0,52 – 0,59 µm M: 0,55 – 0,68 µm C: 0,62 – 0,85 µm. (Bron: Kodak publ. M-29, 1982; Lillesand & Kiefer, 1987).

De gevoelige laag bij een *normale kleurenfilm* (TC) is opgebouwd uit een drietal afzonderlijke lagen, welke ieder gevoelig zijn in een ander, weliswaar overlappend, gedeelte van het zichtbare spectrum.
Bij een *kleureninfrarood-film* (FC) wordt, in verband met de sterke verstrooiing door de atmosfeer (Rayleigh-scattering) en het feit dat de infraroodgevoelige laag tevens gevoelig is voor blauw (zie figuur 4-4), het blauw weggefilterd. Doordat nu bij het ontwikkelen een kleurverschuiving in de richting van het blauw wordt toegepast, wordt het mogelijk het infrarode reflectiepatroon van een kleur te voorzien (rood). Door de kleurverschuiving wijken de kleuren sterk af van het gebruikelijke kleurenpalet. We spreken dan ook van onechte kleuren, pseudokleuren of '*false colour*'. Men dient er op bedacht te zijn dat het niet mogelijk is de densiteiten van de drie lagen afzonderlijk te meten. Het is wel mogelijk uit de densiteitsmetingen van de drie lagen samen de afzonderlijke (analytische) densiteiten te berekenen. De resultaten zijn echter minder nauwkeurig dan bij gebruik van afzonderlijke zwart-wit opnamen zoals dit in de *multispectrale fotografie* het geval is. Zoals we namelijk gezien hebben in hoofdstuk 3 (figuur 3-11) zijn de onderlinge verschillen tussen de objectspecifieke reflectiecurves niet overal even groot. De mogelijkheid om verschillende objecten van elkaar te onderscheiden, is het grootst in die gebieden waarin de verschillen in specifieke reflectie het grootst zijn. Door nu opnamen te maken in die golflengte-intervallen (banden) waarin de onderlinge verschillen het grootst zijn, wordt het mogelijk de objecten duidelijk van elkaar te onderscheiden. Wanneer er *tegelijkertijd* een aantal opnamen gemaakt wordt in *verschillende* spectrale banden, spreekt men van *multispectrale fotografie* (MSP: 'Multi-Spectral-Photography'); zie ook Graham & Read (1986).
Voor het maken van multispectrale opnamen dient men te beschikken over een camera met meerdere lenzen, of over meerdere camera's die zodanig zijn opgesteld dat zij alle tegelijkertijd hetzelfde gebied waarnemen. Slechts zwart-wit films (PAN, ZWIR) zijn vereist.
Om te bereiken dat er opnamen gemaakt kunnen worden in *nauwe*

gebieden van het electromagnetisch spectrum (hoge spectrale resolutie), maakt men gebruik van een combinatie van fotografische filters en films met een speciale gevoeligheidskarakteristiek. Op grond van hun werking kunnen we drie verschillende typen filters onderscheiden.
Een *low-pass* absorptiefilter laat alleen electromagnetische *straling* beneden een bepaalde golflengte passeren, terwijl een *high-pass* absorptiefilter alleen electromagnetische straling boven een bepaalde golflengte laat passeren. *Band-pass* filters kunnen een combinatie zijn van een high-pass filter en een fotografische film met een speciale gevoeligheidskarakteristiek (figuur 4-5).



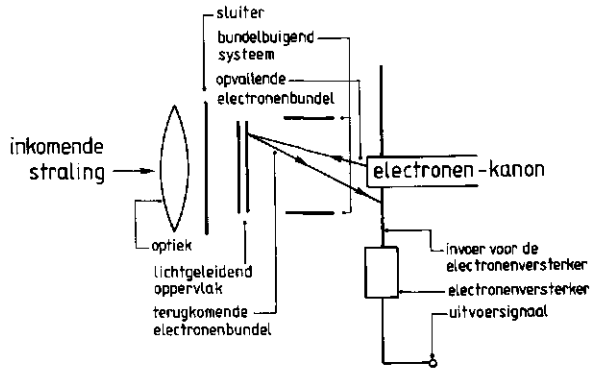

4-5 Band-pass filter als combinatie van een high-pass filter en een fotografische film met een speciale gevoeligheids-karakteristiek.

Naast deze absorptie-filters bestaan nog de zogenaamde *interferentiefilters*, waarbij de straling niet wordt geabsorbeerd, maar gereflecteerd. Dit zijn band-pass filters. Interferentiefilters maken het mogelijk te registreren in extreem nauwe banden, maar worden weinig gebruikt omdat zij erg duur zijn; bovendien vertonen zij een afwijkend gedrag bij schuin invallende straling.

Het met luchtfotografie verkregen analoge beeld (= FOTO) is direct geschikt voor visuele verwerking, eventueel bijgestaan door instrumentele beeldverwerkingsmethoden (zie verder hoofdstuk 6).

### 4.1.2 Electro-optische detectie

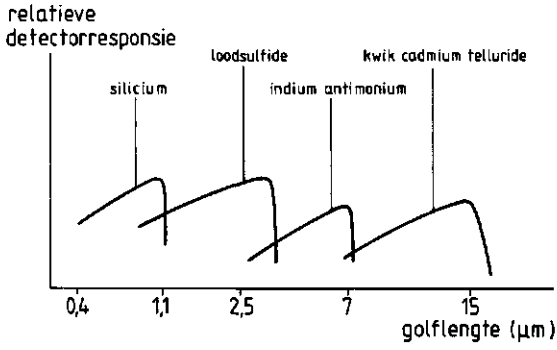
a In beeldbuissystemen zoals in gebruik bij de SRF ('Systematic Reconnaissance Flight') (zie hoofdstuk 1, figuur 1-1), of zoals indertijd het Return-Beam Vidicon (RBV) systeem in Landsat-3 (éénkanaals RBV-systeem in golflengtegebied 0,505-0,750 µm) wordt een beeld gevormd op een *foto-electrisch oppervlak* dat als stralingsdetector fungeert, te vergelijken met luchtfotografische systemen die het beeld vormen op een foto-chemisch oppervlak. Het latente beeld wordt daarna met een electronenbundel afgetast en vervolgens in een reeks van electrische signalen omgezet (figuur 4-6). Het systeem omvat evenals bij fotografie een sluiter en een optisch stelsel (videocamera) en is evenals een fotografische camera een 'framing system', waarin op (nagenoeg) één moment een tweedimensionaal beeld wordt opgenomen.
Het optisch stelsel van de sensor (met name de vidicon) beeldt na opening en sluiting van de camerasluiter het object scherp af op een




**4-6** Foto-electrische detectie: return-beam vidicon (RBV) (bron: Swain & Davis, 1978).

lichtgeleidend oppervlak, waarvan de achterzijde vooraf negatief werd geladen door de electronen-aftastbundel. Waar licht is gevallen op het lichtgeleidend oppervlak, neemt de geleidbaarheid toe waardoor in die plaatsen aan de achterzijde van het oppervlak de electrische lading in positieve zin wijzigt, afhankelijk van de plaatselijke belichtingssterkte. Op deze wijze ontstaat een *latent beeld* van electrische ladingsverschillen als replica van het origineel. Door de priemdunne electronen-aftastbundel van de vidicon wordt nu plaats voor plaats zoveel negatieve lading afgegeven dat de ladingsverschillen worden geneutraliseerd. In een return-beam vidicon wordt de bundel aan de achterzijde van het lichtgeleidend oppervlak gereflecteerd; van deze gereflecteerde bundel wordt daarna gemeten hoeveel electronen zijn afgestaan en wordt door middel van een electronenversterker een electrisch signaal aan de uitgang van de vidicon verkregen. Dit signaal wordt gesynchroniseerd met de signalen die de plaats van de electronen-aftastbundel sturen; tezamen bouwen zij het beeld op (latent videobeeld).

b In scannersystemen worden gewoonlijk *fotondetectoren* (ook quantum-detectoren genoemd) gebruikt die werken volgens het principe dat door de via een optisch stelsel inkomende 'fotonen' (straling opgevat als deeltjes) binnen de kristallijne structuur van de fotondetector electronen worden losgemaakt die op hun beurt een electrisch signaal in de fotondetector te weeg brengen.
De respons van de fotondetector is evenredig met het aantal opgewekte electronen en daardoor met het aantal fotonen dat op de detector viel (latent beeld). Er zijn verschillende soorten fotondetectoren, afhankelijk van het gevoeligheidsbereik in het golflengtetraject van 0,3 tot 25 μm (figuur 4-7). De gevoeligheid van de fotondetector is een maat voor de electrische respons (d.i. het aantal opgewekte electronen) per Watt inkomende straling.
Speciale vermelding verdienen de veelbelovende zeer kleine en radiometrisch gevoelige CCD ('charge-coupled devices') -halfgeleider-sensoren als jongste vorm van electronische beeldvormer (zie Swain & Davis, 1978; Bokhove, 1980). In scannersystemen kunnen zij dicht naast elkaar




**4-7** Relatieve respons van kristallijne fotondetectoren (bron: Swain & Davis, 1978).

in een lijnvormige rij ('array') worden geplaatst. Het stralingsgevoelige oppervlak bestaat uit silicium diodes, die zijn geplaatst in het beeldvlak van een optisch stelsel met sluiter. Wanneer er straling valt op de diode, wordt een hoeveelheid lading (stroom) voortgebracht die evenredig is met de bestralingssterkte. Deze lading wordt overgebracht naar de ladingscel achter de diode, en vervolgens 'uitgelezen' in een geïntegreerd circuit van metaaloxide halfgeleiders. De uitgaande electrische signalen vormen het latente beeld van het afgebeelde object.
Momenteel kan men deze detectoren toepassen voor het golflengtebereik 0,3 – 1,2 µm. Voor grotere golflengten zijn er CCD-sensoren in ontwikkeling. Ook is er voortgang te verwachten in de ontwikkeling van vlakvormige CCD-sensoren zoals bij moderne video-camera's nu al het geval is. In plaats van lijnaftasting vindt dan een frame-opname plaats. Speciale problemen geeft de constructie van het lenzenstelsel of (bij thermografie) de spiegeloptiek.
In nabij- en midden-infrarode gebieden van het spectrum is het gewoonlijk niet nodig de detectoren te koelen. In het ver-infrarood daarentegen is koeling noodzakelijk bijv. met vloeibare stikstof tot 77 K (-196°C) zoals bij thermografische detectoren het geval is. Hoofdstuk 7 geeft verdere uitleg over de multispectrale opnamesystemen waarin bovengenoemde electro-optische detectiemiddelen worden toegepast.

c Ook de atmosfeer kan door middel van RS worden gepeild. Dit is van betekenis voor ondermeer de meteorologie en het vakgebied van de luchtverontreiniging. Dit aandachtsveld valt buiten de opzet van dit boek, maar op deze plaats zal er in het kort iets over gezegd worden. Daar het bij de opsporing en meting van luchtverontreiniging dikwijls gaat om deeltjes van zeer klein formaat (van moleculair-formaat tot de grootte-orde van de golflengte van licht) kan er gebruik gemaakt worden van een optische, actieve detectietechniek die *LIDAR* heet ('Light detection and ranging'). Lidar heeft hetzelfde werkingsprincipe als radar maar dan met licht. De instrumentatie wekt zelf een regelbare laserbundel op die het medium (atmosfeer) tussen waarnemer en object doordringt. Deze monochromatische, coherente en priemdunne lichtbundel heeft een grote spectrale helderheid en

doordringingssvermogen. Er zijn thans tal van regelbare, coherente laserbronnen in het UV, zichtbaar licht en het nabij-infrarood (tot 10 μm). Het ontvangstgedeelte ontvangt de echo via een optische, vlakke of parabolische spiegel op specifieke lichtversterkers of fotondetectoren, waardoor na electronische versterking een signaal kan ontstaan.
Behalve de *echosterkte* wordt ook de *positie* van (-de afstand tot-) het reflecterend object gemeten uit het tijdsverschil tussen uitzenden en ontvangen. Een van de meetmethoden is de absorptieverschil-methode, die in staat is kleine hoeveelheden van bepaalde atmosferische gasconcentraties (aerosols) als een gemiddelde te bepalen over een uitgekozen pad in de orde van een kilometer. De methode berust op het uitzenden van twee golflengten $\lambda_1$ en $\lambda_2$, de een in de absorptieband van het object, de ander er buiten. Op de plaats van ontvangst wordt de verhouding tussen de echosterkte in beide golflengten gemeten. Er wordt òf gebruik gemaakt van een retroreflector òf van een tweede standplaats voor het ontvangstgedeelte. De meting van deze verhouding kan thans erg nauwkeurig plaatsvinden (kleiner dan 1/3%). De beperkende factor in de detectorgevoeligheid is gelegen in atmosferische turbulentie. Ook blijkt het met een zekere mate van nauwkeurigheid mogelijk te zijn om met LIDAR (gepulsde robijnlaser) atmosferische gassen waar te nemen vanuit een vliegtuig, waarbij de grond als reflector optreedt. Hiermee kunnen ondermeer (onzichtbare) rookgassen worden onderzocht. De ruimtelijke resolutie is in de orde van 5 meter.

### 4.1.3 Electronische detectie

In *microgolfsystemen met eigen stralingsbron* (actieve systemen) geschiedt in de sensor (met de antenne als detector) de bepaling van plaats (i.c. afstand) en van stralingsintensiteit door *electronische vergelijking* van de fysische toestand van de uitgezonden microgolven met die van de echo, afkomstig van het object. Deze vergelijking leidt tot een amplitude/tijd video-signaal, dat gebruikt kan worden om een beeld voort te brengen (op te bouwen) in een filmrecorder (reëel beeld) dan wel om vastgelegd te worden op magneetband (latent beeld). Hoofdstuk 8 geeft verdere uitleg van de specifieke kenmerken van de actieve microgolf-systemen.
*Passieve* microgolfsensors hebben geen eigen stralingsbron, maar observeren de in de natuur aanwezige microgolfenergie in het gezichtsveld ('field of view') van de sensor, welke wordt bepaald door de antenneconfiguratie. De ontvangen energiesterkte is zeer laag in vergelijking met radar. Het door de antenne opgenomen signaal wordt versterkt; het verschil tussen dit antennesignaal en een intern referentiesignaal wordt in de sensor *electronisch gedetecteerd*, resulterend in een uitgangssignaal, dat correspondeert met de ontvangen energiesterkte.
De ontvangen energie is een functie van verscheidene factoren m.b.t. het object (temperatuur, textuur, electrische en chemische eigenschappen), atmosfeer, invalshoek en antenneconfiguratie.

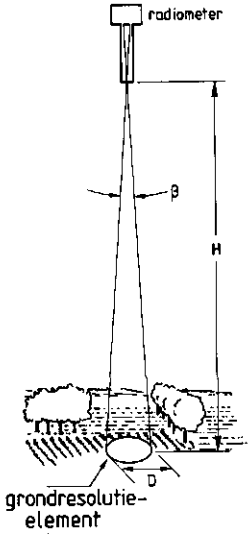
## 4.2 Beeldvorming

Men kan sensorsystemen onderscheiden in:

a *beeldvormende* sensorsystemen, onderverdeeld in:
'framing systems' (FOTO (lufo), BEELD (vidicon))
'scanning systems' (BEELD (MSS, TIRS, RADAR))

b *niet-beeldvormende* sensorsystemen, ook wel 'spectral data systems' genoemd, bijv. lidar, spectroradiometer, thermische radiometer, passieve microgolvenradiometer, radar scatterometer.

Wat is het kenmerkende verschil, ofwel, wat is eigenlijk een '*beeld*'? We zouden kunnen stellen:
'Een beeld ('image') is een twee-dimensionale afbeelding van de ruimtelijke structuur van het object met betrekking tot zijn spectrale kenmerken', of:
'Een beeld is een twee-dimensionale geordende opbouw of verzameling (matrix) van beeldelementen (pixels) die een unieke en instrumentele reconstructie of afbeelding (in feite transformatie) beschrijft van de spectrale ruimtelijke verdeling van de terreinelementen in het werkzame gebied van het sensorsysteem'. Nadruk ligt hierin niet op de afbeelding (detectie etc.) maar op het waarnemen in een *ruimtelijk domein* (categorie a.).
Bij niet-beeldvormende sensors (categorie b.) vindt detectie plaats in het *tijddomein*, met de bedoeling in een bepaalde spectraalband gedurende een tijdsverloop respons te ontvangen van één terreinelement. De ruimtelijke omvang van dit 'punt' hangt af van bijv. de openingshoek van de sensor (figuur 4-8), die ondermeer gekozen wordt naar gelang het sensorsysteem (bijv. al of niet een eigen stralingsbron), van het




4-8 Openingshoek (β) en resulterend grondoppervlak (D) dat wordt waargenomen door een radiometer (bron: Lillesand & Kiefer, 1987).

dynamisch bereik, van de verstrooiingseigenschappen van het object en van de benodigde integratietijd om een betrouwbaar electrisch signaal of andere meetwaarde te verkrijgen. Door beweging van het platform van de sensor (d.m.v. voertuig of vliegtuig) kan men een reeks van terreinpunten tot een lijn samenvoegen zodat een *spectraal terreinprofiel* wordt verkregen. (N.B. géén 'beeld' in bovenstaande zin). Omdat voor het verkrijgen van de gewenste radiometrische resolutie de sensor een zekere integratietijd nodig heeft om een uitgesproken electrisch signaal te verkrijgen, is er een relatie tussen bewegingssnelheid van de sensor en openingshoek van de aftastende radiometer. Openingshoek ('Instantaneous field of view': IFOV), vlieghoogte en inkijkhoek bepalen de afmetingen van het plaatselijke grondresolutie-element (resolutiecel).

## 4.3 Beeldvastlegging en bemonstering

De beeldvastlegging van beeldvormende sensorsystemen (categorie a.) kenmerkt zich door:

1 *directe* beeldvastlegging:
De film in (lucht)fotografische sensoren is zowel detector- als vastleggingsmedium. Het product is een analoog en reëel beeld, exclusief FOTO te noemen.
2 *indirecte* beeldvastlegging:
Het detectie-gedeelte van electro-optische en van electronische sensoren brengt een opeenvolging van electrische signalen voort die corresponderen met de EM-energiewaarden van de opeenvolgend waargenomen terreinelementen. Het product is een latent BEELD, dat in eerste aanleg analoog van aard is.

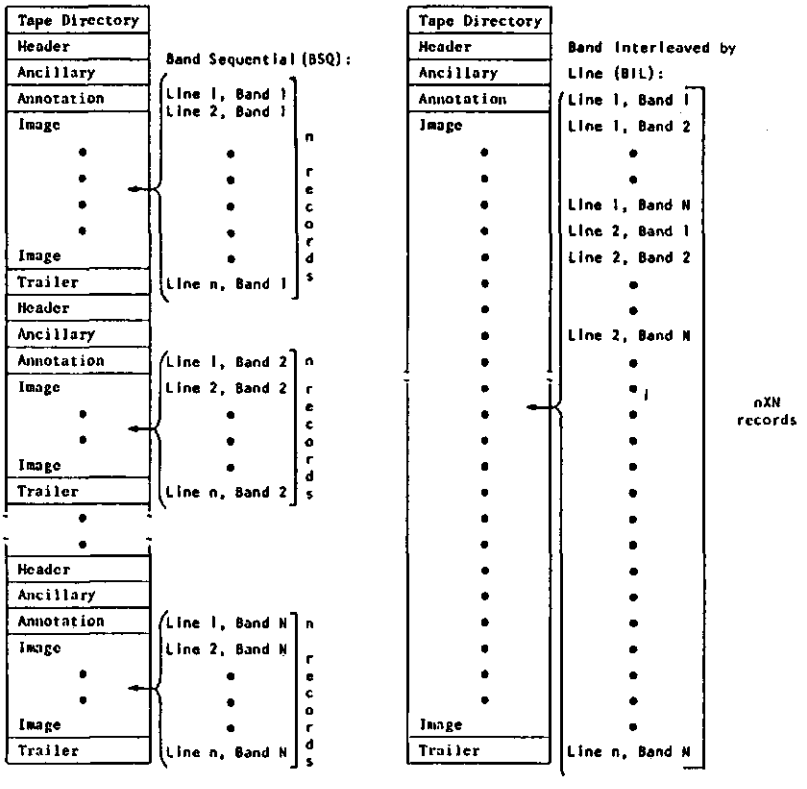
De indirecte beeldvastlegging zal nu in 't bijzonder worden besproken.

Het optisch stelsel (van RBV, MSS of TIRS) of het electronisch stelsel zelf (radar) tezamen met de voortbeweging van het sensorplatform (met uitzondering van RBV) zorgen voor de eenduidige ruimtelijke opbouw van het beeld. *Beeldelementen* (pixels) ontstaan pas na omzetting van de analoge signaalstroomwaarden naar digitale waarden (AD-conversie). Behalve deze AD-conversie vindt er veelal ook een *voorbewerking* plaats m.b.t. geometrische en radiometrische correcties, alvorens de RS-gegevens naar de gebruiker gaan. Dit heeft tot gevolg dat om bepaalde redenen de ruimtelijke omvang van een *pixel* (omgerekend naar terreinafmetingen) niet gelijk behoeft te zijn aan een (grond)resolutiecel oftewel IFOV. Speciaal bij radar is dit het geval, waar het beeldelement wordt samengesteld uit een weloverwogen aantal bemonsteringen (zie de hoofdstukken 8 en 19).

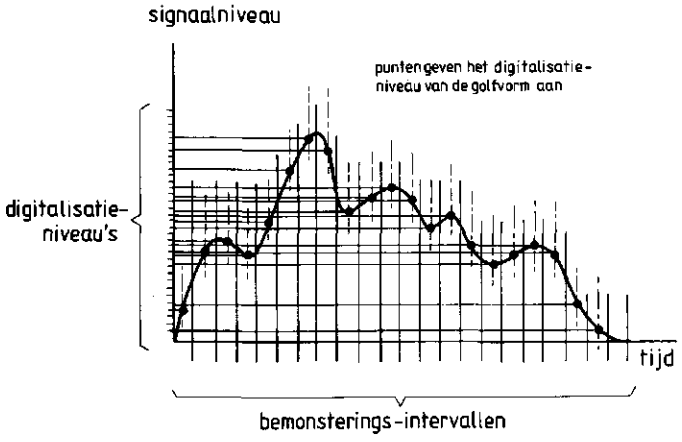
RS-gegevens die met een satelliet worden verkregen, worden voorlopig als ruwe gegevens opgeslagen en op geschikte momenten, gedigitaliseerd en gecodeerd, via modulatie van een EM-draaggolf naar de aarde gestuurd (Telemetrie). In het grondstation worden de gegevens

gedecodeerd en op tape gezet. De gebruiker van een tape kan dan tenslotte via een *kleurengrafisch systeem* naar eigen maatstaven een reëel BEELD produceren.
Verwerking op een computersysteem kan gewoonlijk alleen plaats vinden indien de uitvoerder van de remote sensing-opname de originele gegevens op de opname-HDDT ('High Density Digital Tape') heeft omgevormd naar de leescode van de computer van de gebruiker tot een reeks van CCT's ('computer compatible digital tape'). De organisatie ('formatting') van de getallen op deze magneetbanden hangt af van de gebruikerswens, of hij deze BIL ('band interleaved by line', per aftastlijn alle spectraalbanden); dan wel BSQ ('bandsequential', per spectraalband alle pixels in volgorde) wil hebben (figuur 4-9). Ook behoort zelfs een getallen-organistie BIP ('band interleaved by pixel', per pixel alle spectraalbanden) tot de mogelijkheden.

Vastlegging op magneetband is in de remote sensing van grote betekenis. Een van de voornaamste redenen voor de omzetting van analoge naar digitale waarden (AD-conversie) is dat daardoor een *numerieke gegevensverwerking* (zie thema 4 en hoofdstuk 1) mogelijk wordt. Het gros van de computers zijn digitale computers; ook tal van patroonherkennings- en beeldverwerkingsmethoden zijn digitaal georiënteerd. Een verduidelijking van deze conversie naar 'digital



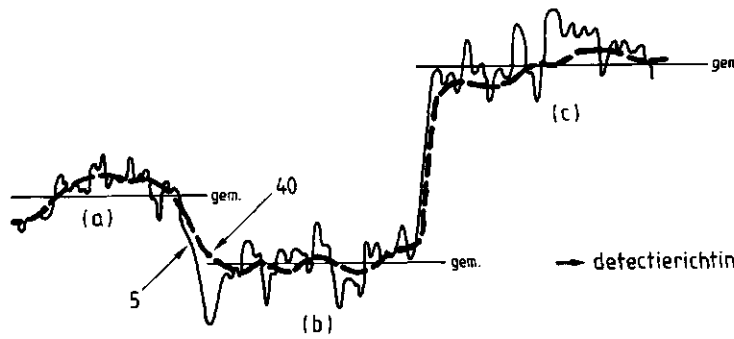

4-9 Voorbeeld van 'bandsequential' (BSQ) en 'band interleaved' (BIL) scannerdata van N banden met n lijnen elk (bron: Slater, 1980).




4-10 Bemonstering van een analoog signaal bij de AD-conversie (bron: Swain & Davis, 1978).

numbers' (DN) geeft figuur 4-10. De *bemonstering* dient in evenwicht te zijn met de hoogste frequentie in het signaalverloop, die men nog wenst te bewaren (zie ook paragraaf 14.3). Hierbij mag geen semantische inhoud verloren gaan of vervormd worden. Het signaalverloop is een weerspiegeling van de variatie in EM-straling die de sensor van de terreinobjecten ontvangt. Er zijn verscheidene oorzaken die deze stralingsontvangst vervormen (beelddegradatie). Daarbij kan zowel sprake zijn van een verzwakking als van een additionele waarde. Men betitelt deze verstoringseffecten gewoonlijk met de term *ruis* die men een toevallig ('random') karakter toeschrijft. Egan (1985) onderscheidt een achttal soorten ruis! De oorzaken van ruis zijn samen te vatten in drie hoofdpunten:

- De geaardheid van de *sensor* als afbeeldingssysteem, zoals instrumentele eigenschappen, imperfectie van de optiek, invloeden van mechanische en electronische componenten en eigen electronische detectorruis. Hierin speelt de kleinst detecteerbare stralingseenheid $\Delta Q$ ('noise equivalent power', NEP) een belangrijke rol. Een andere beperking is het *dynamisch bereik* dat werd gedefiniëerd als de verhouding tussen de maximaal detecteerbare stralingsenergie $Q_{max}$ en de minimaal nog weer te geven stralingsenergie $Q_{min}$ in decibels (hoofdstuk 3).
- De invloed van de *atmosfeer* ten gevolge van verstrooiing en absorptie, resulterend in zowel een verzwakkingsfactor als een optelwaarde die per golflengte verschillend is.
- De geaardheid van het *terrein*, met name de variabiliteit van de terreinobjecten en hun detaillering, in verhouding tot de ruimtelijke en radiometrische resolutie van het sensorsysteem. Hiertoe kan men ook de objectafbeeldings-ruis ('scene noise') rekenen die een variatie in het gedetecteerde signaal teweeg brengt ten gevolge van heterogeniteiten binnen één objectklasse. Afwijkende reflecterende objecten zorgen voor een grotere spectrale verdeeldheid binnen die objectklasse. Deze verdeeldheid neemt toe bij een fijnere ruimtelijke resolutie, maar neemt af bij grovere ruimtelijke resolutie omdat dan het effect van de afwijkende objecten wordt uitgemiddeld (figuur 4-11).




4-11 Invloed van de resolutiecel-grootte op de 'scene noise'-variabiliteit van het detectie-signaal in de aftastlijn van een sensor, die drie verschillende terreinobjecten (klassen) (a), (b) en (c) opeenvolgend aftast (zie ook de denkbeeldige gemiddelden).
5 = 5 meter ruimtelijke (grond-)resolutie.
40 = 40 meter ruimtelijke (grond-)resolutie.

Men dient dan ook bij de keuze van het *bemonsteringsinterval* (horizontale as in figuur 4-10) en bij de keuze van het *aantal stappen of niveaus* (verticale as in figuur 4-10) rekening te houden met het storend optreden van ruis. In een actuele RS-situatie omvat deze ruis méér dan alleen de instrumentele ruis die door het afbeeldingssysteem wordt teweeggebracht. Ook de factoren atmosfeer en terrein zijn invloedrijke componenten.
Kiest men de digitalisatie-stappen (deze keuze wordt in paragraaf 14.3 *kwantiseren* genoemd) op grond van de eerdergenoemde NEP, dus in feite de radiometrische resolutie zoals genoemd in hoofdstuk 3, dan introduceert men in de actuele situatie een schijnnauwkeurigheid omdat dan, ten gevolge van signaalvervorming en -verzwakking, het actueel waarneembaar onderscheid tussen naburige digitale waarden minder scherp is dan de radiometrische resolutie doet vermoeden. Veelal zal het maximale weergavesignaal $S_{max}$ niet bereikt worden (het theoretische dynamisch bereik wordt dan potentiëel onvoldoende benut) en zal het detectiesignaal zich bewegen in een veel smaller bereik dan in een 'ideale' situatie. Ook zal het globale niveau waarop het detectiesignaal zich beweegt, zich steeds wijzigen zodra bij de voortbeweging van het sensor-platform een gebied wordt gedetecteerd met andere stralingskarakteristieken. Bij vliegtuig remote sensing kan men de electronische instrumentatie afstemmen op de heersende regionale omstandigheden door de te produceren signaalwaarden te controleren en te sturen met versterking ('gain') en verschuiving ('offset'). Bij satelliet-sensorsystemen ontbreekt deze mogelijkheid in het algemeen, tenzij er speciale voorzieningen zouden zijn getroffen voor terugkoppeling van de instrument-parameters op de actuele situatie.
Bij luchtfotografische opnamen komt het er voor de gebruiker (in casu de RS-ondernemers) op aan (deels vooraf!) een doelgerichte keuze te maken van filmtype, filmgevoeligheid i.v.m. spectraalbereik, filter, belichting en ontwikkeling. Hierbij zijn hulpmiddelen als belichtingsmeters en ervaringsgegevens van nut; evenwel pas *achteraf* kan men aan het densiteitsbereik en het contrast zien of de opname geslaagd is of niet.
Het zal dan ook van veel belang zijn de bedoelingen van het

onderhavige RS-systeem voor de informatieverkrijging te betrekken bij het onderscheiden tussen wat wezenlijk van belang is (het 'eigenlijke' signaal in semantische zin) en wat een storend effect is (de onvermijdelijke ruis). Dit ligt deels op het aandachtsveld van de beeldinterpretatie (thema 4).

Zoals geschetst is het dus voor de AD-conversie in technisch opzicht van belang het relevante analoge signaal door digitale bemonstering betrouwbaar te reproduceren. Te weinig niveaus (stappen) is onjuist en veroorzaakt een verbrokkeling en effening, maar ook de keuze van te veel niveaus is af te raden. Dat laatste zou betekenen dat de relatief snel fluctuerende ruiscomponent van het door de sensor ontvangen detectiesignaal te sterk gaat meespreken in de digitalisatie. Deze schijnnauwkeurigheid in de signaalweergave kan nadelig uitwerken bij die beeldbewerkingen die de hoogfrequente variatie in pixelwaarden versterken (zie hoofdstuk 14). Ook kan dan een efficiënte opslag en digitale beeldinterpretatie in de weg worden gestaan.
Ervaring in RS heeft uitgewezen dat een digitalisering in 256 stappen (8 bits) gewoonlijk voldoet. Aldus kan men elke getalwaarde in de getallenreeks van 0 tot en met 255 naar tape wegschrijven als de som van de bijdragen van acht opeenvolgende bitniveaus ('bitslices'), namelijk de positie 'aan' (= 1) of 'uit' (= 0) van opeenvolgend het:

$0^e$ bit m.b.t. optelcomponent $2^0$ = eenheden
$1^e$ bit m.b.t. optelcomponent $2^1$ = getallenreeks-doorsnede in groepen van twee
$2^e$ bit m.b.t. optelcomponent $2^2$ = getallenreeks-doorsnede in groepen van vier
.
.
.
$7^e$ bit m.b.t. optelcomponent $2^7$ = getallenreeks-doorsnede in groepen van 128.

Uit onderzoekingen met de 'bitslicing'-techniek blijkt echter dat bijv. bij sommige Landsat-CCT's de bitniveaus 0, 1, 2 en zelfs 3 in feite *ruis* bevatten, in plaats van informatie over significante verschillen in stralingswaarde van naburige pixels. Een reductie van het aantal bitniveaus zou dan mogelijk zijn! Bij de beeldverwerking is dit bijv. te effectueren door alle pixelwaarden door vier of acht te delen en af te ronden op gehele waarden.

Op film vastgelegde beelden (in 't bijzonder de luchtfoto) hebben in 't algemeen een grote informatie-dichtheid, meer dan enige beeldbuisweergave van op CCT vastgelegde RS-gegevens. De oorzaak is vooral gelegen in de fijne korrelstructuur van de filmemulsie. Sommige films zijn in staat tot een scheidend vermogen van 400 optische lijnen per mm (één optische lijn in een lijnentestpatroon is de dikte van 1 zwarte streep plus de aangrenzende witte tussenruimte van dezelfde dikte, zie paragraaf 4.1.1).

Door de grote informatie-dichtheid kan er sprake zijn van *redundantie* (overtalligheid) van informatie bij visuele interpretatie van het filmbeeld. De film leent zich ook goed voor (micro)densitometrie om details te meten die met het oog niet worden opgemerkt.
Ook kan het filmbeeld veelal zonder bezwaren sterk vergroot worden, zonder het synoptisch element te verliezen. Tienmaal vergroten is geen uitzondering.

Hoewel mogelijk, strookt het niet met het karakter van de luchtfotografische detectie een analoge foto met een densitometer in z'n geheel toch digitaal te willen maken teneinde een computer-bewerking te kunnen toepassen. Incidentele meting van punten en lijnen in een filmbeeld (zoals met een densitometer) kan echter de visuele interpretatie ondersteunen met objectieve meetwaarden. In 't bijzonder wanneer het gaat om de densiteiten van referentie-oppervlakken (zoals kleurpanelen bij luchtfotografische opnamen) in verband met de herleiding van de object-densiteiten in het filmbeeld naar spectrale energiewaarden, is digitale bemonstering van het analoge filmbeeld van belang (zie hoofdstuk 9).

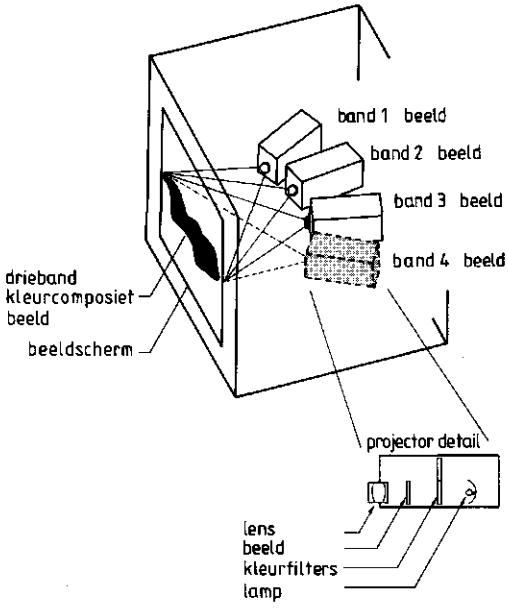
Tot slot van deze paragraaf moet nog gezegd worden dat bij passieve RS-systemen de digitale bemonsteringswaarden (DN's) zelden radianties voorstellen. Via een omrekeningsformule zouden zij er wel toe herleid kunnen worden. Slechts via referentie-oppervlakken is een verdere omrekening naar reflectiepercentages mogelijk. In hoofdstuk 9 wordt dit besproken voor multispectrale luchtfotografische opnamen.

## 4.4 Beeldweergave in kleur

Doordat de mens maar een beperkt aantal (10 à 15) grijstonen kan waarnemen, is omzetting van grijstrappen naar welgekozen kleuren een bijzonder waardevol hulpmiddel. De 'color additive viewer' (zie Supplement 2) en de kleuromzetting d.m.v. video-camera en beeldbuisweergave via een proces van dichtheidsdoorsnijding zijn voorbeelden. In de numerieke verwerking van digitale RS-gegevens maakt men overwegend van beeldreconstructie en presentatie in kleur gebruik (hoofdstuk 14). Figuur 4-12 laat schematisch een color additive viewer zien.

Het woord '*kleur*' heeft een nadere omschrijving nodig. Internationaal onderscheidt men drie kleurcomponenten:

1 *Kleursoort* ('Hue'), ook wel 'kleurtoon' genoemd; dit is de 'kleur' van het algemene spraakgebruik (rood, groen, violet, oranje etc.).
2 *Kleurverzadiging* ('Saturation' of 'Chroma'); hieronder wordt verzadigingsgraad of kleurdichtheid (aantal kleurpuntjes per eenheid van oppervlakte) verstaan; men kan ook zeggen de mate van afwijking van wit of neutraal grijs.
3 *Kleurwaarde* ('Value' of 'Brightness'), dit is de grijstoon van de




**4-12** Principe van de color additive viewer (bron: Lillesand & Kiefer, 1987).

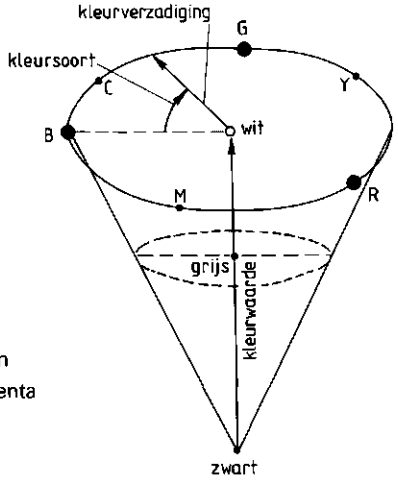
kleur. De waarde van een kleur wordt bepaald door een vergelijking te maken met een schaal van grijzen oplopend van wit naar zwart (of omgekeerd).

Figuur 4-13 vertoont de kleurenkegel waarin de drie componenten in een poolcoördinatensysteem zijn weergegeven. De verticale as is kleurneutraal (grijs).

Vervolgens moet men onderscheid maken tussen:

a *additieve kleuren*: blauw (B), groen (G), rood (R). Voor de samenvoeging van projectielicht van de kleuren B, G en R geldt: B + G + R = Wit.

b *subtractieve kleuren*: cyaan (C), magenta (M), geel (Y). Deze worden




**4-13** Internationale kleurenkegel als pool-coördinatensysteem. De verticale as is kleur-neutraal (grijs).
B = blauw C = cyaan
G = groen M = magenta
R = rood Y = geel.

verkregen door van wit licht één additieve kleur af te trekken (bijvoorbeeld via een filter):

C= Wit – R  M= Wit – G  Y= Wit – B
= B + G  = B + R  = G + R

Een subtractieve kleur kan dus ook worden verkregen door optelling van twee additieve kleuren.

Ook geldt: C + M + Y = Zwart, mits er sprake is van één lichtbundel van wit licht die wordt onderschept door achtereenvolgens drie filters, respectievelijk van de kleur C, M en Y. Bij menging van drie lichtbundels van de kleuren resp. C, M en Y ontstaat echter een witte combinatie.

In beeldverwerkingssystemen wordt gewoonlijk gebruik gemaakt van de additieve kleuren, evenals in televisiebuizen. In de (lucht)fotografie hanteert men de subtractieve kleuren, evenals in de kleurendrukkerij.

## 4.5 Resolutie-afweging bij keuze van sensorparameters

### 4.5.1 Pixel en terreindetail

De visuele ervaring van de *scherpte* van een RS-beeld hangt nauw samen met de mate waarin het afbeeldende sensorsysteem in staat is de fijnheid van de objectdetails intact te laten en in het beeld weer te geven. Er bestaat objectief gesproken een relatie tussen de ruimtelijke resolutie van het afbeeldende systeem, doorgaans uitgedrukt via de eerdergenoemde IFOV ('instantaneous field of view') in pixelafmetingen op de grond na digitale bemonstering, èn de afmetingen of de herhalingsmaat van de objectdetails. Die relatie ligt niet vast, maar is mede afhankelijk van de contrasten in stralingssterkte van de afgebeelde objecten en van de radiometrische resolutie van de sensor. Zo kunnen lijnvormige terreinelementen met een objectbreedte van een halve IFOV zonder moeite gedetecteerd worden door het sensorsysteem mits de straling van dit terreinobject relatief veel hoger of veel lager is dan de omgeving, zodat de radiometrische pixelwaarde door die hogere of lagere straling wordt gedomineerd (bijv. bij spoorwegen en waterwegen). Daarentegen is een afmeting van minstens twee maal het IFOV noodzakelijk om contrastarme terreinelementen te kunnen detecteren. We zouden dus wensen dat een hoge ruimtelijke frequentie in het terrein zou corresponderen met een overeenkomstige beeldweergave, m.a.w. behoud van de contrastrijkdom van de terreindetails.

In feite is iedere radiometrische getalwaarde van het pixel een mengwaarde ('*mixel*') binnen de ruimtelijke resolutie, want de graad van fijnheid van de objecten kan naar believen worden doorgezet als men het terrein in gedachten neemt. De stralingssterkten van de terreincomponenten binnen de afmeting van een pixel worden tezamen genomen ook al zijn zij verschillend uit het oogpunt van radiometrische resolutie. De beeldwaarnemer houdt onbewust rekening met deze beperking door alleen die terreindetaillering in het beeld mogelijk te achten die – in afhankelijkheid van eerdergenoemde contrasten – min of meer strookt met de ruimtelijke resolutie.

### 4.5.2 Detecteerbaarheid en herkenbaarheid

De *onderscheidbaarheid* van objecten in een beeld hangt nauw samen met de ruimtelijke en de radiometrische resolutie van het sensorsysteem, naast het contrast dat het object zelf in spectrale zin bezit ten opzichte van zijn naaste omgeving.
Bij luchtfotografische afbeeldingen zijn beide resoluties nauw met elkaar verweven, hetgeen in hoofdstuk 6 nader aan de orde zal komen. Bij andere detectiemiddelen is deze relatie nauwelijks minder impliciet, alhoewel de openingshoek (IFOV) van de sensor, die de ruimtelijke resolutie bepaalt, van te voren gekozen wordt. Het zal echter duidelijk zijn dat een sensorsysteem met een fijnere ruimtelijke resolutie een detectortype vereist dat ofwel radiometrisch gevoeliger is of dat een langere integratietijd krijgt voor de vorming van het signaal.
De aanwezigheid van bepaalde vormen en structuren in het beeld kan soms op basis van tintverschillen worden geconstateerd (*detecteerbaarheid*) terwijl toch (nog) niet de herkenning kan plaatsvinden. Voor de *herkenbaarheid* van terreinkenmerken is een dosis vakkennis en kennis van het betrokken gebied nodig.
Het verschil tussen detecteerbaarheid en herkenbaarheid zij men zich goed bewust als over *beeldscherpte* wordt gepraat. Zo zal bijvoorbeeld een groepje van maar slechts enkele pixels voldoende zijn om een object te kunnen detecteren; voor de herkenning zal een veelvoud aan pixels nodig zijn, of een bepaalde structuur of repeteringsmaat van deze kleine groepjes. Ook zal het vaak nodig zijn het terreindetail voor zijn herkenning te bezien in een wijdere omgeving, zodat de *beeldcontext* van het te herkennen object meespreekt in het mentale (eventueel deels interactief digitale) interpretatieproces. Door inzooming kan men dan de relatie leggen tussen omgeving en detail. De omvang van de voor herkenning benodigde omgeving van een detail zou men de *fenomenologische resolutie* kunnen noemen. Verdere beschouwingen over het herkenningsproces en het waarnemen van ruimtelijke patronen treft men aan in de navolgende paragraaf en in de hoofdstukken 6 en 24.

### 4.5.3 Pixel en beeldinterpretatie

Het begrip beeldscherpte wordt meestal behandeld in technische zin, waarbij de detecteerbaarheid centraal staat. Naast deze objectief getinte detecteerbaarheid van structuren in het beeld, speelt duidelijk de vraag wat de beeldwaarnemer eigenlijk zelf wil herkennen, wat hij als terreinobjecten hoopt of denkt te kunnen lezen in het beeld. Dit cognitief en associatief gebeuren als een subjectief element in de beeldinterpretatie laat zich niet in een getalmaat vangen, maar beïnvloedt de beeldinterpretatie impliciet en onafgebroken. Hier speelt duidelijk de kennis van eigen en aangrenzende vakgebieden een rol bij de interpretatie van de objecten of verschijnselen in het beeld.
Wel is er enige praktijkervaring met de relatie tussen de *schaal* van de beeldpresentatie en de mate waarin de waarnemer *samenhang in* het beeld onderkent en hij in staat is structuren (terreindetails) te herkennen. Het is onze ervaring dat een digitaal RS-beeld dat opgebouwd is uit rasterelementen (in casu de pixels) in de beeldpresentatie als 'brokkelig' wordt ervaren zodra de beeldvergroting leidt tot een beeld dat minder

dan 1 à 1,5 pixel per mm bevat. Dit betekent dat een Landsat-MSS beeld (zie hoofdstuk 7) vergroot mag worden tot maximaal de schaal 1:100.000; een Landsat-TM beeld (zie hoofdstuk 7) tot maximaal de schaal 1:30.000. Een kleinere beeldschaal zal in eerste instantie de *herkenbaarheid* van terreinobjecten bevorderen. Bij voortgaande interpretatie zal men tot vergroting kunnen besluiten, tot bovengenoemde ondergrens. Daarbij dient men, gelet op de gedachtengang van paragraaf 4.5.1, in het oog te houden dat ondanks een grove ruimtelijke resolutie toch ongedacht fijne details onderkend kunnen worden in het beeld als hun stralingswaarde duidelijk afwijkt van de omgeving (contrastrijkdom), waardoor die stralingswaarde in het pixel domineert.

### 4.5.4 Evenwichtige keuze van sensorparameters

Bij de keuze van sensorsystemen voor RS-opnamen moet men trachten een evenwicht te vinden tussen een aantal resoluties en nauwkeurigheden (zie ook Bokhove, 1980, en paragraaf 3.4):

1 Breedte van de golflengteband(en) → *spectrale resolutie.*
2 Aantal te onderscheiden grijstrappen → *radiometrische* of intensiteits*resolutie*, signaal/ruis verhouding en dynamisch bereik.
3 Uniforme gevoeligheid in de diverse kanalen → *radiometrische relatieve nauwkeurigheid*, plus lineariteit van de detector in elk kanaal (dan wel ijking van de responskarakteristiek zoals bij luchtfotografie, zie de hoofdstukken 6 en 9).
4 Pixelomvang in harmonie met op te nemen terreindetails → *ruimtelijke resolutie* en adequate digitale bemonstering.
5 Zo weinig mogelijk systematische of stochastische vervormingen → *geometrische nauwkeurigheid.*
6 Is dynamische RS mogelijk → *temporele resolutie.*

Men kan niet alle zes factoren tegelijk optimaal verkrijgen. Ook is er vaak een nauwe relatie (zoals bij luchtfotografie) tussen de spectrale, radiometrische en ruimtelijke resolutie (zie ook de hoofdstukken 6 en 24). In het algemeen gesproken zal het verlies op de ene factor moeten worden afgewogen tegen de winst op de andere factor. Ook kan men de *fenomenologische resolutie* (paragraaf 4.5.2) in de overweging betrekken.

Voor een overzicht van specificaties van RS-sensorsystemen in het optische venster respectievelijk in het microgolfvenster wordt verwezen naar de Supplementen 5 en 6 resp. 7.

## 4.6 Literatuur

1 Bokhove, H., 1980. Optische instrumenten voor aardobservatie. Ruimtevaart, feb. 1980, blz. 47-67.
2 Eastman Kodak Company, 1982. Kodak data for aerial photography. Publ. M-29, 5e ed., Rochester, New York.
3 Egan, W.G., 1985. Photometry and polarization in remote sensing. Elsevier Science Publishing Co., Inc., New York, 503 blz.

4 Graham, R. & R.E. Read, 1986. Manual of aerial photography. Focal Press, London, 346 blz.
5 Jensen, N., 1968. Optical and photographic reconnaissance systems. J. Wiley & Sons, Inc., New York, 211 blz.
6 Lillesand, T.M. & R.W. Kiefer, 1987. Remote sensing and image interpretation. Second edition. J. Wiley & Sons, Inc., New York, 721 blz.
7 Slater, P.N., 1980. Remote sensing: optics and optical systems. Addison-Wesley Publ. Comp., Reading, Massachusetts, 575 blz.
8 Swain, P.H. & S.M. Davis, 1978. Remote sensing: The quantitative approach. McGraw-Hill, New York, 396 blz.

Documentatie

# 5 Botanische objectkenmerken van vegetatie en hun invloed op de remote sensing

Th. A. de Boer

## 5.1 Inleiding

Bij de herkenning van een vegetatie maakt de mens via zijn oog o.a. gebruik van verschillen in reflectie van het licht (hoofdstuk 3). Een gedeelte van de gereflecteerde straling, die met remote sensing-technieken wordt waargenomen, valt samen met het voor het menselijk oog zichtbare gedeelte. Het is daarom zinvol in eerste instantie gebruik te maken van de verschillen in vegetatie die ieder van ons in het veld kan waarnemen.

Een algemeen kenmerk van vegetatie is dat het gedurende een belangrijk deel van zijn groeiperiode een of andere *groene tint* heeft. Hierop komen uitzonderingen voor. In Nederland is een bekend voorbeeld de bruine beuk. De groene kleur wordt veroorzaakt door het *chlorofyl*. Hiervan bestaan verschillende soorten, maar het geelgroene chlorofyl komt in alle synthetiserende planten voor en speelt een overheersende rol bij het absorberen van zonne-energie.

Verder heeft iedereen wel eens waargenomen dat bijvoorbeeld eenzelfde gewas een verschillende groene tint kan hebben. De oorzaken hiervan kunnen van verschillende aard zijn. Het kan een kwestie van groeistadium zijn, van watervoorziening, bemesting, ziekten enzovoort. De tintverschillen in het groen zijn een belangrijk kenmerk bij de visuele beoordeling van een gewas.

Ook kunnen verschillen in reflectie van het licht, dus niet alleen in het groen, ontstaan door verschillen in het *bladoppervlak*. Te denken valt hierbij aan bladeren die bedekt zijn met een waslaag of beharing. Ook hieraan zijn plantesoorten op het oog te herkennen door verschil in lichtreflectie.

Een geheel ander botanisch kenmerk waardoor verschillen in reflectie kunnen ontstaan, zijn verschillen in *structuur* van vegetatie. Hierbij valt te denken aan de bladstand en de verdeling daarvan. In relatie met de hoek van de invallende straling kan dit van grote invloed op de reflectie zijn. We hoeven hier maar te denken aan een door de wind platgeslagen

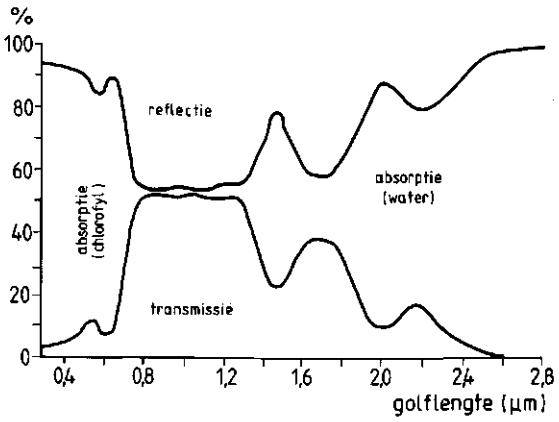
Engels raaigras-gewas, met zijn met een waslaagje bedekte glimmende blaadjes. Bij een invalshoek rondom de 50° t.o.v. de verticaal tegen de kijkrichting in, werkt het bijna als een spiegel.
Ook het *groeistadium* of fenologisch stadium, waarin plantesoort(en) zich bevinden, hebben duidelijk invloed op de reflectie. Dit kan zowel veroorzaakt worden door verschillen in structuur (vormen van bloemen, aren etc.) als door verschillen in kleur.
Naast deze verschillen in reflectie van het zichtbare licht, kunnen we ook de in het nabij-infrarood door begroeiingen gereflecteerde en in het thermisch-infrarood geëmitteerde energie waarnemen. Met radar vinden we bij uiteenlopende vegetaties verschillen in terugkaatsing van microgolven. We gaan hier later op in.

Uit de inleiding is voldoende naar voren gekomen dat verschillen in reflectie van inkomende straling informatie over de gesteldheid van vegetatie kan geven. Uiteraard maakt de mens met zijn oog, dat een goed ruimtelijk scheidend vermogen (paragraaf 3.4) heeft, ook gebruik van verschillen in vormen. Dit is vooral van belang bij het herkennen van plantesoorten aan uiterlijk waarneembare kenmerken als vorm van stengel, blad en bloem. Aangezien het ruimtelijk scheidend vermogen van RS-technieken hiervoor in de regel onvoldoende is, heeft het geen zin hierop in te gaan.
Omdat bij RS het spectraal scheidend vermogen (paragraaf 3.4) beter kan zijn dan bij het oog, gaan we nader in op de reflectie van vegetatie in de verschillende banden van het spectrum.

Van de electromagnetische energie die van de zon op het plantendek valt, kunnen we wat de aard van de interactie betreft een drietal gebieden in het traject van 0,4 tot 2,5 micrometer onderscheiden (zie ook het algemene beeld van de reflectiekarakteristiek van vegetatie in Supplement 6).

## 5.2 Zichtbaar licht en botanische kenmerken

Het eerste gebied is het zichtbare licht van 0,4 tot ± 0,7 µm (VIS), waar diverse *pigmenten* zoals chlorofyl, xantofyl (geel) en carotine (oranje) de reflectie beïnvloeden. Bij de meeste plantesoorten wordt deze reflectie bij goed functionerende bladeren en ook wel stengeldelen voornamelijk bepaald door de absorptie van blauw en rood en in iets mindere mate groen licht door twee soorten *chlorofyl (a en b)* (zie figuur 5-1).
De energie in deze spectrale banden wordt gebruikt voor electronen-verplaatsing, waardoor de synthese van koolhydraten met behulp van $CO_2$ uit de lucht en het uit de bodem opgenomen water kan plaatsvinden. Het geelgroene chlorofyl a, is in alle fotosynthetiserende planten aanwezig en speelt een overheersende rol. Hogere planten en groene algen bevatten bovendien, zij het in geringe hoeveelheden, het blauw-groene chlorofyl b.
Beide chlorofylen absorberen het zichtbaar licht in hoge mate en hebben



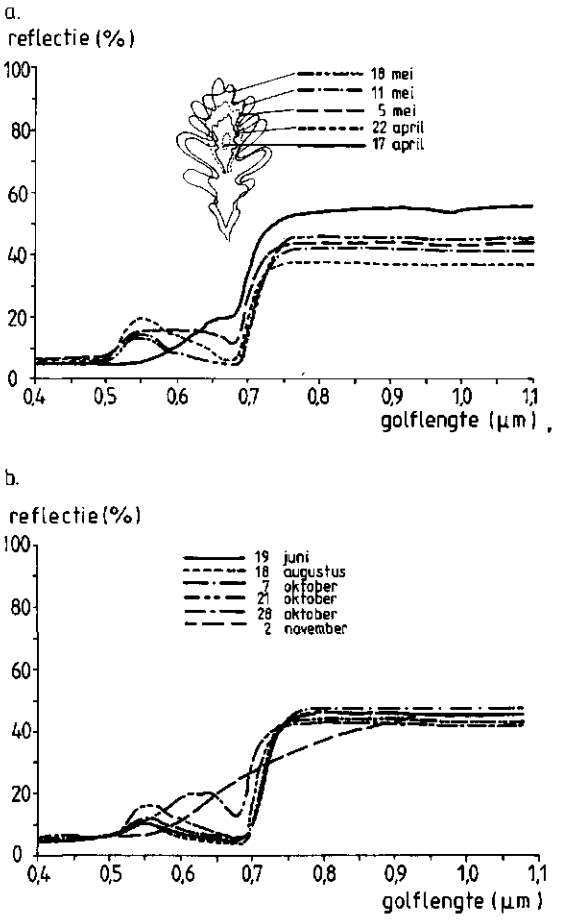

5-1 Gemiddeld verloop van reflectie, absorptie en transmissie door een groen gezond planteblad als percentage van de inkomende straling (bron: Knipling, 1970). (overgenomen met toestemming van Elsevier Science Publ. Co., Inc.)

absorptie-pieken, één in het blauwe (± 0,45 µm) en één in het rode (± 0,65 µm) gebied van het EM-spectrum. Als gevolg hiervan en van de overgevoeligheid van ons oog voor groen, doet het plantendek zich in diverse tinten groen aan ons oog voor. Relatief gezien ligt de reflectie-piek, als gevolg van het bovenstaand, in het zichtbare licht bij ± 0,54 µm.

Bij gezonde planten wordt een klein deel van de geabsorbeerde stralingsenergie in het zichtbare gebied weer uitgezonden in het 'verrood' (0,65 – 0,70 µm) en in het nabij-infrarood. Dit wordt *fluorescentie* genoemd. Daarnaast is er een geringe emissie van warmtestraling bij langere golflengten (paragraaf 5.6). Wanneer door stress-situaties in de plant (bijv. door luchtverontreiniging of andere oorzaken) het fotosynthese-proces niet optimaal functioneert, dan neemt de fluorescentie toe. Onder laboratorium-omstandigheden wordt dit, na het geven van een lichtflits op bijvoorbeeld bladeren, in het donker gemeten. Men kan dit ook met RS-technieken in de veldsituatie meten. Men doet dit zowel met zonlicht als met laserlicht, waarbij men dan de toename meet van de op de detector opgevangen hoeveelheid energie in het verrood (reflectie + fluorescentie) bij vegetaties onder stress-condities. Voor de interpetatie van dit soort metingen is voldoende kennis van de gedetecteerde vegetatie en zijn groeiomstandigheden nodig (Buschmann, 1986).

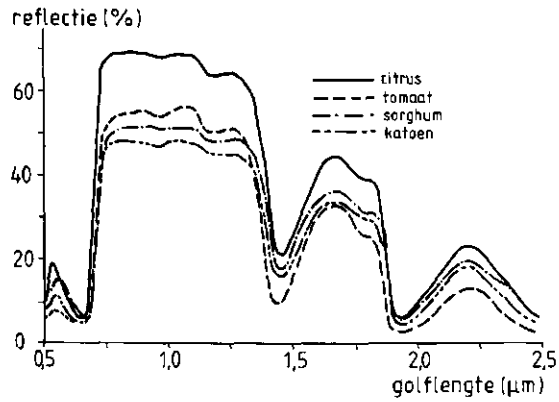
Als een plant bij gebrek aan bepaalde voedingsstoffen opgroeit kan er minder chlorofyl gevormd worden. De plantedelen krijgen dan een 'bleek uiterlijk' en we zien bij spectrometermetingen van het gereflecteerde licht een duidelijke toename van het gereflecteerde licht in de blauwe en rode band van het spectrum, zodat dit op één lijn met de reflectie van het groen komt.
Andere in het blad voorkomende pigmenten zijn *carotenen* en *xantofyl* (oranje en gelige tinten) en *anthocyanen* (rode pigmenten). Deze pigmenten hebben hun absorptie voornamelijk in het blauwe gebied van het spectrum. Omdat het chlorofyl, wat meestal in grote hoeveelheden in het blad aanwezig is, ook in het blauw energie absorbeert, worden de genoemde pigmenten niet zichtbaar.

Het is iedereen bekend dat we onder bepaalde omstandigheden, namelijk *veroudering* van de plant, de gele tot rode pigmenten wel te zien krijgen, doordat het chlorofyl dan afgebroken wordt. Dit is o.a. het geval bij loofbomen, die dan de veelgeroemde herfstkleuren tentoonspreiden in ons klimaatsgebied.
In de literatuur komt men vele curven tegen van reflectiemetingen over een groot spectraal bereik van bijvoorbeeld bladeren van de eik gedurende het groeiseizoen. Men ziet dan duidelijk de reflectie in het rood afnemen resp. toenemen (zie figuur 5-2a en 5-2b).
Bij remote sensing kan men van deze bladverkleuringen gebruik maken om de soortensamenstelling van loofhoutbossen vast te stellen. Dit werkt vooral goed indien men meerdere malen per groeiseizoen eenzelfde bos opneemt. Hierdoor kan men gebruik maken van het feit dat niet alle boomsoorten op dezelfde tijd gaan verkleuren. Wel moet men natuurlijk voorzichtig zijn de informatie, die men door metingen aan afzonderlijke bladeren omtrent de spectrale reflectie verkrijgt, rechtstreeks toe te passen op een bos. Men krijgt bij een bos ook de




5-2 Veranderingen in de spectrale reflectie gedurende het groeiseizoen van bladeren van een eik (Quercus alba) (bron: Shay et al., 1970) a april-mei b juni-november.

invloed van de boomstructuur en wanneer het geen monocultuur is van eenzelfde boomsoort, de bijdrage aan de gemeten reflectie van de andere boomsoorten.
Voor elk mengsel van boomsoorten zal de grens voor herkenning van een bepaalde soort aan de zogenaamde *spectrale signatuur* (reflectie-karakteristiek van een object met betrekking tot de relatie tussen golflengte en reflectiepercentage, meestal grafisch weergegeven) anders liggen. Bovendien zal een en ander ook afhankelijk zijn van de ruimtelijke resolutie van de sensor.
Er bestaan ook verschillen tussen reflectie in het zichtbare deel van het EM-spectrum van bladeren op eenzelfde tijdstip van bij gelijke omstandigheden gegroeide verschillende plantesoorten. Over het algemeen zijn dit verschillen in groen en blauw reflectie (zie figuur 5-3), die kunnen ontstaan door verschillen in *pigment-gehalte* en verschillen aan het *bladoppervlak*, zoals beharing, waslaag etc. Ook hier zal men echter in de veldsituatie rekening moeten houden met andere factoren die de spectrale reflectie beïnvloeden. We noemen als voorbeeld verschillen in bemestingstoestand en vochtvoorziening van een gewas. Hierdoor kan zowel direct de signatuur van de bladeren veranderen als ook de gewasstructuur.




**5-3** Spectrale reflectie van representatieve bladeren van vier landbouwgewassen gemeten met een Beckman DK-2A laboratorium spectrometer (bron: Shay et al., 1970).

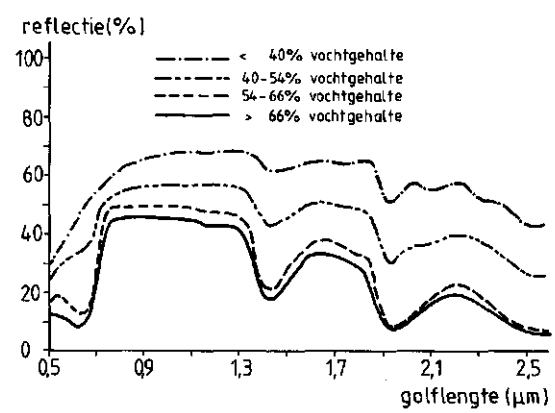
In het zichtbare licht kunnen ook verschillen in reflectie ontstaan door *aantastingen* van het bladoppervlak. Dit kunnen bijvoorbeeld schimmelsporen zijn. Bekend is bijvoorbeeld de bladverkleuring door de sporen van roestschimmels, maar ook bacterie- en virusaantastingen kunnen invloed op de bladkleur hebben.
In figuur 5-4 geven we een voorbeeld van de reflectiecurve van tarwebladeren met een zware (21) en een lichte (24) graanroestinfectie (Puccinia triticina). Uit de figuur valt duidelijk waar te nemen dat de reflectie in het rood (0,65 µm) duidelijk hoger is bij de zwaar geïnfecteerde (21) bladeren.

tevens wordt bepaald door het *aantal celwanden evenwijdig met de opperhuid* van het blad. Hiervan komen er in bladeren met meerdere lagen palissadecellen inderdaad veel meer voor.
Uiteraard zal de reflectie ook nog afhangen van de *oriëntatie van het blad* in het gewas. De voorgaande theorieën zijn gebaseerd op metingen aan enkele bladeren.

Samenvattend kunnen we zeggen dat voor het nabij-infrarode gebied (tot 1,3 µm) bij de bovenste bladeren van een vegetatie een aanzienlijk gedeelte wordt gereflecteerd en de rest wordt doorgelaten (zie figuur 5-1); dit laatste komt daarna op het eronder liggende blad terecht. Uit metingen is gebleken dat, naarmate er meer bladeren onder elkaar voorkomen, de reflectie in genoemd golflengte-gebied toeneemt. Afhankelijk van de bladstandverdeling kan de reflectie tot ± 5 à 6 bladeren onder elkaar nog toenemen (zie ook hoofdstuk 9). Men heeft dit ook gedemonstreerd door het opstapelen van bladeren in het laboratorium en meting van de reflectie met een spectrometer (zie figuur 5-5).

## 5.4 Midden-infrarood en botanische kenmerken

Van het derde golflengtegebied, namelijk van 1,3 tot 2,5 µm (MIR), wordt nogal wat *energie geabsorbeerd door het water* dat zich in de plantecellen bevindt (zie figuur 5-1). Uit de figuur blijkt, evenals uit de figuren 5-3, 5-5 en 5-6, dat de sterkste waterabsorptie bij 1,9 en 1,4 µm ligt. We vestigen er de aandacht op dat ook bij 1,1 en 0,96 µm nog, weliswaar zwakke, *waterabsorptiebanden* liggen.
In figuur 5-5 ziet men duidelijk dat bij de gedroogde bladeren t.o.v. de verse bladeren de reflectie over het traject 1,3 – 2,5 µm veel hoger is geworden en de waterabsorptiedalen in de curven zijn verdwenen.
Men heeft ook gemeten aan bladeren met meer geleidelijke verschillen in vochtgehalte en kreeg dan de in figuur 5-7 afgebeelde reflectiecurven. Hier neemt de reflectie in het gebied van 0,7 tot 1,3 µm toe bij afnemend vochtgehalte, evenals bij 1,3 tot 2,5 µm. Maar in het laatstgenoemde gebied verandert ook de vorm van de curve.

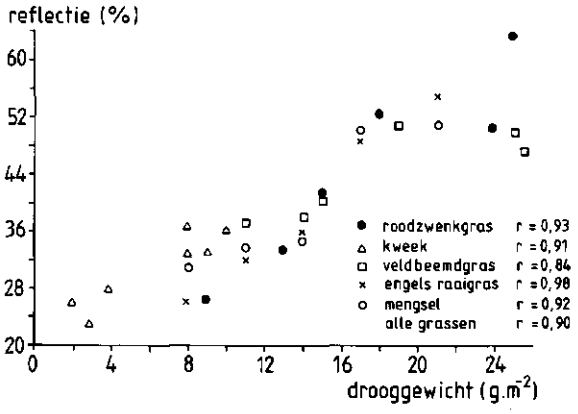



5-7 Invloed van het vochtgehalte van maisbladeren op de spectrale reflectie (bron: Hoffer & Johannsen, 1969).

Men kan door de verhouding van het reflectieminimum in het door water veroorzaakte deel in de curve t.o.v. het reflectiemaximum in het naastliggende gebied van de curve in dit gebied specifieke informatie over vochtgehalte van vegetatie krijgen. Ook de detectie van vegetatietypen als heide en graslanden, naald- en loofbossen, die verschillen in vochtgehalte van bladeren (naalden) hebben, is in deze spectrale banden mogelijk.

## 5.5 Conclusie t.a.v. remote sensing voor zichtbaar licht en reflectief-infrarode straling

Uit het voorgaande kunnen we de conclusie trekken dat de reflectie van het zichtbare licht vooral aan de bovenste bladeren van vegetatie plaatsvindt. Het zegt vooral wat over de gezondheidstoestand van het gewas bij een volledig bedekte bodem. In de meeste gevallen gaan gebreksziekten of infectieziekten van planten gepaard met afbraak van het chlorofyl, waardoor de absorptie in het rood en blauw afneemt en de totale reflectie van het zichtbare licht toeneemt, waardoor de bladkleur geel tot wit wordt.
Er zijn echter ook verschillen in reflectie in genoemd golflengtegebied die gebonden zijn aan de plantesoort. Dit kan samenhangen met de aard van het bladoppervlak (beharing, waslaag e.d.), maar ook met verschillen in pigmentgehalte, waardoor tintverschillen ontstaan. Bij onvolledige bedekking van de bodem met vegetatie kan een vermenging met de bodemreflectie ontstaan, waardoor een andere spectrale signatuur ontstaat. Bij herhaalde opnamen, waarbij deze reflectie-verschillen in diverse banden van het spectrum worden vastgelegd met een of andere sensor, kan dit een determinatiekenmerk zijn ten opzichte van andere vegetatietypen.
Bij diverse gewassen is, zowel bij veldspectrometeronderzoek als met densiteitsmetingen van luchtfoto's, bij het zichtbare rood een hoge correlatie tussen reflectie en bedekkingsgraad van de bodem gevonden (gras 0,95; bieten 0,90; lucerne 0,96).
De reflectie van het nabij-infrarode gebied (van 0,7 – 1,3 μm) zegt iets over het totale bladoppervlak van vegetatie. Dit wordt meestal gedefiniëerd als 'leaf area index' (het totale bladoppervlak per eenheid bodemoppervlak). De mogelijkheid via de grootte van de infraroodreflectie hiervan een schatting te maken is aangetoond en is om meerdere redenen van belang (hoofdstuk 9).
In de eerste plaats bepaalt het bladoppervlak van gezonde bladeren (lage reflectie in het rood) de mate waarin de plant suikers kan synthetiseren via opgevangen zonne-energie. Hoe sneller in het groeiseizoen de optimale bladoppervlakte bereikt wordt, hoe meer er in het algemeen aan koolhydraten, eiwitten etc. geproduceerd kan worden, wanneer althans geen andere groeifactoren in het minimum zijn.
Er zijn bij metingen met de veldspectrometer te Wageningen (zie Supplement 8) correlatie-coëfficiënten van 0,84-0,98 gevonden tussen hoeveelheid gras en de reflectiecoëfficiënt van enkele banden uit het




5-8 Verband tussen de reflectiecoëfficiënt van een golflengtebandje om de 0,871 micrometer (nabij-infrarood) en het drooggewicht (in grammen per vierkante meter) van een aantal grassoorten
(bron: Kasteren & Uenk, 1975);
r = correlatiecoëfficiënt.

nabij-infrarood, waarvan in figuur 5-8 een voorbeeld. Bij gras geeft het dus een schatting van de hoeveelheid plantenmateriaal die op het veld staat.

Door allerlei oorzaken, zoals vochtgebrek, zoutschade en mineralengebrek, kan een langzamere ontwikkeling van een gewas t.o.v. een zich optimaal ontwikkelend gewas ontstaan, wat zich via een kleinere leaf area index in een geringere infraroodreflectie uit. Bij voldoende kennis omtrent de oorzaken is hiermee voor grote oppervlakten een schatting van de schade mogelijk. Via dit principe zijn *oogstvoorspellingen* mogelijk. Ook verschillen in bladstandverdeling, die door bovenstaande suboptimale groei-omstandigheden kunnen ontstaan, beïnvloeden de reflectie zowel in het (nabij-)infrarood als in het zichtbare rood.

Interessant is verder het verschijnsel dat bij suikerbieten de groeiperiode in twee fasen is in te delen. In de eerste fase hebben we voornamelijk met bladgroei te maken, in de tweede fase start ook de wortelgroei. In deze laatste fase sterven er bladeren af en vormen zich in het centrum van de bladrozet nieuwe bladeren die steiler zijn en een steilere stand hebben. Bij veldspectrometermetingen is geconstateerd dat er omstreeks het intreden van de tweede fase ook een afname van de nabij-infraroodreflectie plaatsvindt.

Gezien wat we gezegd hebben over de veranderingen van de reflectie in het midden-infrarode gebied (1,3 – 2,5 μm), zou bijvoorbeeld een specifieke aanduiding van vochtgebrek van een gewas mogelijk zijn. Hiervan is voor de veldsituatie echter nog onvoldoende studie gemaakt. Uiteraard is het ook van belang of men gewassen kan onderscheiden zonder direct gebruik te maken van verschillen in vorm, waarvoor het ruimtelijk scheidend vermogen in vele gevallen zelfs bij luchtfoto's van een praktisch te gebruiken schaal onvoldoende is, laat staan met multispectrale aftastsystemen. Gebleken is dat men een aantal gewassen soms reeds in één vlucht, op een juist gekozen tijdstip gedurende het groeiseizoen, van elkaar kan onderscheiden. Voor andere gewassen zijn hiervoor twee of meerdere vluchten nodig. De verschillen in spectrale

signatuur ontstaan hierbij door verschillen in bladkleur, gewasstructuur en biomassa op het tijdstip of de tijdstippen van de reflectiemeting(en).

## 5.6 Emissie van thermisch-infrarood en botanische kenmerken

Bladeren hebben in hun opperhuid regelbare openingen die *huidmondjes* worden genoemd. Of deze huidmondjes open staan of ten dele of geheel gesloten zijn, wordt bepaald door het feit of de plant voldoende water, meestal via zijn wortels, kan opnemen. Met dit water worden voedingsstoffen opgenomen en de stijfheid (turgor) van de plant op peil gehouden.
Bij voldoende beschikbaarheid van vocht is er een constante stroom van water dat via de huidmondjes verdampt, waardoor thermische energie aan het bladoppervlak wordt onttrokken, zodat een lagere temperatuur t.o.v. de omgevende luchtlaag ontstaat.
Deze lagere temperatuur is met een detector op afstand als een verschil in energiestroom bijvoorbeeld in het thermisch-infrarood (TIR) van 10 – 13 µm te meten. Dit biedt mogelijkheden om met RS bijvoorbeeld watergebrek, virusziekten (verhoging bladtemperatuur) en schimmelziekten (verlaging bladtemperatuur) op te sporen.

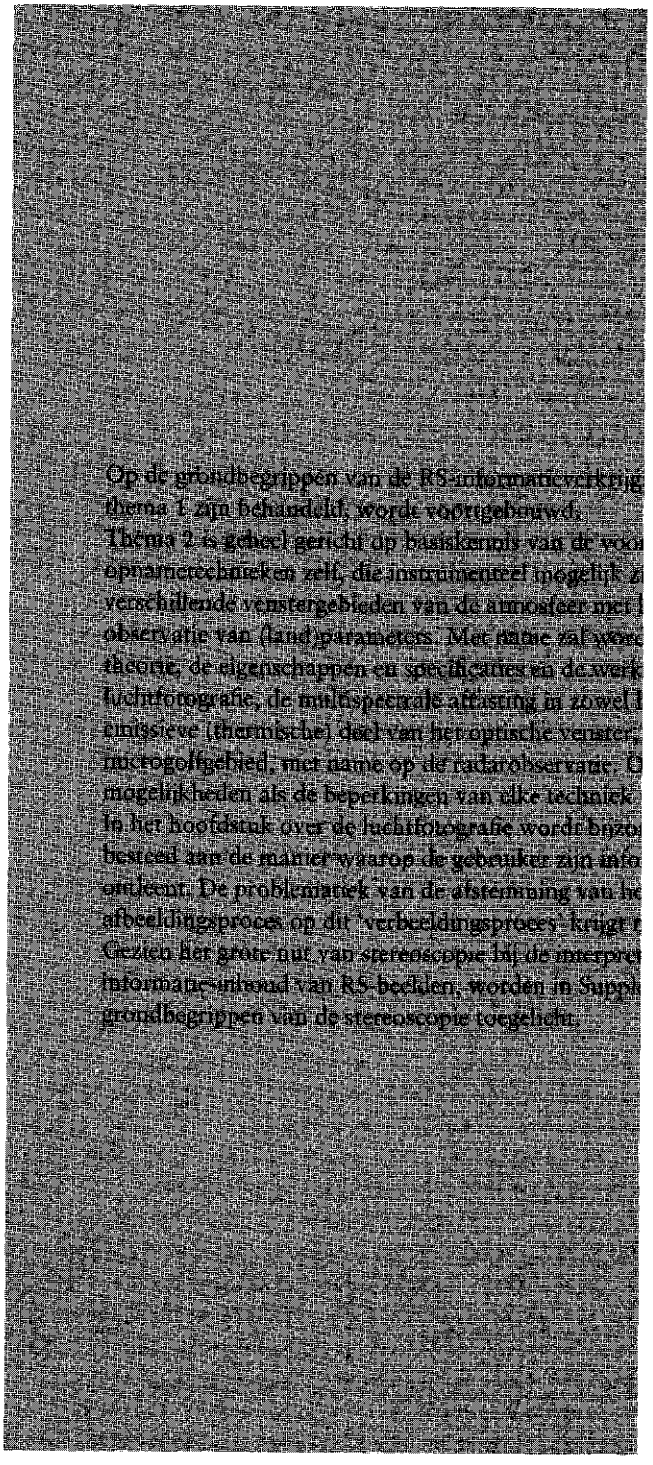
## 5.7 Terugkaatsing van microgolven en botanische kenmerken

Uit onderzoek is gebleken dat gewashoogte, bladgrootte, vlakverdeling en ruwheid van het gewasoppervlak, botanische kenmerken zijn die de terugkaatsing van microgolven beïnvloeden. Microgolven reageren op de diëlektrische eigenschappen van het materiaal. Vegetatie dienen we ons in dit verband, afhankelijk van genoemde botanische kenmerken, als een laag met uiteenlopende dichtheid en dichtheidsverdeling van waterdruppels voor te stellen. De radarreflectie (verstrooiing) van vegetatie zal verderop uitvoerig beschreven worden in hoofdstuk 10 en 11.

## 5.8 Literatuur

1 Bunnik, N.J.J., 1978. The multispectral reflectance of shortwave radiation by agricultural crops in relation with their morphological and optical properties. Mededelingen Landbouwhogeschool Wageningen 78-1, 175 blz.
2 Buschmann, C., 1986. Fluoreszenz- und Wärme-abstrahlung bei Pflanzen. Naturwissenschaften 73: 681-699 (Springer Verlag).
3 Hoffer, R.M. & C.J. Johannsen, 1969. Ecological potentials in spectral signature analysis. In: Remote Sensing in Ecology. Ed. P.L. Johnson, Univ. of Georgia Press, Athens, Georgia, blz. 1-16.
4 Kasteren, H.W.J. & D. Uenk, 1975. Spectrale reflectie van enige landbouwgewassen in relatie tot hun aard en structurele opbouw. NIWARS-publ. 32.

5 Keegan, H.J. e.a., 1956. Spectrometric and colorimetric study of diseased cereal crops. US Department of Commerce.
6 Knipling, E.B., 1970. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. Remote Sensing of Environment 1 : 155-159.
7 Olson, C., 1969. Seasonal change in foliar reflectance of five broadleaved forest tree species. Ann Arbur. Thesis.
8 Shay, J.R. e.a., editors, 1970. Remote Sensing, with special reference to agriculture and forestry. Washington., Nat. Acad. of Sciences, 424 blz.
9 Sinclair, Th., 1968. Pathway of solar radiation through leaves. Purdue University. Thesis.
10 Swain, P.H. & S.M. Davis, 1978. Remote sensing: The quantitative approach. McGraw-Hill, New York.
11 Uenk, D., 1982. Bepaling van grondbedekking en biomassa met behulp van een reflectiemeter. CABO-verslag no. 41, 18 blz.



Op de grondbegrippen van de RS-informatieverkrijg
thema 1 zijn behandeld, wordt voortgebouwd.
Thema 2 is gericht op basiskennis van de voo
opnametechnieken zelf, die instrumenteel mogelijk z
verschillende venstergebieden van de atmosfeer met
observatie van (land)parameters. Met name zal wore
theorie, de eigenschappen en specificaties en de werk
luchtfotografie, de multispectrale afbeelding in zowel
emissieve (thermische) deel van het optische venster
microgolfgebied, met name op de radarobservatie. D
mogelijkheden als de beperkingen van elke techniek.
In het hoofdstuk over de luchtfotografie wordt bijzo
besteed aan de manier waarop de gebruiker zijn info
ontleent. De problematiek van de afstemming van he
afbeeldingsproces op dit 'verbeeldingsproces' krijgt
Gezien het grote nut van stereoscopie bij de interpret
informatie-inhoud van RS-beelden, worden in Supp
grondbegrippen van de stereoscopie toegelicht.

Documentatie

# 6 Luchtfotografie

J.H. Loedeman

## 6.1 Inleiding

De *fotografische film-emulsie* (*receptor*) vormt de schakel tussen het gefotografeerde object en de gebruiker van de foto. De laatste wil 'informatie' hebben over dat object. Die informatie is vastgelegd in de receptor, die na ontwikkeling het *fotografische 'beeld'* vertoont. De eigenschappen van de receptor komen aan de orde in paragraaf 6.3. Hoe de vastlegging via optische afbeelding in zijn werk gaat, en welke invloed de omstandigheden tijdens de opname daarop hebben, wordt behandeld in paragraaf 6.4. Een vraagstuk apart is de wijze waarop een gebruiker zijn informatie uit de receptor haalt. Steeds zal die gebruiker zich op een of andere wijze een beeld vormen van het object van opname. Dit *'verbeeldingsproces'* speelt een moeilijk te overschatten rol bij het toepassen van luchtfotografie. Daarom zal dit onderwerp als eerste worden behandeld (paragraaf 6.2). *Stereoscopie* valt buiten de opzet die voor dit hoofdstuk luchtfotografie is gekozen. Gezien het grote nut van stereoscopie bij het bedrijven van *foto-interpretatie* en *fotogrammetrie* ('luchtkartering') is besloten de algemene hoofdzaken van stereoscopie in Supplement 3 onder te brengen.

## 6.2 Afbeelden en verbeelden (beeldkwaliteit)

### 6.2.1 Waarnemen van contouren

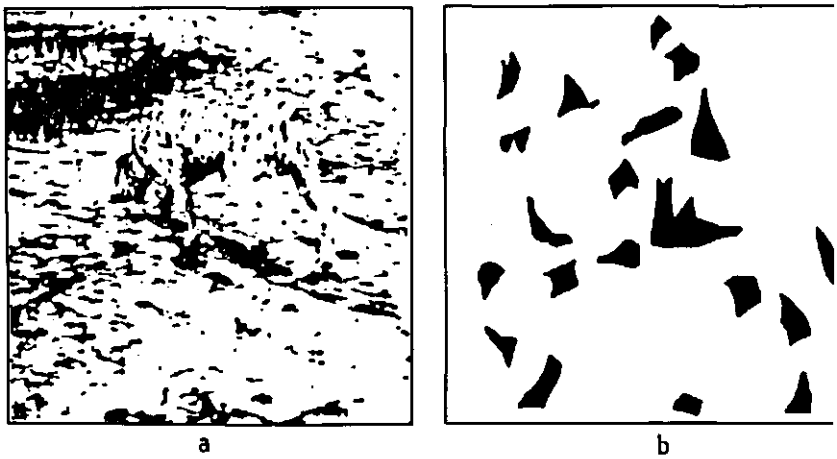
Zinvolle toepassing van remote sensing vergt een afstemming van het *afbeeldingsproces* op het *verbeeldingsproces*. Tot voor kort was bij toepassingen van luchtfotografie het verbeeldingsproces vrijwel uitsluitend gebaseerd op het visueel waarnemen met 'gewapend oog' van stereo-opnamen (fotogrammetrie en foto-interpretatie). Het afbeeldingsproces is dan ook steeds gericht geweest op een verbetering van de geschiktheid van de luchtfotografie voor visuele verbeelding (zie echter ook de beschouwing in Supplement 1).
Deze stand van zaken maakt dat in een kwaliteitsoordeel over een fotografische opname impliciet of expliciet eigenschappen van het

menselijke visuele systeem een rol spelen. Het zijn slechts enkele van die eigenschappen die hebben geleid tot algemeen gebruik van *geometrische resolutie* (of ruimtelijke resolutie, zie paragraaf 3.4) als kwaliteitscriterium.

In paragraaf 6.3.4 wordt uiteengezet dat vanuit theoretisch oogpunt bezien geometrische en *radiometrische resolutie* onlosmakelijk met elkaar zijn verbonden. Brock (1970) geeft aan waarom geen kwaliteitscriterium is ontwikkeld gebaseerd op radiometrische resolutie: 'Quality cannot be described by a single variable; the image degrades in both shape and contrast with decreasing size. Change of shape cannot be expressed as a single variable. However, we may reasonably ask why a measure of contrast should not serve our purpose. We are not very sensitive to the intensity profile of the details of small images. It is highly important that the detail should have enough contrast to be visible; the exact image profile is less important because we cannot resolve it; the object is identified by its shape and relation to its surroundings' (blz. 242, 243).

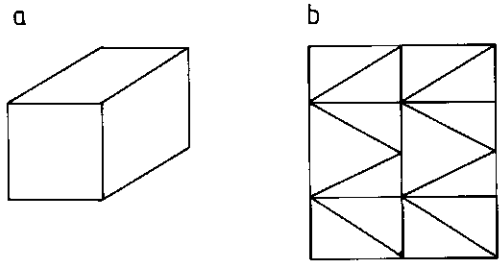
Geometrische resolutie komt neer op visuele detectie van een overgang in korreling (paragraaf 6.3.1) die wordt gezien als een lijn (contour). In het algemeen speelt het waarnemen van *contouren* een belangrijke rol bij het opsporen en herkennen van figuren en objecten. Het waarnemen van contouren berust niet alleen op het detecteren van een verschil in dichtheid; ook overgangen in textuur en structuur kunnen leiden tot het zien van contouren.
Contouren zijn letterlijk het produkt *van de verbeelding van de waarnemer*. Of een contour in een fotografische afbeelding waarneembaar zal zijn, hangt dan ook van veel meer af dan alleen de korrelverdeling of de geometrische resolutie.

Een van de belangrijkste voorwaarden voor het zien van een contour, en daarmee voor de herkenning ervan, is de *verwachting* die de waarnemer heeft (vergelijk paragraaf 4.5.3). Degene die de figuren 6-1a en 6-1b nog



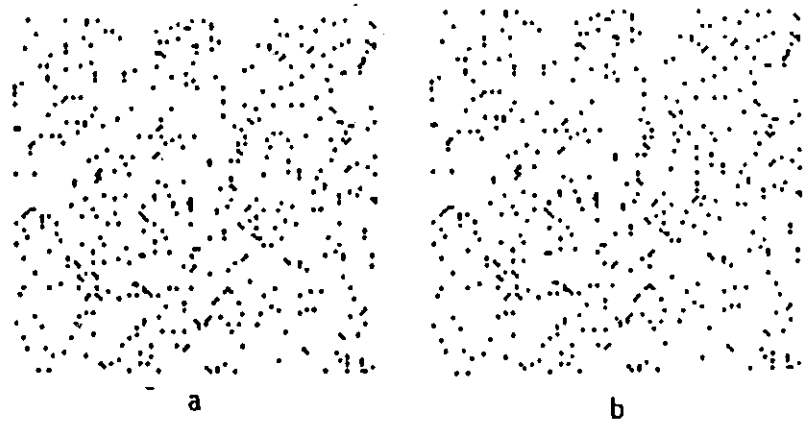

6-1 Aanvullen van incomplete figuren: (a) snuffelende hond (bron: Rock, 1984) (b) ruiter te paard (bron: onbekend).

nooit heeft gezien zal moeite hebben er iets herkenbaars in te ontdekken. Zodra de juiste contour – die met een betekenis – eenmaal is ontdekt, verloopt de herkenning voortaan moeiteloos.
Bekendheid met een te verwachten contour betekent niet per se dat herkenning ervan eenvoudig zal zijn. De contour van figuur 6-2a is volledig aanwezig in figuur 6-2b. De herkenning verbetert niet bij een vergroting van de waarnemingsafstand, noch bij een verkleining daarvan. De moeilijkheid is invariant met de *afbeeldingsmaatstaf* (schaal).




**6-2** De enkelvoudige contour (a) is niet waarneembaar als onderdeel van een ingewikkelder patroon (b) (bron: Vernon, 1966).

*Ruimtelijke contouren* nemen een bijzondere plaats in, omdat zij te voorschijn kunnen komen uit twee twee-dimensionale afbeeldingen die elk afzonderlijk geen enkele informatie bevatten. Een voorbeeld van zo'n informatieloos beeld is een cellenraster waarvan 5% van de cellen zwart is gemaakt en de rest wit is gelaten (figuur 6-3a). Uit zo'n beeld kan men een tweede beeld maken door de beeldinhoud van een gedeelte één rastercel op te schuiven (figuur 6-3b). Bekijkt men beide beelden afzonderlijk dan is geen verschil waar te nemen; patroon en dichtheid zijn visueel gelijk. Ook densitometrisch zou geen verschil aantoonbaar zijn omdat de dichtheid in beide gevallen 5% bedraagt. Toch bevatten beide beelden samen informatie, omdat zij een systematisch verschil – een *parallax* – vertonen. Via rekenkundige beeldcorrelatie is het mogelijk parallaxen op te sporen, maar dit vergt het digitaliseren van



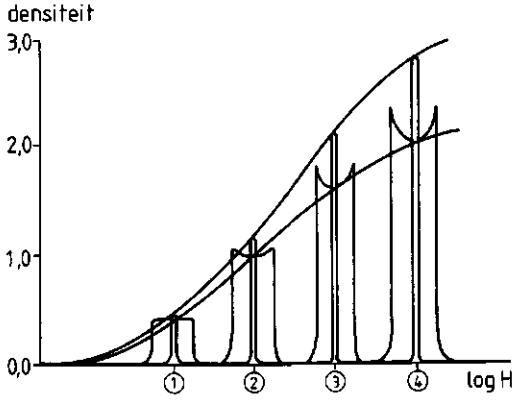

**6-3** Cellenraster met 5% van de cellen zwart gemaakt. In stereo bekeken vormen beide afbeeldingen een duidelijke figuur (bron: Julesz, 1971).

fotografische beelden. In 'stereo' bekeken valt het verschoven gedeelte wegens die parallax onmiddellijk op met een scherpe ruimtelijke contour. De parallax is zichtbaar voor elk rasterpunt afzonderlijk. De grens van de parallaxwaarneming in stereo-opnamen ligt rond 0,01 mm en dat is beter dan voor de geometrische resolutie van normale luchtfoto's.

### 6.2.2 Beeldkwaliteit in algemene zin

Objectieve criteria voor het beoordelen van de *kwaliteit* van het afbeeldingsproces (beeldkwaliteit) zijn beperkt tot *geometrische resolutie* en aanverwante criteria, en tot de *benutte opslagcapaciteit*. Het verbeeldingsproces loopt langs twee wegen, enerzijds via visuele waarneming en anderzijds via densitometrie (digitaliseren; paragraaf 6.3.2) gevolgd door een 'beeldverwerking'. Hoe nu te formuleren waaraan de afbeelding moet voldoen om de beoogde verbeelding 'zo goed mogelijk' te bereiken?
Beeldkwaliteit en resolutie zijn niet synoniem. Bovendien blijkt het waarnemen van contouren voor een deel te berusten op factoren die geen enkel verband hebben met de afbeelding in fysieke zin, maar met de wijze van waarnemen en vooral met de waarnemer. Eerder is naar voren gebracht waarom een algemeen criterium ontbreekt voor beeldkwaliteit vanuit radiometrisch opzicht. Kortom: 'beeldkwalificatie' laat zich moeilijk formaliseren. Men ontkomt er niet aan het afstemmen van doel (verbeelden) en middel (afbeelden) van geval tot geval te beoordelen.

Fotografische *radiometrie* (zie hoofdstuk 9) is goed mogelijk wanneer chemische contrastverhoging (= een verhoging in densiteitsverschil op de plaats van een scherpe overgang in bestralingsdosis van de emulsie t.o.v. verder verwijderd liggende delen; vgl. figuur 6-4) en grote densiteitsverschillen over minder dan 1 mm afstand zo veel mogelijk worden vermeden. Voor nauwkeurig werk is een 'rechte' DlogQ-curve gewenst met een voldoend hoge contrastfactor (zie paragraaf 6.3.3). Indien men geïnteresseerd is in radiometrische gegevens is het visuele systeem weinig dienstbaar. *Densitometrie* is juist daar toepasbaar waar het visuele systeem veelal faalt of in elk geval onnauwkeurige radiometrische informatie verstrekt. Densitometrie kan systematische verschillen in densiteit aan het licht brengen die visueel niet zichtbaar zijn (Clevers, persoonlijke communicatie).
Densitometrie is echter niet zinvol zonder ook vast te stellen op welke plaatsen in de afbeelding moet worden gemeten. *Multitemporele multispectrale fotografie* (Clevers, 1986) vergt dat van eenzelfde plaats in het terrein de positie op een groot aantal verschillende opnamen bekend is. Dit gaat alleen via het combineren van densitometrie met fotogrammetrie. Indien densitometrie rastergewijs wordt uitgevoerd is het resultaat een gedigitaliseerd 'beeld'. Deze werkwijze opent de mogelijkheid radiometrie te koppelen met zowel *fotogrammetrie* als met *digitale beeldverwerking*. Bij een meetvenster van 0,5 $mm^2$ en 256 densiteitsniveaus, is 1 Mbit voldoende voor het digitaliseren van een standaardformaat luchtfoto.




6-4 Verschil in karakteristieke curve voor beelddetails van verschillende afmeting.
Op de horizontale as zijn vier waarden voor log H weergegeven in de punten resp. 1, 2, 3 en 4. Aan weerszijden van deze punten zijn schematisch twee verschillende detailafmetingen uitgezet, namelijk een smal detail (microdetail met een afmeting kleiner dan 0,5 mm) en een breed detail (macrodetail met een afmeting veel groter dan 1 mm).
Bij éénzelfde bestralingsdosis H blijkt ten gevolge van het zogenaamde Eberhard-effect de resulterende densiteit voor het smalle detail hóger te zijn dan die voor het brede detail, en wel des te meer naarmate de bestralingsdosis groter is.
Bovendien blijkt, dat bij het brede detail het genoemde effect aan de randen sterker is dan in het centrum van het detail, ten gevolge van de laterale diffusie van chemische ontwikkelstoffen.
Dit verklaart de holle bovenzijde van de densiteitsweergave van het brede detail.
(Bron: Dainty & Shaw, 1974). (Overgenomen met toestemming van The Society for Imaging Science and Technology, USA).

De vele technische middelen die de gebruiker bij het verbeelden ter beschikking staan maken het ondoenlijk om in algemene termen aan te geven waaraan een afbeeldingsproces moet voldoen. Uit het voorgaande blijkt dat de eisen tussen twee uitersten zullen liggen:

- Hoge geometrische resolutie en 'goed contrast' zonder specifieke eisen ten aanzien van radiometrische en spectrale resolutie (fotogrammetrie en foto-interpretatie).
- Hoge radiometrische resolutie, met specifieke eisen ten aanzien van de spectrale resolutie, en 'voldoende' geometrische resolutie (radiometrie en digitale beeldverwerking).

## 6.3 Fotografische receptoren

### 6.3.1 Fotografische opslag van informatie

Het gebruik van een *fotografische receptor* (film-emulsie) brengt onder meer het volgende met zich mee (zie verder paragraaf 4.1.1):

- De gegevens liggen besloten in de *variatie in korreldichtheid* per volume van een plat drie-dimensionaal beeld met een dikte van 0,003 tot 0,015 mm.
- De gegevens worden ontleend aan de *twee-dimensionale projectie* van de drie-dimensionale korrelverdeling.

De onregelmatige verdeling van de kristallen naar plaats en grootte, en de invloed van de ontwikkeling op de korrelvorming, maken dat de *korrelverdeling* onregelmatig is. Door lokale samenballingen van zilverkorrels krijgt het beeld daardoor een korrelige textuur zonder dat de afzonderlijke korrels zichtbaar zijn; die zijn daar te klein voor. Deze *korreling* ('graininess') is van een groot aantal factoren afhankelijk. Een objectieve maat is moeilijk te geven.
De onregelmatigheid van de korrelverdeling is te beschouwen als een storing (*ruis*), omdat het de uitkomst is van de toevalsfactoren. Alleen wanneer de verdeling plaatselijk ook niet-toevallige verschillen vertoont valt in het beeld iets te onderscheiden. Naarmate de toevallige onregelmatigheden groter zijn, zullen ook de niet-toevallige onregelmatigheden groter moeten zijn om boven het storingsniveau waarneembaar te zijn.
Over de *ruis van fotografische receptoren* bestaat in de literatuur een bijna verwarrende hoeveelheid begrippen. In Supplement 4 wordt de lezer een handreiking gedaan om de in paragraaf 6.3.2 te bezigen begrippen te vergelijken en te onderscheiden, en er de achtergrond van te begrijpen.

### 6.3.2 Densitometrie (meten van de korreldichtheid)

De zeer hoge korreldichtheid per oppervlak sluit methoden gebaseerd op het tellen van korrels uit. Omdat de informatie besloten ligt in verschillen in aantallen korrels over een oppervlak, komen meetmethoden in aanmerking die zijn gebaseerd op *indirecte meting van de korreldichtheid.*

*Densitometrie* berust op het meten van de 'opaciteit' (= mate van ondoorlatendheid voor licht) van een transparant medium. De densiteit (D) is als volgt gedefiniëerd:

$$D = \log 0 = \log(\Phi i/\Phi t) = \log(1/T) = -\log(T) \qquad (6.1)$$

Hierin is O de opaciteit, Φi de opvallende stralingsstroom, Φt de doorgelaten stralingsstroom en T derhalve de transmissiefactor van het medium (vergelijk paragraaf 4.1.1).
Densitometrie toegepast op fotografische registraties komt neer op het meten van de transmissie van een emulsie over een zeker oppervlak, met inbegrip van het materiaal waarop deze emulsie is aangebracht. Metingen worden uitgevoerd met een zogenaamde *densitometer.*

Bij het verschuiven van het meetvenster van een densitometer over een uniform bestraalde en ontwikkelde fotografische emulsie variëert de gemeten densiteit ten gevolge van de *onregelmatige verdeling van de korrels*: de korreligheid ('granularity'). Naarmate het oppervlak waarop een densiteitsmeting betrekking heeft kleiner is, zal de toevalsfactor in de korrelverdeling sterker in de meting merkbaar zijn. Opeenvolgende metingen op onderlinge afstanden die groter zijn dan de breedte van het meetvenster leveren een normaal verdeelde steekproef op. De

Tabel 6.1 Effectieve filmgevoeligheid voor luchtopnamen (EAFS) en de σ(D) (in promilles) voor 13 zwartwit films en 6 kleurenfilms.

EAFS: 'Effective Aerial Film Speed'
σ(D): RMS-granularity met 0,048 mm diameter ronde opening bij densiteit D = 1,0.

Recent ontwikkelde emulsies (bijv. Kodak T-Max 100 en T-Max 400) waarin platte AgBr-kristallen worden gebruikt vertonen een veel gunstiger verhouding tussen EAFS en σ(D).

| | Film | EAFS | σ(D) |
|---|---|---|---|
| Kodak | Aerial Color (SO-242) | 6 | 9 (langzaam) |
| | High Def. Aerochr. IR (SO-131) | 6 | 9 |
| | High Def. Aerial (3414) | 8 | 8 |
| | Aerochrome MS (2440) | 32 | 12 |
| | Pan-X Aerographic (2412) | 40 | 9 |
| | Aerochrome IR (2443) | 40 | 17 |
| | Technical Pan (SO-115) | 50 | 8 |
| Agfa | Aviphot Pan 150 PE | 50 | 20 |
| Kodak | Ektachrome EF (SO-397) | 64 | 13 |
| | Aerocolor Neg. (2445) | 100 | 13 |
| Agfa | Aviphot Pan 150 PE | 150 | 22 |
| Kodak | Plus-X Aerographic (2402) | 200 | 20 |
| Ilford | FP-3 Aerial | 200 | 21 |
| Kodak | Plus-X Aerecon (3411) | 200 | 28 |
| Agfa | Aviphot Pan 200 PE | 200 | 29 |
| Ilford | HP-5 Aerial | 400 | 29 |
| Kodak | IR-Aerographic (2424) | 400 | 27 |
| | Double-X Aerogr. (2405) | 500 | 26 |
| | TRI-X Aerographic (2404) | 640 | 60 (snel) |
| | T-Max 100 | 200 | ca. 10 |
| | T-Max 400 | 600 | ca. 15 |

standaardafwijking van zo'n steekproef wordt de 'root mean square granularity' genoemd. Deze *RMS-granularity* als maat voor de korreligheid wordt soms aangegeven in promilles; een waarde van bijvoorbeeld 16 betekent dan een standaardafwijking σ(D) = 0,016. Snelle, grofkorrelige emulsies vertonen een hogere RMS-granularity dan langzame, fijnkorrelige emulsies (tabel 6.1).

De oppervlakte van het meetvenster (A) van de densitometer heeft invloed op de meting van σ(D).
De *korreligheidsfactor* G, met:

$$G = A * \sigma^2(D) \tag{6.2}$$

is vrijwel constant voor een toevallige korrelverdeling mits A veel groter

is dan de oppervlakte van een korrel (Dainty & Shaw, 1974). Met vergelijking (6.2) kan worden afgeleid dat voor een granularity die niet hoger mag zijn dan $\sigma(D)_{max}$ de meetopening tenminste een oppervlakte $A_{min}$ moet beslaan. Indien de RMS-granularity $\sigma(D)$ die met een meetopening met oppervlakte $A_{ref}$ is gemeten bekend is, geldt voor $A_{min}$:

$$A_{min} = (\sigma(D)/\sigma(D)_{max})^2 \cdot A_{ref} \qquad (6.3)$$

Uit tabel 6.1 blijkt dat de grofkorrelige Tri-X een $\sigma(D)$ heeft van 0,06 ($A_{ref}$ = 0,0018 mm$^2$). Indien voor een bepaalde toepassing van densitometrie $\sigma(D)$ niet groter mag zijn dan bijvoorbeeld 0,01, dan vergt dit een 6 maal groter oppervlak $A_{min}$. De diameter van de meetopening dient dus $(6)^{1/2}$ maal zo groot te zijn (0,12 mm). Dit houdt tevens de voorwaarde in dat aangenomen mag worden dat de bestralingssterkte over dit oppervlak uniform is. Luchtfoto's vertonen details die soms aanzienlijk kleiner of smaller zijn dan 0,12 mm.
Voor een bepaalde korrelverdeling (ofwel een bepaalde film) geldt dat de densiteit D gemeten over oppervlakte A evenredig is met het aantal korrels binnen A. De variatie in dit aantal zal toenemen naarmate het aantal toeneemt. De 'granularity' $\sigma(D)$ neemt dan ook bij benadering evenredig toe met de densiteit D. Voor A constant geldt dan wegens vergelijking (6.2):

$$G = a \cdot D \qquad (6.4)$$

De constante a is bij benadering evenredig met het gemiddelde van de korrelgrootteverdeling.
De RMS-granularity die fabrikanten verstrekken (tabel 6.1) is meestal gemeten bij een gemiddelde densiteit van D = 1,0.

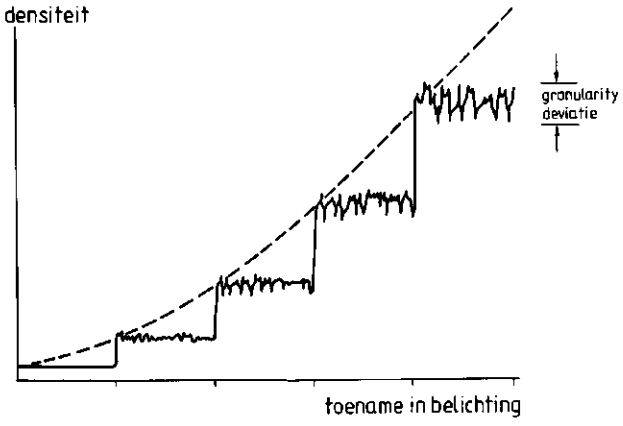
### 6.3.3 Karakteristieke curve (DlogH-curve)

Voor de *DlogH-curve* bestaan diverse aanduidingen, zoals H en D-curve (naar de uitvinders Hurter en Driffield), sensitometrische curve, karakteristieke curve, densiteitscurve, zwartingscurve (zie ook paragraaf 4.1.1).

De DlogH-curve (functioneel verband tussen de logaritme van de bestralingsdosis H en densiteit D) verschaft inzicht in enkele eigenschappen van de combinatie van emulsie en ontwikkeling die ook voor RS-toepassingen van belang zijn (vgl. figuur 4-1, waar in plaats van H de waarde Q is aangeduid). Voor een zwart-wit (monochrome) film geldt:

- De densiteit van de drager en de grondsluier $D_{min}$ ('base plus fog'), en de hoogst haalbare densiteit $D_{max}$ met de bijbehorende waarden voor logH geven het *maximum dynamisch bereik* $\Delta$logH aan.
- De hellinggradiënt $\gamma$ vormt een maat voor de *contrastweergave*. Voor $D_{max}$ en $D_{min}$ is $\gamma$=0. De fotografische beeldvorming berust op contrasten ($\gamma$>0).

De *sensitometrische gevoeligheid (snelheid)* wordt ontleend aan de




6-5 Variatie in 'granularity' als functie van de densiteit. De onderbroken lijn stelt de karakteristieke curve voor
(bron: Arnold et al., 1971).

ligging van de DlogH-curve ten opzichte van de geijkte logH-as. Hiervoor bestaan verschillende criteria, veelal gebaseerd op de reciproke van de dosis H die nodig is om een bepaalde zwarting D te bereiken.

De DlogH-curve geldt alleen voor macro-details. Deze zijn zo groot dat chemische contrastversterking geen invloed heeft. Voor details die kleiner zijn afgebeeld dan ca. 1 mm$^2$ en die een hoog contrast vertonen met de directe omgeving geldt dit beslist niet, zoals in figuur 6-4 schematisch is aangeduid. Bovendien beïnvloedt bij kleine meetopeningen de korreligheid de uitkomst van de meting. Bij zeer kleine meetvensters zoals van een microdensitometer zijn meerdere metingen over een oppervlak nodig om de densiteit via een gemiddelde te schatten (figuur 6-5).

Een DlogH-curve is derhalve alleen van toepassing indien D en H beide betrekking hebben op een *zekere oppervlakte* (zie paragraaf 6.3.2). Een bestralingsdosis H over een oppervlakte A betekent een stralingsenergie Q. Het zou daarom juister zijn te spreken van een *DlogQ-curve* (hoofdstuk 4).

### 6.3.4 Geometrische en radiometrische resolutie

Begrippen als resolutie, oplossend vermogen en scheidend vermogen (paragraaf 3.4) houden verband met de grens waar beneden geen systematisch verschil in korrelverdeling kan worden aangetoond. Beneden de resolutiegrens gaat elk detail verloren in de onregelmatigheid van de korrelverdeling (korreligheid). Het contrast tussen detail en omgeving is dan onvoldoende.
Stel dat een fotografische emulsie moet dienen voor het opslaan van informatie in een vierkantspatroon met cellen van A mm$^2$, en dat binnen elke cel M densiteitsniveaus onderscheidbaar moeten zijn. Op grond van theoretische overwegingen geldt voor M (Dainty & Shaw, 1974, blz. 359):

$$M = \frac{R}{2k\sigma(D)} + 1 = \frac{RA^{\frac{1}{2}}}{2kG^{\frac{1}{2}}} + 1 \qquad (6.5)$$

R = het densiteitsverschil dat voor het opslaan van M niveaus beschikbaar is

$2k\sigma(D)$ = het densiteitsverschil tussen twee opeenvolgende niveaus uitgedrukt in het aantal malen de RMS-granularity

G = korreligheidsfactor in $mm^2$; zie betrekking (6.2)

$A^{1/2}$ = lineaire afmeting van de cel in mm.

Substitutie van vergelijking (6.4) in vergelijking (6.5) levert na herschikking:

$$R.A^{\frac{1}{2}} = 2k \cdot (M - 1) \cdot (a \cdot D)^{\frac{1}{2}} \tag{6.6}$$

met D de gemiddelde densiteit over het traject waarover het densiteitsverschil R betrekking heeft.

Voor M = 2 is:

$$R \cdot A^{\frac{1}{2}} = 2k(a \cdot D)^{\frac{1}{2}} \tag{6.7}$$

Dit is de *resolutie-vergelijking*, waarin R de intensiteitscomponent vertegenwoordigt, $A^{1/2}$ is de geometrische component, en k de stochastische component.
Voor een normaal verdeelde korreldichtheid geeft 2k impliciet de kans aan dat bij een densiteit D een densiteitsverschil R aantoonbaar is indien D is gemeten over celoppervlak A. Een andere formulering die op hetzelfde neerkomt is dat in 2k de kans besloten ligt dat bij densiteit D een cel kan worden gedetecteerd indien de oppervlakte A is en het densiteitsverschil met de omgeving tenminste R bedraagt.
Het geometrisch resolutiecriterium bij uitstek 'lijnparen per mm' (zie paragraaf 4.1.1) berust op dezelfde principes als waaraan vergelijking (6.7) is ontleend, zodat geometrische resolutie evenmin in één bepaald aantal lijnparen per mm valt uit te drukken.

Het verloop van de karakteristieke curve (paragraaf 6.3.3 en figuur 4-1) geeft aan dat D niet onbegrensd kan dalen. Bovendien blijkt dat naarmate D bij lage waarden afneemt eenzelfde contrast in bestralingsdosis log(H1/H2) een steeds kleiner densiteitscontrast R tot gevolg zal hebben. Uiteindelijk daalt R tot een waarde nul. Voor het weergeven van het aangeboden contrast ($C_i$=log(H1/H2)) zou de resolutie van de emulsie dan oneindig hoog moeten zijn. Substitutie in vergelijking (6.7) van:

$$R = \gamma \cdot \log(H1/H2) = \gamma \cdot C_i \tag{6.8}$$

levert:

$$C_i \cdot A^{\frac{1}{2}} = 2k \cdot (a \cdot D)^{\frac{1}{2}}/\gamma \tag{6.9}$$

Deze betrekking leert dat voor een emulsie de resolutie het hoogst is als èn D laag is èn $\gamma$ hoog, gegeven de waarde voor 2k.
Resultaten van empirisch onderzoek naar de geometrische resolutie van films voor luchtopnamen zijn hiermee in overeenstemming. Gegeven een contrast $C_i$ blijkt $A^{½}$ minimaal voor de laagste densiteit waarbij $\gamma$ de hoogste waarde vertoont. Naarmate $C_i$ lager is wordt $A^{½}$ hoger (lagere geometrische resolutie), maar gegeven $C_i$, wordt de hoogste resolutie steeds voor hetzelfde punt van de DlogQ-curve bereikt.
De geometrische resolutie heeft betrekking op het microbereik ($A^{½} <$ 0,5 mm). Ten gevolge van *chemische contrastversterking* bereikt $\gamma$ hogere waarden dan in het macrobereik (figuur 6-4).
*Een geforceerde ontwikkeling* leidt tot een gemiddeld hogere $\gamma$-waarde voor de DlogQ-curve. Dit geeft echter geen verbetering van de resolutie omdat de factor $A^{½}$ ongeveer evenredig toeneemt met $\gamma$, wegens een vergroting van de korrels (Campbell, 1962). Men bereikt immers met een zelfde aantal korrels een hogere densiteit.

Tot nu toe is de behandeling van de fotografische registratie impliciet beperkt tot het *negatiefprocédé*. Voor visuele interpretatie moet het oorspronkelijke negatieve beeld worden omgezet in een positief beeld via een tweede fotografische procédé; voor radiometrische toepassingen is zo'n tweede fase beslist af te raden.
Het gebruik van het *direct-positief procédé* neemt toe maar vrijwel uitsluitend als kleurenprocédé. *Een kleurenfilm* bestaat uit drie verschillende zwartwit-emulsies over elkaar heen. Elk van de drie emulsies heeft een eigen spectrale gevoeligheid en een eigen DlogQ-curve. Tijdens het ontwikkelen vormt zich in elke laag een aparte kleurstof (geel, magenta, cyaan) (zie paragraaf 4.1.1). Kleurenfotografie is niet bijzonder geschikt voor radiometrische toepassingen, en bovendien is het procédé bijzonder ingewikkeld. Om deze redenen blijft behandeling in dit hoofdstuk achterwege.

### 6.3.5 Spectrale resolutie

De drie lagen van een kleurenfilm beslaan drie verschillende spectrale banden (zie paragraaf 4.1.1). De ligging van die banden en de breedten ervan zijn voor bepaalde toepassingen niet optimaal. Dit blijkt bijvoorbeeld bij Kodak Aerochrome IR 2443 ('false colour' film). De roodgevoelige band van deze film loopt van 550 tot 680 nm, met het maximum bij 650 nm. De spectrale band van de 'infrarood'gevoelige laag loopt van ca. 600 nm tot ca. 850 nm en is dus óók roodgevoelig. Voor het inwinnen van spectrale informatie over planten is de optimale ligging van deze golflengtebanden (hoofdstuk 5) 650 – 700 nm (fotosynthese-activiteit), 670 – 730 nm ('red edge'; zie hoofdstuk 28 en 29) en 750 – 850 nm (LAI en biomassa). Met bestaande kleurenfilms valt dus geen optimaal resultaat te bereiken. De *spectrale resolutie* (bandbreedte) is onvoldoende en de ligging van de banden (spectrale precisie) valt niet te wijzigen.
Met een combinatie van een monochrome emulsie (zwartwit-film) en filters zijn binnen de spectrale bandbreedte van de film meerdere

spectrale banden te realiseren. Op deze wijze valt een goede spectrale precisie te bereiken, bij een spectrale resolutie van 30-50 nm, en dat is vergeleken met menige multispectrale scanner een heel goed resultaat (zie bijvoorbeeld hoofdstuk 9).
In Supplement 5 wordt een overzicht gegeven van diverse spectraalbanden in de luchtfotografie in vergelijking met andere RS-opnametechnieken in het optische venster.

## 6.4 Fotografische luchtopnamen

### 6.4.1 Eigenschappen van de camera

De componenten van de *camera* die in deze paragraaf aandacht krijgen, zijn de beeldvormende lens, de filters en het mechanisme voor het regelen van de bestralingsdosis.

#### 6.4.1.1 Lenzen

De verdeling van de bestralingsdosis over de receptor is het resultaat van de optische afbeelding die de lens gedurende enige tijd daarop projecteert. Een contrast in luminantie (helderheid) aan de voorkant van een lens ($C_l$) met effectie lensopening $A_l$ wordt omgezet in een *beeldcontrast* $C_i$:

$$C_i = \frac{\tau \cdot E_1 + E_c}{\tau \cdot E_2 + E_c} \tag{6.10}$$

met
$E_1$ = bestralingssterkte t.g.v. object 1 ($Wm^{-2}$)
$E_2$ = bestralingssterkte t.g.v. object 2 ($Wm^{-2}$)
$\tau$ = transmissiefactor van de lens
$E_c$ = bestralingssterkte t.g.v. strooilicht ($Wm^{-2}$).

Voor goed geconstrueerde camera's en lensoppervlakken met geringe reflectie bedraagt de *strooilichtfactor* ($E_c$) slechts 1 à 3% van de gemiddelde bestralingssterkte (Thomas, 1973). Onder deze voorwaarde valt $E_c$ te verwaarlozen voor de geringe waarden van $C_l$. Bij luchtfotografie liggen deze meestal rond 2 en bereiken zelden waarden boven 10.
De *transmissiefactor* van een lens is afhankelijk van de golflengte, maar niet van de bestralingssterkte. Binnen een golflengteband van ca. 100 nm is de verandering van de transmissie gering.
Een tweede factor die invloed op het beeldcontrast $C_i$ kan hebben, is de afname van de bestralingssterkte (E) naar de rand van het beeld. Donkere details ontvangen dan doses waarvoor de DlogQ-curve minder steil verloopt, dus een lagere contrastfactor vertoont (zie figuur 4-1). De *stralingsafval* ('lichtafval') van een lens valt te beschrijven als (Slater, 1983):

$$E_\alpha = K_N(\alpha) \cdot E_o \cdot \cos^n \alpha \tag{6.11}$$

$K_N(\alpha)$ = vignetterings-factor bij diafragma N en invalshoek $\alpha$

$E_o$ = bestralingssterkte van het beeldvlak in de optische as
$E_\alpha$ = bestralingssterkte van het beeldvlak buiten de as
$\alpha$ = hoek van inval ten opzichte van de as
n = constante, afhankelijk van de optische constructie.

Voor de bestralingssterkte van een object op het filmvlak ($E_i$) geldt (vgl. vergelijkingen 6.10 en 6.11):

$$E_i = K_N(\alpha) \cdot \cos^n \alpha \cdot \tau \cdot E_l + E_c \qquad (6.12)$$

waarbij $E_l$ de bestralingssterkte aan de voorkant van de lens is.

De eenvoudigste methode om de invloed van vignettering, lichtafval en strooilicht te bepalen is via densitometrie van een opname die is gemaakt met een uniform bestraald matglas voor de lens. Zo'n bepaling is nodig indien fabrikanten van lenzen geen volledige gegevens kunnen verstrekken.
De waarde voor $\alpha$ kan soms groter zijn dan 45°. Zonder tegenmaatregelen zou dan $E_\alpha$ ten opzichte van $E_o$ dalen met een factor 4, hetgeen een verschil in bestralingsdosis zou betekenen van logH1/H2 = $\Delta$logH = log 4 = 0,60. Voor een DlogQ-curve met gemiddeld $\gamma$ = 1,5 levert dat een densiteitsverschil $\Delta$D = ca. 1,0 op. Een optimale belichting over het volledige beeldveld is dan niet mogelijk. Met een speciaal filter waarvan de transmissie toeneemt met $\alpha$, kan het effect teruggebracht worden tot aanvaardbaardere proporties. Indien een lens van zo'n *antivignetteringsfilter* is voorzien, moet de lichtafval worden bepaald voor lens èn filter.

*Lensvertekening* heeft geen invloed op de resolutie, maar wel op de beeldgeometrie. Bij fotogrammetrische toepassingen is lensvertekening bij de mechanische (analoge) uitwerking hinderlijk, en daarom hebben fotogrammetrische camera's een zeer geringe lensvertekening. Bij rekenkundige (analytische) uitwerking vormt vertekening geen probleem, omdat correctie mogelijk is. Camera's met gewone niet geheel vertekeningsvrije lenzen zijn daarom ook geschikt voor fotogrammetrische toepassingen, mits onder meer de lensvertekening bekend is.
Over het algemeen zijn gewone lenzen niet ontworpen voor infraroodfotografie; lenzen van moderne grootformaat luchtfotocamera's zijn dat wel. Indien een lens niet is gecorrigeerd voor nabij-infrarood dan is de brandpuntsafstand voor dit spectrale bereik groter dan voor zichtbare straling (Jacobsen, 1978, blz. 109). Een afstandsinstelling op 'oneindig' voor infrarood is dan gelijk aan een instelling die voor zichtbare straling met een geringere voorwerpsafstand overeenkomt. Zolang de spectrale band smal is, levert dit geen nadeel op voor de beeldkwaliteit (geometrische resolutie). Is daarentegen een opname gevraagd zowel in het zichtbare als in het nabij-infrarode deel van het spectrum, zoals bij kleureninfraroodfilm, dan zal de beeldkwaliteit minder zijn omdat geen correcte scherpstelling mogelijk

is. Met proefopnamen is een optimale scherpstelling te achterhalen.

6.4.1.2 Filters

Onder welke omstandigheden welke *filters* bij welke films voor welke toepassingen het meest geschikt zijn blijft in dit hoofdstuk buiten beschouwing. Bij films zitten meestal instructies die aanknopingspunten bieden.

Het *gebruik van filters* heeft verschillende redenen: (1) verbetering van het beeldcontrast door absorptie van niet-beeldvormende straling bij zwart-wit; (2) aanpassing van de kleurbalans bij kleurenopnamen; (3) selectieve spectrale transmissie voor radiometrische doeleinden (zie bijvoorbeeld hoofdstuk 9).

Filters absorberen straling zodat bij gegeven omstandigheden een filter noopt tot aanpassing van de effectieve gevoeligheid van de film. Opgegeven filter-factoren zijn zeer globaal en bij smalle transmissiebanden niet bruikbaar, omdat dan de radiometrische en spectrale eigenschappen van gefotografeerde objecten ook een rol spelen.

De transmissiefactor van de filter(s) kan in vergelijking (6.12) worden verrekend door i.p.v. $\tau$ de transmissie van het hele optische systeem ($\tau_o$) in te voeren:

$$E_i = K_N(\alpha) \cdot \cos^n \alpha \cdot \tau_o \cdot E_1 + E_c \qquad (6.13)$$

6.4.1.3 Diafragma en sluiter

Uit het verloop van de DlogQ-curve blijkt dat de bestralingsdosis binnen zekere grenzen moet blijven. De totale globale instraling aan het aardoppervlak varieert met zonnestand en bewolking. Omdat ook de reflectiefactor van dit oppervlak niet overal gelijk is, is de bestralingssterkte over het lensoppervlak van de camera niet voor iedere richting gelijk. Bovendien heeft de atmosfeer invloed op de bestralingssterkte (zie paragraaf 6.4.2).

Via een variabel *diafragma* in de lens is de stralingsstroom die aan de achterzijde van de lens uittreedt binnen zekere grenzen regelbaar, en de bestralingssterkte in het beeldvlak dus ook. De diafragma-instelling wordt aangegeven met het diafragmagetal N dat numeriek gelijk is aan de cameraconstante (beeld-afstand) gedeeld door de diameter van het diafragma. De reeks diafragmagetallen loopt op met een factor $2^{1/2}$, zodat de doorsnede steeds met een factor 2 toeneemt. De standaardreeks voor N is: 1, 1.4, 2, 2.8, 4, 5.6, 8, 11, 16, etc.

Een '*sluiter*' regelt de tijdsduur van de bestraling. Hiervoor bestaan bij framecamera's twee methoden: (1) openen en sluiten van de lensopening en (2) een gordijn met daarin een spleet vlak langs het beeldvlak laten lopen. De mechanismen die dit mogelijk maken heten respectievelijk *centraalsluiters* en *spleetsluiters*. Elk type heeft zijn voor- en nadelen, mede afhankelijk van de constructieve oplossing die is gekozen. De standaardreeks voor de belichtingstijd is: 1 sec, 1/2, 1/4, ..., 1/125, 1/250 etc. De kortste belichtingstijden van sluiters lopen uiteen van ca. 1/300 sec

voor eenvoudige centraalsluiters tot 1/4000 voor sommige spleetsluiters. Om de bestralingssterkte aan de voorzijde van de camera te bepalen, moet in vergelijking (6.13) allereerst de invloed van het diafragma worden betrokken. Hiervoor moet een factor $1/4N^2$, met N = relatieve lensopening, aan vergelijking (6.13) toegevoegd worden:

$$E_i = \frac{K_N(\alpha) \cdot \cos^n \alpha \cdot \tau_o}{4N^2} \cdot E_l + E_c \qquad (6.14)$$

Door vervolgens de sluitertijd (t) erbij te betrekken gaat vergelijking (6.14) over in:

$$Q_i = \frac{K_N(\alpha) \cdot \cos^n \alpha \cdot \tau_o \cdot t}{4N^2} \cdot E_l + Q_c \qquad (6.15)$$

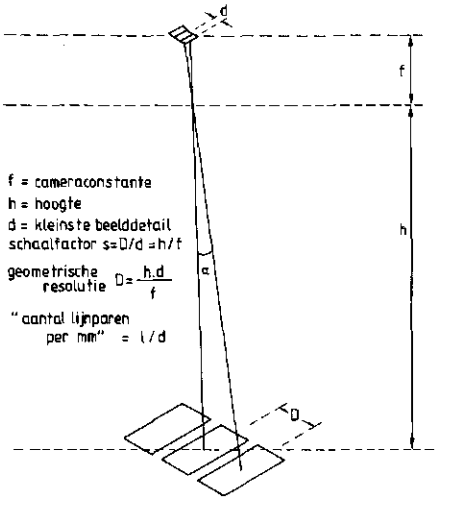
met $Q_i$ = stralingsenergie gedetecteerd op het filmvlak
$Q_c$ = stralingsenergie t.g.v. strooilicht.

Het instellen van de bestralingsdosis via diafragma en sluiter gebeurt aan de hand van een licht- of stralingsmeting. Halvering van de belichtingstijd en vergroting van het diafragma met 1 stop (factor 2), geeft dezelfde bestralingsdosis of lichtwaarde. Welke combinatie moet worden ingesteld hangt mede af van het gebruiksdoel van de opname en de eis ten aanzien van de beeldbeweging die daaruit voortvloeit.
Voor de meeste toepassingen gaat de eis ten aanzien van de bestralingsdosis niet verder dan dat deze een 'goed belicht' beeld moet opleveren. Bij luchtfotografie voor radiometrische doeleinden moet de sluiter echter een zeer hoge *repetitienauwkeurigheid* hebben, evenals de instellingen van het variabele diafragma. Fotogrammetrische camera's staan wat dit betreft buiten verdenking, maar dat geldt niet zonder meer voor gewone klein-formaat camera's.

## 6.4.2 Omstandigheden tijdens de opname

### 6.4.2.1 Schaal en beeldbeweging

Bij verticaalopname van vlak terrein geldt dat de voorwerpsafstand bij




6-6 Relatie tussen schaal, resolutie en detailweergave (bron: Brock, 1970).

benadering gelijk is aan de vlieghoogte h. In figuur 6-6 is de relatie aangegeven tussen *schaal*, resolutie en detailweergave. Hieruit mag niet worden afgeleid dat een verdubbeling van de geometrische resolutie en een halvering van de schaal een zelfde beeldkwaliteit oplevert; zeker niet als daarvoor ook de vlieghoogte wordt verdubbeld (Brock, 1970; Welch, 1972). Dit komt omdat resolutie betrekking heeft op simpele testfiguren met een bepaald contrast, terwijl het beeld gecompliceerder is en uiteenlopende contrasten vertoont. Factoren die hierop sterke invloed hebben, zijn de korreligheid, zoals uit vergelijking (6.7) is af te leiden, en de atmosfeer (zie paragraaf 6.4.2.2). Beide veroorzaken een verslechtering van de beeldkwaliteit in de donkere partijen.
Indien de verdeling van E over het oppervlak van de receptor (film) niet verandert gedurende sluitertijd t, heeft de lengte van t geen invloed op de verdeling van de bestralingsdosis H, en dus ook niet op het beeldcontrast ($C_i = \log (H_1/H_2)$) uit vergelijking (6.9). Bij luchtopnamen is bij voorbaat niet aan deze voorwaarde te voldoen, omdat de sensor (camera) beweegt ten opzichte van het object (aardoppervlak). Het resultaat is dat het beeld dat de lens van het aardoppervlak op de receptor projecteert tijdens de belichting verschuift ('image motion'). Dit komt voor een beelddetail A neer op het verdelen van dezelfde energie Q over een groter oppervlak dan A.
De vergroting van A gedurende t hangt af van de mate van *beeldbeweging* ten opzichte van grootte en vorm van A. Voor een lijnvormig element levert beweging in de lengterichting een veel geringere vergroting op dan beweging in de dwarsrichting.
Beeldbeweging leidt tot een contrastverlaging die het eerst merkbaar zal zijn bij kleine of smalle details. Een verminderde geometrische resolutie is het gevolg.
De camerabewegingen ten opzichte van het aardoppervlak zijn te onderscheiden in twee soorten: *verplaatsingen* en *verdraaiingen*. De oorzaken zijn bewegingen van het vliegtuig en trillingen van en in de camera.
De invloed van trillingen is tot een niet merkbare waarde terug te brengen met de juiste constructieve maatregelen. Eenvoudig is dat niet. Bij de inbouw van een lichte kleinformaat-camera in een ultra-licht vliegtuig zijn op dit punt problemen te verwachten.

De voorwaartse beeldbeweging ($dB_v$) is gelijk aan:

$$dB_v = t \cdot v_g / s \qquad (m) \qquad (6.16)$$

$v_g$ = grondsnelheid van het vliegtuig ($ms^{-1}$)
t = belichtingstijd (s)
s = schaalfactor.

Deze beeldbeweging valt te compenseren als de film in de camera met het beeld meebeweegt. Sommige luchtfotocamera's zijn uitgerust met een vorm van FMC ('forward motion compensation').
Het inzetten van FMC is alleen zinvol indien de voorwaartse

beeldbeweging groot is ten opzichte van de beeldbeweging ten gevolge van rotaties. Deze laatste vorm van beeldbeweging ($dB_r$) is onafhankelijk van de opnameschaal, want:

$$dB_r = t \cdot \omega \cdot f \tag{6.17}$$

$dB_r$ = beeldbeweging door rotatie (m)
t = belichtingstijd (s)
$\omega$ = hoeksnelheid ($rad.s^{-1}$)
f = brandpuntsafstand (m).

Hoge waarden van $\omega$ treden op ten gevolge van turbulentie, en bij gebrek aan stabiliteit van het vliegtuig. Naarmate vlieghoogte en vliegsnelheid lager zijn, en de vleugelbelasting geringer is, kan $\omega$ grotere waarden bereiken. Het gebruik van lichte langzame vliegtuigen dwingt daarom tot korte belichtingstijden en korte brandpuntsafstanden. Beeldbeweging van minder dan 0,005 mm blijft onzichtbaar. Daarboven zal het effect eerder merkbaar zijn naarmate de korreligheid van de film en het contrast in het onderwerp lager zijn, en de resolutie van de lens beter is. Waarden tot 0,02 mm zijn in de meest voorkomende gevallen acceptabel uit het oogpunt van geometrische resolutie. Voor radiometrische toepassingen hoeft een aanzienlijk grotere beeldbeweging van 0,2 mm geen bezwaar te zijn indien met een lage geometrische resolutie kan worden volstaan. Dit heeft praktische consequenties voor de uitvoering van de fotografie.
Men kan dan ook stellen dat bij radiometrische toepassingen (voldoende radiometrische resolutie) de nood van een lage geometrische resolutie de deugd van een hoge spectrale resolutie oproept.

6.4.2.2 Atmosfeer en beeldcontrast
Niet alle straling die het aardoppervlak in de richting van de lens reflecteert bereikt deze ook. Een deel blijft steken in de atmosfeer. Tevens ontvangt de lens niet-beeldvormende (verstrooide) straling. De luminantie (helderheid) van een object buiten de camera ($L_c$) bedraagt:

$$L_c = \tau_a \cdot L_g + L_a = \tau_a \cdot \rho \cdot E/\pi + L_a \tag{6.18}$$

$L_g$ = luminantie van het object ($Wm^{-2}sr^{-1}$)
E = bestralingssterkte (radiantie) van het object ($Wm^{-2}$)
$\rho$ = reflectiefactor van het object
$\tau_a$ = transmissiefactor van de atmosfeer tussen object en lens
$L_a$ = luminantie van de atmosfeer tussen object en lens ($Wm^{-2}sr^{-1}$).

De waarde $E_i$ uit vergelijking (6.15) is gelijk aan $\pi.L_c$ uit vergelijking (6.18). Combineren van beide vergelijkingen leidt uiteindelijk tot:

$$Q_i = \frac{K_N(\alpha) \cdot \cos^n \alpha \cdot \tau_o \cdot t}{4N^2} \cdot (E \cdot \rho \cdot \tau_a + \pi \cdot L_a) + Q_c \tag{6.19}$$

Radiometrische toepassingen zijn meestal gericht op berekening van reflectiefactoren. Zulke toepassingen zijn alleen uitvoerbaar indien behalve $\rho$ en E ook de atmosferische onbekenden $\tau_a$ en $L_a$ worden opgelost. Dit blijkt o.a. mogelijk indien referentie-oppervlakken beschikbaar zijn (zie verderop en hoofdstuk 9).

Contrast gemeten aan het aardoppervlak berust op de verhouding van reflectiefactoren ($C_g = \rho_1/\rho_2$). Buiten de camera is dit contrast wegens (6.18) afgenomen tot:

$$C_c = \frac{L_{c1}}{L_{c2}} = \frac{\rho_1 \cdot \tau_a \cdot E/\pi + L_a}{\rho_2 \cdot \tau_a \cdot E/\pi + L_a} \tag{6.20}$$

De contrastverlaging is het sterkst te merken bij lage objectcontrasten en lage gemiddelde reflectie. Dit zijn de donkere partijen.
Infraroodgevoelige film levert contrastrijkere beelden op dan film die alleen gevoelig is voor zichtbare straling. De belangrijkste reden schuilt in een hoger objectcontrast in het nabij-infrarood. Voor vegetatie is de reflectiefactor voor nabij-infrarood 5 tot 10 maal zo hoog als voor zichtbare straling. Alle andere oppervlakken vertonen een infraroodreflectie die veel lager is, en op ongeveer dezelfde waarde ligt als in het zichtbare spectrum.

### 6.4.3 Optimale belichting van de film

*Lichtmeting* wordt algemeen toegepast, maar vergt ervaring voor het bereiken van een juiste instelling (Graham & Read, 1986). Bij gebruik van de Kodak Aerial Exposure Computer is zelfs geen meter nodig. Dit goedkope kartonnen rekenschijfje levert voor standaard omstandigheden, standaard filtering en standaard ontwikkeling een voldoende nauwkeurige schatting voor de belichting (Kodak, publication R10). Zulke eenvoudige maatregelen voldoen, omdat het verticaal gemeten objectcontrast in het zichtbare spectrum zelden de waarde 10 haalt en meestal rond 2 ligt.
Bij verticaalopnamen in het nabij-infrarood zijn de contrasten aanzienlijk groter. Dit maakt de belichting van infraroodfilms kritisch. Bovendien zijn gewone *belichtingsmeters* nauwelijks gevoelig voor rood en ongevoelig voor nabij-infrarood.
Om met behulp van een belichtingsmeter een juiste aanduiding voor de instelling van diafragma en sluiter te krijgen is instelling op een 'gevoeligheid' nodig. De *effectieve gevoeligheid* voor een bepaalde film hangt af van (1) het gehanteerde gevoeligheidscriterium, (2) de ontwikkeling, (3) de filtering, (4) de spectrale gevoeligheidskarakteristiek van de film en (5) de spectrale samenstelling van het daglicht. Omdat belichtingsmeters een fotopische gevoeligheid hebben (hoofdstuk 3) is bij opnamen in het rood of nabij-infrarood ook in het geding: (6) de verhouding in radianties $L_{groen}/L_{rood}$, respectievelijk $L_{groen}/L_{infrarood}$. Deze verhoudingen zijn niet zonder meer uit bekende reflectiefactoren van objecten af te leiden wegens de selectieve spectrale invloed van de atmosfeer. Dat brengt mee dat onder afwijkende omstandigheden de daarvoor geldende gevoeligheid moet

worden geschat of afzonderlijk bepaald.
Met *radiometers* die in meerdere spectrale banden registreren is de meting zo in te richten dat de uitkomst wel onder alle omstandigheden geldig is. Een eenmalige empirische ijking is nodig, omdat geen radiometers beschikbaar zijn die de 'lichtwaarde' als uitkomst geven. Zonder die waarde is de instelling van diafragma en sluiter op een camera niet mogelijk.
Het is dus niet mogelijk tot een juiste instelling van de camera te komen zonder eerst een afweging te maken waarin de filmgevoeligheid een rol speelt. Dit betreft de keuze van de film/ filter-combinatie en de ontwikkeling in relatie tot de toepassing die met de foto's wordt beoogd.

*Toepassingen* waarbij het *herkennen of aanmeten van details* van doorslaggevend belang is, vereisen een opnametechniek waarmee gegeven de omstandigheden een zo hoog mogelijke geometrische resolutie over het hele beeldveld is te bereiken.
In paragraaf 6.3.4 is gebleken dat de eis van een hoge geometrische resolutie samenhangt met de visuele waarneming en een geringe korreligheid vraagt. Tevens zijn een hoge contrastfactor en een lage densiteit nodig (vergelijking 6.9). Helaas gaat het verlagen van de korreligheid gepaard met een verlies aan gevoeligheid. De daardoor noodzakelijke verhoging van de bestralingsdosis wordt bereikt via openen van het diafragma of met verlengen van de belichtingstijd. De eerste oplossing betekent enige afname van de optische resolutie van de lens naar de randen van het beeld, terwijl bij de tweede oplossing de beeldbeweging verdubbelt. Bij goede optische kwaliteit levert de eerste oplossing vrijwel altijd een verbetering van de beeldkwaliteit op. De tweede oplossing biedt slechts perspectief indien de totale beeldbeweging klein blijft (niet meer dan 0,02 mm), en dat zal bij de gebruikelijke opnameschalen en vliegsnelheden niet bij voorbaat het geval zijn. Een halvering van de gevoeligheid leidt tot een verdubbeling van de beeldbeweging maar niet tot een halvering van de RMS-granularity (zie paragraaf 6.3.4 en tabel 6.1).
De consequentie is dat de toegestane beeldbeweging en de maximale lensopening bepalen wat de laagste nog bruikbare filmgevoeligheid is. De rotatiecomponent in de beeldbeweging is omgekeerd evenredig met de cameraconstante. Een kleinere cameraconstante betekent bij dezelfde schaal een geringere vlieghoogte (zie figuur 6-6). Beperking van de opname-afstand verhoogt het objectcontrast dat bij de lens arriveert (zie paragraaf 6.4.2). Uiteindelijk resulteert dit in een betere resolutie wegens een hoger beeldcontrast $C_i$ (zie vergelijking 10.9 in paragraaf 6.3.4).

Bij *radiometrische toepassingen* is het uitgangspunt niet de geometrische resolutie maar de spectrale en radiometrische. De selectie van de golflengtebanden en de bandbreedten hangt samen met de spectrale eigenschappen van op te nemen objecten. Aan de hand van spectrale gevoeligheden van films en de transmissie-eigenschappen van filters selecteert men film/filter-combinaties die de gewenste spectrale resolutie

en precisie (ligging van de piektransmissie) zo goed mogelijk benaderen. De effectieve gevoeligheid is van secundair belang.

De factor $A^{1/2}$ uit vergelijking (10.9) kan naar believen worden opgevoerd door het vergroten van de meetopening, of door het uitvoeren van meerdere onafhankelijke metingen. De korreligheid vormt dan geen probleem. Evenwel mag de signaal-ruisverhouding van de densitometer niet uit het oog worden verloren. Thomas (1973) geeft nauwkeurigheden van D=+/-0,01, wat neerkomt op ca. 2,5%.
Densiteiten waarbij de contrastfactor niet dicht bij de maximumwaarde ligt moeten worden vermeden. Deze eis beperkt de densiteitsomvang tot het bereik tussen D = ca. 0,7 en D = ca. 2,0. Het gevoeligheidscriterium zal hierop afgestemd moeten zijn, hetgeen noodzaakt tot het afwijken van gebruikelijke criteria. Tevens dient de stralingsafval van de lens (paragraaf 6.4.1) binnen de perken te blijven. Bij de keuze van de lens moet men daarmee rekening houden. Eventuele vignettering is tegen te gaan met verkleinen van het diafragma, hetgeen noodzaakt tot evenredige verlenging van de belichtingstijd (paragraaf 6.4).
In welke mate beeldbeweging acceptabel is, zal afhangen van het doel van de opnamen en verhouding tussen de beeldbeweging en de grootte van afgebeelde objecten waarvan densiteiten gemeten moeten worden.

Er bestaat geen principieel verschil in de opnametechniek voor radiometrisch georiënteerde toepassingen enerzijds en geometrisch georiënteerde anderzijds; wel bestaat er een verschil in afweging van factoren die in beide gevallen invloed hebben op het afbeelden. Voor het inwinnen van geometrische informatie over een object, moet dit visueel onderscheidbaar zijn in het beeld, hetgeen radiometrische informatie impliceert. Als het daarentegen gaat om de radiometrische en spectrale eigenschappen ervan, moet de positie in het beeld berekend kunnen worden, en dat vergt weer geometrische informatie.
Het verschil tussen radiometrisch en geometrisch georiënteerde toepassingen schuilt dan ook niet in de opnametechniek (afbeelden) maar in het gebruik van de opnamen (verbeelden).

### 6.4.4 IJking bij radiometrische toepassingen

Het ontlenen van *radiometrische informatie* aan luchtfoto's kan niet langs visuele weg. Het verbeelden verloopt dan ook volstrekt anders dan bij foto-interpretatie; men is genoodzaakt een *model* op te stellen dat de relatie tussen object en densiteit op een praktisch toepasbare wijze voldoende nauwkeurig beschrijft.
Een nauwkeurige beschrijving van de relatie tussen de bestralingssterkte op het beeldvlak in de camera ($E_i$) en de reflectiefactor van een object ($\rho$) is de volgende (Slater, 1983, blz. 236) (vgl. vergelijking 6.19):

$$E_{i\Delta\lambda} = \frac{K_N(\alpha)\cos^n\alpha}{4N^2}\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}[E_\lambda\rho(\lambda)\tau_a(\lambda) + \pi L_{\lambda a}]\,\tau_o(\lambda)\,d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\lambda c}\,d\lambda \qquad (6.21)$$

De bijbehorende toelichting luidt: 'This general expression is included as a caution against oversimplifying camera spectroradiometric calculations'.
Vanuit praktisch oogpunt is vereenvoudiging toch noodzakelijk omdat de betrekking niet-meetbare parameters bevat. Nuttig is de vergelijking dan ook alleen om aan te geven in welke richting zo'n vereenvoudiging gezocht moet worden:

- Verminderen van de golflengte-afhankelijkheid door het kiezen van smalle spectrale banden waarbinnen de betreffende factoren elk weinig variëren. Vergelijking (6.19) is dan identiek aan vergelijking (6.21) indien de belichtingstijd toegevoegd wordt.
- Benaderen van vignettering ($K_N(\alpha)$) en stralingsafval ($\cos^n\alpha$) (vergelijking 6.11) via een hogere graads polynoom die het gemeenschappelijk effect beschrijft als functie van de afstand tot de optische as. Dit moet voor elke waarde van N gebeuren (zie paragraaf 6.4.1.1).
- Veronderstellen dat de bestralingssterkte van het aardoppervlak $E_\lambda$ uniform is (geen invloed van bewolking).
- Gebruiken van een kleine beeldhoek, omdat $\tau_a$, $L_a$ en $\rho$ richtingsafhankelijk zijn.
- Beschouwen van het strooilicht in de camera ($E_c$) als een verwaarloosbaar aandeel van de totale bestralingssterkte ($E_i$) (zie paragraaf 6.4.1.1).

Na berekening van de stralingsenergie ($Q_i$) uit de gemeten densiteiten met behulp van de DlogQ-curve, wordt een correctie voor stralingsafval en vignettering uitgevoerd. Onder constant blijvende atmosferische omstandigheden en camera-instelling en voor één spectrale band kunnen de overige termen in het rechter lid van vergelijking (6.19), met uitzondering van $\rho$, als constant beschouwd worden. Dit houdt in, dat na correctie voor lichtafval uit de berekende $Q_i$ de reflectiefactor ($\rho$) van een bepaald object volgt uit de vergelijking:

$$\rho = a + b \cdot Q_i \tag{6.22}$$

met a en b als constanten.

Men kan theoretisch volstaan met het oplossen van a en b uit twee vergelijkingen met bekende waarden voor $\rho$ en de bijbehorende waarden voor $Q_i$. Deze waarden van $\rho$ verkrijgt men via radiometrie met een spectroradiometer in het terrein, of door gebruik te maken van referentiepanelen met bekende spectrale eigenschappen. De stralingsenergie $Q_i$ volgt uit densiteitsmetingen via de geijkte DlogQ-curve, zodat ingeval van referentiepanelen deze voldoende groot afgebeeld moeten zijn; tenminste 0,5 mm$^2$; liefst 1,0 mm$^2$ of meer. Dit maakt het gebruik van referentiepanelen problematisch bij opnameschalen kleiner dan 1:5000 wegens de vereiste afmetingen; te meer daar het gebruik van twee panelen niet voldoende is (zie hoofdstuk 9).

Het verbeteren van de operationele waarde van multispectrale fotografie voor radiometrische toepassingen van RS vergt dan ook onderzoek op twee onderdelen:

1 Het ontwikkelen van een methodiek en een meettechniek die het gebruik van afzonderlijke kunstmatig aangebrachte referentiepanelen overbodig maakt. (Dit geldt evenzeer voor opnamen met multispectrale scanners; zie hoofdstuk 7).
2 Het verbeteren van de instelling van de camera met behulp van spectroradiometrie.
Beide verbeteringen samen komen neer op het verplaatsen van noodzakelijke referentiemetingen van de grond naar het vliegtuig. Dit betekent fysisch georiënteerd onderzoek naar de relatie object – stralingsbron – atmosfeer – sensor.

6.4.5 Geometrische aspecten

Over het algemeen zal een gebruiker geïnteresseerd zijn in verschijnselen aan het aardoppervlak. Daarbij is altijd een of andere vorm van *plaatsbepaling* in het geding en meestal ook een thematisch kartografische weergave van verkregen gegevens. Deze aspecten vormen het domein van de fotogrammetrie (geometrische basis) en van de foto-interpretatie (thematische kaart). Hoewel dit boek een hoofdstuk over 'Geometrische en plaatsbepalingsaspecten van remote sensing' bevat (hoofdstuk 16) wordt in Supplement 3 apart aandacht besteed aan *stereoscopie*. De reden is tweeërlei. In de eerste plaats vormt stereoscopie een vrijwel onmisbaar hulpmiddel bij de foto-interpretatie en de fotogrammetrie. In de tweede plaats biedt SPOT de mogelijkheid stereoscopische satellietopnamen te verkrijgen (paragraaf 7.5.4.).

## 6.5 Literatuur

1 Arnold, C.R., P.J. Rolls & J.C.J. Stewart, 1971. Applied photography. Focal Press Limited, London, England, 510 blz.
2 Brock, G.C., 1970. Image evaluation for aerial photography. Focal Press Limited, London, England, 258 blz.
3 Campbell, C.E., 1962. The optimization of photographic systems. Photogramm. Eng. 28: 446-455.
4 Clevers, J.G.P.W., 1986. Application of remote sensing to agricultural field trials. Proefschrift, Agricultural University Wageningen Papers 86-4, 227 blz.
5 Dainty, J.C. & R. Shaw, 1974. Image science. Academic Press, London, 385 blz.
6 Graham, R. & R. Read, 1986. Manual of aerial photography. Focal Press, London, England, 346 blz.
7 Gregory, R.L., 1972. Eye and brain. Weidenfeld and Nicholson, London, 235 blz.
8 Jacobsen, R.E., 1978. The manual of photography. Focal Press Limited, London, England, 628 blz.
9 Julesz, B., 1971. Foundations of cyclopean perception. University of Chicago Press, Chicago. 406 blz.

10 Kodak, 1981. Kodak filters for scientific and technical uses. Eastman Kodak Comp., Publication No. B-3, 94 blz.
11 Kodak, 1973. Understanding graininess and granularity. Eastman Kodak Comp., Publication No. F-20, 12 blz.
12 Kodak, 1971. Kodak data for aerial photography. Eastman Kodak Comp., Publication No. M-29, 80 blz.
13 Kodak, 1986. Specifications and characteristics of Kodak aerial films. Eastman Kodak Comp., Publication No. GS-57, 4 blz.
14 Kodak, 1970. Kodak aerial exposure computer. Eastman Kodak Comp., Publication No. R-10 (kartonnen rekenschijf).
15 Rock, I., 1984. Perception. Scientific American Library, published by Scientific American Books, Inc. 243 blz.
16 Slater, P.N., 1983. Photographic systems for remote sensing. In: Manual of remote sensing, ed.: Am Soc. of Photogrammetry and Remote Sensing, Falls Church, Virginia, blz. 231-291.
17 Thomas, W.Jr., 1973. SPSE Handbook of photographic science and engineering. J. Wiley & Sons, Inc., New York, 1416 blz.
18 Vernon, M.D., 1966. De psychologie van het zien. Aulaboek no. 252 (oorspronkelijke titel: The psychology of perception, Penguin Books Ltd., Harmondsworth, 1965).
19 Welch, R., 1972. Quality and applications of aerospace imagery. Photogramm. Eng. 38: 379-398.
20 Welch, R. & J. Halliday, 1973. Imaging characteristics of photogrammetric camera systems. Photogrammetria 29: 1-43.

Vrijwel alle literatuur over luchtfotografie heeft betrekking op grootformaatopnamen voor fotogrammetrische doeleinden. Het recent verschenen boek van Graham & Read (1986) vormt hierop een uitzondering.
Publicaties over beeldkwaliteit hebben zonder uitzondering betrekking op geometrische resolutie. Een goed, maar niet erg helder overzichtsartikel met theoretische achtergronden is dat van Campbell (1962). Welch (1972 en 1973) geeft vooral fotogrammetrisch georiënteerde resultaten. Het boek van Brock (1970) over beeldkwaliteit is theoretisch georiënteerd, doch ook vanuit praktisch oogpunt verhelderend.
Publicaties van Kodak zijn onmisbaar, zowel bij praktische als theoretische bezigheden.
Geïnteresseerden in multispectrale fotografie zijn aangewezen op het boek van Graham & Read en het proefschrift van Clevers (1986). Deze publicaties zijn echter erg beknopt wat betreft de specifieke problemen bij multispectrale fotografie. Voor achtergrondinformatie raadplege men dan ook het SPSE-Handbook (Thomas, 1973) en het boek van Arnold et al. (1971).
Publicaties over de praktische kanten van de luchtfoto-interpretatie zijn ruimschoots voorhanden, maar geen enkele besteedt aandacht aan het visuele waarnemings- en interpretatieproces. Voor dit laatste moet men te rade buiten het vakgebied van de remote sensing. Hoewel niet erg

Documentatie

# 7 Multispectrale aftasting

P. Binnenkade

## 7.1 Inleiding

Alhoewel *multispectrale aftasting* (multispectrale scanning, MSS) vanuit de lucht pas na de tweede wereldoorlog werd ontwikkeld (en toen nog alleen voor militaire toepassingen) kan het principe worden beschouwd als de voortzetting van een ontwikkeling die reeds in het midden van de vorige eeuw werd begonnen. Met de ontdekking van de fotografie ontstond toen al snel de behoefte om van grotere afstand waarnemingen te verrichten en dan met name vanuit de lucht. Tijdens de Frans-Duitse oorlog van 1870-71 werden voor het eerst met behulp van (bemande) ballonnen opnamen gemaakt van de vijandelijke stellingen. In de daarop volgende decennia werd dit principe verder ontwikkeld hetgeen resulteerde in de huidige stand der techniek, waarbij nu voor civiele toepassingen vele *satellieten* regelmatig *digitale, multispectrale beelden* van het aardoppervlak opnemen.
De huidige stand van multispectrale aftasting is het gevolg van een aantal inherente beperkingen van fotografie (zie ook hoofdstuk 6):
- de filmzwarting is analoog en niet exact reproduceerbaar
- de filmkwaliteit blijft niet constant in de tijd
- numerieke verwerking was tot voor kort beperkt (vergelijk echter ook paragraaf 6.3.2).

Het tegenwoordige, veelvuldige gebruik van multispectrale aftasting vanuit satellieten en vliegtuigen is voorts terug te voeren op de mogelijkheid tot:
- opname in verschillende spectraalbanden met digitale output
- opname van synoptische beelden van (grote) gebieden
- waarnemen van ontoegankelijke gebieden
- eenvoudige multitemporele opname-mogelijkheden.

Een nadeel van multispectrale aftasting kan de enorme hoeveelheid data zijn die men te verwerken krijgt, en de noodzaak tot gebruik van geavanceerde computerapparatuur.

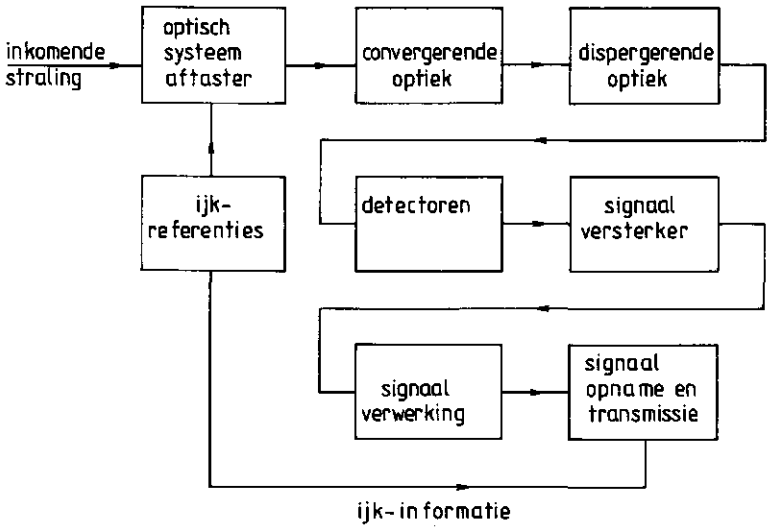
## 7.2 Instrumentatie

De behandeling van instrumentatie voor multispectrale aftasting zal worden beperkt tot *beeldvormende apparatuur*, t.w.

- mechanische, electro-optische lijnaftastende systemen (MSS)
- thermisch-infrarood lijnaftastende systemen (TIR-scanners)
- multispectrale instrumentatie gebaseerd op CCD-technieken.

Elk van de genoemde systemen bestaat uit een aantal functionele onderdelen (figuur 7-1):

- optisch gedeelte
- detectie gedeelte
- ijk-gedeelte
- elektronica
- data-opslag.




7-1 Functioneel blokdiagram voor multispectrale aftasting (bron: Swain & Davis, 1978).

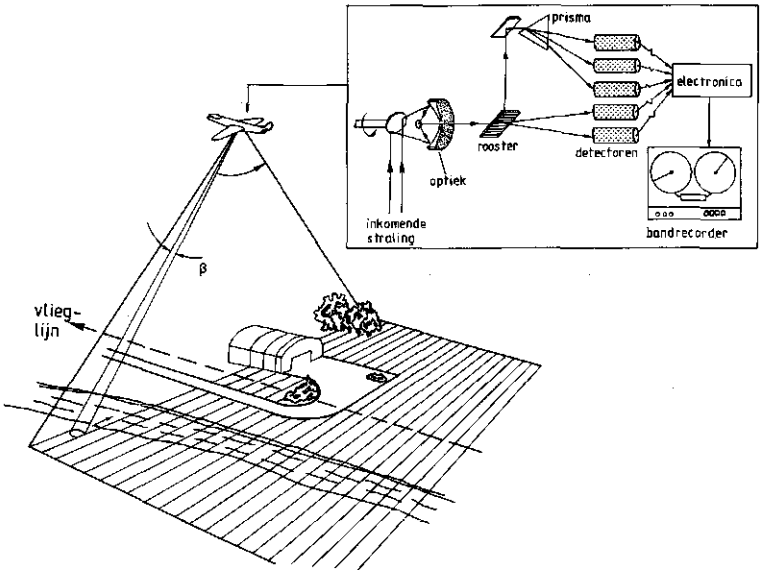
Het (stralings-) *detectie-gedeelte* van elk systeem is een bijzonder kritisch onderdeel. De spectrale componenten van de in het optisch gedeelte invallende straling komen terecht op de detectoren. Deze foton-detectoren zijn gebaseerd op het principe dat de invallende straling (fotonen) electrische ladingstransporten in de (kristal) structuur van de detector teweeg brengen. De invallende fotonen bezitten een hoeveelheid energie $Q = h.\nu$, waarbij $\nu$ de frequentie van de invallende straling is (zie paragraaf 3.1). Deze invallende stralingsenergie resulteert bij de detector in een electrisch signaal dat vervolgens wordt geregistreerd. Kenmerkend voor een detector is de respons, d.w.z. de mate waarin een detector reageert op de energie (=frequentie) van de invallende fotonen en een electronentransport bewerkstelligt. In het algemeen geldt hier dat het aan-

tal opgewekte electronen evenredig is met het aantal invallende fotonen. Verschillende detector-typen hebben een verschillende frequentie-gevoeligheid en worden derhalve gebruikt binnen verschillende delen van het spectrum (zie figuur 4-7).

Het is van groot belang te weten welke de achterliggende fysische verschijnselen zijn die resulteren in een detector-signaal van een systeem voor multispectrale aftasting (zie verder hfdst. 2 en 3).
Systemen voor multispectrale aftasting zijn *passieve* systemen, d.w.z. er wordt gebruik gemaakt van de zon als stralingsbron (zie figuur 1-1). Dit in tegenstelling tot actieve systemen, waarbij het systeem de eigen stralingsbron met zich mee draagt.

### 7.2.1 Mechanische electro-optische lijnaftastende systemen (MSS)

Mechanische, electro-optische lijnaftastende systemen (= opto-mechanische lijnaftastende systemen), ook wel multispectrale scanners (MSS) of *zwaaiscanners* genoemd, vervaardigen beelden van het aardoppervlak op een sequentiële wijze, d.w.z. het aardoppervlak wordt *lijnsgewijs*, loodrecht op de voortbewegingsrichting van het systeem afgetast.
De door het optisch systeem bepaalde momentane openingshoek ('instantaneous field of view', IFOV; zie hfdst. 4) wordt door middel van bijvoorbeeld een draaiende spiegel dwars verplaatst. De voorwaartse snelheid van het platform zorgt ervoor dat het aardoppervlak sequentiëel, lijn na lijn, wordt afgetast (figuur 7-2). Het is van belang om de rotatie-snelheid van de spiegel, de voorwaartse snelheid van het platform en de hoogte boven het aardoppervlak goed op elkaar af te stemmen (zie ook paragraaf 16.2.2). De invallende straling wordt, na de roterende spiegel te zijn gepasseerd, door middel van een dispergerend medium (prisma, rooster) opgesplitst in de gewenste *spectrale banden*.




**7-2** Principe van multispectrale scanning (bron: Lillesand & Kiefer, 1987).

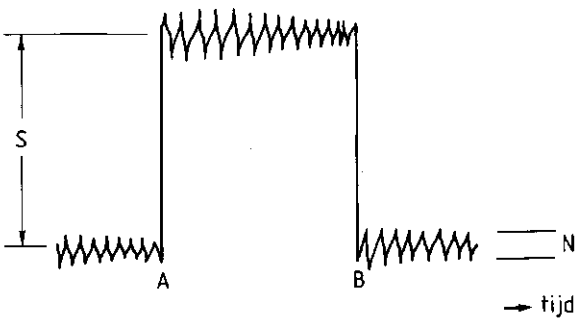
Deze componenten (banden) worden vervolgens naar een serie van detectoren geleid die de invallende stralingsenergie omzetten in een electrisch signaal. Vaak wordt gedurende het deel van de omwenteling waarin het aardoppervlak niet wordt 'gezien' een *ijk-slag* uitgevoerd door middel van bijv. 'black-bodies' of referentie-lampen.
De rotatiesnelheid van de draai-spiegel dient uiterst stabiel te zijn. Hiertoe wordt veelal op de as van de draaispiegel een electrische sensor geplaatst die terugkoppeling met de MSS-electronica en het aandrijfgedeelte van de draai-spiegel mogelijk maakt.
De van de verschillende detectoren afkomstige signalen worden voorversterkt, gefilterd, gedigitaliseerd en vastgelegd via de electronica op een electro-magnetisch medium (*magneetband*).

### 7.2.2 Thermisch-infrarood lijnaftastende systemen (TIR-scanners)

Het gebruik van *thermisch-infrarood* lijnaftastende systemen (TIR-scanners) is gebaseerd op het fysische gegeven dat elk object, met een temperatuur hoger dan 0 K, straling emitteert (zie hoofdstuk 1 en paragraaf 2.3.1). Hiermee is gelijk al duidelijk op welke punten een TIR-scanner zal afwijken van een MSS-scanner:
- geen waarneming van reflectie maar van emissie van objecten
- ander optisch materiaal voor het optisch systeem noodzakelijk
- ander detectie-principe van toepassing.

Naast deze fundamentele verschillen is de beeldvorming van het systeem gelijk aan dat van MSS (figuur 7-2).
Thermische detectoren zijn gebaseerd op een temperatuurverhoging in warmtegevoelig materiaal t.g.v. stralings-absorptie, hetgeen resulteert in een secundaire verandering in de detector die wederom electrisch kan worden vastgelegd (weerstand-verandering in bolometers, spannings-verandering in thermokoppels, etc.). De gevoeligheid van thermische detectoren is aanzienlijk lager dan die van foto-electrische detectoren en is in het algemeen geheel onafhankelijk van de golflengte van de invallende (thermische) straling. De respons-snelheid van thermische detectoren is eveneens veel lager.
Het is van belang op te merken dat de relatie tussen de fysische temperatuur van het waar te nemen object en het signaal van de detector in een TIR-scanner *indirect* is en afhankelijk is van een groot aantal factoren (zie ook de hoofdstukken 2, 3 en 20).
Detectoren in thermische systemen dienen in het algemeen *gekoeld* te worden (tot 77 K) aangezien bij 'normale' temperaturen de thermische energie van de detector zelf reeds een detector-signaal kan genereren (*thermische ruis*). Dit geldt in het bijzonder in het spectrale bereik van 1,5 micrometer en hoger. Figuur 7-3 geeft i.h.a. schematisch de invloed van ruis op een detectorsignaal weer.

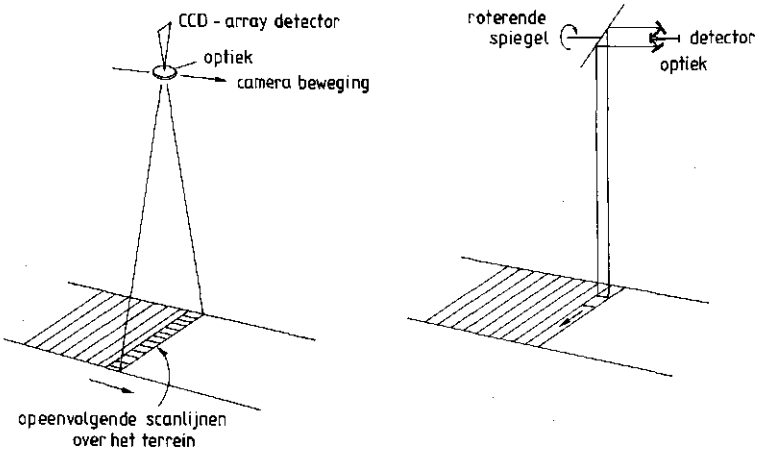
Het optische gedeelte van een TIR-scanner bestaat, in tegenstelling tot MSS-scanners, niet uit silicium-glas maar uit bijvoorbeeld alkali-halogeniden of germanium, aangezien glas niet transparant is voor golflengten groter dan ca. 2 micrometer.




**7-3** Algemene en schematische voorstelling van de signaalweergave van een bloksignaal S, waarbij tevens ruis (N) optreedt (bron: Lintz & Simonett, 1976).
**A** = signaal 'aan';
**B** = signaal 'uit'.

### 7.2.3 Multispectrale systemen gebaseerd op CCD-technieken

De in de paragrafen 7.2.1 en 7.2.2. genoemde instrumenten hebben een inherent nadeel: elke beeldlijn wordt puntsgewijs opgebouwd middels een mechanisch-bewegende optiek, namelijk de roterende of oscillerende spiegel. Dit is een kwetsbaar element en o.a. aan slijtage en stabiliteitsproblemen onderhevig.
Sedert enkele jaren is het mogelijk om in multispectrale opnamesystemen gebruik te maken van een rij ('array') van '*charge-coupled devices*' (CCD's); men spreekt in dit verband van een *arrayscanner*. Een CCD-array bestaat uit een lange rij van stralingsgevoelige silicium elementen die als ladingsdragers fungeren. De door de invallende straling opgewekte ladingen kunnen electronisch, voor het gehele CCD-array simultaan, worden uitgelezen en geregistreerd. Dit maakt elk bewegend deel overbodig en dit is als zodanig een grote verbetering. In figuur 7-4 is het principe van deze zogenaamde 'pushbroom' scantechniek vergeleken met de opto-mechanische scanning.




**7-4** Illustratie van de 'pushbroom' scantechniek in vergelijking met opto-mechanische scanning ('whiskbroom' scanning) (bron: Slater, 1980).

CCD's bestaan veelal uit meer dan 1500 elementen per array, die dan een (latente) beeldlijn vormen bestaande uit evenzoveel beeldelementen (pixels). De (zeer kleine) afmeting van een CCD-element in een CCD-

array bepaalt, te zamen met het optische stelsel, de ruimtelijke resolutie (grondresolutiecel) van het pushbroom aftastsysteem (zie ook hoofdstuk 16).

De beperkingen van CCD-instrumenten zijn
- beperkte spectrale gevoeligheid (0,3 – 1,2 micrometer) (alhoewel recente ontwikkelingen hebben geleid tot spectrale gevoeligheden tot ca. 10 µm)
- beperkt aantal elementen per array
- variërende radiometrische eigenschappen binnen een CCD-array.

Het beperkte spectrale *gevoeligheidsbereik* is in eerste instantie hinderlijk. Door het plaatsen van spectrale filters kan men echter *binnen* dit bereik een multispectraal systeem voor het zichtbare en nabij-infrarode spectrum realiseren.
Het *aantal elementen per array* kan synthetisch worden vergroot door enkele array's 'naast' elkaar te plaatsen en de optiek aan te passen.
De elementen binnen een array zijn *niet identiek*, d.w.z. dat er verschillen kunnen bestaan in (spectrale) gevoeligheid tussen de elementen. Hiertoe is het noodzakelijk dat de CCD's voor gebruik goed worden geijkt, zodat achteraf een correctie kan plaatsvinden.

## 7.3 Signaal-behandeling

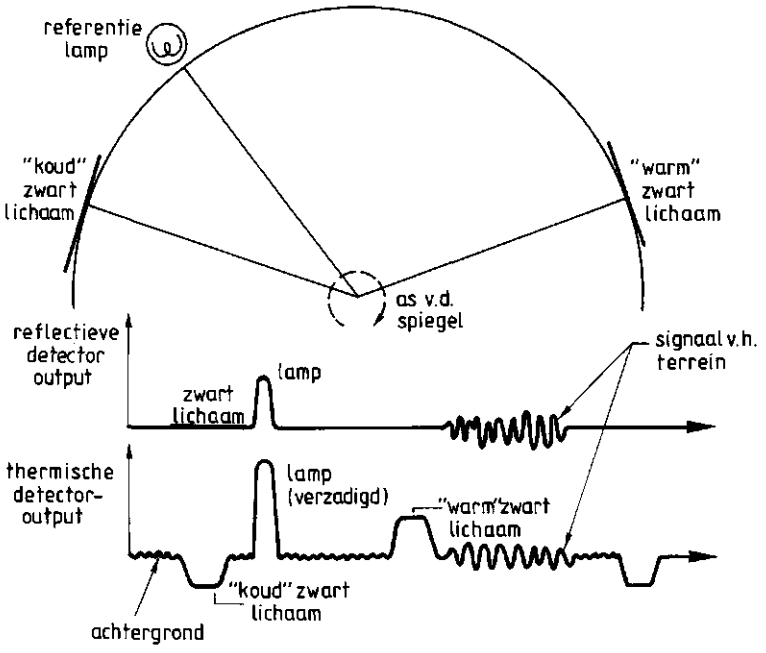
Tussen de detector-uitgang en de data-opslag op bijvoorbeeld magneetband worden nog bewerkingen op het signaal uitgevoerd, c.q. worden nog gegevens aan het geregistreerde signaal toegevoegd.

### 7.3.1 IJking

In het algemeen is het niet zinvol om de gedetecteerde en daarna geregistreerde gegevens zonder meer verder te verwerken. De instabiliteit van de detector in de tijd, de wens naar kwantificeerbare informatie en geijkte gegevens leiden ertoe dat referentie-gegevens voor (latere) *interne ijking* aan het opgenomen signaal worden toegevoegd. Hiertoe wordt gebruikt gemaakt van de regelmatige meting van de (in paragraaf 7.2.1) genoemde referentiebronnen, namelijk:
- voor de reflectieve spectraalbanden: een zwart lichaam en een geijkte lamp ten behoeve van het nulniveau (donkerstroom) resp. de hoogste referentie-waarden.
- voor de emissieve spectraalbanden: een 'koud' en een 'warm' zwart lichaam ten behoeve van de laagste resp. hoogste referentiewaarde (figuur 7-5).

### 7.3.2 AD-conversie

Het opgenomen (analoge) signaal, veelal het verloop van een electrische spanning in de tijd, wordt in het electronische gedeelte van het instrument *gedigitaliseerd* (zie figuur 4-10).
Het analoge signaal wordt hier bemonsterd met een voldoende hoge frequentie en gekwantiseerd in bijvoorbeeld 256 niveaus (8 bits).




**7-5** Referentiebronnen en signalen bij MSS en TIRS
(bron: Swain & Davis, 1978).

Bemonstering en kwantisering dient dusdanig te geschieden dat het oorspronkelijke signaal zo goed mogelijk benaderd wordt en later numeriek verder verwerkt kan worden in een digitaal beeldverwerkingssysteem, ter extractie van de gewenste informatie (zie ook de overwegingen in paragraaf 4.3).

7.3.3 Geometrische aspecten

Geen enkel remote sensing data-acquisitiesysteem is in staat om zonder verdere correcties een getrouwe weergave van de *geometrische* werkelijkheid aan het aardoppervlak te leveren. De fouten-bronnen zijn onder meer:

- opname-principe
- mechanische onvolkomenheden
- (panoramische) vertekeningen (o.a. t.g.v. aardkromming)
- schaalfouten
- bewegings-verstoringen gedurende de opname.

Deze geometrische vervormingen zijn in het algemeen bekend en kunnen worden gecorrigeerd, mits tijdens de opname aanvullende opname- en bewegingsparameters worden geregistreerd (zie hiertoe hoofdstuk 16).

## 7.4 Bijzondere problemen

7.4.1 Atmosfeer

Tussen de sensor en het object bevindt zich de atmosfeer. Deze is niet homogeen en (qua samenstelling) veranderlijk in plaats en tijd. Dit is een beperking van de multispectrale passieve meetmethode. Bij het ontwerp van het systeem, de specificatie van het opnametijdstip en de verdere

verwerking van de opgenomen gegevens dient hiermede rekening gehouden te worden.

Analoog aan de situatie bij luchtfotografie (paragraaf 6.4.2.2) kan voor de radiantie gemeten bij de sensor ($L_s$) de volgende uitdrukking gegeven worden:

$$L_s = \tau_a \cdot L_g + L_a \tag{7.1}$$

waarin:
$L_s$ = radiantie inkomend in de sensor ($Wm^{-2}sr^{-1}$)
$\tau_a$ = transmissiefactor van de atmosfeer
$L_g$ = radiantie afkomstig van het object ($Wm^{-2}sr^{-1}$)
$L_a$ = radiantie van de atmosfeer ('path radiance') ($Wm^{-2}sr^{-1}$).

Voor de radiantie afkomstig van het object geldt verder:

$$L_g = \rho \cdot E/\pi \tag{7.2}$$

$\rho$ = richtingsafhankelijke reflectiefactor van het object
E = bestralingssterkte van het object ($Wm^{-2}$).

Eventuele mogelijkheden voor *atmosferische correctie* worden in de volgende paragraaf beschreven.

### 7.4.2 Koppeling met grond-waarnemingen

De optimale ijking (in absolute zin) kan pas worden bereikt indien tijdens de opname (maar tenminste op de dag van de opname) op de grond, nabij het waar te nemen object, additionele waarnemingen worden verricht, zoals:
- toestand van het object (steekproeven)
- bepaling van de momentane stralingsstroom van de zon en van atmosferische parameters
- eventueel het plaatsen van referentiepanelen voor *externe ijking* (vooral indien de stralingsstroom van de zon en de atmosferische invloed niet bepaald worden, vergelijk paragraaf 9.3).

### 7.4.3 Fysische betekenis

Een niet te onderschatten activiteit bij het gebruik van een remote sensing-instrument is een nauwkeurige analyse van de achterliggende fysische verschijnselen:
a *Welke* verschijnselen treden op aan het object?
b *Wat* wordt door de sensor gemeten?
c *Wat* wordt op de magneetband geregistreerd?
d *Welke* parameter is voor de onderzoeker van belang?
e *Hoe* kan informatie betreffende d. uit a., b. en c. worden verkregen?
Deze verschillende vragen zullen verderop in dit boek aan de orde komen.

## 7.5 Multispectrale opnamesystemen

In deze paragraaf zal alleen aandacht besteed worden aan die systemen die zijn ontwikkeld voor landobservatie. Speciale systemen ontwikkeld voor zee-observatie of voor meteorologische toepassingen blijven buiten beschouwing. Vermelde systemen worden min of meer veelvuldig gebruikt en zijn beschikbaar in Nederland. In Supplement 5 wordt ten behoeve van de afweging van sensorsystemen een overzicht gegeven van de specificaties van verschillende RS-opname-instrumentaties in het optische venster.

### 7.5.1 Daedalus DS-1260 multispectrale scanner

Deze voor gebruik vanuit een vliegtuig ontwikkelde scanner is gebaseerd op het klassieke principe van de opto-mechanische aftasting (paragraaf 7.2.1). De beschikbare spectrale banden van de *Daedalus-scanner* staan vermeld in tabel 7.1.

Tabel 7.1 Specificaties van de Daedalus-banden

| band | golflengte-interval (µm) |
|---|---|
| 1 | 0,38 – 0,42 |
| 2 | 0,42 – 0,45 |
| 3 | 0,45 – 0,50 |
| 4 | 0,50 – 0,55 |
| 5 | 0,55 – 0,60 |
| 6 | 0,60 – 0,65 |
| 7 | 0,65 – 0,69 |
| 8 | 0,70 – 0,79 |
| 9 | 0,80 – 0,89 |
| 10 | 0,92 – 1,10 |
| 11 óf | 3,0 – 5,5 |
| 12 | 8,0 – 14,0 |

Per vlucht kan een offset en een versterkingsfactor ('gain') ingesteld worden om het dynamische bereik (zie paragraaf 3.4 en 4.3) aan het object en aan de omstandigheden aan te passen. Via een interne ijking kan elke digitale pixelwaarde (paragraaf 4.3) uiteindelijk weer omgerekend worden tot een radiantie-waarde ($L_s$ in vergelijking 7.1) voor band 1 t/m 10 of tot een 'schijnbare' temperatuur (band 11 en 12) (zie hiertoe ook hoofdstuk 20).

### 7.5.2 Landsat-MSS

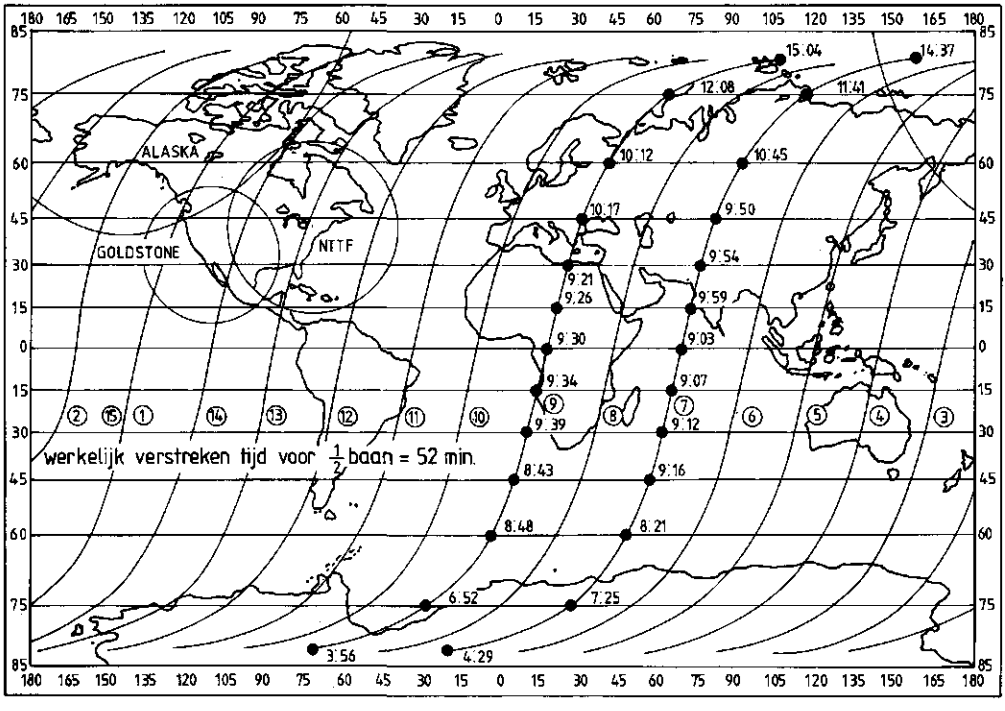
In het kader van het satelliet-programma van de NASA in de VS is vanaf 1972 een serie satellieten gelanceerd voor de aardobservatie, de zogenaamde '*Landsat-satellieten*'. Elk van deze satellieten is enkele jaren operationeel. Met een interval van 2-4 jaren wordt een nieuwe satelliet gelanceerd ter vervanging van de vorige. Allereerst waren dat de Landsat-1 (1972), Landsat-2 (1975) en Landsat-3 (1978). In 1982 is een

nieuwe generatie landobservatie-satellieten gestart met de lancering van Landsat-4, gevolgd door Landsat-5 in 1984 (zie ook paragraaf 7.5.3). De spectrale banden van de MSS in deze satellieten staan vermeld in tabel 7.2.

Tabel 7.2 Specificaties van de banden van de Landsat-MSS

| band | golflengte-interval (μm) |
|---|---|
| 4 | 0,5 – 0,6 |
| 5 | 0,6 – 0,7 |
| 6 | 0,7 – 0,8 |
| 7 | 0,8 – 1,1 |

De Landsat beschrijft een baan die *synchroon met de zon* loopt (redelijk constante bestralingssterkte) op een hoogte van ongeveer 913 km voor Landsat 1, 2 en 3 en ongeveer 705 km voor Landsat 4 en 5. Elke 18 dagen (16 dagen voor Landsat 4 en 5) wordt in principe hetzelfde deel van het aardoppervlak opnieuw afgetast met een strookbreedte van 185 km (figuur 7-6). Het nominale, momentane gezichtsveld op het




7-6 Typische dagelijkse Landsat-baan van Landsat-1, 2, 3 over het aardoppervlak, waarbij verschillen in lokale tijd binnen één omwenteling van de satelliet zijn aangegeven
(bron: Manual of Remote sensing, 1983).

aardoppervlak, het zogenaamde *resolutie-element*, in elk der vier spectrale banden bedraagt 79 bij 79 m. Na voorbewerking door het Landsat-grondstation wordt een *beeldelement* (pixel) afgeleverd corresponderend met terreinafmetingen van 56 m (in de aftastrichting) bij 79 m (in de voortbewegingsrichting) bij Landsat-1, 2 en 3 resp. 57 m bij 83 m bij Landsat-4, 5. Om de andere terugslag van de oscillerende scanspiegel wordt het detectorsysteem afgesloten voor straling vanaf de aarde en worden de detectoren verlicht door een gecontroleerde interne ijk-bron. Deze meetwaarden worden gebruikt voor radiometrische correcties voor de individuele detectoren. De analoge detectorsignalen worden gedigitaliseerd in *zes bits woorden*.

7.5.3 Landsat-TM

De door de VS ontwikkelde tweede generatie multispectrale scanner is afgeleid uit de Landsat-MSS, waarbij een *hoger ruimtelijk scheidend vermogen* is bereikt in combinatie met een *groter spectraal oplossend vermogen*. Deze eveneens opto-mechanische scanner staat bekend onder de naam '*Thematic Mapper*' (TM). Zowel het oplossend vermogen als de keuze van de spectrale banden zijn voornamelijk afgestemd op het gebruik voor landbouwkundige toepassingen. De TM is in combinatie met een MSS ondergebracht in de Landsat 4 en 5. De spectrale banden van de TM staan vermeld in tabel 7.3.

Tabel 7.3 Specificaties van de banden van de Landsat-TM

| band | golflengte-interval (μm) |
|---|---|
| 1 | 0,45 – 0,52 |
| 2 | 0,52 – 0,60 |
| 3 | 0,63 – 0,69 |
| 4 | 0,76 – 0,90 |
| 5 | 1,55 – 1,75 |
| 6 | 10,4 – 12,5 |
| 7 | 2,08 – 2,35 |

Het resolutie-element, tevens pixel, van de TM bedraagt 30 m bij 30 m (m.u.v. band 6: pixelgrootte 120 bij 120 m). Bij TM worden de analoge detectorsignalen gedigitaliseerd in *acht bits* woorden (256 niveaus i.p.v. 64 niveaus bij Landsat-MSS).

7.5.4 SPOT

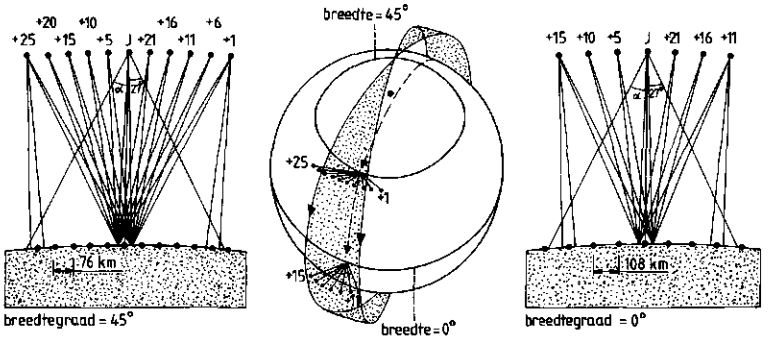
Frankrijk heeft een satellietsysteem ontwikkeld onder de naam: 'Système Probatoire d'Observation de la Terre' (*SPOT*). SPOT-1 is begin 1986 gelanceerd. Deze satelliet bevat twee 'high resolution visible' (HRV) sensors die hetzij *multispectraal* ('XS-mode') hetzij *panchromatisch* ('P-mode') kunnen werken. Hierbij berust het principe evenwel niet op een opto-mechanische scanning, maar op het zogenaamde '*pushbroom*'

principe (zie paragraaf 7.2.3). Het voordeel van dit principe is dat naast de afwezigheid van de op zich kwetsbare mechanische scancomponenten de *integratietijd* per detectorelement vele malen *groter* kan worden, waardoor een hoger ruimtelijk scheidend vermogen verkregen kan worden. Ook de geometrische beeldkwaliteit wordt verbeterd als gevolg van de betere reproduceerbaarheid en het ontbreken van beeldfouten die inherent zijn aan mechanische scanning. De spectrale banden van de SPOT staan vermeld in tabel 7.4.

Tabel 7.4 Specificaties van de banden van SPOT

| band | golflengte-interval (μm) |
|---|---|
| 1 | 0,50 – 0,59 |
| 2 | 0,61 – 0,68 |
| 3 | 0,79 – 0,89 |
| panchromatisch | 0,51 – 0,73 |

Het HRV-instrument is te gebruiken in een multispectrale stand met drie banden (1, 2 en 3) met elk 20 m resolutie of in een panchromatische stand met 10 m resolutie. De zogenaamde 'temporele resolutie' van SPOT kan worden verhoogd door gebruik te maken van '*off-nadir viewing*' van beide HRV's. Het concept is weergegeven in figuur 7-7. Weerszijden van de positie op dag J zijn de satelliet-posities op hiernavolgende dagen aangegeven waarop eenzelfde baan op het aardoppervlak door zijwaarts richten van de optische as van de HRV's met behulp van een instelbare spiegel waargenomen kan worden. Een beperkte mogelijkheid van het verkrijgen van stereo-opnamen ontstaat door toepassing van dit principe. (Voor het algemene begrip van stereoscopie, zie Supplement 3.)




7-7 Herhaalde observatie vanuit SPOT door gebruik van de 'off-nadir viewing' mogelijkheid (bron: CNES, 1982).

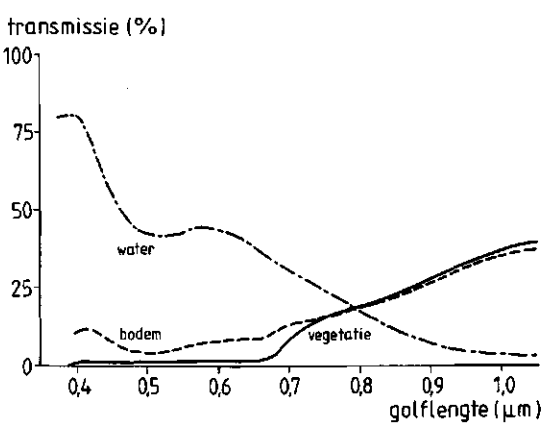
### 7.5.5 Caesar-scanner

In Nederland is sinds kort een experimentele CCD-scanner voor gebruik vanuit een vliegtuig beschikbaar. Deze zogenaamde *Caesar-scanner* (CAESAR = CCD Airborne Experimental Scanner for Applications in Remote Sensing) is gebaseerd op CCD detector-arrays ('charge-coupled devices', zie paragraaf 7.2.3) die geplaatst zijn in het brandpuntsvlak van een camerasysteem. Aangezien het instrument zowel voor land- als voor zee-toepassingen gebruikt wordt is naar aanleiding van de gebruikerswensen gekozen voor een modulaire opzet van het systeem. De spectrale banden voor landobservatie staan vermeld in tabel 7.5.

Tabel 7.5 Specificaties van de banden van de Caesar-scanner voor landobservatie

| band | golflengte-interval (μm) |
|---|---|
| 1 | 0,535 – 0,565 |
| 2 | 0,655 – 0,685 |
| 3 | 0,845 – 0,895 |

Vanwege de geringe afmetingen van de CCD-elementen (13 μm) en door gebruik te maken van een objectief met een brandpuntsafstand van 50 mm wordt een hoogste *ruimtelijk scheidend vermogen* verkegen van 50 cm bij een vlieghoogte van 2 km (minimale vlieghoogte in de praktijk). Voor landtoepassingen is de Caesar-scanner uitgerust met een module waarmee in dezelfde banden (tabel 7.5) onder een schuine hoek voorwaarts (52°) gemeten kan worden ('*forward mode*'). Hierdoor kan naast de multispectrale informatie ook informatie worden verkregen met betrekking tot het niet-ideaal diffuus verstrooiend gedrag van objecten. Deze informatie met betrekking tot verschillen in ruimtelijke verstrooiing kan gebruikt worden om het multispectraal discriminerend vermogen voor verschillende gewassen te vergroten.




**7-8** Absolute transmissiecurves voor de correlatiefilters van de Caesar-scanner (bron: Pouwels, 1987).

Een tweede optie, die met Caesar mogelijk is, is het meten via zogenaamde *spectrale correlatiefilters* ('Mulder-filters'), waarvan de transmissiecurves in figuur 7-8 zijn gegeven. Deze curves staan in verband met de gemiddelde reflectiecurves van water, bodem en vegetatie.
Pouwels (1987) geeft een uitvoerige beschrijving van de Caesar-scanner.

## 7.6 Literatuur


1 CNES, 1982. SPOT satellite-based remote sensing system. Centre National d'Etudes Spatiales, Toulouse,16 blz.

2 Lillesand, T.M. & R.W. Kiefer, 1987. Remote sensing and image interpretation. Second edition. J. Wiley & Sons, Inc., New York, 721 blz.

3 Lintz, J. & D.S. Simonett, 1976. Remote sensing of environment. Addison-Wesley Publ. Comp., Reading, Massachusetts, 694 blz.

4 Manual of Remote Sensing, 1983. Second edition. (R.N. Colwell, ed.), American Society of Photogrammetry, Falls Church, Virginia.

5 Pouwels, H., 1987. User guide to CAESAR. BCRS-rapport no: BCRS-87-04, NLR memorandum IE-87-012U, 26 blz.

6 Slater, P.N., 1980. Remote sensing: optics and optical systems. Addison-Wesley Publ. Comp., Reading, Massachusetts, 575 blz.

7 Swain, P.H. & S.M. Davis, 1978. Remote sensing: The quantitative approach. McGraw-Hill, New York, 396 blz.

Documentatie

# 8 Remote sensing in het microgolfgebied

L. Krul

## 8.1 Inleiding

Ook in het *microgolfgebied* kan gebruik worden gemaakt van door objecten, als gevolg van hun fysische temperatuur, geëmitteerde straling. Daarbij wordt echter, in vergelijking tot het optische gebied, een afwijkende terminologie gebruikt. Zo wordt bijvoorbeeld de radiantie (L) in vergelijking (2.1) in de microgolf-terminologie aangeduid met de helderheid ('brightness', B). In tabel 8.1 zijn de belangrijkste grootheden vermeld die in de microgolfradiometrie gebruikt worden en die afwijkend zijn van die in de optische radiometrie (vergelijk ook paragraaf 3.3 en Ulaby et al., 1981, blz. 187).

Tabel 8.1 Vergelijk tussen microgolf- en optische terminologie voor radiometrische grootheden. Deze grootheden kunnen ook gedefiniëerd worden als spectrale grootheden, d.w.z. uitgedrukt per eenheid bandbreedte (μm of Hz).

| microgolf-terminologie | symbool | optische terminologie | symbool | eenheid |
|---|---|---|---|---|
| vermogen | P | stralingsstroom | $\Phi_e$, P | W |
| vermogensdichtheid | S | bestralingsdichtheid | E | $Wm^{-2}$ |
| helderheid | B | radiantie | L | $Wm^{-2}sr^{-1}$ |

Omdat het moeilijk is bij deze thermische microgolfobservatie de, voor Nederland, gewenste geometrische resolutie te realiseren wordt hier uitsluitend gewerkt met waarnemingstechnieken die gebaseerd zijn op het *radarprincipe*. Daarbij wordt het waar te nemen object bestraald door een bron en wordt de straling gemeten die door het object in de richting van de radar wordt gereflecteerd (hoofdstuk 1).

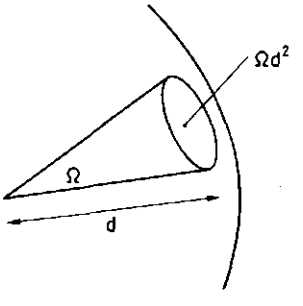
De radarbron bestaat feitelijk uit twee delen: de *zender* waarin straling van de gewenste golflengte wordt opgewekt en de *antenne* waarmee deze straling ruimtelijk wordt verdeeld. De door het object gereflecteerde straling wordt eerst opgevangen door een antenne en vervolgens gedetecteerd in de *radarontvanger*. Dikwijls wordt bij het zenden en het ontvangen gebruik gemaakt van één en dezelfde antenne. De zend- en ontvangfuncties van de radar komen in combinatie voor in de zgn. *radarformule*. Deze formule wordt in paragraaf 8.2 afgeleid voor een object met verwaarloosbare afmetingen, het zogenaamde *puntdoel*. Door een deel van het aardoppervlak op te vatten als een verzameling puntdoelen kan het ontstaan van de *radarecho bij aardobservatie* op aanschouwelijke wijze worden toegelicht (paragraaf 8.3). Uit deze simulaties kunnen ook conclusies worden getrokken m.b.t. de mogelijkheden en beperkingen van het werken met radardata.
De in tijdvolgorde uit de radarontvanger komende echosignalen worden zodanig opgeslagen dat ze later eenvoudig op een plat vlak kunnen worden afgebeeld. De principes van deze *beeldvormende radarsystemen* zullen worden behandeld in paragraaf 8.4.

## 8.2 Grondbeginselen van de radarobservatie

De *bestralingsfunctie* van de zendantenne kan het eenvoudigst worden geïntroduceerd door uit te gaan van het concept van de *isotrope straler*. Een isotrope straler verdeelt het toegevoerde zendvermogen $P_z$ gelijkmatig over het oppervlak van een bol met de straler als middelpunt. Is de straal van de bol gelijk aan d dan wordt in elk punt van het boloppervlak de *vermogensdichtheid* ($S_{is}$) gelijk aan:

$$S_{is} = P_z/(4\pi d^2) \quad \text{in } Wm^{-2} \tag{8.1}$$

Praktisch toegepaste antennes onderscheiden zich van de isotrope straler in die zin dat de ruimtehoek waarover het vermogen verdeeld wordt beperkt is. In verband hiermee introduceren we in figuur 8-1, naast de isotrope antenne, een *ideale zendantenne* die het zendvermogen zo verdeelt dat in elk punt van het met de beperkte ruimtehoek $\Omega$ corresponderende deeloppervlak van de bol een gelijke vermogensdichtheid ontstaat terwijl in alle andere punten van de bol de




8-1 Ideale zendantenne met ruimtelijke openingshoek $\Omega$.

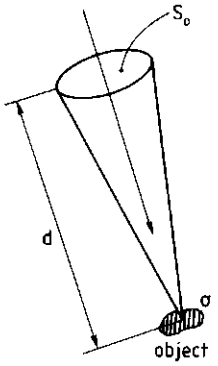
vermogensdichtheid gelijk aan nul is (gebundelde vermogensdichtheid). Bij een zendvermogen $P_z$ is de vermogensdichtheid binnen de ruimtehoek $\Omega$ gelijk aan:

$$S = P_z/(\Omega d^2) \tag{8.2}$$

Aangezien $S > S_{is}$ kan aan deze tweede antenne, binnen de ruimtehoek $\Omega$, een van de richting onafhankelijke *versterking* ('gain') worden toegekend volgens:

$$G = \frac{S}{S_{is}} = \frac{P_z}{\Omega d^2} * \frac{4\pi d^2}{P_z} = \frac{4\pi}{\Omega} \tag{8.3}$$

Het praktisch gebruik van radar leidt tot de behoefte om de, door verschillende objecten opgewekte, *echosignalen* (radarecho of radarreflectie) met elkaar te vergelijken. Voor deze vergelijking dienen we te beschikken over een goed gedefinieerde maat voor de sterkte van een echo. Deze maat is de zgn. *radardoorsnede* van het object. Bij conventionele radartoepassingen kunnen de objecten (vliegtuigen, schepen, auto's) meestal worden omschreven als *puntdoelen*, d.w.z. dat de afmetingen van het object klein zijn t.o.v. het door de antenne bestreken gebied (zie echter ook paragraaf 8.3). Om voor dat geval de radardoorsnede te kunnen definiëren gaan we uit van een zendvermogen $P_z$, toegevoerd aan een antenne met gain G. Op een afstand d wordt hierdoor een vermogensdichtheid $GP_z/(4\pi d^2)$ geproduceerd; op deze plaats denken we ons het object aangebracht (figuur 8-2).




8-2 Definitie van de radardoorsnede σ van een (puntvormig) object.

De *radardoorsnede* van het object is dan een denkbeeldig oppervlak σ van zodanige grootte dat het vermogen $\sigma GP_z/(4\pi d^2)$ als dit isotroop over de ruimte wordt verdeeld, ter plaatse van de ontvangantenne dezelfde vermogensdichtheid $S_o$ geeft als die welke daar in werkelijkheid, als gevolg van de aanwezigheid van het object, optreedt. Dus:

$$S_o = \frac{GP_z}{4\pi d^2} * \frac{\sigma}{4\pi d^2} \tag{8.4}$$

Deze vermogensdichtheid $S_o$ ($Wm^{-2}$) geeft aanleiding tot een ontvangen vermogen $P_o$ (W). Blijkbaar moet de ontvangfunctie van een antenne dus formeel worden beschreven door aan de antenne een opvangend oppervlak A ($m^2$) toe te kennen van zodanige grootte dat $P_o = AS_o$. Tenslotte wordt dan de *radarformule*:

$$P_o = \frac{AGP_z}{4\pi d^2} * \frac{\sigma}{4\pi d^2} \tag{8.5}$$

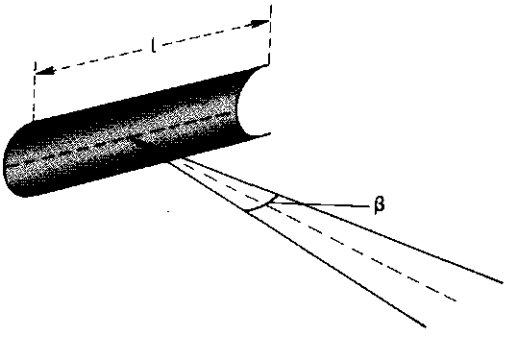
In de *antennetheorie* (zie Ulaby et al., 1981, hoofdstuk 3) wordt bewezen dat er voor antennes die zowel voor zenden als ontvangen worden gebruikt, een vaste relatie bestaat tussen de versterking G in de zendsituatie en het opvangend oppervlak A in de ontvangsituatie. Deze relatie luidt:

$$G = 4\pi A/\lambda^2 \tag{8.6}$$

als $\lambda$ de gebruikte golflengte is. Aangezien we in vgl. (8.3) reeds vonden dat $G = 4\pi/\Omega$ is er blijkbaar ook een vaste relatie tussen het opvangend oppervlak en de ruimtehoek nl. $A = \lambda^2/\Omega$. Deze betrekking is overigens beter bekend in de lineaire vorm:

$$l \sim \lambda/\beta$$

waarbij, in een dwarsdoorsnede, l de antenne-afmeting is en $\beta$ de bijbehorende *openingshoek* in radialen (paragraaf 3.4 en figuur 8-3).




8-3 Illustratie van de openingshoek van een antenne.

Substitueren we relatie (8.6) in de uitdrukking voor $P_o$ dan ontstaat de *radarvergelijking voor een puntdoel*:

$$P_o = \frac{G^2\lambda^2 P_z}{(4\pi)^3 d^4} * \sigma \tag{8.8}$$

Oplossen van $\sigma$ uit deze vergelijking leert dat de radardoorsnede van het object recht evenredig is met het ontvangen vermogen:

$$\sigma = (4\pi)^3 * \frac{d^4}{\lambda^2 G^2 P_z} * P_o \qquad (8.9)$$

Blijkbaar kan de σ van het object worden bepaald door meting van $P_o$ mits de *systeemparameters* λ, G en $P_z$ alsmede de afstand d bekend zijn. De systeemparameters worden meestal geëlimineerd door het uitvoeren van een *ijkmeting*. Hiervoor gaan we uit van een (puntvormig) object met een bekende radardoorsnede $\sigma_y$, geplaatst op een afstand $d_y$ van de radar. Het (puntvormige) object met de onbekende radardoorsnede $\sigma_x$ bevindt zich op de afstand $d_x$. Tijdens de ijking mogen λ, G en $P_z$ uiteraard niet worden veranderd. De meting aan het object met radardoorsnede $\sigma_x$ levert een ontvangen vermogen:

$$P_{o,x} = \frac{G^2 \lambda^2 P_z}{(4\pi)^3 d_x^4} * \sigma_x \qquad (8.10)$$

terwijl voor de ijkmeting:

$$P_{o,y} = \frac{G^2 \lambda^2 P_z}{(4\pi)^3 d_y^4} * \sigma_y \qquad (8.11)$$

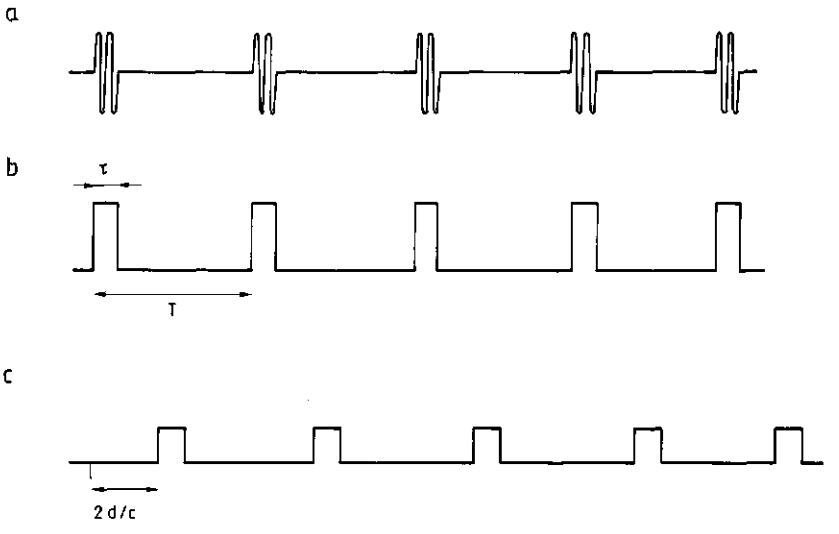
Combineren we beide metingen dan komen we tenslotte tot de relatie:

$$\sigma_x = \{P_{o,x} d_x^4 / P_{o,y} d_y^4\} \sigma_y \qquad (8.12)$$

Meestal wordt de radardoorsnede uitgedrukt in de logaritmische *decibelmaat* (dB) volgens:

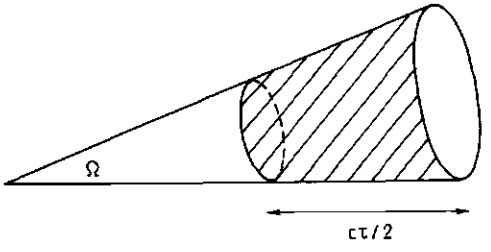
$$10 * \log(\sigma_x/\sigma_y) = \alpha \, \mathrm{dB} \qquad (8.13)$$

Om de nog onbekende afstand d in vergelijking (8.8) te kunnen bepalen moet aan het, voor de bestraling van het object, gebruikte signaal een speciale vorm worden gegeven. Het daarvoor gebruikte proces wordt *modulatie* genoemd. In eenvoudigste vorm bestaat deze modulatie daaruit dat de, in de zender opgewekte, sinusvormige trilling telkens slechts voor korte tijd wordt uitgezonden. Het zendsignaal bestaat dan uit een periodieke impulsreeks (figuur 8-4a).
Meestal wordt eenvoudigheidshalve (zoals in figuur 8-4b) alleen het aan- en uitschakelsignaal weergegeven. Figuur 8-4c geeft dan tenslotte het daarmee corresponderende echosignaal dat ontstaat doordat het object een deel van het opvallende vermogen reflecteert in de richting van de radar. Dit echosignaal is kleiner dan het zendsignaal en bovendien later in de tijd.
Van elke uitgezonden zendimpuls wordt door de radarontvanger één echo-impuls geregistreerd. Aangezien het signaal de afstand d tussen radar en object in totaal tweemaal aflegt is de echo t.o.v. de zendimpuls een tijd 2d/c vertraagd waarbij c (= $3.10^8$ $ms^{-1}$) de lichtsnelheid voorstelt. De afstand d wordt dan bepaald door de meting van het tijdverschil t tussen een uitgezonden impuls en de bij deze impuls behorende echo: d = ct/2.




8-4
a Zendsignaal van gemoduleerde radar
b Schakelfunctie van het zendsignaal, pulsduur τ, periodeduur T
c Schakelfunctie van het ontvangen echosignaal.

Een nadere beschouwing van figuur 8-4c leert dat twee objecten die zich vanuit de radar gezien in dezelfde richting bevinden pas afzonderlijk worden waargenomen als het tijdverschil tussen de van deze objecten afkomstige echosignalen minsten gelijk is aan de *impulsduur* τ. Dit verschil correspondeert met een afstandverschil $\Delta d = c\tau/2$. Deze $\Delta d$ wordt de *afstandsresolutie* van het systeem genoemd; is τ bijvoorbeeld 1 μs dan wordt $\Delta d = 150$ m. In combinatie met de ruimtehoek Ω van de antenne bepaalt de afstandsresolutie zoals in figuur 8-5 is aangegeven een *ruimtelijke resolutiecel*. De echo's van alle binnen dit volume gelegen puntdoelen zijn dus niet afzonderlijk waar te nemen.




8-5 Ruimtelijke resolutiecel bepaald door antenne-opening Ω en afstandsresolutie cτ/2.

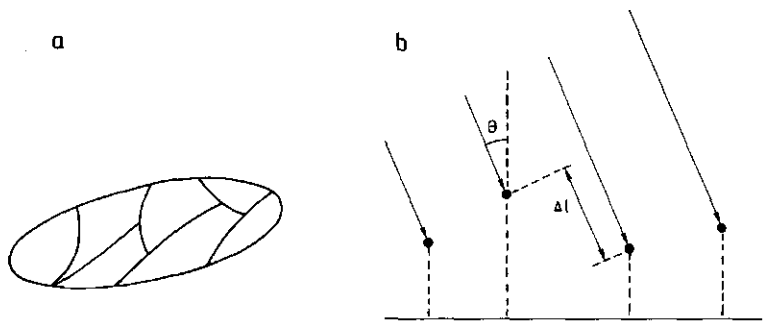
Bij een *ideaal systeem* is de minimale meetafstand gelijk aan de afstandsresolutie cτ/2. Omdat er in een praktisch systeem echter altijd '*overspraak*' is tussen zender en ontvanger – hetzij direct via inwendige koppelingen in de apparatuur, hetzij indirect via parasitaire reflecties in de naaste omgeving van de radar – is in werkelijkheid de minimale afstand altijd groter. De maximale afstand die op ondubbelzinnige wijze kan worden gemeten wordt, zoals een eenvoudige overweging leert, bepaald door het tijdsinterval tussen twee impulsen. Omdat in de praktijk $\tau << T$ (figuur 8-4b) is de maximale afstand praktisch gelijk

aan cT/2. Een radar met een *pulsherhalingsfrequentie* van 500 Hz (T = 2 ms) heeft, afgezien van eventuele beperkingen die samenhangen met de grootte van het zendvermogen, een afstandsbereik van 300 km; bij 200 Hz wordt dit 750 km.

## 8.3 Aardobservatie gebaseerd op het gebruik van radar

Met deze korte inleiding over de grondbeginselen van het conventionele radargebruik is tevens een basis gelegd voor het gebruik van radar voor *aardobservatie*. Volgens de thans geldende inzichten kunnen we het echosignaal dat correspondeert met een bepaald gedeelte van het aardoppervlak nl. beschouwen alsof het afkomstig is van een *verzameling puntdoelen*. Feitelijk neemt elk puntdoel de plaats in van een daaromheen liggend gebiedje. Het aantal puntdoelen in de verzameling wordt naar boven begrensd door de grootte van het gebied dat gelijktijdig wordt waargenomen. De dimensies van deze zgn. *resolutiecel* worden, zoals in de volgende paragraaf wordt beschreven bepaald door de ontwerpparameters van het radarsysteem. Binnen deze begrenzing zijn het *aantal* puntdoelen en de *distributie* ervan over de resolutiecel nog gerelateerd aan de eigenschappen van het object. Het blijkt echter in de praktijk moeilijk om deze relaties expliciet te maken.

De juistheid van de puntdoelenhypothese kan o.a. worden onderzocht door de echosignalen afkomstig van natuurlijke objecten te vergelijken met gesimuleerde signalen afkomstig van een verzameling puntdoelen. Na een korte toelichting op de principes van dit *simulatieproces* zullen enige resultaten worden besproken.
In figuur 8-6a is een denkbeeldige resolutiecel weergegeven met een mogelijke onderverdeling in een aantal gebiedjes die corresponderen met evenzoveel puntdoelen. Meestal zullen niet alle puntdoelen in een plat vlak liggen. In figuur 8-6b is dit in beeld gebracht door het tekenen van een 'doorsnede' van een resolutiecel.
De radarzender zorgt voor de bestraling van de verschillende puntdoelen die elk voor zich een bijdrage leveren aan het ontvangen signaal. Het verschil met de in de vorige paragraaf beschreven situatie is dat nu rekening gehouden moet worden met het feit dat de door het signaal



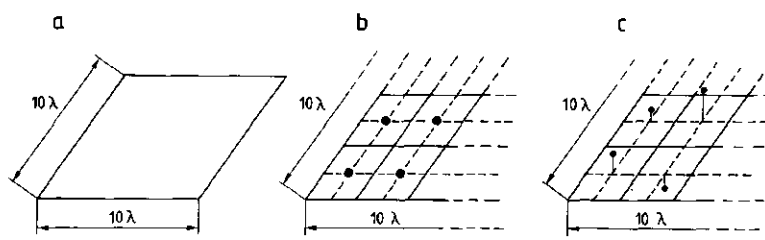

**8-6a** Verdeling van een resolutiecel in samenhangende gebiedjes
**b** 'Doorsnede' van een resolutiecel.

afgelegde afstand voor alle puntdoelen verschillend is. Het afstandsverschil tussen twee willekeurige puntdoelen is, bij een invalshoek θ voor de radarstraling, aangegeven met Δl. Meestal worden deze afstandsverschillen echter omgerekend naar zgn. *faseverschillen* Δφ:

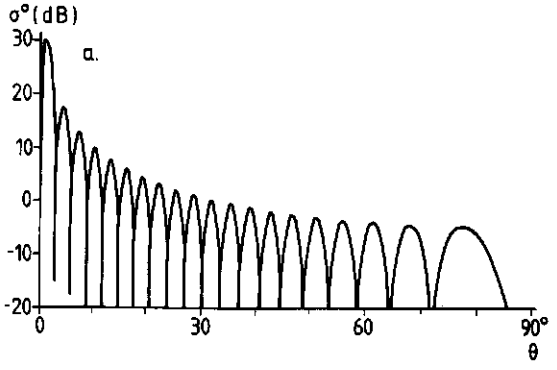
$$\frac{\Delta\phi}{2\pi} = \frac{\Delta l}{\lambda} \text{ zodat } \Delta\phi = 2\pi\,(\Delta l/\lambda) \qquad (8.14)$$

als λ de gebruikte radargolflengte is. De van de getekende resolutiecel ontvangen echo wordt gevonden door een *sommatie* van de bijdragen van alle puntdoelen. De uitkomst van deze sommatie wordt niet alleen bepaald door de radardoorsneden van de afzonderlijke puntdoelen maar ook door hun onderlinge faseverschillen Δφ.
Uit deze eenvoudige overweging kunnen direct twee belangrijke eigenschappen van het samengestelde radarsignaal worden afgeleid. Zoals in figuur 8-6b blijkt zullen de onderlinge faseverschillen Δφ afhangen van de *invalshoek* θ. Als gevolg hiervan wordt, voor een bepaalde resolutiecel, ook het ontvangen radarsignaal afhankelijk van θ. Aangezien verder elke resolutiecel gekenmerkt wordt door een eigen *rangschikking van puntdoelen* zal, bij gelijke invalshoek θ, het ontvangen radarsignaal tevens variëren van resolutiecel tot resolutiecel. Beide aspecten, de θ-afhankelijkheid en de variatie van cel tot cel, komen bij de nu volgende simulaties duidelijk naar voren.

Voor het eerste voorbeeld kiezen we een object waarvoor de radarreflectie enerzijds theoretisch al goed bekend is en anderzijds ook met de beschreven simulatiemethode kan worden bepaald. Dit object is een vlakke metalen plaatreflector met afmetingen van 10 λ x 10 λ (figuur 8-7a). De langs theoretische weg berekende radardoorsnede is in figuur 8-8a weergegeven als functie van de invalshoek θ. De radardoorsnede σ gegeven in vergelijking (8.9) geldt uitsluitend voor een puntdoel en niet voor een samengesteld object. Omdat het voor de hand ligt dat de radarecho des te sterker is naarmate de resolutiecel een groter oppervlak heeft is het gebruikelijk de radardoorsnede te *normeren* op dit oppervlak. In figuur 8-8a is de zo verkregen *radardoorsnede per oppervlakte-eenheid* ($\sigma^\circ$) uitgezet. Deze $\sigma^\circ$ wordt gebruikt voor samengestelde doelen (zie ook paragraaf 10.1). Ter vergelijking is in figuur 8-8b het resultaat weergegeven van een simulatie waarbij in één vlak, binnen een vierkant van 10 λ x 10 λ, 625 puntdoelen zijn aangebracht volgens een regelmatig rooster (figuur 8-7b). Een bij deze

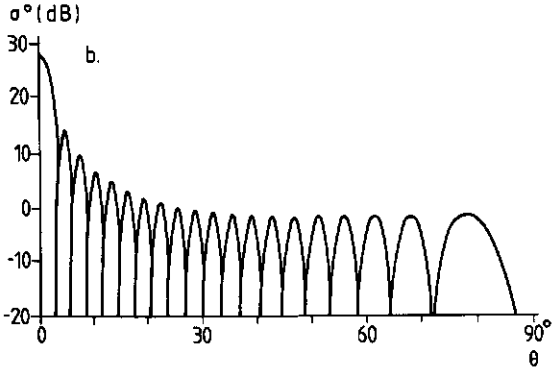



**8-7** Objecten waarvan in figuur 8-8 de radardoorsnede is weergegeven.

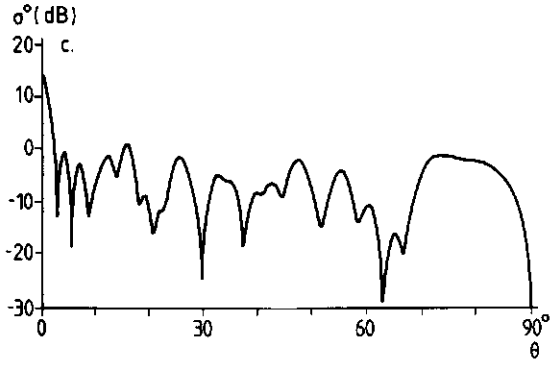



8-8

a Radardoorsnede van een vlak metalen plaatje van 10λ bij 10λ (fig. 8-7a)




b Nabootsing van dit plaatje met behulp van 625 puntdoelen (fig. 8-7b)

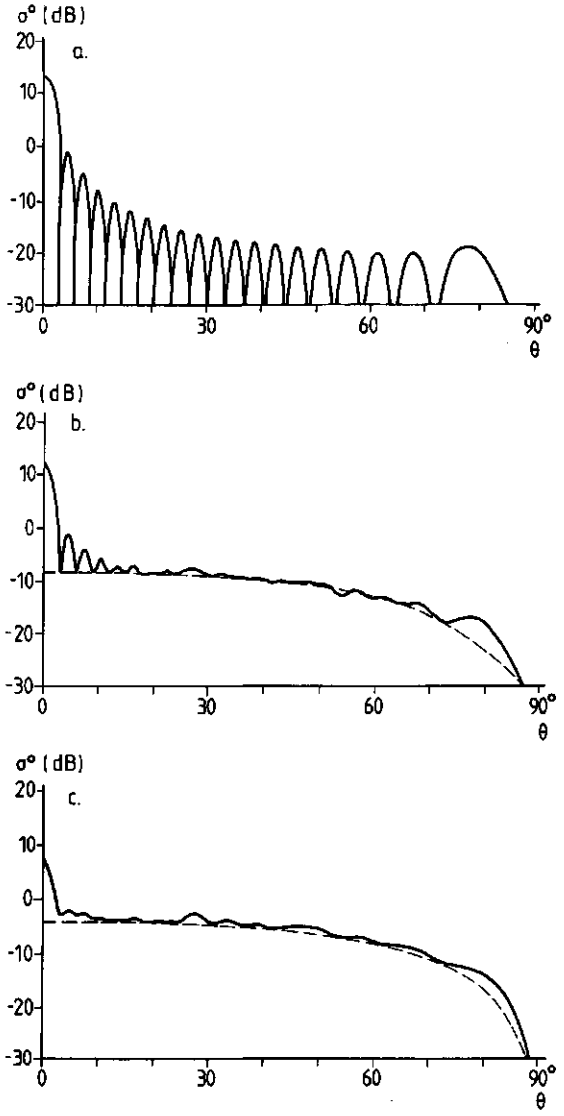



c Simulatie met 625 puntdoelen en Gaussische hoogteverdeling (fig. 8-7c) met een effectieve hoogte van 0,3 λ.

simulaties optredende complicatie is nog dat de puntdoelen elkaar beïnvloeden bij de optredende onderlinge afstanden. Met dit effect is bij de simulatie rekening gehouden.
De nog optredende kleine verschillen tussen de figuren 8-8a en 8-8b zouden verder verminderd kunnen worden door het aantal gebruikte puntdoelen op te voeren.

Voor het volgende voorbeeld gaan we uit van hetzelfde vierkant. De 625 puntdoelen bevinden zich nu echter (figuur 8-7c) boven en onder het vlak van het vierkant op afstanden verdeeld volgens een Gaussische verdeling met een effectieve hoogtewaarde van 0,3 λ. Vergelijken we het

resultaat van deze simulatie, weergegeven in figuur 8-8c, met figuur 8-8b dan springen twee dingen naar voren. In de eerste plaats wordt het maximum voor $\theta=0$ door het invoeren van random hoogten veel kleiner terwijl verder het regelmatige *interferentiepatroon* voor $\theta > 10°$ is vervangen door een random amplitudeverloop.
Aannemende dat een Gaussische verdeling met een bepaalde effectieve hoogte kenmerkend is voor een bepaald perceel, dan correspondeert elke trekking met een resolutiecel binnen dit perceel. De simulatie leert verder dat elke set hoogten resulteert in een ander verloop van $\sigma°$ als functie van $\theta$. Voor de praktijk van de aardobservatie is dit een ongewenst effect omdat we daarbij willen komen tot een eenduidige karakterisering van het perceel. Met simulaties kan worden aangetoond




8-9 Gesimuleerde radardoorsnede van een ééndimensionaal object (lengte l) bestaande uit 49 puntdoelen op een rij:
a Alle puntdoelen op hoogte nul

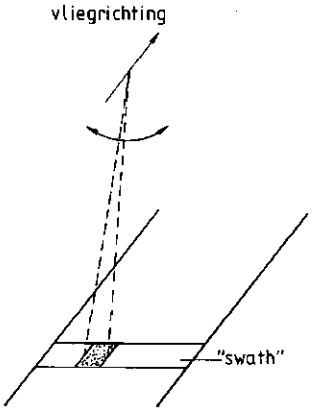
b Middeling over 100 realisaties waarbij de hoogte Gaussisch verdeeld is, effectieve hoogte 0,05 λ

c Idem maar met effectieve hoogte 0,1 λ.

dat dit doel wordt bereikt door zoveel mogelijk *onafhankelijke waarnemingen te middelen.*
Om de rekentijd bij het simulatieproces te beperken is deze middeling uitgevoerd voor een ééndimensionaal geval waarbij 49 puntdoelen zijn verdeeld over een lengte van 10λ. Figuur 8-9a toont het verloop van $\sigma^\circ$ als alle puntdoelen een hoogte nul hebben. In figuur 8-9b is het resultaat gegeven van een middeling over 100 resolutiecellen waarbij de hoogten zijn genomen uit een Gaussische verdeling met een effectieve hoogte van 0,05 λ. In figuur 8-9c is hetzelfde gedaan bij een effectieve hoogte van 0,1 λ. Vergelijking van deze figuren leert dat de middeling in het middengebied $20^\circ < \theta < 70^\circ$ het meeste effect heeft (*incoherente* gebied, vgl. paragraaf 3.3). Voor $\theta < 20^\circ$ (*coherente* gebied) blijft een restant zichtbaar van het interferentiepatroon dat wordt bepaald door de begrenzing van het object (figuur 8-9a). Maak ook de vergelijking met figuur 10-2. Het middengebied levert daarom de meest betrouwbare waarnemingen op met $\sigma^\circ$-waarden die inderdaad als een *perceelkarakteristiek* kunnen worden aangemerkt. Met deze conclusies moet terdege rekening worden gehouden bij het gebruik van de beeldvormende observatiesystemen die in de volgende paragraaf worden besproken.

## 8.4 Beeldvormende radarsystemen

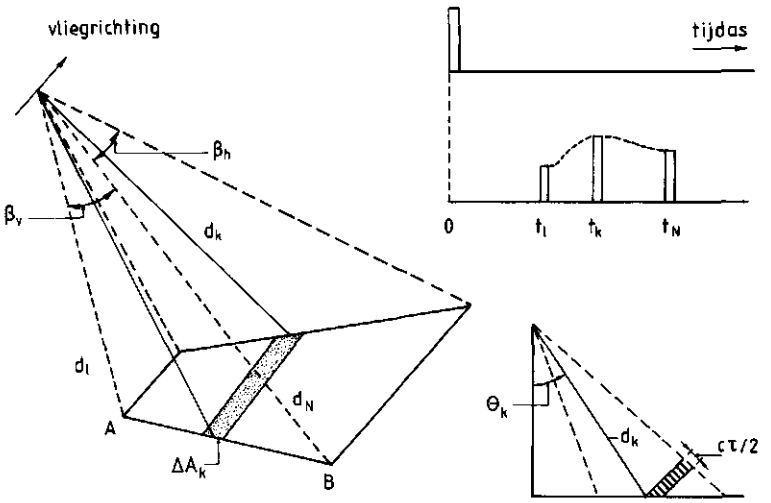
Om met behulp van de radar beschreven in paragraaf 8.2 een gebied af te kunnen tasten zou de kijkrichting langs mechanische weg op een systematische manier moeten worden veranderd. Voor elke kijkrichting wordt dan het echosignaal als functie van afstand of tijd afgebeeld. Bij aardobservatie is het uitgangspunt dat de radar gemonteerd is op een bewegend platform zoals een vliegtuig of een satelliet (figuur 8-10).




8-10 Aftasting van het aardoppervlak met behulp van radar.

Achtereenvolgens worden dan alle objectelementen, die binnen een strook ('swath') liggen, met de radar verbonden. Deze strook heeft de breedte van een resolutiecel en ligt dwars op de vliegrichting. De

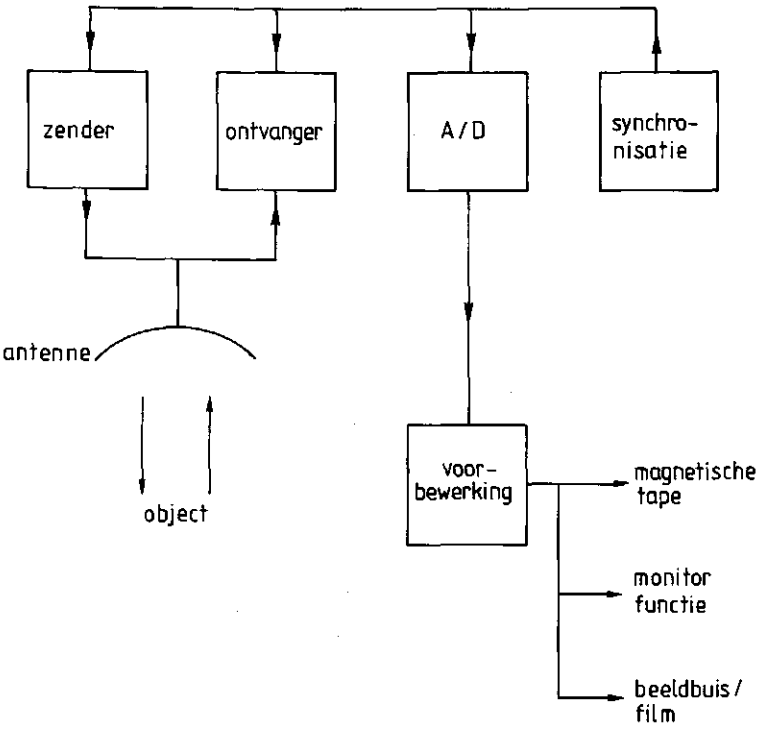
verplaatsing in de vliegrichting zorgt ervoor dat telkens een volgende lijn (strook) wordt afgetast. Omdat de sensor zich tijdens het aftasten van een lijn iets verplaatst, staan de lijnen in werkelijkheid niet exact loodrecht op de vliegrichting.
In de geschetste situatie liggen de opeenvolgend afgetaste lijnen in het nadir gecentreerd (loodrecht onder het platform). Voor de lijnaftasting zou men dan in principe aan een *mechanisch scannende antenne* kunnen denken. Een dergelijke oplossing stuit echter op onoverkomelijke praktische bezwaren.
Door de variabele kijkrichting in plaats van gecentreerd in het nadir zo te kiezen dat de antenne een *vaste hoek* met het aardoppervlak maakt, blijkt dat een afgetaste lijn ook langs *elektronische weg* in resolutiecellen kan worden onderverdeeld. In figuur 8-11 is het door de antenne van zo'n '*sideways looking radar*' (SLR) bestreken gebied geschetst. De antenne heeft een langgerekte vorm en wordt zo aangebracht dat de kleinste openingshoek $\beta_h$ in de vliegrichting ligt; in de richting hier loodrecht op is de openingshoek $\beta_v$. Het zendsignaal bestaat, net als in paragraaf 8.2, uit een reeks impulsen.




8-11 Geometrie van een 'sideways looking radar'.

In de SLR-configuratie wordt niet het gehele door de antenne bestreken gebied tegelijkertijd door de uitgezonden impuls getroffen. Als gevolg daarvan zal het, bij een bepaalde zendimpuls behorende, echosignaal zich uitstrekken over een tijdsinterval lopend van $t_1=2d_1/c$ tot $t_N=2d_N/c$. Elektronisch gezien kan het echosignaal worden beschouwd als een opeenvolging van gereflecteerde impulsen waarbij de k-de impuls (tijdstip $t_k$) correspondeert met de reflectie van een strookje $\Delta A_k$. Aangezien de *afstandsresolutie* in de richting $d_k$ gelijk is aan $c\tau/2$ is de resolutie langs de grond gemeten gelijk aan $c\tau/(2\sin\theta_k)$, met $\theta_k$ = hoek in de sensor tussen nadir en richting naar het beschouwde resolutie-

element. In de vliegrichting is de afmeting van de strook gelijk aan $d_k \cdot \beta_h$ (*azimuth-resolutie*).
Het zal duidelijk zijn dat, als we $\tau$ steeds groter maken, uiteindelijk een situatie bereikt wordt waarbij $\Delta A_k$ volledig wordt bepaald door antennebundeling en afstand. Uit figuur 8-11 kan nog worden afgeleid dat het aantal resolutiecellen N gelijk is aan $d_N$-$d_1$ gedeeld door $c\tau/2$. Een met redelijke middelen haalbare pulsbreedte is bijvoorbeeld 50 ns, dat wil zeggen dat de resolutiecel-afmeting loodrecht op de vliegrichting in meters gelijk is aan $7{,}5/\sin\theta_k$.
Het in de vorm van deelreflecties beschikbaar komende echosignaal bevat informatie over de fysische en materiële eigenschappen van het waargenomen oppervlak. Zo zal het echosignaal bijvoorbeeld groter zijn voor een wateroppervlak dan voor een landoppervlak, groter voor een ruwe zee dan voor een kalme en sterker voor een suikerbietenveld dan voor een tarwe-akker. We spreken in dit verband over de *radarsignatuur* van het oppervlak. De in tijdvolgorde binnenkomende signalen dienen zo te worden vastgelegd dat ze later eenvoudig op een plat vlak kunnen worden afgebeeld. Het blokschema in figuur 8-12 laat zien hoe de ontvanger de waargenomen echosterkte aflevert in de vorm van een elektrisch signaal in analoge vorm. Bij de moderne systemen wordt dit analoge signaal direct gedigitaliseerd door een analoog/digitaal-omzetter. Deze omzetting is nodig in verband met de opslag van de data op magnetische band met het oog op latere bewerking (zie ook paragraaf 4.3). De frequentie waarmee het analoge echosignaal wordt



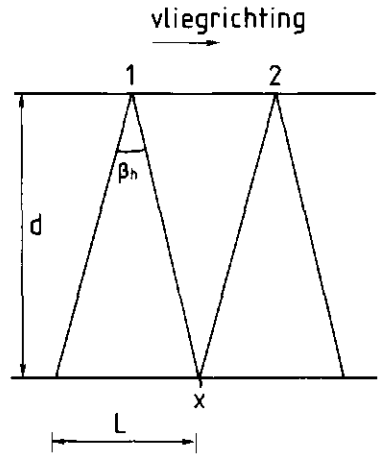

8-12 Blokschema van een beeldvormend radarsysteem.

bemonsterd is gerelateerd aan de pulsbreedte van de radar en daarmee aan de resolutiecel-afmeting loodrecht op de vliegrichting. De pulsherhalingsfrequentie bepaalt het aantal bemonsteringen *in* de vliegrichting en daarmee het aantal aftastlijnen per tijdseenheid. In combinatie hiermee bepaalt de vliegsnelheid dan de lijnafstand op de grond. Zo ontstaat tenslotte een matrix van digitale bemonsteringen over het observatiegebied.
Vanzelfsprekend zal bij satellietsystemen alle apparatuur na de analoog/digitaal-omzetter zich op de aarde bevinden; een radioverbinding zorgt dan voor de overdracht. Het in Nederland beschikbare *'sideways looking airborne radar' (SLAR)-systeem* is ondergebracht in de 'Swearingen Metro II', een vliegtuig van het NLR. Aan boord van het vliegtuig bestaat de mogelijkheid om via een 'quicklook'-faciliteit de metingen direct op film vast te leggen.
Het microgolfgedeelte van het SLAR-systeem is opgebouwd rond een gemodificeerde DECCA Marine Radar type 65610 en heeft de specificaties die zijn opgenomen in tabel 8.2.

Tabel 8.2 Specificaties Nederlandse SLAR

| | |
|---|---|
| frequentie (golflengte) | 9.400 MHz (3,2 cm, X-band) |
| type | impuls gemoduleerd |
| piekvermogen | 25 kW |
| pulsherhalingsfrequentie | 100-3300 Hz (instelbaar) |
| pulsbreedte | 50 of 200 ns (naar keuze) |
| antenne | G = 31,4 dB |
| | $\beta_h$ = 0,8 ° ($l_a$ = 2,70 m) |
| | $\beta_v$ = 21,4 ° |
| polarisatie | zenden horizontaal |
| | ontvangen horizontaal |
| pixel | 15 × 15 m |
| | of 7,5 × 7,5 m |

Het beschreven SLR-principe leidt, zoals we hebben gezien, tot een resolutiecel waarvan het oppervlak $\Delta A_k$ lineair toeneemt met de afstand $d_k$. Dit zou bij aardobservatie vanuit een *satelliet* onbruikbare waarden opleveren. Een oplossing voor dit probleem wordt geboden door de methode van de zgn. *synthethische apertuur radar* (meestal kortweg aangeduid als SAR). Deze methode berust op het feit dat, in de vliegrichting, elk beeldelement gedurende langere tijd wordt waargenomen. In figuur 8-13 is de doorsnede van de antennebundel in de vliegrichting schematisch aangegeven. Bij een openingshoek $\beta_h$ van de bundel behoort als lengte van het bestraalde gebied: $L = \beta_h d$. Een bepaald beeldelement x komt voor het eerst 'in zicht' als de antenne zich bevindt in positie (1) en verdwijnt weer uit de bundel als de antenne in positie (2) is gekomen. De ondertussen door de antenne afgelegde afstand bedraagt L. Worden alle achtereenvolgende antenneposities

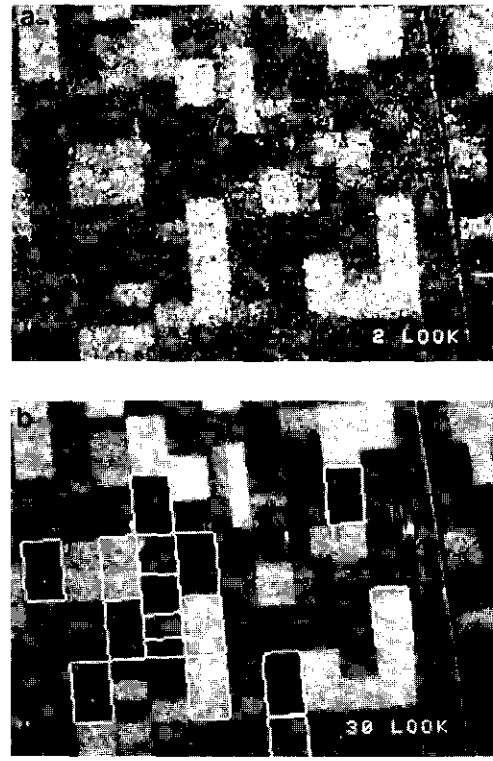



8-13 Toelichting op het synthetische apertuurprincipe.

gelijktijdig gerealiseerd met behulp van evenzoveel aparte antennes, dan vormen deze antennes gezamenlijk een antenne met lengte L. Zolang het object gedurende de waarnemingsperiode echter niet verandert kunnen we hetzelfde resultaat bereiken door bij elke antennepositie het gemeten signaal op te slaan in een geheugen en later op de opgeslagen signalen een optelbewerking toe te passen zoals die ook in een werkelijke antenne met lengte L plaats vindt. We hebben dan een *synthetische antenne* met een apertuurlengte L geformeerd. De openingshoek van deze apertuur is in het ideale geval, volgens vergelijking (8.7), gelijk aan $\lambda/L = \lambda/(\beta_h d)$ waarmee de resolutiecelafmeting in de vliegrichting gelijk wordt aan $\lambda/(\beta_h d) * d = \lambda/\beta_h$, een uitkomst die onafhankelijk is van de afstand resp. van de vlieghoogte. Een noodzakelijke voorwaarde in de SAR-methode is dat de radarstraling *coherent* is. Het blokschema voor een radar met een synthetische apertuur komt in grote lijnen overeen met dat in figuur 8-12. De verschillen liggen met name in het vlak van de opslag van data en van de processing.
Een beknopte beschrijving van enkele toekomstige SAR-systemen met hun specificaties wordt gegeven in Supplement 7.

## 8.5 Middelingsproces en pixelvorming

De gebruikelijke presentatie van de echosignalen na verwerking leidt tot een afbeelding die veel gelijkenis vertoont met een zwart-wit luchtfoto. We dienen ons echter steeds te realiseren dat het feitelijk gaat om een *intensiteitsbeeld* waarin een gemeten radardoorsnede wordt afgebeeld als een grijstint (figuur 8-14). Als gevolg van het in paragraaf 8.3 beschreven optelproces varieert het signaal, ook binnen een perceel, van resolutiecel tot resolutiecel. Daardoor doen de gevormde beelden zich *gespikkeld* aan ons voor. De remedie tegen spikkel ('speckle') is *middeling* over een aantal resolutiecellen (de zgn. 'multilook'-techniek). Aangezien de signalen van een aantal elementen daarbij resulteren in één




**8-14** Het effect van ruimtelijke middeling
**a** 2-look beeld
**b** 30-look beeld
(bron: Nooren et al., 1985).

signaal dat hoort bij een nieuw element (het uiteindelijk pixel in een beeld) dat net zo groot is als de oorspronkelijke elementen samen, impliceert het middelingsproces een vermindering van de geometrische resolutie. Er is dus een wezenlijk verschil tussen *resolutiecel* en *pixel.* Door de bereikte verbetering van de eenduidigheid van de waarneming is de radiometrische resolutie echter toegenomen. Deze mogelijkheid tot uitwisseling van *geometrische* en *radiometrische resolutie* is karakteristiek voor het gebruik van radar (zie ook hoofdstuk 3).
In een practische situatie wordt voor de middeling uitgegaan van de in de vorige paragraaf beschreven bemonsterde signaalwaarden. Ondanks het feit dat deze waarden door de in de vliegrichting overlappende resolutiecellen niet altijd statistisch onafhankelijk zijn, kan het middelingsproces een spectaculaire verbetering te zien geven zoals een vergelijking van de figuren 8-14a en 8-14b (Nooren et al., 1985) laat zien. Zolang de oorspronkelijke resolutiecel voldoende klein is ten opzichte van de perceelafmeting hoeft de verminderde geometrische resolutie geen probleem te zijn.

## 8.6 Literatuur

1 Ulaby, F.T., R.K. Moore & A.K. Fung, 1981. Microwave remote sensing, active and passive. Vol. I. Addison-Wesley Publ. Comp., Reading, Massachusetts.

2 Nooren, G.J.L. et al., 1985. Land use of a synthetic aperture radar. Report NLR TR 85096 L.

Alvorens men daadwerkelijk beeldanalyse kan interpreteren
noodzakelijk zijn systematische kennis te verwerven van het
gedrag van objecten (al of niet natuurlijke objecten of versch
van het aardoppervlak. Beknopt zal worden uiteengezet hoe
objectsignaturen via experimenten kunnen worden bepaald,
restricties van de omstandigheden waaronder deze bepalingen
zijn. Hierbij zullen ook de factoren tijd en plaats in belangrij
meespelen. Het belang van een goede ijkingsmethodiek, mede
behoud van referentie-objecten en doelgerichte veldwaarneming
worden onderstreept. Ook zal worden ingegaan op de pogin
komen tot modellen die de (tijdsafhankelijke) samenhang be
tussen sensorparameters enerzijds en objectparameters anderz
De hoofdstukken zijn gerangschikt naar venster (optische ve
microgolfvenster) en naar gevoeligheid van het object (kale bo
en bosvegetatie).

Documentatie

# 9 Spectrale signatuur en modelvorming in het reflectief-optische venster

J.G.P.W. Clevers

## 9.1 Inleiding

Remote sensing (RS) maakt het mogelijk om *kwantitatieve informatie* over vegetatie te verkrijgen, en wel voor een groot gebied *op één moment* en *op niet-destructieve wijze*. Deze wijze van gegevensverzameling met betrekking tot vegetatie is tot nu toe nog niet erg gebruikelijk. De gebruikelijke werkwijze is om in het veld de gewenste gegevens te verzamelen. Vraag is nu welke gegevens met behulp van RS verkregen kunnen worden en op welke wijze deze geïnterpreteerd moeten worden. In dit hoofdstuk zal de aandacht vooral gericht zijn op *landbouwgewassen* en zal als voorbeeld de toepassing bij *akkerbouwveldproeven* gebruikt worden. Door een parallelle benadering kunnen andere toepassingsgebieden beschreven en geanalyseerd worden.
Tijdens het groeiseizoen van landbouwgewassen kunnen verschillende plantkenmerken bepaald worden bij proefvelden. Vaak worstelt een onderzoeker met het dilemma welk relevant kenmerk *snel*, maar ook *nauwkeurig*, bepaald kan worden. Beide voorwaarden zijn vaak tegenstrijdig. Een belangrijk gewaskenmerk, dat vaak bepaald wordt bij proefvelden, is de *leaf area index* (LAI, bladoppervlakte-index). De LAI is gedefiniëerd als de totale, eenzijdige bladoppervlakte per eenheid bodemoppervlak. Deze LAI wordt bepaald aan de hand van bemonstering van elk veldje (kleinste experimentele eenheid) van een proefveld. Deze vorm van gegevensverzameling is destructief. Bemonstering kan bijvoorbeeld eens per twee weken uitgevoerd worden. Slechts een beperkt aantal planten kan telkens geoogst worden, omdat anders een proefveld veel te groot zou moeten worden. Door de geringe monstergrootte is de variabiliteit vrij groot; met andere woorden, metingen verricht aan zo'n monster geven vaak maar een matige schatting voor een heel veldje ten gevolge van lokale bodem- en plant-variaties.

## 9.2 Opname- en verwerkingssysteem

De belangrijkste voorwaarde voor het toepassen van RS bij akkerbouwveldproeven is dat het opname- en verwerkingssysteem aan de volgende *eisen* moet voldoen:

a De spectrale banden moeten karakteristieke, kwantitatieve informatie over een gewas opleveren.
b Er moet voldoende detail in het veld waarneembaar zijn. Aangezien de veldjes bij een proefveld meestal klein zijn, moeten objecten van enkele vierkante meters waarneembaar zijn.
c De opnamen moeten niet al te duur zijn, omdat ze vrij regelmatig gedurende het groeiseizoen uitgevoerd moeten worden.

### 9.2.1 Keuze van de spectrale banden

In de literatuur bestaat een zekere eenstemmigheid over de optimale banden nodig om karakteristieke spectrale informatie over vegetatie te verkrijgen. Deze banden liggen in het zichtbare (groen en rood) en nabij-infrarode deel van het electromagnetische spectrum. Bunnik (1978) wees drie golflengten aan op basis van optimale informatie over variaties in een aantal belangrijke gewaskenmerken. Deze golflengten zijn: in het groen bij 0,55 µm, in het rood bij 0,67 µm en in het nabij-infrarood bij 0,87 µm.

### 9.2.2 Keuze van platform en sensor

RS in het zichtbare en nabij-infrarode gebied kan op verschillende niveaus uitgevoerd worden, variërend van metingen in het veld tot metingen vanuit de ruimte.
Stralingsmeters toegepast in het veld zijn ongeschikt om gehele proefvelden in een kort tijdsbestek te meten. Ze zijn wel geschikt om de ijking van andere sensoren te controleren (zie Supplement 9).
Waarnemingen vanuit de ruimte vallen ook meteen af omdat te weinig detail is waar te nemen voor het toepassen bij proefvelden.
Voor waarnemingen vanuit de lucht (vliegtuig) kan men gebruik maken van een multispectrale scanner (zie: paragraaf 7.2.1 en 7.5.1; Manual of Remote Sensing, 1983). Dit instrument is echter duur, terwijl ook kostbare verwerkingsapparatuur benodigd is. Hierdoor is dit instrument niet geschikt voor frequente waarnemingen.
Een fotografisch systeem, toegepast vanuit een vliegtuig, voldoet aan de gestelde eisen. Door gebruik te maken van 70-mm filmmateriaal en niet-metrische camera's kunnen relatief goedkope opnamen verkregen worden (zie ook hoofdstuk 6). Als platform zijn o.a. een eenmotorig vliegtuig (opnameschaal bijvoorbeeld 1:8000) en een zogenaamde ultralight (opnameschaal 1:3000) bruikbaar.

### 9.2.3 Keuze van film en filters

De mogelijkheden van *kleureninfraroodfilm* (Aerochrome Infrared film 2443), met de mogelijkheid van gelijktijdige registratie in het groen, rood en infrarood, zijn overwogen. Belangrijkste argument tegen het gebruik hiervan is dat de spectrale banden erg breed zijn (vergelijk de paragrafen 6.3.5 en 4.1.1). Vooral de infrarode band is erg breed en zelfs gevoelig voor groene en rode straling (Kodak publ. M-29, 1976; en

figuur 4-4). Hierdoor is opsplitsing in groen, rood en nabij-infrarood erg gecompliceerd. Bovendien kunnen zogenaamde 'inter-image' effecten optreden (Egan, 1985).
Bij gebruik van *zwart-wit film* voor elk van de spectrale banden afzonderlijk is de bandkeuze binnen zekere grenzen vrij en kan de bandbreedte aanzienlijk smaller zijn dan bij kleurenfotografie. Bovendien zijn inter-image effecten dan volledig uitgesloten. Op basis van de door Bunnik (1978) gevonden optimale golflengten zijn als voorbeeld drie film/filter-combinaties geselecteerd. De combinaties zijn vermeld in tabel 9.1. Dit is dus de werkwijze van de in hoofdstuk 4 en 6 genoemde *multispectrale luchtfotografie* (MSP). Een illustratie van deze opnametechniek wordt gegeven in figuur 9-1.

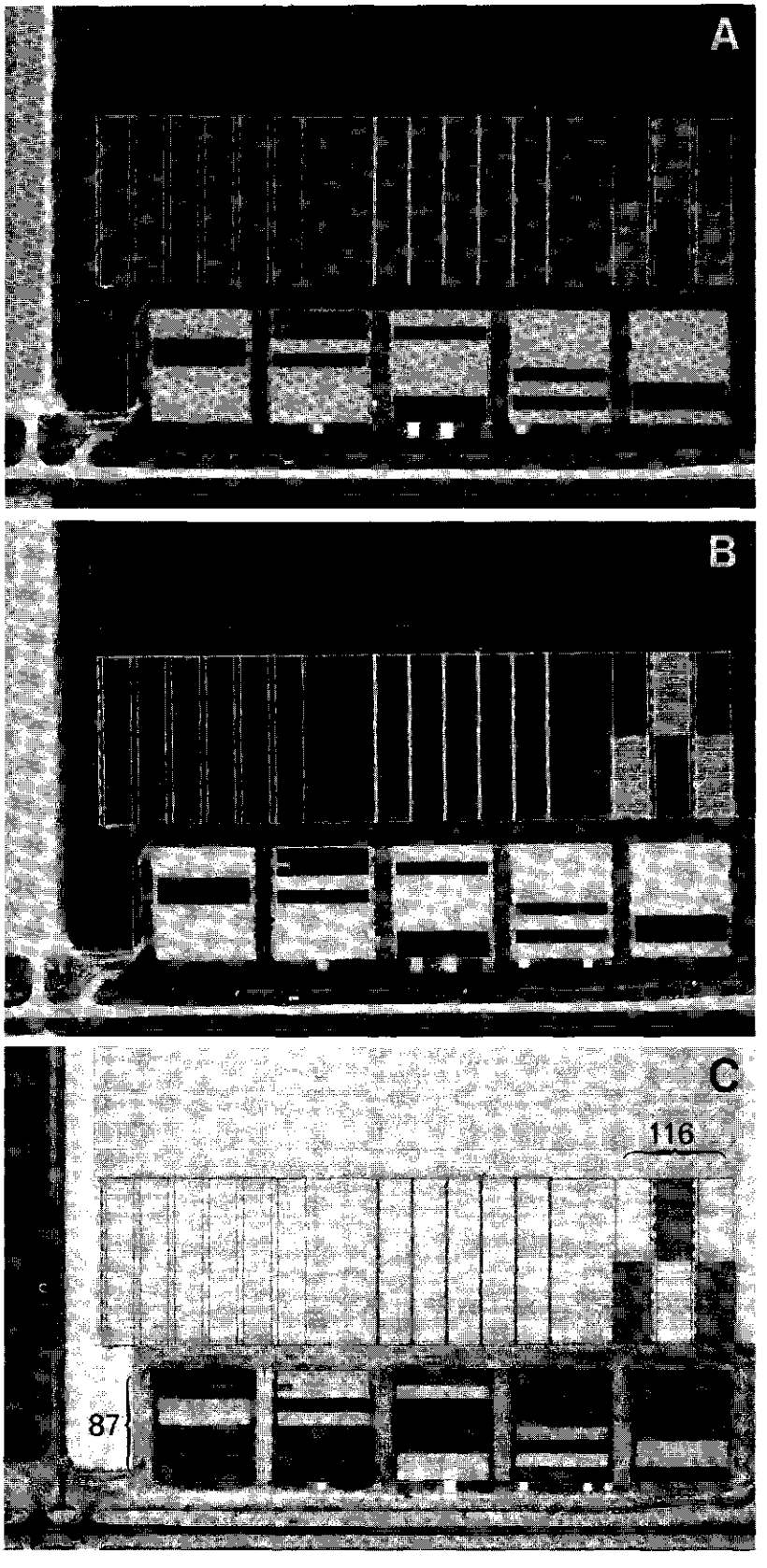
Tabel 9.1 Film/filter-combinaties gebruikt voor het verkrijgen van optimale spectrale banden.

| Band | Kodak 70-mm Aerographic film | Kodak Wratten filters | Golflengte-interval (50% rel. gevoeligheid) |
|---|---|---|---|
| groen | PX 2402 | W21 + W57A | 0,555 – 0,580 µm |
| rood | PX 2402 | W70 | 0,665 – 0,700 µm |
| infrarood | IR 2424 | W87C | 0,840 – 0,900 µm |

Voor de gecombineerde weergave van de drie spectrale banden in de vorm van een kleurencomposiet (met zelf gekozen kleuren) kan men nuttig gebruik maken van de eerdergenoemde color additive viewer (zie paragraaf 4.4 en Supplement 2).

### 9.2.4 Keuze van de densitometer

Om kwantitatieve informatie uit foto's af te leiden is het nodig de beelden te digitaliseren met een *densitometer* (zie ook paragraaf 6.3.2). Aan de Landbouwuniversiteit te Wageningen is voor dit doel een Macbeth TD-504 densitometer beschikbaar. Aangezien de veldjes van proefvelden over het algemeen vrij klein zijn, moet de opening van de densitometer eveneens vrij klein zijn. Bij een schaal 1:8000 (eenmotorig vliegtuig) correspondeert een veldjesbreedte van 3 meter (een veel voorkomende breedte bij proefvelden) met 0,375 mm op het negatief. De beeldbeweging (paragraaf 6.4.2.1) zal over het algemeen minder dan 0,1 mm bij schaal 1:8000 bedragen. Dit betekent dat een opening van 0,25 mm geschikt is.
Indien men bij opnamen van verschillende tijdstippen in het groeiseizoen telkens hetzelfde object wil meten, is een nauwkeurige plaatsbepaling van de densitometer op het negatief noodzakelijk (zie ook paragraaf 6.4). Daartoe moet de ligging van het object (i.c. proefveld) in het terrein ten opzichte van paspunten (of vaste herkenningspunten die als paspunt kunnen dienen) precies bekend zijn. De Macbeth TD-504 densitometer is aangesloten op een microcomputer. Deze microcomputer stuurt het meetprocédé met de densitometer en registreert de data.


A
B
C
116
87

**9-1** 70-mm luchtfoto's verkregen boven de ir. A.P. Minderhoudhoeve op 27 mei 1982.
**A** Groene band; PX 2402 met W21 + W57A filters
**B** Rode band; PX 2402 met W70 filter
**C** Infrarode band; IR 2424 met W87C filter.

Proefveldindelingen:

APM 116 ZOMERGERST

| | | |
|---|---|---|
| 1 Z1N5 | 13 Z2N1 | 25 Z1N3 |
| 2 Z1N2 | 14 Z2N2 | 26 Z1N4 |
| 3 Z1N3 | 15 Z2N5 | 27 Z1N1 |
| 4 Z1N6 | 16 Z2N6 | 28 Z1N6 |
| 5 Z1N4 | 17 Z2N4 | 29 Z1N5 |
| 6 Z1N1 | 18 Z2N3 | 30 Z1N2 |
| 7 Z2N2 | 19 Z1N4 | 31 Z2N6 |
| 8 Z2N6 | 20 Z1N2 | 32 Z2N1 |
| 9 Z2N5 | 21 Z1N3 | 33 Z2N3 |
| 10 Z2N3 | 22 Z1N1 | 34 Z2N5 |
| 11 Z2N1 | 23 Z1N6 | 35 Z2N4 |
| 12 Z2N4 | 24 Z1N5 | 36 Z2N2 |

Z1 = 26 maart 1982
Z2 = 22 april 1982

Stikstofniveau's (kg N per ha):
N1 = 0
N2 = 20
N3 = 40
N4 = 60
N5 = 80
N6 = 100

APM 87 Vruchtwisselingsproef AARDAPPELEN

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 C2+ | 2 D4O | 3 A2+ | 4 A1+ | 5 B1O |
| 6 A2O | 7 B2O | 8 D2O | 9 C1+ | 10 D1+ |
| 11 D4+ | 12 C2O | 13 D3O | 14 D1O | 15 D3+ |
| 16 B2+ | 17 D2+ | 18 C1O | 19 B1+ | 20 A1O |
| 21 A1O | 22 C1O | 23 B1+ | 24 D4+ | 25 A2+ |
| 26 D3+ | 27 D3O | 28 D1O | 29 C2+ | 30 B2+ |
| 31 B1O | 32 C1+ | 33 D2+ | 34 D2O | 35 D4O |
| 36 D1+ | 37 A1+ | 38 B2O | 39 A2O | 40 C2O |

Rotatie:

| 1 | 2 | 3 | 4 | |
|---|---|---|---|---|
| A = a | – | a | | a = aardappelen |
| B = a | – | z | | z = zomertarwe |
| C = a | – | s | | s = suikerbiet |
| D = a | – | z | – s – h | h = haver |

Nematicide-behandeling:
O = onbehandeld
\+ = behandeld

## 9.3 IJking van de luchtfotografie

De ijking van de luchtfotografie heeft betrekking op de densiteitscurve, lichtafval, belichtingstijd, effectieve lensopening, transmissie van het optische systeem en tot slot de verstrooiing en absorptie in de atmosfeer (hoofdstuk 6).
Slater (1980) heeft de totale stralingsenergie, die over een oppervlakte ter grootte van de meetopening van de densitometer in een bepaalde spectraalband op de film valt, beschreven als (zie vergelijking 6.19, paragraaf 6.4.2.2):

$$Q_i = \frac{K_N(\alpha)\cdot\cos^n\alpha\cdot t}{4\cdot N^2}\cdot(E\cdot\rho\cdot\tau_a + \pi\cdot L_a)\cdot\tau_0 + Q_c \qquad (9.1)$$

met $Q_i$ = totale stralingsenergie per eenheid oppervlak op het filmvlak (in Joule)
$K_N(\alpha)$ = vignetterings-factor
$\cos^n\alpha$ = lichtafval factor
t = belichtingstijd (s)
N = effectieve lensopening ($m^{-1}$)
E = bestralingssterkte aan het aardoppervlak ($Wm^{-2}$)
$\rho$ = reflectiefactor van het object
$\tau_a$ = atmosferische transmissiefactor
$L_a$ = radiantie door de atmosfeer verstrooid naar de sensor ($Wm^{-2}sr^{-1}$)
$\tau_o$ = transmissiefactor van het optische systeem (lens plus filter)
$Q_c$ = stralingsenergie t.g.v. strooilicht (Joule).

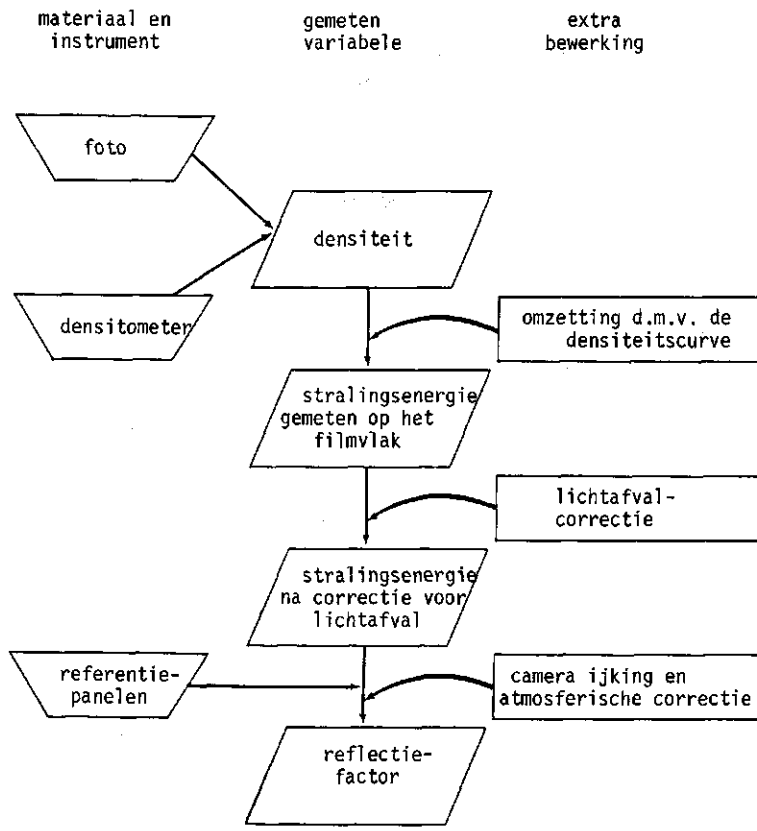
De invloed van strooilicht ('camera flare') is gering bij moderne camera's en bovendien constant indien de verdeling van reflecterende objecten binnen het gezichtsveld redelijk constant is (zie ook paragraaf 6.4.1.1). Na berekening van de stralingsenergie ($Q_i$) uit de gemeten densiteiten met behulp van de densiteitscurve (D-logQ), wordt een correctie voor lichtafval uitgevoerd (vignettering dient vermeden te worden). Voor een bepaalde vlucht onder constant blijvende atmosferische omstandigheden en camera-instelling en voor één spectrale band kunnen de overige termen in het rechter lid van vergelijking (9.1), met uitzondering van $\rho$, als constant beschouwd worden. Dit houdt in, dat na correctie voor lichtafval uit de berekende $Q_i$ het reflectiepercentage ($\rho$) van een bepaald object volgt uit de vergelijking (zie ook vergelijking 6.22):

$$\rho = a + b\cdot Q_i \qquad (9.2)$$

met a en b als constanten.

Om a en b voor een bepaalde spectrale band te bepalen, kan men een aantal *referentiepanelen* met bekende reflectiekarakteristieken gebruiken. Tijdens elke vlucht moeten de referentiepanelen met de verschillende film/filter-combinaties met dezelfde camera-instelling en

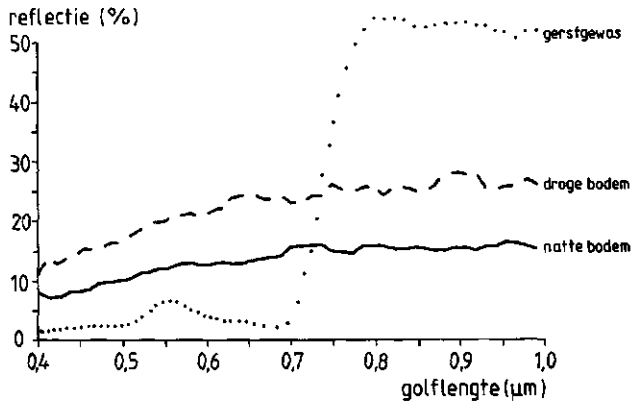
onder dezelfde atmosferische omstandigheden gefotografeerd worden als de overige objecten. Voorts moeten ze met dezelfde densitometrische procedure geanalyseerd worden. Op deze wijze worden met luchtfotografie *geijkte reflectiepercentages* verkregen (zie figuur 9-2). Zo'n reflectiepercentage is een kenmerkende, kwantitatieve eigenschap van het object, dat direct gebruikt kan worden als gewaskenmerk of dat gebruikt kan worden om meer conventionele gewaskenmerken te schatten.




9-2 Stroomdiagram dat de ijking van multispectrale luchtfotografie illustreert.

## 9.4 Signatuur

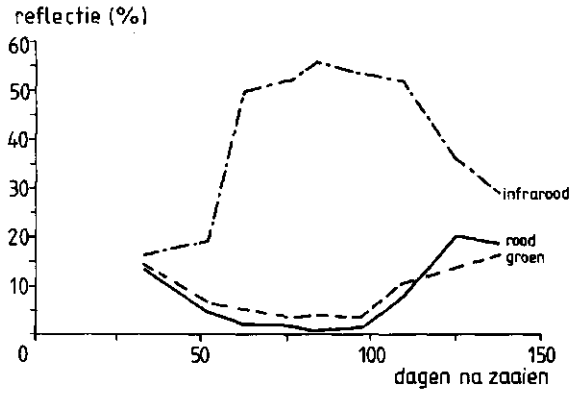
Om een indruk te krijgen van het spectrale gedrag van verschillende objecten onder verschillende condities, zal allereerst het reflectiepercentage voor enkele objecten als functie van de golflengte gegeven worden (spectrale signatuur; vergelijk eveneens hoofdstuk 5). Vervolgens zullen enkele resultaten bij proefvelden gegeven worden, waarbij het reflectiepercentage gegeven wordt als functie van de tijd voor verschillende behandelingen (temporele signatuur).
De bodem uit figuur 9-3 laat in het onderzochte deel van het spectrum



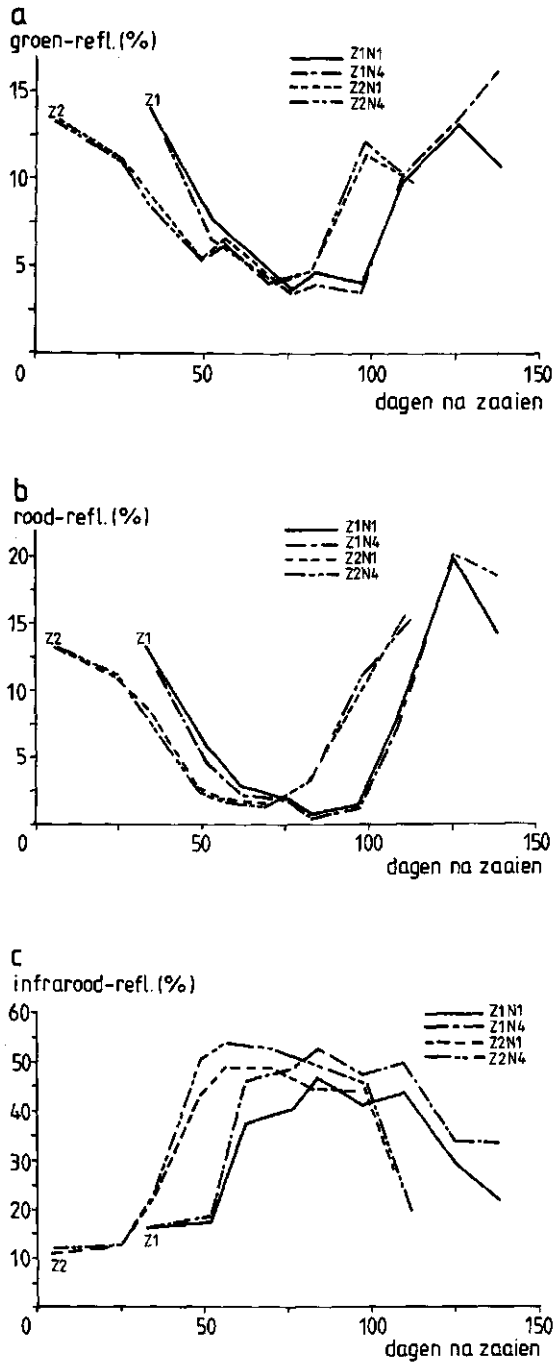

9-3 Spectrale reflectie van een groen gerstgewas vergeleken met de reflectie van droge en natte bodem (Veldspectrometer; ir. A.P. Minderhoudhoeve, Oost-Flevoland).

(0,4 – 1,0 µm) een constante, geringe toename in reflectiepercentage zien. De metingen zijn in het veld uitgevoerd met een veldspectrometer, zoals beschreven in Supplement 8. Een *natte bodem* heeft duidelijk een veel lager reflectiepercentage dan een *droge bodem*. Verder blijkt er een duidelijk contrast in reflectiepercentage te bestaan tussen kale bodem en *vegetatie* in het zichtbare (rood en groen) en in het nabij-infrarode gebied van het spectrum (zie ook de algemene spectrale reflectie-karakteristieken van vegetatie en bodem in Supplement 6). In het zichtbare deel treedt absorptie van straling door het chlorofyl (bladpigment) in de bladeren op, welke relatief vooral sterk in het rood is. Het gevolg is een laag reflectiepercentage door groene vegetatie in dit deel van het spectrum. In het nabij-infrarood is de absorptie van straling door vegetatie juist erg gering, waardoor het reflectiepercentage van vegetatie groter is dan dat van kale bodem.

Figuur 9-4 laat resultaten zien van het *verloop over het groeiseizoen* van het reflectiepercentage bepaald met behulp van multispectrale luchtfotografie voor een gerstgewas. De groen- en rood-reflectie vertoonden over het algemeen een vergelijkbaar patroon. Het reflectiepercentage in de zichtbare banden (groen en rood) daalde met




9-4 Reflectie-percentage in het groen, rood en nabij-infrarood als een functie van de tijd, voor een gerst-gewas onder normale teeltomstandigheden (ir. A.P. Minderhoudhoeve, 1982).



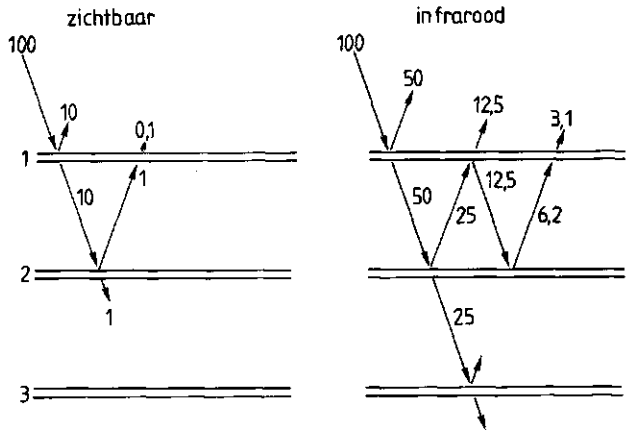

9-5 Reflectie-percentage als functie van de tijd in het (a) groen, (b) rood en (c) nabij-infrarood voor 2 zaaitijdstippen (Z1 = 26 Maart en Z2 = 22 April) en voor 2 stikstoftrappen (N1 = 0 kg N/ha en N4 = 60 kg N/ha) voor een gerstgewas (ir. A.P. Minderhoudhoeve, 1982). Eerste opnamedatum was 28 April. N.B. Op de horizontale as is de dag na zaaien, m.a.w. de groeidag, uitgezet. Bij eenzelfde groeidag is voor verschillende zaaitijdstippen de kalenderdag verschillend.

toenemende groei gedurende het begin van het groeiseizoen (dag 0-50). Tijdens de eerste opnamedatum was er alleen kale bodem aanwezig, hetgeen resulteerde in bijna gelijke reflectiepercentages in alle banden. Tijdens volledige bedekking van de bodem (dag 50-75) bleef het reflectiepercentage in de zichtbare banden vrijwel constant. Aan het eind van het groeiseizoen (vanaf dag 75) nam dit reflectiepercentage weer toe ten gevolge van veroudering (vergeling) van het gewas. In het algemeen waren de effecten in de nabij-infrarode band tegengesteld aan die in de zichtbare banden.
Uit figuur 9-5 blijkt dat er een duidelijk effect van het zaaitijdstip op de reflectiepercentages aanwezig was. Het laatgezaaide gewas toonde een snellere ontwikkeling ten gevolge van hogere temperaturen tijdens de kieming en de begingroei dan het vroeggezaaide gewas, resulterend in een korter groeiseizoen en in een verschuiving van de responsie qua reflectiepercentages. Verder blijkt uit figuur 9-5 dat er een duidelijk negatief effect van de stikstofbemesting op de reflectiepercentages in de zichtbare banden was, hoewel de verschillen klein waren. Voor het nabij-infrarood-reflectiepercentage was er een positieve invloed van de stikstofbemesting gedurende het gehele groeiseizoen.

## 9.5 Modelleren van de gewasreflectie

### 9.5.1 Inleiding

Door een gewas opgebouwd te denken uit horizontale (blad-)lagen, kan men een indruk krijgen welke gewaskarakteristieken direct m.b.v. reflectiemetingen geschat zouden kunnen worden (figuur 9-6).

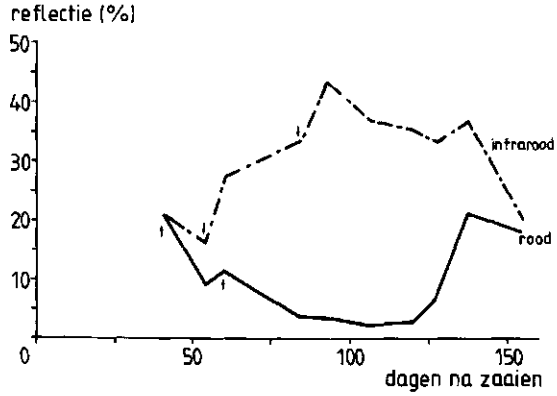



9-6 Schematische voorstelling van reflectie en transmissie van straling door gewaslagen in het zichtbare en nabij-infrarode gebied, respectievelijk.

In het *zichtbare deel* van het electromagnetische spectrum zijn de reflectie en de transmissie van een groen blad 10% of minder (zie ook figuur 5-1). Dit betekent dat de absorptie tenminste 80% bedraagt. Indien 10% van de inkomende straling door het bovenste blad gereflecteerd wordt, dan zou de bijdrage tot de totale gemeten reflectie

van een tweede blad onder dat bovenste blad slechts ongeveer 1% van de reflectie van dat bovenste blad bedragen. Voor een gewas betekent dit dat in het zichtbare gebied alleen de reflectie van de bovenste bladlaag de totale reflectie van dat gewas bepaalt (deze redenering klopt met de visuele waarneming van een plant). Dit betekent dat het grote contrast in reflectie van kale bodem en vegetatie in het zichtbare gebied bij uitstek geschikt zal zijn om de *bedekkingsgraad* te schatten, omdat deze reflectie een minimale waarde (maximale absorptie) zal bereiken op het moment van volledige bedekking.
In het *nabij-infrarode deel* van het spectrum, zijn de reflectie en transmissie van een groen blad elk ongeveer 50% (zie ook figuur 5-1) en vindt er vrijwel geen infrarood-absorptie door een groen blad plaats. In deze situatie dragen bladeren of gewaslagen onder de bovenste laag significant bij aan de totale gemeten reflectie. In het eenvoudige geval dat reflectie en transmissie beide 50% bedragen, is de bijdrage van een tweede blad (of bladlaag) ongeveer 15% van de inkomende staling, hetgeen niet te verwaarlozen is. De bijdrage van daaropvolgende bladeren (of lagen) neemt exponentiëel af. Deze meervoudige reflectie geeft aan dat de infrarood-reflectie vooral geschikt zal zijn om de *LAI* te schatten ('het aantal bladlagen tellen').
Deze voorstellingen zijn een oververeenvoudiging van de werkelijkheid, maar ze verklaren het algemene concept.

Bij het modelleren van de relatie tussen reflectie en gewaskenmerken moeten een aantal verstorende factoren beschouwd worden. Een van die factoren is de *bodemreflectie*. Deze reflectie wordt in sterke mate bepaald door het vochtgehalte van de bodem. Dit wordt in figuur 9-7 verduidelijkt aan de hand van reflectiemetingen in het rood en infrarood aan een gerstgewas (in een ander groeiseizoen t.o.v. figuren 9-4 en 9-5). De invloed van het vochtgehalte op de reflectie in beide banden was hetzelfde. Het reflectiepercentage was relatief laag bij een hoog vochtgehalte van de bodem (dag 54 en 84 na zaaien) en relatief hoog bij een laag vochtgehalte van de bodem (dag 40 en 60 na zaaien), zie de pijltjes in figuur 9-7.




9-7 Reflectie-percentage in het rood en infrarood als functie van de tijd (gerst, ir. A.P. Minderhoudhoeve, 1983). Een pijltje omhoog betekent 'droge bodem'; een pijltje omlaag betekent 'natte bodem'.

De bodemreflectie heeft een grote invloed op de relatie tussen reflectie en bedekkingsgraad en op de relatie tussen reflectie en LAI. Bij een lage bedekkingsgraad draagt de bodemreflectie sterk bij tot de totale gemeten reflectie in de verschillende spectrale banden. Voor een gegeven bodemsoort zal het vochtgehalte van de bodem de belangrijkste factor zijn die de bodemreflectie bepaalt. Het is belangrijk om te weten op welke wijze het vochtgehalte van de bodem de bodemreflectie beïnvloedt en in hoeverre deze beïnvloeding afhangt van de golflengte in het van belang zijnde deel van het spectrum.
Een toename in vochtgehalte van de bodem doet de bodemreflectie dalen (Bowers & Hanks, 1965). Echter, het relatieve effect van het vochtgehalte op de reflectie bij verschillende golflengtes is gelijk. Janse & Bunnik (1974) vonden dat de reflectie afnam bij een toename van het vochtgehalte van de bodem, maar dat de mate van afname bijna onafhankelijk van de golflengte was in het traject tussen 0,4 en 1,0 µm voor een zandgrond. Dit betekent dat de verhouding in reflectie van twee spectrale banden in dit traject bijna onafhankelijk van het vochtgehalte van de bodem was. Resultaten verkregen door Condit (1970) en Stoner et al. (1980) bevestigen dat de verhouding in reflectie van twee banden onafhankelijk is van het vochtgehalte van de bodem.

### 9.5.2 Indices voor het schatten van de LAI

De groen-, rood- en infrarood-reflectiepercentages kunnen gebruikt worden als variabelen om bijvoorbeeld de LAI te schatten. Recent is veel onderzoek gericht geweest op het vaststellen van vegetatiekenmerken, zoals biomassa en LAI, d.m.v. combinaties van reflectiepercentages of digitale pixelwaarden van vegetaties in verschillende spectrale banden. Een zodanige combinatie van reflectiewaarden, *vegetatie-index* genaamd, dient tevens om te corrigeren voor ongewenste invloeden van verschillen in bodemreflectie of atmosferische omstandigheden op de resultaten. Dit soort verstoringen zijn vooral ongewenst bij ruimtelijke en multitemporele analyses. Een vegetatie-index voor het schatten van de LAI moet bovendien nog gevoelig zijn voor veranderingen in LAI bij volledig bedekte bodem (LAI groter dan 2 à 3). Dit betekent dat de infrarood-reflectie een centrale rol zal spelen in zo'n index (zie paragraaf 9.5.1).
Het eerste onderzoek naar vegetatie-indices betrof de *infrarood/rood verhouding* (Landsat-MSS band 7/band 5; zie hoofdstuk 7) door Rouse et al. (1973, 1974). Rouse en collega's vonden in hun onderzoek dat deze ratio geschikt was voor het schatten van gewaskenmerken vanwege gedeeltelijke correctie voor zonnestand en atmosferische invloed bij toepassing op satelliet-data (o.a. Landsat-MSS). Dezelfde auteurs gebruikten voor hetzelfde doel ook een index die in de literatuur vaak aangeduid wordt met de *'vegetation index'* of *'normalized vegetation index'* (NVI = MSS(7-5)/(7+5) voor Landsat-MSS als voorbeeld; of algemener NVI = (infrarood-rood)/(infrarood+rood)). Om negatieve waarden te voorkomen werd voor practische toepassingen ook wel een getransformeerde vegetatie-index (*'transformed vegetation index'* TVI = $\sqrt{(VI+0.5)}$) gebruikt. Wiegand et al. (1974) relateerden als eersten

spectrale data aan de LAI. Zij concludeerden dat Landsat-MSS(7-5) en MSS(5/7) in combinatie met MSS7 en MSS6 banden in de praktijk geschikt waren als indicatoren voor bodembedekking en plantdichtheid. Simulaties van Bunnik (1978, 1981) tonen aan dat dit soort indices wel geschikt zijn om de bedekkingsgraad te schatten, maar dat ze weinig gevoelig zijn voor variaties in LAI nadat volledige bodembedekking opgetreden is.

Om een index te vinden die onafhankelijk is van de bodeminvloed, hebben Richardson & Wiegand (1977) de zogenaamde *'perpendicular vegetation index'* (PVI = $\sqrt{(MSS5_s - MSS5_v)^2 + (MSS7_s - MSS7_v)^2}$ met s = bodem en v = vegetatie) geïntroduceerd. Zij vonden dat de Landsat-MSS digitale data van kale bodem in een grafiek van band 7 tegen band 5 op een rechte lijn lagen. Een toename in hoeveelheid vegetatie kwam overeen met een verplaatsing van de digitale waarde loodrecht op zo'n zogenaamde bodemlijn in een dergelijke grafiek (vandaar 'perpendicular'). Een soortgelijke benadering om variaties in bodeminvloed te onderdrukken is ontwikkeld door Kauth & Thomas (1976). Zij hebben een lineaire transformatie in de vier-dimensionale dataruimte van Landsat-MSS metingen voor landbouwgebieden met verschillende bodemsoorten toegepast. Toepassing van de transformatie op de vier Landsat-1-MSS banden resulteerde in een zogenaamde *'brightness index'* gedomineerd door bodemverschillen (soil brightness = 0,43 MSS4 + 0,63 MSS5 + 0,59 MSS6 + 0,26 MSS7) en een zogenaamde *'greenness index'* gedomineerd door groene vegetatie (greenness = -0,29 MSS4 – 0,56 MSS5 + 0,60 MSS6 + 0,49 MSS7). Het grote probleem bij al deze indices is dat de wiskundige beschrijving van de relatie tussen zo'n index en bijvoorbeeld LAI verschilt van auteur tot auteur, omdat deze meestal empirisch bepaald wordt. Dit maakt een vergelijking van resultaten van verschillende herkomst erg lastig.

### 9.5.3 Reflectiemodellen

Het belangrijkste doel van fysische reflectiemodellen, die geschikt zijn voor landbouwgewassen, is de complexe interactie tussen zonnestraling en de planten beter te begrijpen. In principe zijn er twee soorten fysische reflectiemodellen: *numerieke en analytische modellen.* Bunnik (1984) heeft hiervan een uitgebreid overzicht gegeven.

Een voorbeeld van een numeriek model is het model dat door Idso & De Wit (1970) beschreven is en waarin het stralingstransport binnen een gewas bepaald wordt door verstrooiing en absorptie door afzonderlijke bladlagen. Goudriaan (1977) heeft dit model verbeterd en uitgebreid door een numerieke oplossing voor opwaartse en neerwaartse diffuse stralingsstromen (fluxen) te berekenen binnen negen sectoren van elke hemisfeer voor elke laag afzonderlijk.

Een van de eerste analytische modellen is beschreven door Allen & Richardson (1968). Dit is gebaseerd op een theorie van Kubelka & Munk (1931), die het transport van een isotrope, diffuse flux in een perfect diffuus medium beschrijft. In het analytische model worden opwaartse en neerwaartse fluxen beschreven door middel van differentiaalvergelijkingen. Allen et al. (1969) hebben dit model

uitgebreid om ook de verstrooiing van directe zonneflux in het model te betrekken. Het eerste analytische model dat zowel de geometrie van de belichting als die van de waarneming in het model betrekt, is ontwikkeld door Suits (1972). Dit is een uitbreiding van het model van Allen en collega's. Het model van Suits maakt tevens gebruik van geometrische en optische eigenschappen van het gewas. Indien modelsimulaties uitgevoerd worden voor variërende kijkrichting, dan blijkt het model van Suits teveel vereenvoudigingen te bevatten (Verhoef & Bunnik, 1981). Daarom heeft Verhoef (1984) het model van Suits verder uitgebreid door verstrooiings- en uitdovings-functies te gebruiken voor gewaslagen die opgebouwd waren uit bladeren ingedeeld in een groot aantal klassen voor de bladhoek. Het model van Suits maakte alleen gebruik van horizontale en verticale componenten van de bladeren. Het model van Verhoef staat bekend als het *SAIL-model* ('Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves').
Bovengenoemde gecompliceerde, fysische reflectiemodellen simuleren de reflectie meestal voor variërende gewaskenmerken. Ze zijn lastig te inverteren en te gecompliceerd voor practische toepassingen. Echter ook al streeft men naar een eenvoudige functie tussen reflectie en LAI, men kan toch het beste uitgaan van een fysische basis. Daartoe zal in de volgende paragraaf als voorbeeld in het kort een vereenvoudigd, semi-empirisch, reflectiemodel voor het schatten van de LAI beschreven worden (zie voor een uitgebreide beschrijving: Clevers, 1986).

### 9.5.4 Eenvoudig reflectiemodel (CLAIR-model)

Allereerst wordt een *schijnbare bedekkingsgraad* geïntroduceerd. Dit is de bedekkingsgraad waarmee in de remote sensing gewerkt kan worden. Als kale bodem wordt daarbij die bodem, die door de zon belicht wordt én door de sensor rechtstreeks waargenomen wordt, beschouwd. Voor het speciale geval dat de sensor verticaal naar beneden gericht is, betekent dit dus dat de schijnbare bedekkingsgraad gedefiniëerd wordt als de verticale projectie van groene vegetatie met het relatieve oppervlak van de schaduw inbegrepen, relatief ten opzichte van het totale bodemoppervlak (in deze definitie hangt de bedekkingsgraad dus af van de positie van de zon). Het door Clevers afgeleide reflectiemodel is vervolgens gebaseerd op het uitdrukken van de gemeten reflectie als de *samengestelde reflectie* van planten en bodem: het gemeten reflectiepercentage in de verschillende banden is een lineaire combinatie van de schijnbare bedekkingsgraad en zijn complement met als respectievelijke coëfficiënten de reflectiepercentages van plant en bodem:

$$r = r_v \cdot B + r_s \cdot (1 - B) \tag{9.3}$$

r = totale gemeten reflectiepercentage
$r_v$ = reflectiepercentage van de vegetatie
$r_s$ = reflectiepercentage van de bodem
B = schijnbare bedekkingsgraad.

Om de LAI te schatten wordt een *gecorrigeerde infrarood-reflectie*

berekend door de bijdrage van de bodem in mindering te brengen op het gemeten reflectiepercentage:

$$r' = r - r_s \cdot (1 - B) = r_v \cdot B \tag{9.4}$$

r' = gecorrigeerd reflectiepercentage.
Deze gecorrigeerde reflectie is dus de reflectie die men gekregen zou hebben met een zwarte bodemachtergrond.
Voor het reflectiepercentage in een nabij-infrarode band geldt bijvoorbeeld (benedenindex ir):

$$r'_{ir} = r_{ir} - r_{s,ir} \cdot (1 - B) \tag{9.5}$$

Voor het reflectiepercentage in een rode band geldt op analoge wijze (index r):

$$r'_r = r_r - r_{s,r} \cdot (1 - B) \tag{9.6}$$

Om een nauwkeurige schatting van de LAI te krijgen moet men ofwel het reflectiepercentage van de bodem kennen of meten ofwel men moet een relatie afleiden die minder gevoelig is voor verschillen in bodemreflectie (ten gevolge van verschillen in bodemvochtgehalte).
Zoals eerder gezien blijkt voor vele bodems de verhouding tussen infrarood- en rood-reflectie van de bodem constant en onafhankelijk van het vochtgehalte van de bodem te zijn:

$$r_{s,ir}/r_{s,r} = C \tag{9.7}$$

Door combineren van vergelijkingen (9.5), (9.6) en (9.7) krijgt men:

$$r'_{ir} - C \cdot r'_r = r_{ir} - C \cdot r_r \tag{9.8}$$

De gecorrigeerde infrarood-reflectie in vergelijking (9.5) zal veel groter zijn dan de gecorrigeerde rood-reflectie in vergelijking (9.6), zodat als goede benadering geldt:

$$r'_{ir} = r_{ir} - C \cdot r_r \tag{9.9}$$

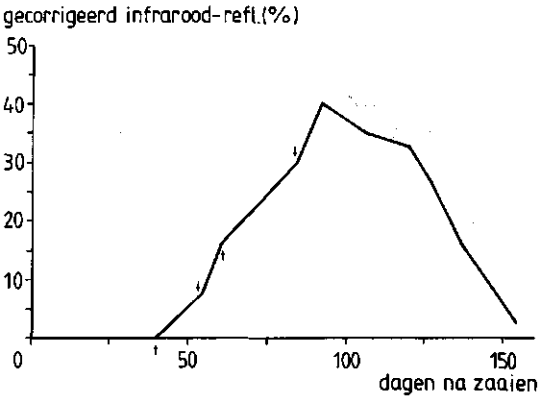
Clevers (1986) heeft vervolgens een semi-empirische relatie afgeleid tussen dit gecorrigeerd infrarood-reflectiepercentage (die te beschouwen is als een vegetatie-index) en de LAI:

$$\text{LAI} = -1/\alpha \cdot \ln(1 - r'_{ir}/r_{\infty,ir}) \tag{9.10}$$

met parameter $r_{\infty,ir}$ als asymptotische waarde voor de gecorrigeerde infrarood-reflectie bij zeer grote LAI en $\alpha$ als combinatie van extinctie- en verstrooiings-coëfficiënten in het gewas. Beide parameters moeten empirisch geschat worden aan de hand van een *trainingsset* (vgl. ook

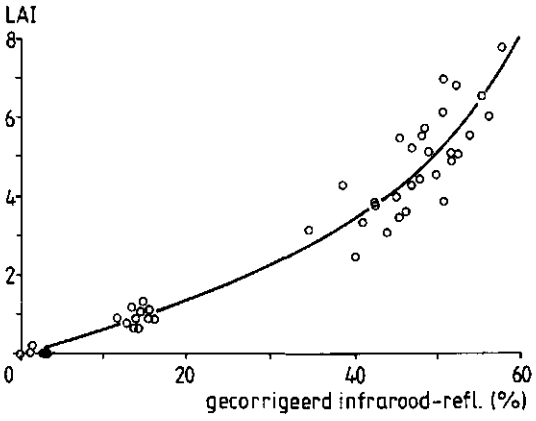
paragraaf 13.2.1), maar ze hebben een fysische basis. Vergelijking (9.10) is de inverse van een bijzonder geval van de Mitscherlich functie. De combinatie van vergelijking (9.9) en (9.10) vormt het vereenvoudigd, semi-empirisch, reflectiemodel: CLAIR-model ('Clevers Leaf Area Index by Reflectance'-model).
De vegetatie-index beschreven in vergelijking (9.9) lijkt op de 'greenness index' van Kauth & Thomas (1976) voor het twee-dimensionale geval, met dien verstande dat zij uitgaan van digitale pixelwaarden (paragraaf 9.5.2). De aanname in vergelijking (9.7) beschrijft een bodemlijn, die aangeduid kan worden door de vector (1, C) in een rood-infrarood grafiek. De greenness index is orthogonaal ten opzichte van deze lijn gedefiniëerd: greenness = $r_{ir}$-C.$r_r$. Bovendien lijkt de vegetatie-index in vergelijking (9.9) ook op de 'perpendicular vegetation index' van Richardson & Wiegand (1976). Onder de aanname dat de bodemlijn door de oorsprong gaat kan men aantonen dat de PVI gelijk is aan $\sqrt{(1/(C^2+1))}\cdot(r_{ir} - C\cdot r_r)$. Deze index is gelijk aan de 'greenness index' na normalisatie (op lengte 1 brengen).

Als voorbeeld is in figuur 9-8 de gecorrigeerde infrarood-reflectie als functie van de tijd gegeven voor het in figuur 9-7 gebruikte gerstgewas. De gecorrigeerde infrarood-reflectie is bepaald als het verschil tussen infrarood-en rood-reflectie in figuur 9-7. Voor de bodem op de ir. A.P. Minderhoudhoeve kan voor C in vergelijking (9.7) de waarde 1 gebruikt worden (deze waarde is verkregen door op willekeurige tijdstippen de bodemreflectie te bepalen). De storende invloed van het vochtgehalte van de bodem tijdens het begin van het groeiseizoen is geëlimineerd (vergelijk infrarood- en rood-reflectie in figuur 9-7).




9-8 Gecorrigeerd infrarood-reflectiepercentage als functie van de tijd (gerst, ir. A.P. Minderhoudhoeve, 1983). Een pijltje omhoog betekent 'droge bodem'; een pijltje omlaag betekent 'natte bodem'.

Tot slot geeft figuur 9-9 een voorbeeld van de regressie van de LAI op de gecorrigeerde infrarood-reflectie voor een gerstgewas in het vegetatieve stadium. De bruikbaarheid in de praktijk van het hiervoor beschreven model is uitvoerig beschreven door Clevers (1986).




9-9 Regressie van LAI op gecorrigeerde infrarood-reflectie voor een gerstgewas (vegetatief stadium).

## 9.6 Literatuur

1 Allen, W.A., T.V. Gayle & A.J. Richardson, 1969. Interaction of light with a compact leaf. J. Opt. Soc. Am. 59: 1376-1379.

2 Allen, W.A. & A.J. Richardson, 1968. Interaction of light with a plant canopy. J. Opt. Soc. Am. 58: 1023-1028.

3 Bowers, S.A. & R.J. Hanks, 1965. Reflection of radiant energy from soils. Soil Science 100: 130-138.

4 Bunnik, N.J.J., 1978. The multispectral reflectance of shortwave radiation by agricultural crops in relation with their morphological and optical properties. Thesis, Meded. Landbouwhogeschool Wageningen 78-1, 175 blz.

5 Bunnik, N.J.J., 1981. Fundamentals of remote sensing. Relations between spectral signatures and physical properties of crops. In: Application of Remote Sensing to Agricultural Production Forecasting, ed. A. Berg, A.A. Balkema, Rotterdam, p. 47-81.

6 Bunnik, N.J.J., 1984. Review of models and measurements of multispectral reflectance by plant canopies. Recommendations for future research. Publ. NLR MP 84039 U, 11 pp.

7 Clevers, J.G.P.W., 1986. Application of remote sensing to agricultural field trials. Thesis, Agricultural University Wageningen Papers 86-4, 227 blz.

8 Condit, H.R., 1970. The spectral reflectance of American soils. Photogram. Eng. Rem. Sens. 36: 955-966.

9 Egan, W.G., 1985. Photometry and polarization in remote sensing. Elsevier Science Publishing Co., Inc., New York.

10 Goudriaan, J., 1977. Crop micrometeorology: a simulation study. Thesis Landbouwhogeschool, Wageningen, 249 pp.

11 Idso, S.B. & C.T. De Wit, 1970. Light relations in plant canopies. Appl. Opt. 9: 177-184.

12 Janse, A.R.P. & N.J.J. Bunnik, 1974. Reflectiespectra van enige Nederlandse bodemmonsters bepaald met de NIWARS-veldspectrometer. NIWARS-publ. 18, 21 blz.

13 Kauth, R.J. & G.S. Thomas, 1976. The tasseled cap – A graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. Proc. Symp. on Mach. Proc. Rem. Sens. Data, Purdue Univ., W-Lafayette, Ind., 4B: 41-51.
14 Kodak data for aerial photography, 1976. Kodak publ. nr. M-29, 92 blz.
15 Kubelka, P. & F. Munk, 1931. Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche. A. Techn. Physik 11: 593-601.
16 Manual of Remote Sensing, 1983. Second edition. (R.N. Colwell, ed.), American Society of Photogrammetry, Falls Church, Virginia.
17 Richardson, A.J. & C.L. Wiegand, 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. Photogram. Eng. Rem. Sens. 43: 1541-1552.
18 Rouse, J.W. Jr., R.H. Haas, J.A. Schell & D.W. Deering, 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Earth Res. Techn. Satellite-1 Symp., Goddard Space Flight Center, Washington D.C., blz. 309-317.
19 Rouse, J.W. Jr., R.H. Haas, D.W. Deering, J.A. Schell & J.C. Harlan, 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. NASA/GSFC Type III Final Report, Greenbelt, Md., 371 blz.
20 Slater, P.N., 1980. Remote sensing: optics and optical systems. Addison-Wesley Publ. Comp., Reading, Massachusetts.
21 Stoner, E.R., M.F. Baumgardner, L.L. Biehl & B.F. Robinson, 1980. Atlas of soil reflectance properties. Agric. Exp. Station, Purdue Univ., W-Lafayette, Indiana, Res. Bull. 962, 75 blz.
22 Suits, G.H., 1972. The calculation of the directional reflectance of a vegetative canopy. Rem. Sens. Envir. 2: 117-125.
23 Verhoef, W., 1984. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modelling: The SAIL model. Rem. Sens. Envir. 16: 125-141.
24 Verhoef, W. & N.J.J. Bunnik, 1981. Influence of crop geometry on multispectral reflectance determined by the use of canopy reflectance models. Proc. Int. Coll. on Signatures of Remotely Sensed Objects, Avignon, France, blz. 273-290.
25 Wiegand, C.L., H.W. Gausman, J.A. Cuellar, A.H. Gerbermann & A.J. Richardson, 1974. Vegetation density as deduced from ERTS-1 MSS response. Third ERTS Symp., NASA-SP-351, Vol. I, Sect. A, blz. 93-116.

Documentatie

# 10 De radarreflectie van gewassen

G.P. de Loor

## 10.1 Inleiding; definities

De *radardoorsnede* σ (in $m^2$) van een voorwerp wordt gedefiniëerd m.b.v. de zgn. *radarvergelijking* (zie paragraaf 8.2; Ulaby et al., 1982). Omdat de bestraling door een radar *coherent* is en de gebruikte golflengtes vergelijkbaar zijn met de *afmetingen* van het waargenomen voorwerp, kan deze radardoorsnede sterk afwijken van de geometrische afmetingen en de vorm van het voorwerp zoals wij die met het oog waarnemen. Alleen voor een betrekkelijk beperkt aantal vormen kan de radardoorsnede *exact* worden berekend. Voorbeelden zijn de *bol* en de *hoekreflector*. Deze beiden worden dan ook veel gebruikt als *referentie* bij calibratie-metingen (ijking).
Bij het waarnemen van land- en zee-oppervlakken krijgen we te maken met *samengestelde objecten*, die bovendien groter zijn dan de antennebundel (zgn. gedistribueerde doelen). In tegenstelling tot het meten van geïsoleerde objecten moet nu de radardoorsnede gedefiniëerd worden als radardoorsnede per eenheid van oppervlakte (1 $m^2$; dus als een reflectiecoëfficiënt) om onafhankelijk te worden van de grootte van het belichte gebied (zie ook paragraaf 8.3).
We definiëren nu de *differentiële radardoorsnede* ('differential scattering coefficient', Ulaby et al., 1982) als

$$\sigma^0 = \sigma / A_k \tag{10.1}$$

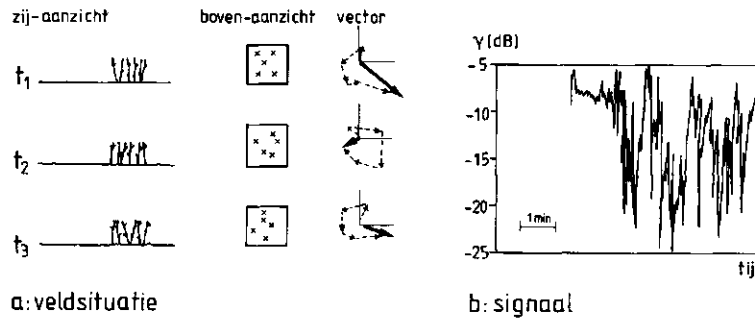
waarbij σ wordt gedefiniëerd door de radarvergelijking (formule 8.8) en $A_k$ het door de radar belichte oppervlak van de aarde voorstelt (= de oppervlakte van de resolutiecel).
Naast de differentiële radardoorsnede is een tweede maat voor de echosterkte in gebruik, namelijk de *verstrooiingscoëfficiënt* γ. Deze γ is de radardoorsnede per eenheid van in de zendrichting geprojecteerd oppervlak.

$$\gamma = \sigma/A_i \text{ waarin } A_i = A_k \cdot \sin\theta_g \qquad (10.2)$$

De relatie tussen $\sigma^\circ$ en $\gamma$ wordt dan gegeven door:

$$\sigma^\circ = \gamma \sin\theta_g \text{ of } \sigma^\circ = \gamma \cos\theta_i$$

met $\theta_g$: de hoek t.o.v. de horizon (scheerhoek) en $\theta_i$: de invalshoek (t.o.v. de verticaal) (figuur 10-2). Alhoewel beide maten voor de echosterkte in de literatuur veelvuldig voorkomen is $\gamma$ te prefereren daar het een constante functie van de hoek t.o.v. de horizontaal (scheerhoek) is voor zeer ruwe oppervlakken.



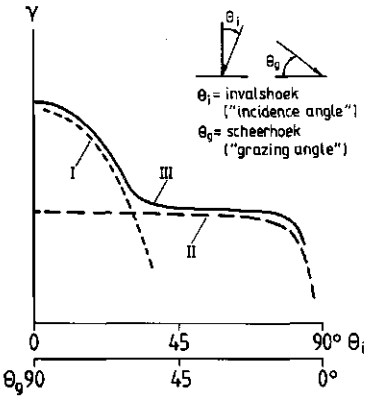

10-1 Coherente bestraling zorgt voor variatie in radarreflectie bij samengestelde reflectoren.

Willen we $\sigma^\circ$ (of $\gamma$) meten dan moet rekening worden gehouden met het feit dat de belichting coherent is (zie figuur 10-1). Bij veel objecten, waaronder vegetaties, hebben we te maken met eerder genoemde *gedistribueerde doelen*: samengestelde reflectors (stengels en bladeren) die bewegen in de wind. De totale echo ('backscatter', verstrooiing of in het algemeen reflectie) binnen een resolutiecel komt dan van steeds wisselende combinaties van reflectoren en met wisselende sterktes (vectoriële sommatie) zoals figuur 10-1 aangeeft. Dit veroorzaakt het bekende 'spikkelige' karakter van veel radarbeelden ('speckle'). Om de radar-verstrooiing $\sigma^\circ$ (of $\gamma$) nauwkeurig te bepalen moet hiermede rekening worden gehouden en zal steeds *gemiddeld* moeten worden over voldoende onafhankelijke waarnemingen, bijv. door *langer* waar te nemen (figuur 10-1b) of over een *groter oppervlak* (door de meetapparatuur te verplaatsen).

## 10.2 De radarreflectie

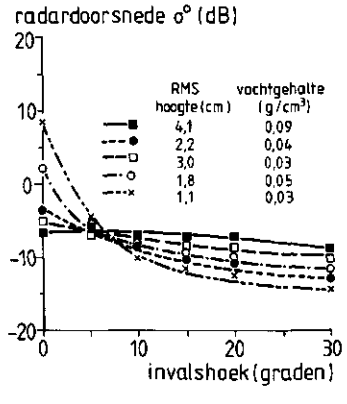
10.2.1 Hoek-afhankelijkheid

Cosgriff et al. (1960) gebruikten ook de radarreflectie (beter: verstrooiingscoëfficiënt) $\gamma$, omdat deze grootheid redelijk constant bleef als functie van de *invalshoek* in veel van hun metingen aan natuurlijke oppervlakken. Dit zogenaamde 'Lamberts' gedrag geldt echter lang niet overal. Als functie van de invalshoek kan de radar-verstrooiing worden



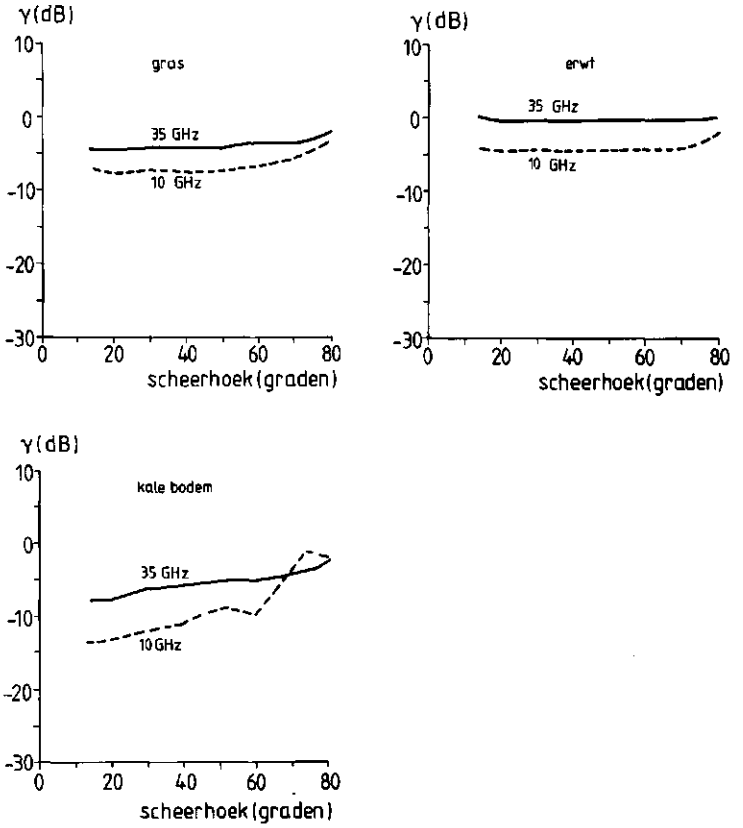

**10-2** Afhankelijkheid van de radarreflectie van de invalshoek. I: speculair deel; II: diffuus deel; III: totaal.

beschreven als bestaande uit twee componenten: een *speculair* en een *diffuus* deel (zie figuur 10-2). Het speculaire deel is belangrijk bij loodrecht inzien, terwijl het diffuse deel belangrijk is voor de overige hoeken. Hoe 'ruwer' een oppervlak wordt, hoe belangrijker het diffuse deel wordt, terwijl voor vlakke oppervlakken het speculaire deel overheerst. Voor een groep oppervlakken met verschillende ruwheid zal er ergens een '*cross-over point*' zijn, zoals figuur 10-3 fraai demonstreert.




**10-3** Hoek-afhankelijkheid van de radardoorsnede $\sigma^0$ voor vijf kale velden met verschillende ruwheden bij 4,25 GHz, horizontale polarisatie (bron: Ulaby & Bare, 1978). Het vochtgehalte betreft de bovenste 1 cm van de bodem.

'*Ruwheid*' is frequentie afhankelijk. Een oppervlak kan als 'vlak' worden gedefiniëerd als de variaties er in onder ¼ λ blijven. Dit kan bijv. betekenen dat een oppervlak dat in de X-band (λ = 3 cm) 'ruw' is in de L-band (λ = 25 cm) als 'vlak' gezien wordt. Figuur 10-4 geeft hiervan mede een voorbeeld.
Naast de hier beschreven hoekafhankelijkheid (figuur 10-2) kan ook de onder een gewas liggende grond een rol in de totale radarreflectie spelen. Met name bij een lagere bedekkingsgraad en steilere invalshoeken (grote $\theta_g$, kleine $\theta_i$) zal dit het geval zijn. Hier komen we later op terug.




**10-4** Voorbeeld van een meting van $\gamma$ als functie van de scheerhoek $\theta_g$. Data ROVE-team, 3 juni 1980, horizontale polarisatie.

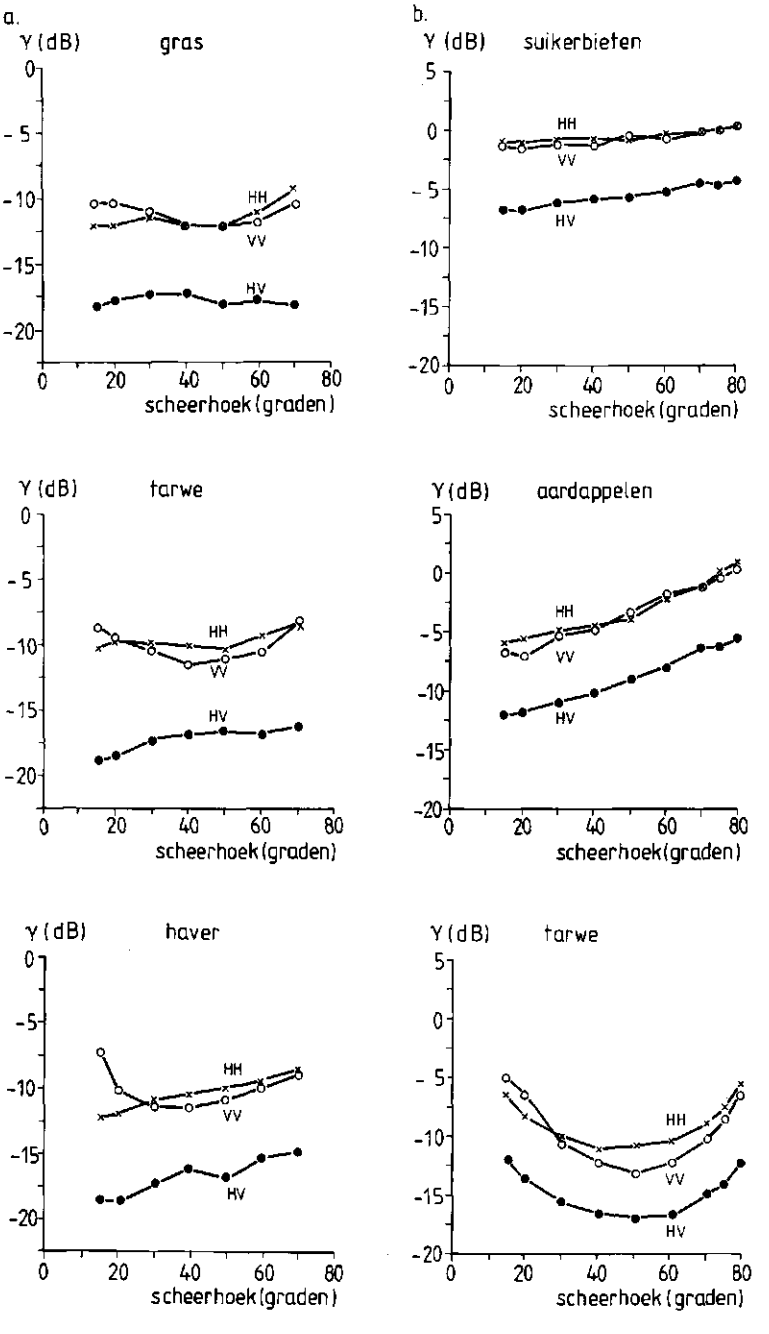
10.2.2 Afhankelijkheid van de polarisatie

De radarreflectie van sommige vegetatietypes is afhankelijk van de *polarisatie*. Dit geldt in het bijzonder voor de granen en voor gras (zie figuur 10-5).

10.2.3 Seizoens-afhankelijkheid

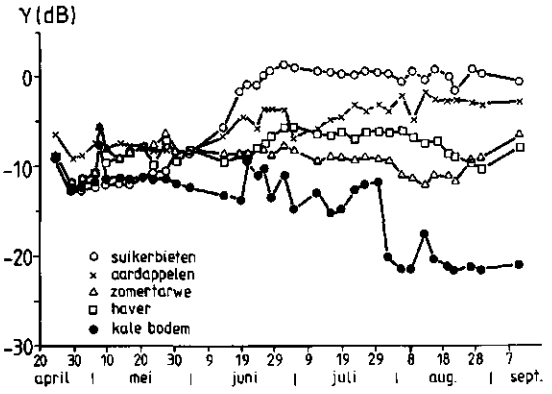
In figuur 10-6 wordt een voorbeeld gegeven van de *seizoensafhankelijkheid* van de radarreflectie van een aantal gewassen, zoals gemeten door het ROVE-team* bij 10 GHz en $\theta_g = 30°$. Tot begin juni was de bedekking laag, dus de reflectie van de bodem speelde de belangrijkste rol. Na die datum ontstonden er verschillen tussen de verschillende vegetatietypen. De piek in $\gamma$ op 7 mei is toe te schrijven aan regenval vlak voor de meting (hoge grondvochtigheid). Zulke pieken worden verderop in het seizoen uitgedempt door het vegetatiedek, maar blijven natuurlijk zichtbaar in de metingen aan kale grond. Zoals we uit figuur 10-6 kunnen zien was de totale variatie in $\gamma$ maar klein, in de orde van een 10 à 15 dB, en binnen dat bereik moet dus tussen gewassen of binnen gewassen (bijv. in het geval van ziekte of stress) door de radar kunnen worden gediscrimineerd.

* ROVE staat voor 'radaronderzoek vegetatie'. In deze werkgroep werken onderzoekers van diverse Nederlandse instellingen samen.

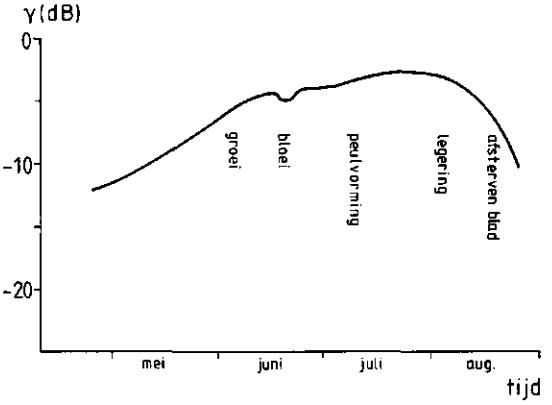



**10-5** Voorbeelden van data-series gemeten door het ROVE-team bij horizontale (HH), verticale (VV) en 'kruis' (HV) polarisatie, 10 GHz. **a**: 14 augustus 1975; **b**: juni 1981.

Vele tijdseries aan metingen staan ons thans ter beschikking door het werk van het Nederlandse ROVE-team. Analyse van deze curves toonde aan dat de vorm van deze curves typisch is voor een bepaald gewas. Groeistadia kunnen in zo'n curve worden aangegeven (zie figuur 10-7). Dit algemene gedrag kan van jaar tot jaar wat variëren, afhankelijk van

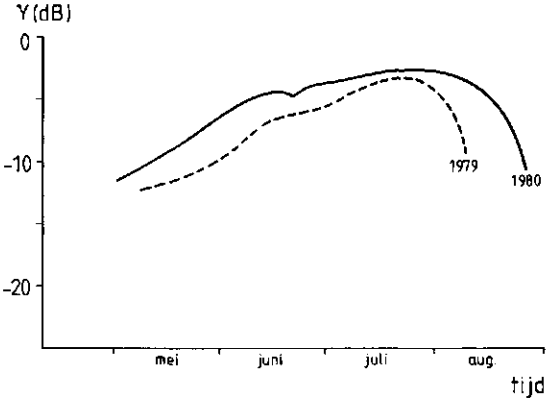



**10-6** Seizoens-afhankelijkheid van de radarreflectie. ROVE-data, 1980, horizontale polarisatie, $\theta_g = 30°$, 10 GHz.

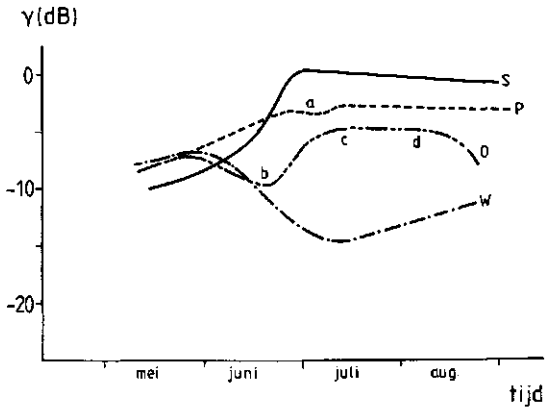



**10-7** De temporele radarsignatuur voor erwten. VV-polarisatie, $\theta_g = 20°$, 10 GHz.

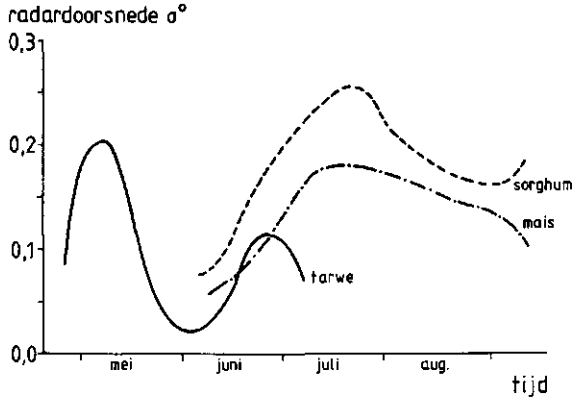
de van jaar tot jaar wat wisselende meteorologische omstandigheden (figuur 10-8). Dit heeft vooral invloed op de lengte van de curve, terwijl de vorm over het algemeen gelijk blijft. Zo kan voor elk gewas een algemene vorm worden gegeven voor deze *temporele signatuur*, zoals figuur 10-9 aangeeft. Vergelijken we deze curves met die gemeten in het




**10-8** De variatie in temporele radarsignatuur voor erwten t.g.v. wisselende meteorologische omstandigheden. VV-polarisatie, $\theta_g = 20°$, 10 GHz.




**10-9** Algemene vorm van de temporele radarsignatuur voor vier gewassen.
S: suikerbieten; P: aardappelen; W: tarwe; O: haver.
a: bloei; b: pluimen komen; c: begin afsterven bladeren; d: begin van legering.
10 GHz, $\theta_g = 50°$, verticale polarisatie.

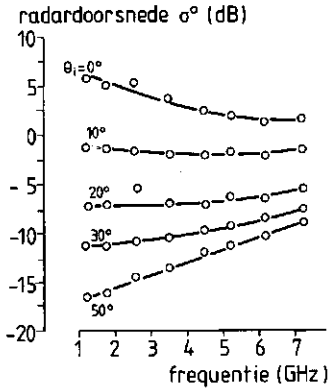



**10-10** Temporele radarsignatuur voor drie gewassen in Kansas (USA). 17 GHz, $\theta_g = 40°$, verticale polarisatie (bron: Ulaby & Bare, 1978). Opm.: as voor σ° is hier lineair en niet in dB.

buitenland (zie figuur 10-10), dan blijkt ook daar een zelfde *vorm* gevonden te worden, alleen zijn er verschillen t.a.v. tijdsduur en de plaats in de tijd. Dit is verklaarbaar, aangezien de groei van een gewas afhankelijk is van de plaats op aarde en de daar geldende meteorologische condities. Een en ander betekent natuurlijk ook, dat procedures voor gewasclassificatie en -discriminatie (hoofdstuk 13) zullen moeten verschillen naar de plaats op aarde.

### 10.2.4 Frequentie-afhankelijkheid

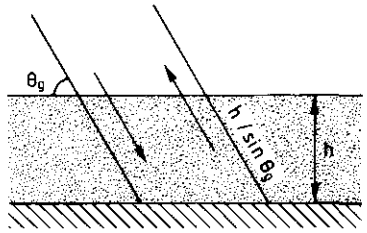
Omdat in het microgolfgebied geen sterke lijn-absorpties zijn te verwachten voor de componenten van een vegetatiedek zullen de variaties in de radarreflectie met de *frequentie* altijd geleidelijk en nooit abrupt zijn. Ruwheid zal daarbij een rol spelen (zie ook figuur 10-4) omdat elk gewas boven een bepaalde frequentie 'ruw' zal worden. Zodra dat het geval is zal de afhankelijkheid van de radarreflectie met de hoek afnemen (de diffuse component wordt het belangrijkst).
De invloed van de bodem zal ook veranderen met de frequentie. De dichtheid van de vegetatie neemt dan toe (de weglengte in golflengtes gemeten neemt toe met de frequentie). In figuur 10-11 wordt een voorbeeld gegeven van metingen gedaan bij de Universiteit van Kansas (Ulaby & Bare, 1978).




**10-11** Frequentie-afhankelijkheid van de radardoorsnede voor een combinatie van gewassen. HH-polarisatie
(bron: Ulaby & Bare, 1978).

## 10.3 Modellen

Er zijn ook *modellen* ontwikkeld om de radarreflectie te koppelen aan gewas- en bodemparameters. Wij zullen hier kort het semi-empirische model bespreken dat ontwikkeld is door Attema & Ulaby (1978), het zgn. *CLOUD-model*. Hierin wordt een gewas opgevat als een wolk van kleine waterdruppeltjes. De radarreflectie kan nu beschreven worden als te bestaan uit twee componenten: één t.g.v. de verstrooiing aan de waterdruppeltjes en één t.g.v. de reflectie aan de bodem onder het gewas. Figuur 10-12 schetst de geometrie. Om het model eenvoudig te




**10-12** Geometrie van het CLOUD-model
(bron: Hoekman, 1981).

houden worden de volgende vooronderstellingen gemaakt: (a) alle druppeltjes zijn gelijk en uniform verdeeld, (b) alleen enkelvoudige verstrooiing wordt meegenomen in de berekening, (c) de belangrijkste variabelen zijn de hoogte van de wolk (h = hoogte van het gewas) en haar dichtheid W, die geacht wordt gelijk te zijn aan de waterinhoud van het gewas in kg/m$^3$. Met $\eta$ de doorsnede per volume-eenheid (m$^2$/m$^3$), $\alpha$ de verzwakking per meter en N het aantal druppeltjes per m$^3$, krijgen we: $\eta = N\sigma$ (m$^{-1}$) en $\alpha = NQ$ (m$^{-1}$), waarbij $\sigma$ de radardoorsnede en Q de 'verzwakkings-doorsnede' zijn van één druppeltje. Met deze definitie kan de radarreflectie door de wolk zelf worden berekend door sommatie:

$$\gamma_{veg} = \frac{P_o}{P_z} \int_0^{h/\sin\theta_g} N\,\sigma \exp(-2\alpha z)\,dz \qquad (10.3)$$

waarbij $P_z$ de hoeveelheid invallend (toegevoerd) vermogen en $P_o$ de hoeveelheid gereflecteerd (ontvangen) vermogen is. Zo vinden we:

$$\begin{aligned}\gamma_{veg} &= N\sigma/2\alpha \cdot (1 - \exp(-2\alpha h/\sin\theta_g)) \\ &= \sigma/2Q \cdot \ (1 - \exp(-2\alpha h/\sin\theta_g))\end{aligned} \qquad (10.4)$$

Hierbij moet de bijdrage van de bodem nog worden opgeteld om tot de totale radarreflectie te komen. Uit metingen, onder meer door het ROVE-team, is gebleken dat de verstrooiing van een kale bodem kan worden benaderd met:

$$\gamma_{bodem} = G(\theta) \cdot \exp(Km_s) \qquad (10.5)$$

waarbij G(θ) de functionele relatie geeft tussen de reflectie en de invalshoek voor een droge bodem en exp(Km$_s$) geeft de invloed van het bodemvocht. K ligt tussen 0,5 en 0,7 afhankelijk van de bodem en m$_s$ is het volumetrisch vochtgehalte van de bodem. De reflectie van de bodem wordt verzwakt door het bovenliggend vegetatiedek, zodat we tenslotte vinden:

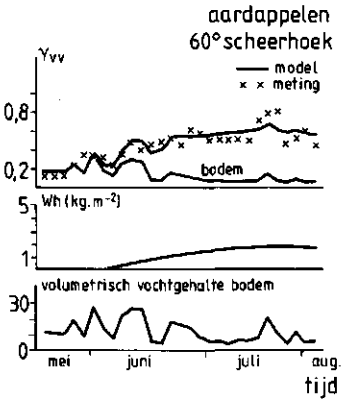
$$\begin{aligned}\gamma = (\sigma/2Q) \cdot [1 - \exp(-\mathrm{DWh}/\sin\theta_g)] + G(\theta) \cdot \exp(Km_s) \cdot \\ \cdot \exp(-\mathrm{DWh}/\sin\theta_g)\end{aligned} \qquad (10.6)$$

Deze formule kunnen we ook schrijven als:

$$\gamma = C \cdot (1 - \tau) + \gamma_{bodem} \cdot \tau \qquad (10.7)$$

met τ de 'doorlatendheid' van het vegetatiedek.

Bovenstaande formule bevat naast de grootheden W, h en m$_s$, die in het veld gemeten kunnen worden, de constantes: C, de radarreflectie van de vegetatie alleen en D, de tweeweg-verzwakking (demping) van de radargolf door het vegetatiedek. M.b.v. een rekenmethode, ontwikkeld door Hoekman (1981), was het mogelijk G(θ), C en D te bepalen voor een aantal gewassen uit de vele metingen van het ROVE-team. Figuur 10-13 geeft een voorbeeld hoe dan de verschillende componenten van de radarreflectie zichtbaar kunnen worden gemaakt en hoe zij door het seizoen variëren.
Met dit model zijn studies verricht om na te gaan in hoeverre bodemeigenschappen gemeten kunnen worden door een vegetatiedek heen (bodemvocht) en wat daarvoor de optimale radarfrequentie(s) en invalshoek zijn. Door parametrisatie van het model is ook bekeken welke frequenties en hoeken optimaal zijn om inlichtingen te verkrijgen over het vegetatiedek zelf.




**10-13** Gemeten data (kruisjes) vergeleken met het CLOUD-model (bron: Hoekman, 1981). Opmerking: de as voor $\gamma$ is hier lineair en dus niet in dB.

## 10.4 Enkele opmerkingen over beeldanalyse en classificatie

In de inleiding (en figuur 10-1) zagen we dat de nauwkeurigheid van een registratie (of meting) van $\sigma°$ ($\gamma$) afhangt van het aantal onafhankelijke waarnemingen n dat in één pixel ('picture element') kan worden gedaan (het 'spikkelig' karakter van radarbeelden). Aan de andere kant zagen we ook dat de onderlinge verschillen in de radarreflectie $\gamma$ ($\sigma°$) tussen gewassen maar klein zijn (figuur 10-6). Bij de bewerking van *radarbeelden*, bijv. voor classificatie, zal hiermee rekening moeten worden gehouden. Een pixelgewijze aanpak (zoals bij Landsat en SPOT gebruikt wordt) wordt bij radarbeelden dan meestal onmogelijk door deze 'spikkel'. Bij SEASAT bijv. is n = 4 (variatie in $\gamma$: $\pm$ 2,5 dB) en zelfs voor de Nederlandse digitale SLAR waarvoor n = 30 wordt de variatie nog bijna $\pm$ 1 dB. In het ROVE-team heeft men daar het volgende op gevonden. Door een *split-and-merge algoritme* (zie paragraaf 14.5) worden eerst de veldgrenzen in een landbouwgebied bepaald. Vervolgens wordt de gemiddelde radarreflectie *per veld* bepaald en met deze waarden wordt het *classificatie-algoritme* ingegaan. Succespercentages tot 90% blijken dan mogelijk.
Er zit nog een ander aspect aan de 'spikkel'. Eén van de sleutels voor het analyseren van beelden is '*textuur*'. Oppervlakkig gezien lijkt de 'spikkel' wel wat op textuur, maar is dat dus principieel niet. De invloed van de 'spikkel' valt te berekenen. Pas nadat dat gebeurd is zal men kunnen uitmaken of men werkelijk met textuur te maken heeft in een beeld (Churchill & Wright, 1984).

## 10.5 Literatuur

1 Attema, E.P.W. & F.T. Ulaby, 1978. Vegetation modelled as a water cloud. Radio Science 13: 357-364.
2 Churchill, P. & A. Wright, 1984. Human and automatic interpretation of radar images of land cover. In: Proc. EARSeL

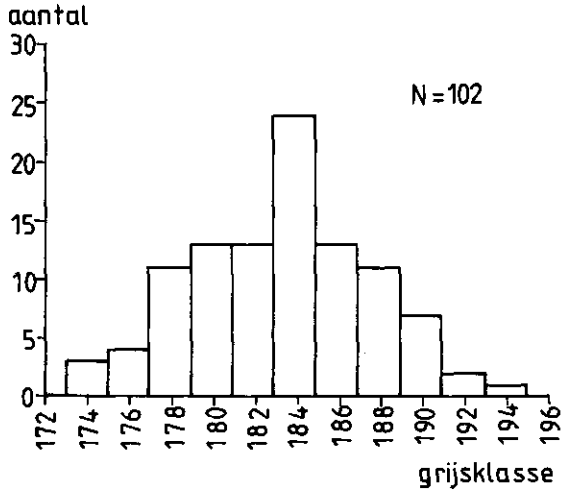
Workshop 'Microwave Remote Sensing Applied to Vegetation', Amsterdam 10 – 12 Dec. 1984; ESA publication SP-227, Jan. 1985, blz. 131-140.
3 Cosgriff, R.L. et al., 1960. Terrain scattering properties for sensor system design. Terrain Handbook II, Rapport Ohio State University, Publicatie 181.
4 Hoekman, D.H., 1981. Modelvorming radarbackscatter voor gewassen. Afstudeerscriptie, TH Delft, Nr. 05-1-533-AV-90 '81, 109 blz.
5 De Loor, G.P. et al., 1982. The Dutch ROVE Program. IEEE Trans. Geosci. and RS, vol. GE-20, No. 1, blz. 3-10.
6 Ulaby, F.T., R.K. Moore & A. Fung, 1982. Microwave Remote Sensing. Addison-Wesley Publ. Comp., Reading, Mass., 3 delen.
7 Ulaby, F.T. & J.E. Bare, 1978. Look direction modulation function of the radar backscattering coefficient of agricultural fields. Rapport Kansas University. RSL 360-3, Dec.

In paragraaf 11.2 zullen de met de X-band (zie figuur 3-5) SLAR empirisch bepaalde *radarsignaturen* van diverse boomsoorten worden besproken. Er zal worden gekeken naar de invloed van de scheerhoek t.o.v. de horizontaal op de parameter $\gamma$ (zie paragraaf 10.1), naar de variatie van $\gamma$ binnen een boomsoort en tussen boomsoorten en naar de seizoensinvloeden. Hierna komt de invloed van de kijkrichting op $\gamma$ ter sprake en zal een vergelijking met andere radarfrequentiebanden (L- en C-band) worden gemaakt. Tenslotte wordt de invloed van enkele objectparameters (bosopstandsparameters, genetische kenmerken) besproken aan de hand van een aantal voorbeelden.
In paragraaf 11.3 zullen een aantal experimentele metingen worden besproken die tot doel hebben het inzicht in het radarreflectie-mechanisme van bossen te vergroten ten behoeve van de ontwikkeling van bruikbare *radarreflectiemodellen* (verstrooiingsmodellen of backscattermodellen).

## 11.2 Radarsignaturen van bosopstanden

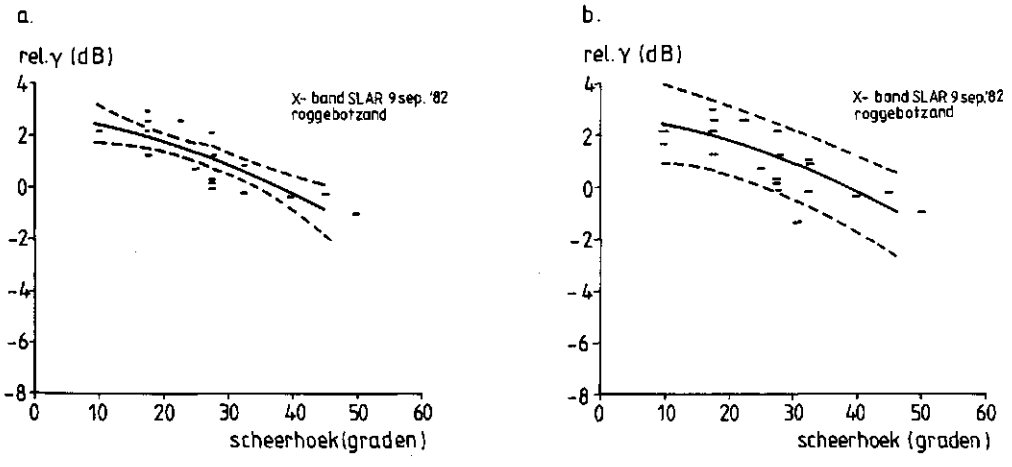
### 11.2.1 De bepaling van de radarsignatuur van populier 'Heidemij' uit een X-band SLAR-beeld

Met behulp van een grafisch computersysteem kan een perceel in het SLAR-beeld worden omlijnd en kan een histogram van de grijswaarden (reflectiewaarden) van de pixels binnen een omlijning worden vervaardigd. Een resultaat, voor een homogene opstand met populier 'Heidemij', is gegeven in figuur 11-2. De variatie in reflectiewaarden (radarecho, verstrooiing) binnen de homogene opstanden van het Roggebotzandbos wordt vrijwel uitsluitend bepaald door de zgn. *'spikkel'* (zie paragraaf 8.4), een fysisch fenomeen dat inherent is aan het gebruik van coherente golven. Als wordt gemiddeld over 30 onafhankelijke waarnemingen van de radarreflectie per pixel, wordt, tengevolge van de spikkel, de verdeling van de grijswaarden binnen een homogene opstand Gaussisch met een standaardafwijking van ~ 0,8 dB.




11-2 Histogram van grijsklassen van 102 pixels binnen een opstand met populier 'Heidemij'. Iedere grijsklasse is 0,2 dB. Het gemiddelde grijsniveau is 183,77, de standaardafwijking is 4,20 of 0,84 dB.

Er treden ook variaties op tussen de gemiddelde niveaus van opstanden van dezelfde soort. Deze kunnen worden veroorzaakt door ecologische factoren, leeftijdsverschillen en toegepaste bosbouwtechnieken. In figuur 11-3a zijn deze getekend als functie van de scheerhoek ('grazing angle'). Er kan een gemiddelde signatuur, met een bepaalde betrouwbaarheid, worden berekend.
In figuur 11-3b zijn dezelfde waarden nog eens getekend maar nu is een betrouwbaarheidsinterval aangegeven voor individuele percelen. 90% van de perceelsgemiddelden valt binnen de geschetste grenzen. Uit onderzoek blijkt dat de standaardafwijking van het verschil tussen perceelsgemiddelde en de gemiddelde signatuur in de X-band ongeveer 0,5 dB bedraagt (0,66 dB voor 'Heidemij') voor alle boomsoorten voorkomend in het Roggebotzand en voor alle gemeten scheerhoeken. Dit is een belangrijk gegeven voor het bepalen van *classificatiemogelijkheden* (zie hoofdstuk 27).



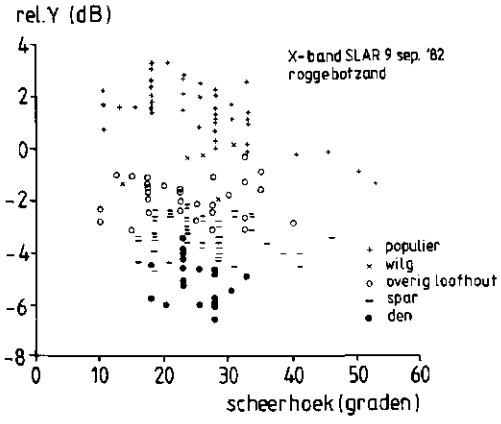

11-3 Radarsignatuur van populier 'Heidemij'
**a** met een 90% betrouwbaarheidsinterval voor de gemiddelde γ
**b** met het interval waarbinnen 90% van de gemiddelde γ-waarden van individuele percelen valt.
De γ-waarden zijn als 'relatief' opgegeven, omdat deze betrekking hebben op een (indertijd nog) onbekende interne ijkingswaarde; zie de betreffende opmerking in paragraaf 11.2.3.

### 11.2.2 De dynamiek binnen het bos

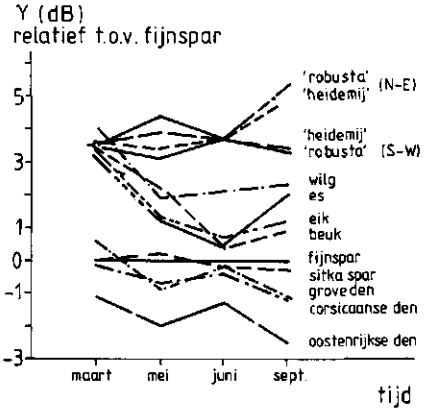
In figuur 11-4 zijn de gemiddelde waarden van de γ (gamma) getekend als functie van de scheerhoek voor alle bospercelen in het Roggebotzand. Soorten of groepen van soorten zijn gelokaliseerd in elkaar soms gedeeltelijk overlappende banden. Dit heeft tot gevolg dat een goede classificatie van boomsoorten niet zonder meer mogelijk is in dit bos en op grond van dit SLAR-beeld alleen (zie hoofdstuk 27).

### 11.2.3 Seizoens-invloeden

In figuur 11-5 zijn de relatieve veranderingen van de γ ten gevolge van seizoensinvloeden zichtbaar voor de boomsoorten uit het Roggebotzand.




11-4 Gemiddelde γ-waarden van alle percelen in het Roggebotzand. Legenda: (+) populier, (x) wilg, (o) overig loofhout, (–) spar en (•) den. X-band SLAR, september 1982.Voor γ-relatief, zie de tekst bij figuur 11-3.

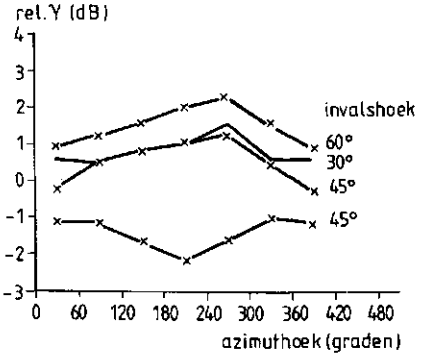



11-5 Relatieve seizoensvariaties van de γ t.o.v. de fijnspar voor enkele boomsoorten in de X-band bij een scheerhoek van 25° met de horizontaal.

Aangezien de SLAR nog niet intern geijkt was (de interne ijking van de SLAR werd in 1985 gerealiseerd) kunnen geen absolute veranderingen zichtbaar worden gemaakt en zijn alle waarden arbitrair gerelateerd aan de waarden van de fijnspar.
De getoonde radarsignaturen behoren bij de populierenklonen 'Robusta' en 'Heidemij' (hiervan zijn twee signaturen getekend op de betekenis waarvan we terugkomen in paragraaf 11.2.4), de overige loofhoutsoorten: wilg, es, eik en beuk en de naaldhoutsoorten: fijnspar, Sitkaspar, grove den, Corsicaanse den en Oostenrijkse den. In de figuur zijn direct een aantal bijzonderheden op te merken: (1) het radarreflectieniveau is voor alle loofhoutsoorten in de winter ongeveer gelijk en belangrijk hoger dan het niveau van de naaldhoutsoorten; (2) in de zomer treedt een grotere differentiatie op van de γ-waarden van loofhout maar deze zijn nog steeds hoger dan die van naaldhout; (3) er is een duidelijk verschil tussen Corsicaanse en Oostenrijkse den, twee variëteiten van de soort Pinus Nigra die qua uiterlijk sterk op elkaar lijken maar in deze radarbeelden goed onderscheidbaar zijn (zie paragraaf 11.2.9).

11.2.4 De kijkrichtingsafhankelijkheid van γ bij populier 'Robusta'

Uit de analyse van de eerste serie radarbeelden van het Roggebotzand bleek dat de radarreflectie van de populieren 'Robusta' en 'Heidemij' soms een richtingsafhankelijk gedrag vertoonden. Alle runs met de SLAR zijn uitgevoerd in twee tegengestelde richtingen. In de helft van de runs keek de SLAR in noord-oostelijke richting, in de andere helft in zuid-westelijke richting. Tijdens vluchten uitgevoerd in september 1982 en mei 1983 werd in de ochtend gemeten en was de γ-waarde gemeten in de ZW-richting 1,5 à 2 dB hoger dan de γ gemeten in de NO-richting. Bij een vlucht uitgevoerd in juni 1982 aan het begin van de avond en bij een vlucht in de winter werden geen significante verschillen gemeten. Alle vluchten werden uitgevoerd bij vrijwel windstil weer. De oorzaak van dit gedrag is nog niet goed bekend en treedt, voor zover dat uit de ROVE-dataset opgemaakt kan worden, in het Roggebotzand alleen op bij de 'Robusta' en 'Heidemij' opstanden. Er is geopperd dat dit effect veroorzaakt wordt door *heliotroop* gedrag, dat wil zeggen de bladstand wordt beïnvloed door de stand van de zon. Het effect is ook gemeten met een C-band (figuur 3-5) radar (zie figuur 11-6).




**11-6** Relatieve C-band γ-waarden van de populierenkloon 'Robusta' als functie van de kijkrichting bij enkele invalshoeken gemeten met C-band. Onderste curve: 6-9-1984, 7.30-8.00 uur, wind: 30° 8 $ms^{-1}$. Bovenste 3 curves: 28-8-1985, 15.30-17.30 uur, wind: 230° 4 $ms^{-1}$. De invalshoeken (30°, 45°, 60°) zijn de hoeken met de verticaal. De kijkrichting van de radar bij 0° is naar het noorden, bij 90° naar het oosten, etc. Voor γ-relatief, zie de tekst bij figuur 11-3.

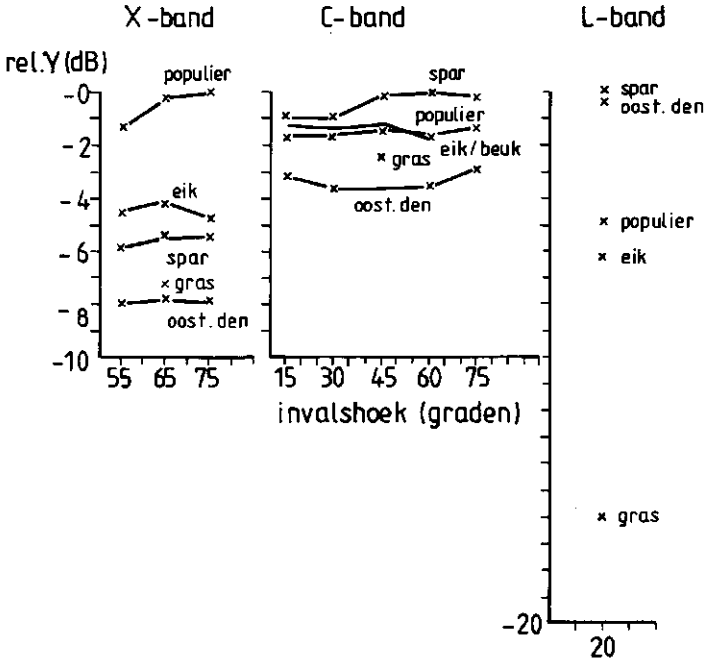
Tabel 11.1 Specificaties DUTSCAT

| | |
|---|---|
| radar type | coherente pulsradar |
| frequenties | 1,2; 3,2; 5,3; 9,65; 13,7 en 17,25 GHz |
| pulsherhalingsfrequentie | 78,125 kHz |
| pulsbreedte | 100 ns |
| piekvermogen | 250 mW |
| bereik | 50-1920 m |
| antenne | 0,9 m parabolische schotel |
| polarisatie | VV en HH |
| invalshoek | 0-80 graden |

Deze meting is uitgevoerd in zes kijkrichtingen. Er was echter wel sprake van enige wind (zie ook Hoekman, 1986). De gebruikte C-band bevond zich in de zgn. *DUTSCAT*. Dit is een Nederlandse multiband-scatterometer die zich in een vliegtuig bevindt en waarbij frequentie, polarisatie en kijkhoek instelbaar zijn (tabel 11.1). Een *scatterometer* is een onderzoeksinstrument dat de verstrooiings-coëfficiënt meet. Hierbij wordt een hoge radiometrische resolutie nagestreeft ten koste van de beeldvorming. Voor een uitvoerige beschrijving van DUTSCAT zie Attema & Snoeij (1985).

11.2.5 Het verschil in frequentie-afhankelijkheid tussen naald- en loofhout

In het frequentiedomein is een duidelijk onderscheid geconstateerd tussen de reflectie-eigenschappen van loofhout en naaldhout (figuur 11-7). Uit metingen in de X-band (3 cm golflengte) blijkt dat de radarreflectie van het loofhout over het algemeen veel sterker is dan van het naaldhout. Uit metingen in de L-band (25 cm golflengte) volgt dat deze relatie net andersom ligt: alle naaldhoutsoorten geven een sterker reflectiesignaal dan de loofhoutsoorten.




11-7 Relatieve verschillen in γ voor enkele vegetatie-soorten in het Roggebotzand in 3 frequentiebanden
a: X-band SLAR, HH-polarisatie, september 1982
b: C-band DUTSCAT, HH-polarisatie, juli 1984
c: L-band SEASAT SAR, HH-polarisatie, augustus 1978.
Voor γ-relatief, zie de tekst bij figuur 11-3.

In de C-band, die met een golflengte van 6 cm tussen de L- en de X-band in ligt, overlappen de signaturen elkaar grotendeels. Er is dus (voor alle boomsoorten voorkomend in het Roggebotzand) sprake van een relatieve toename van de radarreflectie van de naaldhoutsoorten met toenemende golflengte ten opzichte van de loofhoutsoorten.
Het is nog niet geheel duidelijk welk fysisch mechanisme dit verschijnsel

veroorzaakt, maar het ligt voor de hand te veronderstellen dat de oorzaak gezocht moet worden in het sterke structuurverschil (vorm en afmetingen) tussen naalden en bladeren.

11.2.6 De invloed van diverse opstandsparameters op γ bij populier 'Robusta'

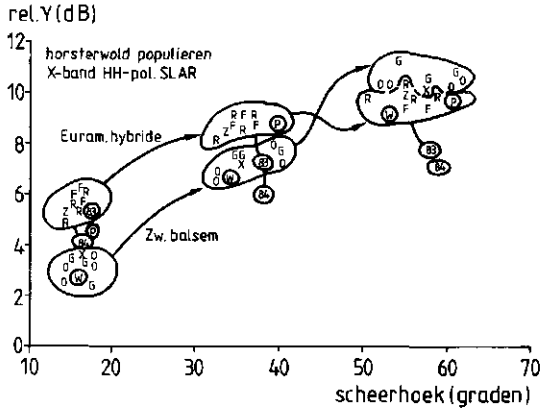
In het Roggebotzand zijn een twintigtal populier 'Robusta' opstanden in de leeftijdsklasse van 20-25 jaar geanalyseerd op onderlinge verschillen in het radarreflectieniveau (in de X-band en bij HH-polarisatie). Al deze opstanden vertonen een goede groei en hebben een redelijk gesloten kronendak. De onderlinge verschillen blijken uit de bosopstandsgegevens die de boswachterij voor dit onderzoek beschikbaar stelde. Deze zijn:

(a) De gemiddelde jaarlijkse aanwas van het houtvolume per ha (gja), een vitaliteitsparameter (deze variëerde voor de onderzochte percelen van 7,1 tot 11,5 $m^3ha^{-1}jaar^{-1}$).
(b) Het gemiddelde houtvolume per ha (88 – 193 $m^3ha^{-1}$).
(c) Het aantal bomen per ha (stamtal) (96 – 191 $ha^{-1}$).
(d) De gemiddelde diameter op borsthoogte (29,7 – 40,9 cm).
(e) De gemiddelde boomhoogte (23,4 – 26,8 m).

Met behulp van regressie-analyse werd onderzocht of er significante lineaire relaties bestaan tussen deze opstandsparameters en de radarreflectiewaarden in een bepaald radarbeeld en binnen een beperkte invalshoek van 10 graden.
De invloed van deze parameters op de (X-band) reflectie bleek gering te zijn. Dit was te verwachten op grond van het in paragraaf 11.2.1 geconstateerde feit dat de standaardafwijking van de perceelsgemiddelden onafhankelijk van de invalshoek slechts 0,6 dB was. De parameter met de meeste invloed op γ bleek de stamdiameter te zijn. De correlatie was in de meeste gevallen significant positief. Voor de boomhoogte en het stamtal werden respectievelijk positieve en negatieve correlaties gevonden. Deze waren echter niet erg significant. Voor de parameters gja en houtvolume werden geen duidelijke lineaire relaties gevonden.

11.2.7 De invloed van genetische verschillen tussen populieren

Het grootste deel van de bosopstanden met populieren in het Roggebotzand bestaat uit de klonen 'Robusta' en 'Heidemij'. De radarsignaturen gemeten met de X-band SLAR van deze twee klonen lijken zeer sterk op elkaar. Ook in de C-band is dit het geval zoals blijkt uit metingen met de DUTSCAT. Andere klonen zoals 'Oxford' en 'Geneva', die veel minder frequent voorkomen in het Roggebotzand, hebben duidelijk afwijkende radarreflectie-eigenschappen alhoewel de structuur van deze opstanden en de boomstructuur gelijken op die van de eerste twee genoemde klonen. Blijkbaar zijn er toch kleine verschillen die een belangrijke invloed op de radarreflectie hebben. Om deze met wat meer zekerheid vast te kunnen stellen is besloten in 1985 een vlucht met de SLAR uit te voeren boven het Horsterwold, een bos met een grote verscheidenheid aan populierenklonen. Enkele resultaten van deze vlucht, waarin een strook bos bij drie verschillende scheerhoeken is gemeten, zijn weergegeven in figuur 11-8. Het is gebleken dat populierenklonen uit de




11-8 Relatieve veranderingen in de radarreflectie als functie van de scheerhoek voor Euramerikaanse hybride populieren; 'Zeeland' (Z), 'Flevo' (F), 'Robusta' (R), 'Dorschkamp' plantjaar 1984 (84) en 'Dorschkamp' plantjaar 1983 (83); voor zwarte balsempopulieren: 'Oxford' (O), 'Geneva' (G), 'Rochester' (X) en voor de klonen 'Fritzy Pauly' (P) en 'Witte van Haamstede' (W). Voor γ-relatief, zie de tekst bij figuur 11-3.

groep van Euramerikaanse hybriden (Pop. x euramericana) in het Horsterwold, o.a. vertegenwoordigd door de klonen 'Robusta', Flevo' en 'Zeeland', een groep vormen met sterk op elkaar gelijkende radarreflectie-eigenschappen. Een andere groep wordt gevormd door de zwarte balsempopulieren (Sectie Aigeiros x Tacamahaca) vertegenwoordigd door de klonen 'Geneva', 'Oxford' en 'Rochester'. Andere groepen met weer andere reflectie-eigenschappen zijn minder sterk vertegenwoordigd. Dit zijn o.a. de kloon 'Fritzy Pauly', een Westamerikaans balsem en de kloon 'Witte van Haamstede' (Pop. x canescens).
Alle onderzochte opstanden hebben ongeveer dezelfde leeftijd (10-12 jaar), een redelijk gesloten kronendak en vergelijkbare standplaatscondities. De overige opstandsparameters zoals genoemd in paragraaf 11.2.6 variëren per opstand, maar er werd ook in dit bos geen duidelijke relatie met de radarreflectie geconstateerd. Aangezien de indeling van radarsignaturen in groepen van klonen wel sterke overeenkomsten vertoont met de taxonomische indeling zijn blijkbaar genetische verschillen de overheersende factoren.
Een kenmerkend verschil tussen de zwarte balsempopulieren en de Euramerikaanse hybriden is de *bladstandsverdeling;* deze is planofiel voor de eerste groep (bladeren liggen min of meer horizontaal) terwijl deze voor de tweede groep neigt naar een erectofiele verdeling (bladeren hangen min of meer in verticale richting). Waarschijnlijk moet hierin de oorzaak van het geconstateerde verschil in reflectie-eigenschappen worden gezocht.

11.2.8 De invloed van de sluitingsgraad bij populier 'Dorschkamp'

Tenslotte moet in figuur 11-8 gewezen worden op het afwijkende gedrag van 2 jonge 'Dorschkamp' opstanden (Euramerikaanse hybride) geplant in respectievelijk 1983 (2 jaar oud) en 1984. Pas ingeplante populierenopstanden hebben aanvankelijk een zeer lage sluitingsgraad

en sluiten, indien de aanplant succesvol is, binnen enkele jaren. Het effect van de lage sluitingsgraad is het grootst bij de 1-jarige opstand en bij de steilere hoeken. Al naar gelang de sluiting toeneemt of de scheerhoek afneemt wordt de invloed van de bodem minder en neigen de reflectiewaarden meer naar die van vergelijkbare opstanden met een goede sluiting. Blijkbaar is de sluitingsgraad van het kronendak een belangrijke opstandsparameter in de X-band.

11.2.9 De invloed van de naaldbezetting bij twee Pinus nigra variëteiten

De Oostenrijkse den (Pinus nigra 'nigra') in het Roggebotzand vertoont in de X-band een duidelijk lagere waarde voor $\gamma$ dan de Corsicaanse den (Pinus nigra 'corsicana'). Dit is opmerkelijk aangezien deze bomen genetisch sterk verwant zijn, en qua structuur sterk op elkaar lijken. Ook het stamtal en de leeftijd zijn gelijk. Het enige opvallende verschil is de naaldbezetting. De 'corsicana' heeft te leiden van de ziekte Bronchorstia. Een van de symptomen is voortijdig naaldverlies. De 'nigra' heeft het normale aantal van 4 jaargangen naalden. De 'corsicana' nog slechts drie. Er bestaat een vermoeden dat dit de reden is voor het geconstateerde verschil in $\gamma$. Een relatief sterke bijdrage van takken en stammen zou als een gevolg van de geringere naaldbezetting bij 'corsicana' sterker kunnen bijdragen tot de totale radarreflectie.

## 11.3 Experimenten ter ondersteuning van het modelonderzoek

De in de vorige paragraaf genoemde empirische relaties suggereren dat zowel bladstand als naaldbezetting belangrijke factoren zijn in de beschrijving van het interactiemechanisme tussen microgolven en bossen in de X-band. Ook takken en stammen lijken direct of indirect de radarreflectie te beïnvloeden en in het geval van zeer jonge of open opstanden lijkt de mate van sluiting een belangrijke factor.
Om de potentiële toepassingsgebieden van radar remote sensing in de bosbouw aan te kunnen geven, is een goede beschrijving van de relatie tussen het radarreflectie-signaal en de bos- en sensorparameters met behulp van *modellen* noodzakelijk. De ontwikkeling van deze modellen is echter lastig vanwege de complexe structuur van de vegetatie. Voor landbouwgewassen, waaraan reeds veel aandacht is besteed, zijn enige resultaten geboekt die ook bruikbaar kunnen zijn bij het modelleren van de radarreflectie van bosvegetatie (zie hoofdstuk 10). De bosstructuur is echter, vanwege de aanwezigheid van takken en stammen (en naalden bij naaldhout) sterk verschillend en veel ingewikkelder. Ook de ontwikkeling van een bosopstand (aanplant onder scherm of met menghoutsoorten, periodieke dunningen, de lange tijdsduur, etc.) verschilt sterk van de ontwikkeling van een (eenjarig) landbouwgewas. Er zullen specifieke bosmodellen ontwikkeld moeten worden.
De ontwikkeling van deze modellen verloopt eenvoudiger als behalve de fysische parameter $\gamma$ additionele fysische eigenschappen van het bos bekend zijn. Met behulp van grote *hoekreflectoren*, geplaatst op de grond in het bos, kan bijvoorbeeld de transmissie van de microgolven door het kro-

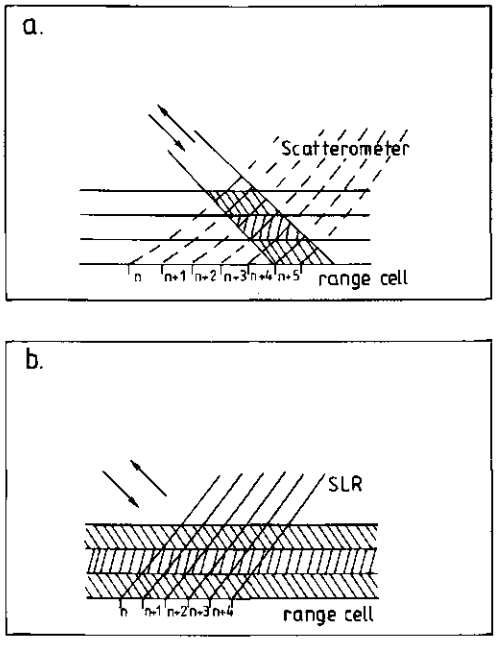
nendak onderzocht worden. Dit experiment is uitgevoerd met de X-band SLAR en de L-band versie van DUTSCAT (paragraaf 11.3.1). Met behulp van een speciale verwerkingstechniek van de ruwe data van DUTSCAT is ook informatie verkrijgbaar over de relatieve sterkte van bijdragen van diverse horizontale lagen in het bosvolume van de totale radarreflectie. Op deze wijze kan berekend worden hoeveel de bodem, de ondergroei, de stammen en het kronendak bijdragen. Dit experiment werd uitgevoerd in de C-band en de L-band (paragraaf 11.3.2).

### 11.3.1 Het hoekreflector-experiment

De radarreflectie-eigenschappen van hoekreflectoren (in de vrije ruimte) kunnen nauwkeurig worden berekend. Wanneer deze reflectoren op de grond in het bos worden geplaatst (zie Plaat I), is het verschil tussen de gemeten sterkte van de radarreflectie van de reflector en de verwachte sterkte, wanneer deze reflector in het open veld zou staan, een maat voor de transmissie van de microgolven door het kronendak (zie ook Hoekman, 1986, 1987a).
In de X-band bleek de *demping* van de boomkronen zeer hoog te zijn, zowel voor loofhout als naaldhout, zodat geconcludeerd mag worden dat in de X-band bij een gesloten kronendak vrijwel alle reflectie afkomstig is van de bladeren en naalden. Alleen bij minder vitale dennen, met een lage graad van naaldbezetting, werd wel enige transmissie door de kroon gemeten (zie ook paragraaf 11.2.9).
De meeste hoekreflectoren werden zorgvuldig achter boomkronen of groepen van boomkronen geplaatst. Sommigen werden echter zodanig geplaatst dat ze voor de radar direct zichtbaar waren, bijvoorbeeld door gaten in het kronendak of, als dwars op de boomrijrichting werd gevlogen, door plaatsing tussen boomrijen. Er werden dan soms zeer lage dempingen geconstateerd. Blijkbaar speelt (in de X-band) de architectuur van het kronendak (sluitingsgraad, kroonvorm) een belangrijke rol en bepaalt of reflectie-elementjes uit de lagere delen van het bosvolume (bodem, stammen en ondergroei) een bijdrage leveren. Voor de L-band, waar op grond van theoretische overwegingen een veel lagere demping van de boomkroon verwacht mag worden, moeten de (DUTSCAT) data nog geanalyseerd worden.

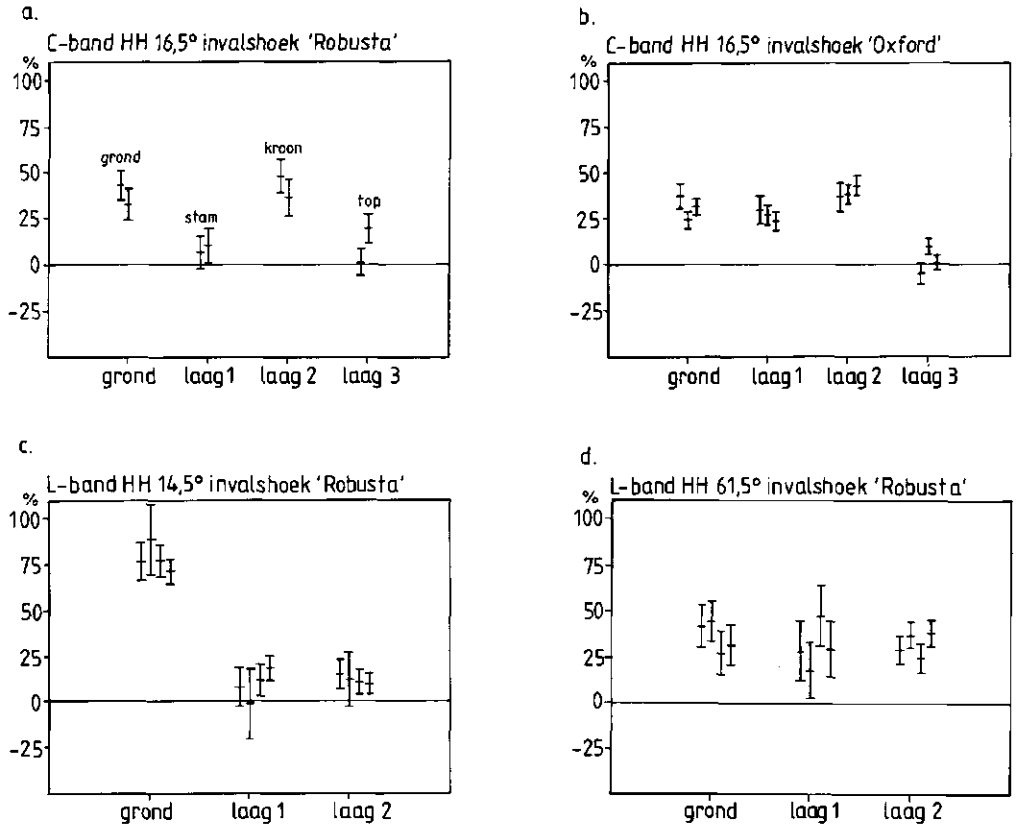
### 11.3.2 De meting van bijdragen van diverse horizontale lagen

Als een gevolg van de smalle bundelbreedte en de hoge afstandsresolutie (paragraaf 8.4) van DUTSCAT worden de echosignalen afkomstig van reflectie-elementjes, die zich op verschillende hoogteniveaus in het bos bevinden, enigszins gescheiden ontvangen (figuur 11-9). Vanwege de relatief smalle bundelbreedte en lage vlieghoogte van DUTSCAT worden bijdragen uit verschillende boslagen in, min of meer, verschillende afstandcellen gemeten. Bij een SLR-systeem zijn deze bijdragen in iedere afstandcel gelijk. Met behulp van een model, waarin verondersteld wordt dat de reflectie-elementjes geconcentreerd mogen worden in enkele (3 of 4) horizontale vlakken, kunnen de afzonderlijke bijdragen van verschillende lagen in het bos bepaald worden. Enkele resultaten van een 'Robusta' en een 'Oxford' opstand zijn gegeven in figuur 11-10 en zullen nu worden besproken (zie ook Hoekman, 1987b).




11-9 Bijdrage van verschillende boslagen tot de totale gemeten echosterkte
a: scatterometer
b: 'sideways looking radar' (SLR).

In de C-band bij een invalshoek (met de verticaal) van 16,5 graden worden voor de 'Robusta' opstand met behulp van het model 4 lagen onderscheiden (figuur 11-10a). De grond draagt voor ~40% bij. De stammen (laag 1) dragen niet noemenswaardig bij. De kronen (laag 2) en de kroontoppen (laag 3) dragen samen voor ~50% bij. Hierbij moet worden opgemerkt, dat het met dit model niet mogelijk is te bepalen in welke mate de bijdrage van de grond veroorzaakt wordt door de grond (en kruidlaag) alleen of dat grondreflecties via de stam (het zgn. hoekreflectoreffect) overheersen.
Voor de 'Oxford' opstand krijgen we een ander beeld (figuur 11-10b). De bomen zijn iets lager waardoor er zich in laag drie geen reflecterende elementen meer bevinden. Het belangrijkste verschil is de relatief sterkere bijdrage van laag 1. In tegenstelling tot de 'Robusta' opstand staan in deze opstand beukebomen in een dichte onderlaag en deze leveren blijkbaar een belangrijk aandeel in de totale reflectie (bij deze steile hoek).
In de L-band worden nog slechts drie lagen onderscheiden (figuur 11-10c). Bij een steile invalshoek van 14,5 graden komt ~75% van de radarreflectie van de grond. Het vrij goed gesloten kronendak (sluitingsgraad 80%) is dus blijkbaar vrij transparant voor microgolven van deze lengte.
Ook bij een invalshoek van 60 graden met de verticaal (figuur 11-10d) waar de golven een lange weg door het kronendak moeten afleggen, komt nog een belangrijk deel van de grond. Het kronendak (in laag 1 en 2) draagt nu voor ~2/3 deel bij.
In het algemeen kan gesteld worden dat bij toenemende golflengte en bij afnemende invalshoek (met de verticaal) reflecterende elementen uit




**11-10** Relatieve bijdragen van de afzonderlijke lagen tot de totale radarreflectie, uitgedrukt als percentage van het totaal, waarbij het verticale streepje het 50% betrouwbaarheidsinterval voorstelt. Dit is gedaan voor 2, 3 of 4 metingen.

dieper liggende lagen een belangrijkere rol gaan spelen. Met name bij kortere golflengten speelt de architectuur van het kronendak (sluitingsgraad, kroonvorm) een belangrijke rol.

### 11.3.3 Het experiment met de SOURCESCAT

Voor de ontwikkeling van radarreflectie-modellen is het van groot belang om de invloed te kennen van de diverse samenstellende componenten van het object (het vegetatiedek) op de reflectie- en dempingseigenschappen. Met dit doel voor ogen is op de universiteit van Kansas (R.K. Moore) een X-band FM-CW scatterometer, genaamd SOURCESCAT, ontwikkeld met een zeer hoge afstandsresolutie van 11 cm. Dit systeem werkt alleen op korte afstand (~ 4 meter) en heeft dan een bundeldiameter van 16 cm. Bij enkele experimenten werd de scatterometer gericht op vrije boomtakken. Het gemeten echosignaal (als functie van de afstand) laat dan twee pieken zien; de eerste piek kan worden gerelateerd aan de echo van de tak, de tweede aan de echo van de bodem. Als nu, in opeenvolgende stappen, diverse delen van de

boomtak worden verwijderd – zoals de bladeren, de bladstengels (of naalden), vruchten, twijgjes en tenslotte de hele tak – dan neemt de echosterkte van de tak af en de echosterkte van de bodem toe. Uit deze gegevens zijn belangrijke conclusies te trekken over de reflectie- en dempingseigenschappen van een boomtak in de X-band.

## 11.4 Literatuur

1 Attema, E.P.W. & P. Snoeij, 1985. DUTSCAT, a 6-frequency airborne scatterometer. Proc. EARSeL Workshop 'Microwave remote sensing applied to vegetation', Amsterdam, 10-12 dec. 1984, ESA SP-227, blz. 127-129.

2 Hoekman, D.H., 1986. Experiments on modelling radar backscatter of forest stands and research on classification. Proc. Third Int. Coll. on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, Les Arcs, France; ESA-SP-247: 127-132.

3 Hoekman, D.H., 1987a. Measurements of the backscatter and attenuation properties of forest stands at X-, C- and L-band. Rem. Sens. Envir. 23: 397-417.

4 Hoekman, D.H., 1987b. Multi-band scatterometer data analysis of forests. Int. J. Rem. Sens. 8: 1695-1707.

Documentatie

# 12 De radarreflectie van bodems

A.R.P. Janse

## 12.1 Inleiding

Zoals in hoofdstuk 10 gezien is de radarreflectie (-verstrooiing) in het algemeen een functie van invalshoek, polarisatie, frequentie (golflengte) en van object-eigenschappen. De belangrijkste factoren die de *radarecho (backscatter) van bodems* bepalen zijn hun geometrische en electrische eigenschappen. Bij kale bodems hebben geometrische eigenschappen vooral betrekking op de oppervlakte-ruwheid. De electrische eigenschappen worden beschreven d.m.v. de *diëlectrische constante*, die de mate van reflectie sterk beïnvloedt. Indien een stralingsenergiestroom van het ene medium naar het andere medium gaat, treedt een *wijziging van de voortplantingssnelheid* op in afhankelijkheid van de gebruikte golflengte. Daarnaast zal o.a. door voorkomende faseverschuiving(en) een *demping* (verlaging van het energieniveau) kenmerkend zijn voor dat medium. Bovendien zal door verstrooiing die demping nog worden versterkt. Beide eigenschappen worden meestal gecombineerd tot één getal (complex getal), hetgeen vooral rekentechnische voordelen oplevert. De diëlectrische constante, $\varepsilon$, is daarom een complex getal, bestaande uit een reëel deel, $\varepsilon'$, en een imaginair deel, $\varepsilon''$:

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'' \tag{12.1}$$

$\varepsilon'$ wordt vaak aangeduid met de 'permittiviteit' van het materiaal, terwijl $\varepsilon''$ aangeduid wordt met de 'diëlectrische verliesfactor'. In $\varepsilon''$ is de geleidbaarheid een component. De wortel uit de complexe diëlectrische constante voor een homogeen en isotroop medium is de in de optica gangbare *brekingsindex* n (complex getal $n = \sqrt{\varepsilon}$). De modulus van n bepaalt de snelheid waarmee EM-straling door een materiaal gaat, terwijl het argument de demping (verlies) aangeeft (zo is bijv. $\lambda_{materiaal} = \lambda_o/|n|$, met $\lambda_o$ de golflengte in vacuüm of lucht).

Wat er nu precies met de radarbundel aan het bodemoppervlak gebeurt

is moeilijk te begrijpen en laat zich lastig modelleren. Allereerst zijn de diëlectrische eigenschappen meestal slecht bekend, en worden in de gangbare beschrijvingen andere daarmee weinig gerelateerde grootheden gebruikt. Vervolgens zijn in een groot aantal gevallen de oppervlakken waarover en het medium waarvoor de grootheden moeten gelden slecht omschreven. De grootheden zelf zijn moeilijk afzonderlijk te bepalen. Dit geldt bijvoorbeeld voor het vocht en zijn verdeling nabij het bodemoppervlak. Men moet deze beperkingen en moeilijkheden duidelijk in het oog houden, omdat anders grote misverstanden kunnen ontstaan over wat een interpretatie nu eigenlijk voorstelt.
Het bodemoppervlak kan men zien als een natuurlijk grensvlak met een aantal typerende eigenschappen. De daaruit af te leiden processen kan men benaderen als toepassingen of zo men wil interpretaties. Zeer in het kort en min of meer geschematiseerd kan men het volgende stellen:

- als zijnde 'ruw' kan de *windsnelheid* en de opbouw van het *windprofiel* (d.w.z. het verloop van de windsnelheid met de hoogte) worden omschreven.
- als gevolg daarvan zal er een relatie zijn met het kunnen optreden van *deeltjestransport* (winderosie). Die relaties zijn goed bekend en bestudeerd in de micrometeorologie.
- bij uitgeoefende *mechanische druk* zal als gevolg van een ongelijke drukverdeling vervorming kunnen optreden bij bewerken, belopen, berijden etc. Die vervorming kan min of meer elastisch zijn.
- wanneer *water resp. regen* over het in beginsel ruwe oppervlak stroomt, dan zijn er een groot aantal effecten te karakteriseren, die direct met het indringen (infiltratiesnelheid) resp. het verdampen (droogsnelheid) samenhangen. Het transport over het oppervlak speelt dan eveneens een rol (micro-erosie).
- als gevolg van de interactie van de bodemdeeltjes met het water of de waterige oplossing zal er *krimp en zwel* door wateropname resp. onttrekking kunnen optreden, hetgeen de vorm en dus de ruwheid zal doen veranderen en aanleiding kan geven tot het optreden van vervlakking en vervloeiing (water-erosie) of zogenaamde *slemp* (het dichtstromen van het oppervlak met als gevolg een zelfversterkend structuurverval). Door het optreden van meerdere processen gelijktijdig zal bij eventueel aanwezig zout, dat daar uitkristalliseert, een korstvorming plaatsvinden, die structuren aan of nabij het oppervlak stabiliseren.
- zodra de *levende natuur* mede van betekenis wordt, komen door invang van kiemen en zaden, alsook van microfauna, processen op gang die een beginnende vervorming van het oppervlak en een geleidelijke bedekking (slijmen of vegetatie) veroorzaken.

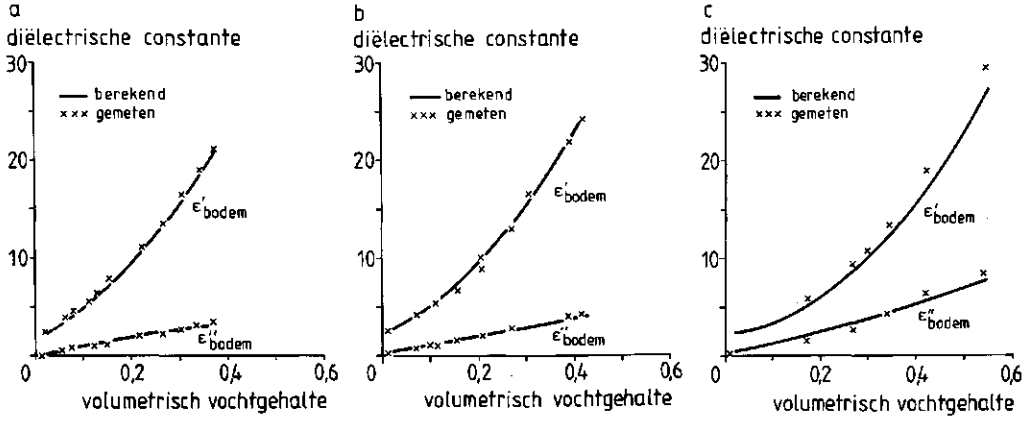
Een groot aantal vragen m.b.t. de onderlinge samenhang en betekenis bij de interpretatie zijn momenteel nog niet opgelost. Vragen komen o.a. uit vakgebieden die geïnteresseerd zijn in erosiegevoeligheid, verslemping in relatie tot kiemgedrag van planten en de plaats in de *energiebalans*. Men kan echter stellen dat de bodemkundige op de eerste plaats

geïnteresseerd is in de plaats die dat onderzochte deel van het aardoppervlak inneemt in de energiebalans. De kennis van deeltermen om zo'n energiebalans te kunnen opstellen kan aan de hand van meting van afzonderlijke grootheden geschieden en wordt thans reeds ondersteund door lastige, maar toereikende modelbenaderingen. Een van de typerende grootheden hierbij is de *oppervlakte-ruwheid* (een geometrische eigenschap).

Tot slot van deze inleiding worden in tabel 12.1 nog enkele globale waarden van de diëlectrische constante van verschillende materialen gegeven. Het blijkt dat water de dominerende factor is, maar dat ook andere materiaaleigenschappen een rol spelen.

Tabel 12.1 Relatieve complexe diëlectrische constante t.o.v. vacuüm en emissiecoëfficiënt voor enkele materialen bij een bepaalde frequentie.

| materiaal | frequentie (GHz) | $\varepsilon'$ | $\varepsilon''$ | emissie-coëfficiënt |
|---|---|---|---|---|
| water (20 °C) | 1 | 80 | 4,5 | 0,36 |
| water (0 °C) | 20 | 35 | 40 | 0,39 |
| droge bodem | 1,4 | 2,8 | < 0,05 | 0,94 |
| natte bodem | 1,4 | 19,6 | 4,8 | 0,59 |
| graniet | 10 | 4,4 | 0,003 | 0,88 |
| mergel | 14 | 8,3 | 0,004 | 0,77 |
| ijs | (onafh.) | 3,2 | < 0,001 | |

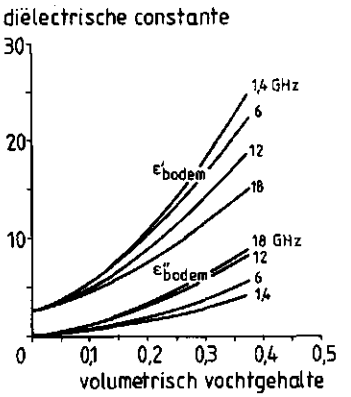



**12-1** Gemeten en berekende waarden voor de complexe diëlectrische constante ($\varepsilon'$ en $\varepsilon''$) bij 1,4 GHz, 23°C en modelvoorspellingen als functie van het vochtgehalte voor (a) een zandige, (b) een leemachtige en (c) een kleiachtige bodem
(bron: Ulaby et al., 1986).

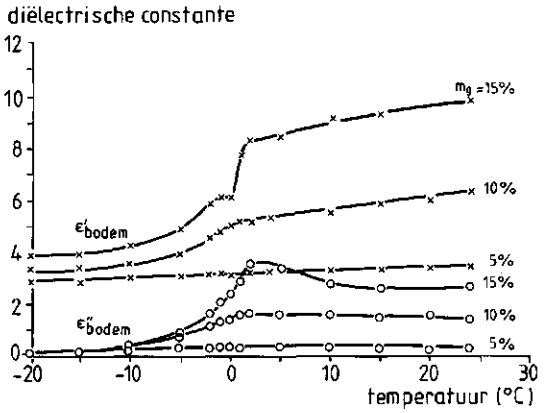
## 12.2 De radarreflectie van de bodem

De diëlectrische constante van een bodem hangt o.a. af van:

- het *vochtgehalte*. De complexe diëlectrische constante (ε' en ε") neemt toe met een toename in vochtgehalte van de bodem (figuur 12-1).
- het *bodemmateriaal* (met inbegrip van het zoutgehalte). In het algemeen is de invloed van het bodemtype op de complexe diëlectrische constante gering en wordt zij overheerst door de invloed van het vochtgehalte (figuur 12-1).
- de *frequentie*. In het algemeen blijkt ε' af te nemen en ε" toe te nemen bij een toename in frequentie (figuur 12-2) in het voor ons interessante frequentietraject (bij hogere frequenties (mm-golven) neemt ε" weer af).
- de *temperatuur*. Een voorbeeld van de invloed van de bodemtemperatuur op de complexe diëlectrische constante wordt in figuur 12-3 gegeven.




12-2 Berekende waarden voor de complexe diëlectrische constante als functie van het vochtgehalte voor een leemachtige grond bij vier frequenties (23°C) (bron: Ulaby et al., 1986).

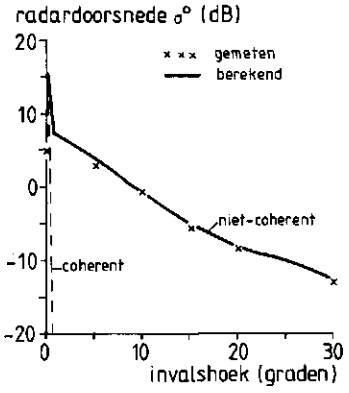



12-3 De complexe diëlectrische constante voor een kleigrond bij 10 GHz als een functie van de temperatuur bij drie vochtgehaltes ($m_g$ in gew. -%) (bron: Ulaby et al., 1986).

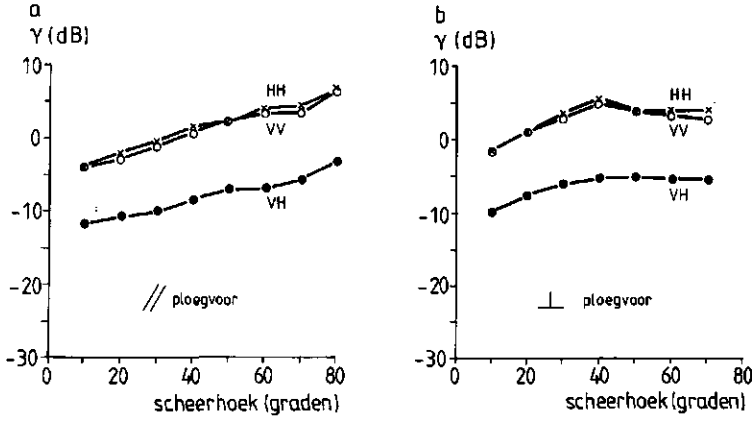
Om het gedrag van de diëlectrische constante te verklaren, resp. te voorspellen, zijn er verscheidene pogingen gedaan om

*modelvoorstellingen* van de bodem te maken, waarin de verschillende componenten bij verschillende verdelingen zijn opgenomen (de Loor, 1983). Bij een dergelijk model (Dobson et al., 1985) kan men de bodem bijvoorbeeld opgebouwd denken uit een vaste, een lucht- en een waterfase. Daarbij kan de waterfase bestaan uit twee componenten, nl. vrij en gebonden water. Het model vertoont voldoende geldigheid voor in evenwicht verkerende bodems op veldcapaciteit (dus met een geringe vochtspanningsgradiënt). Voor frequenties boven 4 GHz bleek het zoutgehalte van de bodem te kunnen worden verwaarloosd in het model. Dergelijke modellen zijn bijvoorbeeld gebruikt om de passieve emissie in het microgolfgebied vanuit het diëlectrische gedrag te verklaren.

Bij de actieve radartechnieken wordt in hoofdzaak gekeken naar twee eigenschappen, nl. het *vocht*, meestal benaderd door het volumepercentage of gehalte, en de *oppervlakte-ruwheid*. Als men daarbij kijkt naar de radarreflectie als functie van de invalshoek blijkt de vorm van deze curve bepaald te worden door de ruwheid, terwijl de invloed van het vocht zich manifesteert in een hoger of lager liggen van de totale curve (hogere vochtigheid: hogere reflectie). De *verschuiving* van de curve als totaal t.g.v. het variërend vochtgehalte kan dan redelijk verklaard worden uit de veranderingen in diëlectrisch gedrag t.g.v. de variërende vochtigheid. De *vorm* van de curve (radarreflectie als functie van de invalshoek) wordt bepaald door de structuur van het oppervlak, de ruwheid. Bij de bestudering van de invloed van de ruwheid dient men zich goed te realiseren dat een 'optisch' ruw oppervlak toch betrekkelijk vlak kan zijn voor radargolven. Om 'ruw' van 'glad' te kunnen onderscheiden kan men het Rayleigh criterium ($h = \lambda/(8\cos\theta)$) dan wel het Fraunhofer criterium ($h = \lambda/(32\cos\theta)$) gebruiken, waarin h = standaardafwijking in de hoogtevariatie van het object, $\lambda$ = golflengte, $\theta$ = invalshoek t.o.v. de verticaal (Ulaby et al., 1986). De invallende, *coherente golf* zal bij vlakke oppervlakken en verticale inval coherent blijven. Bij ruwe oppervlakken zal de verstrooiing in verschillende richtingen toenemen met de ruwheid en daarmee zal de bijdrage van *incoherente golven* tot de totale verstrooiing eveneens toenemen (figuur 12-4). Ook hiervoor zijn modelvoorstellingen uitgewerkt. Alleen een zogenaamde Lambertse reflector zal een reflectie vertonen die *on*afhankelijk is van de hoek van inzien.
Bij de beschouwingen over ruwheid moet – met name voor de kortere golflengtes (cm-golven) – ook de *bewerkingsrichting* worden meegenomen. Bij een geploegd veld bijvoorbeeld, hebben we te maken met twee typen ruwheden. Allereerst is er de ploegbalk, waaraan spiegelende reflectie kan optreden, wat voor bepaalde invalshoeken loodrecht op de ploegbalk tot reflecties kan leiden die aanzienlijk hoger zijn dan die voor dezelfde invalshoeken maar nu evenwijdig met de ploegbalk 'kijkend' (zie figuur 12-5). Over deze *grove structuur* ligt dan weer de boven beschreven *microstructuur* van facetten en facetjes van kluiten en kluitjes. Deze microstructuur is ook nog ruw voor de kortere




12-4 Voor een enigzins ruw oppervlak wordt de radarreflectie overheerst door de coherente component bij hoeken dichtbij de verticaal en door de niet-coherente component bij hoeken die daarvan afwijken (bron: Ulaby et al., 1983).

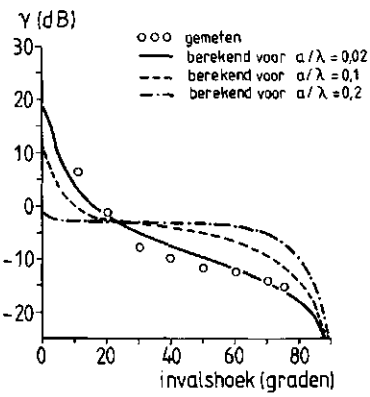



12-5 Radarreflectie als functie van de invalshoek voor kijkrichtingen parallel aan (a) en loodrecht op (b) de bewerkingsrichting voor VV-, HH- en VH-polarisatie. Vochtgehalte ongeveer 25 gew.-% (bron: ROVE databestand). Er treedt een maximum in de reflectie op rond een invalshoek van 40° waar echt loodrecht op de rug van de ploegbaiken wordt 'gekeken'.

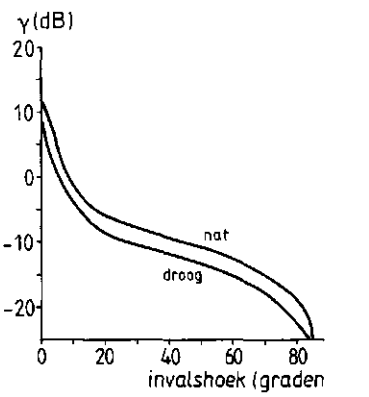
radargolven (cm-golven; zie de boven gegeven definities van ruwheid). Er zijn verschillende manieren om de *geometrie van het bodemoppervlak*, in het bijzonder wiskundig, te benaderen. Men kan starten vanuit doorsneden door de bodem en die van wiskundige kenmerken voorzien, zoals bijvoorbeeld de gemiddelde hoogten per afstandseenheid of de wortel uit deze gemiddelde hoogten (de zgn. *RMS-waarde*). Aangetoond kon worden dat de grotere deeloppervlakken, in de grootte-orde van de golflengte of groter en loodrecht op de invallende golf staande, soms onevenredig sterk bij kunnen dragen tot de totale radarreflectie. Vandaar dat bij het beoordelen en indelen van ruwheden de aanwezigheid van die grotere zgn. *facetoppervlakken* allereerst wordt beschouwd in afhankelijkheid van de invalshoek. Vanzelfsprekend is dit van grote betekenis voor het vaststellen van radarschaduwen, omdat immers achter die deeloppervlakken geen reflecties meer optreden. Ook is het zinvol om aan de hand van stereofoto's hoogtelijnen en hellingen te bepalen. Men moet echter bedenken dat de radarbundel vooral het wateroppervlak 'ziet' en niet het visueel ondoorzichtige vlak van de vaste fase. Bovendien heeft men met een transformatieprobleem te

maken: poolcoördinaten voor de radarbundel t.o.v. euclidische maten voor het bodemoppervlak (van Gijsen & Janse, 1973). Men bedenke voorts dat, als gevolg van 'interne slemp', facetvlakken op grotere (visueel niet waarneembare) diepte kunnen voorkomen.

Het onderzoek naar de ruimtelijke variabiliteit, zeker in het microgolfgebied, is nog nauwelijks gedefiniëerd. Bovendien is nog weinig bekend over de samenhang met bodemkundige processen, structuurveranderingen, gewijzigde vochtspanningsverdelingen, opdroogsnelheden, etc. Wel kwam uit metingen een belangrijk hulpgegeven ter beschikking, nl. het zogenaamde '*cross-over point*' (figuur 12-6 en figuur 10-3). Dit is de invalshoek waarbij het effect van de ruwheid vervalt en de reflectiewaarde uitsluitend wordt bepaald door het vochtgehalte. Hierbij moet opgemerkt worden dat de *dikte* van de bodemlaag, waarover het verloop van het vochtgehalte bepaald moet worden, nog lastig te omschrijven valt omdat het vochtgehalte met radar een geometrisch gedefiniëerde maat is. In de praktijk is het vochtgehalte geen geometrisch gedefiniëerde maat. Dus bij één vochtgehalte kunnen verschillende radarreflectie-waarden optreden (onder verder gelijke condities).

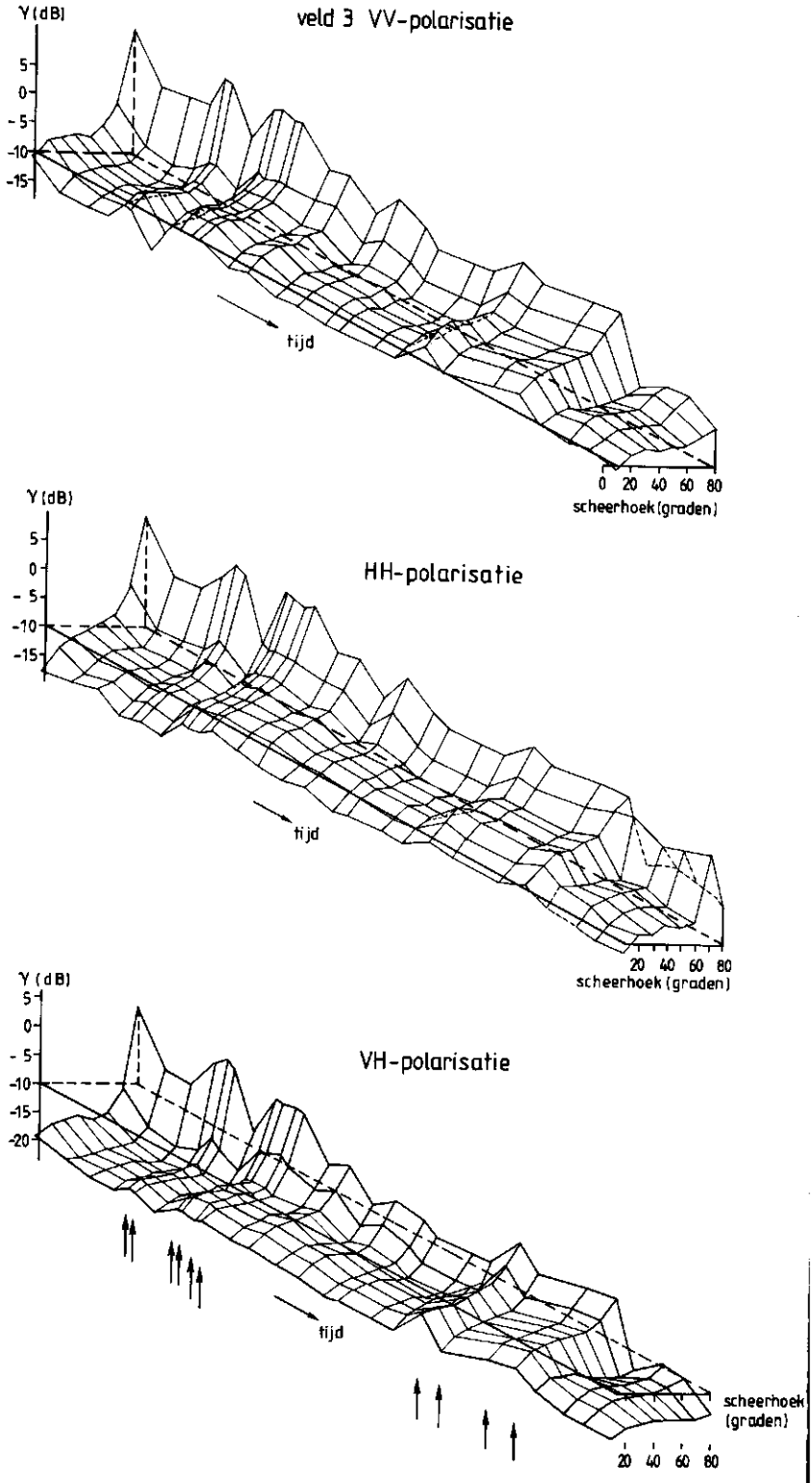



**12-6** De radarreflectie als functie van de invalshoek bij verschillende verhoudingen van de microruwheid (factor a) en golflengte (λ) (bron: Hoekman, 1983).

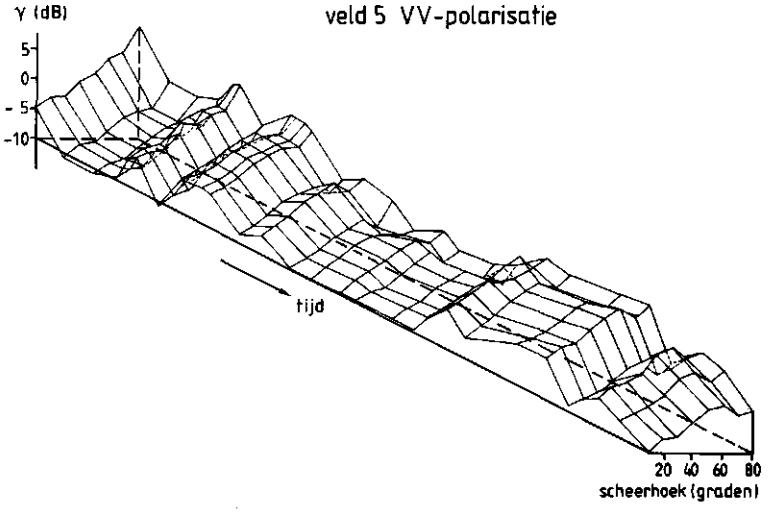


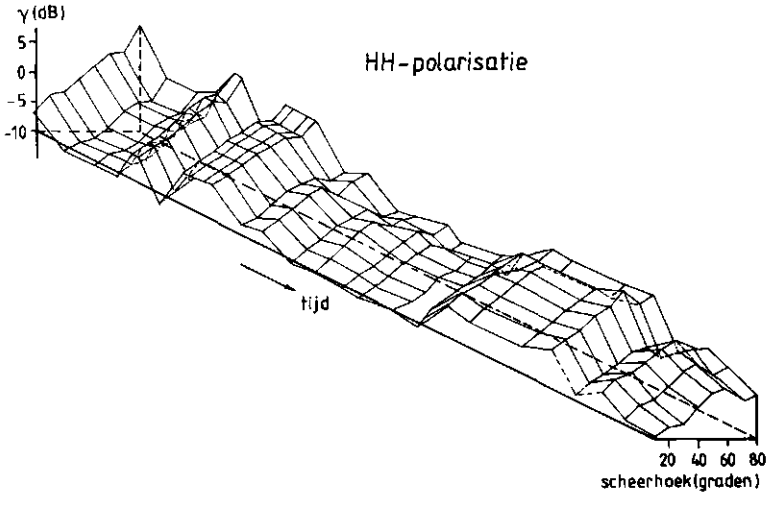

**12-7** Het effect van bodemvocht op de radarreflectie als functie van de invalshoek (bron: Hoekman, 1983) $\gamma_{bodem}$ (dB) = $\gamma_{droge\ bodem}$ (dB) + 0,22. vochtgehalte (in vol.-%).

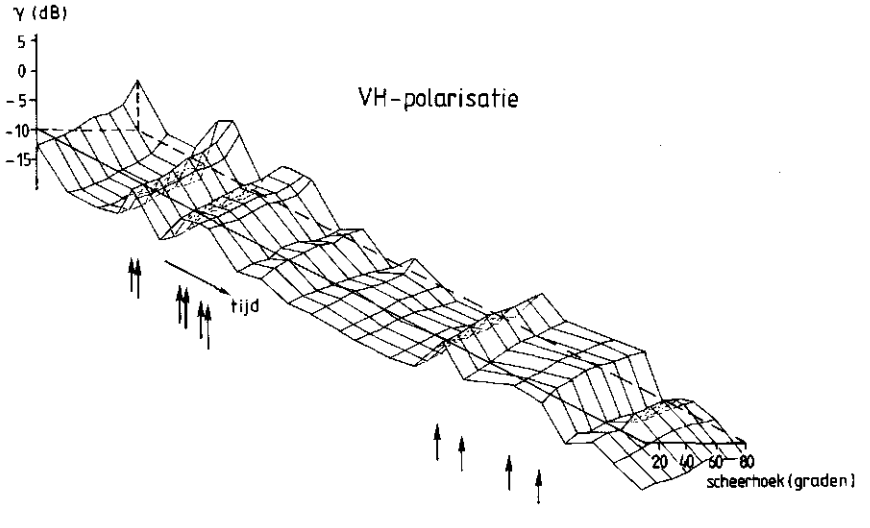
a.


Y (dB)
veld 3 VV-polarisatie
5
0
- 5
-10
-15
tijd
0 20 40 60 80
scheerhoek (graden)
Y (dB)
HH-polarisatie
5
0
- 5
-10
-15
tijd
20 40 60 80
scheerhoek (graden)
Y (dB)
5
0
- 5
-10
-15
-20
VH-polarisatie
tijd
scheerhoek
(graden)
20 40 60 80

b.




**12-8** Stereoplots van de γ-waarden als functie van de scheerhoek en als functie van de tijd voor VV-, HH- en VH-polarisatie. X-band scatterometer, proefboerderij 'de Bouwing', 1978 (bron: Radar bare soils 1978 data report).

**a** veld 3, fijn bed.

**b** veld 5, ruw bed: geploegd in voorafgaande herfst, parallel aan de inkijkrichting

Met een pijl zijn de meetdagen aangegeven waarvoor vanaf 1 dag te voren meer dan 10 mm neerslag is gevallen.

Zoals boven al werd opgemerkt neemt de radarreflectie van kale bodems in principe toe met het vochtgehalte van de bodem en af met de invalshoek. Hoekman (1983) heeft een theoretische toename van de radarverstrooiingscoëfficiënt ($\gamma$) van 0,22 dB per volumeprocent vocht afgeleid (figuur 12-7) in de X-band. Door de ROVE-werkgroep zijn uitvoerig data verkregen van de radarreflectie van kale bodems (ook in de X-band). In figuur 12-8 zijn resultaten gegeven voor een akker met een fijn zaaibed en voor een geploegde akker. Uit de resultaten van regressie-analyses uitgevoerd op deze data bleek dat als ruwe regel gehanteerd kon worden dat de radarreflectie met 0,27 dB per volume-% vocht veranderde.
Bij een totale variatie in vochtgehalte van zeg 35% betekent dit een variatie in de radarreflectie van zo'n 10 dB. Bij een nauwkeurigheid van ongeveer 0,5 dB, zijn er in beginsel dus zo'n 20 vochttrappen te onderscheiden m.b.v. radar! Dit is meer dan men kan onderscheiden aan de hand van vochtmetingen in het veld ten gevolge van de grote spreidingen die daarbij optreden. Dit verschil in onderscheidbaarheid duidt tevens op een van de grote problemen bij de interpretatie van de radarmetingen. Aangezien de radarreflectie bovendien nog hoekafhankelijk is, behoeven de veldmetingen voor wat betreft de ruwheid en de vochtverdeling aanzienlijke verfijning bezien vanuit bodemkundig oogpunt. De momenteel beschikbare reflectiedata kunnen wel een basis vormen voor een nieuwe klasse-indeling voor de veldmetingen. Uit figuur 12-8 blijkt bovendien dat de verlaging in radarreflectie ten gevolge van vochtverlies (opdroging) abrupter geschiedt naarmate het oppervlak ruwer is. Het lijkt dus mogelijk een verband te leggen tussen de plaats van het bodemoppervlak in de energiebalans en de gemeten radarreflectie.

## 12.3 Radarreflectiemodel voor bodem

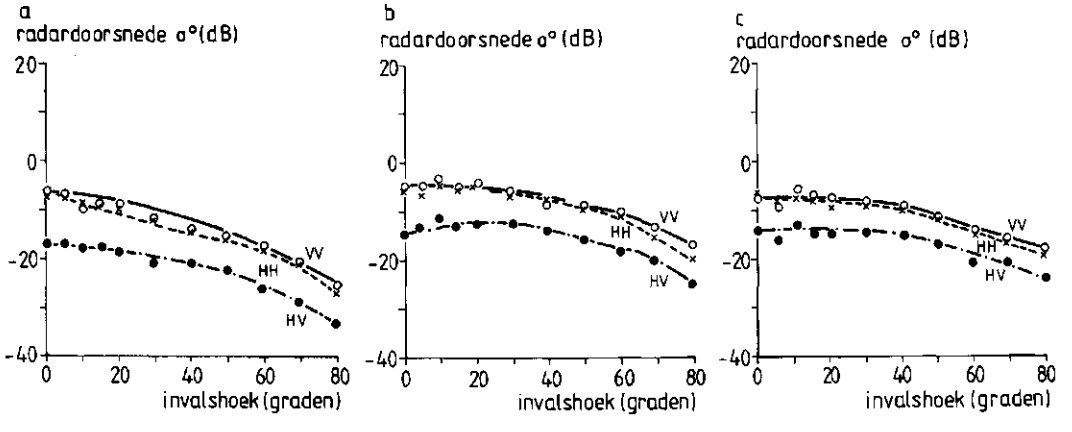
In Nederland wordt uitvoerig aan *modellering* gewerkt (o.a. Attema et al., 1982). In hoofdstuk 10 (paragraaf 10.3) is de radarreflectie voor een oppervlak gegeven door een sommatie van de bijdragen van vegetatie en bodem. Deze aanpak is vergelijkbaar met de in hoofdstuk 9 gegeven aanpak voor het optische gebied. De betreffende vergelijking luidt in eenvoudige vorm als volgt (zie vergelijking 10.7):

$$\gamma = C \cdot (1 - \tau) + G \cdot \exp(K \cdot m_s) \cdot \tau \qquad (12.2)$$

met $\gamma$ = radarverstrooiingscoëfficiënt
C = de radarreflectie van de vegetatie alleen
$\tau$ = de 'doorlatendheid' van het vegetatiedek
G = de radarreflectie voor een droge bodem (functie van $\varepsilon$)
K = constante afhankelijk van het bodemtype
$m_s$ = het volumetrisch vochtgehalte ($m^3/m^3$).

Hierbij zijn $\gamma$, $\tau$, C en G afhankelijk van de invalshoek.

De *doorlatendheid van het vegetatiedek* ($\tau$) in het microgolfgebied is vergelijkbaar met het *complement van de schijnbare bedekkingsgraad* in het optische gebied (vergelijk paragraaf 9.5, in het bijzonder vergelijking 9.3).
In de tweede term houdt de factor G rekening met de herrangschikking van vocht en vaste fase in het materiaal en de ruwheid van de bodem. De factor G is o.a. afhankelijk van de in paragraaf 12.1 gedefiniëerde diëlectrische constante. Uit de vele metingen blijkt overigens dat de radarreflectie bij horizontale polarisatie (HH) vrijwel gelijk is aan die bij verticale polarisatie (VV) en ongeveer 10 dB hoger ligt dan bij kruispolarisatie (HV). Behalve uit figuur 12-8 blijkt dit ook uit de literatuur (figuur 12-9). Bij kruispolarisatie is de gevoeligheid voor structuurveranderingen echter geringer. Bovendien blijkt uit de figuren 12-7 en 12-8 dat de vochtinvloed niet erg afhankelijk is van de invalshoek. Er treedt practisch onafhankelijk van de invalshoek een verschuiving van de curve op zonder een grote vormverandering, zeker wanneer over een korte periode wordt waargenomen en de oppervlaktestructuur niet wijzigt. Dit laatste is dus weergegeven in de factor $\exp(K.m_s)$.




12-9 Hoekafhankelijke radarreflectie voor los gestort, fijn, droog materiaal bij 8,6 GHz (a), 17,0 GHz (b) en 35,6 GHz (c)
(bron: Ulaby et al., 1986).

Voor de situatie waarbij alleen kale bodem aanwezig is ($\tau$ gelijk 1) wordt $\gamma$ alleen bepaald door het laatste gedeelte van vergelijking (12.2) dat betrekking heeft op de bodembijdrage ($G.\exp(K.m_s)$). Indien men $\gamma$ uitdrukt in dB (logaritmisch) dan kan men voor elke invalshoek afzonderlijk de volgende vergelijking eenvoudig afleiden uit vergelijking (12.2):

$$\gamma = a + b \cdot m_s \qquad (12.3)$$

Dit betekent dat er een lineair verband bestaat tussen de gemeten $\gamma$ en het vochtgehalte van de bodem. De coëfficiënten a en b kan men oplossen door lineaire regressie indien men gebruik maakt van een

dataset met een constante invalshoek.
Voor het bepalen van de oppervlakte-ruwheid (vervat in de constante G) is de aanname van een 'Gaussische verdeling' voor de kleine facetten voorkomend op grotere, maar zwakkere, golven van het bodemoppervlak vaak toereikend. Soms blijkt deze aanname echter iets te simpel omdat o.a. enkele grote facetten de radarreflectie enorm kunnen versterken.

## 12.4 Verslemping

De verandering van de bodemruwheid, in het bijzonder op fijnzandige gronden, en een *beginnende erosie* zijn onderzocht aan de hand van radarbeelden opgenomen tijdens een voorjaarsvlucht na een periode van hevige regenval gevolgd door enkele dagen mist in Noord-Groningen (Stolp & Janse, 1986). De radaropnamen van de toen gekarteerde velden, waarbij ingedeeld werd naar klassen van verslemping, waren onder een hoek van ongeveer 20 graden met de horizontaal (scheerhoek, zie figuur 10-2) verkregen. In tabel 12.2 zijn de correlaties vermeld tussen de afstand op het aardoppervlak tot de vluchtlijn (A) bepaald

Tabel 12.2 Correlatie-matrix voor de hoek tussen ploeg- en vliegrichting (P), de afstand tot de vluchtlijn (A), de verslempingsgraad (S) en de radarreflectie in de X-band (MN).

| | P | A | S | MN |
|---|---|---|---|---|
| P | – | | | |
| A | 0,78 | – | | |
| S | −0,76 | 0,79 | – | |
| MN | 0,86 | −0,85 | 0,86 | – |

door de invalshoek, de hoek tussen ploeg- en vliegrichting (P), de *verslempingsgraad* (S) visueel, vrij grof dus, beoordeeld in 9 klassen en de radarreflectie in de X-band weergegeven als een gemiddelde digitale pixelwaarde per veld (MN, evenredig met γ) (Reijerink, 1983). Indien men m.b.v. lineaire regressie de verslempingsgraad schat uit een lineaire combinatie van de overige 3 variabelen, dan krijgt men:

$$S = 0{,}19 \cdot MN - 4{,}4 \cdot P + 0{,}68 \cdot A - 22{,}1 \qquad (12.4)$$

In feite zou de betrouwbaarheid aanzienlijk verhoogd kunnen worden wanneer het vochtgehalte van de bodemtoplaag mede bepaald was (vgl. Wang et al., 1983). De beperking tot alleen horizontale polarisatie, tot één frequentie en tot één tijdstip en de aanname dat alle bodems op veldcapaciteit verkeerden, laten een extrapolatie van de gegevens niet toe. Bovendien komen de gebruikte klassen voor de verslempingsgraad niet overeen met andere maten voor de bodemruwheid.

## 12.5 Relatie vocht-bodem-gewas

Als de bodem bedekt is door *gewas* zal de eerste term in vergelijking (12.2) een rol gaan spelen samen met de factor $\tau$ in de tweede term ($\tau < 1$). Met name naar de kortere golven (X-band en korter) kan het gewas dan al gauw de invloed van de bodem gaan afschermen. Berekeningen en metingen hebben aangetoond dat dit voor langere golven (bijv. in de L-band) minder het geval is, maar dat er wel rekening mee moet worden gehouden. Zo vertoonden SAR-opnamen uit satellieten (zie paragraaf 8.4), aangevuld met scatterometer-gegevens (zie paragraaf 11.2.4), (beide in de L-band, zie figuur 3-5) correlaties tussen de radarreflectie van met vegetatie bedekte, vlakke, bodems en het vochtgehalte van die bodems onder de vegetatie. Uit bemonstering van de bodemlagen 0-2 en 0-15 cm werd via regressie een toename in radarreflectie van resp. 0,31 en 0,41 dB per volume-procent vocht gevonden. De spreidingen waren aanzienlijk. Hiervoor zijn een aantal verklaringen aan te voeren. De aanwezigheid van kluiten, de grote variabiliteit in de schaarse vegetatie-opslag en de vele plassen zullen van betekenis zijn geweest. Interessant is de betekenis van de grote hoeveelheid vocht opgeslagen in het schaarse plantedek na hevige regenval. Bovendien blijkt de bewerkingsrichting, ook op de deels reeds begroeide percelen, nog lange tijd significant tot de radarreflectie bij te dragen. Men kan zich daarom afvragen of aanvullende informatie, bijvoorbeeld uit kleureninfrarood-opnamen, niet als een noodzakelijk gegeven moet worden beschouwd. Het bleek bijvoorbeeld dat rijpende gewassen zich anders gedragen dan groene gewassen (Blanchard & Chang, 1983).

## 12.6 Slotbeschouwing

De overgrote rijkdom aan gegevens welke uit radarbeelden kunnen worden verkregen, kan op dit moment nog nauwelijks adequaat worden behandeld uitgaande van de mogelijke toepassingen. Nog afgezien van de visuele veldbemonstering is de kennis van de veldgegevens vrij primitief. Het feit bovendien dat een gedistribueerd object (zie paragraaf 10.1) in een niet-evenwichtstoestand wordt vastgelegd, houdt tevens in dat (geo-) statistische bewerkingen tekort schieten.
Aangezien verschillende deelaspecten voor een practische toepassing in aanmerking kunnen komen dient men zich vragen te stellen t.a.v. de beschikbaarheid van een geschikte referentie voor alle betrokken waarden waarbij zowel de vereiste gevoeligheid als de practische haalbaarheid overwogen en ingeschat moeten worden.
De informatie, die vanuit andere RS-bronnen of uit veldwaarnemingen kan worden ingebracht, kan wel eens noodzakelijk blijken te zijn gezien de bijzondere positie die het bodemoppervlak in de energiebalans inneemt. Daarnaast verdient de ontwikkeling van modellen voor de karakterisering van de veranderende bodemstructuur meer aandacht.

## 12.7 Literatuur

1 Attema, E.P.W., P.J. v. Kats & L. Krul, 1982. A radar signature model for partially coherent scattering from irregular surfaces. IEEE Trans. Geosci. Rem. Sensing, GE-20, 76-84.

2 Blanchard, B. & A. Chang, 1983. Estimation of soil moisture from Seasat SAR data. Am. Water Res. Bull. 19(5), 803-810.

3 Dobson, M.C., F.T. Ulaby, M. Hallikainen & M. El-Rayes, 1985. Microwave dielectric behavior of wet soil – Part II: Four-component dielectric mixing models. IEEE Trans. Geosci. Rem. Sensing, GE-23, 35-46.

4 Gijsen, J.C.O. van & A.R.P. Janse, 1973. Discrimination of exitances. A theoretical approach for parallel ridges. Proc. Conf. Remote Sensing and Soil Science, WG III, Rome, 1973.

5 Hoekman, D.H., 1983. Radarverstrooiingsmodellen voor vegetatie en kale bodem. Cultuurtechnisch Tijdschrift 22(5), febr./maart '83, 315-326.

6 Loor, G.P. de, 1983. The dielectric properties of wet materials. IEEE Trans. Geosci. Rem. Sensing, GE-21, 364-369.

7 Radar bare soils 1978 data report, 1978. ROVE team, 53 blz.

8 Reijerink, J., 1983. Het vaststellen van verslempingskenmerken met X-band radar. Scriptie LUW, Vakgr. Bodemkunde en Plantevoeding, oktober 1983.

9 Stolp, J. & A.R.P. Janse, 1986. X-band radar backscattering for detecting spatial distribution of soil slaking. ITC-Journal 1986-1, 82-87.

10 Ulaby, F.T., C.T. Allen & A.K. Fung, 1983. Method for retrieving the true backscattering coefficient from measurements with a real antenna. IEEE Trans. Geosci. Rem. Sensing, GE-21, 308-313.

11 Ulaby, F.T., R.K. Moore & A.K. Fung, 1986. Microwave remote sensing. Active and passive. Vol. III. Artech House, Inc., Dedham. De figuren zijn overgenomen met toestemming van Artech House Inc., Londen.

12 Wang, J., P. O'Neill, T. Jackson & E. Engman, 1983. Multi-frequency measurements of the effects of soil moisture, soil texture and surface roughness. IEEE GE-21, 44-50.

# Thema 4 Beeldanalyse-technieken en geografische informatiesystemen voor de remote sensing

In Supplement 1 worden digitale beeldanalyse en visuele beeldinterpretatie met elkaar vergeleken. De grenzen tussen beide benaderingswijzen zullen steeds meer vervagen, zonder dat de specifieke interpretatie-mogelijkheden van de mens zullen gaan inboeten aan betekenis. In de komende hoofdstukken komt hoofdzakelijk de digitale aanpak van de beeldinterpretatie aan bod en zullen digitale beeldbewerkingstechnieken, classificatie-algorithmen en andere patroonherkenningsmethoden de revue passeren. De grondbegrippen worden gegeven voor de definiering van objecten door middel van hun klasse-aanduiding en door een typering van hun soort. Tevens wordt aandacht besteed aan de topologische samenhang van onderdelen van het beeld.

Nieuw in de patroonherkenning is de theorie die gebaseerd is op het zoeken naar ruimtelijke patronen in het beeld door middel van structuur-bouwstenen, gerangschikt in een aantal klassen. Door een proces van 'groeien' (aggregatie) ontstaan ruimtelijke patronen, die van belang zijn voor de beeldinterpretatie.

Vervolgens wordt de manier toegelicht waarop beelden van verschillende opnamedatum of van verschillende sensorsystemen kunnen worden gecombineerd. Zo kan een gemeenschappelijke basis worden verkregen waarop RS-informatie kan worden samengevoegd met andersoortige informatie. Het thema zal daarom worden besloten met een bespreking van de snel in betekenis toenemende integratie van kennis door middel van de technieken van de GIS.

Documentatie

# 13 Digitale beeldinterpretatie

M. Molenaar

## 13.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zullen we onder *beeldinterpretatie*, als onderdeel van de patroonherkenning (zie hoofdstuk 1), verstaan het herkennen en identificeren van objecten in het terrein, waarbij we de digitale benaderingswijze als uitgangspunt nemen (zie Supplement 1). Terreinobjecten worden gekenmerkt door hun aard (= *thematiek*) en door hun vorm en afmetingen (= *geometrie*). De aard van objecten wordt vastgesteld aan de hand van hun spectrale signatuur zoals in een RS-beeld vastgelegd (spectrale patroonherkenning). Hun geometrie wordt vastgesteld met behulp van de pixels die de afbeelding van het object samenstellen (ruimtelijke patroonherkenning).
Bij de beeldinterpretatie dienen er dus *twee soorten beslissingen* genomen te worden. Allereerst een beslissing waarbij aan de hand van de spectrale signatuur een label aan beeldelementen (pixels) wordt toegekend, dat aangeeft tot welke objectklasse ze horen. Dit is het probleem van de *beeldclassificatie* (paragraaf 13.2). Ten tweede moet voor de aldus geclassificeerde pixels beslist worden tot welk gemeenschappelijk object ze horen. Dit gebeurt met behulp van een 'topologische operator', die aangeeft welke onderling aangrenzende pixels dezelfde labels hebben en daarom geacht worden tot hetzelfde object te horen. Uit zulke buurpixels kunnen de objecten via een *topologische structuur* worden samengesteld (paragraaf 13.3).
In het navolgende zullen de twee soorten beslissingen, de thematische en de topologische, worden behandeld en zal het object-herkenningsproces in enkelvoudige doorgang worden beschreven. De enkelvoudige doorgang betekent dat het proces slechts eenmaal wordt doorlopen. In de praktijk kan het hele proces of delen ervan meermalen worden doorlopen waarbij in iedere doorgang de resultaten van de vorige worden verbeterd. Dit kan door externe informatie toe te voegen, of door voor pixels of reeds geïdentificeerde objecten, hun door het beeld gegeven omgeving of context in beschouwing te nemen.

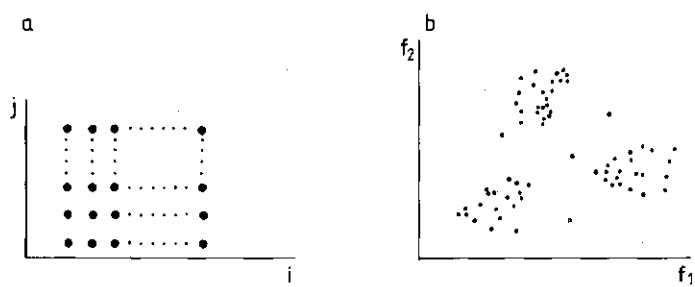
## 13.2 Thematische beslisregels

*Thematische beslisregels* worden gehanteerd om aan de hand van de spectrale signatuur van pixels aan te geven tot welke objectklasse ze behoren. De objectklasse wordt dus aangegeven door middel van een *label* dat aan het pixel wordt verbonden. Voor de verdere beschouwingen onderkennen we drie soorten objecten, te weten: vlakobjecten, lijnobjecten en puntobjecten.
Zoals de termen al aangeven hebben *vlakobjecten* een tweedimensionaal karakter. In een beeld worden ze gevormd door een vlakvullende samenklontering van pixels. *Lijnobjecten* worden gevormd door een keten van aaneengesloten pixels waarbij de lengte van de keten groot is ten opzichte van de breedte. *Puntobjecten* worden in een beeld weergegeven door geïsoleerde pixels of kleine clusters.

De beslisregels die tot labeltoekenning aan de pixels leiden kunnen in twee hoofdgroepen worden onderverdeeld. Bij de eerste hoofdgroep wordt ieder pixel *afzonderlijk* behandeld. Dat wil zeggen dat men per pixel op basis van de stralingswaarden in een of meerdere spectrale banden een label (klassenaam) toekent. Hier gaat het dus om (multi)-spectrale classificatie (paragraaf 13.2.1).
Bij de tweede hoofdgroep wordt de stralingswaarde van een pixel, meestal in één spectrale band, vergeleken met die van omliggende pixels binnen een venster. Hier gaat het dus om een labeltoekenning (objecttype) via een bewerking binnen een *venster* (paragraaf 13.2.2).
Bij beide methoden wordt dus per pixel een label toegewezen met een verschillende betekenis.

### 13.2.1 Multispectrale classificatie

Laten we voor het begrijpen van *multispectrale classificatiemethoden* uitgaan van een beeld waarin per pixel stralingswaarden zijn geregistreerd in twee verschillende golflengtebanden van het EM-spectrum. Alle pixels hebben hun eigen positie in het beeld, welke wordt aangegeven door de indices i en j. De waarde van een pixel op positie (i,j) zal aangeduid worden met f(i,j). De stralingswaarde van een pixel met positie (i,j) in een eerste spectrale band wordt aangeduid met $f_1(i,j)$ en de stralingswaarde in een tweede band met $f_2(i,j)$. We zeggen nu dat (i,j) de positie van het pixel in de *beeldruimte* aangeeft (figuur 13-1a).




**13-1** Grafische weergave van de positie van pixels voor de situatie met twee spectrale banden.
a: in de beeldruimte
b: in de kenmerk-ruimte.

Naast deze beeldruimte, kunnen we echter ook een andere ruimte definiëren met twee assen waarlangs de waarden van $f_1$ respectievelijk $f_2$ worden uitgezet (figuur 13-1b). Daar $f_1$ en $f_2$ de kenmerken van een pixel worden genoemd spreken we hier over een *kenmerkruimte* (zie Duda & Hart, 1973, hoofdstuk 1).
In deze ruimte wordt een pixel (i,j) dus weergegeven door een punt met de coördinaten $f_1(i,j)$ en $f_2(i,j)$. Over het algemeen is het nu zo dat bepaalde typen objecten, bijvoorbeeld gebieden met een bepaalde bedekkingssoort, zoals gras, bos, kale bodem, water, bebouwd gebied etc. een eigen spectrale signatuur vertonen. Dat wil zeggen dat deze objecten in het beeld gekenmerkt worden door een bepaalde combinatie van $f_1$ en $f_2$ waarden van de relevante pixels. Het is niet zo dat deze combinaties exact gelijk zijn voor pixels met eenzelfde bedekkingssoort. Er treden variaties op, maar er vindt meestal wel een zekere wolkvorming (*'clustering'*) plaats.
Een gangbare werkwijze is nu dat in het beeld een aantal *trainingspixels* worden aangewezen, dat zijn pixels waarvan men weet wat voor bedekkingssoort erbij hoort. Voor deze pixels bepaalt men tot welke puntenwolk of cluster in de *kenmerkruimte* ze horen en vervolgens beslist men dat alle pixels die tot dezelfde cluster behoren ook dezelfde bedekkingssoort hebben. Deze bedekkingssoort is dan de label (klassenaam) die aan zo'n pixel wordt opgehangen.

Een probleem is nu dat door de variatie in $f_1$ en $f_2$ het niet altijd zonder meer duidelijk is tot welke cluster bepaalde punten in de kenmerkruimte horen. Daarom definiëert men op een of andere manier een *afstandsmaat* die aangeeft hoever een punt van een bepaalde wolk af ligt. Door zulke maten voor een bepaald punt ten opzichte van verschillende omringende wolken te berekenen, kan men het punt tenslotte toevoegen aan die wolk ten opzichte waarvan de afstand het kleinst is. Het kan ook zijn dat de afstand ten opzichte van alle wolken zo groot is dat besloten wordt dat het punt nergens bij hoort; het betreffende pixel krijgt dan géén label.

Deze redenatie geeft aan dat de beslisregel die op basis van de spectrale signatuur van een pixel een label toewijst, in wezen een beslisregel is die aangeeft aan welke cluster het punt, dat dat pixel representeert in de kenmerkruimte, moet worden toegevoegd. Essentiëel in deze beslisregel is dus de maat die de afstand van een pixel tot een cluster weergeeft. Laten we de afstand van punt p ten opzichte van cluster C aangegeven als d(p,C) (zie Tou en Gonzales, 1974), dan is de beslisregel:
als voor een punt p ten opzichte van alle clusters c de afstand d(p,c) groter is dan de afstand d(p,C) ten opzichte van een bepaald cluster C dan behoort p tot C.

$$d(p, C) = \min_{c} d(p, c) \rightarrow p \in C \qquad (13.1)$$

Daaraan kan men nog toevoegen dat als d(p,C) groter is dan een bepaalde *drempelwaarde* T, dus als de minimale afstand te groot is, dat er dan geen toewijzing plaatsvindt, dus:

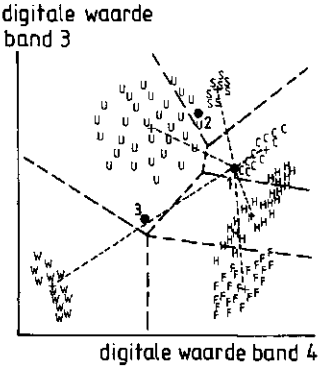
$$\min_c d(p,c) \geqq T \rightarrow \text{geen toewijzing} \qquad (13.2)$$

Omdat het hier om een afstandsmaat gaat moet altijd gelden:

$$d(p,c) \geqq 0 \qquad (13.3)$$

Nu volgen een aantal voorbeelden van beslisregels (zie Lillesand & Kiefer, 1987, hoofdstuk 8; Richards, 1986, hoofdstuk 8; Mather, 1987, hoofdstuk 8):

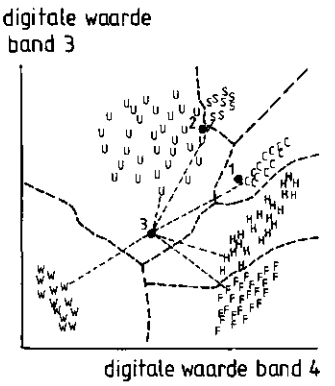
1 *Naaste midden* ('minimum distance to means') classificatie.
Van iedere cluster in de kenmerkruimte wordt het middelpunt bepaald. Voor een nieuw toe te wijzen punt worden de afstanden ten opzichte van deze middelpunten berekend. Het punt wordt toegewezen aan de cluster waarvan het middelpunt het dichtst bij het toe te wijzen punt ligt (figuur 13-2).




13-2 Naaste midden classificatie.
De beslisgrenzen zijn aangeduid met – – –.
Opm.: punt 2 zal foutief worden geclassificeerd.
W = water; U = stad; S = zand; C = mais; H = hooiland; F = bos
(bron: Lillesand & Kiefer, 1987).

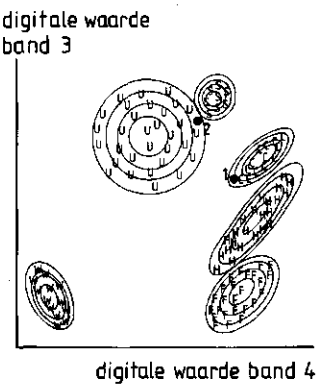
2 *Naaste buren* ('k-nearest neighbours') classificatie.
Van alle clusters worden k punten gezocht die het dichtst bij het nieuw toe te wijzen punt liggen. Het nieuwe punt wordt toegewezen aan die cluster waarvan de gemiddelde afstand van de k punten tot het te classificeren punt het kleinst is (figuur 13-3). Het getal k is ter keuze, bijv. 1, 2 of 3. Ook als k=1 is de hoeveelheid rekenwerk bij de naaste buren-methode nog beduidend groter dan bij de naaste midden-methode; daar staat tegenover dat bij de naaste buren-methode rekening wordt gehouden met vorm en omvang van de puntenwolken.

3 '*Maximum likelihood*' classificatie.
Voor iedere cluster worden, afhankelijk van de verdeling van punten in de cluster om hun gemiddelde, ellipsen om het gemiddelde getrokken, waarbij wordt uitgegaan van een veronderstelde normale (Gaussische) kansverdeling. Per ellips kan men aangeven wat de kans




**13-3** Naaste buren classificatie (k=1). De beslisgrenzen zijn aangeduid met – – –. Opm.: punt 2 zal goed worden geclassificeerd.
Voor verklaring van de symbolen zie fig. 13-2 (bron: Lillesand & Kiefer, 1987).

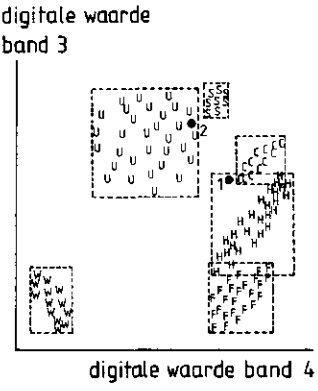
is dat een punt binnen zo'n ellips valt als het tot die cluster behoort. Hoe ruimer de ellips hoe groter de kans dat een punt er binnen valt als het tot die cluster behoort, en hoe kleiner de kans dat hij er buiten valt. Dus hoe verder men van het gemiddelde afgaat hoe kleiner de kans is dat men nog een punt behorende tot de cluster vindt. Van een nieuw toe te wijzen punt berekent men nu, uitgaande van zijn positie in de kenmerkruimte, deze kans ten opzichte van de omringende clusters. Het wordt dan toegewezen aan die cluster waarvoor de kans het grootst is dat men op die positie nog een punt vindt (figuur 13-4).




**13-4** Maximum likelihood classificatie. Ellipsen met gelijke kans dat een punt binnen zo'n ellips valt zijn getrokken voor diverse clusters.
Voor verklaring van de symbolen zie fig. 13-2 (bron: Lillesand & Kiefer, 1987).

4 *Parallellepipedum* classificatie.
Om de clusters worden rechthoeken getrokken zodanig dat deze elkaar niet overlappen. Als een nieuw punt binnen zo'n rechthoek valt wordt het aan de betreffende cluster toegewezen (figuur 13-5).

Bij de bovenstaande voorbeelden van beslisregels is er van uitgegaan dat er per pixel twee stralingswaarden werden geregistreerd. Men kan de redenering ook uitbreiden tot meer stralingswaarden. De kenmerkruimte krijgt dan meer dimensies, voor iedere spectrale band een as. De bij de verschillende beslisregels behorende rekenformules kunnen over het




13-5 Parallellepipedum classificatie. Opmerking: punt 1 zal foutief worden geclassificeerd.
Voor verklaring van de symbolen zie fig. 13-2 (bron: Lillesand & Kiefer, 1987).

algemeen tot willekeurig veel dimensies uitgebreid worden. Meestal zal men echter eerst onderzoeken welke spectrale banden of combinaties daarvan de meeste informatie bevatten. De classificatieprocedures zal men dan tot die banden beperken. Dat wil zeggen dat de kenmerkruimte dan toch maar een beperkt aantal dimensies heeft: twee à drie of vier.

### 13.2.2 Vensteroperaties

Beslisregels die tot toekenning van een label aan een pixel leiden door middel van een vergelijking van zijn stralingswaarden met die van omliggende pixels, zijn gebaseerd op bewerkingen in de *beeldruimte*. Dus hier wordt gebruik gemaakt van de ordening van de beeldelementen door middel van de indices i,j.
De omgeving van een pixel wordt gegeven door een *venster*. Een venster bevat pixels f(p,q) met p=i+r en q=j+s waarbij
$r \varepsilon \{-n_r,\ldots,-1,0,1,\ldots,n_r\}$ en $s \varepsilon \{-n_s,\ldots,-1,0,1,\ldots,n_s\}$
dus index p loopt over een bereik van $i-n_r$ tot en met $i+n_r$ en index q loopt over een gebied $j-n_s$ tot en met $j+n_s$. Bijvoorbeeld als $n_r = 1$ en $n_s = 1$ dan is het bereik van (r,s) gegeven door:

| | | |
|---|---|---|
| -1,1 | 0,1 | 1,1 |
| -1,0 | 0,0 | 1,0 |
| -1,-1 | 0,-1 | 1,-1 |

en het bereik van (p,q) is:

| | | |
|---|---|---|
| i-1,j+1 | i,j+1 | i+1,j+1 |
| i-1,j | i,j | i+1,j |
| i-1,j-1 | i,j-1 | i+1,j-1 |

Het venster gecentreerd om (i,j) is dan:

| | | |
|---|---|---|
| f(i-1,j+1) | f(i,j+1) | f(i+1,j+1) |
| f(i-1,j) | f(i,j) | f(i+1,j) |
| f(i-1,j-1 | f(i,j-1) | f(i+1,j-1) |

Op de pixels binnen een venster wordt nu een bewerking (*vensteroperatie*) uitgevoerd waardoor een *beoordelingsmaat* g wordt verkregen. Deze beoordelingsmaat g wordt geacht betrekking te hebben op het centrale pixel (i,j), dus noemen we de beoordelingsmaat g(i,j). Aan de hand van deze beoordelingsmaat wordt dan beslist of een bepaald label L (objecttype) aan pixel (i,j) wordt toegekend of niet. Dus er wordt een drempelwaarde T ingevoerd, zodat:

$$g(i,j) > T \rightarrow \text{pixel } (i,j) \text{ krijgt label } L \tag{13.4}$$

Een aantal vensteroperaties hebben de structuur:

$$g(i,j) = \sum_r \sum_s h(r,s) \cdot f(i+r, j+s) \tag{13.5}$$

In dit geval spreekt men over *lineaire filters*.

Als $n_r = 1$ en $n_s = 1$, dan zijn de filterelementen h(r,s):

| | | |
|---|---|---|
| h(-1,1) | h(0,1) | h(1,1) |
| h(-1,0) | h(0,0) | h(1,0) |
| h(-1,-1) | h(0,-1) | h(1,-1) |

Voorbeelden van zulke lineaire filters zijn:

1. *Gradiënt filters*

| | | |
|---|---|---|
| -1 | 0 | 1 |
| -1 | 0 | 1 |
| -1 | 0 | 1 |

of

| | | |
|---|---|---|
| -1 | -1 | -1 |
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 |

of

| | | |
|---|---|---|
| -1 | -1 | 0 |
| -1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 |

Als in dit geval g(i,j) > T, dan betekent dat dat het centrale pixel op een helling ligt, dat wil zeggen dat in een bepaalde richting de waarde van f significant toeneemt. Dat kan op zich weer betekenen dat het centrale pixel op de rand tussen twee gebieden (objecten) ligt (zie Rosenfeld & Kak, 1982, paragraaf 10.2).

2. *Gerichte Laplace filters*

| | | |
|---|---|---|
| -1 | 2 | -1 |
| -1 | 2 | -1 |
| -1 | 2 | -1 |

of

| | | |
|---|---|---|
| -1 | -1 | 2 |
| -1 | 2 | -1 |
| 2 | -1 | -1 |

of

| | | |
|---|---|---|
| -1 | -1 | -1 |
| 2 | 2 | 2 |
| -1 | -1 | -1 |

Als g(i,j) > T, dan wijst dat er op dat het centrale pixel op een lijnobject ligt (zie Rosenfeld & Kak, 1982, paragraaf 10.3).

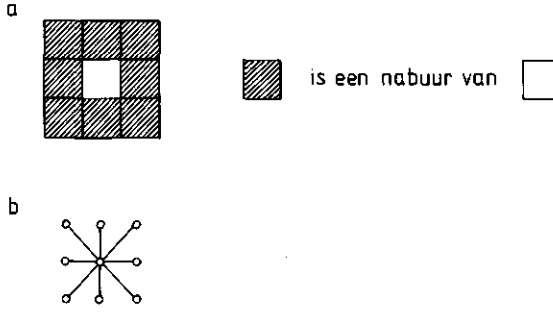
Daarnaast zijn er *niet-lineaire operatoren* (filters) zoals die waarbij binnen het venster de variatie van de f-waarden wordt geëvalueerd en vastge-

legd in een *textuurmaat* (zie Haralick, 1979). Deze textuurmaten zijn vaak kenmerkend voor bepaalde typen gebieden. Ze leiden tot het toekennen van een label dat aangeeft tot wat voor type vlakobject het centrale pixel van het venster hoort (zie Haberäcker, 1987, hoofdstuk 15.1). Verder zijn er nog niet-lineaire filters zoals rangorde (mediaan) en relaxatie filters.

De labels die na een vensteroperatie aan het centrale pixel van een venster worden toegekend, geven dus aan of het tot een bepaald type vlakobject of lijnobject behoort. Meestal wordt bij vensteroperaties slechts één spectrale band in beschouwing genomen, dit in tegenstelling tot multispectrale classificatiemethoden. Daartegenover beschouwen multispectrale methoden meestal maar één pixel tegelijk, terwijl bij vensteroperaties juist meerdere pixels in een omgeving gezamenlijk worden bewerkt.
Voor zowel vensteroperaties als multispectrale classificatie-methoden geldt echter dat na iedere bewerking slechts aan één pixel tegelijk een label wordt toegekend.
Andere toepassingen van dergelijke vensteroperaties liggen o.a. op het terrein van de beeldverbetering; dit wordt in paragraaf 14.4 beschreven.

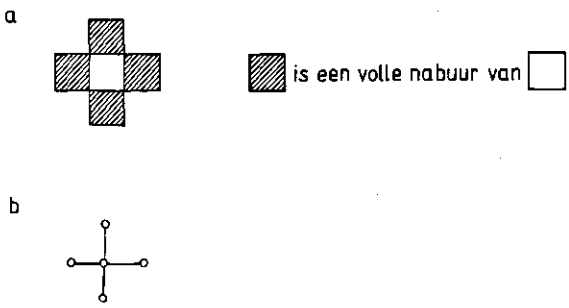
## 13.3 Topologische beslisregels

Tot zover is dus door middel van thematische beslisregels vastgesteld tot wat voor objectklasse de afzonderlijke pixels in een beeld horen. Daarmee zijn dan nog niet de *objecten als zodanig* geïdentificeerd, want zoals we eerder hebben gezien, worden deze gekenmerkt door hun aard èn geometrie. Hun aard is door de tot nu toe toegekende pixel-labels vastgesteld. De geometrie moet nu nog bepaald worden door vast te stellen welke pixels in het beeld gezamenlijk tot eenzelfde object behoren. Dus we moeten de *samenhang* tussen pixels vaststellen. Deze samenhang wordt onderzocht met behulp van wat we de *topologische basisrelatie* noemen in een raster of beeld. Deze basisrelatie is gebaseerd op het *nabuurschap van pixels*. Ieder pixel, behalve die aan de rand van een beeld, heeft acht naburen (figuur 13-6a). Deze relatie kan beschreven




**13-6** Samenhang tussen pixels in een RS-beeld.
a: nabuurschap van pixels in rasterformaat
b: idem, weergegeven als netwerk.

worden in de vorm van een *netwerk* (zie Wilson, 1985, hoofdstuk 2), waarbij een pixel wordt weergegeven door een knooppunt en de nabuurschapsrelatie door een *zijde* die twee knooppunten verbindt (zie Lord & Wilson, 1986, paragraaf 11.4). Dit is schematisch weergegeven in figuur 13-6b.
Het begrip nabuur kunnen we nog verscherpen tot het begrip '*volle nabuur*'. Twee pixels zijn volle naburen als ze een zijde gemeenschappelijk hebben. Dit is geïllustreerd in figuur 13-7.



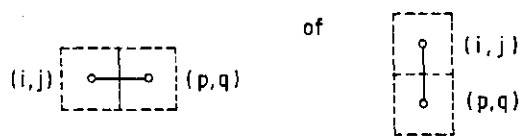

**13-7** Illustratie van het begrip 'volle nabuur'.
a: rasterformaat
b: netwerk.

Uit deze voorbeschouwing volgt dat het onderzoek naar samenhangen tussen pixels in een beeld kan geschieden door het zoeken naar *topologische structuren*. Deze topologische structuren kunnen gevonden worden via topologische basisrelaties welke in een 3x3 venster onderzocht kunnen worden.

13.3.1 Het opsporen van vlakobjecten

13.3.1.1 Het opsporen van vlakobjecten in rasterformaat
*Vlakobjecten* hebben een tweedimensionaal karakter; daarom wordt geëist dat ze zijn opgebouwd uit volle naburen, dus pixels die een zijde gemeenschappelijk hebben.
Bij het vinden van vlakobjecten wordt daarom de beslisregel gehanteerd: twee *volle* naburen pixel (i,j) en pixel (p,q) behoren tot hetzelfde vlakobject als ze dezelfde label hebben (figuur 13-8). De beslisregel hiervoor luidt:

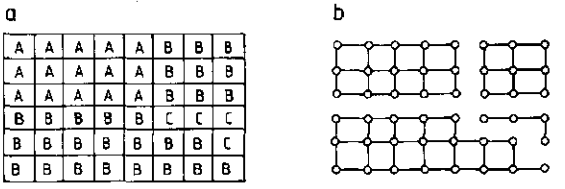
$$L(i,j) = L(p,q) \rightarrow \text{zijde}\,((i,j),(p,q)) \tag{13.6}$$




**13-8** Vlakobjecten bestaan uit volle naburen.

Deze label betreft een klassenaam die volgt uit multispectrale classificatie of een objecttype dat volgt uit een vensteroperatie. Uiteraard moeten de labels betrekking hebben op een vlakobjectklasse.

Uit de afzonderlijke zijden wordt een netwerk opgebouwd. Twee pixels behoren tot hetzelfde object als er een *pad* is van het ene pixel naar het andere pixel. Een pad is een aaneengesloten keten van zijden. Objecten in een beeld worden dus gedefiniëerd door de in een netwerk verbonden pixels. De hier gevonden topologische samenhang beschrijft objecten in beeld- of *rasterformaat* (figuur 13-9).

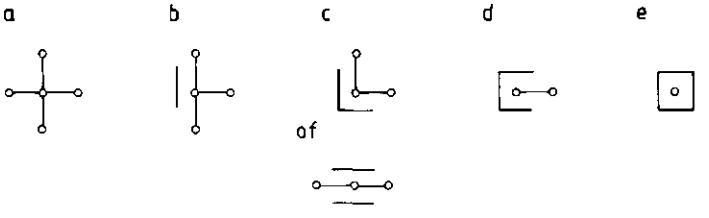



**13-9** Vlakobjecten weergegeven in (a) rasterformaat (beeld) en als (b) netwerk.

13.3.1.2 Omzetting van vlakobjecten naar vectorformaat

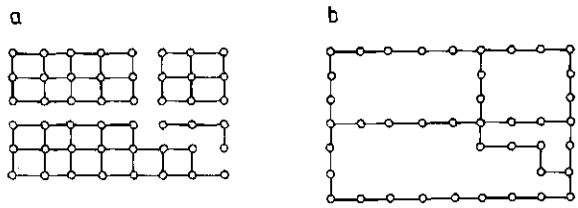
Vlakobjecten worden in *vectorformaat* beschreven door middel van hun *omtrek*. Deze kan relatief eenvoudig van het rasterformaat worden afgeleid, met de volgende regels:

1) is een pixel verbonden met vier volle naburen, dan ligt het binnen in een vlakobject (figuur 13-10a).
2) is het pixel verbonden met drie volle naburen, dan is een van de pixelzijden ook een zijde van de grens van het vlakobject waartoe het pixel behoort (figuur 13-10b).
3) is het pixel verbonden met twee volle naburen, dan zijn twee pixelzijden ook grenszijden (figuur 13-10c).
4) is het pixel verbonden met een volle nabuur, dan zijn drie pixelzijden ook grenszijden (figuur 13-10d).
5) is het pixel niet verbonden met volle naburen, dan is het een geïsoleerd pixel (figuur 13-10e).




**13-10** Beschrijving van de omgeving van een pixel.
- **a**: vier volle naburen (orde = 4)
- **b**: drie volle naburen (orde = 3)
- **c**: twee volle naburen (orde = 2)
- **d**: een volle nabuur (orde = 1)
- **e**: geïsoleerd pixel (orde = 0).

Door nu de *orde* en *verbondenheid* van alle pixels in een beeld te onderzoeken kan men de grenszijden van vlakobjecten opsporen. Een aaneengesloten keten van zulke zijden geeft dan de topologie van de vlakobjectgrenzen in een vectorformaat (figuur 13-11).

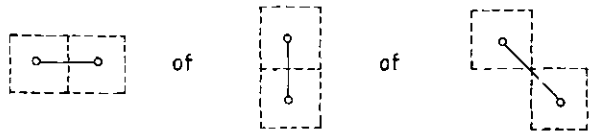



**13-11** Vergelijk tussen (a) rastertopologie en (b) vectortopologie.

13.3.2 Het opsporen van lijnobjecten in rasterformaat

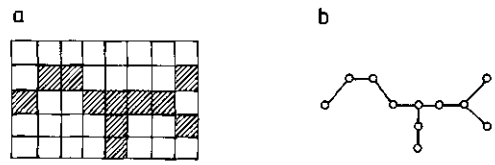
*Lijnobjecten* zijn eendimensionaal, dat wil zeggen hun breedte is gering of verwaarloosbaar ten opzichte van hun lengte. Daarom hoeft hiervoor niet de eis gesteld te worden dat ze uit volle naburen zijn opgebouwd. De beslisregel is nu: twee naburen (i,j) en (p,q) behoren tot hetzelfde lijnobject als ze dezelfde label hebben (figuur 13-12). De beslisregel hiervoor luidt:

$$L(i,j) = L(p,q) \rightarrow \text{zijde}\,((i,j),(p,q)) \tag{13.7}$$




**13-12** Lijnobjecten bestaan uit naburen (vgl. fig. 13-8).

Uiteraard moeten de labels betrekking hebben op een lijnobjectklasse. Dus ook hier wordt weer uit de afzonderlijke zijden een netwerk opgebouwd. Twee pixels behoren tot hetzelfde lijnobject als er een pad van het ene pixel naar het andere pixel is (figuur 13-13). Voor lijnobjecten hoeft er geen onderscheid gemaakt te worden tussen hun topologische structuur in een beeld (raster) en in een vectorbestand.




**13-13** Lijnobjecten weergegeven in (a) rasterformaat en als (b) netwerk (vgl. fig. 13-9).

## 13.4 Slotopmerkingen

In de opzet van dit hoofdstuk worden de verschillende beslisregels slechts één keer doorlopen. Bovendien werd alleen bij multispectrale classificatie verwezen naar het inbrengen van informatie die niet in het te analyseren beeld vervat was. Dit gebeurde door het aanwijzen van trainingspixels om aan de hand van clustering klasselabels aan pixels te kunnen toewijzen.
Over het algemeen is het zo dat telkens na het hanteren van beslisregels het resultaat door de gebruiker getoetst wordt tegen de kennis die hij zelf van het opgenomen gebied heeft en de achtergrondkennis die hij bezit op het gebied van de remote sensing. Deze kennis wordt dan gebruikt om het beeldverwerkingsproces bij te sturen. Het zoeken is tegenwoordig naar de mogelijkheid om meer van deze gebruikerskennis in het geautomatiseerd besluitvormingsproces in te brengen ('expert knowledge'). Dit kan onder andere door het hele proces in een aantal *iteraties* te doorlopen, waarbij het systeem zelf toetsen uitvoert op onlogische samenhangen in het geclassificeerde beeld. Het is bijvoorbeeld niet voor de hand liggend dat men een aardappelveld midden in de stad vindt. Daarnaast probeert men via iteraties het aantal semantisch onbepaalde (niet geclassificeerde) pixels terug te brengen door bij de classificatie hun omgeving mee in beschouwing te nemen.
Verder is het zoeken naar mogelijkheden om kennis zoals voorhanden in *geografische informatiesystemen* (GIS) bij de beeldanalyse te gebruiken om tot betere resultaten te komen. In het bijzonder in hoofdstuk 17 zal op deze ontwikkeling worden ingegaan.
Tenslotte, wanneer het karakter van de objecten zodanig is dat deze intern een grote diversiteit in samenstelling en in ruimtelijke verspreiding vertonen, zoals bij natuurlijke vegetatiesoorten bijvoorbeeld het geval is, is in de praktijk een speciale aanpak van de digitale beeldinterpretatie noodzakelijk. Deze problematiek zal worden verwoord in hoofdstuk 24 (paragrafen 24.3 en 24.7).

## 13.5 Literatuur

1 Duda, R.O. & R.E. Hart, 1973. Pattern classification and scene analysis. J. Wiley & Sons, Inc., New York, 482 blz.
2 Haberäcker, P., 1987. Digitale Bildverarbeitung. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 377 blz.
3 Haralick, R.M., 1979. Statistical and structural approaches to texture. Proc. IEEE, vol. 67 (5).
4 Lillesand, T.M. & R.W. Kiefer, 1987. Remote sensing and image interpretation. Second edition. J. Wiley & Sons, Inc., New York, 721 blz.
5 Lord, E.M. & C.B. Wilson, 1986. The mathematical description of shape and form. Ellis Horwood Ltd., Chichester, 260 blz.
6 Mather, P.M., 1987. Computer processing of remotely-sensed images. An introduction. J. Wiley & Sons, Inc., Chichester, 352 blz.

7 Richards, J.A., 1986. Remote sensing digital image analysis. An introduction. Springer-Verlag, Berlin, 281 blz.
8 Rosenfeld, A. & A.C. Kak, 1982. Digital picture processing. Second Edition, Volume 2. Academic Press, Inc., London, 349 blz.
9 Tou, J.T. & R.C. Gonzalez, 1974. Pattern recognition principles. Addison-Wesley Publ. Comp., Reading, Massachusetts, 377 blz.
10 Wilson, R.J., 1985. Introduction to graph theory. Longman group Ltd., Harlow.

# 14 Digitale beeldverwerking

J.J. Gerbrands

## 14.1 Inleiding

Door de steeds groeiende mogelijkheden van computers en aanverwante apparatuur staat het vakgebied van de *digitale beeldverwerking* sterk in de belangstelling (vergelijk de beschouwingen in Supplement 1). Een beeld, zoals bijvoorbeeld een fotografische opname, kan in een digitaal geheugen worden opgeslagen door van een groot aantal punten de grijswaarde te bepalen en deze op te slaan in een matrix van getallen. De algemene term '*grijswaarde*' of 'digitale pixelwaarde' representeert de feitelijk gemeten fysische grootheid zoals, afhankelijk van het beeldvormend proces, intensiteit, densiteit, reflectiecoëfficiënt, etc. Met 'digitale beeldverwerking' wordt nu bedoeld dat met behulp van *algoritmen* rekenbewerkingen op de beeldmatrices worden uitgevoerd. Het doel van de bewerkingen kan velerlei zijn, maar is meestal onder te brengen in een van de volgende categorieën:

- *beeldcodering*: datacompressie of datareductie voor efficiënte en betrouwbare transmissie of opslag.
- *beeldverbetering*: het verduidelijken van beelden om visuele interpretatie of verdere digitale beeldverwerking te vergemakkelijken.
- *beeldrestauratie*: het terugwinnen van het originele beeld vanuit een door ruis en vervorming verstoorde versie.
- *beeldanalyse*: informatie-extractie ten behoeve van metingen, patroonherkenning, beeldinterpretatie.

Onder 'beeldverbetering' vallen technieken zoals contrastverbetering, pseudokleuren-toekenning, ruiseffening en beeldopscherping (paragraaf 14.4) die bepaalde aspecten in het beeld verduidelijken, zonder dat de pretentie wordt gegeven dat het resultaat een meer getrouwe afbeelding van de werkelijkheid vertoont (zie bijvoorbeeld Rosenfeld & Kak, 1982; Castleman, 1979). Deze technieken zijn meestal sterk heuristisch van aard en beeldscherm-gericht. Bij 'beeldrestauratie' wordt expliciet gepoogd het oorspronkelijke beeld te reconstrueren of, volgens een

bepaald criterium, zo goed mogelijk te benaderen. Voorbeelden hiervan zijn het ijken van de grijswaarden, het uitvoeren van geometrische en radiometrische correcties en het filteren van het beeld met Wiener- of Kalman-filters (zie Gerbrands, 1986, hoofdstuk 5). Coderen, verbeteren of restaureren resulteren uiteindelijk opnieuw in een beeld en kunnen dus omschreven worden als *beeld-naar-beeld transformaties*. Dit is niet het geval bij de automatische of computer-gesteunde beeldanalyse (Rosenfeld & Kak, 1982). Hier wordt informatie onttrokken aan het beeld in de vorm van gegevens omtrent de door het beeld gerepresenteerde verschijnselen. Beeldanalyse kan daarmee omschreven worden als een *beeld-naar-data transformatie* (zie de hoofdstukken 13 en 15), waarbij ook sprake kan zijn van multidimensionale beelden (paragraaf 13.2.1).

In dit hoofdstuk zal alleen gesproken worden over beeldbewerkingen op enkelvoudige (monospectrale of 'monochrome') beelden.

## 14.2 Beeldrepresentatie

Een stilstaand, monochroom (zwart-wit) beeld kunnen we beschrijven als een tweedimensionale functie f(i,j) van de plaatscoördinaten i en j in een plat vlak. Meervoudige beelden als kleurencomposiet-beelden en multispectrale opnamen worden beschreven met een aantal van dergelijke functies. Voor het oorspronkelijke niet-discrete beeld hebben zowel f, i en j in het algemeen een continu waardenbereik. Variaties in grijswaarde in het beeld kunnen worden beschreven in termen van spatiële (ruimtelijke) frequenties: snelle variaties komen overeen met hoge frequenties, langzame variaties met lage frequenties. Een scherpe overgang in de grijswaarde eist hoge frequentie-componenten. Iedere spatiële frequentie-component komt overeen met een twee-dimensionale functie met een sinusvormig karakter in de ene richting en een constante waarde in de richting loodrecht daarop. Er kan worden bewezen, onder bepaalde wiskundige aannames, dat iedere beeldfunctie f(i,j) kan worden ontbonden in een gewogen som van dergelijke spatiële frequenties. De gewichts-coëfficiënten samen vormen de zogenaamde *Fourier-getransformeerde* van het beeld (Gerbrands, 1986).

## 14.3 Discretisatie-aspecten

Zoals reeds in paragraaf 4.3 bij de bespreking van AD-conversie werd gezegd, moet een beeld, om het *digitaal* te kunnen verwerken, gediscretiseerd zijn in een groot aantal punten. Deze punten representeren de zogenaamde pixels ('picture elements'). Het minimaal vereiste aantal punten dat nodig is voor een getrouwe representatie wordt bepaald door het *bemonsteringstheorema*. Dit theorema geeft aan dat de bemonsterfrequentie in een bepaalde richting tenminste een factor twee hoger moet zijn dan de hoogste spatiële of ruimtelijke frequentie in die richting. Als de bemonsterfrequentie te laag wordt gekozen, kan dit

aanleiding geven tot artefacten ('aliasing', vouweffect). Meestal wordt gebruik gemaakt van een rechthoekig of vierkant discretisatie-raster. Ook de gemeten waarden van de pixels moeten worden gediscretiseerd in een eindig aantal niveaus. Dit proces wordt *kwantiseren* genoemd en introduceert altijd vervorming, die onder bepaalde voorwaarden gemodelleerd kan worden als additieve *kwantiseringsruis*. Als slechts twee niveaus worden onderscheiden, zeg zwart en wit, dan kan de grijswaarde van elke pixel worden opgeslagen in 1 bit in het geheugen. Een dergelijk beeld noemen we *binair* (zie paragraaf 4.3). Als we bereid zijn bijvoorbeeld 8 bits per pixel op te slaan, dan kunnen $2^8 = 256$ niveaus worden onderscheiden. Als meer bits per pixel worden gebruikt kunnen we de oorspronkelijke waarde van een beeldelement nauwkeuriger representeren, of, anders gezegd, de door kwantisering geïntroduceerde vervorming is minder. Hoeveel vervorming toelaatbaar is, wordt door de toepassing bepaald. Een overweging kan zijn dat de kwantiseringsruis een kleinere invloed moet hebben dan de overige aanwezige ruisbronnen. Als een beeld wordt gekwantiseerd in Q bits per pixel, dan is de daarmee overeenkomende signaal/kwantiseringsruis-verhouding ongeveer gelijk aan 6*Q + 11 dB, waarbij de signaal/ruis-verhouding (S/N) wordt uitgedrukt in dB op amplitudo-basis, d.w.z. met 20·log(S/N) dB. Als nu de sensor een signaal/ruis-verhouding heeft van bijvoorbeeld 55 dB, dan heeft het weinig zin meer dan 8 bits te onderscheiden, want 6*8 + 11 = 59 dB. Toegepast op Landsat-TM opnamedata (paragraaf 7.5.3) waarvan het 'ruis-equivalente reflectieverschil' (NE$\Delta\rho$) van spectraalband 4 (NIR) ongeveer 0,25% bedraagt, verkrijgen we een S/N-verhouding van 52 dB, zodat we mogen besluiten tot Q = 7 (Q = 6,8). Zou NE$\Delta\rho \approx$0,4% zijn (Landsat-TM banden 1, 2, 3), dan daalt Q tot 6 (Q = 6,2). Kwantisering in 8 bits zoals dit standaard plaats vindt, kan bijgevolg aanleiding geven tot een schijnnauwkeurigheid. Bij de bespreking van de 'bitslicing'-techniek in paragraaf 4.3 kwam dit al even ter sprake.
Het grote probleem in de digitale beeldverwerking is de *hoeveelheid data*: een beeld dat gedigitaliseerd is in 512*512 pixels met 8 bits per pixel vereist ruim 260 kbyte geheugen voor opslag. Zelfs de meest elementaire bewerking op een dergelijk beeld betekent het uitvoeren van die bewerking op *elk* van de ruim 260.000 pixels. Het zal duidelijk zijn dat voor ingewikkelde bewerkingen zeer efficiënte computerprogrammatuur of zelfs 'special purpose hardware' nodig is.

## 14.4 Beeldverbetering

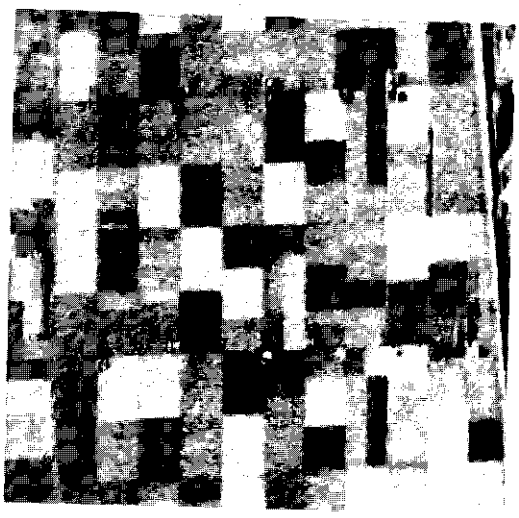
Een voorbeeld van een eenvoudige bewerking op een digitaal beeld is het *verbeteren* van het *contrast*, een methodiek die uiteraard in het algemeen niet bruikbaar is voor de spectrale patroonherkenning (paragraaf 13.2.1) waar men gewoonlijk de onbewerkte pixelwaarden hanteert.
Stel dat we met 8 bits per pixel werken, waarbij de waarde 0 overeenkomt met zwart en de waarde 255 met wit. Als de donkerste partijen niet echt zwart zijn en de lichtste partijen niet echt wit, dan is de

Bijna alle bovengenoemde bewerkingen zijn zogenaamde *lokale operaties*: de waarde van een pixel g(i,j) in het resultaatbeeld wordt berekend op grond van een aantal pixels in de lokale omgeving van pixel f(i,j) in het origineel. Er is een uitzondering. De ook genoemde *Fourier-transformatie* is een voorbeeld van een *globale operatie*: iedere Fourier-coëfficiënt is een lineaire combinatie van de waarden van alle pixels in het beeld en omgekeerd.

## 14.5 Beeldsegmentatie

Bij de automatische of computer-gesteund *analyse van beelden* wordt een cruciale stap gevormd door de zogenaamde *beeldsegmentatie*. Het doel van deze segmentatie is het opsplitsen van het beeld in samenhangende deelgebieden of componenten, die ieder op zich min of meer *homogeen zijn in een bepaalde eigenschap*. Bovendien moeten elkaar rakende deelgebieden onderling verschillend zijn, anders hadden ze samengevoegd moeten worden. Beeldsegmentatie leidt dus tot een plattegrond van het beeld, waarop de verschillende beelddelen zijn aangegeven. In de verdere analyse (patroonherkenning, beeldinterpretatie) worden semantische aspecten aan deze delen verbonden (zie hoofdstuk 13).
Beschouw een beeld met een licht object tegen een donkere achtergrond. Een eenvoudige segmentatie-methode is dan *grijswaarde-drempeling*. Op grond van een *beslissingsdrempel* T wordt een twee-waardige plattegrond opgesteld: als de waarde van f(i,j) kleiner is dan T krijgt het punt (i,j) in het segmentatie-resultaat het label A, als f(i,j) groter of gelijk is aan T het label B (vergelijk de werkwijze in paragraaf 15.3). De bedoeling is natuurlijk dat alle objectpixels met B gelabeld zijn en de achtergrond met A. Het enige probleem is het bepalen van een geschikte drempel T, maar zelfs dat is in sommige situaties zeker geen triviaal probleem. De drempeling zelf is eenvoudig uit te voeren met een opzoektabel. De methode kan natuurlijk gegeneraliseerd worden naar de situatie met meer beslissingsdrempels. De methode is direct gericht op het vinden van gebieden, alhoewel de samenhang daarvan nog moet worden vastgesteld door middel van een *connectiviteits-analyse* (het onderling verbonden zijn). Bovendien wordt de beslissing in een punt (i,j) niet beïnvloed door de beslissingen op andere posities, zodat de bewerkingen *parallel* kunnen worden uitgevoerd als de rekenfaciliteiten dat zouden toelaten.
Een tweede familie van segmentatie-methoden richt zich op het vinden van de *discontinuïteiten* (randen of 'edges') tussen aangrenzende homogene gebieden (zie ook paragraaf 13.2.2). De overgang tussen twee gebieden met verschillende gemiddelde waarden wordt gekenmerkt door een grote waarde van de modulus (absolute waarde) van de gradiënt in grijswaarden. Met behulp van discrete *differentie-operatoren* (paragraaf 13.2.2) wordt een schatting verkregen van de partiële afgeleiden (lokale operaties), hieruit wordt de modulus van de gradiënt berekend en vervolgens wordt getest of de gradiëntwaarde hoog genoeg is om te beslis-

sen dat het onderhavige punt inderdaad een rand-punt is (punt-operatie). Op deze manier is *rand-detectie* wederom een parallelle methode, maar leidt meestal niet direct tot het gewenste resultaat: de differentie-operatoren hebben een hoogdoorlatend frequentiegedrag en versterken daardoor ook de ruis. Hierdoor zullen veel niet-significante randpunten worden gevonden en de echte randen zullen veelal gebroken zijn. Meer succes is te verwachten van *sequentiële rand-detectie*. Nu worden connectieve paden gezocht waarvan de opeenvolgende punten de hypothese steunen dat zij deel uitmaken van een echte rand. Essentiëel bij sequentiële methoden is het detecteren van een startpunt en het formuleren van een toets waaraan connectieve buren moeten voldoen om te mogen worden toegevoegd. Hiermee verwant is de methodiek van patroonherkenning met structurele bouwstenen, zoals hoofdstuk 15 deze zal behandelen. Deze methode betreft zowel lijnen als vlakken.
Binnen de gebieds-geöriënteerde methoden worden de sequentiële algoritmen aangeduid met de term '*region growing*'. In tegenstelling tot de vorige segmentatie-methoden, die parallel uitgevoerd kunnen worden, worden binnen de sequentiële methoden de bewerkingen op een bepaalde positie in het beeld wel beïnvloed door elders in het beeld verkregen resultaten. Een voorbeeld is het '*split-and-merge algoritme*' (Pavlidis, 1977). Hierbij wordt het beeld aanvankelijk verdeeld in vierkante deelgebiedjes. Deze worden getest op homogeniteit en zonodig gesplitst ('split'). Omgekeerd worden naburige homogene vierkantjes getest om te beslissen of ze kunnen worden samengevoegd tot een groter homogeen vierkant ('merge'). Tenslotte worden naburige vierkanten van verschillende afmetingen getest of ze kunnen worden samengenomen tot een homogeen gebied ('grouping').
Als voorbeeld beschouwen we de segmentatie van een SLAR-beeld (paragraaf 8.4) van een proefgebied in de Flevopolders (Werkgroep ROVE; Gerbrands, 1985). De beeldafmetingen zijn 256*256 pixels en ieder pixel beslaat 15*15 meter. Door de ruis is het in dit soort beelden niet mogelijk de pixels direct te classificeren naar gewasklassen. Het beeld moet eerst gesegmenteerd worden in de agrarische percelen, zodat deze percelen kunnen worden geclassificeerd op grond van veldgemiddelden. De velden kunnen worden gevonden met een split-and-merge algoritme. Aanvankelijk wordt het gehele beeld verdeeld in vierkantjes van 8*8 pixels. Op grond van een 'random scatterer model' voor de radarwaarnemingen (dat in dit boek verder niet aan de orde komt) zijn statistische toetsen opgesteld voor de split-, merge- en groupingbeslissingen. Zowel de split- als de merge-toets bestaan uit een toets op varianties van de grijswaarden in het beschouwde vierkant. Een grote waarde van de variantie duidt op een mengpopulatie oftewel een niet-homogene pixelverdeling. De grouping-toets test op verschil in veldgemiddelden. In de afbeeldingen zien we het originele SLAR-beeld (figuur 14-2), het origineel met de gedetecteerde veldgrenzen gesuperponeerd (figuur 14-3) en de velden met als grijswaarde de veldgemiddelden ingevuld (figuur 14-4). Deze laatste waarden kunnen worden gebruikt voor de classificatie van de velden.



**14-2** Origineel SLAR-beeld, 256*256 pixels, Flevopolders, juli 1980, ROVE-project.

**14-3** Gedetecteerde veldgrenzen voor het SLAR-beeld uit fig. 14-2.

**14-4** Gedetecteerde veldgrenzen en veldgemiddelden voor het SLAR-beeld uit fig. 14-2.

## 14.6 Literatuur

1 Castleman, K.R., 1979. Digital image processing. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 429 blz.

2 Gerbrands, J.J., 1986. Inleiding in de digitale beeldverwerking. Collegedictaat Technische Universiteit Delft, Faculteit der Elektrotechniek, 141 blz.

3 Gerbrands, J.J., 1985. Multiple-input segmentation algorithm for SLAR-imagery. Proceedings EARSeL Workshop Microwave remote sensing applied to vegetation, Amsterdam, 10-12 December 1984. ESA SP-227, 35-39.

4 Pavlidis, T., 1977. Structural pattern recognition. Springer Verlag, Berlijn.

5 Rosenfeld, A. & A.C. Kak, 1982. Digital picture processing. Second edition. Academic Press, Inc., London, 2 Volumes.

# 15 Structurele patroonherkenning

N.J. Mulder

## 15.1 Inleiding

*Structurele patroonherkenning* is het vervolg op de *statistische patroonherkenning* (hoofdstuk 13). In de statistische patroonherkenning worden eerst kenmerkvectoren bepaald die gerepresenteerd worden door hun kenmerk-coördinaten in een kenmerkruimte (figuur 13-1b). De basis-aanname is dat er voor elke klasse of subklasse een karakteristieke vector aan te wijzen is die die klasse of subklasse representeert. Het bestaan van vectoren die niet samenvallen met de ideale (karakteristieke) vectoren wordt dan verklaard met een ruismodel (paragraaf 13.2.1). De verdeling (wolk) van punten rondom het karakteristieke punt wordt *cluster* genoemd. De dichtheid van kenmerkvectoren wordt gemodelleerd door aannamen te maken over een statistische verdeling en door daarna de parameters van die verdeling te schatten. Een populaire maar onterechte aanname voor RS-data is bijvoorbeeld dat de spectrale kenmerkvectoren normaal verdeeld zijn rond de klasse-representanten; dit is uitgangspunt bij o.a. de 'naaste midden classificatie' (met bovendien de veronderstelling van gelijke varianties in alle as-richtingen) en de 'maximum likelihood classificatie' (genoemd in paragraaf 13.2.1). De zwakte van de statistische classificatie-methodiek blijkt o.a. uit de soms slechte classificatie-resultaten (typisch 60% goed) bij toepassing op multispectrale satelliet-gegevens van één opnamedatum.
Aangezien de zwakte van de statistische classificatie-methoden zit in de aanname dat afstand in de kenmerkruimte (paragraaf 13.2.1) evenredig is met significant verschil in patroon, heeft het weinig zin om verder te werken aan verbetering van de statistische methode op zich. Het is wel zinnig om naar een betere definitie van '*patroon*' te zoeken.
De nadruk heeft daarbij gelegen op het zoeken naar *invariante structuurbouwstenen* en op het ontwikkelen van software data-structuren en operatoren die werken op de relaties die er tussen deze bouwstenen bestaan. In hoofdstuk 13 is aangegeven hoe topologie gedefiniëerd kan worden op grond van 4-buur- of 8-buur-relaties in een

vierkant raster van nominale data. In de komende paragrafen wordt aangegeven hoe buurrelaties en afstandsrelaties toegepast worden op hogere niveaus van aggregatie dan het rasterelement.
Op het ITC ('International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences') te Enschede worden de besproken methoden toegepast voor object-detectie en -classificatie, kwantificering van textuur en (stereo) 'correspondence analysis' (detectie van corresponderende objecten in stereobeelden). De uitvoer van het beeldanalyse-systeem bestaat uit: object identificerende getallen, per object een lijst van attributen inclusief klasse en zekerheidsfactor; de topologische structuur is gegeven in de 'region adjacency graph' (RAG, vergelijkbaar met het netwerk in paragraaf 13.3 maar niet identiek eraan).

## 15.2 Structurele bouwstenen

Bouwstenen voor structurele patroonherkenning zullen meestal eerst opgebouwd moeten worden uit de pixels of resolutiecellen (vgl. paragraaf 4.2). De relatie tussen de grootte van de pixels, omgerekend naar terreinafmetingen, en de grootte van de typische objectdimensie is hierbij belangrijk. Het maakt bijv. nogal uit of een weg van 10 m breed bemonsterd wordt met 80 m, 30 m, 10 m, of 1 m grondresolutie.

Het genereren van bouwstenen gebeurt middels *segmentatie-programma's* (paragraaf 14.5). Er is keus uit drie basis-benaderingen:
1 drempeling
2 rand-detectie
3 gebieds-detectie door samenvoeging ('region growing').

Methode 1 is equivalent met (multi-) spectrale classificatie (paragraaf 13.2.1); deze methode gebruikt geen kennis over ruimtelijke relaties en valt dus af (paragraaf 14.5 en Rosenfeld & Kak, 1982, hoofdstuk 10.1).
Methode 2 is gebaseerd op differentie-operatoren en genereert daardoor ruis-problemen, waardoor o.a. niet gesloten omtrekken ontstaan (paragraaf 14.5 en Rosenfeld & Kak, 1982, hoofdstuk 10.2).
Methode 3 staat het toe om bij het opbouwen van segmenten gebruik te maken van ruimtelijke relaties voor zover die lokaal toegankelijk zijn (paragraaf 14.5 en Rosenfeld & Kak, 1982, hoofdstuk 10.4.2). Binnen methode 3 zijn nog te onderscheiden:
3a piramidale data-structuren: 'split' en 'merge'
3b aggregatie: alleen 'merge'.
Een nadeel van methode 3a is dat aan het beeld een voorkeursrichting wordt opgelegd, en verder is het lastig om de nodige samenhangende criteria in te voeren (regels voor 'split' en 'merge').
Methode 3b is de geprefereerde methode, die op het ITC toegepast wordt. Hierbij 'groeien' (aggregatie) de objecten in alle richtingen. Alle stappen in de aggregatie ('merging') staan onder controle van de kennis die in het systeem ingebracht wordt. Door een aantal keren bepaalde operatoren (sequentiële methode) te herhalen wordt bereikt dat lokale

samenhangen zich uitstrekken over grotere afstanden. Als na een aantal herhalingen geen verandering meer optreedt in de aggregatie is een voorlopige segmentatie bereikt. De segmenten en hun lijsten met eigenschappen vormen weer bouwstenen voor object-detectie en -classificatie (zoals besproken in hoofdstuk 13).

*Op kennis gebaseerde segmentatie* veronderstelt dat de originele vraagstelling ontleed is in eenvoudiger vragen die op een laag *aggregatie-niveau* te beantwoorden zijn. Er is altijd een interactie tussen hypotheses ten aanzien van radiometrische en ruimtelijke kenmerken. Op lokaal niveau is het bijvoorbeeld wel zinnig om clustering (wolkvorming) van kenmerkvectoren te veronderstellen terwijl dit voor een heel beeld veel minder waarschijnlijk is. Ook is het op laag niveau beter mogelijk om alle mogelijke structuur-elementen te herkennen omdat de *complexiteit* van een lokale omgeving evenredig is met $2^{n*n}$ waarbij n de afmeting is van het vierkante venster waarop een lokale operator werkt. Bij een venster van 3x3 elementen zijn er $2^9 = 512$ binaire patronen mogelijk. We hebben elk van deze bouwsteen-patronen een eigen symbool gegeven, waardoor de structurele complexiteit nu gereduceerd is tot 9 hoofdgroepen, de *binaire structuurbouwsteen-klassen* (met hun resp. labels):

S = 'start or end of line'
L = 'line element'
T = 't-cross'
Y = 'y-cross'
X = 'x-cross'
E = 'edge element'
C = 'corner'
B = 'body element'
P = 'isolated point'.

Op te merken valt dat de bouwsteen-klassen hoofdzakelijk topologisch bepaald zijn, d.w.z. door het aantal verbindingen 'naar buiten toe' (gebaseerd op netwerk-structuren, vgl. paragraaf 13.3). Topologie in de enge zin verandert niet onder transformaties zoals rek, verschuiving of rotatie.

Enkele voorbeelden van bouwsteen-patronen zijn (zie ook figuur 11 in Sijmons, 1987, voor alle 256 bouwsteen-patronen met hun 9 labels):

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 111 | 000 | 001 | 000 | 001 |
| 111 = B, | 010 = P, | 110 = L, | 011 = C, | 010 = S, |
| 111 | 000 | 000 | 011 | 000 |
| | | | | |
| 001 | 001 | 101 | 101 | 111 |
| 011 = E, | 011 = C, | 010 = X, | 010 = Y, | 010 = T, etc. |
| 011 | 001 | 101 | 010 | 010 |

Voor het startpunt van een lijn (S) bestaan bijvoorbeeld 8 rotatiemogelijkheden.

Het volgende niveau van abstractie behelst het gebruik van de *relatie tussen 3x3 bouwstenen*, waardoor *segmenten* gevormd worden. Bijvoorbeeld als in een 3x3 venster voorkomt:

●●●
S S ●
●●●

dan was elk van de s'en een valse 'start of line' en beide kunnen dus uitgepoetst worden (een niveau lager is dit een kort lijnstukje).

## 15.3 Het genereren van binaire bouwstenen

*Binaire* (tweewaardige) *bouwstenen* worden gegenereerd in een *beslissingsproces*, gebaseerd op een monochroom beeld bestaande uit één spectrale band of één synthetische band verkregen als combinatie van spectrale banden. De basis-beslissing (gebaseerd op spectrale kenmerken) luidt: geef die elementen in een beeld die tot dezelfde cluster (klasse) behoren de waarde '1', anders geef ze de waarde '0'.
Een eenvoudige beslisregel voor 'behoort tot dezelfde klasse' binnen een 3x3 venster luidt: een pixel behoort tot dezelfde klasse als die van het centrale pixel indien de pixelwaarden hooguit een bepaalde drempelwaarde verschillen. Anders behoren ze tot verschillende klassen (in contrast met 'grijswaarde'-drempeling in paragraaf 14.5, waar een drempel wordt toegepast op het gehele (foton of EM) beeld).
Voorbeeld: indien de drempelwaarde gesteld wordt op 2,5 en de pixelwaarden binnen het venster luiden:

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1 2 8 | | 0 0 1 | |
| 1 8 9 | dan geeft dit | 0 1 1 | als binaire bouwsteen. |
| 2 7 8 | | 0 1 1 | |

Het centrale pixel is dus een 'edge element' (E).

## 15.4 Klasse-indeling t.b.v. segmentatie

In de praktijk van het patroonherkennen blijkt het handig te zijn om beslissingen te nemen op basis van een indeling in de volgende drie klassen: ruis, lijnvormige segmenten (die verondersteld worden onderdeel te zijn van lijnobjecten) en veld-segmenten (die verondersteld worden onderdeel te zijn van vlakobjecten).
*Ruis* is elk ongewenst patroon. Meer specifiek omvat ruis die patronen die niet bijdragen aan de structurele patroonherkenning. Segmenten die uit één, twee of drie elementen bestaan zijn te klein om op basis van hun vorm geclassificeerd te worden. Meestal zullen ze ook niet aan de

patroonherkenning bijdragen tenzij ze deel uitmaken van een textuurpatroon.
Lijnen en uitgebreide oppervlakken (velden) blijken complementair te zijn in die zin dat als we ons concentreren op lijnvorm de oppervlakken vaak verloren gaan en omgekeerd dat bij het zoeken naar oppervlakken vaak lijnen verloren gaan. Van deze nood is een deugd gemaakt door op de lage niveaus te specialiseren naar een 'lijnendetector' en een 'veldendetector' en op een hoger aggregatie-niveau de beide soorten informatie weer samen te voegen.

### 15.4.1 Lijnvormige segmenten

Enkele eigenschappen van *lijnvormige segmenten* zijn:
- ze hebben een zeer grote lengte/breedte verhouding.
- ze zullen bij juiste (her)bemonstering een 'dikte' hebben van een of enkele pixels.
- in juist bemonsterde terreinen zullen elementen van lijnen merendeels bouwstenen genereren van het type L, met slechts enkele E's en X,Y,T's bij kruisingen.

Bij de lijndetectie worden twee hypothesen getoetst:
- H1: 'een element behoort tot een lijnelement', of
- H0: 'een element behoort niet tot een lijnelement'.

Heeft men bijvoorbeeld de volgende configuratie:

S L S . S L L L L

dan is '.' mogelijk een ontbrekend punt van een lijnelement (t.g.v. ruis), zodat ook het eerste korte lijnstukje niet verwijderd moet worden.
Lijndetectie wordt op het ITC uitgevoerd volgens twee procedures.
Bij procedure 1 wordt de lijn-achtigheid van een venster versterkt d.m.v. een 'niet-lineair teruggekoppeld filter' indien de omgeving overwegend wijst op de aanwezigheid van een lijnelement (H1); anders (H0) wordt de omgeving naar een lokaal constante waarde geleid.
Bij procedure 2 worden de volgende hypothesen getoetst:
H0: 'ruis',
H1: 'lijn',
H2: 'veldgrens',
H3: 'veld'.
Als het centrale pixel van een venster tot H2 behoort dan worden de lijnwaarden gehomogeniseerd met behulp van een 'conditioneel rangorde filter'. Lijnen breder dan een pixel worden gereduceerd tot *skelet-vorm*. Het eindresultaat is een *symbolen kaart* die topologisch consistent is en waarbij elke lijn begint met 'S', hele reeksen 'L' en af en toe kruisingen 'X', 'T' of 'Y' heeft. Het is daarna eenvoudig om naar een klassieke lijnbeschrijving in vectorformaat over te gaan, bijvoorbeeld als invoer in een GIS (vgl. paragraaf 13.3). Op het niveau van de vectorbeschrijving is het ook mogelijk om kennis over bijvoorbeeld kromtestralen van wegen, kruisingen met waterwegen, spoorlijnen etc. mee te nemen.

15.4.2 Veld-segmenten

*Veld-segmenten* zijn complementair aan lijnvormige segmenten. In termen van structuurbouwsteen-klassen wordt gezocht naar 'edges', 'corners' en 'body elements'. In de eerste bewerkings-sequentie met lokale niet-lineaire operatoren wordt zoveel mogelijk de ruis verwijderd. Bij het bereiken van een stabiele segmentatie wordt voor elk segment een lijst berekend van eigenschappen zoals segmentnummer, oppervlak, vormfactor, laagste-, mediane-, hoogste stralingswaarde (pixelwaarde) en ook eigenschappen zoals grenzend aan, omsloten door, omsluitend voor. Op basis van deze eigenschappenlijsten kunnen segmenten (met een sequentiële werkwijze) aan elkaar geplakt worden tot *objecten.* Objecten 'erven' veel eigenschappen van segmenten.

## 15.5 Enige toepassingen van de structurele patroonherkenningsmethode

a Genereren van een digitaal hoogtemodel uit 'stereo' SPOT-beelden (paragraaf 7.5.4). Linker en rechter beeld worden gesegmenteerd. Daarna worden corresponderende linker en rechter segmenten door geometrische transformatie op elkaar ingepast. De verschuiving langs epipolaire lijnen geeft de hoogte van de segmenten aan.

b Segmentatie van radarbeelden (hoofdstuk 19). Aangezien de radiometrische data van radar veel coherente ruis bevat is het onbegonnen werk om op basis van alleen maar gereflecteerde straling per resolutiecel een classificatie uit te voeren. Segmentatie verdeelt het beeld in velden die relatief constante statistische eigenschappen hebben. Uiteindelijke classificatie vindt plaats op basis van deze statistische eigenschappen per veld samen met structurele kenmerken.

c Computer-geassisteerd lijntrekken. Het automatisch detecteren van lijnvormige objecten gaat relatief eenvoudig. De computer levert een ruwe (maar accurate) schets van bijvoorbeeld het wegennet. Het kost de mens daarna relatief weinig tijd om de schets om te zetten in een wegenkaart.

d Computer-geassisteerd bijwerken van oude kaarten. Oude kaarten worden door scanning omgezet in rasterbeelden. Ook oude luchtfoto's en nieuwe luchtfoto's worden gescand. De relatie tussen oude luchtfoto en oude kaart, samen met lijn- en veld-extractie op een nieuwe foto, levert een schets door de computer op die aangeeft waar waarschijnlijk veranderingen in de kaart nodig zijn. Een operationeel probleem is dat van de afscherming van bijvoorbeeld wegen door bomen, die langs de weg staan. Er wordt gewerkt aan krachtiger software die weet heeft van bijvoorbeeld bomen en schaduwwerking.

e 'Mixel correction'. Een *mixel* ('mixed pixel') heeft betrekking op resolutiecellen waarin meer dan een klasse aanwezig is. Het gevolg is dat de spectrale signatuur van dat element niet eenduidig is. Aangezien in de structurele patroonherkenning bekend is welke elementen rand-elementen zijn is het eenvoudig mogelijk om de mixels te vervangen door zuivere buren. Dit werkt vooral aardig bij SPOT. Hier worden de 10 m resolutie-data gebruikt voor het bepalen van de mixels in de 20 m data. Het resultaat van de 'ontmixeling' is een bestand met 10 m equivalente pixels met spectrale informatie in drie kanalen (uit de 20 m data).

f Textuur-analyse. In aanvulling op statistische methoden voor het verkrijgen van textuurkenmerken blijkt de structurele methode succesvol toegepast te kunnen worden als er maar enige structuur in de chaos is. De algemene benadering is die van de 'correspondence analysis'. In de omgeving van een basiselement wordt gezocht naar de drie naaste buren van dezelfde soort of een gedefiniëerde andere soort. Op deze wijze wordt het beeld als het ware ge-trianguleerd. Afstandsanalyse levert dan dichtheden van basiselementen en anisotropie. Een extra analyse-laag is voorhanden in de laag van grenzen van veldsegmenten. De verdeling van knooppunten geeft ook een indicatie van de textuur.

## 15.6 Literatuur

1 Rosenfeld, A. & A.C. Kak, 1982. Digital picture processing. Second Edition, Volume 2. Academic Press, Inc., London, 349 blz.

2 Sijmons, K., 1987. Computer-assisted detection of linear features from digital remote sensing data. ITC-Journal 1987-1: 23-31.

# 16 Geometrische en plaatsbepalingsaspecten van remote sensing

H.J. Buiten

## 16.1 Inleiding

Het blijkt dat er de laatste tijd meer en meer behoefte bestaat aan RS-beeldprodukten die *meetkundig gecorrigeerd* zijn en op directe wijze vergeleken kunnen worden met de inhoud van bestaande thematische kaarten op diverse schalen. Hier zijn verschillende redenen voor aan te voeren. Een van de voornaamste is dat gebruikers in de loop van de jaren bij groei van hun RS-activiteiten steeds meer beelden krijgen van verschillende opname-tijdstippen, opgenomen op verschillende hoogte en afkomstig van verschillende sensorsystemen. Ook de relatie met geografische informatiesystemen is belangrijk (zie hoofdstuk 17). Onderlinge vergelijking van beelden en vergelijking met bestaand kaartmateriaal is nodig om de analyse van de beelden te kunnen uitbuiten en om naast de beschrijving van toestanden ook processen te kunnen volgen met RS, met name de analyse van *veranderingen*. Het is dan ook gewenst dat de beeldgebruiker op de hoogte is van de meetkundige (geometrische) eigenschappen en vervormingen die inherent zijn aan het gekozen sensorsysteem. Afgezien van de bovengenoemde vergelijkings- en karteringsbehoefte is kennis van de geometrie van het beeld noodzakelijk om de interpretatie van de beeldinhoud goed te kunnen uitvoeren.
Met dit doel voor ogen zullen de voornaamste opnamesystemen (luchtfotografie, multispectrale aftasting, radar) achtereenvolgens worden besproken.

## 16.2 Meetkundig verband tussen voorwerp en afbeelding

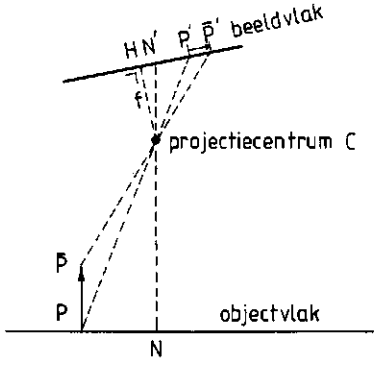
Bij de vaststelling van het verband tussen voorwerp en opgenomen beeld onderscheidt men de begrippen:

a *inwendige oriëntering*: de onderlinge positie van de detecterende en afbeeldende componenten van de sensor.

b *uitwendige oriëntering*: de plaats en de stand van het sensorplatform in de voorwerpsruimte.

16.2.1 Luchtfotografie

Het meetkundig verband tussen voorwerp en afbeelding bij luchtfotografie bestaat uit een *optische projectie*; door idealisering kan deze als een *centrale projectie* worden beschouwd waarin een voorwerpspunt P via een hoofdstraal wordt gedacht te zijn afgebeeld op het beeldpunt P' via het projectiecentrum punt C (zie figuur 16-1).




16-1 Geometrie van de luchtfotografie: centrale projectie; met cameraconstante f, hoofdpunt H, nadirpunt N en omvalling P'-P̄'.

De *inwendige oriëntering* van een camera wordt door de volgende parameters gedefiniëerd: (1) de geijkte beeldafstand (cameraconstante) f; (2) de positie van het hoofdpunt H in het beeldvlak (opnamevlak); (3) de meetkundige vervormingskarakteristiek van het lenzenstelsel.

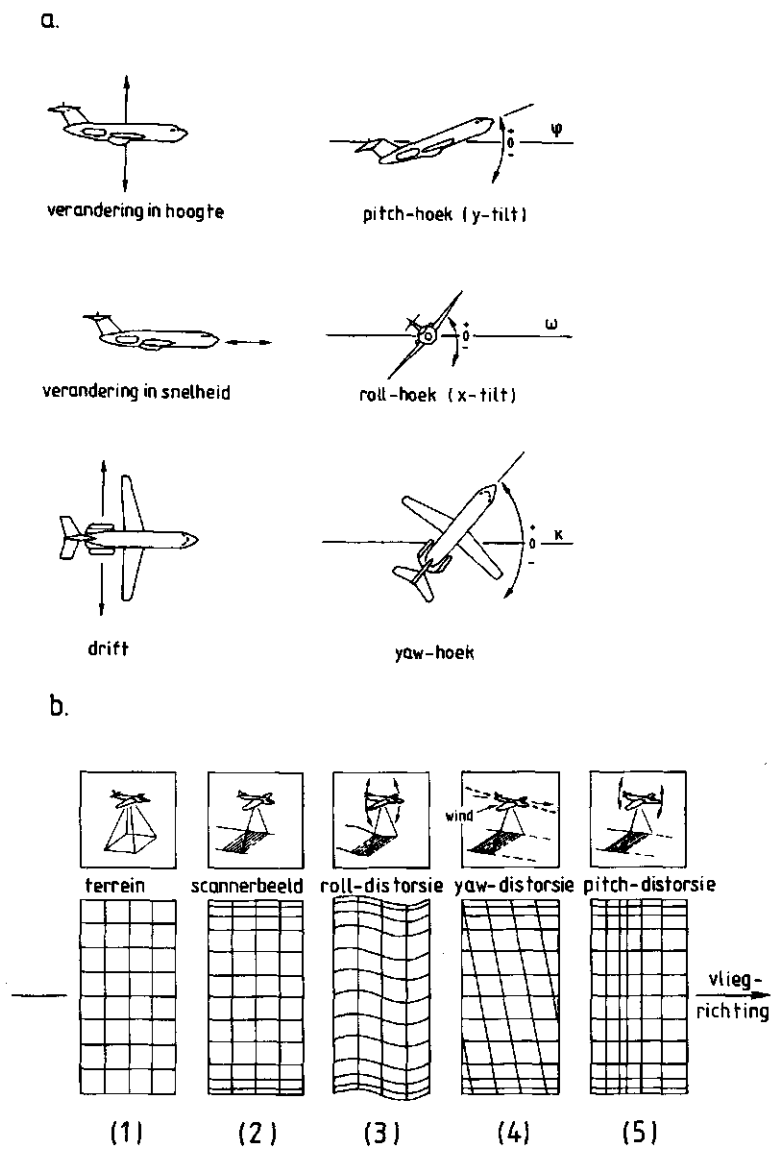
Bij luchtfotografie verstaat men onder de *uitwendige oriëntering* de plaats en de stand van de optische as in de voorwerpsruimte. De hierin optredende elementen zijn uit te drukken t.o.v. een gekozen coördinatenstelsel X,Y,Z in de voorwerpsruimte (Z = verticaal) en bestaan uit de coördinaten van het projectiecentrum $X_c$, $Y_c$, $Z_c$ en de hoeken $\phi$ (langshelling), $\omega$ (dwarshelling) en $\kappa$ (kappa). De corresponderende afwijkingen in de vliegtuigvoortbeweging worden veroorzaakt door de vliegparameters 'pitch', 'roll', 'yaw' en vervolgens hoogte, snelheid en drift (figuur 16-2).

Een voordeel t.o.v. de opto-mechanische aftasting is dat -afgezien van de sluiter – de camera geen bewegende onderdelen heeft en de inwendige oriëntering een vast gegeven is. De fotoschaal is voor verticaalopnamen overal in het fotovlak praktisch gelijk; de nauwkeurigheid van de fotogrammetrische uitwerking kan homogeen zijn. Hoogteverschillen manifesteren zich als een verplaatsing vanuit de afbeelding van het nadirpunt N, de zgn. 'omvalling' (figuur 16-1).

16.2.2 Multispectrale aftasting

16.2.2.1 Opto-mechanische aftasting

In tegenstelling tot een luchtfotografische opname wordt bij



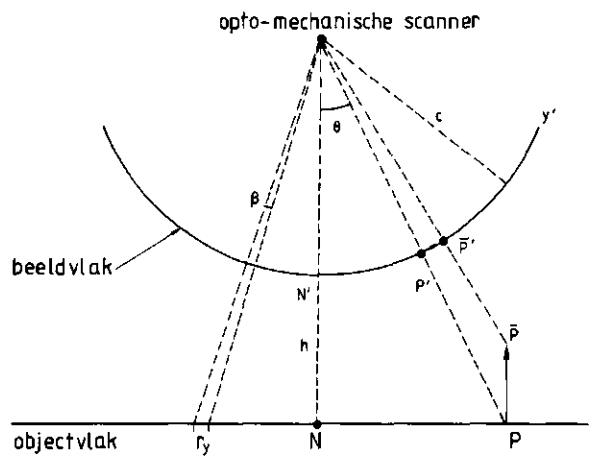

**16-2**
a: De zes belangrijkste vliegparameters van een vliegtuig;
b: Ruitennet (1) stelt een natuurgetrouwe afbeelding voor;
(2) betreft de geometrie van de panoramisch vertekende aftastopname; (3), (4) en (5) laten de vervormingsinvloed van enkele vliegparameters zien
(bron: Lillesand & Kiefer, 1987).

mechanische (electro-optische) aftasting het beeld lijn voor lijn opgebouwd, in principe zelfs punt voor punt (vgl. paragraaf 7.2 en figuur 7-2). Met betrekking tot de inwendige oriëntering hebben systematische en toevallige afwijkingen in de spiegelrotatie of spiegeloscillatie dan ook onmiddellijk effect op het geometrische verband van de resolutiecellen met het terrein. Met betrekking tot de *uitwendige oriëntering* veroorzaken afwijkingen van de ideale voortbeweging en stand van het sensorplatform hoekverwringing, lokale schaalverandering en ongewenste overlap of gaten in de opname. Voor correctie op deze foutenbronnen is men aangewezen op gegevens van de

vliegbaan. In de meeste vliegtuig-aftastsystemen wordt het effect van 'roll' (rotatie om de lengte-as van het vliegtuig, figuur 16-2) gecompenseerd door een electronische verschuiving van het begin van elke aftastlijn in het uiteindelijk op te leveren beeld. Voor het effect van 'pitch' of 'yaw' wordt helaas gewoonlijk (nog) niet gecompenseerd. Wel zijn er ontwikkelingen in die richting gaande. Voor de Nederlandse SLAR (zie hoofdstuk 8) behoort de bepaling en toepassing van de vliegparameters tot de gebruikelijke werkwijze. Het effect van 'pitch' wordt doorgaans versluierd door de overlap van de opeenvolgende lijnen. In satelliet-scanners wordt de vliegbaan nauwkeurig gecontroleerd en gestuurd en vormen de vliegparameters geen serieus probleem.

Als de vliegsnelheid V, de tijd t van één omwenteling van de aftastspiegel, de openingshoek $\beta$ van de sensor en de vlieghoogte h niet goed op elkaar zijn afgestemd, m.a.w. $V.t \neq \beta \cdot h$, dan kan er een aanmerkelijk *schaalverschil* optreden in het aftastingsbeeld tussen het schaalgetal $S_x$ in de vliegrichting en het schaalgetal $S_y$ in de aftastrichting. Een verhouding $S_y = 0{,}7 \cdot S_x$ behoort niet tot de onmogelijkheden.

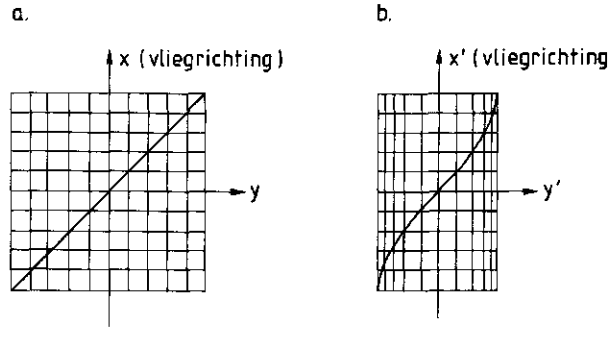
Een kenmerkende eigenschap van de opto-mechanische aftasting is dat het ruimtelijk scheidend vermogen (de geometrische resolutie) in het beeld aanmerkelijke systematische verschillen vertoont. Deze resolutie bedraagt ($\theta$ = opnamehoek t.o.v. verticaal):
$r_x$ = geometrische resolutie in vliegrichting = $\beta h/\cos\theta$
$r_y$ = geometrische resolutie in aftastrichting = $\beta h/\cos^2\theta$.




**16-3** Geometrie van de opto-mechanische aftasting: cylindrische projectie; met instrumentconstante c, nadirpunt N, omvalling P'-P̄', opnamehoek $\theta$, openingshoek $\beta$, vlieghoogte h. T.o.v. het nadir geldt:
Opname (beeldvlak) : $y' = c.\theta$
Terrein (objectvlak): $y = h.tg\theta$ (vlak terrein verondersteld).
Een resolutie-element heeft in de aftastrichting een afmeting $r_y$, met $r_y = \beta.h/\cos^2\theta$.

Terwijl bij vliegtuig-scanners $\theta$ tot 45° kan oplopen, is de maximale opnamehoek bij satelliet-scanners veel kleiner, zodat de geometrische resolutie veel minder inhomogeen is voor het afgebeelde oppervlak.

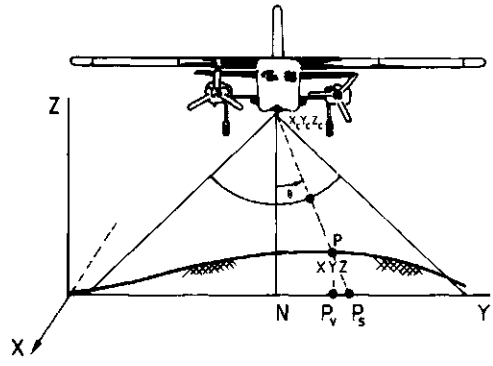
Met bovenstaande geometrische resoluties hangt de *panoramische vertekening* samen, veroorzaakt door het feit dat de *afbeelding* in y-richting plaatsvindt met een constante hoeksnelheid, aldus evenredig met $\theta$, terwijl de *aftasting* over de grond evenredig met $tg\theta$ verloopt (figuur 16-3). Bij toenemende $\theta$ zal dus een steeds groter wordende resolutiemaat $r_y$ op dezelfde afmeting worden afgebeeld (*cylindrische projectie*). De afbeeldingsschaal in x-richting blijft evenwel in principe gelijk; bij groter wordende $\theta$ overlappen de afgetaste stroken elkaar enigszins. Het resultaat van de beeldvorming is dat het terrein naar de zijkanten van het beeld toe, samengedrukt wordt weergegeven (figuur 16-4).




**16-4** Vierkantennet (a) in het objectvlak, door opto-mechanische scanning panoramisch vertekend afgebeeld (b).

Door elke aftastlijn (i.c. de resolutiecellen) opnieuw in te delen in geometrisch gelijke terreinpartjes (herindeling annex herbemonstering) ontstaan kunstmatige pixels waarvan de spectrale stralingsgegevens worden berekend uit de originele waarden in evenredigheid met de oppervlakte-bedekking van de nieuwe pixels t.o.v. de originele resolutiecellen. Pixels en resolutiecellen zijn dus duidelijk verschillende begrippen. De gebruiker zal meestal reeds een geometrische correctie, uitgevoerd door de ondernemer, in de geleverde magneetbanden (CCT's) aantreffen. Tevens wordt dan rekening gehouden met de 'roll'-compensatie; op de berekeningswijze zal hier niet nader worden ingegaan.
Bij satelliet-opnamen als van Landsat heeft men te maken met aardkromming en aardrotatie en met een reeks van pixelpositie-afwijkingen waarvoor gedeeltelijk door het grondstation kan worden gecorrigeerd. Overigens heeft de satelliet-opname een duidelijk meetkundig voordeel t.o.v. de vliegtuig-opname door zijn stabiele stand in de ruimte, een regelmatige voortbeweging en een geringe maximale opnamehoek tegenover een forse grondbedekking.

Tenslotte nog een opmerking over de hoogtecomponent van het aardoppervlak (zie figuur 16-3). De 'omvalling' (paragraaf 16.2.1)

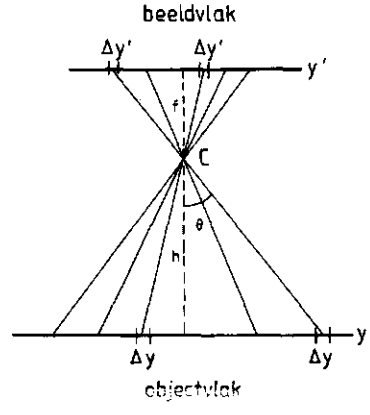



16-5 Invloed van de terreinhoogte op de scanner-afbeelding. Punt P met coördinaten X, Y, Z en corresponderend met het te karteren voetpunt $P_v$, wordt door de scanner 'gezien' als ware het punt $P_s$ (bron: Larsson, 1980).

manifesteert zich bij lijnaftasting vanuit de afbeelding van het nadirpunt N en loodrecht op de vlieglijn (oftewel in de aftastrichting). Zoals figuur 16-5 aangeeft, is voor een juiste uitwerking van gegevens betreffende multispectrale aftasting een *digitaal terreinmodel* (DTM) nodig, dat in een regelmatig X,Y-netwerk de hoogte Z beschrijft. Een DTM kan hetzij aan luchtfotogrammetrische modellen dan wel aan topografische kaarten worden ontleend. Een beschrijving van het gebruik van een DTM bij de kartering van multispectrale aftasting-gegevens valt evenwel buiten het bestek van dit boek (zie bijv. Larsson, 1980; Nasu et al., 1980; Marvin et al., 1987).

16.2.2.2 Multispectrale aftasting gebaseerd op CCD's

Een voornaam verschil met de opto-mechanische aftasting is het feit dat de CCD-array scanner géén bewegende beeldvormende onderdelen heeft, waardoor geometrische vervormingen t.g.v. afwijkingen in de spiegelrotatie of door trillingen worden vermeden. De beeldvorming lijkt op die van de luchtfotografie (centrale projectie) met dien verstande dat het beeld lijn voor lijn i.p.v. als oppervlak ontstaat (figuur 16-6). Daardoor kan er een schaalongelijkheid in x (vliegrichting) en y (aftastrichting) optreden. In tegenstelling tot de opto-mechanische aftasting is de afbeeldingsschaal in de aftastrichting voor alle punten van de array gelijk, zodat in dit opzicht géén herbemonstering nodig is.




16-6 Geometrie van 'pushbroom'-aftasting; met $\Delta y = (h/f).\Delta y'$ (mits het terrein vlak is en het beeldvlak evenwijdig is met het objectvlak).

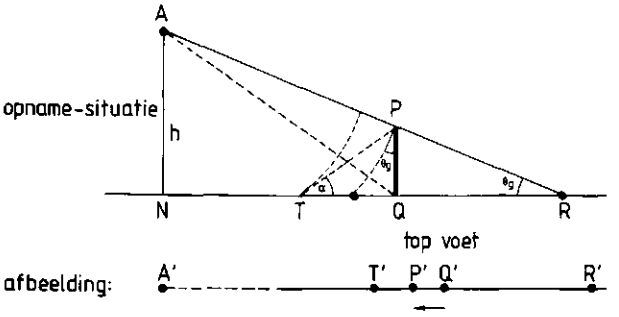
Een correctiemethode voor SPOT-beelden voor de invloed van terreinhoogteverschillen door middel van een digitaal terreinmodel, wordt beschreven in Kay, 1988.

16.2.3 Radar

Omdat de radar in hoofdstuk 8 uitvoerig aan de orde is gekomen, zal hier slechts worden volstaan met een aanduiding van twee meetkundige aspecten van SLAR. Het geometrisch scheidend vermogen zal niet behandeld worden (zie hiertoe hoofdstuk 8).

16.2.3.1 Zijwaartse schaal

Met radar wordt de tijd gemeten dat een puls de *scheve* afstand AR doorloopt (A = antenne, punt R is een terreinelement; figuur 16-7).




16-7 Geometrie van een SLAR-aftasting; met echoparallax en radarschaduw. Punt A' is een denkbeeldig punt.

Worden deze afstanden zondermeer lineair op film of beeldscherm afgebeeld dan ziet men dat de zijwaartse schaal van deze terreinafbeelding géén constante is maar groter wordt met de afstand tot de vlieglijn (dus bij kleiner wordende scheerhoek $\theta_g$), in evenredigheid met $\cos\theta_g$. In tegenstelling tot het schaalverloop bij opto-mechanische aftasting vindt een 'samendrukking' in de richting van het nadirpunt plaats.
Horizontale zijwaartse afstanden kunnen worden afgeleid uit schuine afstanden met

$$NR = \sqrt{((AR)^2 - h^2)} \qquad (16.1)$$

waarin h de vlieghoogte is (het terrein wordt stilzwijgend horizontaal gedacht). Variaties in h beïnvloeden dus de zijwaartse schaal. Bij de Nederlandse SLAR (hoofdstuk 8) worden de digitale beelden gewoonlijk geometrisch heringedeeld plus herbemonsterd tot één schaal in zowel aftast- als vliegrichting, voordat zij aan de gebruiker worden afgeleverd.

16.2.3.2 Parallax en schaduw

Tengevolge van hoogteverschillen in het terrein kan men in radarbeelden echoparallax en radarschaduw onderscheiden (vgl. figuur 16-7).
a) *echoparallax:* de top P van een hoog object ligt dichter bij de antenne A dan zijn voet Q (of zijn denkbeeldige verticale projectie op het referentievlak). Daardoor zal de top P eerder afgebeeld worden (zie

P') dan de voet Q (zie Q'). Bij benadering is P'Q' evenredig met $PQ.tg\theta_g$. Hieruit volgt dat de echoparallax toeneemt naarmate de hoogte van P toeneemt, en/of de vlieghoogte toeneemt; zij neemt af bij toenemende afstand AR. In tegenstelling met de fotografie en de multispectrale aftasting, waarin de omvalling van het nadirpunt af gericht bleek te zijn, is bij radarbeelden de echoparallax naar het nadirpunt toe gericht.

b) *radarschaduw:* het golffront vanuit A wordt door PQ gestopt, zodat er van Q tot R niets geregistreerd wordt. Het terrein achter hoge objecten kan door zijwaartse radar dus niet waargenomen worden, er komen geen echo's van terug. In figuur 16-7 is Q'R' de radarschaduw. Zij neemt toe naarmate de vlieghoogte afneemt, of de hoogte van P toeneemt, of de afstand tot de vlieglijn toeneemt. Als er in plaats van een afzonderlijk hoog object PQ sprake is van een terreinhelling TP zoals in figuur 16-7 is weergegeven, dan is er géén echoparallax, maar vindt de afbeelding plaats van T' tot en met P'. De radarschaduwlengte is in dat geval P'R'.

Door parallax en schaduw worden terreinhellingen op verschillende manieren afgebeeld, afhankelijk van de helling $\alpha$ (figuur 16-7), de oriëntering van de helling en de invalshoek. Hierdoor kunnen meetkundige vervormingen optreden in het beeld. Omgekeerd kan men, door deze vervormingen te meten, iets te weten komen over de geomorfologie van het waargenomen terrein (zie bijv. Trevett, 1986).

Voor een beschouwing over de mogelijkheden van het stereoscopisch bekijken van radarbeelden, wordt de lezer verwezen naar Supplement 3.

## 16.3 Combineren van RS-beelden

### 16.3.1 Werkwijze

Zoals al in de inleiding van dit hoofdstuk werd gezegd, is een tot dekking brengen van beelden van hetzelfde gebied van eminent belang voor het volgen van *processen*. Daarnaast is het vaak belangrijk (ook voor het analyseren van *toestanden*) beelden in het meetkundig verband van een bestaande kaart in te passen. Reconstructie van de opnamesituatie, dus kennis van de inwendige en de uitwendige oriëntering, is daartoe een voorwaarde. Om beelden geometrisch te kunnen corrigeren, hetzij van beeld naar beeld of van beeld naar kaart, of om omgekeerd een uitgekozen kaart in het beeld te kunnen projecteren, kan men verschillende wegen volgen. De ene aanpak is de *parametrische werkwijze*, waarin men alle vliegparameters betrekt in een wiskundig model; de andere aanpak is de *niet-parametrische werkwijze*, waarin men niet zoekt naar parameterwaarden, maar waarin men het verschil tussen gecorrigeerd en ongecorrigeerd karakteriseert als realisatie van een twee-dimensionaal stochastisch veld.

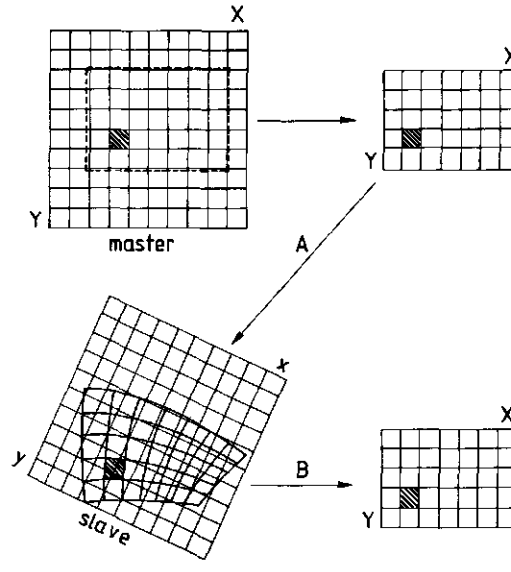
Bij beide werkwijzen kan men twee hoofdstappen onderscheiden:

a *geometrische herindeling* van de beeldelementen ('registration');
b *herbemonstering* van de stralingswaarden op basis van de nieuwe pixelindeling ('resampling').

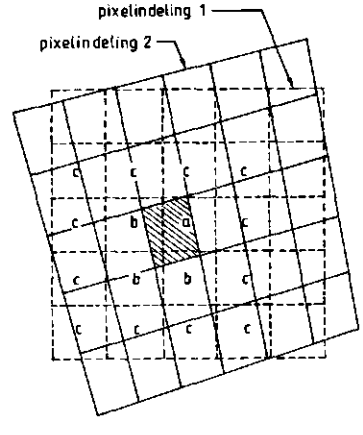
Bij de parametrische werkwijze zal men trachten zoveel mogelijk te weten te komen over de vliegparameters en de instrument-constanten. Deze worden betrokken in de vergelijkingen, die het ruimtelijk verband leggen tussen voorwerppuntscoördinaten, afbeeldingscentrum en beeldpuntscoördinaten. Meestal werkt men met benaderde waarden voor de parameters en bepaalt men de waarden voor differenties van de parameters uit de vergelijkingen. Voor deze zgn. *restitutie* zijn *paspunten* ('ground control points') nodig. Het is goed te bedenken dat wanneer men de vliegparameters zou hebben gemeten, men aanmerkelijk zou kunnen besparen op het aantal paspunten dat nodig zou zijn voor de restitutie. Een nauwkeuriger bepaling van deze vliegparameters zal naar verwachting in de nabije toekomst haalbaar en algemeen gangbaar zijn bij de opname.
Een pluspunt van de parametrische werkwijze is ook dat men rekening houdt met de meetkundige eigenschappen van voorwerp en afbeeldingsprocédé (bijv. rechte voorwerpslijnen blijven recht in het gecorrigeerde of gekarteerde beeld).

### 16.3.2 Beeldkoppeling

Bij de niet-parametrische werkwijze (*beeldkoppeling*) is men aangewezen op een proefondervindelijke combinatie van beelden (of van beeld en kaart; vice versa). Het zijn *interpolatiemethoden* of *inpassingsmethoden* die volledig afhankelijk zijn van *paspunten*. Deze punten zijn corresponderende, denkbeeldige of fysiek aanwijsbare punten in de beide te koppelen beelden. Laten we eerst het begrip 'beeld' hier veralgemenen: noemen we het ene 'beeld' (opgevat als een ruimtelijk coördinatensysteem) de '*MASTER*' (in feite òf een kaart in digitaal rasterformaat òf een beeldrooster) en het andere 'beeld' de '*SLAVE*' (beeldrooster danwel kaart), dan is het dus de opgave 'master' en 'slave' zo goed mogelijk tot dekking te brengen via een aantal paspunten met een gericht gekozen *wiskundige transformatie.*
Vervolgens worden álle slave-punten opeenvolgend geometrisch getransformeerd naar de master-pixelindeling. Tenslotte worden nieuwe stralingswaarden (densiteiten of digitale waarden) afgeleid voor de nieuwgevormde pixels van de getransformeerde slave (figuren 16-8 en 16-9, zie paragraaf 16.3.4).
Naast het doelgerichte gebruik van paspunten kan men ook iets over de aard van de opname-eigenschappen en -vervormingen tot uitdrukking brengen door een weloverwogen keuze te maken van het ruimtelijke interpolatiemodel. Zo kan men kiezen voor een puur wiskundige behandeling van de transformatie annex interpolatie, dan wel voor een (deels) mathematisch-statistische aanpak. Dit laatste heeft te maken met een statistisch verantwoorde methodiek voor het 'wegwerken' van de resterende verschillen in de paspunten, na een kleinste-kwadraten-transformatie waarin méér paspunten meedoen dan op basis van de wiskundige betrekkingen noodzakelijk is. Deze transformatie wordt dan een '*trendfunctie*' genoemd. Een dergelijke functie, afgeleid uit n paspunten van de vorm:




**16-8** Koppeling van de slave via een deelbeeld aan de master, waarbij A de transformatie-stap voorstelt en B de herbemonsterings-stap. De pixelindeling van de master wordt via de transformatie gesuperponeerd op die van de slave (zie de – overdreven kromlijnige – masterfiguratie over het slaverooster). Hierna volgt de herbemonstering.




**16-9** Herbemonstering: de overdracht van de pixelwaarden van de pixels in beeld 1 (slave) naar de pixelindeling van beeld 2 (master, getransformeerd naar de slave) volgens een bepaald algoritme.

$$x = f(X,Y) + u$$
$$y = g(X,Y) + v$$

kan bijv. een polynoom van lagere orde zijn, bijv. van de graad 2:

$$x = a_1 + a_2X + a_3Y + a_4X^2 + a_5XY + a_6Y^2 + u$$
$$y = b_1 + b_2X + b_3Y + b_4X^2 + b_5XY + b_6Y^2 + v$$

met
$(X,Y)$ = master-coördinatenstelsel en $u = u_1, u_2, \ldots\ldots, u_n$
$(x,y)$ = slave-coördinatenstelsel en $v = v_1, v_2, \ldots\ldots, v_n$

waarin (u,v) de restwaarden (residuen) zijn in de n paspunten na de kleinste-kwadraten-vereffening en waarbij wordt verondersteld dat er

méér paspunten worden aangewezen dan strikt noodzakelijk is voor het gekozen transformatiemodel. Het minimum aantal paspunten is voor een polynoom van de eerste graad 3, van de tweede graad 6, van de derde graad 10.

De trendfunctie draagt zorg voor een primaire eliminatie van de invloed van aardkromming, kaartprojectie, opnamevertekeningen, affiene schaalvervorming, translatie en rotatie en andere verschillen tussen beide coördinatenstelsels. De bovengenoemde transformatie, die is berekend uit de n paspunten, wordt vervolgens uitgevoerd op alle punten van de slave. Alvorens dit laatste te doen, zal het verstandig zijn eerst twee vragen te beantwoorden:

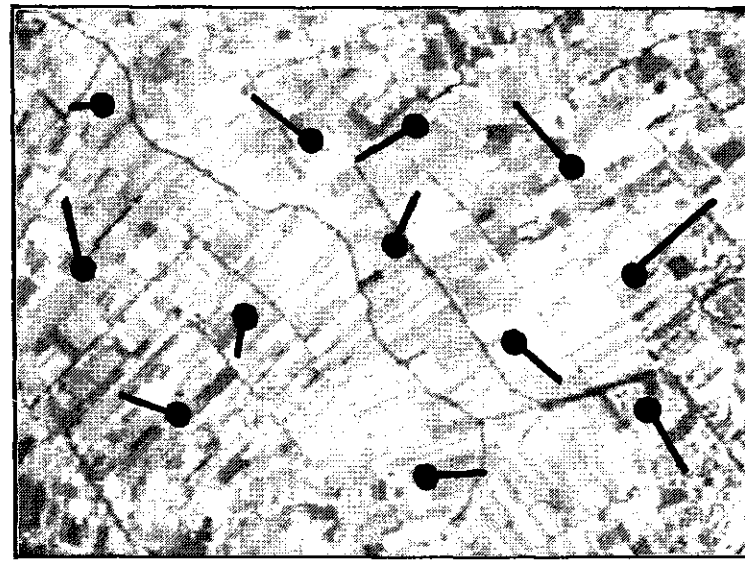
a Is het transformatiemodel goed gekozen?
b Zijn er fouten gemaakt bij de bepaling van de paspunten?

Voor de gezamenlijke beantwoording van deze vragen kan men enkele opeenvolgende *statistische toetsen* inbouwen in de transformatieprocedure:

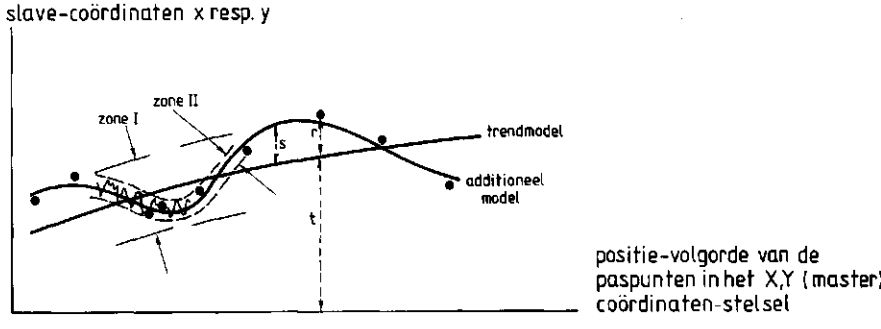
- *Variantie-verhouding toets*:
  De uit de transformatieberekening volgende variantie in x-richting, $\sigma_x^2$, resp. in y-richting, $\sigma_y^2$, wordt getoetst tegen een a priori variantie $\sigma_o^2$.
- *Foutopsporing per punt*:
  Deze toets gaat er van uit dat het transformatiemodel goed is, maar dat er één onjuist aangewezen paspunt in de berekening meedoet. Voor elk paspunt wordt een toetswaarde berekend en vergeleken met een op statistische gronden maximaal toelaatbare waarde. Uiteraard kan men ook kijken naar de grootte-verdeling van de residuen in x- en y-richting.
- *Grenswaarde*-berekening per paspunt, die aangeeft welke grove fout in de aanwijzing van het paspunt pas te ontdekken valt, bij een bepaald onderscheidingsvermogen. Hoe groter de grenswaarde, des te zwakker wordt het paspunt door de andere punten gecontroleerd. Hoe meer ongelijk de grenswaarden van het stel paspunten zijn, des te zwakker is de opzet van het totale paspuntennet ten behoeve van de transformatie (zie ook Buiten, 1988).

Een andere methode is om, nadat het minimaal aantal paspunten voor de gekozen transformatie in beide 'beelden' is bepaald èn een extra punt in de master is aangewezen, de computer zelf een voorspelling te laten doen van de positie van dit extra punt in de slave. Dan kan men op het beeldscherm op visuele en interactieve wijze beoordelen hoe groot de discrepantie is tussen voorspeld punt en werkelijk punt in de slave, waarna men eventueel tot herziening van het stel paspunten kan besluiten.

Met de *residuen* (figuur 16-10: restverschillen in de paspunten na trendfunctieberekening) kan men verschillend omgaan (figuur 16-11 en figuur 16-13a):



16-10 In deze figuur zijn de residuen in de paspunten na trendtransformatie voorgesteld door vectoren op overdreven schaal.




16-11 Trendmethode voor de inpassing van slave op master m.b.v. n paspunten, weergegeven met een schematische projectie van de drie-dimensionale modelruimte op het vlak van de figuur.

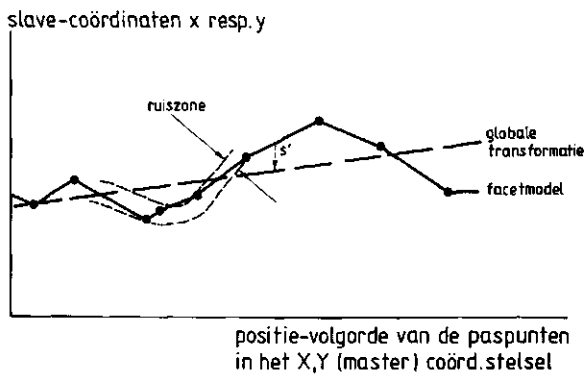
Zone I: a priori betrouwbaarheidsgebied van het trendmodel waarbinnen residuen r (u resp. v) als stochastische waarden (ruis) worden opgevat. In de figuur is t = f(X,Y) resp. g(X,Y) en t + r = x resp. y.

Zone II: a priori betrouwbaarheidsgebied van een additioneel model dat nauwer aansluit bij de paspunten en waarbinnen eventuele kleine restwaarden als ruis worden opgevat. In de figuur is t = *trendfunctie-waarde en s = additionele interpolatiewaarde.*

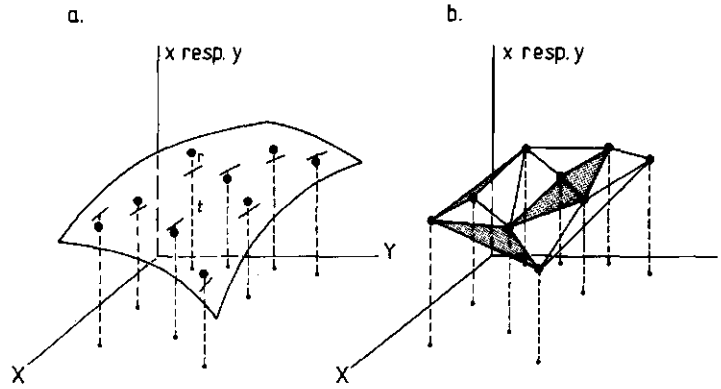
- Als zone I maatgevend is, de residuen als zodanig accepteren, mits ze klein zijn (bijv. kleiner dan 1 à 3 pixelafmetingen). De uitvoering van de transformatie kan dan onmiddellijk plaatsvinden over alle punten van de slave.
- Als zone II maatgevend is, de residuen in een volgende berekeningsstap (bijna) volledig 'wegwerken' in de paspunten en alle andere beeldpunten een gewogen aandeel s' toekennen bovenop de al toegekende positie volgens de trendtransformatie (Göpfert, 1982; Buiten, 1978).

Voor de interpolatiemethoden waarin gebruik gemaakt wordt van een trendfunctie, geldt dat deze functie niet willekeurig mag worden gekozen. Men zal op grond van voorkennis of ervaring een goede reden moeten hebben om een bepaalde wiskundige functie te kiezen voor de beeldkoppeling van het voorhanden beeld- en kaartmateriaal. Opname-eigenschappen, sensorverschillen, herkomst van het kaartmateriaal of van GIS-gegevens spelen in deze overweging een rol. In 't bijzonder bij beeldkoppeling t.b.v. 'change detection' is het belangrijk te letten op de *relatieve nauwkeurigheid* van master-beeld en ingepast slave-beeld ter plaatse van met elkaar te vergelijken lijnobjecten en vlakobjecten (vgl. hoofdstuk 13). De mogelijkerwijs aanwezige verandering is pas significant als deze qua beeldpositie minstens driemaal zo groot is als de berekende standaardafwijkingen in x- en y-richting van de beeldtransformatie.

In afwijking van voorafgaande methoden die gebaseerd zijn op een trendfunctie en eventueel een daaropvolgende behandeling van de residuen, levert de zgn. '*facetmethode*' (een vorm van transformatie op eindige elementen) een directe aansluiting van master en slave (White & Griffin, 1985; Beseniçar & Kengen, 1988), zie figuur 16-12 en figuur 16-13b. In deze methode wordt van de n paspunten een driehoekenconfiguratie opgebouwd volgens bepaalde criteria. Op basis van de verschillen tussen de master- en de slave-coördinaten in deze punten wordt *voor elke driehoek afzonderlijk* een transformatie uitgevoerd. Per driehoek vindt een toetsing plaats op mogelijke aanwijsfouten van de paspunten. Doordat er geen residuen achterblijven, is de facetmethode geschikt voor de geometrische correctie van *lokale* deformaties van het beeld, zoals het geval kan zijn bij




**16-12** Facet-methode voor de inpassing van slave op master m.b.v. n paspunten, weergegeven met een schematische projectie van de drie-dimensionale modelruimte op het vlak van de figuur.
Globale transformatie: benadering van de inpassing met een lineaire (1e-graads) polynoom via drie geschikt gekozen paspunten.
Facetmodel: transformatie en interpolatie met een (per driehoek van paspunten verschillende) polynoom van de 1e graad. In de figuur is s' de interpolatiewaarde bovenop de globale transformatie-waarde.




16-13
Beeldkoppeling van master (X,Y) en slave (x,y):
a: trendmodel (zie ook figuur 16-11);
b: facetmodel (zie ook figuur 16-12).

multispectrale aftastsystemen vanuit een vliegtuig met nogal sterk variërende vliegparameters tijdens de opnamevlucht. Het aantal benodigde paspunten zal dan aanzienlijk zijn. De facetmethode is uiteraard ook toepasbaar op satellietbeelden maar is dan minder noodzakelijk; een trendfunctie-interpolatie is dan doorgaans toereikend. Bovendien kan men dan volstaan met minder paspunten gezien de stabielere gang van de satelliet.

De gebruiker dient er op bedacht te zijn dat men met genoemde inpassingsmethoden wel in staat is beelden om te vormen tot ogenschijnlijk aanvaardbare afbeeldingen op het niveau van een kaart, maar dat de intrinsieke betekenis van het ingepaste beeld soms twijfelachtig is. Vooral als het gaat om het onderkennen van temporele veranderingen in RS-beelden kan een onzorgvuldige keuze van wiskundig en/of statistisch model de gebruiker tot verkeerde uitkomsten verleiden. Men zij dus *kritisch* in het hanteren van inpassingsmethoden.

16.3.3 Paspuntsbepaling

De wijze waarop paspunten kunnen worden verkregen kan met het volgende overzicht van mogelijkheden worden samengevat:

a Directe bepaling:

- Punten in het terrein signaliseren (zichtbaar maken voor de beeldopname, rekening houdend met het type sensor en de ruimtelijke resolutie), met bijv. vliegschijven (luchtfotografie), panelen (MSS), zwarte plastic-absorptieoppervlakken (TIR-scanner) of hoekreflectoren (SLAR). De coördinaten in een bepaald kaartprojectievlak worden terrestrisch bepaald met landmeetkundige methoden. In grote, minder ontwikkelde gebieden kan men tegenwoordig op efficiënte wijze aan paspuntscoördinaten komen m.b.v. de Doppler Satellieten Plaatsbepalingstechniek (zie Buiten, 1986). Uiteraard is het ook mogelijk op kleine terreinen zonder coördinaten te werken waar het alleen gaat om de relatieve positie van de te detecteren objecten.
- Markante punten in het beeld aanwijzen en in beeldcoördinaten vastleggen; de coördinaten van de corresponderende punten op een

bestaande topografische kaart worden als kaartcoördinaten uitgemeten met bijv. een electronische coördinatenlezer.

b Indirecte bepaling (slechts via computer mogelijk):

- Door aanwijzing van markante punt-omgevingen in twee corresponderende beelden worden gebieden van n x n pixels rondom deze punten met elkaar gecorreleerd. De plaats van maximale correlatie levert dan het corresponderende puntenpaar in beide beelden.
- In het referentiebeeld wordt een equidistant ruitennet van paspuntsgebieden gevormd, elk met de afmeting van bijv. 20 x 20 pixels ('window').
  In het aan te koppelen beeld wordt een overeenkomstig patroon van zoekgebieden gevormd, elk met de afmeting van bijv. 40 x 40 pixels ('search area'). Elke 'window' schuift over het corresponderende 'search area'; de plaats van maximale beeldovereenstemming wordt uit correlatie-coëfficiënten rekenkundig bepaald. Uit proefnemingen met multitemporele Landsatbeelden bleek meer dan de helft van het aanvankelijk gekozen aantal paspuntsgebieden te voldoen (zie Bronsveld & Luderus, 1982).

16.3.4 Herbemonstering

Na de geometrische herindeling van twee 'beelden' zoals beschreven in voorgaande paragrafen, vindt een *herbemonstering* plaats van de pixelwaarden, stralingswaarden of densiteiten, op basis van de nieuwe pixelindeling. Figuur 16-9 laat in 't kort zien hoe dit kan gebeuren. Enkele mogelijke werkwijzen voor de herbemonstering van de pixelwaarden zijn:

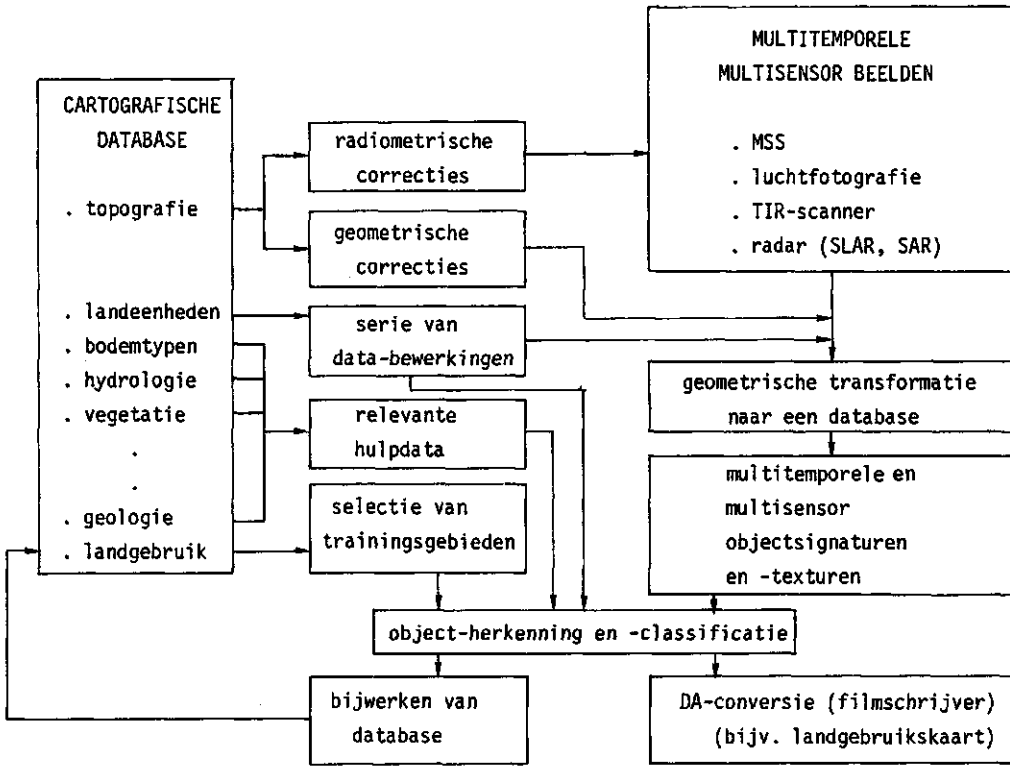
1 *Naaste buren herbemonstering.*
  Simpelweg wordt de pixelwaarde van het dichtstbijzijnde oorspronkelijke pixel (gemerkt met a in pixelindeling 1) aan het beschouwde resultaatpixel (pixelindeling 2) toegekend.
2 *Bilineaire interpolatie.*
  De pixelwaarden in het beschouwde resultaatpixel worden op bilineaire wijze (eerste graad) ontleend aan de pixelwaarden van de 4 omringende oorspronkelijke pixels, gemerkt met a en b in figuur 16-9.
3 *Kubische convolutie* (vgl. paragraaf 14.4).
  Met een derdegraads interpolatie worden de spectrale waarden van 16 oorspronkelijke pixels (gemerkt met a, b en c in figuur 16-9) overgedragen naar het beschouwde resultaatpixel.

Voor een meer uitvoerige beschrijving, zie o.a. Jensen (1986), Lillesand & Kiefer (1987), Richards (1986).

Tegenwoordig wint de gedachte veld dat het beter is (t.b.v. de beeldinterpretatie) de kaartinformatie, andere beelden of een GIS-bestand te transformeren naar het voorhanden, te interpreteren beeld. Men interpreteert dan met de *originele waarden* i.p.v. met de herbemonsterde waarden. De resultaten van interpretatie kunnen dan naderhand alsnog in het raam van de geometrisch correcte kaart worden overgebracht.

16.3.5 Gegevens-bestand

Het wordt thans steeds belangrijker geacht de resulterende gegevens van de beeldanalyse te bewaren in een *geografisch gegevensbestand.* Omgekeerd kan ook dit bestand van belang zijn bij het interpreteren van de RS-beelden, doordat dan van gedigitaliseerde voorkennis gebruik gemaakt kan worden. Ook kan digitaal opgeslagen informatie van andere gegevensbronnen bij de beeldanalyse betrokken worden (figuur 16-14). Een RS-gegevensbestand zal ook de integratie versterken van (al of niet multitemporele) RS-informatieresultaten met andere informatie in het totaal van de gegevensbehoefte van een toepassingsveld (vgl. bijv. hoofdstuk 2). In hoofdstuk 17 zal hier nader op worden ingegaan.




**16-14** Geïntegreerde beeldverwerking m.b.v. databases (GIS)
(bron: Göpfert, 1982).

## 16.4 Literatuur

1 Beseniçar, J. & H.P.A.M. Kengen, 1988. Projection of topographic data into remote sensing images. 16th ISPRS-Congress, Kyoto, Japan, July 1-10, 1988.

2 Bronsveld, M.C. & F.J.D. Luderus, 1982. Analysis of multitemporal data for the identification of land use and crops. ITC-IBM, april 1982, vol. I, Appendix 2.

3 Buiten, H.J., 1978. Junction of nets by collocation. Manuscripta Geodetica Vol. 3, blz. 253-297.
4 Buiten, H.J., 1986. Teledetectie, deel 1 (opnamemethoden en beeldvorming). Collegedictaat 1986. Vakgroep Landmeetkunde- LUW, hoofdstuk 9.
5 Buiten, H.J., 1988. Matching and mapping of remote sensing images: Aspects of methodology and quality. 16th ISPRS-Congress, Kyoto, Japan, July 1-10, 1988.
6 Göpfert, W., 1982. Methodology for thematic image processing using thematic and topographic data bases and base-integrated multi-sensor imagery. Actes du Symposium Int. Comm. VII ISP, Toulouse 1982.
7 Jensen, J.R., 1986. Introductory digital image processing. Prentice-Hall, New Jersey, hoofdstuk 6.
8 Kay, S., 1988. The differential rectification of SPOT-HRV panchromatic and multispectral imagery using a digital elevation model. Proceedings International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS '88, 12-16 september 1988, Edinburgh, UK, ESA SP-284 Volume I, August 1988, blz. 479-481.
9 Konecny, G., 1976. Mathematische Modelle und Verfahren zur geometrischen Auswertung van Zeilenabtaster-Aufnahmen. Bildmessung und Luftbildwesen 44: 188-197.
10 Larsson, J., 1980. Rectification of digital images for remote sensing analysis. Thesis, Stockholm.
11 Lillesand, T.M. & R.W. Kiefer, 1987. Remote sensing and image interpretation. Second edition. J. Wiley & Sons, Inc., New York, 721 blz.
12 Marvin, J.W., M.L. Labovitz & R.E. Wolfe, 1987. Derivation of a fast algorithm to account for distortions due to terrain in earth-viewing satellite sensor images. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Volume GE-25, no. 2, blz. 244-251.
13 Nasu, M., K. Shimamoto, H. Kano & M. Fuchimoto, 1980. Digital differential rectification of airborne MSS-data for geothermal mapping. Pres. Paper 14th Congress ISP, Hamburg 1980, Comm. III, WGI, B9: 454-470.
14 Richards, J.A., 1986. Remote sensing digital image analysis, An introduction. Springer-Verlag, Berlijn, 281 blz., hoofdstuk 2.
15 Trevett, J.W., 1986. Imaging radar for resources surveys. Chapman & Hall, London, 313 blz.
16 White, M.A. & P. Griffin, 1985. Piecewise linear rubber-sheet map transformation. The American Cartographer 12: 123.

Documentatie

# 17 Technieken voor het koppelen van RS-beelden aan andere ruimtelijke gegevens met behulp van geografische informatiesystemen

P.A. Burrough

## 17.1 Inleiding

Een RS-beeld is op zichzelf interessant, maar de waarde van de informatie in het beeld wordt sterk verhoogd als de patronen en verschillen in het beeld in verband gebracht kunnen worden met herkenbare objecten of patronen die op de grond zijn waar te nemen, of die reeds op topografische en thematische kaarten aanwezig zijn. De mogelijkheden voor een goede koppeling met topografische en thematische gegevens zijn in de laatste jaren aanzienlijk toegenomen als gevolg van de ontwikkeling van satelliet-beelden met hoge resolutie (Landsat-TM, SPOT) en toepassing van multispectrale aftastsystemen vanuit de lucht. Directe *koppeling* tussen RS-gegevens en andere digitale ruimtelijke databestanden is nu een veel gevraagde optie binnen moderne *geografische informatiesystemen* (GIS).

Er zijn twee belangrijke aspecten aan het koppelen van RS-gegevens en andere digitale ruimtelijke bestanden, met name:

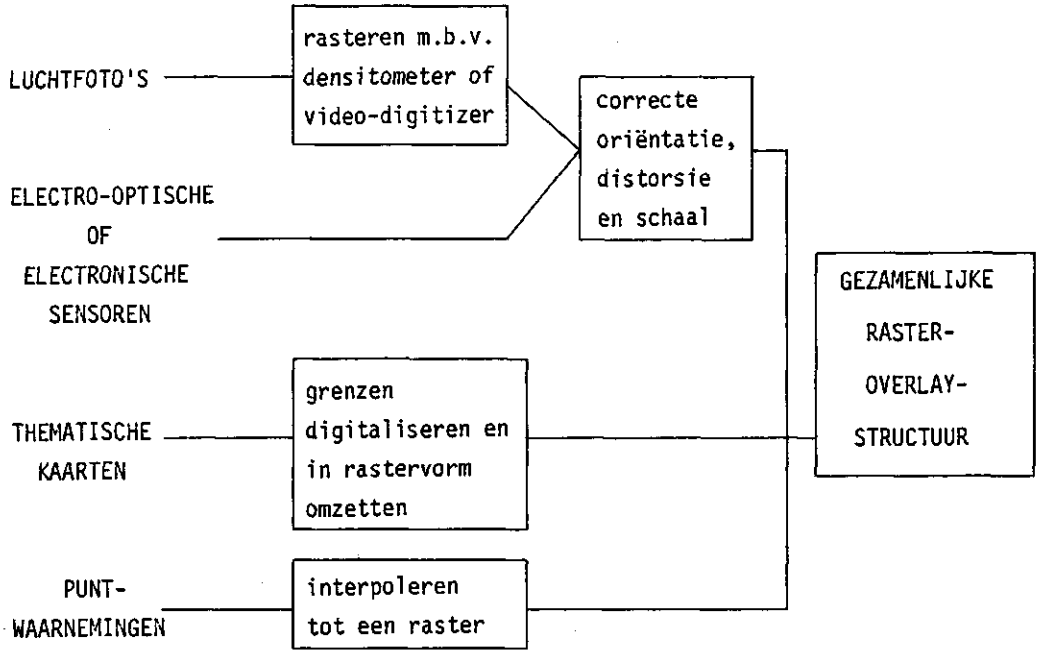
1 de geometrische aspecten
2 de inhoudelijke aspecten.

Onder *geometrische aspecten* worden begrepen de landmeetkundige problemen omtrent het terugbrengen van zowel de RS als van de andere gegevens tot dezelfde projectie, dezelfde schaal en hetzelfde coördinatenstelsel. Onder *inhoudelijke aspecten* worden de identificatie en labelling van objecten in beide soorten gegevens en de koppeling tussen verschillende soorten gegevens begrepen.

## 17.2 Geometrische aspecten van data-integratie

De geometrische bewerkingen nodig om RS-gegevens aan andere ruimtelijke gegevens te relateren zijn afhankelijk van de data-structuur die wordt gebruikt. Indien men hoofdzakelijk in *rasterformaat* werkt,

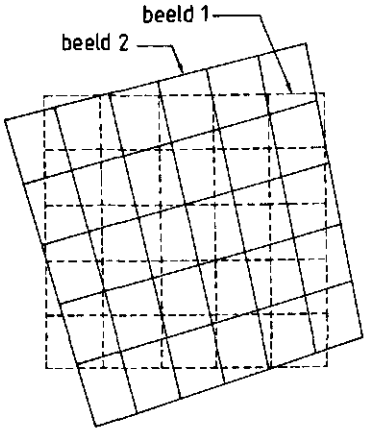
dan zijn de methoden anders dan indien men in *vectorformaat* werkt (vgl. paragraaf 13.3).




**17-1** Het terugbrengen van verschillende soorten ruimtelijke gegevens tot een gezamenlijk rasterformaat.

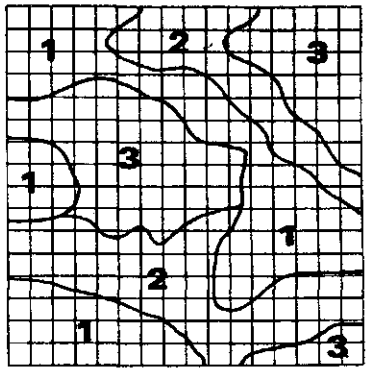
17.2.1 Geometrische correcties in rasterformaat

Figuur 17-1 geeft een overzicht van de procedures die gebruikt worden bij *raster-systemen* (systemen met data in rasterformaat). RS-beelden verkregen met electro-optische of electronische sensoren in vliegtuigen en satellieten zijn reeds in rastervorm, maar de richting en de maat van het raster kunnen van die in het databestand afwijken (figuur 17-2). Bovendien kan ondermeer 'tilt' van het platform (zie figuur 16-2) tot perspectief-vervorming leiden. Daarom zijn er diverse methoden van *geometrische herindeling* en *herbemonstering* ontwikkeld om de discrete pixel-gegevens om te zetten in het nieuwe coördinatenstelsel, zoals beschreven is in hoofdstuk 16. Dit is een reken-intensief proces, maar het is in recente jaren als gevolg van de ontwikkeling van zogenaamde 'dedicated array processoren' veel sneller geworden (Adams et al., 1984; Burrough, 1986).
Luchtfoto's en andere niet-digitale beelden kunnen ook in rastervorm worden omgezet door middel van een densitometer of een 'video digitizer'. Dit is een soort televisiecamera waarbij het signaal als een serie pixels wordt opgenomen in plaats van als een normaal analoog signaal. Zulke beelden moeten ook een geometrische correctie ondergaan.

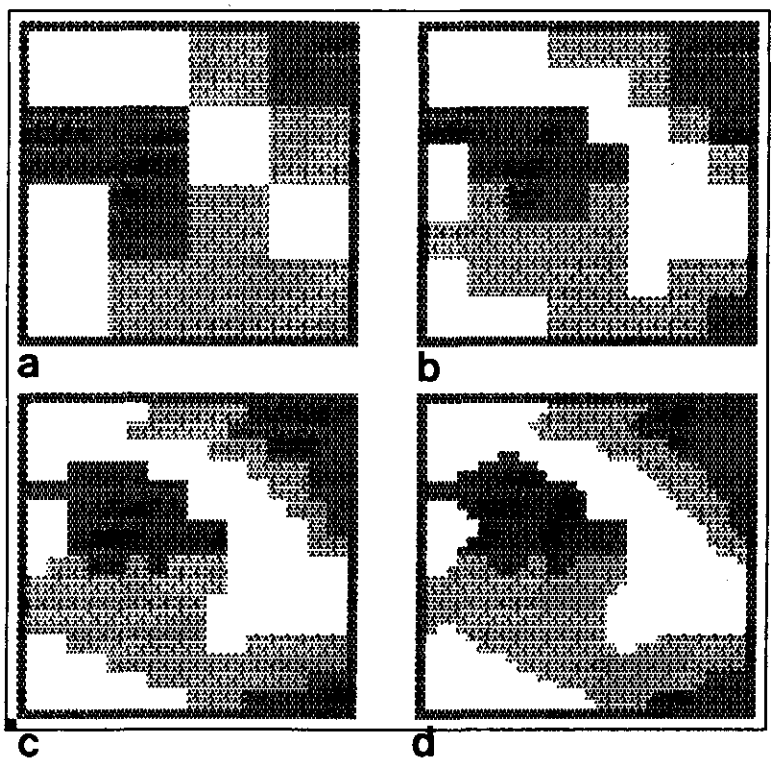



17-2 Geometrische correcties (translatie, rotatie, schaal-correctie, vervorming) zijn noodzakelijk om RS-beelden op elkaar passend te maken (zie hoofdstuk 16).

Om met de RS-beelden vergeleken te kunnen worden moeten gegevens vanuit topografische en thematische *kaarten* ook in rastervorm omgezet worden. Dit gebeurt tegenwoordig meestal door eerst de lijnen en vlakken op de desbetreffende kaarten te digitaliseren in vectorvorm. Daarna worden de lijnen en vlakken automatisch omgezet in rastervorm. Zowel de geometrische correctie van de RS-beelden als het *rasteren* (in rastervorm brengen) van thematische kaarten leidt tot verlies aan informatie. Het verlies is een functie van zowel de ingewikkeldheid van de grenzen op de kaarten als van de relatie tussen pixelmaat en de maat van de eenheden op de vectorkaart. Bijvoorbeeld, als de kaart in figuur 17-3 wordt omgezet in pixels van verschillende maten, zoals in figuur 17-4, dan neemt het verlies aan informatie alleen tengevolge van de rastering sterk toe met de afmeting van de pixels (zie ook Burrough, 1986, hoofdstuk 6).

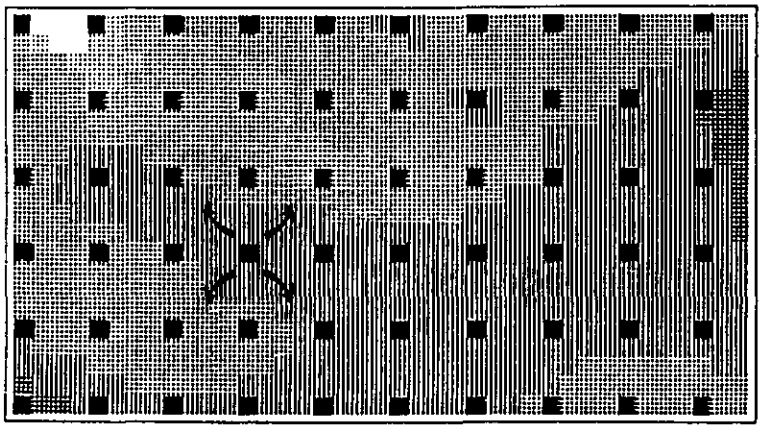



17-3 Polygonale kaarten in vectorvorm moeten gerasterd worden.



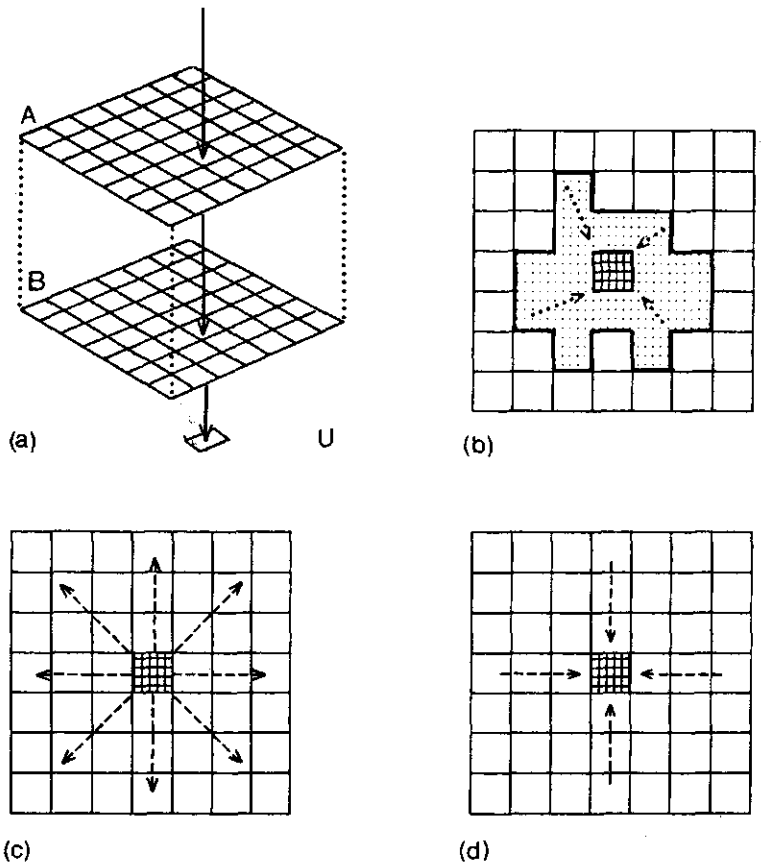

17-4 Door rastering treedt informatieverlies op. Voor de kaart in figuur 17-3 is het informatieverlies te schatten als:
**a**: 4 x 4 pixels → 34,25% verlies
**b**: 8 x 8 pixels → 16,89% verlies
**c**: 16 x 16 pixels → 8,46% verlies
**d**: 32 x 32 pixels → 4,11% verlies

In sommige gevallen zijn veldgegevens (de zogenaamde '*ground truth*') alleen door *puntwaarnemingen* te verkrijgen. In deze gevallen is het noodzakelijk het verloop van het kenmerk (attribuut) te *interpoleren* vanuit de punten tot een raster dat overeenkomt met het raster dat voor alle andere gegevens gebruikt wordt (figuur 17-5). Er zijn veel technieken voor interpolatie (zie Agterberg, 1982; Burrough, 1986, hoofdstuk 8; Ripley, 1981; Webster, 1985), maar de methode van 'block



17-5 Interpolatie vanuit puntwaarnemingen tot een vier maal zo fijnmazig raster. De pixels waarin een monsterpunt valt zijn zwart aangegeven.

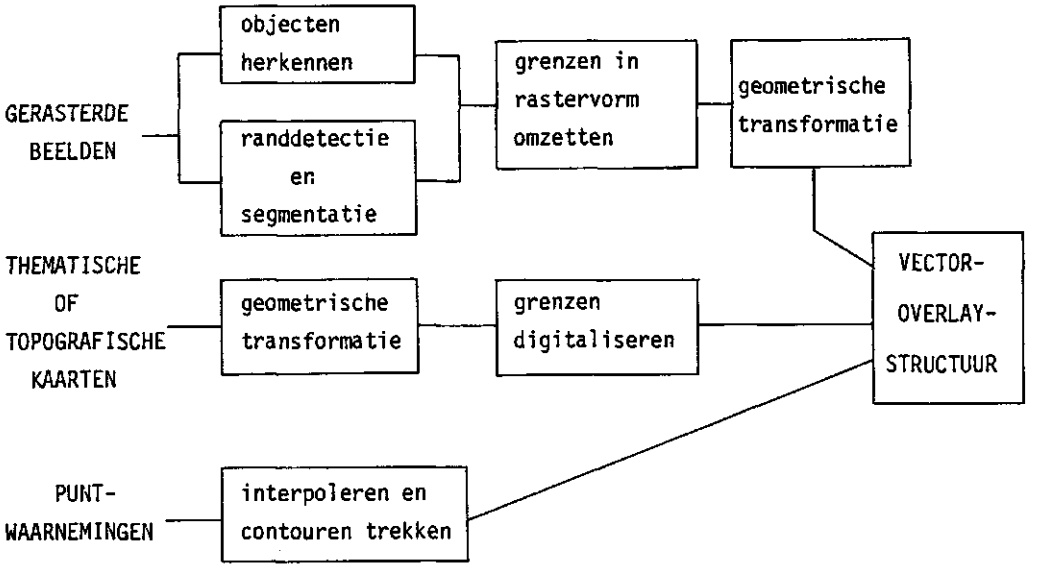
kriging' is waarschijnlijk een van de meest geschikte. Dit is omdat geïnterpoleerde waarden voor cellen met dezelfde vorm en oppervlakte als de pixels van de RS-beelden berekend kunnen worden als lopende gemiddelden.
Gegevens m.b.t. hoogtemetingen kunnen in digitale rastervorm omgezet worden. In rastervorm wordt een *digitaal terreinmodel* (paragraaf 16.2.2.1) een 'altitude matrix' genoemd.
Het gevolg van al deze operaties is een gezamenlijke '*raster-overlay-structuur*' waarop de inhoudelijke aspecten van de gegevens bekeken kunnen worden (figuur 17-6).




17-6 Een gezamenlijke raster-overlay-structuur:
a: data-integratie per pixel (zie ook paragraaf 17.3.1)
b: pixels ontvangen waarden die ontleend worden aan de kenmerken van een gebied
c: pixelwaarden worden isotropisch tot de omgeving (al of niet gewogen) uitgebreid
d: interpolatie van pixelwaarden uit die van de omgeving.

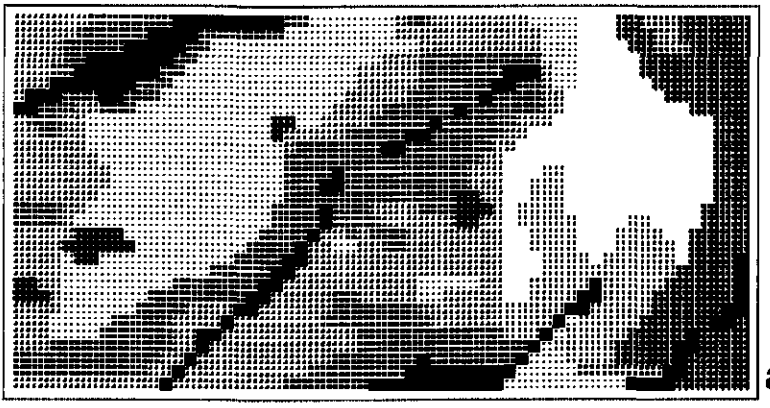
17.2.2 Geometrische correcties in vectorformaat

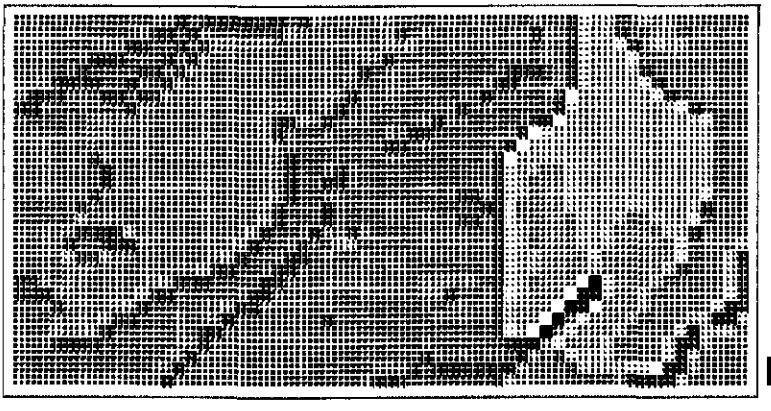
Deze operaties zijn tegengesteld aan de bovengenoemde procedures. Topografische en thematische kaarten worden eerst aan een coördinatenstelsel gerelateerd, en daarna worden de lijnen en vlakken gedigitaliseerd in een '*vector-overlay-structuur*' (figuur 17-7). Deze methode vraagt dat objecten in de RS-beelden eerst herkend, en daarna met grenzen beschreven moeten worden. De grenzen worden beschreven in vectorformaat, zonodig verwerkt tot het gezamenlijke

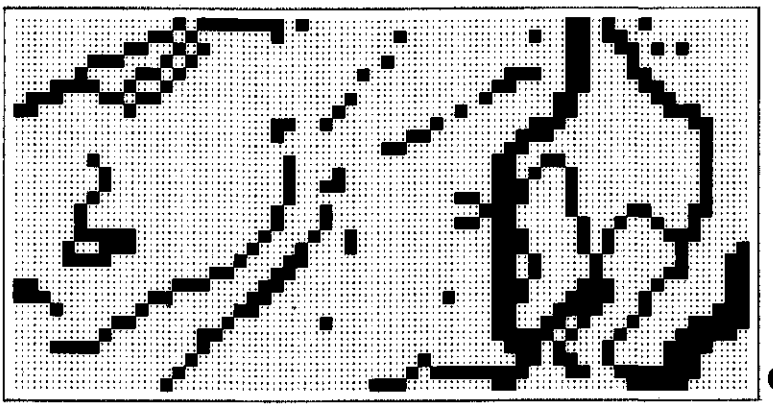



**17-7** Het terugbrengen van verschillende soorten ruimtelijke gegevens tot een gezamenlijk vectorformaat.

coördinatenstelsel en in de vector-overlay-structuur geplaatst. Er zijn twee hoofdmethoden om objecten of grenzen te vinden. De ene methode is het gebruik van automatische beeldinterpretatie-sleutels ('experts'), die bepaalde objecten gemakkelijk uit het beeld kunnen halen. Deze methode is het meest geschikt voor hoge resolutiebeelden toegepast op kunstmatige objecten. Voor grovere resoluties en voor minder duidelijk te onderscheiden objecten, of voor grote databestanden, worden semi-automatische methoden gebruikt. Deze methoden omvatten een reeks technieken voor randdetectie (figuur 17-8) en beeldsegmentatie zoals beschreven is in de hoofdstukken 14 en 15.
Indien puntgegevens worden gebruikt, dan kunnen deze op dezelfde bovenbeschreven manieren (zie paragraaf 17.2.1) tot grotere gebieden geïnterpoleerd worden. Het enige verschil is dat het verloop van een kenmerk nu met isolijnen beschreven wordt (figuur 17-9).
Data betreffende hoogtemetingen kunnen in vectorvorm als 'triangulated irregular networks' (TIN) beschreven worden. Deze TIN's hebben een polygonale vector-structuur die met normale polygonale structuren te vergelijken is (zie Burrough, 1986, hoofdstuk 3).

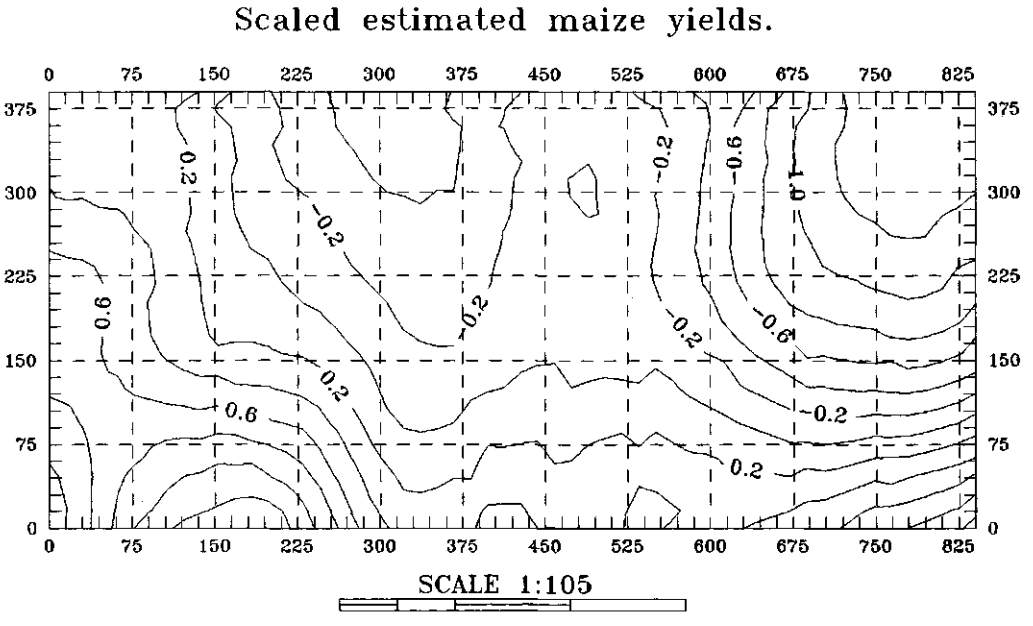



17-8 Rand-detectie en rand-opscherping zijn methoden voor het omzetten van rasterbeelden in vectorvorm.

- a: oorspronkelijk rasterbeeld (geclassificeerd)
- b: na rand-opscherping
- c: eerste stap tot het lokaliseren van grenzen.




17-9 Voorbeeld van een isolijnen-kaart.

## 17.3 Inhoudelijke aspecten van data-integratie

17.3.1 Data-integratie met rastergegevens

Als alle data tot hetzelfde raster teruggebracht zijn, kan *data-integratie* plaatsvinden door het vergelijken en het combineren van de kenmerken *per pixel.* In principe is elke overlay een apart kenmerk. Per pixel kunnen alle bewerkingen (operaties) in de algemene vorm:

$$U = f(A, B, C, .....) \qquad (17.1)$$

beschreven worden, waarbij A, B, C, ... de pixelwaarden zijn voor de verschillende overlays en U het uiteindelijke resultaat is (zie ook figuur 17-6). De exacte vorm van functie (17.1) kan erg verschillend zijn (zie Burrough, 1986, hoofdstuk 5). Op zijn eenvoudigst is het alleen een lineaire combinatie van verschillende soorten gegevens zoals optellen en aftrekken met gebruik van gewichten voor de kenmerken. Maar vergelijking (17.1) kan ook een aantal logische en een reeks van rekenkundige operaties voorstellen die apart of in combinatie uitgevoerd kunnen worden. De functie kan ook een simulatie-model zijn, zoals bijvoorbeeld een gewasgroeimodel of een hydrologisch model, dan wel een multivariate analyse of classificatie-operatie (zoals hoofdcomponententransformatie, cluster analyse, en multivariabele classificaties zoals beschreven in paragraaf 13.2.1).
Ruimtelijke operaties die gebruik maken van de eigenschappen van de *omgeving* van de desbetreffende pixels zijn ook mogelijk. Met deze is

het dan mogelijk om bijvoorbeeld vanuit een digitaal terreinmodel een afwateringsgebied te definiëren en de satelliet-gegevens daarop in te passen (Marks et al., 1985). Het is ook mogelijk bodemgebruiksgegevens uit de satelliet-beelden te interpreteren en deze in drie dimensies boven op een blokdiagram of op een geschaduwde reliëfkaart van het terrein af te beelden (zie bijv. Burrough, 1986, hoofdstuk 3 en Ormeling & Kraak, 1987). Veel geografische informatiesystemen bieden nu de mogelijkheden om al deze eenvoudige verwerkingen *modulair* aan te pakken. De operaties worden opgeroepen door middel van een 'command language' of 'cartografische algebra' die direct aansluit bij het normale taalgebruik. De verschillende mogelijkheden hiervoor zijn in Burrough (1986, hoofdstuk 5) uitvoerig beschreven. Meer ingewikkelde bewerkingen, zoals multivariate analyses kunnen vaak beter gedaan worden door een deelverzameling van de totale hoeveelheid rastergegevens te selecteren en die met een speciaal statistisch pakket of model te verwerken. De resultaten van die verwerkingen kunnen daarna voor het classificeren van de rest van de pixels gebruikt worden.

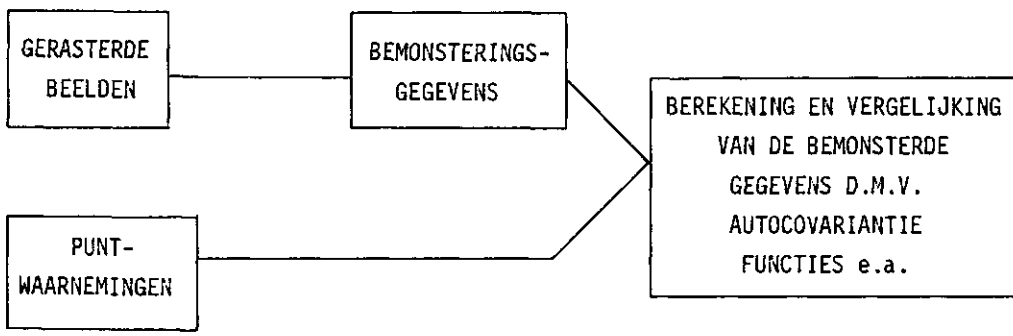
### 17.3.2 Data-integratie met vectorgegevens

Met vectorgegevens zijn er minder mogelijkheden voor data-analyse dan met rastergegevens. Ruimtelijke vergelijkingen zijn beperkt tot *polygonale overlay*, met alle problemen van de overeenkomsten of verschillen tussen de grenzen op de verschillende lagen er bij. Polygonale overlay in vectorvorm is in essentie alleen de doorsnede of vereniging van verschillende ruimtelijke deelverzamelingen, en is geschikt bijv. voor het beantwoorden van vragen zoals 'waar komt bodemtype A en bodemgebruik B voor?' (zie Burrough, 1986, hoofdstuk 5). Als duidelijke objecten, zoals huizen, fabrieken e.d., te onderscheiden zijn en er kenmerken bij geschreven kunnen worden, dan is RS een mogelijke manier om snel veel up-to-date gegevens te kunnen verzamelen en in te voeren, op een manier die bijna even nauwkeurig is als veld-opname, maar die minder kost. De meeste toepassingen van die aard zijn in de opbouw van vastgoed-informatiesystemen, bestemd voor ruimtelijke planning en beheer.

## 17.4 Data-integratie door middel van ruimtelijke statistiek

De in dit hoofdstuk beschreven methoden gaan uit van de hypothese dat objecten in het terrein als eenheden te onderscheiden zijn, of van de benadering dat de waarden van verschillende kenmerken van dezelfde pixels direct met elkaar te correleren zijn. In zekere zin is alle informatie over ruimtelijke verschillen opgebouwd uit *signaal- en ruis-componenten* (vergelijk de overwegingen m.b.t. RS-informatie in de paragrafen 4.3 en 4.5). Het onderscheiden van objecten en het detecteren van grenzen is een manier om de ruis weg te drukken en alleen een signaal over te houden. Helaas, veel beelden bevatten niet één signaal op één duidelijke schaal, maar zijn opgebouwd uit informatie van verschillende ruimtelijke processen, die gezamenlijk een vaak gecompliceerd en moeizaam te interpreteren beeld opleveren. Onder

deze omstandigheden is het onderscheiden van aparte eenheden vaak niet erg zinvol omdat de variabiliteit van de signalen binnen de eenheden relatief groot is. Dit soort problemen komt vaak bij RS-beelden van bodems en natuurlijke vegetatie-patronen voor.
Onder deze omstandigheden kunnen de methoden van de *ruimtelijke statistiek* behulpzaam zijn (zie figuur 17-10). Hieronder worden begrepen technieken zoals auto- en cross-covariantie, semivariantie en Fourier-analyse (Ripley, 1981; Webster, 1985). De methoden zijn vooral toepasbaar in gebieden zonder veel reliëf. Als voorbeelden kunnen wij de studies van ten Berge et al. (1983) en Burrough et al. (1985) noemen. Het hierin onderzochte probleem was dat kale bodems op de Ir. A.P. Minderhoudhoeve, proefboerderij van de Landbouwuniversiteit Wageningen en gelegen nabij Swifterbant in Oost-Flevoland, ieder jaar in het vroege voorjaar merkwaardige patronen op thermisch-infrarood-opnamen (TIR-scanner, zie paragraaf 7.2.2) vertoonden. Er waren twee patronen: een lange-afstands patroon met hoofdoriëntatie oost-west, en een regelmatig terugkerend streep-patroon met wat leek een golflengte van 24 m. Gedurende het overgrote deel van het jaar was er van beide patronen niets te zien, maar gezien de aard van de temperatuurverschillen over een afstand van een paar honderd meter was het denkbaar dat deze patronen door belangrijke inhomogeniteiten van het proefgebied veroorzaakt werden.




17-10 Het vergelijken van rasterbeelden en puntwaarnemingen op de grond d.m.v. de ruimtelijke statistiek (auto- en cross-covariantie, Fourier-analyse e.d.).

Bemonstering van het gehele gebied in detail was niet mogelijk, zodat de meest belangrijke kenmerken van de bodem (textuur van de bovenlaag, temperatuur van de oppervlakte, vochtspanning e.d.) op drie transecten bemonsterd werden, gelijktijdig met de thermisch-infrarood-opname. Met twee transecten werd het lange-afstands patroon, en met één transect het streep-patroon onderzocht. Opbrengstdata van blancoproeven werden ook gebruikt. De transect-data van de 'ground truth' werden aangevuld met de thermisch-infrarood-metingen voor die pixels waarvoor de bodemmetingen waren gedaan. Statistische analyse

van de transect-data heeft daarna uitgewezen welke bodemgegevens een ruimtelijk gedrag hadden dat met de infrarood-gegevens te vergelijken was. Op deze manier werden de aard en de oorzaak van de patronen op de thermisch-infrarood-beelden op een effectieve en goedkope manier verklaard. Daarna kon men de thermisch-infrarood-beelden gebruiken om de totale verspreiding van de fenomenen te karteren.

## 17.5 Evaluatie

Bij het aan elkaar koppelen van RS-beelden en andere ruimtelijke data in een GIS loopt men tegen de problemen van geometrie en inhoud aan. Voor niet al te gemakkelijk te herkennen objecten en in omstandigheden waar analyse en modellering van gegevens voorop staan is het gebruik van rastertechnieken wel aan te bevelen. Voor grootschalige, vastgoed- en kadastrale toepassingen waar het snel inwinnen van data over duidelijk herkenbare objecten het doel is, hebben vectormethoden de voorkeur. In gevallen waar de relaties tussen patronen op de beelden en ruimtelijke verschillen op de grond onduidelijk zijn of waar de verschillen op een geleidelijke manier variëren, kunnen statistische methoden voor ruimtelijke analyse behulpzaam zijn.

## 17.6 Literatuur

1 Adams, J., C. Patton, C. Reader & D. Zamora, 1984. Fast hard-ware for geometric warping. In: Proc. 3rd Australasian Remote Sensing Conference, Queensland, Australia.

2 Agterberg, F.D., 1982. Recent developments in GeoMathematics. Geoprocessing 2: 1-32.

3 Berge, H.F.M. ten, L. Stroosnijder, P.A. Burrough, A.K. Bregt & M.J. de Heus, 1983. Spatial variability of physical soil properties influencing the temperature of the soil surface. Agricultural Water Management 6/2, 213-226.

4 Burrough, P.A., 1986. Principles of geographical information systems for land resources assessment. Clarendon Press, Oxford, 1986, 193 blz.

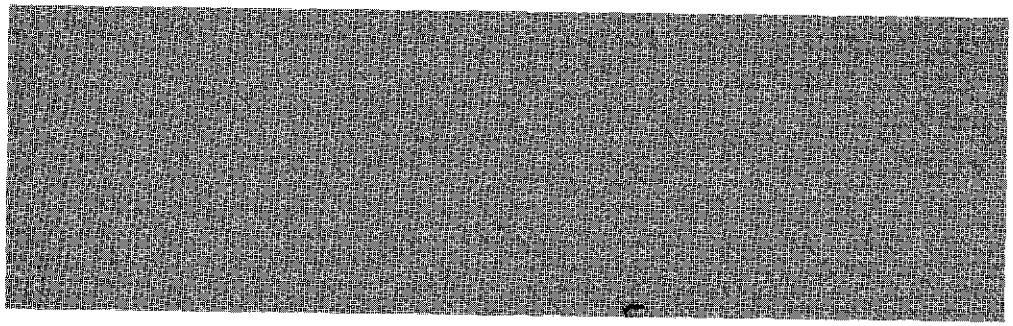
5 Burrough, P.A., A.K. Bregt, M.J. de Heus & E.G. Kloosterman, 1985. Complementary use of thermal imagery and spectral analysis of soil properties and wheat yields to reveal cyclic patterns in the polders. J. Soil Science 36: 141-152.

6 Marks, D., J. Dozier & J. Frew, 1984. Automated basin delineation from digital elevation data. Geoprocessing 2: 299-311.

7 Ripley, B., 1981. Spatial statistics. J. Wiley & Sons, Inc., New York.

8 Webster, R. 1985. Quantitative spatial analysis of soil in the field. Advances in Soil Science, Volume 3, Springer-Verlag, New York.

9 Ormeling, F.J. & M.J. Kraak, 1987. Kartografie: ontwerp, productie en gebruik van kaarten. Delftse Universitaire Pers, 1987, 246 blz.



# Thema 5 Remote sensing en de inventarisatie en monitoring van landbouwgebieden

Een belangrijke toepassing van RS in de landbouw ligt op het vlak van de opbrengstschatting van gewassen. Ruime aandacht zal worden gegeven aan RS als input van agrometeorologische groei- en gewasopbrengstmodellen voor uitgestrekte gebieden, waarbij gebruik gemaakt wordt van RS-gegevens in het optische venster. Een andere toepassing van RS in de landbouw ligt op het terrein van de gewasclassificatie op lokale of regionale schaal. Ingegaan zal worden op de mogelijkheden van radar.
Voor de monitoring van de gewasgroei is, speciaal met betrekking tot vochttekorten in de worteizone, een methodiek ontwikkeld voor de kartering van de verdamping aan de hand van digitaal opgenomen reflectie- en warmtebeelden.
Vervolgens worden ervaringen met RS besproken, opgedaan bij waterbalansstudies in geïrrigeerde gebieden, met het oog op de verschillende niveaus waarop de zogenaamde irrigatie-efficiëntie kan worden vastgesteld. Voor gebieden met schaarse vegetatie (woestijnen) zal de betekenis worden belicht van de inzet van RS bij de vraagstukken van het grondwaterbeheer en hydrogeologische studies.

Document

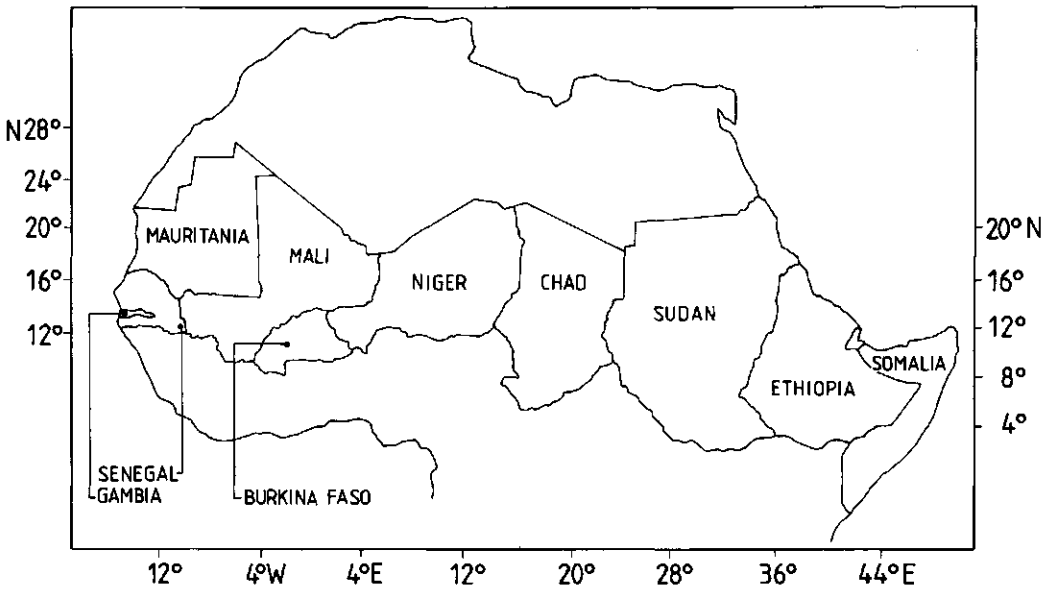
# 18 Remote sensing en gewasopbrengstschatting

A. van Dijk

## 18.1 Inleiding

Het 'Cooperative Institute for Applied Meteorology' (CIAM) van de Universiteit van Missouri-Columbia volgt samen met de 'National Oceanic and Atmospheric Administration, National Environmental Satellite Data and Information Service, Assessment and Information Services Center' (NOAA/NESDIS/AISC) de *gewasgroeiomstandigheden* en *gewasopbrengst* in onderontwikkelde landen met het doel meer *voedselzekerheid* te bieden. De toegenomen vraag naar voedsel in deze landen is veroorzaakt door een toename in bevolking en een reductie in landbouwgebied ten gevolge van onjuist landgebruik en gebrek aan bodembescherming.
Een misoogst is in de onderontwikkelde landen vaak pas aan het eind van het groeiseizoen bekend. Aangezien er in deze landen landbouw voor eigen levensonderhoud wordt bedreven en opslagcapaciteit normaliter niet beschikbaar is, kan een lagere opbrengst resulteren in een lokale hongersnood. Nadat men zich in de voedsel-donorlanden eindelijk heeft gerealiseerd dat er een voedseltekort is, wordt veel tijd verloren met het transport van het voedsel naar het noodgebied en als de hulp eindelijk arriveert, is het voor veel mensen te laat.
Vroegtijdige en gedetailleerde informatie betreffende gewasgroei-omstandigheden en gewasopbrengst is uiterst belangrijk aangezien deze meer tijd verschaft om de gevolgen van een te verwachten misoogst te verzachten. Tot voor kort waren de gewasgroei- en gewasopbrengstbepalingen hoofdzakelijk gebaseerd op *agrometeorologische modellen,* die onder meer de plantdatum, de temperatuur en de regenval als variabelen hebben. Het verzamelen van gegevens voor al het agrometeorologisch onderzoek wordt gedaan door een net van conventionele meteorologische *weerstations*. Ondanks een toename in de belangstelling voor agrometeorologische gegevens, zijn netten van weerstations in de meeste tropische en subtropische gebieden niet of onvoldoende aanwezig. Het resultaat is dat RS-systemen,

gebaseerd op *satellietgegevens*, steeds belangrijker worden als bron voor de anderszins niet beschikbare agrometeorologische gegevens.
Verschillende onderzoekers hebben relaties gevonden tussen satellietgegevens en variabelen van agrometeorologische modellen zoals instraling van de zon (bijv. Sullivan et al., 1984; Tarpley, 1979); temperatuur (bijv. Davis et al., 1983; Jackson et al., 1980); neerslag (bijv. Griffith et al., 1978, 1981); verdamping (Idso et al., 1975; Heilman & Moore, 1982) en gewaskalender (bijv. Badhwar, 1980, 1982). Ook zijn er studies gedaan om de satellietgegevens te correleren aan indicatoren voor de toestand van het gewas, zoals de hoeveelheid groene biomassa (bijv. Wiegand et al., 1979; Tucker et al., 1980); droogte-verschijnselen (bijv. Thompson en Wehmanen, 1979, 1980) en bodemvocht (Reiniger, 1981).
Het voordeel van direct werken met groene biomassa, droogte-verschijnselen en bodemvocht in plaats van met gewascondities afgeleid van instraling, temperatuur en regenval is dat de groene biomassa, droogte-verschijnselen en bodemvocht vaak beter de *werkelijke veldsituatie* weergeven aangezien ze niet alleen een gevolg zijn van instraling, temperatuur, regenval en evaporatie maar ook van landbouwpraktijken (effect van bodemvruchtbaarheid, irrigatie, plantdichtheid); van bodem (bodemsoort, helling) en van ziekten van het gewas. Deze laatste drie zijn precies de variabelen die moeilijk in te bouwen zijn in een agrometeorologisch model.
Dit hoofdstuk concentreert zich op de bepaling van vegetatiecondities met behulp van NOAA/AVHRR-satellietgegevens (zie volgende paragraaf), die doorslaggevende, actuele informatie verschaffen voor

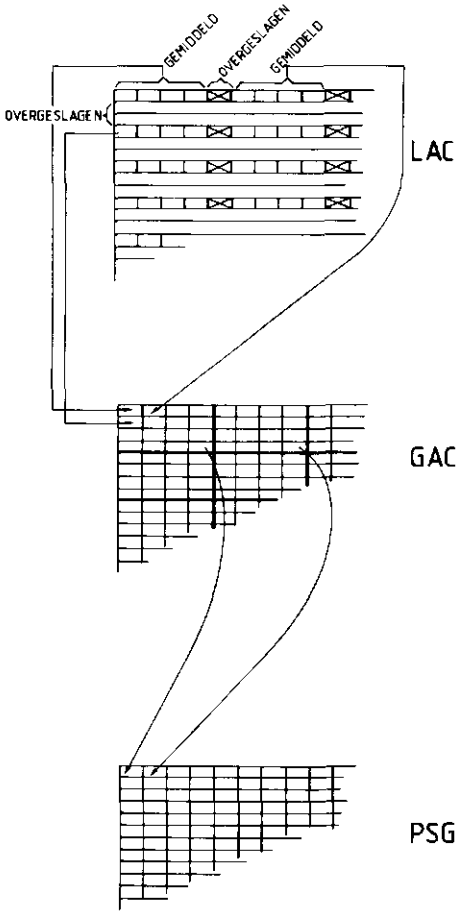



18-1 Sahel- en Hoornlanden van Afrika.

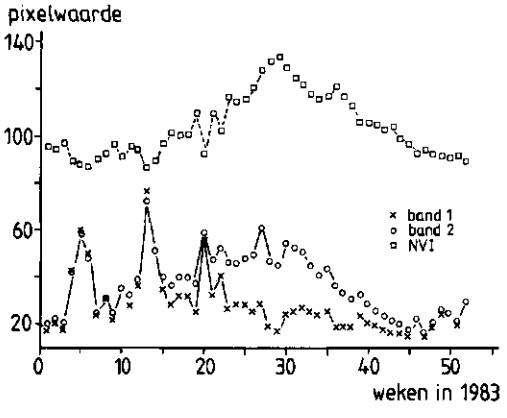
sub-continenten. Het systeem is toegepast op de Sahel- en Hoornlanden van Afrika, een gebied dat ernstig geleden heeft onder droogten en misoogsten in de laatste jaren (zie figuur 18-1).

## 18.2 NOAA/AVHRR-satellietgegevens

De VS hebben in het verleden een hele serie zgn. *NOAA-satellieten* gelanceerd. Deze vormen het belangrijkste meteorologische satellietsysteem voor de VS. Hoewel bedoeld als *weersatelliet*, wordt er ook gebruik van gemaakt voor landtoepassingen. Deze satellieten worden vanwege hun *lage geometrische resolutie* alleen gebruikt voor informatie over uitgestrekte gebieden of hele continenten. Een interessant instrument aan boord is de zgn. AVHRR ('Advanced Very High Resolution Radiometer'), die een resolutie heeft van 1,1 bij 1,1 km. De AVHRR heeft ondermeer twee spectrale banden (band 1: 0,58 – 0,68 μm; en band 2: 0,725 – 1,10 μm) die te vergelijken zijn met de Landsat MSS-banden 5 (0,6 – 0,7 μm) en 7 (0,8 – 1,1 μm) (zie ook paragraaf 7.5.2). De Landsat MSS-banden 5 en 7 zijn veelvuldig gebruikt in vegetatiestudies (bijv. Richardson & Wiegand, 1977; Kollenkark et al., 1982). De NOAA-satelliet is een zgn. *bijna-polair platform* (de baan loopt bijna over beide polen), die een baan beschrijft die synchroon met de zon loopt, en die van hetzelfde gebied *elke dag* opnamen maakt. Tijdens een groeiseizoen zijn er van de NOAA-satelliet veel meer wolkenvrije opnamen beschikbaar dan van Landsat, die eenmaal elke 16 dagen over hetzelfde gebied vliegt. De *dagelijkse opnamen* en de gevoeligheid van de spectrale banden (digitale gegevensvastlegging in 10 bits woorden) maken NOAA-satellieten veelbelovend voor het monitoren van vegetatie. Andere voordelen van het gebruik van de NOAA-satellieten voor vegetatieconditie-bepalingen zijn de beschikbaarheid van de gegevens *binnen een week* na de opname en het feit dat de *continuïteit* van de gegevens gegarandeerd is door het operationele gebruik van de NOAA-satellieten voor het monitoren van het weer.
Tijdens de periode van april 1982 tot april 1985 heeft NOAA/NESDIS wekelijkse composieten geproduceerd, die gebaseerd zijn op de NOAA 'polarstereographic' (PSG)-satellietgegevens (Kidwell, 1983). De PSG-pixels zijn bemonsterd uit de 'Global Area Coverage' (GAC)-gegevens. Een PSG-pixel is opgebouwd uit resolutiecellen van 4,8 $km^2$ en vertegenwoordigt een gebied van ongeveer 290 $km^2$. De wijze waarop de GAC- en PSG-gegevens uit de 'Local Area Coverage' (LAC) worden gedistilleerd, is verklaard in figuur 18-2. Composieten van een week of langere periode worden geproduceerd van dagelijkse satellietgegevens met het doel wolken te elimineren. Het maken van de composiet is gebaseerd op het kiezen van de pixel met de grootste *'Normalized Vegetation Index'* (NVI = (band 2 – band 1)/ (band 1 + band 2)) uit de dagelijkse pixelwaarden (zie paragraaf 9.5.2).
De NVI (Rouse et al., 1973) geeft een indicatie voor de hoeveelheid fotosynthetisch actieve, groene biomassa (Wiegand & Richardson, 1984;




**18-2** Genereren van PSG-gegevens.
Een LAC-pixel vertegenwoordigt een gebied van 1,2 km$^2$ en heeft een resolutiecel van 1,2 km$^2$.
Een GAC-pixel vertegenwoordigt een gebied van 18 km$^2$ (5x3 LAC-pixels) en is samengesteld uit resolutiecellen van 4,8 km$^2$ (4 LAC-pixels in aftastrichting, waarvan de pixelwaarde wordt gemiddeld).
Een PSG-pixel vertegenwoordigt een gebied van 290 km$^2$ (waarin 4x4 GAC-pixels worden begrepen) en is samengesteld uit resolutiecellen van 4,8 km$^2$ (4 LAC-pixels, zie boven).




**18-3** Het verloop van band 1, band 2 en de NVI (*100+90) als functie van de tijd voor een district in Iowa (NOAA-satelliet).

Tucker, 1977). De wekelijkse band 1, band 2 en NVI-waarden zijn gegeven in figuur 18-3.

## 18.3 De gewasconditie-bepalings-methode ontwikkeld door CIAM/AISC

De jaarlijkse variabiliteit van een oogst is het gevolg van de gewasgroeiomstandigheden, die hoofdzakelijk afhankelijk zijn van weer en ziekten. Een gewasopbrengst wordt bepaald door de soort en de intensiteit van de nadelige invloeden, die een gewas tijdens zijn verschillende ontwikkelingsstadia ondergaat. Daarom is het bij oogstvoorspelling uiterst belangrijk te weten op welke stadia in de levenscyclus van een gewas het weer en eventuele ziekten van invloed waren. Belangrijke gewasgegevens zoals een actuele gewaskalender, het gebied onder aanplant, regenval, luchttemperatuur en bodemvocht zijn vaak niet beschikbaar voor de Sahel- en Hoornlanden van Afrika.
CIAM/AISC gebruikt voor de vegetatieconditie-bepaling twee produkten, gebaseerd op de NOAA/AVHRR-gegevens.

1) Een beeld van de banden 1 en 2 van GAC-gegevens (zie de Platen IIa en IIb) in een kleurensysteem, gebaseerd op kleurwaarde, kleursoort en kleurverzadiging (zie paragraaf 4.4), wordt gebruikt voor *ruimtelijke evaluatie* (Ambroziak, 1985).
2) Een spectrale signatuur van de NVI gebaseerd op PSG-gegevens versus tijd wordt gebruikt voor *temporele evaluatie.*

De Afrikaanse landbouwpraktijken worden gekarakteriseerd door 'shifting cultivation' met lange braakperiodes, het gedeeltelijk weghalen en afbranden van de natuurlijke vegetatie, het ontbreken van kunstmest, weinig of geen onkruidcontrole, gemengd en multihybride gewasteeltsysteem, laag technisch niveau en velden die klein en onregelmatig van vorm zijn. De landbouwgebiedjes zijn verspreid in een enorm gebied van natuurlijke vegetatie. Uit de officiële statistieken van de lokale Ministeries van Landbouw blijkt bijvoorbeeld, dat van het potentiële landbouwgebied slechts 2% in Chad en 5% in Burkina Faso als zodanig in gebruik zijn. Het gevolg van dit alles is dat het NVI-signaal afkomstig van de cultuurgewassen een heel kleine inbreng heeft op het totale NVI-signaal van een 4,8 $km^2$ resolutie-element in een PSG-pixel. De NVI-signatuur typeert het groen worden van de natuurlijke vegetatie in een gebied, maar de groeiomstandigheden van een gewas kunnen niet worden gevolgd. Daardoor is een lage NVI-waarde het gevolg van ongunstige groeiomstandigheden, die hun effect op *alle* vegetatie hebben uitgeoefend, inclusief de cultuurgewassen en niet een gevolg van cultuurtechnische handelingen (oogst).
Informatie zoals landgebruik geeft een indicatie t.a.v. welke gewassen worden geteeld in een bepaalde streek. Tengevolge van de variabiliteit in regenval is het belangrijk met de actuele gewasgroeikalender te werken. Dit soort informatie is vaak niet beschikbaar. De eerste regens veroorzaken spruiten van alle overjarige vegetatie en uitkomen van alle zaden, inclusief die van de cultuurgewassen. Het *'spectrale uitkomen'*, per definitie de periode waarin een jonge plant twee tot drie bladeren heeft, is duidelijk te zien aan de temporele spectrale signatuur van NVI-waarden, de zgn. NVI-signatuur. Een normale gewasgroeikalender is

gebruikt om de gewasgroeiperioden te bepalen. Variaties in groei ten gevolge van abnormale groeiomstandigheden worden niet in aanmerking genomen. Een vergelijking van een NVI-signatuur voor het huidige groeiseizoen met een NVI-signatuur van vorig jaar voor hetzelfde gebied (aannemende dat groeiomstandigheden van het vorige jaar bekend zijn) kan informatie verschaffen over de gewasgroeiomstandigheden van het huidige jaar. Meer gedetailleerde informatie kan worden verkregen wanneer de kritieke perioden voor gewasopbrengst en het effect van ongunstige gewasgroeiomstandigheden op de gewasoogst in aanmerking worden genomen.

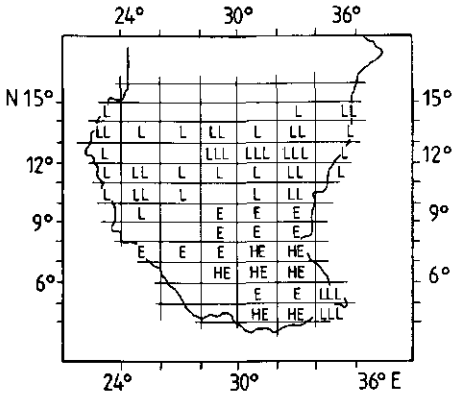
## 18.4 Surveillance-systeem gebaseerd op satellietgegevens voor de Sahel- en Hoornlanden van Afrika

CIAM en AISC hebben een systeem ontwikkeld om satellietgegevens met een hoge temporele resolutie te verwerken met het doel de gewasgroeicondities te bepalen over grote gebieden. Het systeem heet *satelliet-surveillance-systeem*. Tijdens een gemiddelde, operationele analyse zijn er meestal niet voldoende mensen en instrumenten om een gedetailleerd onderzoek te doen over een groot gebied. Als er eenmaal een ongunstige groeiomstandigheid is ontdekt in het grote gebied, kunnen de probleemgebieden gedetailleerd onderzocht worden; dit spaart tijd en inspanning.
Gebaseerd op het satelliet-surveillance-systeem, waren de Sahel-en Hoornlanden van Afrika voor de groeiseizoenen 1983 en 1984 verdeeld in 340 rechthoekige rastercellen van 1° in de breedte en 2° in de lengte. De resultaten waren zo veelbelovend dat er besloten werd in 1985 naar kleinere rastercellen van ½ breedtegraad en 1 lengtegraad over te gaan. Het surveillance-systeem zal met een voorbeeld duidelijk worden gemaakt.

## 18.5 Resultaten

### 18.5.1 Soedan voorbeeld

In november 1984 werd CIAM en NOAA/AISC verzocht de gewasconditie te bepalen voor Soedan. Op dat tijdstip waren er geen recente meteorologische gegevens beschikbaar. Een vergelijking van twee kleurenbeelden (kale grond is rood en vegetatie is groen) duidt aan dat de hoeveelheid biomassa voor 1984 lager is dan in 1983 (zie de Platen IIa en IIb). Ook werden de NVI-signaturen voor 1983 en 1984 voor de 1° bij 2° rastercellen bepaald.
De gedetailleerde analyse van de NVI-signaturen van 1983 en 1984 is gegeven in figuur 18-4. Er kunnen vier verschillende patronen in de NVI-signaturen worden onderscheiden. De locatie van deze vier representatieve temporele spectrale signaturen en de gemiddelde jaarlijkse regenval zijn aangegeven in figuur 18-5. De vier NVI-signaturen zelf zijn te zien in figuur 18-6. De NVI-signaturen hebben een onregelmatige vorm tengevolge van atmosferische verstoringen, de




**18-4** Kaart van het vergelijken van de NVI-waarden in 1983 en 1984.
Legenda:

□ 1984 vegetatie-index hetzelfde als in 1983.

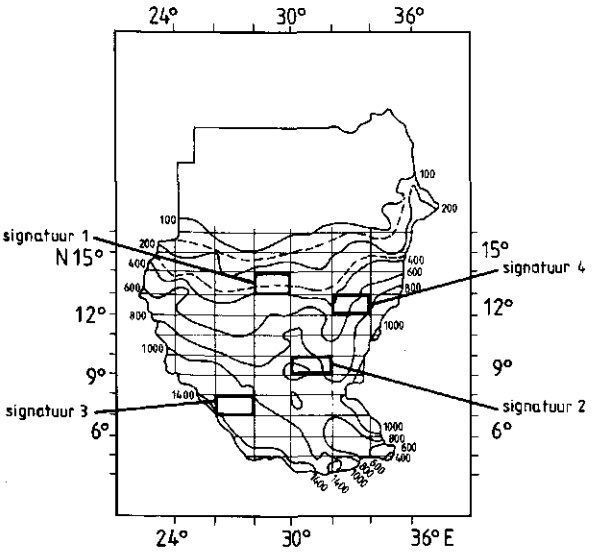
L 1984 vegetatie-index een beetje lager dan in 1983 gedurende het hele groeiseizoen.

LL 1984 vegetatie-index lager dan in 1983 gedurende het hele groeiseizoen.

LLL 1984 vegetatie-index veel lager dan in 1983 gedurende het hele groeiseizoen.

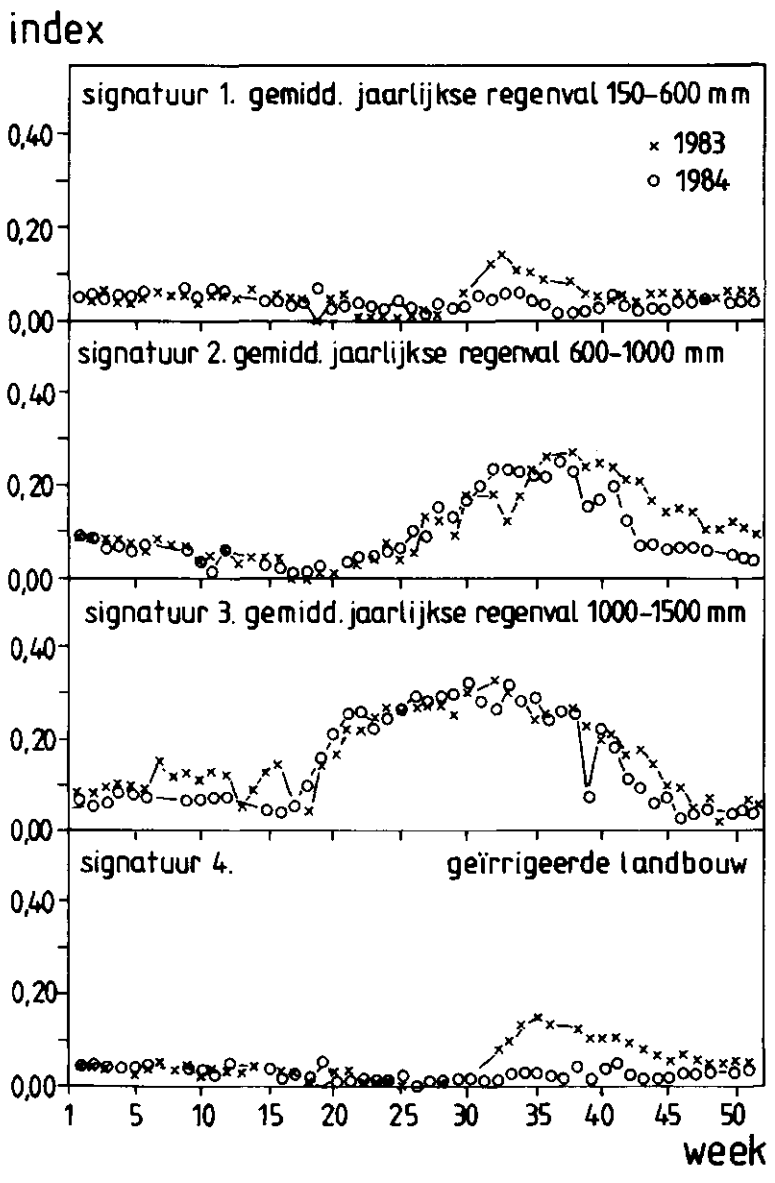
E 1984 vegetatie-index lager dan in 1983 gedurende het einde van het groeiseizoen.

HE 1984 vegetatie-index hoger dan 1983 gedurende het begin, hetzelfde gedurende het midden en lager gedurende het einde van het groeiseizoen.




**18-5** Verdeling van het gebied in (1° bij 2°) rechthoeken; daaroverheen de isolijnen van de gemiddelde jaarlijkse regenval. Voorts locatie van de vier NVI-signaturen in Soedan.

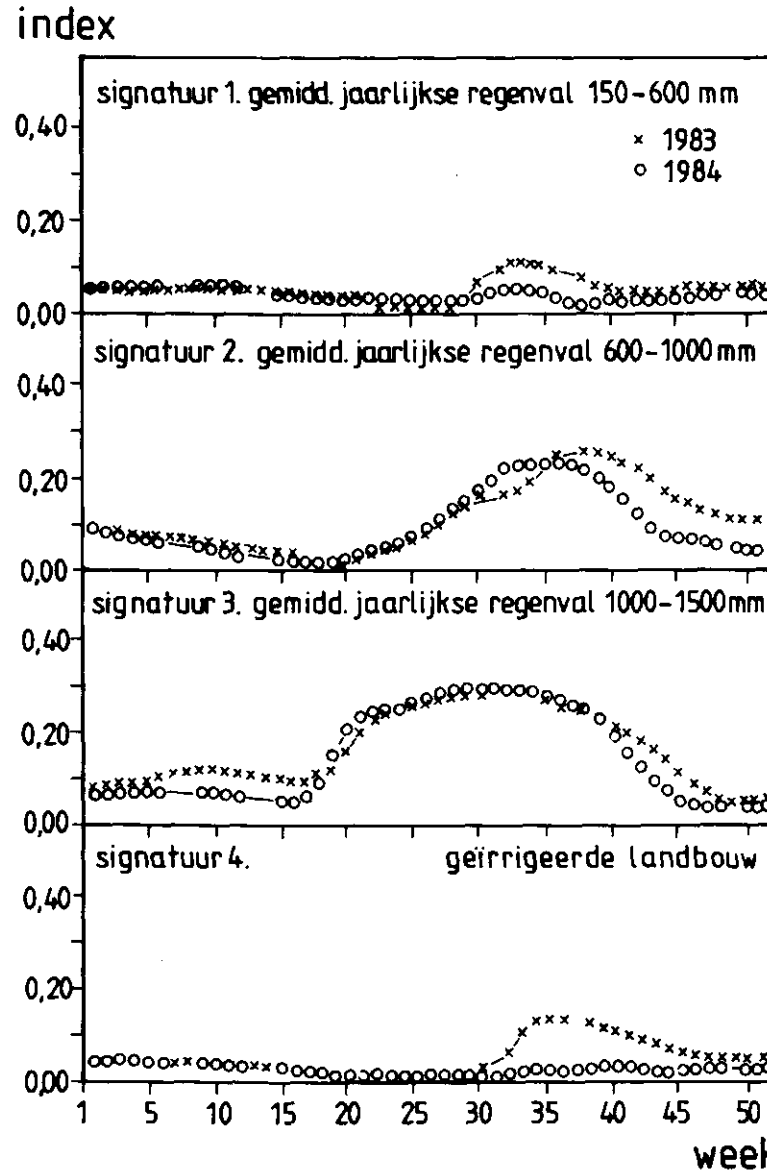
hoogte van de zon en de inkijkhoek van de sensor. In een gewasgroeistudie zijn de gevolgen van de groeiomstandigheden op de NVI-signaturen het onderwerp van onderzoek, terwijl de atmosfeer niet interessant is en het probleem compliceert. Een adequate methode om het storende effect van de interacties tussen atmosfeer, inkijkhoek van de sensor, hoogte van de zon en gewasbedekking op de NOAA/AVHRR




18-6 De vier NVI-signaturen in Soedan.

reflectie-gegevens te corrigeren is tot nu toe niet gevonden (Dave, 1981; Ranson et al., 1985; Shibayana & Wiegand, 1985). De atmosferische verstoring in figuur 18-6 kan worden gereduceerd d.m.v. een effeningsprocedure (van Dijk et al., 1986)(zie figuur 18-7).

NVI-signatuur 1: Semi-aride gebied (gemiddelde regenval 150-600 mm). De zeer lage NVI-waarden van het groeiseizoen 1984 voor dit gebied zijn op het niveau van kale grond. Dit suggereert dat in 1984 de zuidgrens van de woestijn ongeveer 400 km naar het zuiden is verplaatst. De ongunstige groeiomstandigheden zullen in een zeer lage opbrengst voor sorghum en gierst-gewassen resulteren.




18-7 De vier NVI-signaturen na een effeningsprocedure.

NVI-signatuur 2: Niet-intensieve landbouw (gemiddelde regenval 600-1000 mm).

De NVI-waarden van 1984 voor het eerste gedeelte van het groeiseizoen zijn hoger dan die in 1983 en voor het midden-gedeelte ongeveer hetzelfde als in 1983, hoewel in de maand oktober van 1984 de NVI aanzienlijk lager is dan in 1983. Eind september en in oktober wordt er normaal geoogst in dit gebied. De NVI alleen kan geen antwoord geven op de vraag of de lage NVI-waarden in 1984 een gevolg zijn van een vroege oogst, of van ongunstige gewasgroei-omstandigheden of van een combinatie van beiden.

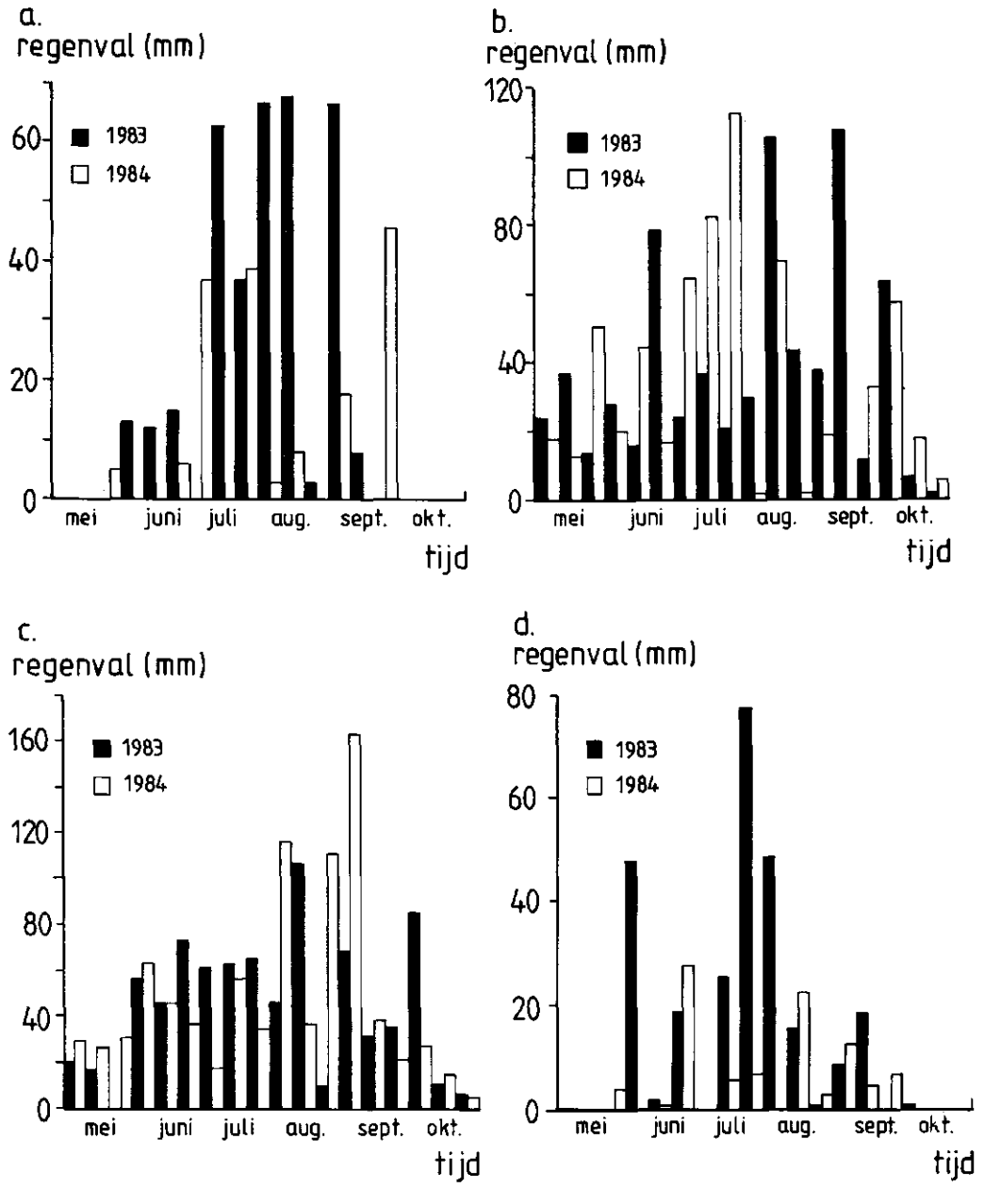
NVI-signatuur 3: Intensieve landbouw (gemiddelde regenval 1000-15000 mm).
De NVI-waarden voor 1983 en 1984 zijn ongeveer gelijk en geven aan dat beide jaren ongeveer dezelfde gewasgroeiomstandigheden hebben.

NVI-signatuur 4: Geïrrigeerde landbouw.
De belangrijkste geïrrigeerde gebieden in Soedan liggen langs de Blauwe en Witte Nijl. De NVI-waarden voor deze gebieden zijn veel lager in 1984 dan in 1983. De gewasgroeiomstandigheden zijn ongunstig en lagere oogsten kunnen verwacht worden in dit gebied.

Een nadere studie toont aan dat de ongunstige gewasgroei-omstandigheden plaatselijk zijn en vooral in de drogere geïrrigeerde gebieden van invloed zijn. Het gebied met de intensieve landbouw had ongeveer dezelfde NVI-waarde in 1983 en 1984. Daarom was de opbrengst in 1984 voor het gehele land niet dramatisch lager dan in 1983 (zoals oorspronkelijk verwacht werd).
In het midden van 1985 kwamen de regenvalgegevens uit Soedan beschikbaar. De regenval gerapporteerd door 4 stations in of nabij de vier rastercellen zijn aangegeven in figuur 18-8. De regenvalgegevens (opgeteld over 10 dagen) van EL OBEID (figuur 18-8a), MALAKAL (figuur 18-8b) en WAU (figuur 18-8c) verklaren het relatieve verschil van de NVI-waarden van 1983 vergeleken met die van 1984 voor respectievelijk NVI-signatuur 1, 2 en 3.
Het station KOSTI is geassocieerd met NVI-signatuur 4. Geïrrigeerde landbouw is niet geheel afhankelijk van regen voor de watervoorziening en op het tijdstip van onderzoek (december 1984) kon er geen verklaring worden gegeven waarom de NVI van een geïrrigeerd gebied zoveel lager kon zijn in 1984 dan in 1983. De hoeveelheid regen in 1984 was lager dan in 1983, maar dit kan niet het verschil in NVI verklaren. Een artikel in de Riyadh Al-Yamamah van 15 mei 1985, pagina's 44 en 45 (JPSRS-NEA-85-085), verschafte opheldering. Het Nijlwatergebruik van Egypte is meer dan 55 miljard $m^3$ per jaar. In 1984 bracht de Nijl slechts 35 miljard $m^3$ hetgeen resulteerde in de laagste vloedwaterstand van de eeuw. De lage waterstand in de Nijl had tot gevolg dat het irrigatiewater in Soedan werd gerationeerd (persoonlijk bericht van Dr. Mohammed El-Tiraifi Mohammed, UMC-Columbia, 1985) en dit verklaart de lage NVI-waarden van de geïrrigeerde gebieden in 1984 vergeleken met die van 1983.

### 18.5.2 Gewasopbrengst-bepaling

De Sahel- en Hoornlanden van Afrika zijn gekarakteriseerd door niet-intensieve landbouw. Zoals eerder verklaard, typeert de NVI-signatuur in deze gebieden het groen worden van het *gehele* gebied en kan de groei van één gewas niet worden gevolgd.
Aannemende dat in semi-aride gebieden de groeiomstandigheden alle groene biomassa (inclusief de cultuurgewassen) beïnvloeden en dat de groeiomstandigheden tijdens *het in aar komen* het meest bepalend voor de gewasopbrengst zijn, kan worden vastgesteld dat een lage (hoge) NVI

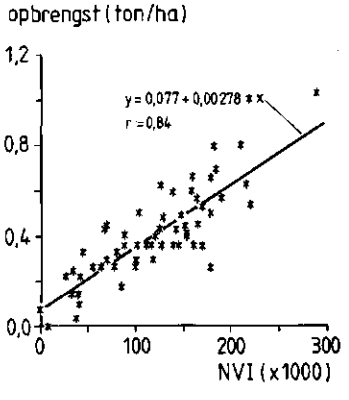



18-8 Tiendaagse regenvalgegevens voor 1983 en 1984 voor (a) El Obeid, (b) Malakal, (c) Wau en (d) Kosti.

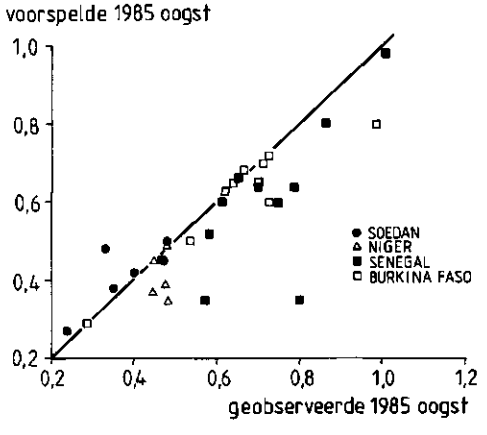
tijdens het in aar komen het gevolg is van weinig (veel) groene biomassa; dat deze op haar beurt weer bepaald wordt door ongunstige (gunstige) groeiomstandigheden en dat dit alles zal resulteren in een lage (hoge) gewasopbrengst.

Het 'spectrale uitkomen' gebeurt ongeveer twee tot drie weken na het planten, afhankelijk van temperatuur, beschikbaar bodemvocht en de

genetische eigenschappen van het gewas. Het tijdstip van in aar komen kan worden bepaald indien de duur van de verschillende gewasgroeistadia in de verschillende streken bekend zijn. Zo zal bijvoorbeeld een 80-daags gierstgewas in de kritieke fase van reproductie zijn ongeveer 7 weken na het 'spectrale uitkomen'. Voor een 100-daags sorghumgewas zal dit 9 weken zijn en voor een 110-daags aardnootgewas ongeveer 12 weken.
Men kan nu de gierstopbrengsten in ton per ha per district voor 1983 en 1984 grafisch uitzetten tegen de NVI-waarden op het moment van in aar komen (figuur 18-9). Na regressie-analyse kan men hieruit de opbrengst voor bijvoorbeeld 1985 voorspellen zodra de NVI-waarde voor het tijdstip van in aar komen bekend is. Dit betekent dat de *oogstvoorspelling* kan worden gedaan als het gewas nog in het veld staat en vaak is dit drie tot vier maanden voordat de officiële landbouwstatistieken door de lokale Ministeries van Landbouw worden gepubliceerd. Figuur 18-10 laat zien hoe de verhouding is tussen de oogstvoorspelling gebaseerd op satelliet-gegevens, gedaan in september 1985, en de officiële, geobserveerde oogststatistieken, die beschikbaar kwamen in het midden van 1986.

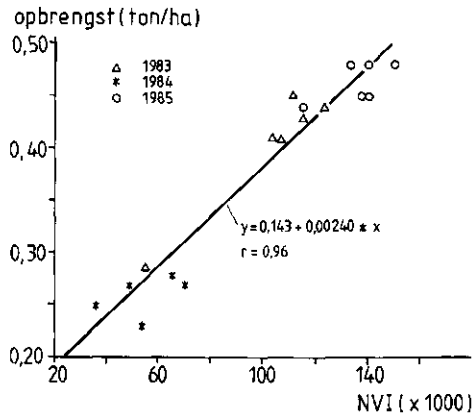



18-9 Regressie-analyse van de opbrengst tegen de NVI-waarden voor een gierstgewas in de Sahel in 1983 en 1984. r = correlatiecoëfficiënt.




18-10 Voorspelde tegen waargenomen gierstopbrengsten voor Soedan, Niger, Senegal en Burkina Faso in 1985. r = correlatiecoëfficiënt.

De ooststatistieken van 1986 maakten het mogelijk om NVI-oogstmodellen voor ieder land te ontwikkelen (zie figuur 18-11). Als er in de toekomst meer gegevens beschikbaar komen, kunnen hopelijk de modellen verbeterd worden door een betere stratificatie in gebieden met dezelfde agrometeorologische eigenschappen.




18-11 Regressie-analyse van de opbrengst tegen de NVI-waarden voor het gierst-gewas voor Niger, 1983-1985.

## 18.6 Conclusie

De vegetatie-index gebaseerd op NOAA/AVHRR-gegevens is een zeer bruikbare indicatie voor gewasgroeiomstandigheden en oogstvoorspellingen over grote gebieden. Het potentiële gebruik is het belangrijkst voor een vroegtijdige analyse van te verwachten voedseltekorten, vooral in gebieden waarvan niet veel bekend is. Er moet echter gezegd worden dat de indicatie afkomstig van de NVI gebruikt moet worden tezamen met informatie afkomstig uit andere bronnen, waaronder vooral de meteorologische gegevens. De centrale gedachte is dus convergentie van informatie.

## 18.7 Literatuur

1 Ambroziak, R., 1985. NOAA meteorological satellite applications for food security. NOAA/NESDIS/AISC.
2 Badhwar, G.D., 1980. Crop emergence date determination from spectral data. Photogram. Eng. Rem. Sens. 46: 369-377.
3 Badhwar, G.D., J.G. Carnes & W.W. Austin, 1982. Use of Landsat-derived temporal profiles for corn-soybean feature extraction and classification. Rem. Sens. Envir. 12: 57-79.
4 Dave, J.V., 1981. Influence of illumination and viewing geometry and atmospheric composition on the 'tasseled cap' transformation of Landsat MSS data. Rem. Sens. Envir. 11: 37-55.
5 Davis, P.A. & J.D. Tarpley, 1983. Estimation of shelter temperatures from operational satellite sounder data. Journal of climate and applied

meteorology 3: 369-376.
6 Dijk, A. van, S. Callis, C.M. Sakamoto & W.L. Decker, 1987. Smoothing vegetation index profiles: an alternative method for reducing radiometric disturbance in NOAA/AVHRR data. Photogram. Eng. Rem. Sens. 53(8): 1059-1067.
7 Griffith, C.G., J.A. Augustine & W.L. Woodley, 1981. Satellite rain estimation in the US High Plains. J. Appl. Meteor. 20(1): 53-66.
8 Griffith, C.G., W.L. Woodley, P.G. Grube, D.W. Martin, J. Stout & D.N. Sikdar, 1978. Rain estimation from geosynchronous satellite imagery – visible and infrared studies. Monthly Weather Review 106: 1153-1171.
9 Heilman, J.L. & D.G. Moore, 1982. Evaluating near surface soil moisture using heat capacity mapping mission data. Rem. Sens. Envir. 12: 117-121.
10 Idso, S.B., R.D. Jackson & R.J. Reginato, 1975. Estimating evaporation: a technique adaptable to remote sensing. Science 189: 991-992.
11 Jackson, R.D., S.B. Idso, R.J. Reginato & P.J. Pinter, Jr., 1980. Remote sensed crop temperatures and reflectances as inputs to irrigation scheduling. Proc. ASCE Speciality Conference, Boise, Idaho.
12 Kidwell, K.B., 1983. Global vegetation index user's guide. Satellite Data Services Division (SDSD), National Climatic Data Center (Unpublished manuscript).
13 Kollenkark, J.C., C.S.T. Daughtry, M.E. Bauer & T.L. Housley, 1982. Effects of cultural practices on agronomic and reflectance characteristics of soybean canopies. Agron. J. 74: 751-758.
14 Ranson, K.J., C.S.T. Daughtry, L.L. Biehl & M.E. Bauer, 1985. Sun and view angle effects on reflectance factors of corn canopies. Rem. Sens. Envir. 18: 147-161.
15 Reiniger, P., 1981. Development and tests of algorithms for the evaluation of evaporation and soil moisture from remotely sensed surface temperature and albedo. Final Report of the W.G. II. Tellus Newsletter No. 24, Ispra, Italy.
16 Richardson, A.J. & C.L. Wiegand, 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. Photogram. Eng. Rem. Sens. 43: 1541-1552.
17 Rouse, J.W., R.H. Haas, J. A. Schell & D.W. Deering, 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS Symposium, Vol. I.
18 Shibayama, M. & C.L. Wiegand, 1985. View azimuth and zenith, and solar angle effects on wheat canopy reflectance. Rem. Sens. Envir. 18: 91-103.
19 Sullivan, G.H., V. French, S.K. LeDuc, J.L. Sebaugh & W.W. Wilson, 1984. Evaluation of satellite derived estimates of solar radiation. Preliminary Report USDA/SRS, NOAA/AISC Columbia, Missouri.
20 Tarpley, J.D., 1979. Estimating incident solar radiation at the surface from geostationary satellite data. J. Appl. Meteor. 18: 1172-1181.

21 Thompson, D.A. & O.A. Wehmanen, 1979. Using Landsat digital data to detect moisture stress. Photogram. Eng. Rem. Sens. 45: 201-207.
22 Thompson, D.R. & O.A. Wehmanen, 1980. Using Landsat digital data to detect moisture stress in corn-soybean growing regions. Photogram. Eng. Rem. Sens. 46: 1087-1093.
23 Tucker, C.J., 1977. Use of near infrared/red radiance ratios for estimating vegetation biomass and physiological status. NASA/GSFC x -923-77-183. Houston, Texas.
24 Tucker, C.J., B.N. Holben, J.H. Elgin & J.E. McMurtrey, III, 1980. Relationship of spectral data to grain yield variation. Photogram. Eng. Rem. Sens. 46: 657-666.
25 Wiegand, C.L., A.J. Richardson & E.T. Kanemasu, 1979. Leaf area index estimates for wheat from Landsat and their implications for evapotranspiration and crop modelling. Agron. J. 71: 336-342.
26 Wiegand, C.L. & A.J. Richardson, 1984. Leaf area, light interception and yield estimates from spectral component analysis. Agron. J. 76, July-August.

Documentatie

# 19 Gewasclassificatie met radargegevens

P. Hoogeboom

## 19.1 Inleiding

Het classificeren en monitoren van de groei van landbouwgewassen met behulp van radarbeelden is geen eenvoudige opgave. De contrasten in één enkel beeld zijn vaak klein. De aanwezige spikkel maakt het onderscheiden van gewassen nog moeilijker. Een radarbeeld omvat altijd een zeker invalshoekbereik en voor gewassen is de radarverstrooiingscoëfficiënt $\gamma$ hoekafhankelijk. Ook als functie van de tijd blijkt de $\gamma$ geen constante te zijn. Tenslotte vormen de radiometrische nauwkeurigheid en de ijking van het systeem zelf vaak een probleem.
Ondanks deze problemen is radar toch een sensor die bij een juist gebruik veel waardevolle informatie kan opleveren. In dit hoofdstuk wordt uiteengezet hoe dit bereikt kan worden.
Achtereenvolgens wordt een aantal onderwerpen behandeld, die van groot belang zijn voor de *classificatie van gewassen* met behulp van radar. Ter illustratie worden resultaten getoond van een gewasclassificatie-project in de Flevopolder, met gebruikmaking van radarbeelden van het Nederlandse digitale SLAR-systeem (paragraaf 8.4).

## 19.2 Enkele eigenschappen van de radarreflectie van landbouwgewassen

Dankzij de vele scatterometermetingen (paragraaf 11.2.4) die o.a. in Nederland zijn uitgevoerd, is er thans veel bekend over de radarreflectie (verstrooiing of 'backscatter') van landbouwgewassen. In Nederland zijn deze metingen uitgevoerd op proefvelden gedurende een aantal seizoenen. De resultaten zijn practisch onmisbaar bij de keuze van optimale vluchttijdstippen en invalshoeken voor het radarsysteem. In Nederland is dit onderzoek vooral uitgevoerd in de X-band, d.w.z. voor een radargolflengte van 3,0 cm (frequentie is 10 GHz) van de scatterometer, en een radargolflengte van 3,2 cm (frequentie is 9,4 GHz)

van de Nederlandse digitale SLAR (zie tabel 8.2). De hier gepresenteerde eigenschappen van de $\gamma$ en de resultaten van het gewasclassificatie-onderzoek hebben op deze golflengte betrekking.
Voor meer gedetailleerde gegevens over de eigenschappen van de $\gamma$ wordt verwezen naar hoofdstuk 10. Hier wordt volstaan met het opsommen van enkele eigenschappen die van belang zijn voor het thans behandelde onderwerp.

### 19.2.1 Tijdsafhankelijkheid van de radarreflectie

Er zijn twee typen variaties te onderscheiden in de radarreflectie als functie van de *tijd*, namelijk kortstondige fluctuaties die veroorzaakt worden door voornamelijk *(bodem)vochtverschillen* (vooral in het begin van het groeiseizoen, als de bodem nog relatief weinig bedekking vertoont) en de geleidelijke ontwikkeling van $\gamma$ als functie van de tijd, ook wel aangeduid als de *temporele radarsignatuur* (paragraaf 10.2.3). Ieder gewastype vertoont een eigen specifieke signatuur, die echter wordt beïnvloed door externe parameters als zaaitijdstip en meteorologische omstandigheden. Van gebied tot gebied, van jaar tot jaar, en zelfs van veld tot veld kunnen hierdoor flinke afwijkingen ontstaan in de in hoofdstuk 10 gepresenteerde curves. Deze afwijkingen worden aangeduid met de term *ecologische ruis*.
Enkele opvallende verschijnselen in de spectrale signaturen zijn:

- De hoge en nagenoeg constante waarde van de $\gamma$ van suikerbieten (ca. 0 dB voor de X-band bij HH- of VV-polarisatie; figuren 10-5, 10-6 en 10-9); dit biedt perspectieven voor ijking en vergelijking met andere radarmetingen (beelden).
- Het contrast tussen de gewassen onderling in een radarbeeld is sterk afhankelijk van de gewassoorten en het opnametijdstip (zie bijv. figuren 10-5 en 10-6).
- Een bijzondere situatie doet zich voor bij de wintergranen. Dit is in de in hoofdstuk 10 getoonde curves niet te zien, omdat de scatterometerresultaten alleen betrekking hebben op zomergewassen. Aan het begin van het groeiseizoen, tot ongeveer half mei, staan de wintergranen reeds boven de grond, terwijl alle andere velden nog kaal zijn. De $\gamma$ van de graanvelden is dan beduidend groter dan die van de kale velden. Hiervan kan zeer goed gebruik gemaakt worden voor de gewasclassificatie. Het verschil in radarreflectie doet zich echter alleen voor bij scherende hoeken, en is daarom niet te zien in satellietradarbeelden.

### 19.2.2 Hoekafhankelijkheid van de radarreflectie

Indien voor bepaalde situaties het contrast tussen de te onderscheiden gewassen gering is, kan het zinvol zijn om gebruik te gaan maken van andere *invalshoeken*. Net als bij de tijdsafhankelijkheid is er ook hier sprake van per gewassoort verschillende curves. Echter, men kan de invalshoek niet altijd vrij kiezen. Bijvoorbeeld bij satellietsystemen ligt deze vast. Bij vliegtuigsystemen is er soms wat meer vrijheid (bijv. bij de Nederlandse SLAR) en dan kan met vrucht gebruik gemaakt worden van waarnemingen bij verschillende hoeken. Omdat er gedurende het korte tijdsverloop tussen de vluchten weinig verandert in het veld,

bieden de verschillen in radarreflectie een betrouwbare mogelijkheid om gewassen te classificeren.
Een nadeel van dezelfde hoekafhankelijkheid is, dat deze ook kan optreden binnen één radarbeeld. Dit is vooral het geval bij opnamen gemaakt vanuit vliegtuigen (SLAR) (vgl. o.a. paragraaf 10.2.1). Beelden die een groot invalshoekbereik omvatten, verdienen speciale aandacht met betrekking tot de hoekafhankelijkheid. Het beeld kan bijvoorbeeld opgedeeld worden in sectoren met een nagenoeg constante invalshoek. Of men zou een hoekafhankelijk classificatie-algoritme kunnen toepassen.
Opvallend is, dat suikerbieten een vrijwel constante $\gamma$ vertonen over een groot hoekbereik (figuur 10-5). Zoals reeds eerder bij de bespreking van de tijdsafhankelijkheid is opgemerkt, heeft dit gewas zeer gunstige eigenschappen voor ijkings- en referentiedoeleinden.

## 19.3 Enkele eigenschappen van radarbeelden

Ten opzichte van ander beeldmateriaal, bijvoorbeeld luchtfoto's, bezit een radarbeeld een aantal bijzondere eigenschappen, waarmee terdege rekening gehouden dient te worden. We zullen de belangrijkste opsommen, en deze vervolgens nader bespreken.

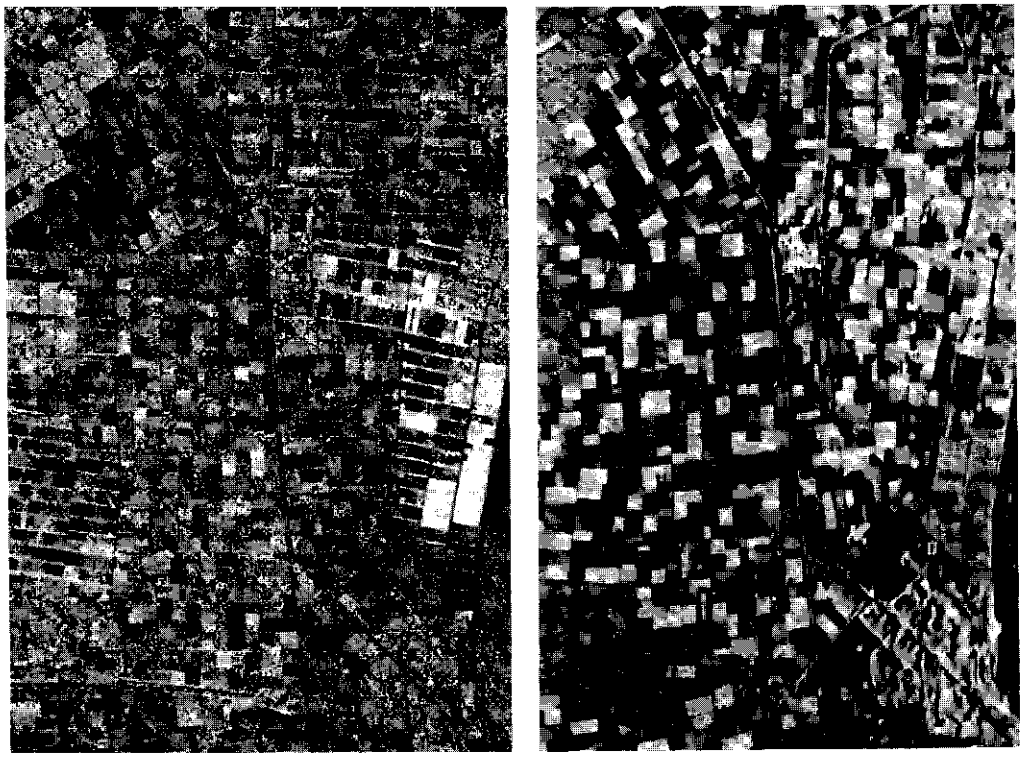
- Het geometrisch scheidend vermogen (ruimtelijke resolutie, paragraaf 3.4) in een radarbeeld is meestal niet in alle richtingen constant en variëert in SLAR-beelden ook nog met de plaats in het beeld.
- Beelden die op lage hoogte zijn opgenomen (in de praktijk betekent dit opnamen vanuit vliegtuigen), bezitten een sterke hoekafhankelijkheid. Dit moet niet verward worden met de gebrekkige manier waarop in sommige radarsystemen de meetwaarden gecorrigeerd worden voor invloeden van het antennepatroon (dit is een functie die de relatieve verdeling van energie, die een antenne uitzendt en ontvangt, beschrijft), de afstand, enz.
- Radarbeelden zijn behept met spikkel, een soort ruis die over het hele beeld aanwezig is; SAR-beelden vertonen dit effect doorgaans in sterkere mate dan SLAR-beelden (vgl. hoofdstuk 8).
- Aangezien radar een actieve afbeeldingsmethode is, is ijking van de opgenomen gegevens relatief eenvoudig te realiseren.

De verwerking van de radarbeelden dient aangepast te zijn aan de eigenschappen ervan. Ten aanzien van de hoekafhankelijkheid zijn in paragraaf 19.2.2 al enkele opmerkingen gemaakt. Beelden, die een slechte radiometrie vertonen, als gevolg van verkeerde of niet uitgevoerde systeemcorrecties zijn minder geschikt voor een classificatie zoals hier besproken. Soms kan er nog wel iets achteraf verbeterd worden door een statistische radiometrische balancering van het beeld. Behandeling hiervan valt buiten het bestek van dit boek. Het fenomeen spikkel wordt in paragraaf 19.3.1 kort nader toegelicht. De ijking en de invloed van het scheidend vermogen wordt hier slechts zijdelings behandeld.

Het geometrisch scheidend vermogen speelt vooral een rol bij het doen van areaalschattingen en in het geval van percelen met afmetingen die niet zeer groot zijn t.o.v. de ruimtelijke resolutie. Men dient te bedenken dat er in de beelden geen scherpe grenzen tussen velden optreden, maar altijd strookjes met mengpixels (mixels, zie ook paragraaf 4.5.1). Kleine velden zullen soms alleen maar uit mixels bestaan: een betrouwbaar classificatie- of areaalschattingsresultaat mag in dergelijke gevallen niet verwacht worden. Het kan verstandig zijn om in voorkomende gevallen rekening te houden met het geometrisch scheidend vermogen, door de breedte van de veldgrenzen aan te passen aan de ter plekke in het beeld geldende ruimtelijke resolutie.
De mogelijkheid van ijking is in de vorige paragraaf al even aan de orde geweest. In paragraaf 19.4 zal het nut ervan ook nog blijken. Alhoewel voor een simpele classificatie een ijking niet altijd nodig is, kan met name een vergelijking met grondmetingen en de toepassing van classificatieparameters op andere beelden alleen maar zinvol gebeuren, als er een of andere vorm van ijking is toegepast. Men onderscheidt *interne ijking* (inwendig in het radarsysteem) en *externe ijking*, met behulp van ijk-objecten (bijv. hoekreflectoren) of door vergelijking van uitkomsten met die van andere radarsystemen.

### 19.3.1 Reductie van de spikkel-invloed

Het begrip *spikkel* en de oorzaak ervan is reeds eerder in hoofdstuk 8 besproken. De sterkte waarmee de spikkel zich in een beeld manifesteert, wordt bepaald door het aantal onafhankelijke waarnemingen per pixel. In het algemeen gesproken, zijn conventionele radarsystemen (SLAR) hier in het voordeel ten opzichte van SAR-systemen. De eerstgenoemde hebben in de orde van 10 – 40 onafhankelijke waarnemingen per pixel, terwijl een SAR-systeem in principe maar één onafhankelijke waarneming per pixel doet. Door een zogenaamde *'multilook'*-techniek toe te passen (zie paragraaf 8.5), wordt dit aantal ten koste van de geometrische resolutie verhoogd tot 4 of meer. Voor visuele interpretatie is 4 voldoende, doch voor classificatie van de individuele pixels in klassen, waarvan de verschillen gering zijn, is dit volstrekt onbruikbaar (figuur 19-1, vgl. ook figuur 8-14).
Door het samennemen (middelen) van pixels kan, net als bij de multilook-techniek in SAR-beelden, de invloed van spikkel gereduceerd worden. Het aantal onafhankelijke waarnemingen, dat dient te worden samengenomen is vrij groot. Voor een betrouwbaarheidsinterval van 0,25 dB zijn al zo'n 300 onafhankelijke waarnemingen nodig! Teneinde niet gehinderd te worden door een verslechterd geometrisch scheidend vermogen, kan het beste gekozen worden voor middeling van pixels uitsluitend binnen de perceelsgrenzen, oftewel voor het bepalen van *veldgemiddelden*. Dit heeft als bijkomend voordeel, dat kleine inhomogeniteiten in de velden weinig invloed op het classificatieresultaat hebben. De dataset (radarbeelden) wordt door deze methode toe te passen gereduceerd tot een veel kleinere set van getallen (veldgemiddelden). Dit bespaart veel rekentijd bij de uiteindelijke classificatie.



19-1 Voorbeeld van een 4-look SAR (Seasat, links) en een 30-look SLAR opname (zie ook figuur 8-14).

## 19.4 Aanpak van het classificatieprobleem bij radar

Uit de tijds- en hoekafhankelijkheid hebben we kunnen zien, dat de mogelijkheden voor classificatie beter worden als we in plaats van één vlucht over het meetgebied meerdere vluchten maken. Dit kan snel achter elkaar zijn, waarbij dan de invalshoek veranderd wordt, of verdeeld over het seizoen op de meest gunstige tijdstippen, bepaald aan de hand van de temporele signaturen van de te classificeren gewassen. We krijgen nu de beschikking over een meerdimensionale dataset. Hierop dient eerst een aantal voorbewerkingen plaats te vinden, namelijk:

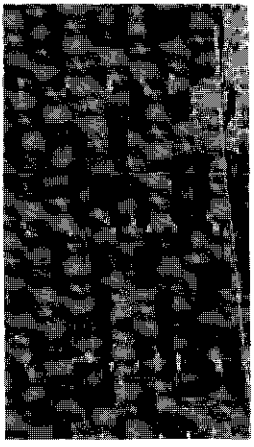
- Het geometrisch corrigeren en op dezelfde schaal brengen van de gegevens (beelden). De keuze van de schaal zelf is min of meer arbitrair, men kan een (gewas)kaart kiezen of één van de radarbeelden zelf als uitgangspunt kiezen (zie ook hoofdstuk 16).
- IJking van de beelden. Zoals reeds eerder besproken is het niet gewenst om met willekeurige grijswaarden te werken maar deze uit te drukken in de $\gamma$, zodat een absolute vergelijking van de beelden kan plaatsvinden. Bovendien kan een uit het beeld afgeleide $\gamma$ vergeleken worden met de database van grondwaarnemingen, en zijn de

classificatieparameters in principe ongewijzigd overdraagbaar naar andere datasets.
- Segmentatie van de beelden (hoofdstuk 14, paragraaf 14.5). Hiermee wordt bedoeld het achtereenvolgens bepalen van de veldgrenzen, berekenen van de gemiddelde $\gamma$ per veld en labelen van de gevonden componenten (velden) in het beeld. Het resultaat is een lijst van veldgemiddelden en een bijbehorende plattegrond, voorzien van een corresponderende nummering.

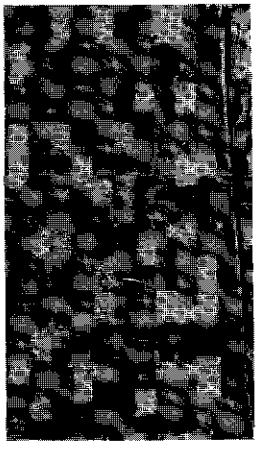
Van deze voorbewerkingen is de segmentatie het meest omvangrijk. Het aangeven van de veldgrenzen moest aanvankelijk met de hand gebeuren, maar er zijn tegenwoordig ook algoritmen beschikbaar, die automatisch de veldgrenzen bepalen. Ook worden thans onderzoekingen gedaan naar de manier waarop *voorkennis*, zoals een percelenkaart of een topografische kaart, kan worden gecombineerd met het beeld ten behoeve van de classificatieprocedure. De overige bewerkingen kunnen vervolgens op eenvoudige wijze door een computer worden verricht.

### 19.4.1 Resultaten van een gewas-classificatie-studie in Oost-Flevoland op basis van een meer-dimensionale dataset

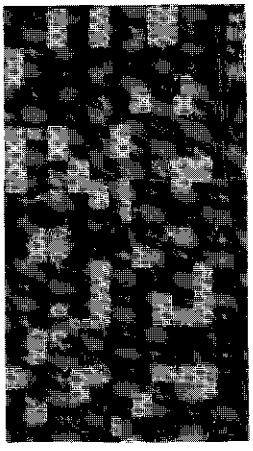
In een proefgebied van ca. 3,7 bij 6,2 km in de Flevopolder nabij Biddinghuizen is al veel onderzoek naar gewasclassificatie-mogelijkheden verricht. In de hier beschreven studie is dit gebied gedurende het groeiseizoen met de Nederlandse digitale SLAR 5 maal opgenomen, namelijk in de tweede helft van april en in de eerste helft van mei, juni, juli en augustus 1980. Op elk van deze tijdstippen is een opname gemaakt in een hoekbereik van 16 – 7,5 graden (met de horizontaal). Van de juli-vlucht is bovendien een opname van 35 – 18 graden voorhanden (de vlucht juli hoog). In figuur 19-2 zijn enkele van de beelden weergegeven, en wordt (op een andere schaal) een kaart van het gebied getoond. Deze beelden zijn vervolgens op dezelfde schaal gebracht en relatief geijkt. Daarbij is het gewas suikerbieten als referentie gekozen.
Na segmentatie van het beeld, welke hier niet verder wordt behandeld, hebben we per veld de beschikking over de gemiddelde radarreflectie van ieder vluchtresultaat. Aan deze gegevens is nog toegevoegd wat er in werkelijkheid op de velden is verbouwd. Zodoende kan in dit experiment steeds een directe controle op de classificatie-resultaten plaatsvinden. Per veld zijn er nu 6 meetwaarden (kenmerken) en het zogenaamde 'true label' aanwezig. De classificatie zou in een zes-dimensionale kenmerkruimte moeten geschieden. Dit kan weliswaar, maar het is niet erg inzichtelijk. Daarom wordt dikwijls toevlucht genomen tot methoden, waarmee het belang van elk van de kenmerken kan worden onderscheiden. Daarna wordt de classificatie beperkt tot de belangrijkste kenmerken. Ook kan men een nieuw stelsel kenmerken introduceren, die afgeleid zijn uit de oude, maar die mathematisch-statistisch gezien orthogonaal, dus onafhankelijk zijn. Ook hierbij is de doelstelling het beperken van het aantal dimensies van de kenmerkruimte, zodat de classificatie eenvoudiger en aanschouwelijker wordt. Deze methoden staan bekend onder de naam



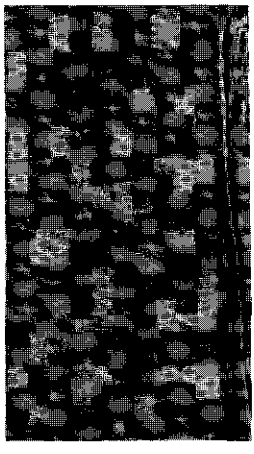
7/5/80



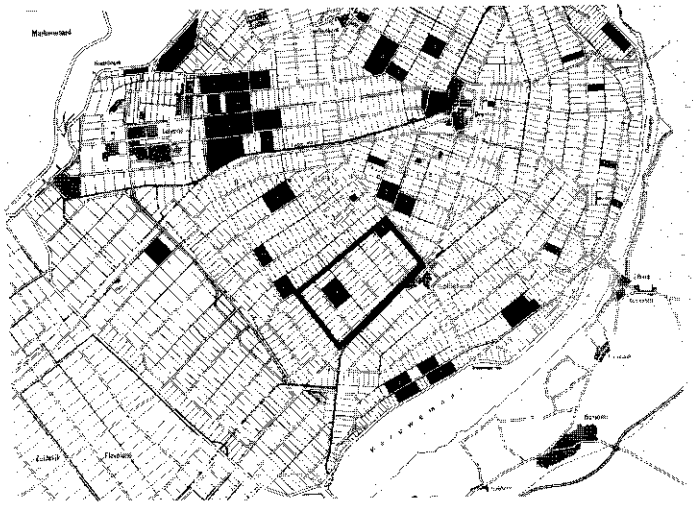
11/7/80 laag



11/7/80 hoog

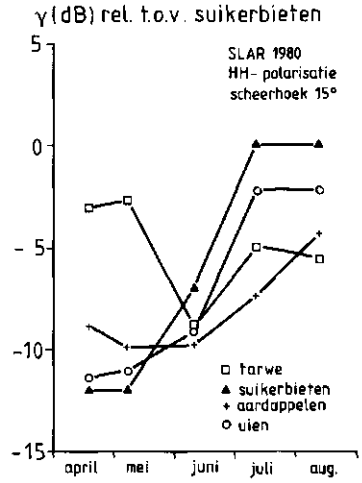


12/8/80

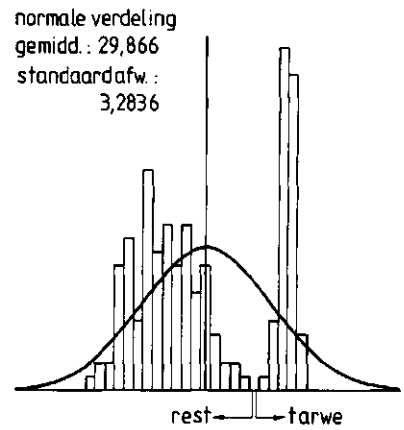


**19-2** Het proefgebied en enkele van de opgenomen radarbeelden.

*hoofdcomponenten-analyse* en berusten op het gebruik van eigenwaardevectoren, welke worden bepaald uit de covariantiematrix van de dataset. De hoofdcomponenten-analyse is kort toegelicht in Supplement 10 (zie ook Buiten, 1986, hoofdstuk 13).
Hoewel de resultaten van deze studie op de hoofdcomponenten-analyse berusten, is het resultaat ten dele ook inzichtelijk wel te verklaren. In figuur 19-3 is de ontwikkeling van de $\gamma$ als functie van de tijd weergegeven. Dit is een resultaat van de met de SLAR gemeten dataset. Duidelijk is hierin te zien dat het contrast tussen wintertarwe en andere (zomer)gewassen in mei optimaal is. Het histogram van de mei-vlucht in figuur 19-4 laat zelfs zien, dat de tarwe volledig gescheiden ligt van de andere gewassen. Door een simpele drempeling (paragraaf 14.5) toe te

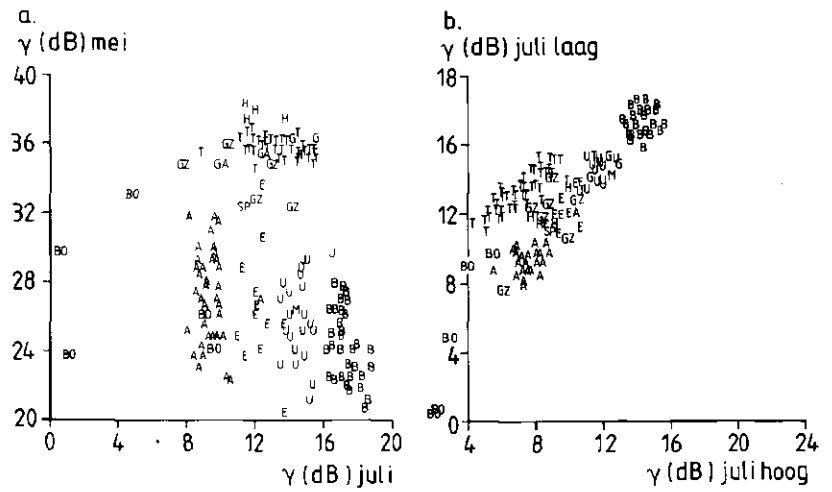



19-3 De ontwikkeling van de radarreflectie als functie van de tijd.




19-4 Een histogram van het mei-beeld.

passen, kan de tarwe reeds in mei goed geclassificeerd worden.
De resterende gewassen blijken in juli het grootste contrast op te leveren. Met name door gebruik te maken van een combinatie van de twee kenmerken in juli (onder verschillende hoeken opgenomen t.g.v. een verschil in vlieghoogte) wordt een zeer goede classificatie verkregen. Figuur 19-5 toont twee zogenaamde 'feature space plots', dit zijn grafische presentaties van telkens 2 kenmerken die tegen elkaar uitgezet worden. In figuur 19-5a is mei tegen juli (de kleine hoeken) uitgezet. Hier blijkt nog eens duidelijk, dat de tarwe (T) gescheiden ligt van alle andere gewassen. In figuur 19-5b zijn de twee juli-kenmerken gebruikt (kleine en grotere hoeken). Hier zijn een aantal andere belangrijke gewassen redelijk van elkaar te onderscheiden, namelijk suikerbieten (B), aardappelen (A), erwten (E) en uien (U).
De hoofdcomponenten-analyse gaf in dit geval aan, dat een classificatie in een tweedimensionale kenmerkruimte optimaal zou zijn. De eerste dimensie viel practisch samen met de data van de mei-vlucht. De tweede



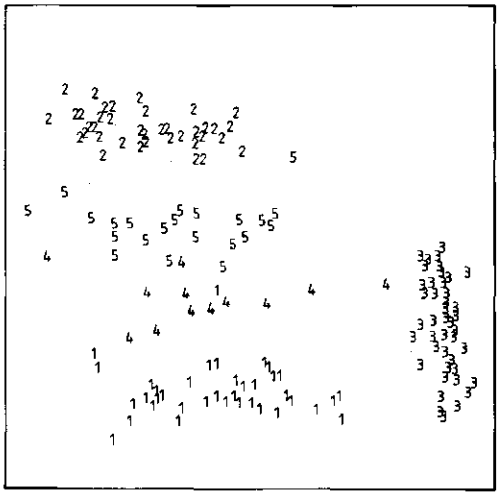

19-5 'Feature space plots' ofwel datapresentaties in de kenmerkruimte.
- a mei uitgezet tegen juli (beide laag).
- b juli-laag uitgezet tegen juli-hoog.

Verklaring van de labels:

| fig. 19-5 | fig. 19-6 | gewas |
|---|---|---|
| A | 1 | aardappelen |
| B | 2 | suikerbieten |
| T | 3 | wintertarwe |
| E | 4 | erwten |
| U | 5 | uien |
| H | 6 | haver |
| GR | 7 | gerst |
| BO | 8 | bonen |
| GZ | 9 | graszaad |
| SP | 10 | spinazie |

dimensie werd gevormd door een lineaire combinatie van de twee juli-vluchten. In figuur 19-6 is deze twee-dimensionale kenmerkruimte weergegeven en is bovendien het classificatie-resultaat in tabelvorm opgenomen. De ontworpen classificator werd geoptimaliseerd voor de eerste 5 klassen. Uit de tabel blijkt dat het resultaat voor deze 5 klassen zeer goed is. Slechts enkele van de velden belanden in een verkeerde klasse. Wel moet men zich hierbij bedenken dat in een experiment als dit, het ontwerpen van de classificator en het uitvoeren van de classificatie op *dezelfde dataset* is gebeurd. De resultaten zouden daardoor te optimistisch kunnen zijn. Om de resultaten van de classificatie-tabel wat realistischer te maken werd daarom de testset bepaald uit een automatische segmentatie van de beelden (zie voor deze methodiek paragraaf 14.5 en ook Kleijweg, 1988); daarentegen werd de classificator ontworpen met behulp van de leerset die door handmatige segmentatie werd verkregen. Deze beide werkwijzen leveren enigszins verschillende segmentatie-resultaten op, waardoor tot op zekere hoogte

a.



b.

| | | CLASSIFIER LABEL | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| TRUE LABEL | 1 | 33 | | 1 | 1 | | | | |
| | 2 | | 36 | | | | | | |
| | 3 | | | 53 | | | | | |
| | 4 | 1 | | 1 | 5 | 1 | | | |
| | 5 | 2 | | | 1 | 11 | | | |
| | 6 | | | 3 | | | 1 | | |
| | 7 | | | 3 | | | | | |
| | 8 | 1 | | | | | | | 4 |
| | 9 | | | 3 | 1 | 1 | | | |
| | 10 | | | | 1 | | | | |

**19-6** Het classificatie-resultaat:
(a) de kenmerkruimte van de leerset (handgesegmenteerd)
(b) de classificatietabel voor de testset (gebaseerd op dezelfde radarbeelden, maar dan automatisch in plaats van handmatig gesegmenteerd). Voor een verklaring van de labels zie fig. 19-5.

de leerset en de testset onafhankelijk zijn.
Bovendien is er geen rekening gehouden met de hoekafhankelijkheid van de gewassen, waardoor de grenzen van de klassen onnodig ruim worden. Aangezien deze zaken elkaar compenseren, mag verwacht worden dat voor een werkelijk operationele toepassing van radar-classificatie van landbouwgewassen goede mogelijkheden bestaan. Het zal duidelijk zijn, dat de areaalschatting als vervolg op de classificatie eenvoudig uitgevoerd kan worden. Tenminste, zolang de vraag niet verder gaat dan het per gewastype bebouwde oppervlak. De voorspelling van oogstopbrengst is een andere kwestie, die momenteel nog volop onderzocht wordt.

### 19.4.2 Resultaat van een gewas-classificatie op basis van een monotemporele radaropname

Een fraaie illustratie van een gewasclassificatie, gebaseerd op een monotemporele X-band SLAR radaropname die werd uitgevoerd op twee verschillende vlieghoogten op 19 juli 1984 in hetzelfde gebied van Oost-Flevoland, wordt getoond in Plaat III (Binnenkade, 1987). De vijf weergegeven gewasklassen zijn duidelijk als afzonderlijke landbouwvelden te onderscheiden. De veldbegrenzingen zijn evenwel nog wat rafelig. Door inbreng van voorkennis in de vorm van topografische perceelsgrenzen zou dit (zoals al werd opgemerkt in de inleiding van paragraaf 19.4) 'opgeschoond' kunnen worden, waardoor ook het classificatieresultaat tot een nog hoger percentage stijgt.
Uit de vorige paragraaf zal het duidelijk zijn dat van een verhoging van het classificatie-resultaat des te meer sprake zal zijn als een

gewasclassificatie wordt gebaseerd op een meerdimensionale dataset waarin naast verschillende inkijkhoeken ook meerdere opnametijdstippen zijn betrokken, met andere woorden een multitemporele aanpak.

## 19.5 Toekomstperspectieven

Naar verwachting zal eind 1990 de ERS-1 satelliet worden gelanceerd (zie ook Supplement 7). De radarbeelden, afkomstig van een dergelijk systeem, komen regelmatig en over grote gebieden beschikbaar. Door combinatie met automatische verwerkingstechnieken en inbreng van a-priori kennis kunnen GIS-bestanden worden opgebouwd en voortdurend worden aangepast met de jongste gegevens over landbouwgewassen, zodat behalve van soortclassificatie ook sprake kan zijn van monitoring van de ontwikkeling van gewassen.
In de radartechniek wordt gewerkt aan de ontwikkeling van de polarimetrie. Door gebruik te maken van de polarisatie-afhankelijkheid van het echosignaal met betrekking tot de aard van het object, kan meer informatie over een waargenomen gebied verkregen worden. Deze ontwikkeling biedt, evenals het gelijktijdig gebruik maken van meerdere radarfrequenties, nieuwe mogelijkheden voor de radar remote sensing van gewassen.

## 19.6 Literatuur

1 Binnenkade P., H.W.J. van Kasteren & D. Uenk, 1987. Classificatie van landbouwgewassen met radar; radarvluchten 1983 en 1984 in Groningen, Oostelijk Flevoland en West-Brabant. Rapport Beleidscommissie Remote Sensing, BCRS-87-17.
2 Buiten, H.J., 1986. Teledetectie, deel 2 (remote sensing, informatieverwerking). Collegedictaat 1986, vakgroep Landmeetkunde en Teledetectie LUW; CM-0619-1510.
3 Gerbrands, J.J. & E. Backer, 1983. Segmentation of multitemporal side-looking airborne radar (SLAR) images. Proceedings SPIE volume 397: 173-179. (Geneva, April 19 – 22) Applications of digital image processing.
4 Gerbrands, J.J., 1986. Inleiding in de digitale beeldverwerking. Collegedictaat Technische Universiteit Delft, Faculteit der Elektrotechniek, 141 blz.
5 Hoogeboom, P., 1983. Classification of agricultural crops in radar images. IEEE Trans. Geosci. and RS, vol. GE-21: 329-336.
6 Hoogeboom, P., 1985. Optimization of agricultural crop identification in SLAR images: hierarchic classification and texture analysis. Proceedings EARSeL Workshop 'Microwave remote sensing applied to vegetation', Amsterdam 10-12 dec. 1984, ESA SP-227.
7 Kleijweg, J.C.M., 1988. Segmentatie van SLAR-beelden met gebruikmaking van a-priori kennis. FEL-TNO, Den Haag. Ook verschenen als rapport van de Beleids Commissie Remote Sensing,

BCRS-89-03.
8 Leeuwen, P.J. van, 1984. Analyse van SLAR beelden. Vakgroep informatietheorie, TU Delft.
9 Smit, M.K., 1979. Preliminary results of an investigation into the potential of applying X-band SLR-images for croptype inventory purposes. IEEE Trans. Geosci. Electron., vol. GE-17: 303-308.

Documentatie

# 20 Toepassing van remote sensing in de landbouw-waterhuishouding

G.J.A. Nieuwenhuis

## 20.1 Inleiding

Door de reflectie van zonlicht te meten in meerdere banden van het electromagnetisch spectrum kan informatie worden verkregen over o.a. het bodemgebruik. *Thermografische technieken* zijn vooral van belang voor de bepaling van *bodemvochtomstandigheden*. Bij deze techniek wordt de warmteuitstraling (emissie) van objecten aan het aardoppervlak waargenomen (zie paragraaf 2.3.1). De uitgezonden stralingsenergie wordt voornamelijk bepaald door de temperatuur. Uit de *temperatuurverdeling* aan het aardoppervlak op bepaalde tijdstippen en uit het *temperatuurverloop* kan informatie worden verkregen over bodemvocht en informatie gerelateerd aan bodemtype en geologische structuren (Kahle, 1977; Menenti, 1984; Pratt & Ellyet, 1979; Rosema & Bijleveld, 1977; Soer, 1980).
Voor een kwantitatieve analyse van *warmtebeelden* is aanvullende informatie onontbeerlijk. Voor dit doel kunnen veldwaarnemingen en simulatiemodellen worden toegepast. De basis van alle modelbenaderingen, zowel voor kale grond als voor vegetatiedekken, is de *energiebalans aan het aardoppervlak*. Uitgaande van de energiebalans worden relaties afgeleid tussen de oppervlaktetemperatuur en processen aan het aardoppervlak.
In de komende paragraaf wordt ingegaan op de fysische betekenis van de oppervlaktetemperatuur. Vervolgens worden enkele resultaten gepresenteerd die zijn verkregen in het kader van het 'Remote Sensing Studieproject Oost-Gelderland' (Projectteam Remote Sensing Studieproject Oost-Gelderland, 1985). Ten slotte wordt ingegaan op de perspectieven van vliegtuig- en satelliet-RS.

## 20.2 Fysische betekenis van de oppervlaktetemperatuur

20.2.1 De oppervlakte-temperatuur in relatie tot de verdamping

Door het opstellen van een energiebalans aan het aardoppervlak kan een relatie tussen de *oppervlaktetemperatuur* en de *verdamping* worden afgeleid. Zoals gezegd in de inleiding, kan men bij het woord 'oppervlakte' zowel denken aan kale bodems als aan vegetatiedekken. Aan het aardoppervlak is de netto straling (bestralingssterkte; vgl. paragraaf 3.3) ($R_n$) gelijk aan de som van de verdamping ofwel latente (verdampings-)warmtestroom ($LE_t$), de warmteuitwisseling tussen het aardoppervlak en de atmosfeer (H) en de warmtestroom vanuit of naar de bodem (G):

$$R_n = LE_t + H + G \quad (Wm^{-2}) \tag{20.1}$$

met L = latente verdampingswarmte van water ($Jkg^{-1}$)
$E_t$ = verdampingsstroom ($kgm^{-2}s^{-1}$).

Verschillende onderzoekers leidden uitgaande van de energiebalans een relatie af tussen de bodem- of gewas-oppervlaktetemperatuur $T_s$ (in Kelvin) en $E_t$ (Brown & Rosenberg, 1973; Stone & Horton, 1974; Soer, 1980):

$$LE_t = \left[(1-\rho)R_s + \varepsilon(R_l - \sigma T_s^4)\right] - \left[\rho_l c_p \frac{T_s - T_a}{r_a}\right] - G\,(Wm^{-2}) \tag{20.2}$$

met $\rho_l$ = dichtheid van de lucht ($kgm^{-3}$)
$c_p$ = soortelijke warmte van lucht bij constante druk ($Jkg^{-1}K^{-1}$)
$T_a$ = luchttemperatuur (K)
$r_a$ = atmosferische weerstand ($sm^{-1}$)
$\rho$ = reflectiecoëfficiënt
$R_s$ = kortgolvige bestralingssterkte (<3,5 μm) ($Wm^{-2}$)
$\varepsilon$ = emissiecoëfficiënt
$R_l$ = langgolvige bestralingssterkte (>3,5 μm)($Wm^{-2}$)
$\sigma$ = constante van Stefan-Boltzmann ($5{,}67 \cdot 10^{-8}$ $Wm^{-2}K^{-4}$).

Uit vergelijking (20.2) blijkt dat $LE_t$ behalve van $T_s$ afhangt van een aantal meteorologische grootheden ($T_a$, $R_s$, $R_l$ en $r_a$) en een aantal gewas- en bodem-afhankelijke factoren ($\rho$, $\varepsilon$, $r_a$ en G). De atmosferische weerstand $r_a$ kan worden gezien als een functie van zowel de windsnelheid als de oppervlakte-ruwheid.
Met vergelijking (20.2) worden verdampingswaarden verkregen op het opnametijdstip. De *dagverdamping* kan worden bepaald uit de momentane waarde door het *simuleren* van het warmte- en watertransport in het bodem-plant-atmosfeer-systeem.

20.2.2 Verdamping voor een vegetatiedek

Voor de vertaling van oppervlaktetemperaturen in dagverdampingswaarden in relatie tot de bodemvochtomstandigheden ontwikkelde Soer (1977) het *TERGRA-model*. De methode ontwikkeld

door Soer is echter tamelijk ingewikkeld vanwege het grote aantal invoerparameters dat vereist is. Nieuwenhuis et al. (1985) leidden uit de methode van Jackson et al. (1977) een sterk vereenvoudigde methode af. Zij stelden voor om per gewas(klasse) *temperatuurverschillen*, afgeleid uit warmtebeelden en behorende bij het opname-moment i, direct te koppelen aan *verschillen in dagverdamping*. De werkelijke 24-uurs verdamping van een gewas wordt dan:

$$E_t^{24} = E_{tp}^{24} - B'(T_c - T_c^*)_i \ (\text{mm dag}^{-1}) \qquad (20.3)$$

waarin $E_t^{24}$ en $E_{tp}^{24}$ respectievelijk de werkelijke (actuele) en de potentiële verdamping (mm $dag^{-1}$) van een bepaald gewas zijn, $T_c$ en $T_c^*$(K) de gewastemperaturen in de werkelijke resp. in de potentieel verdampende situatie en afgeleid uit het warmtebeeld, en B' een ijkconstante (mm $dag^{-1}$ $K^{-1}$).
Resultaten verkregen met het TERGRA-model wijzen er op, dat de ijkconstante minder afhankelijk is van de weersomstandigheden op de vluchtdag indien in plaats van met verschillen in verdamping met *relatieve dagverdampingswaarden* wordt gewerkt (Thunnissen, 1984b). Vergelijking (20.3) wordt dan vervangen door:

$$\frac{E_t^{24}}{E_{tp}^{24}} = 1 - B^r \cdot (T_c - T_c^*)_i \qquad (-) \qquad (20.4)$$

De nieuwe ijkconstante $B^r$ ($K^{-1}$) is dan gelijk aan $B'/E_{tp}^{24}$.

RS-vluchten, die worden uitgevoerd voor het vaststellen van *droogteschade*, vinden gewoonlijk plaats midden overdag op zonnige dagen. Uit berekeningen met het TERGRA-model is gebleken dat onder die omstandigheden de invloed van de bestralingssterkte, de luchtvochtigheid en de luchttemperatuur op $B^r$ verwaarloosbaar is (Thunnissen, 1984b) en de waarde van $B^r$ dan wordt bepaald door de windsnelheid en de gewasruwheid. Voor een aantal gewassen zijn relaties ontwikkeld tussen $B^r$ en de windsnelheid, waarmee warmtebeelden via een eenvoudige bewerking kunnen worden omgezet in kaarten met 24-uurs verdampingswaarden. Enkele karakteristieke waarden voor $B^r$ bij een windsnelheid van 3 $ms^{-1}$ staan in tabel 20.1.

### 20.2.3 Verdamping kale grond

Vergelijking (20.2) kan ook worden toegepast voor kale grond. Er zijn echter een drietal belangrijke verschillen tussen de verdamping van een gewasdek en die van een kale grond:

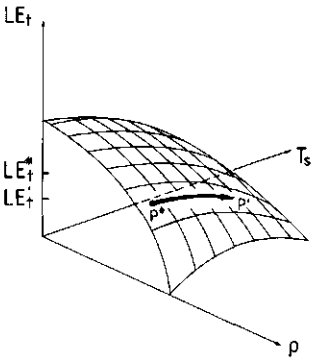
- De verhouding $E_t/E_{tp}$ is in het algemeen voor kale grond aanzienlijk lager dan voor een vegetatiedek.
- De bodemwarmtestroom G is daarentegen in het algemeen aanzienlijk groter. Voor een juiste interpretatie van de oppervlaktetemperatuur verdient de bepaling van G dan ook bijzondere aandacht. Menenti (1984) ontwikkelde hiervoor de zgn. 'thermal admittance' benadering.

Tabel 20.1 Enkele karakteristieke waarden van de ijkconstante $B^r$ ($K^{-1}$) in formule (20.4) voor verschillende gewassen bij een windsnelheid van 3 $ms^{-1}$ gemeten op 2 m hoogte boven het maaiveld van een vlak en open terrein

| gewas | specifikatie | $B^r$ |
|---|---|---|
| volgroeide mais | (bij relatieve dagverdamping >57%) | 0,24 |
| hoog grasland | (>15 cm) | 0,11 |
| middelhoog grasland | (10-15 cm) | 0,08 |
| laag grasland | (<10 cm) | 0,07 |

- De reflectiecoëfficiënt kan voor kale grond sterk variëren. Van de variabelen die de verdamping bepalen kunnen de reflectiecoëfficiënt ρ en de oppervlaktetemperatuur $T_s$ uit RS-opnamen worden afgeleid.

Menenti (1980, 1984) trachtte dan ook deze twee variabelen te correleren met de verdamping. Figuur 20-1 toont een grafische presentatie. Meer betrouwbare resultaten worden verkregen indien in aansluiting op een RS-vlucht referentiemetingen van ρ, $T_s$ en $LE_t$ worden uitgevoerd.

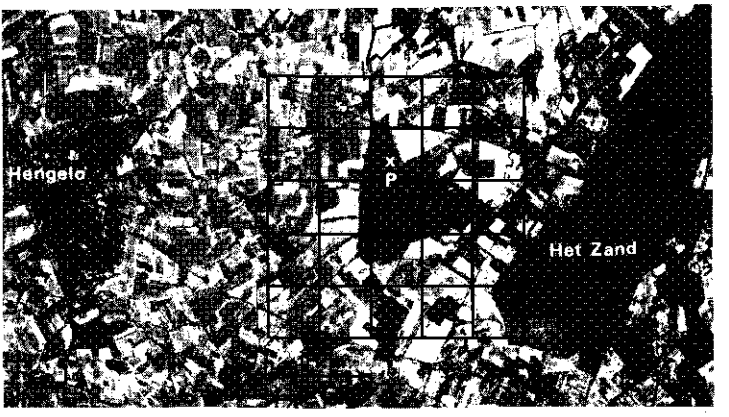



20-1 Relatie tussen verdamping ($LE_t$), oppervlaktetemperatuur ($T_s$) en reflectiecoëfficiënt (ρ) (bron: Menenti, 1980, 1984); P*P' is een voorbeeld van een relatie tussen $LE_t$ en $T_s$ voor een bepaalde waarde van ρ.

## 20.3 Ervaring met verdampingskartering in Oost-Gelderland

In het kader van het 'Remote Sensing Studieproject Oost-Gelderland' (Projectteam Remote Sensing Studieproject Oost-Gelderland, 1985) is de methodiek van *verdampingskartering* aan de hand van RS-opnamen ontwikkeld en in de praktijk getoetst. De methode is er op gebaseerd dat eerst een gewaskartering wordt uitgevoerd aan de hand van digitaal opgenomen reflectiebeelden (zie Plaat IV). Vervolgens worden per gewas (klasse) de uit het warmtebeeld afgeleide temperaturen (zie Plaat V) met de in formule (20.4) getoonde relatie vertaald in verdampingswaarden. De resultaten van een dergelijke kartering worden getoond in Plaat VI.

Voor 30 juli 1982 betreft het de verdampingssituatie na een extreem droge periode. Voor 17 juli 1983 wordt de situatie weergegeven na een minder extreem droge periode. Binnen sommige veldeenheden zijn op beide tijdstippen gelijksoortige patronen te zien ondanks het verschil in grootte van de relatieve dagverdamping. De patronen kunnen wijzen op lokaal bepaalde eigenschappen van de bodem. De verwerking kan worden uitgevoerd op standaard RS-beeldverwerkingsapparatuur. Aan de hand van een voorbeeld worden de toepassingsmogelijkheden van uit RS-opnamen afgeleide verdampingskaarten besproken.

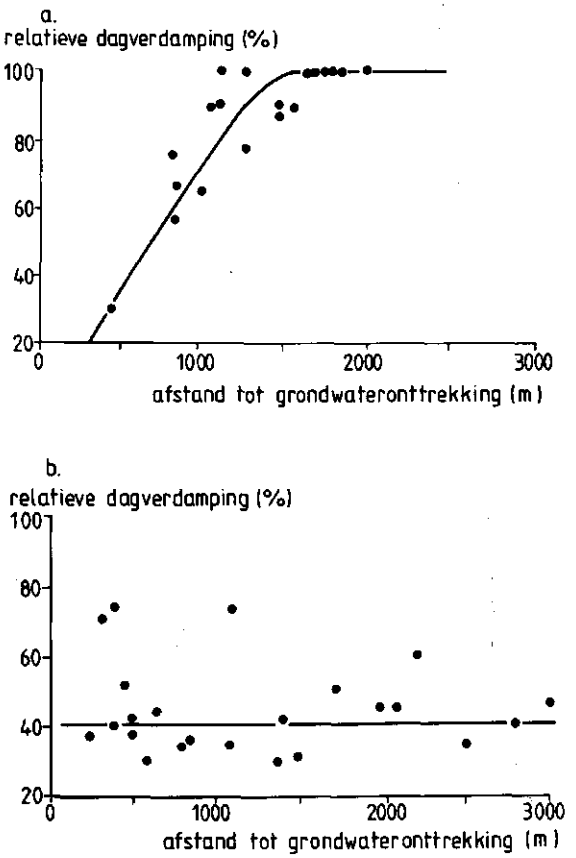



**20-2** Verdampingskaart van het onderzoeksgebied, dat is gelegen in de omgeving van het pompstation 't Klooster (P) bij Hengelo (Gld). De kaart is verkregen door automatische verwerking op het RESEDA-systeem van digitale reflectie- en warmtebeelden, die zijn opgenomen op 30 juli 1982 om 12.00 MET. De roostercel-schematisering toegepast in het hydrologisch model GELGAM is aangegeven. De gewasverdamping neemt af van potentiële verdamping (donker grijs) tot een niveau van ongeveer 30% van de potentiële waarde (wit). Zwart betekent: niet gekarteerd.

Figuur 20-2 toont de verdampingskaart voor 30 juli 1982 in zwart-wit uitvoering; hier overheen is de schematisering aangegeven die is toegepast in het *hydrologisch model* GELGAM (de Laat & Awater, 1978; de Laat, 1980). Met dit model kan per roostercel (zie figuur 20-2) de verdamping van gewassen gedurende het gehele groeiseizoen worden gesimuleerd. De grootte van de roostercel is ter keuze, maar hoe fijner de cellen worden gekozen, des te meer rekenwerk en detaillering van invoergegevens vergt het. Dit hydrologisch model dat per roostercel slechts een gemiddelde waarde kan geven, moet als een benadering worden gezien van de veel meer gedetailleerde variatie die met de verdampingskaart van figuur 20-2 en van Plaat VI wordt getoond. Aangetoond is dat RS op deze wijze een belangrijk hulpmiddel is voor de controle van resultaten verkregen met en voor de ijking van hydrologische modellen (Thunnissen, 1984a).
Aan de hand van de verdampingskaart in figuur 20-2 en van Plaat VI zijn de effecten van de grondwaterwinning door het pompstation 't Klooster bestudeerd. Ondanks het concentrisch verlagingspatroon van

de grondwaterstand rond het pompstation zijn geen daarmee overeenkomende verdrogingspatronen zichtbaar. De verdampingskaart toont echter wel dat in de directe omgeving van het pompstation sterke verdroging optreedt, die vermoedelijk voor een groot deel wordt veroorzaakt door de grondwateronttrekking. Op grotere afstand van het pompstation komt verdroging voor in een onregelmatig patroon. Hier kan de verdroging echter niet zonder meer aan de invloed van de onttrekking op de vochtleverantie van de bodem worden toegeschreven. De verdroging in het gebied gelegen in het verlengde van het natuurgebied 'Het Zand' in zuidwestelijke richting wordt bijvoorbeeld veroorzaakt door de aanwezigheid van sterk droogtegevoelige gronden (vaaggronden). Ten westen van het pompstation 't Klooster blijft de verdroging beperkt door de aanwezigheid van minder droogtegevoelige gronden (laaggelegen beekeerd- en podzolgronden). Bovendien wordt hier op uitgebreide schaal beregening toegepast. Als gevolg van deze factoren hebben de verdrogingspatronen op de verdampingskaart een grillige vorm.
Bij meer systematische studie van de verdamping op 30 juli 1982 per gewassoort, bodemtype en grondwatertrap blijkt, dat voor een aantal bodemtypen en grondwatertrappen er een duidelijke afneming van de verdamping van gras en mais wordt waargenomen naarmate de afstand tot de onttrekking geringer en derhalve de verlaging van de grondwaterstand groter wordt.
Figuur 20-3a toont dat de verdamping van gras op een podzolgrond met een zogenaamde grondwatertrap V afneemt in de richting van het pompstation. Bij een afstand tot de onttrekking van meer dan ongeveer 1300 m heeft de grondwaterwinning geen waarneembare invloed meer op de verlaging. Bovendien is dan door capillaire nalevering vanuit het grondwater de gewasverdamping vrijwel potentieel.
Figuur 20-3b geeft een heel ander resultaat te zien. Het betreft mais op een veldpodzolgrond met grondwatertrap VI (een diepere grondwaterstand dan trap V). De verdamping is volgens het warmtebeeld bijzonder laag en onafhankelijk van de afstand tot de onttrekking. Er is sprake van een hangwaterprofiel, waarbij de diepte van de grondwaterstand geen of slechts een zeer geringe invloed heeft op de vochtleverantie.
De voorbeelden laten zien dat indien aan de hand van het warmtebeeld systematisch wordt gekeken naar de verdamping per gewassoort, bodemtype en grondwatertrap informatie kan worden verkregen over de effecten van grondwateronttrekking op de landbouw.

De mogelijkheden van RS in de *landbouwwaterhuishouding* zijn geïllustreerd aan de hand van een voorbeeld. In zijn algemeenheid kan worden gesteld dat een verbetering van de hydrologische beschrijving van een gebied kan worden verkregen door in aanvulling op de conventionele werkwijze, die is gebaseerd op veldwaarnemingen en toepassing van simulatiemodellen, RS toe te passen.




**20-3** Relatieve dagverdamping afgeleid uit het warmtebeeld op 30 juli 1982 uitgezet tegen de afstand tot het centrum van de grondwateronttrekking. De grondwatertrap is van toepassing op de situatie *zonder onttrekking*. (bron: Thunnissen, 1984a).
**a**: gras op veldpodzolgrond met grondwatertrap V.
**b**: mais op hetzelfde bodemtype met grondwatertrap VI.

## 20.4 Perspectieven van vliegtuig- en satelliet-remote sensing

Of toepassing van RS in de praktijk in de nabije toekomst van de grond komt is sterk afhankelijk van de beschikbaarheid van bruikbare en betaalbare opnamen. Verwacht mag worden dat door de technische vooruitgang satelliet-RS (zoals SPOT en Landsat-TM) een steeds belangrijkere plaats gaat innemen. Hierbij speelt een rol dat deze satelliet-RS goedkoop is ten opzichte van multispectrale aftasting vanuit vliegtuigen (zie deze opnamesystemen in paragraaf 7.5). In tabel 20.2 staat een vergelijking tussen scanning-RS vanuit een vliegtuig en vanuit een aardobservatiesatelliet nog eens samengevat.
Opgemerkt moet worden dat afhankelijk van de toepassing nog niet altijd een geschikt satellietsysteem beschikbaar is. Met name in de landbouwwaterhuishouding is het opnametijdstip bijzonder kritisch, waardoor een satellietsysteem met een beperkte opnamefrequentie (bij Landsat-5 16 dagen, zie paragraaf 7.5.2) niet in aanmerking komt. Vanwege het frequent voorkomen van bewolking doen deze problemen zich vooral voor in de humide gebieden.

Tabel 20.2 Vergelijking tussen multispectrale aftasting vanuit vliegtuig en satelliet

| | vliegtuig | aardobservatie-satelliet | |
|---|---|---|---|
| opnameschaal | naar keuze | staat vast | |
| opnametijdstip | naar keuze | staat vast | |
| opnamefrequentie | naar keuze | staat vast | bruikbaarheid is onzeker i.v.m. bewolking |
| scheidend vermogen: | | | |
| radiometrisch | instelbaar | staat vast | |
| geometrisch | tot ± 1 m | tot ± 10 m (SPOT) | |
| kosten | hoog | laag | |
| beschikbaar komen van opnamen | vrijwel direct | tenminste enkele weken | |

De opnamefrequentie bedraagt voor SPOT voor geselecteerde gebieden 4 tot 5 dagen, dankzij de mogelijkheid van zijwaartse opname (zie paragraaf 7.5.4), hetgeen een aanzienlijke verbetering is ten opzichte van Landsat. SPOT neemt echter alleen waar in het reflectieve deel van het electromagnetische spectrum en niet in het thermische deel. Geconcludeerd kan worden dat voor inventariserende toepassingen de huidige satellietsystemen van groot belang zijn. Bij de bestudering van dynamische processen, zoals het optreden van verdroging in de landbouw, blijven we voorlopig aangewezen op RS vanuit vliegtuigen vanwege de kritische keuze van het opnametijdstip.

## 20.5 Literatuur


1 Brown, K.W. & N.J. Rosenberg, 1973. A resistance model to predict evapotranspiration and its application to a sugar beet field. Agron. J. 65: 341-347.

2 Jackson, R.D., R.J. Reginato & S.B. Idso, 1977. Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. Water Res. 13: 651-656.

3 Kahle, A.B., 1977. A simple thermal model of the earth's surface for geologic mapping by remote sensing. J. of Geophysical Res. 82: 1673-1680.

4 Laat, P.J.M. De, 1980. Model for unsaturated flow above a shallow water table, applied to a regional sub-surface flow problem. Thesis, Agricultural University Wageningen. Pudoc, Wageningen: 126 blz.

5 Laat, P.J.M. De, & R.H.C.M. Awater, 1978. Groundwaterflow and evapotranspiration; a simulation model. Part I. Theory. Basisrapport Commissie Bestudering Waterhuishouding Gelderland. Provinciale Waterstaat van Gelderland, Arnhem, 64 blz.

6 Menenti, M., 1980. Defining relationships between surface characteristics and actual evaporation rate. TELLUS Newsl. 15, JRC

Ispra, 21 blz.
7 Menenti, M., 1984. Physical aspects and determination of evaporation in deserts applying remote sensing techniques. Thesis, Report 10 (special issue), Institute for Land and Water Management Research (ICW), Wageningen, 202 blz.
8 Nieuwenhuis, G.J.A., E.H. Smidt & H.A.M. Thunnissen, 1985. Estimation of regional evapotranspiration of arable crops from thermal infrared images. Int. J. Rem. Sens. 6: 1319-1334.
9 Pratt, D.A. & C.D. Ellyett, 1979. The thermal inertia approach to mapping of soil moisture and geology. Rem. Sens. Envir. 8: 151-168.
10 Projectteam Remote Sensing Studieproject Oost-Gelderland, 1985. Onderzoek naar de mogelijkheden van operationele toepassing van remote sensing technieken in de landbouw en natuurbeheer. Rapport 17. ICW, Wageningen, 26 blz.
11 Rosema, A. & J.H. Bijleveld, 1977. Test of an algorithm for the determination of soil moisture and evaporation from remotely sensed surface temperatures. EARS, Delft/JRC, Ispra, 33 blz.
12 Soer, G.J.R., 1977. The TERGRA Model – mathematical model for the simulation of the daily behaviour of crop surface temperature and actual evapotranspiration. Nota 1014. ICW, Wageningen, 44 blz.
13 Soer, G.J.R., 1980. Estimation of regional evapotranspiration and soil moisture conditions using remotely sensed crop surface temperatures. Rem. Sens. Envir. 9: 27-45. Techn. Bull. 116. ICW, Wageningen.
14 Stone, L.R. & M.L. Horton, 1974. Estimation evapotranspiration using canopy temperatures: Field evaluation. Agron. J. 66: 450-454.
15 Thunnissen, H.A.M., 1984a. Hydrologische beschrijving van een studiegebied rond het pompstation 't Klooster: toepassing van hydrologische modellen en remote sensing. Deelrapport 4. Remote Sensing Studieproject Oost-Gelderland. Nota 1542. ICW, Wageningen, 85 blz.
16 Thunnissen, H.A.M., 1984b. Eenvoudige methode voor de bepaling van de regionale dagverdamping van een gewas met remote sensing. Deelrapport 6. Remote Sensing Studieproject Oost-Gelderland. Nota 1580. ICW, Wageningen, 39 blz.

Documentatie

# 21 De bijdrage van remote sensing aan het waterbeheer in aride gebieden

M. Menenti

## 21.1 Inleiding

De aard van *waterbeheer* houdt in dat de produktie-omstandigheden van landbouwgewassen worden verbeterd door het afstemmen van wateraanvoer dan wel afvoer op plaatselijke waterbehoeften. Waterbeheer is desondanks geen plaatselijke activiteit, omdat water gebiedsgewijs wordt beheerst. Binnen eenzelfde gebied zijn zowel behoeften als beperkingen ten aanzien van het waterbeheer in belangrijke mate variabel. Het is dus noodzakelijk om behoeften en beperkingen gebiedsgewijs te kwantificeren om over geschikte informatie te beschikken voor het oplossen van vraagstukken op het gebied van het waterbeheer. Een goede methode van waterbeheer zou dus de optredende variabiliteit, wat betreft behoeften en beperkingen, moeten verdisconteren. RS-technieken zijn bij uitstek geschikt om *ruimtelijke patronen* weer te geven.

Het komt vaak voor dat RS als een effectieve oplossing voor problemen op het gebied van het waterbeheer in *ontwikkelingslanden* wordt voorgesteld. RS is zonder meer een nuttig hulpmiddel, maar het daadwerkelijk stroomlijnen van de wijze van toepassing van RS-technieken zal nog de nodige inspanning vergen. Het gaat hierbij niet alleen om de techniek zelf, maar ook om de wijze van toepassing, rekening houdend met de plaatselijke infrastructuur en het technisch/wetenschappelijk milieu.

In de nabije toekomst verwacht men dat RS een onmisbaar *hulpmiddel* ten behoeve van waterbeheer in ontwikkelingslanden zal worden. De bovengenoemde afweging tussen de nauwkeurigheid van een bepaalde techniek en de omvang van de te verzamelen gegevens zal in de richting van RS gaan. Dit vanwege het ontbreken van *hydrologische gegevens* en de in het algemeen slecht functionerende systemen voor waterbeheer. De met behulp van RS verkregen informatie zal het verbeteren van het waterbeheer mogelijk maken met relatief lage marginale kosten. Het is nog van belang te onderstrepen dat het met name voor het oplossen van

de in dit hoofdstuk behandelde vraagstukken soms zelfs praktisch onmogelijk is de benodigde hydrologische gegevens te verzamelen door middel van directe waarneming in het veld. Dit geldt zowel voor het *waterbeheer ten behoeve van irrigatie* als voor het *grondwaterbeheer in woestijnen*. In het eerste geval is de hoeveelheid veldgegevens die tijdens elk irrigatieseizoen moet worden verzameld zodanig groot dat de kosten van de noodzakelijke veldwerkzaamheden vergelijkbaar zouden zijn met de te verwachten besparingen door middel van een verbeterd waterbeheer.
Voor woestijnen maken de uitgestrektheid van de in beschouwing te nemen gebieden en de zeer moeilijke toegankelijkheid het verrichten van uitgebreid veldwerk een niet haalbare zaak vanuit financieel en organisatorisch oogpunt.
Enkele RS-technieken zullen worden besproken, die specifiek van belang zijn voor de te behandelen toepassingen. Hiermee wordt gepoogd om duidelijk te maken hoe de wijze van toepassing van enkele RS-technieken voortvloeit uit de behoeften, die verband houden met specifieke vraagstukken op het gebied van het waterbeheer.

## 21.2 Methodieken

### 21.2.1 Waterbeheer ten behoeve van irrigatie

Het totaal aangevoerde water ten behoeve van *irrigatie* overtreft in vrijwel alle irrigatiegebieden in ruime mate de werkelijke waterbehoeften van de aanwezige gewassen. Het totaal beschikbare water moet gelijkelijk worden verdeeld om aan iedereen eenzelfde fractie van de totale wateraanvoer te leveren. Dit gebeurt in het algemeen op basis van schattingen van het geïrrigeerde areaal. In bijzondere gevallen wordt de waterbehoefte van gewassen gehanteerd als maatstaf voor de watertoedeling. Dit is echter slechts zelden mogelijk vanwege de zeer gebrekkige informatie betreffende het werkelijk geïrrigeerde areaal per gewas. Vaak wordt het aanvoeren van te veel irrigatiewater (over-irrigatie) door de waterschappen beschouwd als de meest voor de hand liggende manier om de wetmatig geregelde watertoedeling na te leven. In de laatste jaren is duidelijk gebleken dat over-irrigatie slechts een korte termijn-oplossing is. Vooral in de meest verafgelegen delen van irrigatiesystemen komen ernstige watertekorten voor, terwijl het niet verbruikte water het optreden van ondiep grondwater en verzilting veroorzaakt.
Het functioneren van een irrigatiesysteem kan worden geëvalueerd op een drietal niveaus, waarbij de hoeveelheid en de kwaliteit van de benodigde informatie van het eerste naar het derde niveau toeneemt.

Niveau 1
Op dit niveau wordt de zogenaamde *irrigatie-efficiëntie* vastgesteld aan de hand van het bepalen van het beschikbare water ($V_i$ in $m^3$) per eenheid geïrrigeerd oppervlak ($A_i$ in $m^2$) binnen een bepaald vak van het irrigatiesysteem:

$$d_i = \frac{V_i}{A_i} \quad \text{(m)} \tag{21.1}$$

Deze zogenaamde *waterdiepte* $d_i$ kan worden berekend voor zowel kleinere (bijv. tertiaire) als voor grotere vakken (bijv. een heel secundair kanaal). Het is mogelijk om hieruit de *irrigatie-efficiëntie* van een bepaald vak binnen die irrigatie-eenheid te berekenen met:

$$e_{ij} = \frac{d_{ij}}{d_i} = \frac{V_{ij}/A_{ij}}{V_i/A_i} \quad (-) \tag{21.2}$$

waarbij het vak 'ij' ligt binnen het grotere vak 'i'.

De irrigatie-efficiëntie, zoals deze met vergelijking (21.2) is gedefiniëerd, geeft aan in hoeverre het water *gelijkmatig* is *verdeeld*, terwijl de watertoedeling niet wordt gerelateerd aan de werkelijke waterbehoeften. Er bestaat wel de behoefte om de getallen '$e_{ij}$' in kaart te brengen voor het gehele irrigatiesysteem. Hiervoor blijkt de integratie tussen satellietgegevens en kaarten met de grenzen van de irrigatievakken een zeer effectieve methode te zijn. Dit houdt de volgende procedure in:

a *het karteren van het geïrrigeerde areaal* met behulp van satelliet-RS gegevens. In aride gebieden is het verschil tussen geïrrigeerd en niet-geïrrigeerd land zodanig groot dat nauwkeurige resultaten kunnen worden verkregen zonder aanvullende veldinformatie;

b *het begrenzen van de afzonderlijke irrigatievakken* (tertiaire vakken) op een topografische kaart en het digitaliseren ervan, gevolgd door het geometrisch corrigeren van de bij a. met satellietgegevens verkregen areaalkaart;

c *het berekenen van het geïrrigeerde areaal* $A_{ij}$ door het combineren van de satelliet-areaalkaart met de kaart, die de grenzen van de afzonderlijke vakken bevat;

d *het berekenen van de irrigatie-efficiëntie.* Voor niveau 1 betekent dit het berekenen van de d-waarden volgens vergelijking (21.1); hiervoor zijn debietmetingen (waterverplaatsing) in het veld vereist voor de in beschouwing genomen vakken. Voor het daadwerkelijk karteren van de irrigatie-efficiënties $e_{ij}$ is de beschikbaarheid van toereikende debietmetingen in de meeste gevallen de beperkende factor.

Niveau 2

Op dit niveau wordt de irrigatie-efficiëntie gedefiniëerd als de verhouding tussen de *behoefte aan water* van de per vak aanwezige gewassen en de daarbinnen aangevoerde hoeveelheid water:

$$e_i = \frac{\sum_k (E^k_{pot} \cdot A^k_i)}{V_i} \quad (-) \tag{21.3}$$

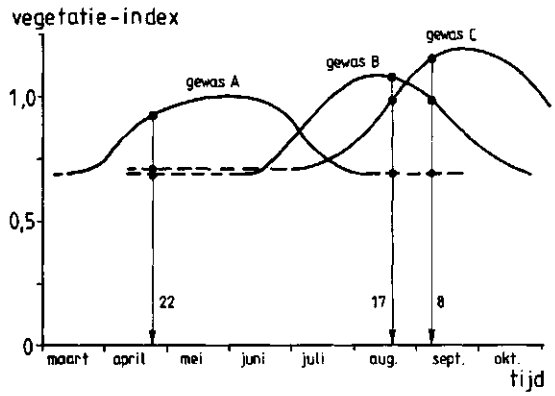
waar k = 1, 2,..., n de aanwezige gewasssen zijn, $E^k_{pot}$ de totale waterbehoefte per oppervlakte-eenheid voor gewas k (om optimaal te

kunnen groeien zodat er sprake kan zijn van potentiële verdamping) en $A_i^k$ het bij gewas k horende areaal binnen vak i is.

Het verschil met de onder 'niveau 1' behandelde methode is dat in dit geval de aanwezige gewassen afzonderlijk moeten worden gekarteerd. Er zijn twee benaderingen mogelijk om gewassen te karteren met behulp van satellietgegevens:

(1) *Monotemporeel*; elk gewas wordt gekarakteriseerd door multispectrale reflectiewaarden bij één enkele groeifase.

(2) *Multitemporeel.* Hierbij wordt gebruik gemaakt van de verschillen in groeicyclus van de verschillende gewassen. Behalve de verschillen in spectrale karakteristieken op één tijdstip wordt per gewas de verandering in reflectie-eigenschappen in de tijd in beschouwing genomen (zie bijv. figuur 21-1).




21-1 Voorbeeld van het verloop in een groeiseizoen van de vegetatie-index (VI) voor drie gewassen A, B en C met een uiteenlopende groeicyclus. Het tijdstip van een drietal Landsat MSS-opnamen is aangegeven. De combinaties van de drie VI-waarden, berekend aan de hand van de drie MSS-opnamen, verschillen van elkaar.

Het in het veld steekproefsgewijs waarnemen van de werkelijk aanwezige gewassen binnen een aantal vakken is voor zowel benadering (1) als (2) een vereiste. In de praktijk blijkt vaak benadering (2) betere resultaten op te leveren vanwege de grote *fenologische variabiliteit* binnen een zelfde gebied. De groeicyclus blijkt een geschikt kenmerk voor de gewasonderscheiding te zijn, ook wanneer meer dan één gewas in een zelfde veld aanwezig is. Het veldwerk kan in het geval van benadering (2) summier zijn als men bekend is met de spectrale signaturen van de te onderscheiden gewassen (zie paragraaf 9.4) en eventueel daaruit af te leiden vegetatie-indices.

Bij 'niveau 2' is het noodzakelijk de totale waterbehoefte per gewas $E_{pot}^k$ te berekenen. Dit kan geschieden met behulp van een aantal bekende methoden (FAO, 1977) en daarom wordt er hier niet verder op ingegaan. Slechts wordt vermeld dat een toereikende beschrijving van de fenologie van de aanwezige gewassen noodzakelijk is voor het berekenen van $E_{pot}$. Vaak zal voor relatief uitgestrekte gebieden binnen een zelfde irrigatie-infrastructuur éénzelfde $E_{pot}$ moeten worden gehanteerd vanwege het gebrek aan voldoende meteorologische waarnemingen.

Niveau 3
De irrigatie-efficiëntie wordt in dit geval gedefiniëerd als de verhouding tussen het *verschil* aan werkelijke (actuele) *gewasverdamping* wanneer geen ($E_a$) en wanneer wel irrigatie ($\tilde{E}_a$) is toegepast, en de aangevoerde hoeveelheid water $V_i$:

$$e_i = \frac{\sum_k (\tilde{E}_a^k - E_a^k) \cdot A_i^k}{V_i} \quad (-) \qquad (21.4)$$

Om de irrigatie-efficiëntie volgens vergelijking (21.4) toe te passen is nog meer gedetailleerde informatie nodig dan voor het toepassen van vergelijking (21.3). Er wordt nu verondersteld dat de *werkelijke verdamping* voor twee hypothetische gevallen in kaart kan worden gebracht:
(1) Irrigatie wordt helemaal niet toegepast.
(2) Irrigatie wordt overal toegepast.

Het karteren van de werkelijke verdamping onder werkelijke omstandigheden (zie hoofdstuk 20) zal in het algemeen moeilijk te interpreteren zijn omdat niet bekend is waar daadwerkelijk irrigatie is toegepast.
Het verdient wel aanbeveling om nader te onderzoeken hoe de verdampingskartering met RS kan worden gebruikt bij de bepaling van de irrigatie-efficiëntie volgens vergelijking (21.4). Vooralsnog zal het verschil ($\tilde{E}_a^k - E_a^k$) moeten worden bepaald met behulp van numerieke modellen, waarbij de bodemvochthuishouding in de onverzadigde zone wordt gesimuleerd (bijv. Belmans et al., 1983). Vanwege de relatief hoge eisen van dergelijke modellen aan de omvang van de benodigde invoergegevens zal het slechts mogelijk zijn om het verschil ($\tilde{E}_a^k - E_a^k$) te berekenen voor vrij grote homogene eenheden binnen het irrigatiesysteem.

Zoals uit de vergelijkingen (21.2), (21.3) en (21.4) gebleken is, is het geïrrigeerde areaal, in zijn geheel ofwel per gewas onderverdeeld, de meest belangrijke informatie om de irrigatie-efficiëntie met voldoende detail in kaart te kunnen brengen. Hiervoor zijn *satelliet-RS opnamen* de meest voor de hand liggende informatiebron. De integratie tussen hydrologische berekeningen en de kartografische weergave van de irrigatie-infrastructuur geschiedt volgens de procedure die is beschreven onder 'niveau 1'.

### 21.2.2 Grondwaterbeheer in woestijnen

De ontwikkeling van landbouw in *woestijnen* is slechts mogelijk met behulp van grondwateronttrekking. Voeding van grondwatervoorraden is bovendien zeer gering of vermoedelijk verwaarloosbaar. Door het vergelijken van de grondwateronttrekkingen met de totale grondwatervoorraad kan worden aangetoond dat het nauwkeurig voorspellen van het tempo waarmee de grondwaterspiegel zal dalen een relevant vraagstuk is.
Behalve de *door pompen onttrokken* hoeveelheid neemt de totale

grondwatervoorraad af vanwege het *verdampen van grondwater* in gebieden waar de grondwaterspiegel zeer ondiep (< 1 m) is. Deze grondwaterverliezen dragen in het algemeen evenveel bij aan de totale afneming van de grondwatervoorraad als de voor landbouwdoeleinden onttrokken hoeveelheid grondwater. Om uitspraken te kunnen doen over de effecten van grondwateronttrekking op lange termijn is het bepalen van grondwaterverliezen door verdamping een vereiste.
De werkelijke verdamping kan worden berekend als de latente warmtebijdrage aan de energiebalans van het aardoppervlak. De theoretische achtergrond hiervan is door Menenti (1984) uitvoerig beschreven. Een beknopte weergave hiervan is reeds in paragraaf 20.2.1 (vergelijkingen 20.1 en 20.2) gegeven.

Vergelijking (20.2) uit hoofdstuk 20 kan worden beschouwd als een formule, $f_1$, om de latente warmte (= verdamping) te bepalen op basis van waarneming van de variabelen aan de rechter zijde van vergelijking (20.2):

$$\{\rho, \varepsilon, R_s, R_l, T_a, T_s, r_a, G\} \xrightarrow{f_1} \{LE_t\} \tag{21.5}$$

Van de variabelen in vergelijking (21.5) kunnen slechts $\rho$ en $T_s$ vanuit de ruimte worden waargenomen. Voor de bepaling van deze waarden moet de invloed van de atmosfeer wel in rekening worden gebracht (zie paragraaf 7.4.1). Er moet dus worden volstaan met een eenvoudiger schattingsformule:

$$\{\rho, T_s\} \xrightarrow{f_2} \{LE_t\} \tag{21.6}$$

waar $LE_t$ wordt berekend met vanuit de ruimte waargenomen waarden van $\rho$ en $T_s$ (zie figuur 20-1). De formule $f_2$ is onder beperkende omstandigheden toepasbaar in plaats van formule $f_1$. Om $f_2$ te kunnen toepassen is het namelijk noodzakelijk dat de zes overige variabelen met andere technieken worden waargenomen of dat zij als constanten binnen een bepaald gebied kunnen worden beschouwd.
De grote variatie in reflectie aan het aardoppervlak is een kenmerk van aride gebieden. Daarom is het van groot belang dat de reflectie van het aardoppervlak met behulp van satelliet-RS metingen in kaart kan worden gebracht.
Aanvullende veldmetingen blijven noodzakelijk om $R_s$, $R_l$, $T_a$, $r_a$ en G te kunnen bepalen en om de formule $f_2$ te kunnen ijken.

## 21.3 Toepassingen

### 21.3.1 Waterbeheer ten behoeve van irrigatie

De methoden op de niveau's 1 en 2, zoals uitgelegd in paragraaf 21.2.1, werden ontwikkeld en uitgetest ten behoeve van een tweetal onderzoekprojecten. Deze projecten zijn uitgevoerd in de Po-vlakte (Italië) en Mendoza (Argentinië). Enkele resultaten zullen volgens de beschreven procedure worden gepresenteerd.

A. Het karteren van het geïrrigeerde areaal

Voor het karteren van het geïrrigeerde areaal in de provincie Mendoza zijn Landsat MSS-beelden toegepast van verschillende jaren en is een zeer eenvoudige klassenindeling gehanteerd: geïrrigeerd land, niet geïrrigeerd land, stedelijk gebied en open water. Vanwege de grote verschillen in reflectie-eigenschappen tussen de vier in beschouwing genomen grondgebruiksklassen zijn eenvoudige classificatiemethoden (parallelopipidum-methode; zie paragraaf 13.2.1) toereikend. Aanvullende veldwaarnemingen zijn ook niet noodzakelijk. Het beeldmateriaal in digitaal formaat is op twee manieren gebruikt:

- Als gecomprimeerde MSS-beelden (1 pixel per 32 resolutiecellen): een tweetal volledige beelden ('full scenes') is bewerkt om de hele provincie Mendoza te beslaan;
- Als niet-gecomprimeerde MSS-beelden: sub-beelden van verschillende delen van Mendoza zijn gebruikt om de resultaten van de voorafgaande stap te controleren op de schaal van de irrigatievakken van de primaire en de secundaire kanalen.

In Plaat VII is een Landsat MSS-beeld van de provincie Mendoza opgenomen om te illustreren dat grenzen van het geïrrigeerde areaal duidelijk zijn te herkennen.

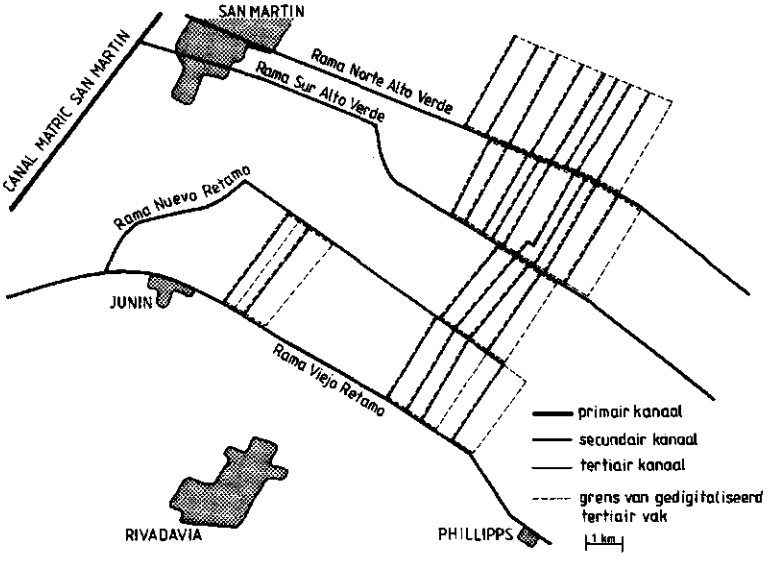
Tabel 21.1 Werkelijk geïrrigeerd areaal in de provincie Mendoza, zoals bepaald met een tweetal Landsat-beelden; het waterrechtenhoudend areaal is gegeven volgens het Departamento General de Irrigación (DGI)

| | waterrechtenhoudend areaal (ha) | werkelijk geïrrigeerd areaal (Landsat-MSS) (ha) |
|---|---|---|
| Mendoza noord | 265360 | 178040 |
| Mendoza zuid | 212160 | 124100 |

In tabel 21.1 zijn de met de gecomprimeerde MSS-beelden bepaalde geïrrigeerde arealen in het noordelijk, respectievelijk zuidelijk deel van de provincie Mendoza opgenomen. In principe is de voor het waterbeheer verantwoordelijke instelling (Departamento General de Irrigación) verplicht om het waterrechtenhoudend areaal van voldoende water te voorzien. Daarom is het zeer belangrijk om eventuele afwijkingen van het werkelijk geïrrigeerde areaal ten opzichte van het waterrechtenhoudend areaal vast te stellen. Daarmee kunnen gelijktijdig schadelijke gevolgen (hoge waterstanden en verzilting) van over-irrigatie worden voorkomen. Het feit dat het areaal, waarvoor waterrechten worden betaald, kan afwijken van het werkelijk geïrrigeerde areaal, zoals met behulp van MSS-beelden is bepaald, bewijst dat het monitoren van het geïrrigeerde areaal dringend noodzakelijk is voor het beheer van het irrigatiewater.

B. Het begrenzen van de tertiaire vakken

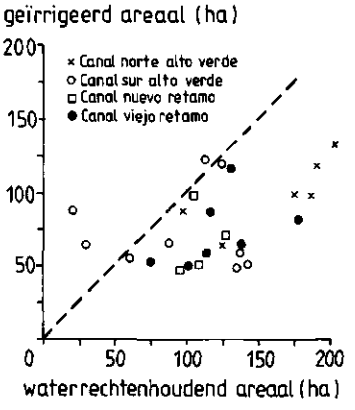
Om de in paragraaf 21.2.1 beschreven methode verder te testen werden de grenzen van een aantal tertiaire vakken vastgelegd op een topografische kaart van het irrigatiedistrict Tunuyán (Mendoza). De resulterende kaart werd gedigitaliseerd en is in figuur 21-2 opgenomen. De benodigde paspunten zijn vastgelegd om deze kaart met de grondgebruikskaart geometrisch te kunnen koppelen.




21-2 Gedigitaliseerde kaart met de grenzen van een aantal tertiaire vakken in het Tunuyán-irrigatie district.

C. Het berekenen van het geïrrigeerde areaal

Door het combineren van de kaart in figuur 21-2 met de voorstelling in Plaat VII bestaat de mogelijkheid om het geïrrigeerde areaal daadwerkelijk per tertiair vak te berekenen. Dit is gedaan voor alle vakken waarvan de grenzen in figuur 21-2 zijn aangegeven. De volgens deze procedure verkregen resultaten zijn met de waterrechtenhoudende arealen in dezelfde tertiaire vakken vergeleken. De resultaten staan in figuur 21-3. Afgezien van enkele opvallende gevallen is het werkelijk geïrrigeerde areaal kleiner dan het areaal, waarvoor waterrechten worden betaald. Deze figuur toont aan dat in het algemeen per bedrijf een beperkter oppervlak wordt geïrrigeerd dan waarvoor waterrechten worden bepaald. Daar het water wordt toebedeeld op basis van de betaalde waterrechten, wordt in het algemeen te veel water verstrekt. Zou het water worden toebedeeld op basis van het *werkelijk* geïrrigeerde areaal zoals uit de RS-satelliet-beelden kan worden afgeleid, dan zou dit resulteren in een verhoging van de irrigatie-efficiëntie. Voor een meer nauwkeurige onderscheiding van het geïrrigeerde areaal per tertiair vak verdienen Landsat TM-beelden door hun fijnere ruimtelijke resolutie de voorkeur boven Landsat MSS-opnamen (Visser, *1987*).
Met betrekking tot de irrigatie-efficiëntie kan samenvattend worden geconcludeerd dat de watertoedeling op basis van de met *RS-beelden*




21-3 Werkelijk geïrrigeerd areaal per tertiair vak, afgeleid uit Landsat TM-gegevens, versus het waterrechtenhoudend areaal per tertiair vak zoals bekend bij het archief van de Departamento General de Irrigación, Mendoza.

verkregen cijfers zou moeten gebeuren, ter verhoging van de irrigatie-efficiëntie.

D. Het karteren van gewassen

Om de irrigatie-efficiëntie op niveau 2 volgens vergelijking (21.3) te kunnen berekenen is allereerst het karteren van de *afzonderlijke gewassen* noodzakelijk.
De zogenaamde monotemporele benadering is reeds door Kuipers (1987) in een proefgebied in de Nijl-Delta uitgetest. Hierbij werden mais, katoen en rijst gekarteerd. Wanneer het aantal gewassen toeneemt en vooral wanneer twee of meer gewassen binnen een zelfde veld aanwezig zijn, zal de multitemporele benadering moeten worden toegepast.
Een drietal MSS-beelden van de noordelijke helft van de provincie Mendoza zijn bewerkt om een karakteristieke *vegetatie-index* (VI) van elk gewas op drie opnametijdstippen te bepalen. De resultaten zijn in tabel 21.2 weergegeven. Er blijken aanzienlijke verschillen te bestaan

Tabel 21.2 Verhouding tussen de reflecties met betrekking tot Landsat MSS in het nabij-infrarood (0,8 tot 1,1 µm: MSS7) en in het rood (0,6 tot 0,7 µm: MSS5) uitgedrukt als (MSS7/MSS5)*50 voor drie opnametijdstippen in Mendoza, Argentinië.

| | datum | | |
|---|---|---|---|
| landgebruiksklasse | 28-8-1984 | 15-2-1985 | 27-2-1985 |
| uien | 69 | 82 | 89 |
| wijngaarden | 73 | 125 | 140 |
| luzerne | 121 | 158 | 143 |
| olijfbomen | 105 | 96 | 122 |
| wijngaarden met gras | 155 | 107 | 150 |
| wijngaarden met olijfbomen | 79 | 114 | 128 |
| fruitbomen | 67 | 113 | 113 |
| grasland | 69 | 61 | 66 |

tussen de onderscheiden gewassen, o.a. voor de combinaties van druiven met gras en olijfbomen. De statistische betekenis van de in tabel 21.2 getoonde verschillen is door Menenti et al. (1986) aangetoond.
Indien verschillen van betekenis aanwezig zijn, dan kan het door een bepaald gewas beslagen areaal rechtstreeks worden bepaald (Azzali, 1987). Voor dit doel zijn ten eerste een drietal VI-beelden, volgens de in tabel 21.2 genoemde definitie (vergelijk paragraaf 9.5.2), voor alle drie opnametijdstippen berekend. Vervolgens zijn de aldus verkregen VI-beelden samengevoegd in een zogenaamde *multitemporele kleurencomposiet,* waarbij de kleuren worden bepaald door de combinatie van de op de drie data voorkomende VI-waarden.
Uiteindelijk zijn de cijfers van tabel 21.2 toegepast om een zogenaamde 'kleursleutel' vast te stellen om elk gewas aan de hand van de multitemporele kleurcompositie te kunnen identificeren. Deze methode is met succes toegepast in de Po-vlakte. Het betreffende multitemporele VI-beeld is als Plaat VIII opgenomen, terwijl in tabel 21.3 de volgens deze benadering bepaalde gewasarealen met landbouwstatistieken worden vergeleken. Voor een uitgebreide presentatie van de resultaten en de evaluatie daarvan wordt verwezen naar Azzali (1987).

Tabel 21.3 Het gewasareaal (als percentage van de totale oppervlakte) volgens officiële landbouwstatistieken en bepaald m.b.v. Landsat (multitemporeel); waterschap Grande Bonificia Ferrarese (Italië), 1980

| landgebruiksklasse | officiële landbouwstatistieken | Landsat multitemporele VI |
|---|---|---|
| wintertarwe | 23,0 | 20,5 |
| hooiland + luzerne | 14,5 | 21,5 |
| mais | 8,0 | 9,2 |
| suikerbieten | 20,0 | 16,1 |
| bomen | 11,9 | 16,1 |
| rijst | 2,8 | 3,3 |
| overig | 19,8 | 13,3 |

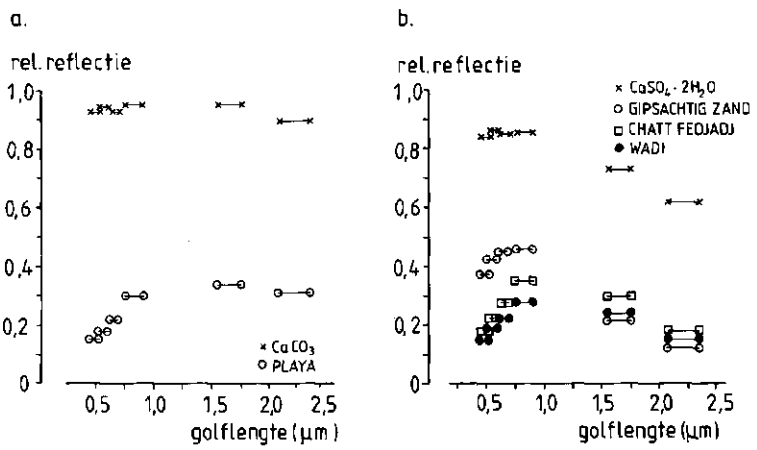
21.3.2 Grondwaterbeheer in woestijnen

De methode, gepresenteerd in paragraaf 21.2.2, werd ontwikkeld ten behoeve van de schatting van de beschikbare hoeveelheid grondwater in West-Libië (Aquater, 1980). De methode wordt verder ontwikkeld en uitgetest in het kader van onderzoek in de westelijke woestijn van Egypte. Zowel het project in Libië als in Egypte is erop gericht de reeds uitgestippelde plannen betreffende toepassing van landbouw in de woestijn uit te voeren.
Kennis omtrent de waterhuishouding van woestijngebieden, met name de grondwaterreservoirs en de grondwaterstromingen in verband met de hydro-geologische gesteldheid, is hier onontbeerlijk. Plaat IX geeft hiervan een algemene indruk voor de woestijngebieden van het noorden van Afrika.

Satelliet-RS metingen kunnen worden toegepast om bij te dragen aan het oplossen van de hierboven samengevatte vraagstukken. Deze kunnen in de volgende logische volgorde worden vermeld:

(1) *Het identificeren en begrenzen van homogene eenheden,* gekarakteriseerd door de hydrologische eigenschappen van de toplaag van het in elke eenheid voorkomende bodemtype.
(2) Het kwantificeren van *gedragsverschillen ten opzichte van de energiebalans* tussen de reeds vastgelegde eenheden.
(3) Het *ijken van de formule* $f_2$ om $LE_t$ te kunnen berekenen met satellietwaarnemingen van $T_s$ en $\rho$.
(4) De gebiedsgewijze *berekening van de verdamping.*

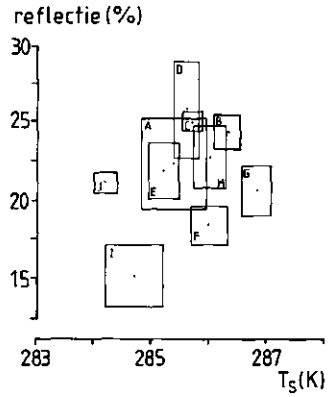
Ad 1 De multispectrale reflectiemetingen met de Landsat-TM zullen zich vooral vanwege de beschikbaarheid van metingen in het midden-infrarood (TM5 en TM7, zie paragraaf 7.5.3) uitstekend lenen voor het onderscheiden van oppervlakken, die kunnen worden gekarakteriseerd door verschillen in vochtigheid en de aanwezigheid van specifieke zoutmineralen. Resultaten, verkregen met metingen van de gebieden Kasserine en Seftimi in Tunesië (zie figuur 21-4), tonen dit duidelijk aan. De figuren 21-4a en 21-4b tonen het verloop van de spectrale reflectie van $CaCO_3$- en $CaSO_4$-rijke bodems, zoals dat is afgeleid uit Landsat-TM gegevens. Het blijkt dat dit verloop overeenstemt met laboratoriumwaarnemingen aan de overeenkomstige zuivere mineralen. In het golflengtebereik van 1,0 tot 2,5 µm is de reflectie van $CaCO_3$-rijke bodems vrijwel constant, terwijl de reflectie van $CaSO_4$-rijke bodems afneemt met toenemende golflengte. Dit betekent dan ook dat beide bodemtypen in het bijzonder in de golflengtebanden 5 en 7 van de Landsat-TM zijn te onderscheiden (Menenti et al, 1986).




21-4 Spectrale reflectie van een aantal bodemeenheden in de omgeving van Kasserine (a) en Seftimi (b), Tunesië. Laboratoriummetingen van de spectrale reflectie van zuivere zoutmineralen zijn als referentie opgenomen (x).

Door Roeters (1987) is de relatie tussen reflectie en vochtgehalte in samenhang met de topografische ligging ten opzichte van de grondwaterspiegel aangetoond voor een tweetal locaties in de Quattara-depressie.

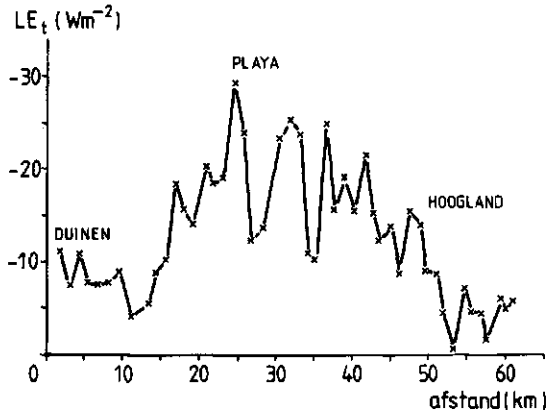
Ad 2 Het is niet vanzelfsprekend dat oppervlakken, die verschillen qua spectrale reflectie, een niet met elkaar vergelijkbaar gedrag wat betreft de energiebalans vertonen. TM-opnamen zijn door Menenti et al. (1986) toegepast om ten eerste $\rho$ en $T_s$ te berekenen en ten tweede vast te stellen welke van de in beschouwing genomen bodemeenheden te onderscheiden zijn op basis van $\rho$ als maatstaf voor netto straling $R_n$ en van $T_s$ als maatstaf voor de energiebalans ($LE_t + H + G$) (vergelijk paragraaf 20.2.1). De voor het gebied Seftimi (figuur 21-5) verkregen resultaten wijzen erop dat bijvoorbeeld klassen F en G onderling zijn te onderscheiden in tegenstelling tot bijvoorbeeld de klassen A en E.




21-5 Reflectiecoëfficiënt ($\rho$) versus oppervlaktetemperatuur ($T_s$) van een aantal bodemeenheden in de omgeving van Seftimi, Tunesië. Voor elke eenheid is voor zowel $\rho$ als $T_s$ een bereik aangegeven die gelijk is aan $(\bar{x} - \sigma_x, \bar{x} + \sigma_x)$, waarin $\sigma_x$ de standaardafwijking is van de betrokken grootheid en $\bar{x}$ de gemiddelde waarde behorende bij een bepaalde bodemeenheid (klasse).

Ad 3 Dit is hoofdzakelijk een hydrologisch onderwerp en wordt hier niet verder beschreven. Slechts wordt vermeld dat de geometrische koppeling tussen kaarten met de locaties van de referentiemetingen van de verdamping en satellietbeelden vanwege het gebrek aan nauwkeurige paspunten een moeizame en niet te onderschatten zaak is.

Ad 4 Een verdampingskaart van het gebied Wadi Ash Shati in Libië werd volgens de in paragraaf 21.2.1 uitgelegde methode berekend met $\rho$- en $T_s$-metingen. Het verloop van de verdamping langs een willekeurige lijn, gaande vanuit de zandduinen ten zuiden van Wadi Ash Shati door een gebied met een ondiepe grondwaterstand naar een rotsachtig hoogland ten noorden van Wadi Ash Shati, is in figuur 21-6 weergegeven. De verdamping vanuit de zandduinen en het hoogland is verwaarloosbaar. Het verloop van de verdamping noordwaarts binnen de zgn. playa (woestijnbekken) zelf loopt parallel met de variatie in de bodemvochtigheid. De in figuur 21-6 weergegeven verdampingswaarden zijn vergelijkbaar met de op verschillende locaties binnen de playa gemeten waarden.




**21-6** Latente verdampingswarmte ($LE_t$) versus afstand langs een traject vanuit zandduinen door een playa naar een rotsachtig hoogland in het zuiden van Libië.

## 21.4 Perspectieven

21.4.1 Waterbeheer ten behoeve van irrigatie

Wat betreft het toepassen van RS op het gebied van het waterbeheer ten behoeve van irrigatie is er van een echte *routinematige* toepassing sprake. De gemeenschap van mogelijke gebruikers bestaat uit een zeer breed publiek van technici, belast met het daadwerkelijke en dagelijkse waterbeheer. Binnen deze gemeenschap is de behoefte voor de met behulp van RS te verschaffen informatie duidelijk aanwezig. Er bestaat een zekere onduidelijkheid over de exacte wijze van toepassing van de voorgestelde techniek. Hiervoor is een verdere *standaardisatie* van de ontwikkelde methode van groot belang. Verder ontbreekt nog het inzicht omtrent de consequenties van het monitoren van het geïrrigeerde areaal voor de op basis hiervan uit te voeren maatregelen. Indien vergaande technische en/of organisatorische maatregelen nodig zouden zijn om de met RS verkregen informatie daadwerkelijk te kunnen toepassen, dan moet nog worden bewezen dat een netto verbetering haalbaar is.

21.4.2 Grondwaterbeheer in woestijnen

Wat betreft het grondwaterbeheer in woestijnen zijn zowel de problemen als de methodieken van een meer *fundamentele* en minder routinematige aard. De beperkte uiteenlopende gemeenschap van gebruikers toont dit aan. Plannen voor het ontwikkelen van landbouw in woestijnen zijn ontworpen. Ondanks de trage besluitvorming en de vaak langzame uitvoering konden toch tenminste een deel van de plannen worden gerealiseerd. Dit geldt voor zo goed als alle woestijnachtige gebieden ter wereld. Bovendien vraagt elk vraagstuk voor een *ad hoc benadering* en voor het verdiepen van de basiskennis omtrent de betreffende waterhoudende grondlagen.
Er mag dus worden geconcludeerd dat de hier beschreven toepassing van RS ook in de nabije toekomst ad hoc werk zal blijven. Dit neemt niet weg dat er een duidelijke behoefte bestaat, zeker in een beperkte kring, voor de toepassing van deze techniek ten behoeve van hydrogeologische studies.

## 21.5 Literatuur

1 Aquater, 1980. Hydrogeological study of Wadi Ash Shati, Al Jufrah and Jabal Fezzan area. Final report.
2 Azzali, S., 1987. The contribution of Landsat data to water management in two italian irrigation districts. ICW Nota 1764, Wageningen, 56 blz.
3 Belmans, C., J.G. Wesseling & R.A. Feddes, 1983. Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE. J. Hydrol. 63: 271-286.
4 FAO, 1977. Crop water requirements. Irr. Drain. Paper 24 (2nd ed.), 144 blz.
5 Kuipers, H., 1987. Toepassing van Landsat Thematic Mapper opnamen ten behoeve van een waterbalansstudie in de Nijldelta. ICW Nota 1794, Wageningen, 26 blz.
6 Menenti, M., 1984. Physical aspects and determination of evaporation in deserts applying remote sensing techniques. ICW Report 10 (special issue), Wageningen, 202 blz.
7 Menenti, M., S. Azzali, D.A. Collado & S. Leguizamon, 1986. Multitemporal analysis of Landsat Multispectral Scanner (MSS) and Thematic Mapper (TM) data in the Po Valley (Italy) and in Mendoza (Argentina). Proc. 7th Int. Symp. on Rem. Sens. for Res. Dev. and Envir. Management, Enschede, 25-29 August 1986, blz. 293-299.
8 Roeters, P.B., 1987. Determination soil moisture conditions of salt crusts by using Landsat TM data – a qualitative and quantitative approach. ICW Nota 1753, Wageningen, 4 blz.
9 Visser, T., 1987. Use of satellite data in irrigation water management. Scriptie LU Wageningen, Vakgroep Cultuurtechniek.

# Thema 6 Remote sensing m.b.t. landevaluatie en landgebruik

Sinds ongeveer dertig jaar worden luchtfoto's gebruikt voor de bepaling van landkenmerken mede ten behoeve van de bodemgeschiktheidskartering. Bij een globale kartering van de bodemgesteldheid en van verschillende landkenmerken zijn satellietbeelden van groot belang. Gebleken is dat een combinatie van beide gegevensbronnen kan leiden tot een aanzienlijk betere informatie-extractie. Na een schets van de basisbegrippen en de werkwijze van de landevaluatie wordt ingegaan op de relaties tussen landparameters en RS-data. Bovendien wordt de wijze van werken van ingenieursbureaus in dergelijke gebieden belicht ten behoeve van projecten waarin herziening van het landgebruik centraal staat. De verwachting zal worden uitgesproken dat de hogere cartografische precisie en het sterk verbeterde onderscheidingsvermogen van hedendaagse satellietopnamen een verschuiving naar de digitale beeldverwerking teweeg zullen brengen. Ook zullen deze opnamen toepasbaar zijn op relatief kleine arealen.

Documentatie

# 22 Remote sensing en landevaluatie

M.A. Mulders

## 22.1 Inleiding

Luchtfoto-interpretatie wordt reeds lang (sinds de 2de wereldoorlog) toegepast bij de *landinventarisatie*. De voornaamste voordelen liggen in een gerichte planning van het veldwerk, doch ook in het verkrijgen van inzicht in de landeigenschappen.
MSS-technieken (multispectrale aftasting, hoofdstuk 7) maken het mogelijk om radiometrisch een verhoogde nauwkeurigheid te bereiken, en door de toepassing van MSS in satellieten ligt een multitemporele benadering binnen het bereik.
De betekenis van luchtfoto-interpretatie en interpretatie van andere RS-gegevens voor *landevaluatie* vormt het thema van dit hoofdstuk. Hiertoe dient eerst de landevaluatie nader te worden toegelicht.

## 22.2 Landevaluatie

Landevaluatie bemoeit zich met de vergelijking van *landgebruiksbehoeften en landhoedanigheden*. Het voornaamste doel van de landevaluatie is om het optimale landgebruik voor elke gedefiniëerde landeenheid vast te stellen. De principes van deze *landgeschiktheidsschatting* zijn vastgelegd door Brinkman & Smyth (1973), FAO (1976, 1983), Beek (1978) en Breimer et al. (1986). Enkele van de begrippen worden hieronder weergegeven.

*Landeigenschap*: (eng. land characteristic) landkenmerk, dat meetbaar of in te schatten is; bijv. topografische positie, helling en reliëf, bodemtextuur, profieldiepte, bodemtype, vegetatiebedekking, grondwaterniveau, wegenstelsel, waterlopenstelsel (drainage-dichtheid).

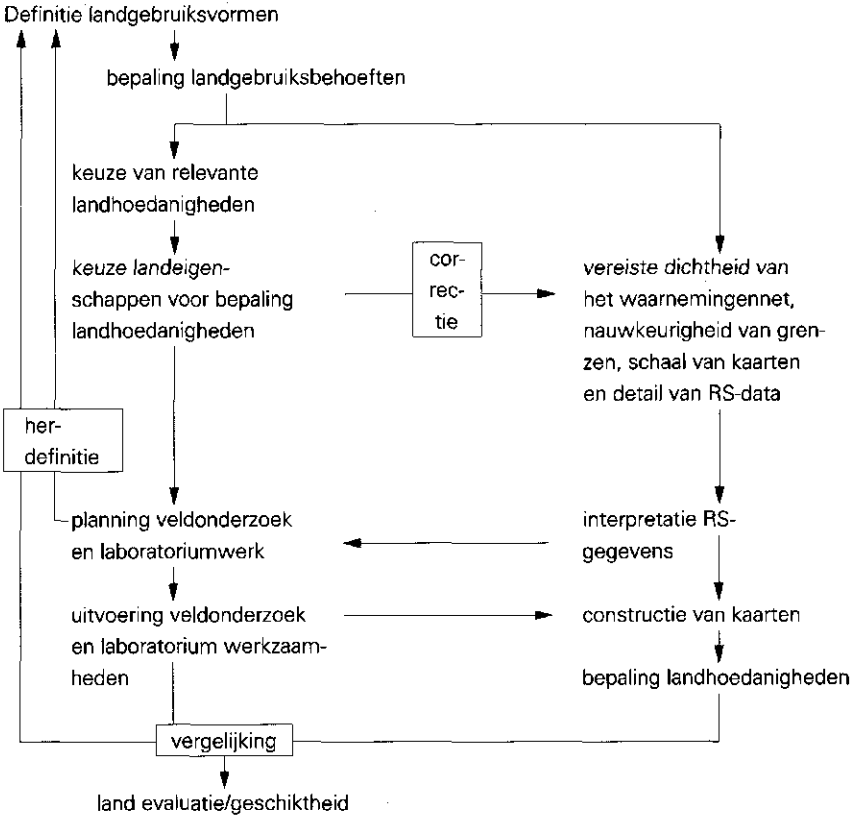
*Landhoedanigheid*: (eng. land quality) complexe landeigenschap, die invloed uitoefent op de geschiktheid van land voor een bepaald gebruik; bijv. vochtbeschikbaarheid, temperatuur regime, overstromingsgevaar, bewerkbaarheid, erosiegevoeligheid.

Landeigenschappen kunnen zowel in positieve als negatieve zin in landhoedanigheden worden uitgedrukt.

*Landgebruiksbehoeften*: (eng. requirements of land use) groep landhoedanigheden, die de produktie en landbehandeling voor een bepaald gebruik definiëren.

Landevaluatie is een systeem, waarbij land en landgebruik centraal staan. Het land wordt beïnvloed door het gebruik. Er kunnen verbeteringen worden aangebracht, of de beperkingen zijn zodanig, dat een bepaald gebruik dient te worden ontraden.
Er vindt een interactie plaats tussen de verschillende componenten van het landgebruikssysteem (incl. klimaatsfactoren), die bepalend is voor de uiteindelijke produktie.
Landevaluatie wordt toegepast op verschillende schaal (overzicht, semi-detail en detail) en vereist interdisciplinaire discussie van technische disciplines met sociologische en economische disciplines. Het schema in figuur 22-1 richt zich op de fasen vanaf de keuze van relevante landgebruiksvormen.

22-1 Schema voor landevaluatie (Jordens & Mulders, 1985).



## 22.3 Rol van de remote sensing

22.3.1 Fysiografische beeldinterpretatie

De *fysiografische beeldinterpretatie*, zoals gebruikt bij de interpretatie van luchtfoto's doch in meerdere of mindere mate ook toepasbaar op de interpretatie van andere RS-produkten, houdt in het kort de volgende stappen in:

a) waar mogelijk onderscheid in 'landtypes', eenheden met een complex aan interpretatie-aspecten, dat duidelijk verschilt van de omgeving;
b) onderverdeling van de landtypes in landeenheden afhankelijk van hun drainage-dichtheid (in deze context wordt met drainage het totale systeem van open kanalen, sloten, rivieren, etc., bedoeld en niet een ondergronds buizensysteem zoals in de Nederlandse landbouw toegepast) op grond van:
   - reliëf of drainage-patroon bij hoge dichtheid,
   - helling en topografische positie bij matige of lage dichtheid,
   - andere criteria, zoals natuurlijke vegetatie;
c) beschrijving van de landeenheden (b);
d) formulering van afgeleide aspecten per landeenheid, zoals drainage- en erosie-conditie, en bodemdiepte.

De fysiografische beeldinterpretatie levert reeds gegevens op, welke direct bruikbaar zijn voor de landevaluatie, zoals drainage-dichtheid, reliëf, helling, topografische positie, vegetatie en landgebruik. De definitie van de landgebruiksbehoeften kan het gebruik van bepaalde landeenheden reeds in het interpretatiestadium uitsluiten. Voor bepaalde vormen van geïrrigeerde landbouw kan bijvoorbeeld land met hellingen steiler dan 8% reeds in dit stadium worden geëlimineerd. De vereiste minimum afmetingen van de landbouwbedrijven en percelen kunnen bijvoorbeeld zodanig zijn, dat land met een grote drainage-dichtheid al afgekeurd dient te worden voor het geplande gebruik. Het is mogelijk om meer voorbeelden aan te dragen, doch vooral dient duidelijk te worden, dat indien de landgebruiksvormen goed gedefiniëerd zijn, reeds veel kennis vooraf kan worden vergaard, en het veldwerk efficiënt gepland kan worden.

Bij fase d van de fysiografische beeldinterpretatie worden ook complexe aspecten beschouwd, die verband houden met vochtbeschikbaarheid, weerstand tegen erosie, en bewortelbaarheid. In feite maakt men hypothesen, die in het veld getoetst dienen te worden op hun geldigheid, doch die ook van waarde zijn voor het sturen van het veldonderzoek. Op grond van inzichten verkregen in het veld, en noodzakelijke correcties, wordt een tweede en meestal laatste interpretatie verricht.

22.3.2 Mogelijkheden van moderne remote sensing-technieken

RS-technieken leveren interessante mogelijkheden t.a.v. de detectie van specifieke aspecten die van belang zijn voor de landevaluatie. Een aantal voorbeelden worden hieronder gegeven.

- Multitemporele luchtfotografie: gewasherkenning; detectie van

groeiverschillen in vegetatie, die bodemvariatie op korte afstand kunnen weergeven.
- Multispectrale luchtfotografie: het individuele beeld van de groen-, rood- of nabij-infrarood-reflectie van vegetatie kan belangrijke inzichten verschaffen over de soorten en hun hoedanigheden en ruimtelijke patronen.
- Zwart-wit infraroodluchtfotografie: levert verhoogd contrast tussen bodem en vegetatie op, alsmede sterke indicaties voor vochtige bodemoppervlakken.
- Luchtfotografie in kleur (true colour resp. false colour): levert combinaties in kleur op van blauw, groen en rood, die de gereflecteerde straling weergeven van dezelfde golflengte-zones resp. van de groen, rood en nabij-infrarood golflengte-zones, waarbij de voordelen aangegeven voor multispectrale en zwart-wit infraroodluchtfotografie in de kleurcombinatie tot uiting komen.
- Multitemporele satelliet-opnamen (MSS): gewasherkenning; gewas- en natuurlijke vegetatie-kalenders sturen de dataselectie voor een optimale keuze; reflectie-ratio's indicatief voor de biomassa, kunnen gebruikt worden voor produktieschattingen per landeenheid.
- Warmtebeelden (TIR-scanner): een gewas met vochttekort of geringe verdamping heeft overdag bij toevoer van zonnestraling een relatief hoge temperatuur; thermische opnamen met een hoge geometrische resolutie vanuit vliegtuigen zijn toepasbaar voor detectie van gewasgroeiverschillen binnen het perceel of tussen de percelen onderling; de gegevens van satellieten met een lage geometrische resolutie zijn bruikbaar voor regionale verdampingsstudies (Rosema, 1978).
- Radar: indicaties t.a.v. gewassoorten, bodemruwheid en bodemvocht.

Naast een verbetering van de multispectrale opnametechniek verschaffen de huidige RS-technieken kwantitatieve gegevens, die te correleren zijn met de vochttoestand, de fotosynthese en biomassa van vegetatie. Voorts kunnen multispectrale opnamen belangrijke verbeteringen bewerkstelligen bij de inventarisatie van gesteente en bodem in droge gebieden.

## 22.4 Voorbeelden

De fysiografische beeldinterpretatie kan gebruikt worden voor de *planning van het veldwerk* (Mulders, 1987). Landhoedanigheden, die in dit verband d.m.v. luchtfoto-interpretatie kunnen worden geschat, zijn:
- *landcomplexiteit*, afhankelijk van grootte en distributie van de landeenheden per oppervlakte-eenheid;
- *begaanbaarheid* van het terrein, afhankelijk van reliëf, drainage-conditie, aanwezigheid van wegen en vaarroutes;
- *toegankelijkheid* van het terrein, afhankelijk van type en dichtheid van het vegetatiedek.

Door op grond hiervan correctie- (of reductie-)factoren aan te brengen op het optimale aantal veldwaarnemingen (boringen) m.b.t. een hypothetisch ideaal terrein en gelet op het te karteren oppervlak bij gekozen schaal van kartering, kunnen schattingen gemaakt worden van de te verwachten voortgangssnelheid van de kartering van de vereiste veldgegevens.

In klimaten met een droge periode (semi-aride en mediterraan) kan RS van belang zijn voor het *identificeren van droogtegevoelige landeenheden*. Zo worden in het gebied Kasserine (Tunesië) de beste (vochtigste) gronden voor niet-geïrrigeerde graanteelt aangetroffen in de puinwaaiers aan de voet van het bergland, en in brede dalen tussen plateaus met verharde kalklagen. Deze kunnen zeer goed met Landsat-TM-gegevens en luchtfoto-interpretatie worden geïdentificeerd en in kaart gebracht; zie de Platen X en XI met verklarende tekst. Het Kasserine gebied (ongeveer 9° O.L. en 35° N.B.) is gelegen in een bekken op ongeveer 600 m hoogte tussen twee gebergteketens met toppen op 1350-1540 m boven zeeniveau. Het gebied heeft een semi-aride klimaat. Dinç (1986) vond in Turkije een lineaire correlatie tussen opbrengst en *vegetatie-index* (spectraalbanden-verhouding (7-5)/(7+5) van Landsat-3; voor de banden zie paragraaf 7.5.2). De bodemdiepte (hier bepalend voor de vochtbeschikbaarheid) bleek een grote invloed te hebben op de totale biomassa en de opbrengst.
In de zeer regenrijke Atlantische zone van Costa Rica bleek een droge periode van 3 weken in 1985 een dermate groot effect op grasland te hebben, dat dit op het Landsat-TM-beeld duidelijk waarneembaar was. Vergelijking van het droogte-effect in grasland op verschillende bodemtypes en landeenheden kan inzicht verschaffen in de kwetsbaarheid voor droogte van deze landgebruiksvorm, en dus een rol spelen in de landevaluatie.

## 22.5 Conclusie

RS-technieken kunnen van veel belang zijn in het landevaluatie proces. In figuur 22-1 staat de interpretatie van RS-gegevens reeds opgenomen, echter meer gezien in het kader van de produktie van kaarten. De gegevens aangedragen door de fysiografische beeldinterpretatie maken echter reeds evaluaties mogelijk afhankelijk van de geplande landgebruiksvorm.
Ook kunnen met name de huidige technieken voor multispectrale aftasting (incl. warmtestraling) inzicht verschaffen in de vochthuishouding en biomassa-ontwikkeling, dus gegevens opleveren die van belang zijn voor de plantaardige produktie. Gebruikt men deze RS-technieken multitemporeel, zodat men gegevens verkrijgt op meer momenten in het groeiseizoen, dan kunnen zij veel bijdragen tot de schatting van de landgeschiktheid.
Het behoeft geen betoog dat de RS-data wel ondersteund dienen te worden door voldoende veldwaarnemingen, doch tevens kunnen leiden

tot reductie van het benodigde aantal veldwaarnemingen, alsmede tot een verhoogde nauwkeurigheid.

## 22.6 Literatuur


1 Beek, K.J., 1978. Land evaluation for agricultural development. Publ. 23, ILRI, Wageningen, 333 blz.

2 Breimer, R.F., A.J. Van Kekem & H. Van Reuler, 1986. Guide-lines for soil survey and land evaluation in ecological research. Unesco/ISRIC, MAB, Techn. notes 17, 125 blz.

3 Brinkman, R. & A.J. Smyth, 1973. Land Evaluation for rural purposes. Expert Consult. (Chairman: J. Bennema), Wageningen, 1972. ILRI, Wageningen, 116 blz.

4 Dinç, U. et al., 1986. Preliminary studies on acreage estimation of Small Grain area in the eastern mediterranean region using Landsat-3 data. Abstract ITC Journal 1986-1, blz. 95.

5 Epema, G.F., 1986. Processing thematic mapper data for mapping in Tunisia. ITC Journal 1986-1: 30-34.

6 FAO, 1976. A framework for land evaluation. Soils Bull. 32, FAO, Rome, 72 blz.

7 FAO, 1983. Guidelines: Land evaluation for rainfed agriculture. Soils Bull. 52, FAO, Rome, 237 blz.

8 Jordens, E.R. & M.A. Mulders, 1985. Land evaluation and remote sensing. Agric. Univ. Wageningen, Soil Science and Geology, Lab. for Remote Sensing, 24 blz.

9 Menenti, M., A. Lorkeers & M. Vissers, 1986. An application of thematic mapper data in Tunisia. Estimation of daily amplitude in near-surface soil temperature and discrimination of hypersaline soils. ITC Journal 1986-1: 35-42.

10 Mulders, M.A. & G.F. Epema, 1986. The thematic mapper: a new tool for soil mapping in arid areas. ITC Journal 1986-1: 24-29.

11 Mulders, M.A., 1987. Remote sensing in soil science. Elsevier Science Publ., Amsterdam, 379 blz.

12 Rosema, A., 1978. The application of thermal infrared remote sensing data to soil moisture and evaporation determination. ESA/FAO/WMO, Int. Training Course, FAO, Rome, 18 blz.

# 23 Remote sensing bij ingenieursprojecten

W.D. Langeraar

## 23.1 Inleiding

Er is een duidelijke voorwaarde waaraan het gebruik van een nieuwe techniek binnen *ingenieursbureaus* moet voldoen, wil die activiteit bestaansrecht hebben. De *prijs/prestatie-verhouding* is van toepassing en het resultaat moet gunstig zijn. Zo ook voor remote sensing-gebruik. Zolang RS goedkoop genoeg blijft om de totale kosten van een project lager te laten zijn dan zonder het gebruik ervan, of zolang de kwaliteit van het werk voor hetzelfde geld beter is, zolang zal RS toegepast blijven worden bij commerciële instellingen.
Meestal is het alleen passieve satelliet-RS in het optische gebied van het EM-spectrum (zie paragraaf 7.5) die aan deze voorwaarde voldoet. RS-activiteiten van 'Euroconsult' (waaraan auteur was verbonden) en andere internationaal opererende ingenieursbureaus spelen zich dan ook voornamelijk af rondom Landsat- en, recentelijk, SPOT-datagebruik.
Waarom is alleen dat soort RS interessant? Een aantal factoren maken satelliet-RS *kosteneffectief*, niet alleen ten opzichte van traditionele methoden van data-vergaring, maar ook ten opzichte van andere soorten van RS zoals multispectrale aftasting en radar vanuit vliegtuigen en radar vanuit de ruimte. De factoren die spreken voor SPOT- en Landsat-gebruik zijn:

1 De hoge mate van *beschikbaarheid*, niet te beïnvloeden door het ontwikkelingsland waar het werk gedaan wordt. Hierdoor is men verzekerd van beeldmateriaal.
2 Het element van *regelmatige overkomst* en dus ook de mogelijkheid van recent materiaal, te gebruiken voor het volgen van grootschalige processen.
3 De *grootte van het oppervlak* simultaan bestreken door een satellietbeeld (een Landsatbeeld bestrijkt pakweg 34.000 $km^2$).
4 De kunstmatig *lage prijs*. EOSAT (Landsat) en SPOT-Image (SPOT) claimen beiden commerciëel te zijn, maar in werkelijkheid worden ze gesubsidiëerd door overheden.

5 De *relatieve eenvoud* waarmee een beeld te verwerken is met een computer voor maximale data-extractie.
6 De aanvaardbare *ruimtelijke resolutie* (SPOT tot 10 m) en de x, y-positienauwkeurigheid van weergegeven objecten (0,4 maal de pixelgrootte).

De andere vormen van RS zijn of relatief duur wat de opname betreft (vliegtuig-MSS, speciaal gevlogen luchtfoto's), of vereisen bovendien specifieke en kostbare voorbewerkingen (SLAR, SAR) of betreffen incidentele opnamen, bijv. SAR vanuit de ruimte (tot op heden alleen experimenteel). De prijs/prestatie-verhouding van het gebruik van dit soort RS is over het algemeen niet gunstig.

Natuurlijk zullen bestaande luchtfoto's en andere RS-materialen worden gebruikt *ter completering* van, en ter inpassing in satelliet-informatie, maar in het algemeen alleen als ze zonder hoge kosten te verkrijgen zijn of via de opdrachtgever ter beschikking worden gesteld. Zoals reeds is aangestipt, komt het voor dat luchtfoto's helemaal niet beschikbaar worden gesteld, zoals bijvoorbeeld in Pakistan waar alle luchtfoto's militair geheim zijn. Hoge resolutie SPOT is daar dan een ware uitkomst, omdat SPOT zonder restricties te verkrijgen is in Toulouse (Frankrijk).

Perfectie is de vijand van het goede. Bedrijven gaan failliet aan het leveren van perfect werk, terwijl minder dan perfectie goed genoeg zou zijn geweest, voor eentiende van de kosten. Ingenieursbureaus hoeden zich er dan ook voor produkten af te leveren die beter zijn dan is gestipuleerd in de 'terms of reference' (TOR) van een project. Als in het kader van een inventarisatieproject van natuurlijke hulpbronnen een kaartschaal van 1:250.000 wordt gevraagd dan zal Landsat-MSS, en niet SPOT, gebruikt worden als kartografische basis en bron van thematische informatie.

In de volgende paragraaf wordt aan de hand van twee studies het gebruik van RS bij ingenieursprojecten toegelicht. In paragraaf 23.3 wordt ingegaan op de verwachte veranderingen in RS-gebruik bij ingenieursbureaus.

## 23.2 Remote sensing-gebruik tot nu toe

### 23.2.1 Geschiedenis

Reeds 30 jaar lang worden bij ingenieursprojecten luchtfoto's gebruikt voor de extractie van bodemkundige, bosbouwkundige, geologische en cultuurtechnische gegevens. Sinds de lancering in 1972 van Landsat wordt visuele satellietbeeld-interpretatie eveneens min of meer toegepast voor de verkrijging van die gegevens.
De matige resolutie was echter een serieuze restrictie in het effectieve gebruik van die beelden.

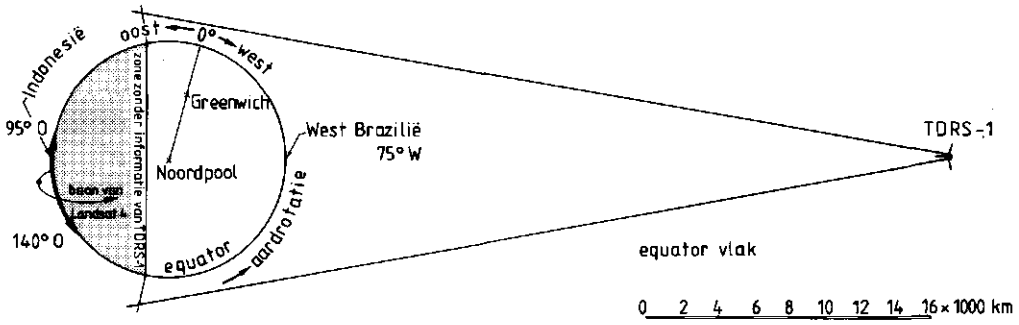
Er zijn tot op heden twee categorieën input van RS in ingenieursprojecten te onderscheiden.

1 De eerste is wanneer RS een integraal en *onmisbaar onderdeel* vormt van het project. Dit is het geval bij monitoring-projecten die bijvoorbeeld gewasgroei over hele continenten in de gaten houden (vergelijk hoofdstuk 18); of bij inventarisaties van natuurlijke hulpbronnen van naties of hele regio's (vergelijk de onderwerpen in de hoofdstukken 21, 22, 25 en 26). Tot nu toe zijn dit projecten waarbij RS-gebruik het meest frequent voorkwam. Een voorbeeld van een dergelijk project is 'Nationwide Survey of Coastal Lands' in Indonesië (paragraaf 23.2.2).
2 De tweede categorie input is tot voor kort minder frequent voorkomend in de advieswereld. Het betreft hier de bijdrage van RS in een *deelaspect* van een project zodat het totaal *efficiënter* wordt. Het soort projecten waar dit vrijwel altijd opgaat zijn die projecten die een component van kartering in zich hebben. Een voorbeeld hiervan is het 'Merauke III Project', tevens in Indonesië (paragraaf 23.2.3).

Beide genoemde projectvoorbeelden met RS-bijdrage worden hieronder kort beschreven.

### 23.2.2 Studie 1

Dit project, genaamd 'Nationwide Survey of Coastal Lands', is een voorbeeld van een project waar RS-gebruik onontbeerlijk is.
Van 1982 tot 1984 (10 mensjaar) heeft Euroconsult een studie door heel Indonesië uitgevoerd teneinde alle kustvlakten (een gebied zo groot als Groot-Brittannië: 24,5 miljoen ha) te inventariseren en op geschiktheid voor landbouwontwikkeling te classificeren. Uiteindelijk werd ongeveer 20% van de oppervlakte geselecteerd als land met ontwikkelingspotentiëel.
Een studie als deze zou, indien uitgevoerd met alleen luchtfoto's ter beschikking, uitgedrukt in mensjaren een veelvoud kosten. Overigens is dit zuiver theoretisch want de bedekking van Indonesië met luchtfoto's is alleen fragmentarisch mogelijk, dus met veel gaten. Bovendien bleek het erg moeilijk de bestaande foto's te pakken te krijgen. Andere RS-materialen, zoals analoge radarbeelden vanwege oliemaatschappijen, experimentele radaropnamen vanuit de ruimte (Space Shuttle SIR-A Experiment) en luchtfotografie vanaf grote hoogte waren slechts incidenteel voorhanden en hebben slechts weinig bijgedragen tot het project.
Satelliet-RS, met name Landsat-MSS, was de aangewezen bron voor thematische en kartografische informatie, die beschikbaar was buiten Indonesië, redelijk recent en van adequate kwaliteit voor het doel waarvoor het gebruikt moest worden.
Landsat-TM van Indonesië is tot op heden niet beschikbaar. Dit komt in de eerste plaats omdat er geen lokaal ontvangststation voor TM-data in de buurt is. In de tweede plaats is de zgn. 'Tracking and Data Relay Satellite' (TDRS-2) die TM-ontvangst wel mogelijk zou maken, afwezig.




**23-1** De situatie met maar één 'Tracking and Data Relay Satellite' voor ontvangst van TM-data. Het papier valt samen met het equator-vlak. Aardstraal en satelliethoogten zijn op schaal getekend. De TM-satelliet kan alleen uitgelezen worden indien deze zich westelijk van ongeveer 67 graden oost en 171 graden west bevindt. Indonesië, onder andere, valt daar buiten.

De geplande TDRS-2 werd verwoest tijdens de ramp van de Challenger. De situatie, gevisualiseerd in figuur 23-1, is tot op heden nog ongewijzigd gebleven. Indonesië valt buiten het bereik van de TDRS-1, zodat ter plaatse geen TM-data ontvangen kunnen worden[1].
Het projectgebied werd bedekt door iets meer dan 100 Landsat-MSS-beelden. Zodra deze beschikbaar waren, werd van de beelden een multitemporele dataset *op film* aangeschaft. Het zou ondenkbaar zijn geweest om al deze beelden (een 150-tal) digitaal te gaan verwerken. Niet alleen zouden de kosten astronomisch zijn geweest, maar ook was de benodigde mate van detail dermate globaal (kaartschalen van 1:250.000 tot 1:1000.000) dat digitale beeldverwerking in een situatie als deze een overdreven beeldanalyse zou betekenen. *Visuele interpretatie* bleek de juiste weg.
Omdat het zulke grote aantallen van Landsat-beelden betrof, was het relevant de goedkoopste methode van kleurcomposieten-produktie te gebruiken. De techniek van '*diazo-drukken*' bleek het meest kosten-effectief te zijn, met – binnen de beperkingen van de techniek – uitstekende resultaten. Diazo-drukken is gebaseerd op het principe van het contactafdruk-procédé op gekleurde, transparante film. Deze film is geprepareerd met een bestendige diazoverbinding. Diazo-films zijn beschikbaar in diverse kleuren, o.a. geel, magenta en cyaan. Materiaal met deze kleuren kan gebruikt worden voor het maken van kleurencomposieten door de transparanten op elkaar te leggen. Voor een fractie van de kosten van digitale beeldverwerking kon uit de diazo-beelden op adequate wijze kartografische en thematische informatie worden geëxtraheerd (Langeraar & Spijkerman, 1986).

[1] Noot van de redacteur: Begin oktober 1988 slaagde de NASA er alsnog in met de Space Shuttle een TDRS-satelliet in de ruimte te brengen.

23.2.3 Studie 2

Dit project, genaamd het 'Merauke III Project', is een voorbeeld waarbij het gebruik van RS een relatief klein onderdeel van het project is, maar efficiëntieverhogend heeft gewerkt.
Gedurende de afgelopen vijf jaar heeft Euroconsult aanzienlijke ervaring opgedaan in rurale ontwikkelingsplanning in Zuidoostelijk Irian Jaya, Indonesië, en heeft daar ongeveer een half miljoen hectare gekarteerd. Thematische en topografische kaarten werden geproduceerd op een schaal van 1:20.000, hetgeen geleid heeft tot het ontwerp van gedetailleerde plannen voor de regio.
Voordat de studie aanving heeft de Indonesische regering speciaal voor dat doel luchtfoto's laten opnemen op een schaal van 1:20.000 en deze werden ter beschikking gesteld. Deze foto's moesten dienen niet alleen als basis voor thematische informatie maar ook als kartografische basis. Het probleem was dat de geometrische kwaliteit van de luchtfoto's slecht was, met grote 'pitch', 'roll' en schaalvariaties (paragraaf 16.2.1 en figuur 16-2). Bovendien waren de raaien (opengekapte paden) in de bosgebieden, waarlangs de veldwaarnemingen gedaan werden, niet zichtbaar want de luchtfoto's waren gevlogen voordat de raaien gekapt waren. De gerenommeerde gleufmallen-methode om in het veld luchtfoto's te converteren tot een min of meer kartografisch verantwoorde kaart ging dus niet op, mede omdat er ook nauwelijks vaste punten (paspunten) in het terrein waren.
Dit had als zeer hinderlijk gevolg dat veldwaarnemingen niet gerelateerd konden worden aan de luchtfoto-interpretatie. Met geen mogelijkheid kon gezegd worden op wèlke luchtfoto de waarneming gedaan was, laat staan waar op de luchtfoto. Pas nadat de topografen veel later uit het bos terugkwamen met een kaart met daarop de gekapte lijnen, kon met veel moeite worden gereconstrueerd hoe de foto's lagen ten opzichte van de raaien. Op die manier werden aanvankelijk de veldwaarnemingen gelokaliseerd. Aangezien deze kaarten echter zeer veel later ter beschikking kwamen moest een andere oplossing gevonden worden. Landsat-MSS van het Australische ontvangststation in Alice Springs gaf die oplossing. Dit station kon deelvergrotingen in false colour op de schaal 1:50.000 leveren van de benodigde Landsatbeelden. Op deze afbeeldingen enerzijds en op elke luchtfoto anderzijds konden nu overeenkomstige terreinpunten herkend worden. Deze punten dienden als paspunten voor het met een zgn. optische pantograaf tot dekking brengen van beide soorten beelden, waarbij het Landsatbeeld steeds als maatgevend werd beschouwd, m.a.w. als kartografische basis. Op deze manier werd gebruik gemaakt van zowel de hoge geometrische nauwkeurigheid over grote gebieden van gewoon 'bulk-processed' Landsat-MSS materiaal als de prima lokale detailinformatie van de beschikbare luchtfoto's. Aldus konden basiskaarten op de schaal 1:20.000 gemaakt worden met een x,y-positienauwkeurigheid over het gehele kaartblad van 0,4 Landsat-pixelgrootte (ongeveer 30 m). Dit is geverifiëerd door deze kaarten te vergelijken met planimetrische polygoonkaarten van hoge precisie, geproduceerd door de topografen (Langeraar, 1986). Benny (1981) komt ook uit op een

positienauwkeurigheid van 0,4 pixel.
Een kaart met een schaal van 1:20.000 met een precisie van 1,5 mm op de kaartschaal, mag een resultaat genoemd worden dat met de doelstellingen van het project overeenkomt, de omstandigheden en vooral de locatie van het project in beschouwing nemend. Dit temeer gezien het feit dat interpretatielijnen al gauw 2 mm dik zijn, gerekend naar de onscherpte van de thematische beeldinterpretatie.

## 23.3 Remote sensing-gebruik vanaf heden

Met de nieuwe generatie satellieten is het mogelijk geworden om RS te gaan toepassen op gebieden van zo'n 10.000 ha grootte. Beeldschalen van 1:20.000 (SPOT panchromatisch) behoren tot de mogelijkheden zonder noemenswaardig verlies aan scherpte (pixels 0,5 mm). Dit geeft heel wat meer potentiëel voor gebruik in ingenieursprojecten. Met name valt te denken aan:

a de kartografische productie van basiskaarten, met het oog op de *recente topografische* (geometrische) aspecten van geografische informatie;
b de weergave op die basiskaarten van *thematische* aspecten van geografische informatie;
c het constateren en het weergeven van geografische *veranderingen* (dynamiek van het landschap);
d het verschaffen van *statistische* informatie (arealen, biomassa, etc.).

Het aantal projecten van de eerste categorie (zie paragraaf 23.2.1) zal constant blijven groeien. Bovendien, het aantal studieprojecten dat gaat over relatief kleine oppervlakten (tweede categorie), waar het gebruik van RS de efficiëntie verhoogt, zal een stuk sneller stijgen dan het aantal projecten die een heel land bestrijken.
Nu meer gedetailleerd geobserveerd kan worden met SPOT en Landat-TM, moet ook alle informatie uit de data gehaald kunnen worden die erin opgeslagen is om inderdaad een wezenlijke bijdrage te leveren aan bovenstaande projecten. Analoge diazo-verwerking of standaard-filmprodukten zijn hiervoor niet meer toereikend. *Digitale verwerking* van de RS-beelden is daarom nu een vereiste geworden.

## 23.4 Literatuur

1 Benny, A.H., 1981. Automatic relocation of ground control points in Landsat imagery. In: Proc. Matching Remote Sensing Technologies and their applications, The Remote Sensing Society, 16-18 Dec.
2 Langeraar, W.D. & A.J.C. Spijkerman, 1986. Use of remote sensing images for resource surveys in lowlands. In: Proc. of the Lowland Symposium, Jakarta, August 1986.
3 Langeraar, W.D., 1986. Airphoto map control with Landsat – an alternative to the slotted templet method. In: Proc. 7th Symp. on Remote Sensing for Resources Development and Environmental

Management, ISPRS, Comm. VII, Enschede, August 1986, blz. 47-50.
4 Euroconsult & DHV, 1987. Internationale commercialisering remote sensing. Interim rapport. BCRS-rapport no. 87-14, 30 blz.

# Thema 7 Remote sensing en de inventarisatie en monitoring van natuurlijke vegetatie

Hoewel in (semi-)aride zones in de wereld uitgestrekte gebieden met relatief homogene vegetatietypen voorkomen, worden natuurgebieden in het algemeen gekenmerkt door een grote mate van diversiteit van de aanwezige vegetatie. Dit geldt zeker in vergelijking met de monocultuur in landbouwgebieden. Ook in Nederland is dit het geval. De vegetatiekundige beschrijving van natuurgebieden aan de hand van de RS-opnamen stelt daarom specifieke eisen aan de verwerkingsmethode. Bij de bespreking van de inzet van RS ten dienste van de natuurbescherming in Nederland wordt een onderscheid aangelegd tussen fysisch-georiënteerde en fenomenologische denkwijzen met het oog op het menselijk handelen en de besluitvorming.
Voor het volgen van veranderingen in natuurgebieden – indicaties vaak van veranderingen in het milieu – kan RS van groot belang zijn. Zowel voor Nederland als voor (semi-)aride gebieden wordt besproken in hoeverre RS-technieken kunnen bijdragen aan de informatiebehoefte, met een aanduiding welke kwaliteitseisen en welke opnamefrequenties gevraagd zullen worden.
Ook blijkt duidelijk het complementaire karakter van de verschillende RS-technieken m.b.t. de inventarisatie en monitoring van natuurlijke vegetatie.

# 24 Remote sensing ten dienste van de natuurbescherming in Nederland

G. van Wirdum

## 24.1 Natuurbescherming

De '*natuurtechniek*' is als instrument van de *natuurbescherming* gericht op de bescherming van de natuur tegen de invloeden van allerhande technische bezigheden van mensen. Als criterium voor het functioneren van de natuur geldt het spontaan voorkomen van wilde organismen. Natuurbescherming wordt bereikt middels grondgebruik; wanneer dit alleengebruik betreft, spreken we van *natuurreservaten*. Hoewel in ons land de *agrarische techniek* en de natuurtechniek door hetzelfde ministerie worden behartigd, zijn er toch grote verschillen in object, werkwijze en voorwaarden (vgl. Van Wirdum, 1986); dit is in tabel 24.1 aangegeven.

Tabel 24.1 Enkele verschillen tussen de agrarische en de natuurtechniek

| onderwerp | agrarische techniek | natuurtechniek |
|---|---|---|
| inwendige variatie op perceelsniveau | zo klein mogelijk (één gewas, één behandeling) | groot (verschillende soorten met verschillende eisen) |
| terreinbeschrijving | gemiddelden | patroonkenmerken, frequentieverdelingen |
| beoordelingscriterium | opbrengst droge stof | voortbestaan bedreigde soorten |
| beheer middels | direct werkzame factoren (fysiologie)/lokaal | indirect werkzame factoren (ecologie)/regionaal |

Ook ten opzichte van de '*milieutechniek*' moet de natuurtechniek goed worden onderscheiden. In beperkte zin is *het milieu* de werkzame omgeving van een bepaald organisme, bijvoorbeeld de mens. 'Natuurlijk milieu' is dan natuur in het milieu van de mens en *indicator* voor de toestand van dat milieu. Een theoretisch elegantere benadering van de milieutechniek, die ook wel tegemoet komt aan de drijfveren die men hiervoor kan herkennen, kent de milieutechniek de taak toe de omgeving in algemene (dus niet soortsgebonden) zin te beschermen tegen de invloeden ('milieu-effecten') van het bedrijven van overige technieken, en wel zodanig dat die omgeving daarvoor geschikt blijft (Van Wirdum, 1982, 1986).
Fysiologisch is natuurbescherming niet strikt noodzakelijk; de betekenis ervan wordt in de politiek toegekend en ieder heeft daar zijn eigen argumenten voor. De betekenis van gebieden en grondgebruik voor de natuurbescherming kan echter, net als in de landbouw, in principe wèl objectief worden vastgesteld.

Remote sensing kan worden ingeschakeld bij:
- het *achtergrondsonderzoek*: wat hebben organismen ons te vertellen, wat voor eisen stellen ze aan hun omgeving, en hoe beïnvloeden zij die omgeving eventueel zelf weer? (indicatoren, normen);
- de *inventarisatie* ten behoeve van planning en beheer: wat komt waar voor? (inventarisatie, monitoring);
- de *informatie-overdracht*: mits zorgvuldig toegepast kan beeldmateriaal bewijskracht en interpretaties aan andere gegevens toevoegen en deze informatie toegankelijk maken voor de menselijk-organische 'beeldverwerking', die op een zeer directe wijze verbonden is met de menselijke besluitvorming (maatregelen, evaluatie).

Potentiële gebruikers zijn diverse overheidsdiensten en particuliere natuurbeschermingsorganisaties, alsmede ingenieursbureaus die van deze instellingen opdrachten aannemen. In het kader van de wetgeving op het terrein van de milieu-effect-rapportage kunnen ook andere particuliere instellingen hiermee te maken krijgen, vooral wanneer hun voornemens zich over grote gebieden uitstrekken. Men kan nog slechts van een aarzelend begin van operationeel gebruik spreken.

## 24.2 De objecten

Op de beelden die in dit toepassingsveld gebruikt worden zijn bodem, water en vegetatie de belangrijkste beeldbepalende objecten. In bijzondere gevallen kunnen ook dieren of hun bouwwerken of invloeden expliciet zichtbaar worden. De natuurbescherming is geïnteresseerd in het voorkomen van *indicatieve soorten* of op grond daarvan onderscheiden vegetatietypen (associaties) die zelden rechtstreeks de waarde van beeldpunten beïnvloeden, en moet daarom een relatie leggen met bijvoorbeeld de structuur van de vegetatie. Onafhankelijk van RS worden wel vegetatietypen onderscheiden op grond van dominante

soorten en vegetatiestructuur ('droge heide', 'dicht riet'), of ook wel zgn. *ecotopen*, terreingedeelten die ruimtelijk begrensd zijn en als inwendig homogeen beschouwd worden ('heideveld', 'rietveld'). Deze systemen bewijzen hun waarde bij de RS niet zozeer als alternatief voor het letten op minder in het oog springende kenmerken, dan wel als hulpmiddel om het terrein op te delen in een aantal afzonderlijk nader te onderzoeken eenheden (stratificatie, segmentatie). Om vegetatiestructuur te kenmerken heeft men meer dan één beeldpunt nodig.
De vegetatiestructuur en dominante soorten, die op de beeldinhoud van invloed zijn, maken het vaak wel mogelijk een uitspraak te doen over de *waarschijnlijkheid van het voorkomen* van de minder algemene soorten. De onzekerheid in aldus gefundeerde uitspraken kan worden verkleind door nog andere in de beelden zichtbare terreinkenmerken in aanmerking te nemen of door aanvullend veldonderzoek te doen (Verschoor, 1978).

## 24.3 Objectkenmerken en beeldinhoud; fysische en fenomenologische denkwijzen

De ontwikkeling van het gebruiksgereedmaken van RS-technieken voor de natuurbescherming is het verst gevorderd in het optische venster, van ultraviolet tot en met nabij-infrarood. Bij het ITC (International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences) en het RIN (Rijksinstituut voor Natuurbeheer) is een geformaliseerde methode van *vegetatiekartering* met behulp van luchtfoto's in gebruik (Zonneveld, 1972). Hierbij worden géén fysische veronderstellingen gedaan over de wijze waarop objecten de kenmerken van de beeldpunten beïnvloeden. Wèl wordt verondersteld dat (ruimtelijke) *patronen* van kleur- of grijstint-verschillen in het beeld meer dan toevallig overeenkomen met relevante patronen van verschillen in het terrein. Verschillende fasen in de methode zouden gesynchroniseerd kunnen worden wanneer, (1) delen van de foto-interpretatie digitaal kunnen worden versneld (zie paragraaf 24.4), en, (2) terreingegevens snel in digitale vorm in verband gebracht kunnen worden met beelden (de basisgedachte voor de uitvoering ervan wordt gegeven in de hoofdstukken 16 en 17). Een dergelijke synchronisatie zou een efficiëntere veldwerkstrategie mogelijk maken (van Wirdum, 1983).
Onder de *beeldkenmerken* kan onderscheid gemaakt worden tussen per beeldpunt (pixel) en tijdstip gedefiniëerde kenmerken, en kenmerken waarvan de betekenis mede afhankelijk is van de kenmerken van andere beeldpunten, bijv. naastliggende, of van hetzelfde beeldpunt op een ander tijdstip (zie ook hoofdstuk 13). Het meeste gebruik van digitale methoden is gebaseerd op de analyse van per tijdstip en beeldpunt gedefiniëerde kenmerken. Bij de menselijk-organische 'beeldverwerking' wordt juist de nadruk gelegd op *patroon* en *verandering*. Deze tegenstelling is niet bijzonder voor de toepassing van RS in de natuurbescherming, maar patroon en verandering zijn daar wel erg essentiëel.

Het bovenstaande houdt verband met het type modellen dat in de natuurbescherming gebruikt wordt. Een *fysisch bepaald model* is gebaseerd op causale relaties die in principe met natuurkundige formules kunnen worden beschreven. Meestal worden niettemin proefondervindelijke formuleringen gegeven, waarbij waarschijnlijkheidsmarges passen. De ontwikkeling van de kleureninfrarood-fotografie en het gebruik van een vegetatie-index zijn gebaseerd op een fysische redenering die een verband legt tussen enkele aspecten van de hoeveelheid vegetatie en de reflectie in het rode en nabij-infrarode golflengtegebied (zie paragraaf 9.5.2). Hierdoor kunnen bijv. gewasmodellen en beelden in onderlinge samenhang worden gebruikt.

Menselijk handelen en besluitvorming hebben vaak betrekking op zaken die ontegenzeggelijk verband met elkaar houden, hoewel wij dat verband nog niet fysisch kunnen definiëren. Hier kan gebruik gemaakt worden van *fenomenologische modellen*, waarin formele, (systeem) theoretische redeneringen in de plaats treden van fysische. Men kan die 'anticausaal' (Waldhauer, 1982) noemen, in die zin, dat de oorzaken uit hun gevolg worden afgeleid, lacunes in de fysische basiskennis invullend met 'black boxes'. Men spreekt dan ook wel van een 'teleologische' systeembenadering: redenerend vanuit iets dat als doel wordt beschouwd, ongeacht of het ook in menselijke zin 'bedoeld' is. Beelden kunnen een wezenlijk onderdeel van fenomenologische benaderingen zijn. Het is echter belangrijk zorg te dragen voor een begripsmatig juiste afbeelding en, waar mogelijk, een statistische beschrijving van de relaties. In onze wetenschapscultuur is geen plaats voor fenomenologische benaderingen die het natuurkundige wereldbeeld volledig negeren, en zeker niet wanneer een fysisch gedefiniëerd waarnemingssysteem gebruikt wordt. Het 'Ik zie het toch zelf'-argument is op RS-beelden niet van toepassing, hoeveel deze als beeld ook lijken op de beelden van onze intuïtieve belevingswereld.
Voorbeelden van fenomenologisch onderzoek zijn op het gebied van de natuurbescherming te vinden in de ontwikkeling van het begrip 'milieudynamiek' en de theorie met betrekking tot grenzen (Bakker, 1979; Van Leeuwen, 1967; Van Wirdum, 1985). Ook de oorspronkelijke systeemtheorie steunt in hoge mate op een fenomenologische benadering.

De *per beeldpunt* gedefiniëerde parameters in de digitale beeldverwerking worden gevormd door de zogenaamde spectrale signatuur van het object (paragraaf 13.2). Deze spectrale waarden vormen als waarnemingsvector te zamen het *spectrale* patroon behorende bij dat beeldpunt (zie ook hoofdstuk 1). Zoals reeds is opgemerkt staan deze in fysische relatie tot ondermeer de hoeveelheid vegetatie. Men kan hierdoor de beeldinhoud in zekere zin begrijpen, ordenen en classificeren naar de waarde van zo'n objectkenmerk en kent hiertoe eventueel aan elk beeldpunt een nieuwe kenmerkvector toe, die in een eindproduct bijv. door een kleur kan worden weergegeven. Naast

transformaties op basis van fysisch afgeleide criteria, zijn ook vele statistische procedures voorhanden. In veel gevallen wordt hierbij de transformatieregel afgeleid uit in hetzelfde beeld aanwezige informatie. Hoewel de transformatie dus voor ieder beeldpunt volgens dezelfde regels plaatsvindt, zijn deze regels zelf wel afhankelijk van de beeldinhoud. Op deze wijze kan het wèl of juist niet in een trainingsset opnemen van beeldpuntjes van een bepaald objecttype, ook al is men in dat type zelf niet geïnteresseerd, van grote invloed zijn op het resultaat. Behalve spectrale patronen kunnen ook *ruimtelijke* patronen aan de herkenning van objecten bijdragen. In het geval van de patroon- of proces-afhankelijke kenmerken wordt een beeldpunt met een bepaalde spectrale signatuur verschillend geïnterpreteerd al naar gelang bijv. de *omgevende beeldpuntjes* verschillen (paragraaf 13.3). Bij de conventionele foto-interpretatie speelt een dergelijke *context* een grote rol. Er is in principe een omvangrijk terrein van bewerkingsmogelijkheden beschikbaar, waaruit het vaak moeilijk kiezen is zolang men geen beoordelingscriteria heeft opgesteld. In een gegeven context wordt een individueel beeldpunt eenduidig een nieuwe kenmerk-vector toegewezen. Omgekeerd zijn er echter teveel variabelen om de oorspronkelijke kenmerkvector te reproduceren. Men is dus in hoge mate aan de transformatie 'overgeleverd' en doet er meestal goed aan deze eerst toe te passen nadat de relatie tussen de signatuur van elk individueel beeldpunt en wat dit op de grond voorstelt geoptimaliseerd is. Digitale beeldverwerking kan ook gebruikt worden om niet in de eerste plaats de objecten zelf, maar een bepaalde *samenhang tussen de objecten* zichtbaar te maken, bijv. successie of gradiënten. Men verwacht bijvoorbeeld een patroon met een richtingscomponent die in verband gebracht kan worden met oorzakelijke processen of gradiënten.
Een nuttige per beeldpunt gedefiniëerde transformatie waarbij een externe context wordt gebruikt, is de bepaling van de gelijkenis met enkele 'standaardobjecten'. Uit de foto-interpretatie is de methode van vergelijking goed bekend. Daar probeert men vaak voor elk type object een stukje beeld als vergelijkingsstandaard te vinden. Dit is ook in digitale beelden mogelijk. Men definiëert dan 'met de hand' (met de cursor) in grafische afbeeldingen van de beeldruimte (al dan niet na filteringen) betekenisklassen waaraan men een waarde (symbool, kleur) toekent. Rekenkundige *similariteitsmethoden* hebben echter aan twee of drie vergelijkingstypen, mits goed gekozen, genoeg om de beeldelementen te ordenen. Eventuele patrooneigenschappen kunnen nu uit het similariteitsbeeld worden afgeleid.

## 24.4 Automatisering van de foto-interpretatie

Zojuist is een vergelijking gemaakt met de ver ontwikkelde traditionele foto-interpretatie. Hier past een opmerking over de mogelijkheid digitale technieken daarop te baseren. Ten eerste kan gedacht worden aan het inschakelen van computers op het terrein waarop deze het krachtigst zijn: de administratieve serviceverlening. Een computersysteem kan

'onthouden' welke beeldelementjes eerder een bepaalde interpretatie kregen, respectievelijk qua spectrale signatuur veel op een te interpreteren beeldgedeelte lijken, en zulke beeldelementjes ter vergelijking aandragen. Ten tweede, en in vervolg hierop, kan gedacht worden aan 'kennissystemen', die uit de door de interpreteur tot nu toe genomen beslissingen trachten formeel af te leiden waarop die gebaseerd zouden kunnen zijn. Deze systemen leren dus als het ware van de interpreteur en kunnen op grond daarvan ook zelf beslissingen voorstellen en, na gebleken bekwaamheid, nemen (zogenaamde 'expert systems', zie ook paragraaf 13.4). Op dit gebied bestaat in het vlak van de RS nog vrijwel niets en men moet constateren dat de digitale beeldverwerking zich onafhankelijk van de foto-interpretatie heeft ontwikkeld.

## 24.5 Beeldverwerving

Er zijn verschillende situaties waarin waarneming vanuit de lucht met het ongewapend oog reeds van groot nut kan zijn (vergelijk paragraaf 25.5.3). De menselijk-organische beeldverwerking (die 'real time' werkt, vergelijk hoofdstuk 1) is meestal goedkoper en lang niet altijd minder betrouwbaar dan een scheiding in beeldverwerving en digitale beeldverwerking.

Veel resultaten van digitale beeldverwerking laten zien dat de gebruikte informatie vaak reeds voor het grootste deel in een panchromatische zwart-wit luchtfoto aanwezig is. Voor spectrale informatie heeft men, binnen het terrein van de *luchtfotografie*, de keuze uit een aantal kleuremulsies en filters, naast de mogelijkheid zwart-wit-beelden met kleurfilters op te nemen (zie hoofdstukken 4 en 6). Er is een scala aan technieken beschikbaar voor het maken van *kleurcomposities* uit zulk basismateriaal. Color additive viewers (paragraaf 4.3 en Supplement 2) geven de mogelijkheid de compositie te beoordelen en te verbeteren voordat die in een afdruk wordt vastgelegd.

Wanneer digitale verwerking van belang is om de relatie tussen de beeldinhoud en het afgebeelde beter te begrijpen en te formuleren in beperkte beelduitsneden is *digitalisatie van een deel van het luchtfotografisch materiaal* voldoende. Wanneer aan de ruimtelijke resolutie-eisen met fotografie wèl, maar met multispectrale aftasting nauwelijks of niet kan worden voldaan, is eventueel *volledige digitalisatie* van foto's mogelijk. De vaak genoemde winst in spectrale en radiometrische resolutie bij multispectrale aftasting is lang niet altijd aanwezig en weegt overigens vaak niet op tegen het verlies aan ruimtelijke resolutie. De natuurbescherming is vaak in fijnkorrelige texturen en patronen geïnteresseerd.

Vooral wanneer men een groot gebied moet onderzoeken, en in het bijzonder wanneer dit bij herhaling nodig is, zijn *satellietbeelden* in het voordeel. Dit voordeel wordt versterkt doordat geen vluchtorganisatie binnen het project nodig is, hetgeen, vooral in gebieden waarvan standaard luchtfotografisch materiaal niet of moeilijk te verkrijgen is, een zeer grote tijdwinst met zich mee kan brengen. Van alle gebieden in

Nederland zijn echter recente zwart-wit luchtfoto's op een schaal van ca. 1:20.000 voorhanden, en vaak geldt dit ook voor grotere schalen en kleurenfotografie.
Wanneer een bepaald beeld niet voor het gestelde doel bruikbaar lijkt, valt te overwegen of toevoeging van een soortgelijk beeld uit een ander seizoen niet effectiever is dan het zoeken naar geavanceerder opnametechnieken.

## 24.6 Beeldverwerking

In de RS wordt ingegaan op het achterhalen van een verband tussen wat op het beeld voorkomt en wat door de sensor is afgebeeld. Het originele RS-beeld wordt dan derhalve als een gegevenheid beschouwd. *Eindbeelden* kunnen echter ook een *logische conclusie* overdragen. Bij het toepassen van een classificatiemethode doet men dit door rechtstreekse kleurtoekenning. In veel andere gevallen is bijzondere aandacht vereist voor de afbeeldingswijze. Vaak worden teveel kleuren of grijstonen aan onbelangrijke beeldaspecten verspild. Ook moet men zich goed vergewissen van de resolutie van de kleurcodering in het eindbeeld. Wat in de kenmerkruimte getalmatig onderscheiden kan worden, belandt dikwijls toch in dezelfde kleurklasse, gezien de beperkte mogelijkheden voor visueel waarneembare onderscheiding tussen grijstonen en tussen kleuren.

Als voorbeeld van beeldverwerking met een betrekkelijk hoge mate van fysische definitie kan de beschikbaarheid van voedsel op natuurlijke kwelders voor rotganzen (Bijlsma, 1988) genoemd worden. Plaat XII geeft hiervan een illustratie.

Als voorbeeld van beeldverwerking met een sterk fenomenologisch aspect kan de vegetatiezonering in een moerasgebied (Verschoor, 1978; Van Wirdum, 1977) genoemd worden. Dit wordt in Plaat XIII geïllustreerd.

## 24.7 Conclusies en perspectieven

a In tegenstelling tot monocultures (zoals landbouwgewassen) vertoont (half)natuurlijke vegetatie gewoonlijk een grote diversiteit in samenstelling en in ruimtelijke opbouw. Hierdoor is voor de RS-beeldanalyse een andere aanpak noodzakelijk.
b Door het synoptisch karakter van RS zijn ruimtelijke vegetatiepatronen in het algemeen goed zichtbaar in RS-beelden.
c Het verband tussen de beeldinhoud en de objecten in de natuurbescherming (levensgemeenschappen; indicatieve soorten; ecotopen; oorzaken van verandering) is echter moeilijk fysisch causaal in een verklarend model te vatten. Zeker in eerste aanzet is dan ook de opstelling van *fenomenologisch* geaarde modellen de aangewezen weg voor de RS-beeldanalyse.

d Luchtfotografie is, mede dankzij fijnheid van detail en de directe, analoge weergave, zeer waardevol voor de nationale natuurbescherming. Voor een optimaal gebruik dient digitalisatie van luchtfoto's te worden bevorderd.

e Om digitaal opgenomen RS-beelden optimaal te kunnen visualiseren ('verbeelden') is onderzoek naar de herkenning van ruimtelijke patronen en een evaluatie van beeldverwerkingsprocedures dringend gewenst teneinde zinvolle toepassingen mogelijk te maken in het natuurbeschermingsvlak.

f De ontwikkeling van de beeldinterpretatie voor de natuurbescherming zal gericht dienen te worden op *digitale* beeldverwerkingsprocedures; textuuranalyse en beeldanalyse van beeldsegmenten in plaats van afzonderlijke pixels; concepten voor de relatie tussen RS en GIS annex computermodellen voor de natuurfactoren; doelgerichte, deels instrumenteel, veldwerkstrategie ter ondersteuning van de beeldanalyse.

g Wanneer de genoemde problemen opgelost kunnen worden, dan kunnen krachtige en controleerbare argumenten worden gegeven voor het *beleid*.

h Alhoewel naar economische maatstaven gerekend met RS weinig te besparen valt in het natuurbeschermingsonderzoek zelf (het budget is al zo beperkt) is *stimulering* van het gebruik van RS ten behoeve van natuurbeschermingsactiviteiten in den brede wel zeker gewenst in het licht van de kennis- en informatiebehoefte bij diverse potentiële gebruikers.

i Of deze stimulering ook daadwerkelijk zal gebeuren hangt er van af of we, nationaal gezien, gemeenschappelijk de moed hebben RS niet in de eerste plaats te gebruiken om dié vormen van landgebruik die de grootste bedreiging voor natuur en milieu vormen te intensiveren, maar om RS en GIS te optimaliseren ten behoeve van een *integraal beleid*.

## 24.8 Literatuur

1 Bakker, P.A., 1979. Vegetation science and nature conservation. In: M.J.A. Werger, The study of vegetation, blz. 247-288, Junk, The Hague.

2 Van Leeuwen, C.G., 1967. Tussen observatie en conservatie. In: 10 jaren RIVON, blz. 38-58. RIVON-verhandeling 4, Zeist.

3 Bijlsma, R.J., 1988. Classification and quantification of vegetation in spring staging areas of brent geese Branta bernicula bernicula on the basis of digitized colour infrared photography. In Annual Report 1987. Research Institute for Nature Management (RIN), Arnhem/Leersum/ Texel; blz. 86-92.

4 Van Wirdum, G., 1977. Natuurgebieden Noord-West Overijssel. In: N.J.J. Bunnik e.a., Onderzoek naar de toepassingsmogelijkheden van multispectrale scanning. NIWARS publ. nr. 44, blz. 314-333.

5 Van Wirdum, G., 1982. The ecohydrological approach to nature

protection. RIN, Annual Report 1981, blz. 60-74.
6 Van Wirdum, G., 1983. Application of remote sensing in surveys performed for nature management. RIN, Annual Report 1982, blz. 19-22.
7 Van Wirdum, G., 1986. Water-related impacts on nature protection sites. TNO Committee on hydrological Research, Proceedings and Information 34, blz. 27-57.
8 Verschoor, A., 1978. Vegetatiekartering met behulp van false-colour luchtfoto's in het CRM-reservaat 'De Weerribben' (N.W.-Overijssel). Intern Rapport Hugo de Vries-Laboratorium, UvA, nr. 56.
9 Waldhauer, F.D., 1982. Feedback. J. Wiley & Sons, Inc., New York. 651 blz.
10 Zonneveld, I.S., 1972. Textbook of photo-interpretation, Vol. VII, Chapter VII.4, Land evaluation and land(scape) science. ITC, Enschede, 106 blz.

Documentatie

# 25 Remote sensing van natuurlijke vegetatie in (semi-) aride gebieden

D.C.P. Thalen

## 25.1 De (semi-)aride gebieden op aarde

Een groot deel van het landoppervlak van de aarde valt in de zogenaamde *semi-aride* en *aride* (droge) gebieden. De afbakening van deze gebieden hangt af van de criteria die worden gebruikt. In de meeste gevallen betreft dit klimaatgegevens, maar ook informatie gebaseerd op de bodem, de vegetatie en drainage is hiervoor gebruikt. Bij de klimaatgegevens gaat het meestal om classificaties op grond van temperatuur en neerslag, dikwijls samengebracht in een 'index of aridity'. Dzerdzeevski (1958) noemt er 19. Veel gebruikt is de classificatie van Meigs (1953) op grond van de index van Thornthwaite. Deze indeling leidt tot de oppervlakten gegeven in tabel 25.1. Op grond van deze en andere schattingen kan worden gesteld dat een derde tot de helft van het landoppervlak van de aarde ligt in de aride gebieden in de breedste zin van het woord.

Tabel 25.1 Oppervlakte van (semi-)aride gebieden op aarde (naar Meigs, 1953)

| klimaatszone | oppervlakte ($\times 10^6$ km$^2$) | deel van het landoppervlak (in %) |
|---|---|---|
| semi-aride | 21,1 | 15,9 |
| aride | 21,8 | 16,3 |
| extreem aride | 5,8 | 4,3 |
| totaal (aride) | 48,7 | 36,5 |

De geografische ligging van deze gebieden (vgl. Thalen, 1979) is globaal te omschrijven als 'rond de keerkringen' met een veel groter deel ten noorden dan ten zuiden van de evenaar, mede omdat de hoeveelheid land op het noordelijk halfrond veel groter is.

Het zou te ver voeren hier in te gaan op de oorzaken van de mate en de verspreiding van de ariditeit. Hiervoor kan naar de handboeken worden verwezen.

## 25.2 De vegetatie van (semi-)aride gebieden

Het overgrote deel van de aride gebieden heeft een lage tot zeer lage bevolkingsdichtheid. Van intensief landgebruik kan alleen sprake zijn op plaatsen waar extra water beschikbaar is voor irrigatie: langs rivieren of op plaatsen waar voldoende (diep, soms fossiel) grondwater kan worden gewonnen. Afgezien van deze plaatsen en rond bevolkingscentra is er over het algemeen sprake van een (semi-)*natuurlijke vegetatie* die meer of minder is gedegradeerd door overexploitatie van mens en dier. Hoewel de vegetatie van aride gebieden een enorme variatie vertoont in termen van soortensamenstelling en structuur, zijn toch wel enkele meer algemene karakteristieken te geven die van belang zijn bij een beschouwing over de bruikbaarheid van RS-technieken.

a Er is dikwijls sprake van zeer *uitgestrekte gebieden* met relatief *homogene vegetatietypen* of van *karakteristieke combinaties* van typen, in het laatste geval bepaald door geomorfologie en bodem.
b De permanente (overjarige) vegetatie heeft een *lage bedekkingsgraad*, met uitzondering van vegetaties in lokale depressies waar zich aflopend water kan verzamelen.
c Na de relatief (in tijd en intensiteit) onvoorspelbare regenval treedt een *korte opbloei* op van de vegetatie, vooral van efemeren (dit zijn zich slechts zeer kort handhavende planten).
d Onder bepaalde omstandigheden is er sprake van een *samenspel* van overjarige soorten en van annuellen (eenjarigen), waarbij bodem en neerslag de bepalende factoren zijn.
e De vegetaties zijn *kwetsbaar* en een eenmaal zwaar aangetaste of verdwenen vegetatie herstelt zich niet of slechts zeer langzaam, mede als gevolg van optredende bodemerosie.

De natuurlijke vegetatie van aride gebieden heeft, zoals in meerdere of mindere mate alle natuurlijke vegetaties, voor de mens twee hoofdfuncties: (1) zij kan dienen als *indicator* voor omstandigheden waarvan kennis op een of andere wijze voor de mens van belang is, bijvoorbeeld van de bodem in verband met productiemogelijkheden, en (2) zij vormt een (zeer belangrijke) *natuurlijke hulpbron* op zich. Op deze punten wordt hieronder kort ingegaan.

## 25.3 De vegetatie als indicator en als natuurlijke hulpbron

### 25.3.1 Indicatorwaarde

Onder *natuurlijke vegetatie* verstaan we de vegetatie die zich op een groeiplaats spontaan heeft gevestigd, onafhankelijk van de mate waarin die groeiplaats door de mens is beïnvloed. Waarnemingen aan deze natuurlijke vegetatie kunnen belangrijke informatie verschaffen over enerzijds abiotische milieufactoren, bijvoorbeeld gerelateerd aan de kwaliteit van water, bodem en lucht, anderzijds over het recente gebruik

van de vegetatie door mens en dier. Voor een argumentatie waarom gebruik te maken van biologische indicatie, ook als het gaat om fysisch en chemisch meetbare factoren, en voor beperkingen van de bio-indicatie zij verwezen naar Zonneveld (1984).
Verschillende karakteristieken van de vegetatie kunnen een indicatieve waarde hebben. Indien een vegetatie voorkomt – het afwezig zijn van vegetatie kan zeker in de aride gebieden worden opgevat als een indicatie op zich – kan daarbij aan de volgende zaken worden gedacht:

a de *floristische samenstelling* (= voorkomende soorten),
b de *structuur* (= ruimtelijke opbouw),
c het spectrum van *levensvormen* (= genotypische, gemakkelijk waar te nemen, morfologische karakteristieken die een aanpassing zijn aan het milieu, vgl. Raunkiaer, 1937; Mueller Dombois & Ellenberg, 1974; en speciaal voor aride gebieden Leistner, 1967).

Slechts in uitzonderingsgevallen is met behulp van RS-waarnemingstechnieken iets te zeggen over de *soortensamenstelling* van de vegetatie in aride gebieden. Dergelijke situaties zijn vrijwel beperkt tot het voorkomen van zeer grote planten met een karakteristieke groeivorm, bijvoorbeeld bomen en struiken, op grote schaal afgebeeld. Over het algemeen zijn referentiewaarnemingen op de grond zelfs dan nog onontbeerlijk. Anders dan bij vegetaties van cultuurgewassen, bestaan natuurlijke vegetaties veelal uit een mengsel van soorten, die niet afzonderlijk zijn waar te nemen. Wel valt te denken aan specifieke soortcombinaties, bijvoorbeeld met een bijzondere *spectrale signatuur* (zie o.a. hoofdstuk 5). Ook dan echter zijn referentiewaarnemingen nodig. In termen van indicator-waarde is de soortensamenstelling echter slechts van belang als er voldoende ecologische kennis bestaat over de waargenomen soorten, m.a.w. uit bestaande *ecologische kennis* kan worden afgeleid wat het voorkomen van soorten indiceert. In dit verband is het werken met ecologische soortengroepen (vgl. Zonneveld, 1984) soms verhelderend. Voor veel soorten van aride gebieden in de wereld ontbreekt deze ecologische kennis nog.
*Structuur* is met behulp van RS vaak direct waar te nemen. Op grootschalige luchtfoto's is via schaduw of stereoscopische interpretatie (zie Supplement 3) vaak verticale structuur te zien, bijvoorbeeld als een gelaagdheid in de vegetatie. In aride gebieden is gelaagdheid echter nauwelijks bruikbaar omdat er meestal slechts sprake is van maar een of twee lagen. Horizontale structuur is daarentegen van groot belang. Het meer of minder 'open' zijn van een vegetatie kan belangrijke aanwijzingen geven over bijvoorbeeld de vochtvoorziening. Het voorkomen van kleine vegetatievlekken met scherpe afgrenzing, soms te zien als een stippenpatroon, duidt veelal op een of meer zeer extreme milieufactoren, bijvoorbeeld een hoog zoutgehalte van de bodem of een hoge begrazingsdruk.
*Levensvormen*, voor vegetatietypen vaak tot uitdrukking gebracht via levensvormenspectra, kunnen een belangrijke indicatie geven over klimaat en bodem. Voor wat betreft het klimaat kan daarbij ook gedacht worden aan onregelmatig optredende extremen, bijvoorbeeld

droogtejaren (Thalen, 1981b). Met behulp van RS zijn slechts bovengrondse delen van de vegetatie waar te nemen, terwijl voor levensvormensystemen juist ook de ondergrondse delen van belang zijn (vgl. Leistner, 1967).
Uit het bovenstaande moge duidelijk zijn dat voor een zo goed mogelijk gebruik van de indicatiewaarde van natuurlijke vegetatie een combinatie van *verschillende* typen informatie van belang is. RS kan hierbij van nut zijn, zeker voor wat betreft het uitwerken van het ruimtelijke patroon van (relatief homogene) eenheden, zoals dat ook, meer algemeen, voor vegetatiekarteringen van belang is.

### 25.3.2 Natuurlijke hulpbron

De natuurlijke vegetatie in aride gebieden is een belangrijke, veelal de belangrijkste, natuurlijke hulpbron, in het Engels vaak samengevat met de vier F-en: Food, Forage, Fuel en Fiber (voedsel, veevoer, brandhout en vezels). Vooral de middelste twee zijn van groot economisch belang. De natuurlijke productiemogelijkheden van het overgrote deel van de aride gebieden in de wereld worden door de mens benut door middel van het grazende dier dat de schaarse primaire productie omzet in voor de mens gemakkelijker oogstbare dierlijke producten. Vele tientallen miljoenen mensen in de aride gebieden zijn voor hun energievoorziening aangewezen op het brandhout dat geoogst wordt uit de natuurlijke vegetatie (Eckholm et al., 1984). Voor gedetailleerde beschouwingen over de vegetatie van aride gebieden als natuurlijke hulpbron moge verwezen worden naar de recente overzichten van Goodin & Northington (1985) en Wickens et al. (1985).
RS-technieken zijn bij uitstek geschikte hulpmiddelen om deze zo belangrijke hulpbron kwalitatief en kwantitatief te inventariseren, in kaart te brengen, en trends in ontwikkelingen vast te stellen, zoals uit het hierna volgende moge blijken. Dit hangt direct samen met het bijzondere ruimtelijke en temporele karakter van de vegetatie in aride gebieden, zoals in paragraaf 25.2 al werd aangeduid.

## 25.4 De vraagkant: de informatiebehoefte

De gewenste informatie bij het beschouwen van de vegetatie als natuurlijke hulpbron kan in de volgende vragen worden samengevat (vgl. Thalen, 1981a): WAT groeit WAAR, WANNEER, en HOEVEEL en HOE GOED is het? Er is dus informatie nodig over soortensamenstelling en structuur van de vegetatie. Daarnaast is de plaats en de verbreiding belangrijk, terwijl juist voor aride gebieden met veel efemere vegetaties en grote fenologische verschillen voor overjarige soorten het temporele aspect van groot belang is. Tenslotte zijn we voor economische en beheerstoepassingen geïnteresseerd in hoeveelheden (bijvoorbeeld door het vee te benutten voer, brandhout, etc.) en kwaliteit, bijvoorbeeld m.b.t. eetbaarheid en voedingswaarde voor vee.

## 25.5 De aanbodkant: remote sensing en andere technieken

Om de bruikbaarheid van RS-technieken na te gaan, mede in relatie tot andere mogelijkheden om zogenaamde primaire informatie te verzamelen, kunnen we de ons thans ten dienste staande belangrijkste mogelijkheden om informatie over de vegetatie te verzamelen kort de revue laten passeren. Daarin zijn voor ons doel een viertal groepen te onderscheiden die achtereenvolgens kort besproken zullen worden:

- gebruik van luchtfotografie
- gebruik van satellietbeelden
- directe waarneming vanuit vliegtuigen
- verzamelen van grondgegevens.

### 25.5.1 Gebruik van luchtfotografie

Voor zeer grote oppervlakten in de aride gebieden zijn relatief goedkope panchromatische zwart-wit luchtfoto's beschikbaar op een schaal van ongeveer 1:20.000 tot 1:60.000, dikwijls gevlogen voor topografische karteringen. Deze tonen geen details van de vegetatie en zijn vaak minstens enige jaren oud. De bruikbaarheid zit vooral in het gebruik op landschapsniveau i.v.m. de verbreiding van vegetatietypen en de relatie met bijvoorbeeld geomorfologische eenheden.
In sommige gevallen is het mogelijk speciale luchtfoto's met eigen specificaties te laten maken, bijvoorbeeld grootschalige (1:2500 -1:10.000) normale kleuren- of kleureninfrarood-diapositieven (zie paragraaf 4.1.1). Dit is echter uiterst kostbaar en kan, als het grootschalige beelden betreft, slechts gedaan worden voor kleine oppervlakken. De toepassingswaarde is groot voor een aantal van de in paragraaf 25.4 genoemde vragen. Een belangrijke practische toepassing kan het via 'sample areas' invoegen van een extra niveau zijn tussen bijvoorbeeld relatief kleinschalige bestaande foto's en grondbemonstering.

### 25.5.2 Gebruik van satellietbeelden

Voor een waarde-oordeel over satellietbeelden m.b.t. informatie over vegetatie in aride gebieden is een onderscheid in drie typen zinvol, gebaseerd op verschillen in ruimtelijke, spectrale en temporele resolutie: (1) Meteosat- en NOAA/AVHRR-beelden, (2) Landsat-beelden, en (3) SPOT-beelden. In de hoofdstukken 18 en 7, respectievelijk, zijn de relevante karakteristieken van deze satellieten gegeven (zie ook Supplement 5).
De eerste categorie heeft een temporele resolutie in de grootte-orde van uren en dagen en een ruimtelijke resolutie van kilometers. Het beeldmateriaal is daarmee bij uitstek geschikt voor het verkrijgen van een snelle, maar globale, indruk van een groot gebied, waarbij er nauwelijks beperkingen zijn m.b.t. het gewenste tijdstip van opname. Dit maakt het materiaal bovendien zeer geschikt voor de monitoring van veranderingen in de vegetatiebedekking over grote gebieden. Zo zijn er recent beeldseries samengesteld waarop per maand voor het gehele Afrikaanse continent de waarden voor een bepaalde vegetatie-index zijn weergegeven. Deze tonen schitterend de verschuiving van de 'groene

vegetatie' grens met de seizoenen en de scherpe overgangen van woestijn enerzijds naar savanne en tropisch oerwoud anderzijds (vergelijk hoofdstuk 18). Een goed overzicht van de inzet van NOAA/AVHRR-beelden bij de temporele informatie-verschaffing over vegetatie in aride gebieden geeft het International Journal of Remote Sensing, 1986, volume 7, no. 11, blz. 1385-1622.
Landsat heeft een temporele resolutie van 16 dagen en een ruimtelijke resolutie van decameters (pixels van 57 x 83 m voor MSS en 30 x 30 m voor de TM). Voor monitoring van de snelle vegetatieveranderingen over de seizoenen in aride gebieden is de temporele resolutie al aan de lage kant. Wel zijn processen over jaren goed waar te nemen, bijvoorbeeld een voortschrijdende woestijnvorming. Voor vegetatiekarteringen, anders dan in zeer globale termen, op een schaalgrootte van 'hoofd'-landschappen, is Landsat toch slechts beperkt bruikbaar gebleken, mede door de beperkte mogelijkheden om grondgegevens via een exacte plaatsbepaling te koppelen aan de beeldinformatie. Wat dit betreft zijn er grote verschillen met toepassing in relatief grootschalige cultuurlandschappen, waar perceelsgrenzen, wegen., etc. vaak zeer goed te zien zijn.
Met SPOT-beelden is nog maar relatief korte ervaring opgedaan, maar deze is voor wat betreft de ruimtelijke reslutie (20 m of 10 m) veelbelovend en een uitwisseling met de plaats van kleinschalige luchtfoto's lijkt voor de hand te liggen. Voor wat betreft de temporele resolutie is er geen winst ten opzichte van Landsat, tenzij er gebruik gemaakt wordt van de 'off-nadir viewing' mogelijkheid (zie paragraaf 7.5.4).
In het bovenstaande is geen rekening gehouden met de beschikbaarheid van de beelden en de kosten.

### 25.5.3 Directe waarneming vanuit vliegtuigen

Vooral in Oost-Afrika is het direct waarnemen van zichtbare ecologische variabelen vanuit kleine, laagvliegende vliegtuigen ontwikkeld tot een standaardtechniek met zijn eigen statistische onderbouwing m.b.t. betrouwbaarheid (de zogeheten 'Systematic Reconnaissance Flight' (SRF), reeds genoemd in figuur 1-1). Het maken van grootschalige foto's vanuit vliegtuigen als bemonsteringstechniek werd al voor de tweede wereldoorlog gedaan, maar in de vijftiger en begin zestiger jaren kwam hieruit voort het tellen van grote dieren om aantallen en verspreiding te weten te komen i.v.m. het beheer. In 1968 werd hierover in Nairobi een eerste conferentie gehouden. Bij de tweede conferentie in 1979 (ILCA, 1981) stond naast het tellen van dieren ook het karakteriseren en inventariseren, o.a. voor monitoring, van habitatkarakteristieken in de belangstelling. Een belangrijk onderdeel hiervan is de natuurlijke vegetatie. Vanuit laagvliegende vliegtuigen is een zeer goed overzicht te krijgen. Het probleem ligt bij het kwantitatief en kwalitatief vastleggen van de relevante variabelen. Dit kan door het meten via random of systematisch gevlogen transecten waarbij de afstanden waarover bepaalde variabelen worden waargenomen kunnen worden vastgelegd via het inspreken op een tape-recorder en later verwerkt kunnen worden tot oppervlakten. Een andere techniek is het

systematisch vastleggen van de vegetatie via zeer grootschalige 'sample-images', bijvoorbeeld eerder genoemde kleurendiapositieven. Het gaat hierbij dan om een variant van wat in paragraaf 25.5.1 al werd besproken. Er bestaan voor deze inventarisatiemethode twee 'scholen', een systematische benadering waarbij volgens een *grid-systeem* wordt gewerkt, en een gestratificeerde random methode waarbij met grotere eenheden wordt gewerkt die met *random transecten* worden geïnventariseerd. De laatste methode laat een goede betrouwbaarheidsanalyse toe (zie bijv. Watson & Tippett, 1976; Jolly & Watson, 1979); de eerste geeft een beter beeld van de ruimtelijke spreiding (vgl. Gwynne & Croze, 1981; Norton-Griffiths, 1978). Ondertussen worden deze methoden ook elders ter wereld in toenemende mate toegepast. De komst van ultralichte vliegtuigen (zie figuur 1-4 en paragraaf 9.2.2) heeft in dit opzicht nog eens een nieuwe dimensie toegevoegd (vgl. Beck et al., 1986).
De mogelijkheden van het gebruik van de techniek van directe waarneming uit laagvliegende kleine vliegtuigen voor vegetatiekarakterisering in aride gebieden liggen voor de hand. Er is een relatief exacte plaatsbepaling mogelijk en belangrijke vegetatieverschillen kunnen vaak goed worden waargenomen. Bovendien leent de techniek zich bij uitstek voor het volgen van *veranderingen* in de fenologische toestand van de vegetatie.

25.5.4 Verzamelen van grondgegevens

Volledigheidshalve wordt deze techniek hier genoemd. Het moge duidelijk zijn dat bepaalde informatie over de vegetatie slechts via bemonstering op de grond kan worden verkregen. Hierbij kan o.a. gedacht worden aan de volledige soortensamenstelling en de chemische samenstelling van de vegetatie.

## 25.6 Vraag en aanbod geconfronteerd

De vraagkant vanuit de behoefte naar informatie over de vegetatie in aride gebieden (zie paragraaf 25.4) kan geconfronteerd worden met de mogelijkheden om deze informatie te verkrijgen (zie paragraaf 25.5) door deze in een matrixvorm met elkaar te confronteren. De resultaten zijn in tabel 25.2 aangegeven.

## 25.7 Complementariteit en integratie

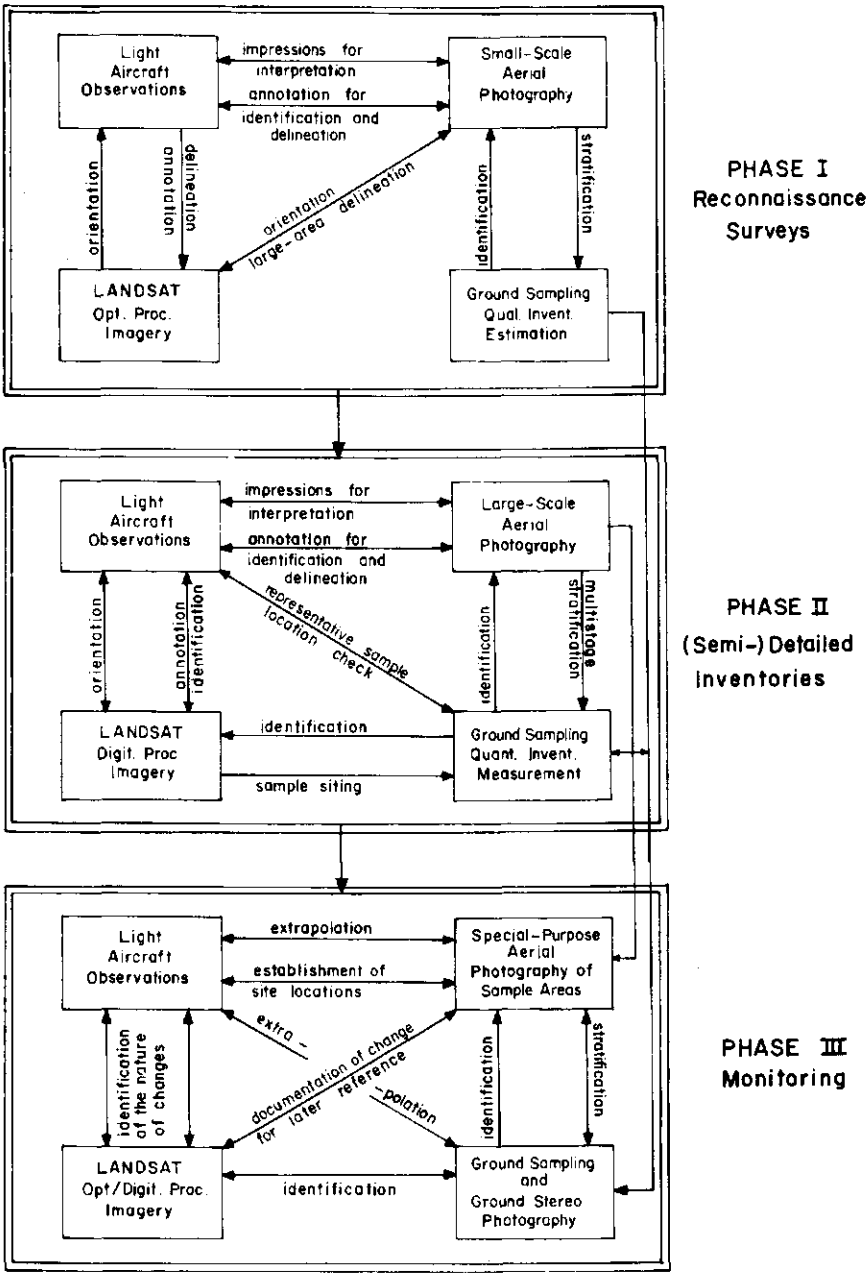
Uit het overzicht in tabel 25.2 komt duidelijk het *complementaire karakter* van de verschillende RS-technieken m.b.t. de toepassing voor vegetatie in aride gebieden uit. De meer conventionele methoden lenen zich goed voor patroon-toepassingen, het afgrenzen en karteren van gebieden met een bepaalde vegetatie bijvoorbeeld. Voor de 'inhoud' van de eenheden is dan echter een ander soort waarneming nodig, bijvoorbeeld direct vanuit een vliegtuig, of door bemonstering op de grond.
Met de introductie van satellietwaarneming in verschillende spectrale

Tabel 25.2 Vergelijkende evaluatie van technieken om informatie over de vegetatie in aride gebieden te verzamelen (uitgewerkt naar Thalen, 1981a)

— = vrijwel onbruikbaar (of onmogelijk),
– = beperkt bruikbaar,
+ = bruikbaar,
++ = zeer bruikbaar.

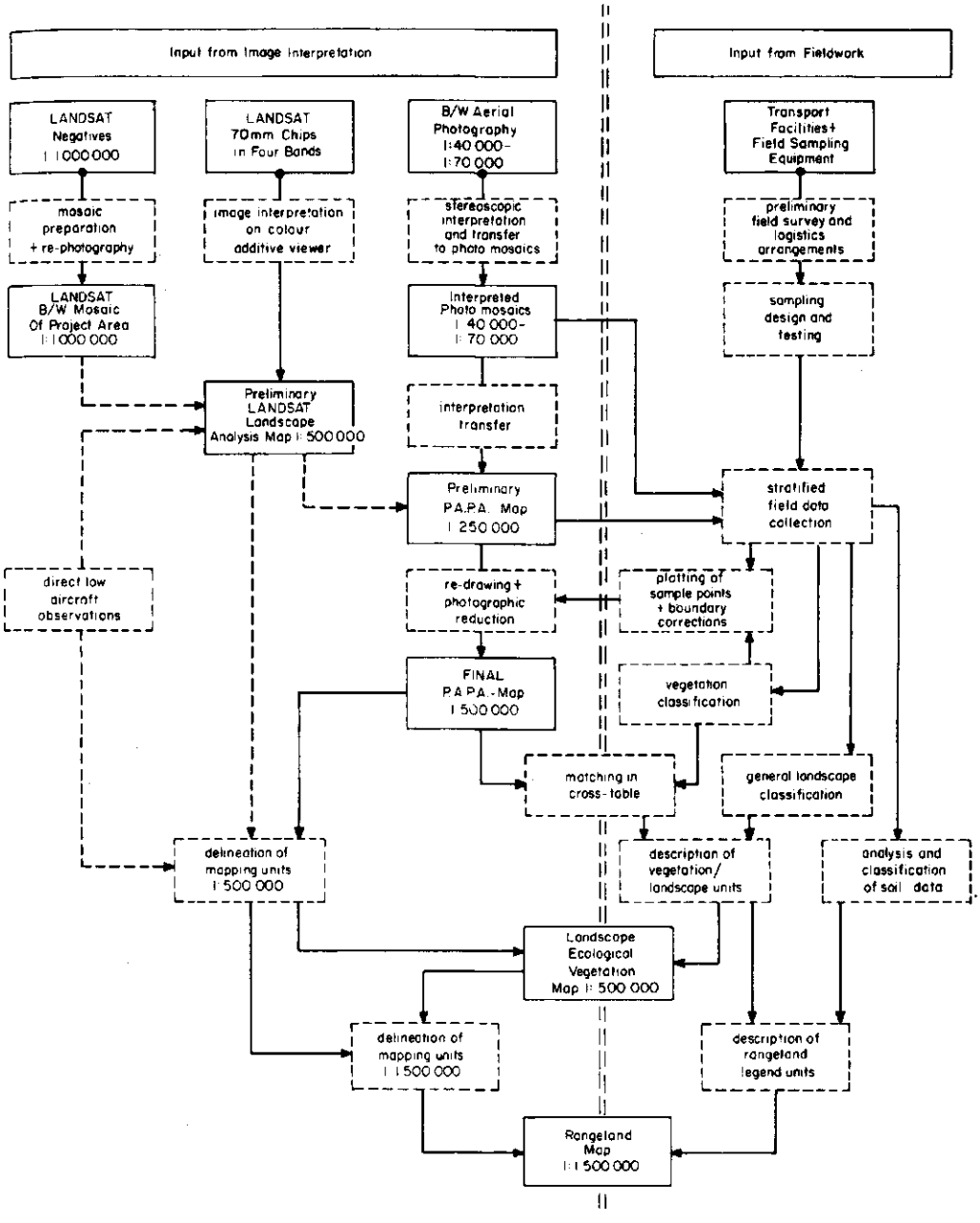
| techniek | wat? (flora, structuur) | waar? (plaats) | waar? (gebieds-grens) | wanneer? (seizoen, fenolo-gische toestand) | hoeveel? (bio-massa) | hoe goed? (kwali-teit) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| conventionele luchtfoto's | – | — | ++ | — | — | — |
| 'special purpose' luchtfoto's | + | ++ | – | – | – | — |
| Meteosat/NOAA-beelden | — | — | – | + | + | — |
| Landsat-beelden | — | — | + | – | + | — |
| SPOT-beelden | — | — | ++ | + | + | — |
| vliegtuigwaarneming | ++ | ++ | – | + | – | — |
| verzamelen grondgegevens | ++ | ++ | — | – | + | ++ |

banden, kwam de mogelijkheid om processen (van verandering) waar te nemen over grotere oppervlakten, en tegelijkertijd de mogelijkheid om via vegetatie-indices (o.a. paragraaf 9.5.2 en hoofdstuk 18) een schatting te maken van de bovengrondse biomassa (zie bijv. Townshend & Tucker, 1981). Dit laatste was tevoren slechts mogelijk door metingen of schattingen op de grond via bemonsteringstechnieken.
Het zal ook duidelijk zijn dat bepaalde detailinformatie slechts via grondgegevens te krijgen is. Dit geldt bijvoorbeeld voor de kwaliteit van de vegetatie i.v.m. voedingswaarde en de floristische samenstelling i.v.m. het voorkomen van medicinale planten.
Het beginsel van het complementair zijn en daarmee de wenselijkheid van *integratie* is uitgewerkt in figuur 25-1 voor 'rangeland surveys', waarbij is aangegeven wat de samenhang en de informatiewinst kan zijn.
In de afgelopen paar jaar is de integratie via 'multi-layered remote sensing' een veel toegepaste techniek geworden (vergelijk de beschouwingen in het laatste gedeelte van hoofdstuk 1). Er wordt voor verschillende toepassingen als het ware in- en uit-'gezoomd', waarbij enerzijds het synoptisch overzicht wordt gebruikt, anderzijds de




25-1 Het complementair gebruik van RS-technieken voor het uitvoeren van 'rangeland surveys' voor inventarisaties en monitoring op verschillende schaal
(bron: Thalen, 1981a).

mogelijkheid tot detailwaarneming. Op wereldschaal wordt dit gepropageerd door UNEP in haar 'Global Environmental Monitoring System' (GEMS, zie bijv. Gwynne & Croze, 1981).




**25-2** Schematisch stroomdiagram van de uitvoering van een vegetatie-inventarisatie en kartering van de Kalahari in Botswana, waarbij verschillende (remote sensing) informatiebronnen werden gebruikt (bron: DHV, 1980).

## 25.8 Een inventarisatie van de Kalahari (Botswana) als praktijkvoorbeeld

Een goed voorbeeld van het complementair gebruik van RS-technieken voor een vegetatie-inventarisatie in aride gebieden vormt de studie die in de eind jaren zeventig werd uitgevoerd voor de Kalahari woestijn in Botswana (DHV, 1980). Figuur 25-2 geeft dit schematisch weer. Voor de inventarisatie en kartering van het 240.000 vierkante kilometer grote gebied werd gebruik gemaakt van verschillende typen Landsat-beelden, kleinschalige luchtfoto's (in totaal ongeveer 3000!), directe waarneming vanuit laagvliegende kleine vliegtuigen en waarneming en bemonstering op de grond. Er ontstonden verschillende (tussen)produkten op steeds kleinere schaal, elk met een eigen toepassingswaarde voor de opdrachtgever.

## 25.9 Conclusies

1) De natuurlijke vegetatie van (semi-)ariden gebieden heeft een aantal bijzondere karakteristieken (zoals de uitgestrektheid en relatieve homogeniteit, gekoppeld aan een lage productiviteit per oppervlakte-eenheid en opvallende veranderingen in fenologie met als extreem het kortstondig verschijnen van eenjarigen) die de toepassingen van RS-technieken voor het verkrijgen van informatie over die vegetatie bijzonder vruchtbaar maken.
2) De 'conventionele' technieken, zoals zwart-wit kleinschalige luchtfotografie hadden in dit opzicht echter een beperkte waarde. Deze waarde lag vooral in het verschaffen van het synoptisch overzicht en het kunnen afgrenzen van relatief homogene eenheden of mozaïeken, vaak gekoppeld aan geomorfologische eenheden (patrooninformatie).
3) Met de komst van satellietbeelden veranderde dit. Het synoptisch overzicht werd een echt overzicht van zeer grote gebieden, zichtbaar gemaakt op slechts een of enkele beelden, via de mogelijkheid van bandcombinaties ook in kleur. De grootste winst lag echter in de mogelijkheid via sequentiële beelden processen te volgen, van langzaam verlopende processen zoals de voortschrijdende woestijnvorming, tot seizoensaspecten zoals verandering in bovengrondse biomassa.
4) Met het scala van thans beschikbare RS-technieken wordt optimaal gewerkt als deze complementair worden gebruikt en de aldus verkregen informatie geïntegreerd. Deze integratie dient ook de inbreng van grondgegevens te bevatten omdat er voor bepaalde toepassingen variabelen zijn waarvoor slechts via bemonstering van de vegetatie zelf en laboratorium-analyse de waarden zijn te bepalen.

## 25.10 Literatuur


1 Beck, R., S.W. Taiti & D.C.P. Thalen, 1986. Land use along the Tana River, Kenya – A study with small format aerial photography and microlight aircraft. Proc. 7th Int. Symp. on Remote Sensing for Res. Dev. and Envir. Management, Enschede, 25-29 August 1986., blz. 375-380.

2 DHV, 1980. Final Report Countrywide Animal and Range Assessment Project, Botswana. Report to Department of Wildlife, National Parks and Tourism, Government of Botswana, Vols. I – VII + 41 maps. DHV Consulting Engineers, Amersfoort.

3 Dzerdzeevski, B.L., 1958. On some climatological problems and microclimatological studies of arid and semi-arid regions in U.S.S.R. in: Climatology and microclimatology, Proc. Canberra Symposium. Arid Zone Research XI, UNESCO, Paris, blz. 315-325.

4 Eckholm, E., G. Foley, G. Barnard & L. Timberlake, 1984. Fuelwood: the energy crisis that won't go away. International Institute for Environment and Development, London & Washington D.C.

5 Goodin, J.R. & D.K. Northington (eds.), 1985. Plant resources of arid and semi-arid lands – a global perspective. Academic Press.

6 Gwynne, M.D. & H. Croze, 1981. Light aircraft and resource monitoring. in: Low-level aerial survey techniques. Proc. Int. Workshop Nairobi, Nov. 1979. ILCA, Addis Ababa, Ethiopia, blz. 7-26.

7 ILCA, 1981. Low-level aerial survey techniques. Report of an international workshop held 6 – 11 November 1979 in Nairobi, Kenya. ILCA Monograph 4. International Livestock Centre for Africa, Addis Abeba, Ethiopia.

8 Jolly, G.M. & R.M. Watson, 1979. Aerial sample survey methods in the quantitative assessment of ecological resources. In: R.M. Cormack, G.P. Patil & D.S. Robson (eds.), Sampling biological populations. Statistical Ecology Series Vol. 5. Fairland, International Cooperative Publishing House, USA.

9 Leistner, O.A., 1967. The plant ecology of the Southern Kalahari. Mem. Bot. Surv. S. Afr. 38, Government Printer, Pretoria.

10 Meigs, P., 1953. World distribution of arid and semi-arid homoclimates. in: Hydrology, Reviews of Research on Arid Zone. Arid Zone Research XXVI, UNESCO, Paris, blz. 203-210.

11 Mueller Dombois, D. & H. Ellenberg, 1974. Aims and methods of vegetation ecology. John Wiley & Sons, New York.

12 Norton-Griffiths, M., 1978. Counting animals. Second edition. African Wildlife Leadership Foundation, Nairobi, Kenya.

13 Raunkiaer, C., 1937. Plant life forms. Clarendon Press, Oxford.

14 Thalen, D.C.P., 1979. Ecology and utilization of desert shrub rangelands in Iraq. Uitgeverij Dr. W. Junk b.v., Den Haag, 448 blz.

15 Thalen, D.C.P., 1981a. An approach to evaluating techniques for vegetation surveys on arid rangelands. in: Low-level aerial survey techniques. Proc. Int. Workshop Nairobi, Nov. 1979. ILCA, Addis Ababa, Ethiopia, blz. 85-97.

16 Thalen, D.C.P., 1981b. Vegetation. in: A drought susceptibility pilot survey in Northern Botswana. Final Report NUFFIC/ITC Project 527/6.3. ITC Enschede, blz. 109-134.
17 Townshend, J.R.G. & C.J. Tucker, 1981. Utility of AVHRR of NOAA 6 and 7 for vegetation mapping. in: Matching remote sensing technologies and their applications. Proceedings of an International Conference in London, December 1981. Published by the Remote Sensing Society, University of Reading, England, blz. 97-109.
18 Watson, R.M. & C.I. Tippett, 1976. Sudan national livestock census and resource inventory. Volume 26. Ecological considerations. Ministry of Agriculture, Food and Natural Resources, Khartoum, Sudan.
19 Wickens, G.E., J.R. Goodin & D.V. Field (eds.), 1985. Plants for arid lands. George Allen & Unwin, London.
20 Zonneveld, I.S., 1984. Grondslagen van de bioindicatie. in: Ecologische indicatoren voor de kwaliteitsbeoordeling van lucht, water, bodem en ecosystemen. Symposium van de Oecologische Kring, Utrecht, 14-15 oktober 1982. E.P.H. Best & J. Haeck (red.). PUDOC, Wageningen, blz. 9-19.

# Thema 8 Remote sensing en de inventarisatie en monitoring van bossen

De verschillende voor de bosbouw belangrijke *RS*-technieken, van grootschalige luchtfoto's tot kleinschalige radarbeelden via satellieten, worden getoetst aan de eisen die worden gesteld aan bosbouwkundige gegevens. Hierbij wordt gedacht aan de bepaling van boomsoorten, bosgrenzen en bostypen, oppervlaktemeting van bostypen en volumeschattingen per ha. Additionele terreingegevens verkregen via een bosinventarisatie, topografische basiskaart en/of via een geografisch informatiesysteem blijven in beperkte mate noodzakelijk voor een bosbeheersplan.
Het volgen van veranderingen van omvang en geaardheid van bosgebieden in de wereld is in het bijzonder een taak voor de *RS*.
Ook wordt ingegaan op de vraag, of gezien de nieuwe ontwikkelingen omtrent satellietbeelden nu ook voor de Nederlandse bosbouw *RS*-technieken in de bostype-classificatie van toepassing kunnen zijn die op het eerste gezicht meer geschikt lijken voor de tropische regenbosgebieden. Bij deze classificatie speelt de digitale beeldverwerking een belangrijke rol, zoals getoond zal worden. De inzet van digitale radargegevens op Nederlandse en tropische gebieden krijgt speciale aandacht.

# 26 Bosproblematiek en remote sensing

G. Sicco Smit

## 26.1 Inleiding

In de *bosbouw* is het gebruik van RS-technieken een *hulpmiddel* voor het verkrijgen van bosbouwkundige gegevens voor een bepaald doel. Het doel kan geheel verschillend zijn, waaraan de volgende factoren verbonden zijn zoals kosten, de nauwkeurigheid van de verkregen gegevens en de beschikbare tijd.
Als voorbeeld kan dienen het verschil tussen een gekleurde kaart op schaal 1:5000 als basis voor een 5-jarig beheersplan van een recreatie/ produktie-bos in Nederland met een oppervlakte van 5832,3 ha en kaarten op schaal 1:500.000 als basis voor een inventarisatie voor een eventuele houtexploitatie van het Colombiaanse Amazone tropische regenbos met een geschatte oppervlakte van 38.000.000 ha. In het eerste geval is een kartering noodzakelijk van de 'individuele' opstanden naar *soortensamenstelling* en kenmerkende bosbouwkundige gegevens voor een accurate volume-bepaling (o.a. stamtal, diameterverdeling vanaf 10 cm, hoogte, leeftijd en groeiplaatsklasse per houtsoort) waarvoor als hulpmiddel luchtfoto's op schaal 1:10.000 noodzakelijk zijn. In het tweede geval kan volstaan worden met een kartering van 'globale' *bostypen* en een steekproefopname om een indruk te krijgen van enkele commerciëel belangrijke houtsoorten met een diameter vanaf 45 cm waarvoor als hulpmiddel radarbeelden op schaal 1:400.000 bruikbaar zijn. In beide gevallen is een controle in het terrein nodig.
Kenmerkend voor het *bos* is dat het een levende verzameling is van een wisselend aantal individuele bomen die gedurende een lange tijd op dezelfde plaats groeien. Vandaar dat de bomen gegroepeerd worden in een zo homogeen mogelijke groep. De verschillen van jaar tot jaar binnen zo'n groep kunnen gering, maar over een periode van bijv. 20 jaar aanzienlijk, zijn. Naast de menselijke invloed zoals kappen en uitdunnen volgens een beheersplan kunnen niet-berekenbare invloeden zoals brand of stormschade plaats vinden.

## 26.2 Luchtfoto's

Gezien het grote aantal publikaties gedurende de afgelopen jaren over de praktische toepassing van radar- of Landsat-beelden voor bosbouw en met de hoge verwachting van het gebruik van SPOT-beelden kan de onjuiste indruk verkregen zijn dat het gebruik van *luchtfoto's* een verouderde techniek is. Echter, luchtfoto's hebben nog steeds de voorkeur indien *gedetailleerde informatie* over het bos een vereiste is; de Platen XIV en XV geven hiervan een indruk. Deze informatie kan verkregen worden door de *visuele interpretatie* van het drie-dimensionale stereoscopische beeld van een luchtfoto-paar op grond van verschillen in tint, vorm, grootte, hoogte, textuur en patroon van de individuele bomen, groepen van bomen of bostypen (zie ook de interpretatie-elementen in Supplement 1, paragraaf 3, en de stereoscopie in Supplement 3). De classificatie van de interpretatiegegevens kan geschieden op grond van soortensamenstelling, leeftijdsklassen, bedekkingsgraad (open, gesloten bos), schatting van het volume en beheerssystemen. *Terreingegevens* zijn noodzakelijk voor een controle en voor het meten van de bosbouwkundige gegevens die niet zichtbaar zijn op de luchtfoto's.
Voor het Nederlandse bos met een oppervlakte van ruim 300.000 ha is het belangrijk om in de eerste plaats een onderscheid te maken tussen de *naaldboomsoorten* (60%) en *loofboomsoorten* (40%). Het naaldhout bestaat voornamelijk uit 5 soorten (grove den 38%, overige pinussoorten, douglas spar, lariks en fijnspar elk circa 5%), maar in de loofhoutsoorten is een grotere verscheidenheid aan soorten met als belangrijkste de inlandse eik (16%), populier (5%) en berk (5%). Deze soorten zijn vrij gemakkelijk te identificeren op luchtfoto's, met uitzondering van de jonge en gemengde opstanden. Naald- en loofhoutsoorten zijn gemakkelijker te onderscheiden op zwart-wit infraroodfilm dan op panchromatische film (zie paragraaf 4.1.1 voor een beschrijving van de verschillende filmtypen). Voor de detectie van de *gezondheidstoestand* van de bomen is de kleureninfraroodfilm het aangewezen filmtype. Kleurenfilm is duurder dan zwart-wit opnamen en de vele kleurverschillen in het groen kunnen soms eerder een hinder dan een voordeel zijn voor de interpretatie van de beeldinhoud en voor de metingen in de luchtfoto. Voor de humide tropische gebieden is de panchromatische film de meest gebruikte en aangezien soorten-identificatie meestal onmogelijk is, ook de beste, omdat bij zwart-wit infraroodfilm de individuele kronen minder duidelijk zichtbaar zijn door de invloed van de schaduwen.

## 26.3 Radarbeelden

*Radarbeelden* hebben in commerciële toepassingen een schaal van 1:200.000 tot 1:400.000, en bedekken een terrein van 20 tot 40 kilometer breedte en indien noodzakelijk vele honderden kilometers in lengte. Vooral in de tropische regenbosgebieden kan de bewolking zodanig zijn,

dat een volledige bedekking van uitgestrekte oppervlakten niet binnen een redelijke tijd mogelijk is met kleinschalige luchtfotografie of met Landsat- of SPOT-beelden. Ter illustratie hiervan kan het voorbeeld van de SLAR-opname van het Colombiaanse Amazonegebied van 38.000.000 ha genomen worden. Binnen 6 weken was het gebied bedekt met 104 radarstrips, in noord/zuid-richting gevlogen met 60% overlap en schaal 1:400.000 (oktober-november 1973).
Een groot voordeel van radarbeelden is dat zelfs bij een dichte (100%) bosbedekking verschillen in de *topografie* aantoonbaar zijn en bij hoogte-verschillen in de orde van 10 à 15 meter zelfs soms duidelijker dan op het stereobeeld van kleinschalige luchtfotografie. In vlak en heuvelachtig terrein is het afstroom-patroon van de rivieren duidelijk zichtbaar, vooral indien de richting parallel is met de vliegrichting. In berggebied is door de aanwezigheid van de zgn. 'radarschaduw' (paragraaf 16.2.3.1) het afstroom-patroon minder duidelijk. Grote vegetatie-verschillen, zoals natuurlijke grasvegetatie, moerasvegetatie, landbouw en graslanden zijn duidelijk te onderscheiden van bosvegetatie. De identificatie van de houtsoorten is onmogelijk. Echter, gezien het heterogene karakter van de soortensamenstelling (100 houtsoorten/ha) van het tropische regenbos is soorten-identificatie op luchtfoto's in het algemeen ook niet mogelijk.
Voor het Colombiaanse Amazonegebied was het mogelijk om op de radarbeelden een *classificatie-systeem* te ontwikkelen voor de bos- en vegetatietypen naar 3 grote regionen en een 15-tal subtypen met een 12-tal combinaties. De afbakening werd uitgevoerd op (zogenaamde) semi-gecontroleerde mozaïeken op schaal 1:200.000. Om de afbakening te controleren en voor het verkrijgen van de bosgegevens die niet zichtbaar zijn op de radarbeelden, zoals soortensamenstelling, aantal, stamdiameter en volume heeft een gerichte inventarisatie plaatsgevonden. De inventarisatie en de verwerking van de gegevens duurde 6 jaar met een totaal van 874 opname-eenheden van 1 ha in 30 geselecteerde zones (opname-intensiteit 0,003%) en 174 individuele 1 ha opname-eenheden langs de rivieren.
Op grond van de berekeningen naar volume- en soortensamenstelling kon het Colombiaanse Amazonebos verdeeld worden in 5 exploitabele bostypen en 5 niet-exploitabele typen zoals moerasbos en moeras-vegetatie, savanna-bos, laag bos en struiken op rotsgronden en het bos na de zogenaamde 'zwerflandbouw'. In het geval van de Colombiaanse Amazone is de classificatie van de bostypen op radarbeelden blijkbaar gedetailleerd genoeg dankzij het feit dat het zeer heterogene tropische regenbos in soortensamenstelling over een klein oppervlak een homogeen gemiddeld volume geeft.
Of radarbeelden kunnen concurreren met luchtfotografische opnametechnieken voor de soorten- en volume-bepalingen van het Nederlandse bos, is nog een open vraag. Onderzoek met digitale radargegevens heeft aangetoond dat de classificatie van boomsoorten in bossen met homogene opstanden goed mogelijk lijkt, evenals de classificatie van bostypen en bosstructuren in natuurlijke bossen (zie

hoofdstuk 27). Van belang kan zijn, dat na de satellietopname met Seasat in 1978 de radarsatelliet ERS-1 van de European Space Agency (ESA) in 1990/92 hopelijk werkzaam zal zijn (zie Supplement 7 voor een beschrijving van enkele toekomstige radarsystemen).

## 26.4 Multispectrale aftasting vanuit satellieten

Met de lancering van Landsat-1 op 23 juli 1972 is het tijdperk begonnen van de *multispectrale opnamesystemen* vanuit satellieten (zie paragraaf 7.5 voor een beschrijving van de diverse satellietsystemen).

Met behulp van de computer kunnen van hetzelfde gebied de satellietbeelden vergeleken worden van verschillende jaren of seizoenen. Verschillen in *bosbedekking* kunnen aangetoond worden. In tropische landen zoals Colombia met een vermindering van het bosareaal met circa 1.000.000 ha per jaar is behoudens de met wolken bedekte Amazone regio dit fenomeen van bosvernietiging duidelijk aantoonbaar. In een studie waarbij Landsat-2 MSS vergeleken werd met een 1:30.000 schaal orthofoto-kaart van een 10.500 ha groot bosgebied in Oostenrijk, vond Sicco Smit (1980) dat, hoewel de *totale* oppervlakte van sparren-opstanden van 40 jaar en ouder met een nauwkeurigheid van 5% bepaald kon worden, de opstanden in blokken van 225 ha (500 pixels) een spreiding van 20% gaven. Voor een beheersplan zijn deze verschillen te groot. Bovendien was indeling naar leeftijdsklassen niet mogelijk en waren de opstanden met beuk van ouder dan 40 jaar niet betrouwbaar te scheiden van opstanden jonger dan 40 jaar (spar of beuk) en van de opstanden met een gemengde soortensamenstelling. Recente kapvlakten waren niet nauwkeurig te identificeren. De oppervlakte van de opstanden van een bepaald bostype was relatief klein ten opzichte van de pixelgrootte van circa 0,45 ha, met als gevolg het voorkomen van zogenaamde *mixels* (paragrafen 4.5.1 en 15.6). Voor de Nederlandse omstandigheden zal door de geringe oppervlaktegrootte van de opstanden het probleem van mixels ook van toepassing zijn. Landsat-TM beelden gaven een veel betere en nauwkeurigere oppervlakte-bepaling van de opstanden dan Landsat-MSS beelden, welke bij de SPOT-beelden nog duidelijker tot uiting zal komen. De panchromatische beelden van SPOT van oblique-opnamen geven een goed stereoscopisch beeld en zijn te vergelijken met luchtfotografische opnamen op schaal 1:50.000 bij een fotografische afdruk van 5 pixels per mm van de SPOT-data. Een grove leeftijdsklasse-indeling met hoogteverschillen van meer dan 5 meter is eventueel mogelijk. Voor een duidelijke uitspraak aangaande de nauwkeurigheid van SPOT-beelden voor de bosbouwkundige doeleinden is een vergelijkende studie noodzakelijk. Rekening zal gehouden moeten worden met het feit dat zelfs bij een 10 m x 10 m ruimtelijke resolutie de *classificatie* gebaseerd is op reflectieverschillen en dat essentiële structuurverschillen van de bomen niet waargenomen kunnen worden zoals op luchtfoto's op schaal 1:10.000. Binnen enkele jaren is echter te verwachten dat een combinatie

verkregen kan worden van SPOT- en TM-beelden geprojecteerd over een bosbouwkundige basiskaart met daarin opgenomen de additionele bosbouwkundige gegevens van soorten-samenstelling en leeftijd van de individuele opstanden. De SPOT- of TM-beelden kunnen dan dezelfde functie hebben in de classificatie als nu gebruikelijk is voor de radarbeelden en kleinschalige luchtfotografie in de humide tropische bosgebieden.

## 26.5 Conclusies

1) De huidige RS-technieken hebben voor de bosbouw de volgende toepassingen (zie ook hoofdstuk 27):

- SPOT en Landsat-TM: overzichtskaarten, bostypen (zie bijvoorbeeld Plaat XVI), monitoring van veranderingen.
- Landsat-MSS: overzichtskaarten, monitoring van veranderingen, mogelijk over de periode 1972-1988.
- Radar: kartering bostypen van humide tropische gebieden.
- Luchtfoto's: kleinschalig: kartering van bostypen (1:50.000-1:100.000),
  middelschalig: kartering van bosopstanden (1:10.000-1:30.000),
  grootschalig: individuele bomen (1:1.000-1:3.000).

2) Additionele terreingegevens verkregen via een bosinventarisatie, basiskaart en/of via een geografisch informatiesysteem zijn noodzakelijk voor een bosbeheersplan.

## 26.6 Literatuur

1 Sicco Smit, G., 1980. Use of Landsat imagery for forest management mapping. ITC Journal 1980-3: 563-575.

2 Stellingwerf, D.A., G. Sicco Smit & J.M. Remeyn, 1986. Applications of aerial photographs and other remote sensing imagery in forestry. (Temperate regions). Part I, 50 blz., Part II, 36 voorbeelden. ITC Publication number 3.

3 Stellingwerf, D.A., S.G. Banyard & G. Sicco Smit, 1986. Applications of aerial photographs and other remote sensing imagery in forestry. (Tropical regions). Part I: 57 blz., Part II: 36 voorbeelden. ITC Publication number 5.

Documentatie

# 27 Inzet van digitale radargegevens op Nederlandse en tropische bosgebieden

D.H. Hoekman

## 27.1 Inleiding

De provincie Darien in het oosten van Panama wordt gekenmerkt door onbegaanbare moeraslanden en bergachtige oerwoudgebieden. Het gebied stond voorheen bekend als de 'Darien Gap', een lastige hindernis die de voltooiing van de laatste 500 km van de Pan American Highway een lange tijd verhinderde. Deze naam was zeer toepasselijk als men bedenkt dat van dit gebied zelfs geen kaarten beschikbaar waren. Vanwege de voortdurende bewolking bleek het onmogelijk een luchtfotobedekking te verkrijgen, iets wat men al vanaf 1947 probeerde. Eind 1965 werd besloten een SLAR-systeem toe te passen (zie paragraaf 8.4 en hoofdstuk 11). Met behulp van deze sensor werd het gehele gebied met een oppervlakte van 17.000 km$^2$ in vier uur vliegtijd opgenomen en kon een topografische kaart (1:250.000) worden vervaardigd. Het project, bekend onder de naam RAMP ('Radar Mapping of Panama'), werd hiermee de eerste operationele toepassing in zijn soort.

Aan het eind van de jaren zestig, begin jaren zeventig werden vrijwel alle tropische regenwoudgebieden met beeldvormende radarsystemen opgenomen vanuit vliegtuigen (figuur 27-1). De opnametechniek bleek, vanwege zijn unieke eigenschap geen hinder te ondervinden van bewolking en nauwelijks van regen, een ideaal middel om deze uitgestrekte en moeilijk toegankelijke gebieden in kaart te brengen. Vooral de geomorfologie van het terrein en de waterlopen zijn op deze radarbeelden goed zichtbaar. Het bleek echter niet goed mogelijk om direct uit de beelden een betrouwbare kartering van vegetatietypen te maken. Veldwerk bleef noodzakelijk maar kon dankzij de verkregen beelden op een effectieve en efficiënte wijze worden uitgevoerd. Hierbij moet worden aangetekend dat bij de enkele destijds beschikbare 'sideways looking radar' (SLR, paragraaf 8.4) systemen de keuze van *sensorparameters* (frequenties, polarisaties en invalshoeken) zeer beperkt

**27-1** Project RADAM (Radar Amazone) 1971/72. Detail van een RADAM-radarbeeld (X-band, schaal 1:250.000), omgeving Santarem, Brazilië. Interpretatie van deze radarbeelden resulteerde in thematische karteringen (geomorfologie, geologie, bodem en vegetatie) op een schaal van 1:1.000.000 van het gehele Braziliaanse deel van de Amazone.

was. Recente technologische ontwikkelingen en een groeiend inzicht in het *interactiemechanisme* tussen radargolven en vegetatie (hoofdstuk 11) bieden geheel nieuwe perspectieven voor toekomstige operationele toepassingen.

De eerste (analoge en niet-geijkte) radarbeelden werden behandeld op een manier alsof het een soort luchtfoto betrof. Er werd gekeken naar grijstinten, texturen en patronen waarbij de normale luchtfoto-interpretatietechnieken werden gehanteerd. Dit is een gevaarlijke handelswijze aangezien er andere fysische wetmatigheden een rol spelen bij de totstandkoming van een radarbeeld. Er wordt immers gebruik gemaakt van een actief systeem met coherente straling, in een ander golflengtegebied, terwijl ook de beeldvorming wezenlijk verschilt (deze berust op afstandsmeting i.p.v. projectie) (vgl. in het bijzonder de hoofdstukken 6 en 8 en paragraaf 16.2).
Alleen met behulp van *modellen* van het fysische interactiemechanisme tussen microgolven en *objectparameters* is een objectieve interpretatie van radardata mogelijk. Voor practische toepassingen is het niet voldoende dat deze modellen de parameter $\gamma$ (radarverstrooiings-coëfficiënt, zie paragraaf 10.1) als functie van sensor- en objectparameters goed voorspelt, maar tevens moet het *inverse*

*probleem*, de bepaling van objectparameters uit sensorparameters en $\gamma$-waarden, met voldoende nauwkeurigheid mogelijk zijn. De ontwikkeling van deze modellen is echter lastig vanwege de complexe structuur van de vegetatie. Voor landbouwgewassen, waaraan reeds veel aandacht is besteed, zijn enige resultaten geboekt (Hoekman, 1983). De bosstructuur is echter sterk verschillend en veel ingewikkelder. Er zullen specifieke bosmodellen moeten worden ontwikkeld. Een tweede hiermee samenhangend probleem is het probleem van de keuze van optimale sensorparametercombinaties en resoluties voor bepaalde toepassingen.

De huidige tendens is een *digitalisatie* en *ijking* van radarbeelden en een sterk *geautomatiseerde verwerking en interpretatie*. Hiervoor zijn een aantal redenen aan te geven.

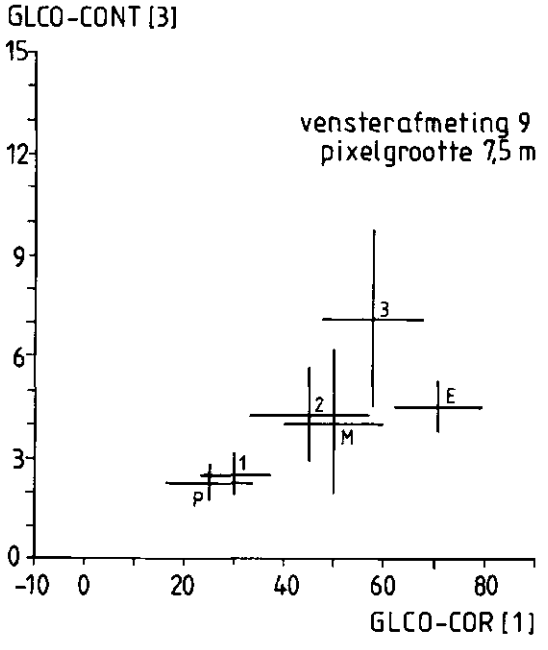
1) Het accent is verschoven van éénmalige inventarisaties naar monitoring. Hiermee wordt het belang van ijking, een vereiste om data uit verschillende gebieden of van verschillende tijdstippen rechtstreeks met elkaar te vergelijken, steeds groter.
2) De behoefte om radarbeelden van bijvoorbeeld verschillende frequentiebanden, tijdstippen etc. van hetzelfde gebied te combineren of te combineren met andere gegevens neemt sterk toe. Dit kan alleen efficiënt gedaan worden m.b.v. gedigitaliseerde databestanden en (grafische) computer-systemen.
3) Toekomstige microgolf-aardobservatie-satellieten zullen zeer grote hoeveelheden data gaan leveren. Aangezien een snelle dataverwerking voor de meeste toepassingen noodzakelijk is zal de verwerking en interpretatie zoveel mogelijk dienen te worden geautomatiseerd.

Het is niet mogelijk op alle hierboven genoemde aspecten van operationalisering dieper in te gaan. Volstaan zal worden met slechts twee aspecten, namelijk de geautomatiseerde herkenning van texturen in radarbeelden van bosgebieden (paragraaf 27.2) en het probleem van optimale sensorparameterkeuze bij soortenclassificatie van cultuurbossen (paragraaf 27.3). Tenslotte zal in paragraaf 27.4 een bespreking van de potentiële toepassingsgebieden van radar remote sensing in bosgebieden worden gegeven.

## 27.2 Geautomatiseerde interpretatie met behulp van textuuranalyse

Voor veel toepassingen bevat de absolute waarde van de radarreflectie de gewenste informatie. Er zijn ook toepassingen denkbaar waar de interesse voor de absolute waarde van de reflectie minder is. Belangrijke informatie kan ook besloten liggen in de temporele veranderingen van de radarreflectie of in de ruimtelijke informatie (patronen en texturen) van het beeld. Dit geldt ook voor bossen.
*Textuuranalyse* is met name voor toepassingen in natuurlijke bossen van belang. De groeiprocessen in een natuurlijk bos kunnen worden

onderverdeeld in een aantal ontwikkelingsstadia. Afhankelijk van de grootte van door brand, storm of aftakeling ontstane openingen ontstaat een mozaïek van verjongingseenheden en successiestadia. Iedere eenheid kan zijn eigen structuur hebben. Jong bos heeft een fijne structuur, aftakelend bos een grove structuur. Deze structuurverschillen en (op een andere schaal) de mozaïeken zijn soms waarneembaar op radarbeelden als gebieden met een verschillende textuur.
Om de mogelijkheden van geautomatiseerde herkenning van gebieden met bepaalde texturen te onderzoeken is gebruik gemaakt van SLAR-beelden van het Speulderbos (Hoekman, 1985). In dit bos komen enkele grotere opstanden voor met karakteristieke structuren. De textuuranalyse op deze beelden is als volgt uitgevoerd. Rondom ieder pixel wordt een denkbeeldig rechthoekig venster gelegd (van bijvoorbeeld 9 x 9 pixels) waarbinnen gekeken wordt naar de 1e orde statistieken of 2e orde statistieken. Statistieken van de 1e orde hebben betrekking op de verdeling van grijswaarden per pixel, die van de 2e orde op het optreden van paren pixels die op een bepaalde afstand in een bepaalde richting t.o.v. elkaar liggen. De waarden van deze statistieken worden toegekend aan het centraal liggende pixel en deze stellen de textuurkenmerken voor. Enkele van deze textuurkenmerken voor verschillende bosstructuren zijn grafisch weergegeven in figuur 27-2 (afbeelding in de kenmerkruimte). Ook zou men een (kleuren)afbeelding in de beeldruimte kunnen maken van de transformatieresultaten van een of meer textuurkenmerken. Voor een uitvoerige beschrijving van textuuranalyse wordt verwezen naar Gerbrands (1986), hoofdstuk 8, en Hoekman (1985).




27-2 Textuurmaten in een 2-dimensionale kenmerkruimte van 6 bosstructuren in het Speulderbos. De streepjes stellen de 1 standaardafwijking-intervallen voor. De onderscheiden structuren zijn (P) jong bos, (1) beukenbos in de rijpe fase met een glad en regelmatig kronendak, (2) idem met een ruw kronendak, (3) idem met grote kunstmatige verjongingsgaten, (M) gemengd gebied met veel kleine (homogene) eenheden en (E) randen en opstanden met coulissen of schermen (bron: Hoekman, 1985).

## 27.3 Een classificatie-simulatie gebaseerd op X-band SLAR-data van het Roggebotzand (Oost-Flevoland)

Er van uitgaande dat perceelsgrenzen op de een of andere manier (bijvoorbeeld met behulp van een database) in het beeld kunnen worden aangegeven, waardoor niet ieder pixel apart geclassificeerd behoeft te worden, kan het spikkel-probleem (paragraaf 8.4) omzeild worden (middeling). Als de gemiddelde $\gamma$-waarden van de aanwezige klassen bekend zijn en als wordt verondersteld dat de variaties van de perceelsgemiddelden binnen een klasse normaal verdeeld zijn met een standaardafwijking van 0,6 dB voor iedere klasse (zie hoofdstuk 11, paragraaf 11.2.1) en als tevens wordt verondersteld dat de $\gamma$-waarden van percelen binnen een bepaalde klasse voor de verschillende gemeten tijdstippen onafhankelijk van elkaar zijn dan kan een eenvoudig model voor het simuleren van classificaties onder verschillende omstandigheden (d.w.z. sensorparameterwaarden en soortensamenstellingen) worden opgesteld.

Tabel 27.1 Gesimuleerd classificatie-resultaat voor een september-beeld gecombineerd met een maart-radarbeeld van het Roggebotzand bij 15° scheerhoek, X-band en HH-polarisatie

| | | loofhout | | | | | naaldhout | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| klasse | No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | aantal velden |
| Populier | 1 | 419 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 420 |
| Wilg | 2 | 1 | 6 | 10 | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 |
| Es | 3 | 0 | 3 | 36 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| Eik | 4 | 0 | 0 | 3 | 44 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 50 |
| Beuk | 5 | 0 | 1 | 0 | 14 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 20 |
| Spar | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 284 | 3 | 3 | 0 | 290 |
| Corsicaanse den | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17 | 7 | 2 | 4 | 30 |
| Grove den | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 1 | 3 | 1 | 20 |
| Oostenrijkse den | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 0 | 102 | 110 |

Een voorbeeld is gegeven in tabel 27.1. Hierin worden 1000 velden gegenereerd met verschillende boomsoorten met een frequentie van voorkomen gelijk aan die in het Roggebotzand. Dit wordt gedaan voor twee opnametijdstippen. Een in september en een in maart, beiden met een scheerhoek van 15 graden. Op deze (multitemporele) gesynthetiseerde data wordt een 'Bayes-classificator' toegepast. Het resultaat is dat van de 420 gegenereerde populierenopstanden er 419 correct geclassificeerd worden en 1 fout als wilg. Van de 20 wilgenopstanden wordt er 1 fout geclassificeerd als populier, 6 correct als wilg, 10 fout als es, 1 fout als eik en 2 fout als beuk. Etc. Van het

totale aantal velden worden er 905 ofwel 90,5% goed geclassificeerd. Uit de tabel blijkt dat met name de classificatie van populier goed is te noemen, maar dat de meeste Corsicaanse dennen en grove dennen als spar worden geclassificeerd en de meeste beuken als eik worden geclassificeerd. In een ander testgebied, het Speulderbos (Veluwe), waar eiken en beuken een veel hogere leeftijd hebben zijn deze wel goed onderscheidbaar. Tevens moet worden opgemerkt dat de resultaten ook sterk afhankelijk zijn van de soortensamenstelling van het bos en zelfs van het voorkomen van bepaalde variëteiten en cultivars. Het onderscheid loofhout - naaldhout is in dit voorbeeld zeer goed, namelijk 99,8%. Het classificatie-resultaat is ook sterk afhankelijk van de gekozen combinaties van scheerhoeken en tijdstippen. Het gegeven voorbeeld is de best mogelijke combinatie van 2 beelden uit 4 gemeten tijdstippen en een traject van gemeten scheerhoeken (10° - 40°) voor dit bos met deze samenstelling. Opnamen in andere frequentiebanden of bij andere polarisaties kunnen veel nieuwe informatie toevoegen. Met de in gebruik neming van de (geijkte) DUTSCAT kan ook dit aspect in de toekomst worden onderzocht (zie paragraaf 11.2.4).

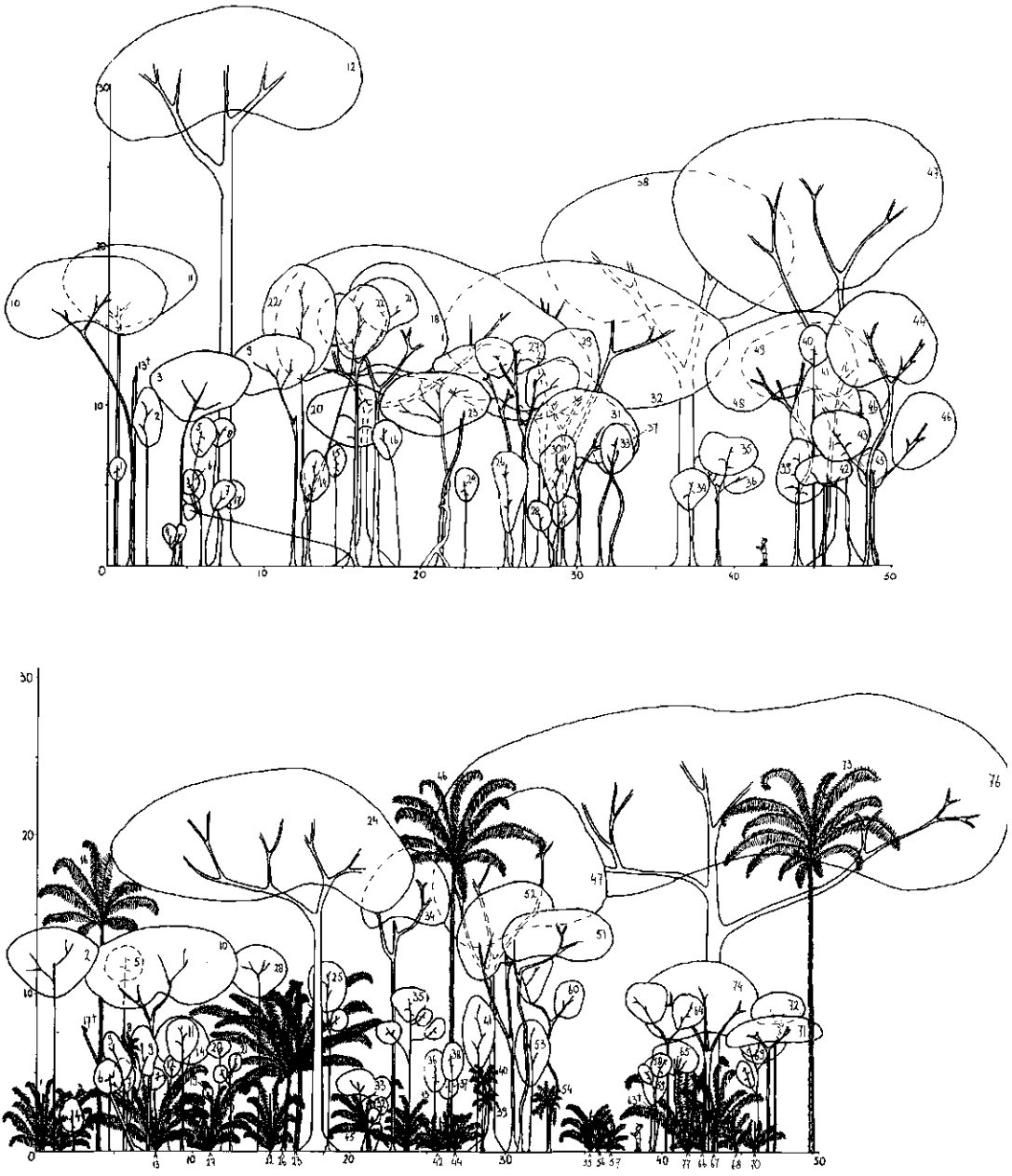
## 27.4 Potentiële toepassingsgebieden van radar remote sensing in de bosbouw

In het microgolfgebied is de *atmosfeer vrijwel transparant*. Ongestoorde waarnemingen zijn met radar altijd mogelijk, ook bij bewolking, regen en andere atmosferische omstandigheden die een goed optisch zicht belemmeren. Omdat de radar een actieve sensor is en de atmosfeer de meting nauwelijks beïnvloedt, is *ijking* altijd mogelijk. Dit maakt meetresultaten van verschillende plaatsen en tijdstippen direct met elkaar vergelijkbaar. Aangezien geijkte metingen *dag en nacht* ongeacht de atmosferische omstandigheden kunnen worden uitgevoerd, is de radar een monitoringsinstrument bij uitstek.
Verscheidene objectparameters die de radar kan bepalen kunnen onder gunstige atmosferische omstandigheden ook door optische sensoren worden bepaald (thermisch infrarood, nabij-infrarood en zichtbaar licht). Er zijn ook parameters die wel door optische sensoren kunnen worden bepaald maar niet door microgolfsensoren of andersom. Omdat de fysische eigenschappen van de objecten in deze spectrale gebieden totaal verschillend zijn, kunnen waarnemingen in beide spectrale gebieden elkaar aanvullen en lijkt een *combinatie van optische- en microgolfsensoren* in toekomstige operationele aardobservatiesystemen voor de hand te liggen. Wanneer deze aanpak ook tot uiting wordt gebracht in de toepassing van modellen (inversie) waarmee objectparameters kunnen worden bepaald uit een doordachte combinatie van sensorparameters van *beide* venstergebieden, dan zal met recht sprake zijn van een krachtenbundeling, waarvan het effect grotere kans op succes heeft dan hetgeen met de afzonderlijke vensters mogelijk zou zijn geweest ('*synergie*'; zie Clevers, 1988).

De reflectie-eigenschappen in het microgolfgebied worden sterk bepaald door *materiaaleigenschappen* en de *structuur* van het object (zie o.a. hoofdstuk 2). Vooral water in vrije of gebonden vorm (bladvocht) blijkt een sterke invloed te hebben. De invloed van de structuur blijkt bijvoorbeeld uit het feit dat naaldhout en loofhout een sterk verschillend gedrag vertonen als functie van de frequentie (zie bijv. figuur 11-7). Ook de bladstand lijkt belangrijk. De transmissie-eigenschappen van microgolven blijken sterk frequentie-afhankelijk te zijn. In de X-band (3 cm) is de transmissie laag, in de L-band (25 cm) aanzienlijk hoger en kan in principe informatie worden verkregen van bedekte structuren (bosbodem, stammen; hoofdstuk 11.3). Ook materiaaleigenschappen zoals het vochtpercentage in de bovenste lagen van de bodem blijken bepaalbaar te zijn voor kale bodems (zie hoofdstuk 12) maar ook voor begroeide bodems. De invloed van boom-, bodem- en opstandsparameters bij verschillende sensorparameter-combinaties op de radarreflectie is nog niet nauwkeurig bekend. Voor de nagestreefde *modelvorming* is nog veel experimenteel onderzoek nodig en theoretische ondersteuning wenselijk.

De beeldvorming bij SLR berust op het principe van *afstandsmeting* in tegenstelling tot optische methoden waar beeldvorming berust op projectie (paragraaf 16.2). Een gevolg hiervan is dat zelfs kleine *reliëfverschillen* goed zichtbaar kunnen zijn, vooral bij de hogere frequenties en kleine scheerhoeken (met de horizontaal), als een gevolg van het optreden van echoparallax en radarschaduw. Ook bosstructuurverschillen kunnen als textuurverschillen in het radarbeeld goed zichtbaar zijn. Als illustratie zal een waarneming in het Horsterwold (Zuid-Flevoland) besproken worden. Op radarbeelden van dit bos bleek het regelmatige rechthoekige patroon van de bosopstanden op sommige plaatsen onderbroken te worden door kleine cirkelvormige patronen. Na inspectie van enkele van deze plekken in het veld bleek dit gebiedjes te betreffen met subtiele groeiverschillen. De populieren waren iets minder hoog en hadden een iets dunnere stam, de takken en loten waren iets korter en dichter bebladerd. De enigzins achterblijvende groei wordt waarschijnlijk veroorzaakt door lokaal slechtere bodemcondities voor de populier, veroorzaakt door zand dat in het verleden uit een tochtwal geschoven is.

Classificatie van *boomsoorten* in bossen met homogene opstanden op basis van de gemiddelde $\gamma$-waarden of classificatie van *bostypen* en *bosstructuren* in natuurlijke bossen op basis van beeldtexturen en $\gamma$-waarden lijkt goed mogelijk. Figuur 27-3 demonstreert de heterogene soortensamenstelling en de complexiteit van de bosstructuur in een tropisch regenwoud. Van de herkenning van afzonderlijke boomsoorten met RS-gegevens zal daar in het algemeen geen sprake zijn, tenzij van grootschalige luchtfoto's wordt gebruik gemaakt.
In het gegeven voorbeeld van het Roggebotzand (paragraaf 27.3) blijkt daarentegen een groot percentage van de homogene opstanden goed



**27-3** Bosprofielen in het Amazonegebied (tekeningen door ir. J.J. van der Sanden, sept. 1986). Idee van bosstructuren in een tropisch regenwoud nabij Santarém, Brazilië, op twee verschillende locaties. Hierin is duidelijk sprake van een heterogene samenstelling van soorten, grote verschillen in boomhoogte en een grote diversiteit in leeftijd. De getallen in de boomtekeningen verwijzen naar een legenda van namen (die hier niet bijgevoegd is). De profielen strekken zich uit over een lengte van 50 meter, de boomhoogten variëren van 0 tot 35 meter.

geclassificeerd te kunnen worden in boomsoortklassen, als een X-band zomerbeeld en een X-band winterbeeld gecombineerd worden. Recente resultaten laten zien dat hetzelfde goede resultaat is te bereiken indien een X-band zomerbeeld gecombineerd wordt met een L-band zomerbeeld. De optimale *sensorparameter-keuze* is nog een punt van onderzoek. Deze zal waarschijnlijk ook sterk afhangen van de soortensamenstelling. Om een voorbeeld te geven: de Euramerikaanse hybride populieren kunnen in de X-band zomerbeelden goed onderscheiden worden van de overige boomsoorten bij de kleine scheerhoeken; voor de zwarte balsempopulieren is dit juist bij de grote scheerhoeken het geval (vgl. figuur 11-8). Ook met het richtingsafhankelijke gedrag van de radarreflectie (heliotropie?, paragraaf 11.2.4) van sommige boomsoorten dient rekening gehouden te worden. Wanneer het fysische mechanisme achter dit fenomeen beter wordt begrepen, kan er gebruik van worden gemaakt om de classificatie te verbeteren. Wordt het verschijnsel genegeerd dan kan het omgekeerde het geval zijn.

Bij het aangeven van de potentiële toepassingsgebieden moet een onderscheid worden gemaakt tussen cultuurbossen en natuurlijke bossen en tussen gematigde gebieden en tropische gebieden.
In de uitgestrekte en moeilijk toegankelijke *tropische regenwouden*, waar optische waarnemingstechnieken vanwege de voortdurende bewolking falen, zal radar remote sensing een belangrijke rol kunnen spelen. Voor een goed toezicht en beheer van deze gebieden kan radar remote sensing de beleids- en beheersinstanties belangrijke informatie verschaffen. De radar kan ingezet worden bij:

(1) het bepalen van bostypen en arealen;
(2) topografische kartering;
(3) het monitoren van ontbossingen, herbebossingen en 'shifting cultivation';
(4) het waarnemen van veranderingen in landgebruik (permanente landbouw, grasland) en het ontstaan van erosie of secundair bos;
(5) een snelle informatievoorziening na natuurrampen zoals omvang en effect van overstromingen.

Bij toepassing van radar remote sensing in *cultuurbossen* in de *gematigde streken* kan gedacht worden aan bostoezicht. Bijvoorbeeld het waarnemen van illegale kap of het nalaten van een herplantverplichting en het toezicht op het naleven van afspraken bij kapconcessies. De belangrijkste toepassingen liggen hier op het gebied van bosbeheer. Deze zijn:

(1) het monitoren van de bosontwikkeling en de ontwikkeling van jonge aanplant;
(2) het in een zo vroeg mogelijk stadium detecteren van ziekte- of stress-situaties;
(3) het op een snelle wijze verkrijgen van een overzicht van natuurrampen zoals stormschade of brand.

Met het bovenstaande is niet gepoogd een volledig overzicht te geven van toepassingsmogelijkheden van radar remote sensing in bosgebieden. Er is immers nog veel onderzoek nodig. Met name op het gebied van *optimale sensorparameter-keuze* (de lagere frequenties: L-, S- en C-band en de invloed van polarisatierichting zijn nog nauwelijks onderzocht) en op het gebied van de *fysische modelvorming*. Toekomstig onderzoek zal ongetwijfeld resulteren in nieuwe inzichten en toepassingsmogelijkheden.

## 27.5 Literatuur

1 Clevers, J.G.P.W., 1988. Crop monitoring for agricultural propositions. Invited paper, Proc. 16th ISPRS-Congress, Kyoto, Japan, July 1-10 1988, Volume 27-B9: VII-206 – VII-215.

2 Gerbrands, J.J., 1986. Inleiding in de digitale beeldverwerking. Collegedictaat Technische Universiteit Delft, Faculteit der Elektrotechniek, 141 blz.

3 Hoekman, D.H., 1983. Radarverstrooiingsmodellen voor vegetatie en kale bodems. Cultuurtechnisch Tijdschrift 22: 315-326.

4 Hoekman, D.H., 1985. Texture analysis of SLAR images as an aid in automized classification of forested areas. Proc. EARSeL Workshop 'Microwave remote sensing applied to vegetation', Amsterdam, 10-12 dec. 1984, ESA SP-227, blz. 99-109.

# Thema 9 Remote sensing en de monitoring van milieu-aspecten

De laatste jaren is de aantasting van het milieu steeds meer een bedreigende factor voor het leven op aarde. In een drietal hoofdstukken zal voor de Nederlandse situatie de aandacht worden gericht op een schets van de mogelijkheden en de beperkingen van (met name optische) Remote Sensing-technieken, om een bijdrage te leveren aan de beschrijving van de actuele toestand en aan de monitoring van veranderingen van het milieu met betrekking tot een drietal aspecten, te weten de luchtverontreinigingseffecten op planten, de gezondheidstoestand van stadsbomen en de detectie van (afval)stortplaatsen. Sedert een tiental jaren is in binnen- en buitenland ervaring opgedaan met RS bij de bepaling van de effecten van luchtverontreiniging op de vegetatie. De verandering van de spectrale signatuur van een plant bij beschadiging blijkt een min of meer gevoelig kenmerk te zijn voor de aard en de mate van beschadiging. Het onderzoek naar de sleutels voor de interpretatie van RS-beelden met het oog op het schade-niveau en, zoals bij bomen, de vermindering van vitaliteit, is nog in volle gang. In aansluiting hierop worden de ervaringen besproken die in een grote stad zijn opgedaan met RS ten behoeve van de sturing en bewaking van het groei- en stabiliteitsverloop van straatbomen, waarbij ook een vitaliteitsbeoordeling in het veld betrokken is. De verwachtingen zijn gunstig, mede met het oog op de monitoring van bomen in een stad in het kader van een zogenaamd boomkadaster.
Aan de mogelijkheden van RS-opnametechnieken voor het opsporen van illegale stortplaatsen in landelijke gebieden is recent veel aandacht besteed. Ook zijn proeven uitgevoerd die gericht waren op het onderkennen van ongewenste ontwikkelingen rond vuilstorten. Op de duidelijk aanwezige mogelijkheden van RS wordt ingegaan, maar ook op zijn beperkingen en op de noodzaak de organisatiestructuur van milieudiensten aan te passen aan de methodiek van de nieuwe mogelijkheden van monitoring.

Documentatie

# 28 Remote sensing en de invloed van luchtverontreiniging op planten

L.J.M. van der Eerden

## 28.1 Inleiding

Natuurlijk dromen milieudeskundigen en RS-specialisten ervan door middel van RS 'onzichtbare' effecten van *luchtverontreiniging* op planten zichtbaar te maken, of op zijn minst om luchtverontreinigingseffecten eenduidig te kunnen onderscheiden van de effecten van bijvoorbeeld droogte, vorst of ziekten. In RS-termen gesproken hopen zij een smalle band in het spectrum, een rekenkundige bewerking van reflecties (vegetatie-index), een truc met warmte- of radarbeelden (of gewoon een toverformule) te vinden, waarmee de effecten van luchtverontreiniging zeer gevoelig waar te nemen zijn en goed te onderscheiden zijn van andere oorzaken van schade aan planten. Dit toverstokje is tot nu toe niet gevonden en bestaat waarschijnlijk ook niet. Een voor de hand liggende reden is dat luchtverontreiniging meestal *a-specifieke* gevolgen heeft: een versnelde veroudering, afbraak van chlorofyl, remming van de fotosynthese, een nutriëntentekort als gevolg van een gestoorde wortelfunctie, een verhoogde vorstgevoeligheid, enzovoorts.

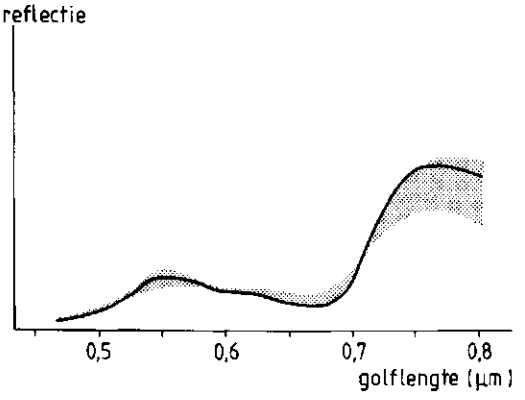
Voor veldwaarnemingen met het ongewapende oog zijn enkele uitzonderingen te noemen: er zijn planten die reageren op luchtverontreiniging met een specifieke en goed herkenbare vorm van beschadiging. Dergelijke uitzonderingen zullen in de toekomst mogelijk ook aan de hand van RS-parameters gevonden worden. Maar voorlopig ontbreekt daarvoor nog grotendeels het *interpretatiekader*: de kennis over effecten van luchtverontreiniging op zowel de fysiologie van de plant als op de verandering van zijn spectrale signatuur is nog erg fragmentarisch. Op de korte termijn heeft RS voor het waarnemen van luchtverontreinigingseffecten op planten niet veel meer te bieden dan dat effecten opgespoord en gekwantificeerd kunnen worden. Het opsporen van de oorzaak van de effecten moet meestal indirekt gebeuren (Van de Lustgraaf, 1984).

RS-waarnemingen moeten dus concurreren met veldwaarnemingen enerzijds en met het 'vertalen' van in het veld gemeten luchtverontreinigings-concentraties naar effecten op de RS-waarneming anderzijds.
In dit hoofdstuk zullen de mogelijkheden aan de orde komen die RS heeft als het gaat om het waarnemen van *schade aan planten*.
Daarbij zal zowel aandacht gegeven worden aan de operationele toepassingen als aan de toekomstige mogelijkheden. Maar eerst moet wat achtergrondinformatie gegeven worden over de spectrale signatuur van gezonde en aangetaste planten.

## 28.2 Verandering in de spectrale signatuur als gevolg van een verminderde gezondheidstoestand

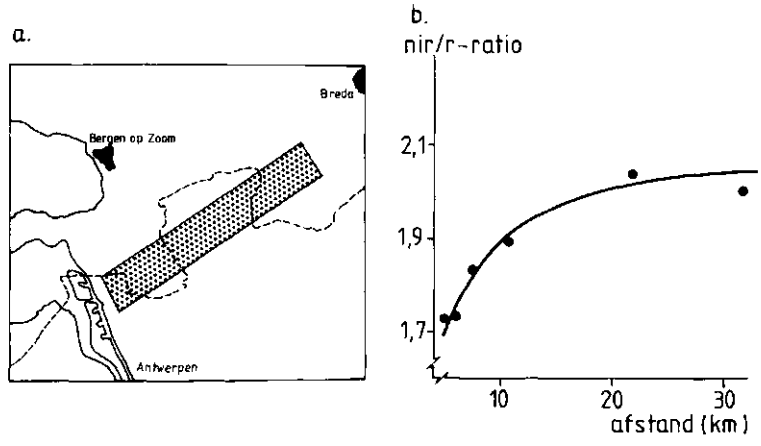
De spectrale signatuur (zie voor een uitgebreide beschrijving hoofdstuk 5) van bijvoorbeeld een *boomkruin* verandert door beschadiging of verkleuring van het bladweefsel, maar ook door verstoring van fysiologische processen. Daarnaast zijn de bladstand, bladval en de architectuur van het takkenstelsel sterk bepalend voor de spectrale signatuur. In het blauwe gebied van het spectrum (0,4 – 0,5 µm) is weliswaar duidelijk de afbraak van pigmenten te volgen (hoofdstuk 5), maar omdat het blauwe licht sterk door de atmosfeer verstrooid wordt is het voor RS-toepassing vaak minder geschikt. Het groene gebied (0,5 – 0,6 µm) geeft bij beschadiging meestal een reflectietoename te zien, maar soms ook een afname. Het rode gebied (0,6 – 0,7 µm) is zeer interessant. In dit gebied wordt licht door chlorofyl geabsorbeerd. Afbraak van chlorofyl en daarmee afname van het fotosynthetisch vermogen levert een reflectietoename op. Deze toename kan zeer aanzienlijk zijn (soms wel een verdubbeling van de reflectie). Als in smalle spectrale banden gemeten kan worden, is het mogelijk naast een reflectietoename door chlorofylafbraak ook iets te zien van *chlorofylfluorescentie*: een verstoorde fotosynthese kan zich uiten door een emissie van straling bij 0,68 – 0,70 µm (zie hoofdstuk 5, paragraaf 5.2). Deze veranderingen kunnen een verschuiving naar kortere golflengten teweeg brengen van de helling van de reflectiecurve die zich tussen het rode en nabij-infrarode gebied bevindt. Hoewel de verschuiving slechts enkele micrometers bedraagt lijkt het een gevoelige parameter te zijn: deze verschuiving wordt wel 'blue shift' of '*red edge*'-verschuiving genoemd (Horler et al., 1983). Deze parameter wordt weinig door de bedekkingsgraad van de vegetatie beïnvloed. Nadere informatie geeft figuur 29-4.
In het nabij-infrarode gebied van 0,7 tot 1,3 µm wordt meestal een verlaging van de reflectie gevonden bij een vermindering van de gezondheidstoestand van een plant. Deze kan bijvoorbeeld ontstaan door het ineenstorten van het parenchymweefsel, het vollopen van intercellulaire holten (door lekkende membranen) of door bladval (en dus vermindering van biomassa). Dat er soms ook een toename wordt geconstateerd kan veroorzaakt zijn door een gedeeltelijke verdroging

van het weefsel, waardoor meer lucht-water overgangen in het bladweefsel ontstaan. De reflectie in het infrarode gebied van 1 tot 3 µm neemt weliswaar toe als de plant water verliest, maar erg subtiel lijkt deze maat voor verdroging niet te zijn (Gates, 1970). Emissie van thermisch-infrarode straling kan eveneens informatie leveren over aantasting van planten voor zover het een verandering in verdamping tot gevolg heeft. Erg gevoelig lijkt ook deze parameter niet te zijn en aan een zinvolle meting zijn erg veel randvoorwaarden verbonden (Puritch, 1981).
Figuur 28-1 geeft voor het gebied tussen 0,4 en 0,8 µm nog eens een indruk van de veranderingen die de spectrale signatuur kan ondergaan als een plant wordt beschadigd.




28-1 Een algemeen beeld van de spectrale signatuur van groene planten tussen 0,4 en 0,8 µm. De doorgetrokken lijn geeft de reflectie van een gezonde plant aan, de gestippelde vlakken geven een indruk van de veranderingen die planten kunnen ondergaan als ze aangetast worden.

Vaak blijkt het combineren van spectrale data van verschillende golflengtebanden gevoelige parameters op te leveren. De resultaten die daarmee geboekt zijn, lijken hoopgevend (Tonelli, 1978; Sapp, 1981; Murtha & McLean, 1981; Lillesand et al., 1979; Lillesand & Meisner, 1982; Kadro, 1983; Van der Eerden & Janse, 1983).
De verhouding van de nabij-infrarood-reflectie en de rood-reflectie (vergelijk de vegetatie-indices in paragraaf 9.5.2) is door diverse onderzoekers herkend als een gevoelige stressparameter. Van deze parameter is ook bij het volgende voorbeeld gebruik gemaakt (van der Eerden et al., 1988). Er zijn kleureninfrarood-opnamen gemaakt (schaal 1:10.000) in een strook ten noord-oosten van het Antwerpse industriegebied: zie figuur 28-2a. Daar werd schade door luchtverontreiniging aan de bossen vermoed. In deze strook zijn een aantal bossen opgezocht met Corsicaanse dennen van ongeveer gelijke leeftijd en gelijke boomhoogte. In de gemaakte opnamen is via densitometrie de verhouding tussen de nabij-infrarood-reflectie en de rood-reflectie gemeten: de nir/r-ratio. Als de kroon van de bomen door naaldval ijler wordt en als de naalden (door chlorofyl-afbraak) geel of bruin worden, neemt de nir/r-ratio af. En dat is precies wat in het




28-2 In de strook, getekend in a, zijn kleureninfrarood-opnamen gemaakt waarin de nir/r-ratio is gemeten op bospercelen met Corsicaanse den. Deze ratio (b), die een maat is voor de gezondheidstoestand van de bomen, bleek af te nemen op kortere afstand van het Antwerpse industriegebied (bron: van der Eerden et al., 1988).

Nederlands-Belgische grensgebied gemeten is (zie figuur 28-2b). Door veldwaarnemingen kon deze tendens in *vitaliteit* bevestigd worden, maar de nir/r-ratio leek gevoeliger dan veldwaarnemingen.

Interessant is de vraag in hoeverre voor het ongewapende oog schade die met RS waargenomen kan worden, zichtbaar is. Met betrekking tot de tijdsfactor is een experiment van Gausman et al. (1978) illustratief. Zij begasten planten met ozon; 38 uur na het einde van de begassing was beschadiging met het ongewapende oog zichtbaar. Met kleureninfrarood-fotografie was toen nog geen schade waarneembaar. Foto's, gemaakt met een hoofdzakelijk blauwe lichtbron en met een film die alleen gevoelig was voor het zichtbare licht, toonden na 22 uur de schade, terwijl reflectiemetingen in een waterabsorptieband (1,35 – 2,50 µm) al na 16 uur schade indiceerden. Ook met behulp van warmtebeelden zijn resultaten geboekt die als '*previsuele schade-detectie*' aangeduid kunnen worden (Fox, 1978; Alger et al., 1978). Overigens is het twijfelachtig of dit soort tijdwinst bij het aantonen van schade van praktische betekenis is.

## 28.3 Operationele toepassingen

Na bovengenoemde opsomming van mogelijkheden zou verwacht kunnen worden dat er een breed scala van RS-technieken in de praktijk wordt toegepast. Niets is echter minder waar: voor het waarnemen van luchtverontreinigingseffecten op planten is de toepassing van RS gering, ook al zijn er in de literatuur een groot aantal succesvolle toepassingen beschreven. Meestal gaat het dan om 'case studies' waarbij het

*ruimtelijk patroon* van schade rondom een luchtverontreinigingsbron wordt vastgesteld. Het volgen van schade in de tijd wordt weinig gedaan.
Wat planten betreft beperkt de toepassing zich voor het grootste deel tot *bossen* en wat de RS-techniek betreft wordt in de toepassingssfeer vrijwel uitsluitend *kleureninfrarood-luchtfotografie* gebruikt, waarvan de beelden visueel worden geïnterpreteerd. Nederland loopt wat deze toepassingen betreft achter bij de haar omringende landen.

De keuze om al of niet voor een RS-techniek te kiezen wordt naast het kostenaspect voornamelijk bepaald door andere pragmatische argumenten zoals de toegankelijkheid van het gebied en het feit dat de interpretatie van RS-beelden voor het grootste deel binnenshuis en op een zelf gekozen moment kan geschieden.
Als het om de beoordeling van de gezondheidstoestand van bomen gaat, levert toepassing van kleureninfrarood-luchtfotografie globaal een even betrouwbaar resultaat op als veldwaarnemingen. Van multispectrale aftasting en andere RS-technieken kan dat meestal nog niet gezegd worden (Van de Lustgraaf, 1984).
Omdat de beoordeling van de *gezondheidstoestand van bomen* door middel van een visuele interpretatie van kleureninfrarood-luchtfoto's zoveel wordt toegepast, wordt daarover hier iets meer informatie gegeven. Daaruit zal onder meer blijken dat de interpretatie zeker niet alleen op het waarnemen van *kleurverschillen* tussen bomen berust, maar dat *structuur* en *textuur* van de kroon een minstens zo belangrijke informatiebron is (vergelijk Supplement 1). De procedure is als volgt:

- De luchtfotografische vlucht wordt op een onbewolkte dag gemaakt (liefst rond het middaguur, om zo weinig mogelijk schaduw te hebben en liefst in augustus, omdat dan jonge naalden volwassen zijn en herfstverkleuring nog niet optreedt). Een schaal van 1:2000 tot 1:7000 is geschikt.
- Op de foto's worden enige bomen aangewezen die in het veld opgezocht worden en op hun gezondheidstoestand beoordeeld worden. Gebruikelijk is 20 tot 100 exemplaren per boomsoort te beoordelen afhankelijk van de gewenste betrouwbaarheid. Dit levert een relatie op tussen veldkenmerken en fotokenmerken: de *interpretatiesleutel.*
- Aan de hand van de interpretatiesleutel wordt het fotomateriaal verder verwerkt. Er wordt vrijwel altijd *stereoscopisch* beoordeeld (vergroting 3 tot 16 maal) (zie voor de beschrijving van stereoscopie Supplement 3).
- De meeste interpretatoren grenzen eerst binnen een beeld gebieden af met een min of meer gelijke gezondheidstoestand en bepalen vervolgens per afgegrensd gebiedje aan de hand van aselect gekozen bomen de gezondheidstoestand.

Soms vindt er na de luchtfoto-interpretatie nog een toetsing van de resultaten in het veld plaats. Ook komt het voor dat de foto's alleen gebruikt worden om veldonderzoek te vergemakkelijken.

Tabel 28.1 Interpretatiesleutel voor Grove den (Hagman, 1985)

| Gezondheidstoestand | Vitaliteitsklasse | Veldkenmerken | Fotografische kenmerken | |
|---|---|---|---|---|
| | | | kleur van de kroon | structuur/textuur van de kroon |
| gezond | 1 | Eén complete naaldjaargang of meer. Kroon dicht tot enigszins lichtdoorlatend. Groene naalden. Geen kale takken. | bruinrood tot (flets) bruinroze. Geen kale takken. | regelmatig grofkorrelig tot vlokkig. |
| gezond | 2 | Minder dan één naaldjaargang. Dicht tot enigszins lichtdoorlatend. Groene naalden. Geen kale takken. | bruinrood tot (flets) bruinroze. Geen kale takken. | fijnkorrelig. |
| aangetast | 3 | Eén complete naaldjaargang. Kroon ijl tot zeer ijl. Groene naalden. Geen kale takken. | bruinrood tot (flets) bruinroze. Geen kale takken. | grofkorrelig, onregelmatig |
| aangetast | 4 | Minder dan één naaldjaargang. Kroon ijl tot zeer ijl. Groene naalden. Geen kale takken. | bruinrood tot (flets) bruinroze. Geen kale takken. | diffuus, fijnkorrelig. |
| aangetast | 5 | Deel van de kroon met kale takken. Groene naalden. | bruinrood tot (flets) bruinroze. Enkele kale takken. | |
| ziek | 6 | Afgestorven kroon. Groene naalden. | bruinrood tot (flets) bruinroze. Centrum van de kroon afgestorven. | |
| ziek | 7 | Naalden geelgroen tot geel. | Kroon bleek tot roze. | |
| zeer ziek | 8 | Naalden bruin, maar wel een halve naaldjaargang of meer. | Kroon geelgroen. | |
| dood | 9 | Geen naalden, of bruine naalden en minder dan een halve naaldjaargang. | Kroon grijsblauw, takstructuur duidelijk zichtbaar. | |

Een voorbeeld van een interpretatiesleutel is in tabel 28.1 gegeven (Hagman, 1985); met de Platen XVII en XVIII worden de betreffende vitaliteitsklassen toegelicht. Veel uitgebreidere interpretatiesleutels zijn ontworpen door Murtha (1972) en Kenneweg (1980). Maar ook sleutels waarin slechts 3 klassen worden onderscheiden, blijken soms voldoende (Masumy, 1983).

De correlatiecoëfficiënt tussen veld- en fotowaarnemingen ligt meestal in de orde van 0,85. Daarbij blijkt dat een belangrijk deel van de niet-correlerende waarnemingen veroorzaakt wordt doordat schade boven in de kroon alleen van boven wordt waargenomen, of dat een kleine boom vanuit de lucht niet waargenomen wordt.

Andere RS-technieken dan de hier besproken visuele interpretatie van kleureninfrarood-luchtfoto's blijken in routinematige toepassingen nauwelijks gebruikt te worden. Naast het kostenaspect speelt daarbij vooral dat (voor de gebruiker) de winst aan spectrale en radiometrische resolutie nog niet opweegt tegen het verlies aan geometrische resolutie. Door toename van de kennis over de relatie tussen gezondheidstoestand en spectrale signatuur, door pixelverkleining en door vergroting van de mogelijkheden van digitale beeldverwerking zal de balans ongetwijfeld doorslaan ten gunste van andere technieken dan een visuele interpretatie van kleureninfrarood-luchtfoto's. Maar dat zou nog wel eens een jaar of tien kunnen duren.

## 28.4 Literatuur


1 Alger, L.A., P.J. Egan & H.J. Heikkenen, 1978. Previsual detection of stressed Loblolly Pine. In: Proc. Symp. 'Remote Sensing for vegetation damage assessment'. Am. Soc. Photogramm. (ed.), blz. 65-71.

2 Eerden, L.J. van der & A.R.P. Janse, 1983. Bomen en remote sensing. Proc. Symp. 'Zure regen; oorzaken effecten en beleid'. Pudoc, Wageningen (ed.), blz. 172-174.

3 Eerden, L.J. van der, H.A.M. van den Ancker & J.H. Loedeman, 1988. Assessment of tree vitality on colour infrared (CIR) and multispectral photography (MSP). Proc. IUFRO-Conf.: 'Air Polution and Forest Decline'. Interlaken, Zwitserland, 2-8 oktober 1988 (in druk).

4 Fox, L., 1978. Previsual detection: the elusive dream. In: Proc. Symp. 'Remote Sensing for vegetation damage assessment'. Am. Soc. Photogramm. (ed.), blz. 53-64.

5 Gates, D.M., 1970. Physiological properties of plants. In: Remote sensing with special reference to agriculture and forestry. Nat. Acad. Sci. (ed.) Washington D.C., blz. 224-252.

6 Gausman, H.W., D.E. Escobar, R.R. Rodriguez, C.E. Thomas & R.L. Bowen, 1978. Using reflectance and photography to detect ozone damage to cantaloupe plants. In: Proc. Symp. 'Remote Sensing for vegetation damage assessment'. Am. Soc. Photogramm. (ed.), blz. 73-87.

7 Hagman, F.A., 1985. Vitaliteitsbeoordeling van grove den (Pinus sylvestris) met behulp van luchtfotografie. IPO Rapport R312, 70 blz.
8 Horler, D.H.N., M. Dockray & J. Barber, 1983. The red edge of plant reflectance. Int. J. Rem. Sensing 4 (2), blz. 273-288.
9 Kadro, A., 1983. Untersuchungen der spektralen Reflexionseigenschaften verschiedener Vegetations Bestände. Allgemeiner Forst Zeitschrift 4647: 1254-1256.
10 Kenneweg, H. 1980. Luftbildinterpretation und die Bestimmung von Belastung und Schaden in vitalitätsgeminderten Wald- und Baumbestanden; Verfahren, Möglichkeiten und Grenzen des operationellen Luftbild-einsatzes. Schriften aus der Forst. Fac. Univ. Gottingen, B62, Sauerl. Verl., Frankf.a.M., 223 blz.
11 Lustgraaf, B. van de, 1984. Remote sensing-methoden voor het beoordelen van de gezondheidstoestand van vegetaties. Pudoc, Wageningen (ed.), 61 blz.
12 Lillesand, T.M., B.B. Eav & P.D. Manion, 1979. Quantifying urban tree stress through microdensitometric analysis of aerial photography. Photogram. Eng. and Rem. Sensing 45 (10), blz. 1401-1410.
13 Lillesand, T.M. & D.E. Meisner, 1982. Application of scanning microdensitometer data in selected plant science case studies. J. Applied Photogr. Eng. 8 (1), blz. 40-45.
14 Masumy, S.A., 1983. Infrarot-farbluftbilder als Grundlage zu der grossraumigen Waldschaden. Algem. Forst Zeitschrift 46/47, blz. 1250-1251.
15 Murtha, P.A., 1972. A guide to air photo interpretation of forest damage in Canada. Can. Forestry Serv. Publ. nr. 1292, Ottawa, 63 blz.
16 Murtha, P.A. & J.A. McLean, 1981. Extravisual damage detection? Defining the standard normal tree. Photogramm. Eng. Rem. Sensing 47 (4), blz. 515-522.
17 Puritch, G.S., 1981. Nonvisual remote sensing of trees, affected by stress. Can. Forestry Serv. Publ. nr. 30, Victoria, 38 blz.
18 Sapp, C.D., 1981. Remote Sensing of sulphur dioxide effects on vegetation. Final report a: summary 25 blz., NTIS rep. TVA-81/5. Final report b: data, 269 blz. NTIS rep. TVA-81/6.
19 Tonelli, A.M., 1978. The use of vegetation as a transducer for environmental pollution. In: Proc. Symp. 'Remote Sensing for vegetation damage assessment'. Am. Soc. Photogramm. (ed.), blz. 115-126.

Documentatie

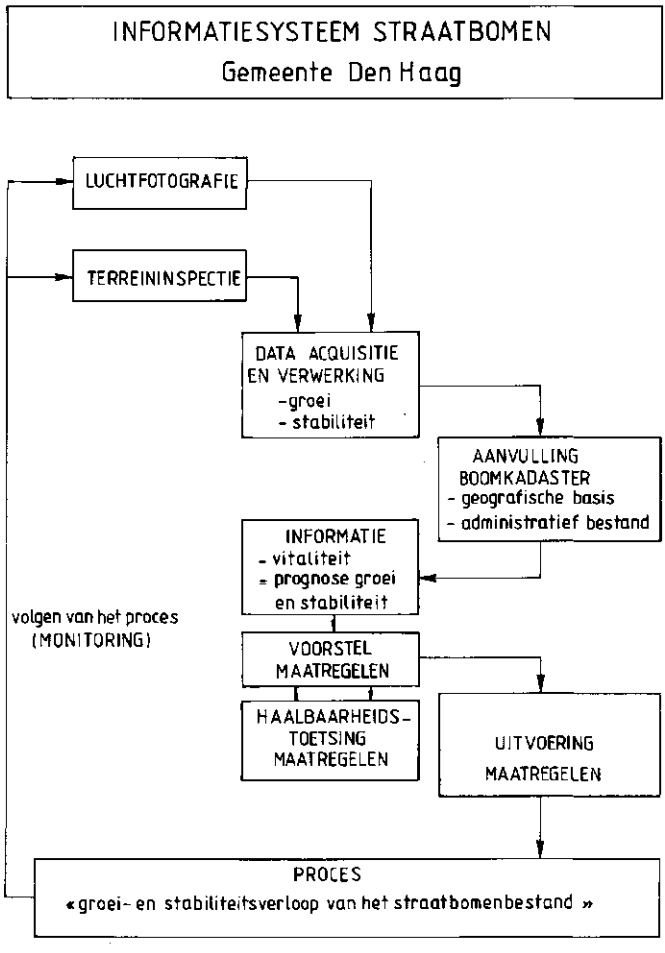
# 29 Remote sensing en schade aan stadsbomen

G.J. Eikenaar

## 29.1 Inleiding

Het beheer van *stadsbomen* is gericht op het naar middelen realiseren en instandhouden van een optimaal functionerend bomenbestand. Bij dit optimaliseringsvraagstuk volgt de nevenvoorwaarde, het aanvaarde schadeniveau, formeel uit het gemeentelijke beleid. Door het ontbreken van algemeen aanvaarde schade-aanduidingen wordt in de praktijk op verschillende manieren aan bovenstaande inhoud gegeven. Het streven naar een systematische aanpak van het bomenbeheer heeft de behoefte doen ontstaan naar een meer toegespitste karakterisering van processen en parameters.
In een eerste benadering kan het *groeiverloop* worden opgevat als het te sturen proces. Groeivermindering kan hierbij worden aangeduid met het begrip *schade*. Om bovenstaand proces te kunnen sturen dient informatie over dit proces *periodiek* beschikbaar te komen. Bedrijfsmatig betekent dit het ontwerpen van een technisch-organisatorische constructie. Een eerste idee hierover is weergegeven in figuur 29-1. Centraal in deze constructie staat een *boomkadaster*. Gegevens over bomen, zoals positie, soort en diameterklasse, kunnen hierin worden opgenomen. Een tweede element in het geheel is de periodieke inspectie van het bomenbestand. De *veldinspectie* van bomen is arbeidsintensief en kan slechts gedurende een beperkt gedeelte van het jaar worden uitgevoerd. RS-technieken bieden de mogelijkheid het totale bomenbestand in betrekkelijk korte tijd vast te leggen. Spreiding van werkzaamheden zou hierdoor tot de mogelijkheden kunnen behoren. Voor een succesvolle toepassing van deze methode gelden de volgende voorwaarden:

(1) vertaling van RS-gegevens naar veldgegevens dient eenduidig mogelijk te zijn;
(2) de uitkomsten van opeenvolgende jaren dienen onderling vergelijkbaar te zijn;




29-1 Eerste idee omtrent een informatiesysteem voor stadsbomen.

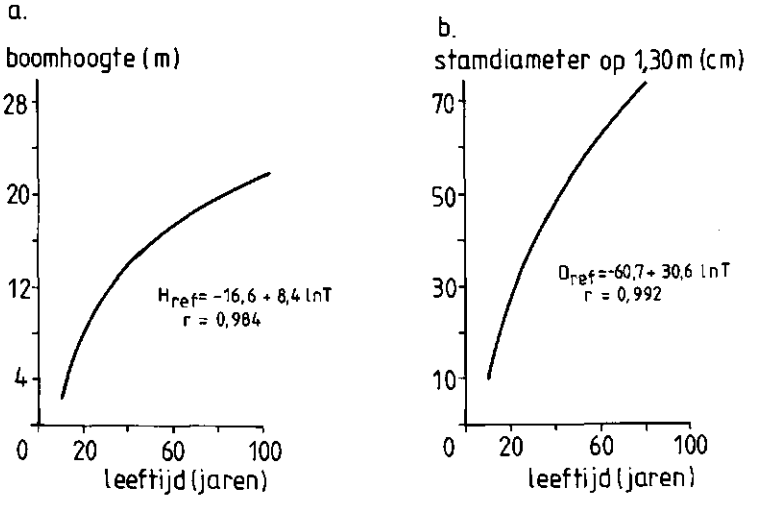
(3) de methode dient praktisch uitvoerbaar te zijn tegen aanvaardbare investeringen en bedrijfskosten.

Naar de bruikbaarheid van RS-technieken (luchtfotografie) in bovenstaand kader werd in samenwerking met de vakgroep Landmeetkunde en Teledetectie van de Landbouwuniversiteit onderzoek verricht.

## 29.2 Veldopnamen en schadetypen

Bij de veldinspectie van stadsbomen wordt veelvuldig het begrip *vitaliteit* gebruikt. Een eenduidige omschrijving van dit begrip ontbreekt. In hoofdstuk 28 kwam dit begrip al eerder ter sprake. Hier zal het begrip vitaliteit worden gebruikt ter aanduiding van het vermoedelijke verloop van de groei (en stabiliteit) in de eerst komende jaren (d.w.z.: prognose). In deze zin kan het begrip vitaliteit worden opgevat als het resultaat van een extrapolatie. Deze extrapolatie kan in een eerste

benadering worden gebaseerd op het 'groei-verleden' en het 'groei-heden' (schadetype).
Het '*groei-verleden*' kan worden afgeleid uit de ontwikkeling van de boomhoogte en de stamdiameter. De waardering van dit 'groei-verleden' volgt uit een toetsing van waarnemingen aan een referentie-kader (figuur 29-2).




**29-2** Referentie-kader voor het 'groei-verleden' van Aesculus hippocastanum; Den Haag
(r = correlatiecoëfficiënt)
a: hoogtegroei (boomhoogte H) als functie van de leeftijd (T)
b: diktegroei (stamdiameter D) op borsthoogte als functie van de leeftijd.

Het 'groei-verleden' en het bepalen van de vitaliteit van stadsbomen wordt verder buiten de beschouwing gelaten.
Het '*groei-heden*' (schadetype) kan in eerste instantie worden afgeleid uit de kroonkenmerken bladhoeveelheid en kleur (Murtha, 1978; Hagman, 1985). In het kader van het onderzoek werden de boomkronen integraal op bovenstaande kenmerken beoordeeld. Ten behoeve van deze beoordeling werden de onderscheiden beschadigingssyndromen (verschijnselen) opgenomen in een *determinatie-sleutel* (tabel 29.1).

In *kwalitatieve* zin zijn verschillen in schadetype met kleureninfrarood-luchtfotografie (false colour) betrekkelijk goed te onderscheiden. De Platen XIX en XX geven hiervan voorbeelden.
In *kwantitatieve* zin is nog weinig bekend over de relatie tussen schadetype en schade (groeivermindering). De *opeenvolging* van syndromen tussen de extremen is eveneens onvoldoende bekend. In een eerste benadering is gekozen voor de opeenvolging van syndromen, zoals deze zich in de herfst manifesteert (vergeling-verbruining-bladval). Aangenomen wordt dat het schadeniveau toeneemt in eerder genoemde volgorde. Met de *omvang* van de beschadiging werd ook rekening gehouden.

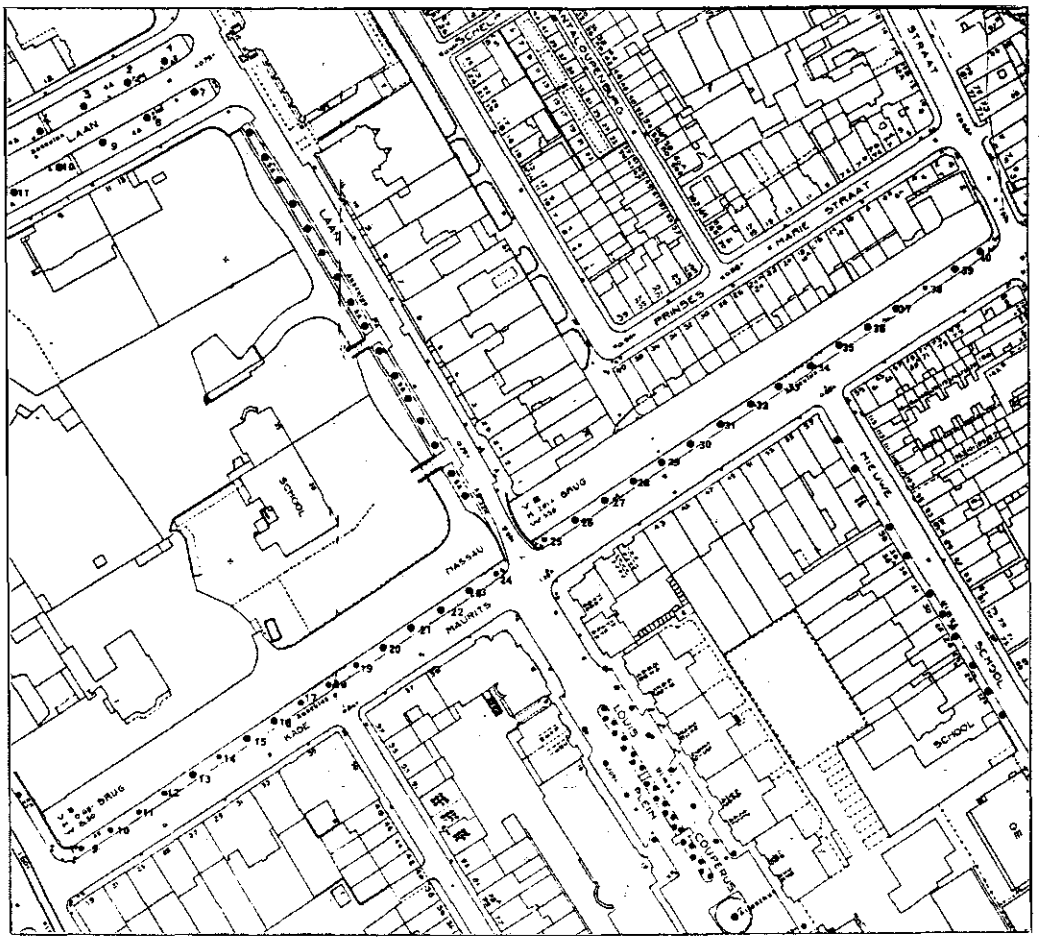
Het veldonderzoek heeft zich toegespitst op de boomsoort Aesculus hippocastanum (paardekastanje). In tabel 29.2 zijn enkele gegevens opgenomen over de geselecteerde objecten. Figuur 29-3 geeft een overzicht van een deel van de onderzoekslocatie in Den Haag.

Tabel 29.1 Determinatie-sleutel schadetypen voor Aesculus hippocastanum

| | | | type |
|---|---|---|---|
| A. | morfologische afwijkingen als gevolg van bladval; kale takken zichtbaar | | |
| | 01 a. | geheel of grotendeels ontbladerd | (naar 02) |
| | b. | gedeeltelijk ontbladerd | (naar 03) |
| | 02 a. | Kale stam met structureel takverlies | $IV_2$ |
| | b. | kale stam zonder structureel takverlies | $IV_1$ |
| | 03 a. | gedeeltelijke ontbladering beperkt tot de top | $III_2$ |
| | b. | gedeeltelijke ontbladering verspreid | $III_1$ |
| B. | fysiologische afwijkingen die zich uiten in verkleuring van de bladeren | | |
| | 04 a. | kroon geheel of grotendeels verkleurd | (naar 05) |
| | b. | kroon gedeeltelijk verkleurd | (naar 06) |
| | 05 a. | overwegend bruin | $II_2$ |
| | b. | overwegend geel | $II_1$ |
| | 06 a. | verkleuring beperkt tot top | (naar 07) |
| | b. | verkleuring verspreid | (naar 08) |
| | 07 a. | overwegend bruin in top | $I_4$ |
| | b. | overwegend geel in top | $I_3$ |
| | 08 a. | overwegend bruin | $I_2$ |
| | b. | overwegend geel | $I_1$ |
| C. | geen zichtbare afwijkingen | | 0 |

Tabel 29.2 Veldbeoordeling Aesculus hippocastanum te Den Haag

| Object | Aantal | Diameter kroon | Beoordelingsdata |
|---|---|---|---|
| Sophialaan | 12 | > 6 m | 11-8-83, 25-8-85 |
| Mauritskade | 30 | > 6 m | 11-8-83, 25-8-85 |
| Koningskade | 20 | > 6 m | 11-8-83, 25-8-85 |




29-3 Overzicht onderzoekslocatie in Den Haag.

## 29.3 Luchtfotografie en schade

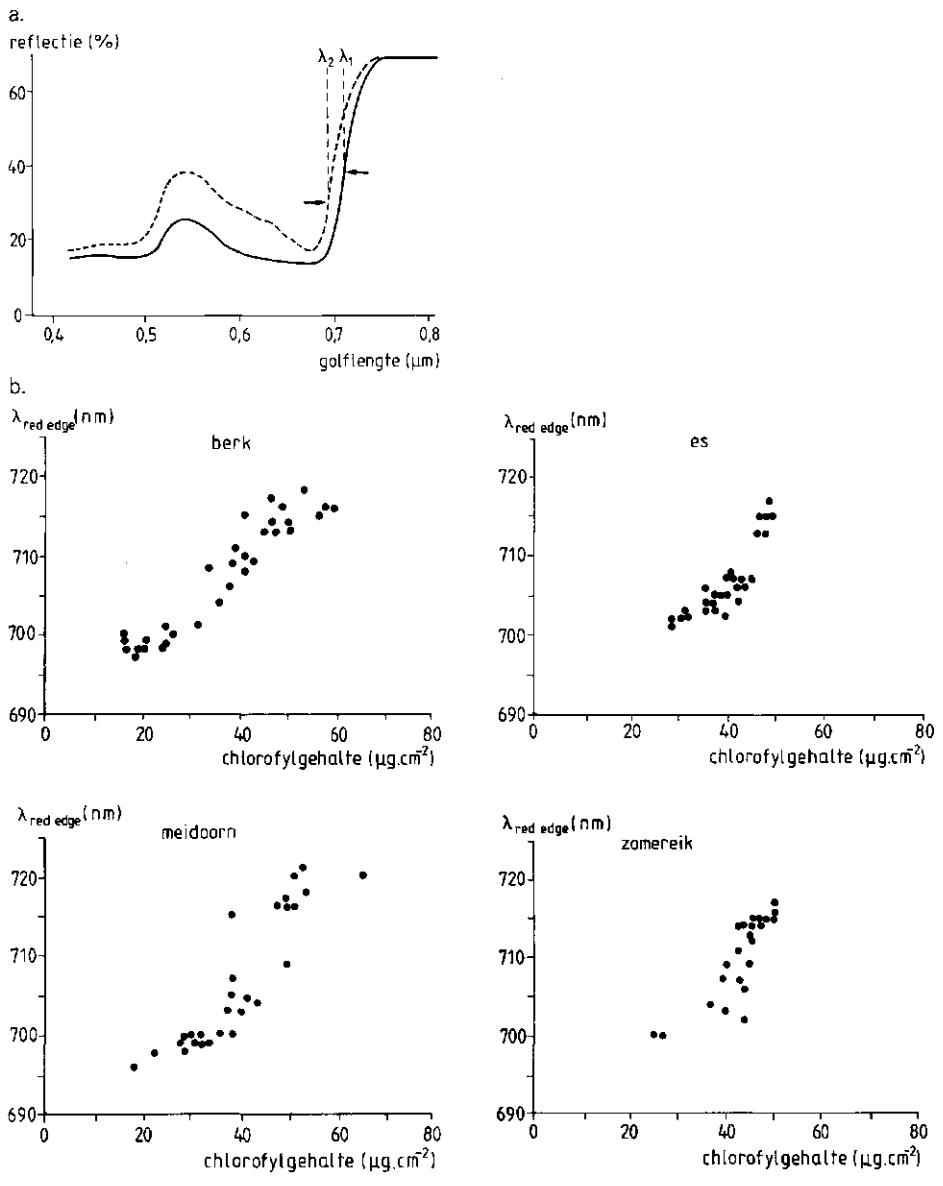
29.3.1 Verband tussen reflectie en schade

In de literatuur worden drie golflengte-gebiedjes genoemd wanneer het gaat om het oorzakelijke verband tussen reflectie en schade-parameters:

(1) de mate van reflectie tussen 650 en 700 nm (rood), verband houdend met de fotosynthese-activiteit;
(2) de mate van reflectie tussen 700 en 900 nm (nabij-infrarood), verband houdend met de bladhoeveelheid;
(3) de overgang tussen (1) en (2), de zgn. 'red edge' (figuur 29-4a), verband houdend met het pigmentgehalte (figuur 29-4b; vgl. ook paragraaf 28.2).

Schade zou tot uitdrukking kunnen komen in:

(1) een verhoogde rood-reflectie;
(2) een verminderde infrarood-reflectie;




**29-4** a Definitie van de 'red edge' in de reflectiekarakteristiek van een plant, als overgang tussen de golflengtegebieden rood en nabij-infrarood, en weergegeven met de waarde $\lambda_1$ resp. $\lambda_1$ voor een gezonde (getrokken lijn) resp. een door begassing beschadigde plant (gestippelde lijn). Deze waarden corresponderen met de buigpunten (zie de pijltjes) in de opgaande lijnstukken nabij 700 nm
(bron: Horler et al., 1983)

b Ligging van de 'red edge' als functie van het chlorofylgehalte
(bron: Horler et al., 1983) voor vier boomsoorten onder veldomstandigheden.

(3) een verschuiving van de 'red edge' in de richting van de kortere golflengten ('blue shift', vgl. paragraaf 28.2);
(4) een combinatie van (1), (2) en (3).

### 29.3.2 Registratie van straling door middel van luchtfotografie

Het oorzakelijk verband tussen reflectie en schade-parameters leidde tot het idee dat stralingsmeting bruikbaar zou kunnen zijn voor het bepalen van schade aan stadsbomen. De methode staat of valt echter met de mogelijkheid de reflectie goed te bepalen. Hiervoor is naast een goede opname-techniek een meettechniek nodig, die deugdelijke resultaten oplevert.

Kleureninfrarood-luchtfotografie komt niet in aanmerking, omdat:
(1) visuele interpretatie van dergelijke opnamen bewerkelijk en weinig objectief is;
(2) radiometrische ijking van kleureninfrarood-opnamen complex is ten opzichte van de vereiste nauwkeurigheid;
(3) de spectrale resolutie onbevredigend is.

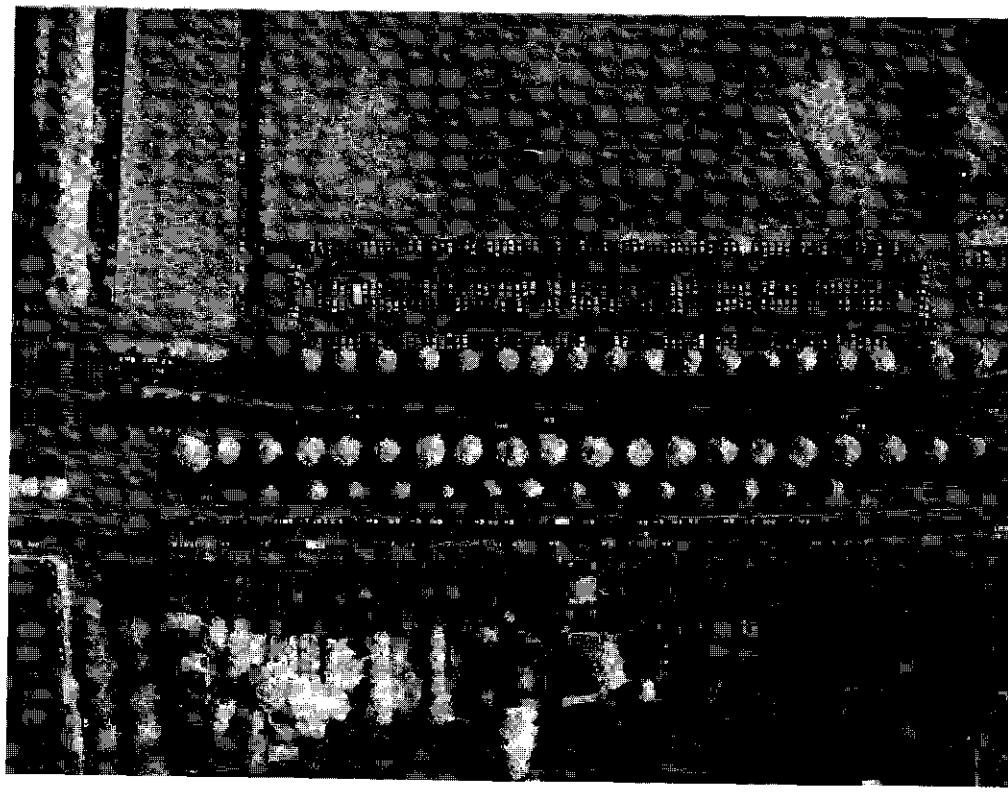
Daarentegen is de multispectrale zwart-wit luchtfotografie (MSP, zie paragraaf 4.1.1) een reeds beproefde techniek voor radiometrie (stralingsmeting; zie ook hoofdstuk 9). Via keuze van film en filters is het mogelijk tegelijkertijd in meerdere gewenste golflengte-banden opnamen te maken. Voor onderzoek aan akkerbouwgewassen is aan de Landbouwuniversiteit een multispectrale opname-techniek ontwikkeld met 70-mm Hasselblad camera's, die goed bleek te voldoen (Clevers, 1986).
De Landbouwuniversiteit heeft van de onderzoeksobjecten in Den Haag multispectrale luchtfotografische opnamen gemaakt in 1983, 1984 en 1985. Voor dit onderzoek werd gebruik gemaakt van de emulsies Kodak Plus-X Aerographic 2402 en Kodak Infrared Aerographic 2424. Voor de rode band werd een Wratten 25 filter en voor de nabij-infrarode band een Wratten 87 filter gebruikt. In tabel 29.3 zijn de gekozen combinaties vermeld. Figuur 29-5 laat een opname in de nabij-infrarode band zien.

Tabel 29.3 Combinaties van film en filters voor luchtfotografie van stadsbomen

| film | | filter | bandbreedte |
|---|---|---|---|
| merk | type | Wratten | film+filter |
| Kodak | Plus-X Aerographic 2402 | 25 | 600-700 nm |
| Kodak | Ir Aerographic 2424 | 87 | 780-900 nm |

### 29.3.3 Verwerking van densiteiten tot reflectiefactoren

Voor het berekenen van *reflectiefactoren* (reflectie-coëfficiënten) uit densiteiten is dezelfde methodiek en dezelfde apparatuur gebruikt als voor het onderzoek van Clevers (1986). De ijking van luchtfotografie m.b.v. referentiepanelen is in hoofdstuk 9 beschreven. De verwerking van de gegevens vereiste evenwel geheel nieuwe programmatuur.
Met een aangepaste MacBeth TD-504 densitometer, voorzien van een cirkelvormige meetopening van 0,25 mm, zijn de middens van de boomkronen op rij gescand met een frequentie van 8 metingen per mm.



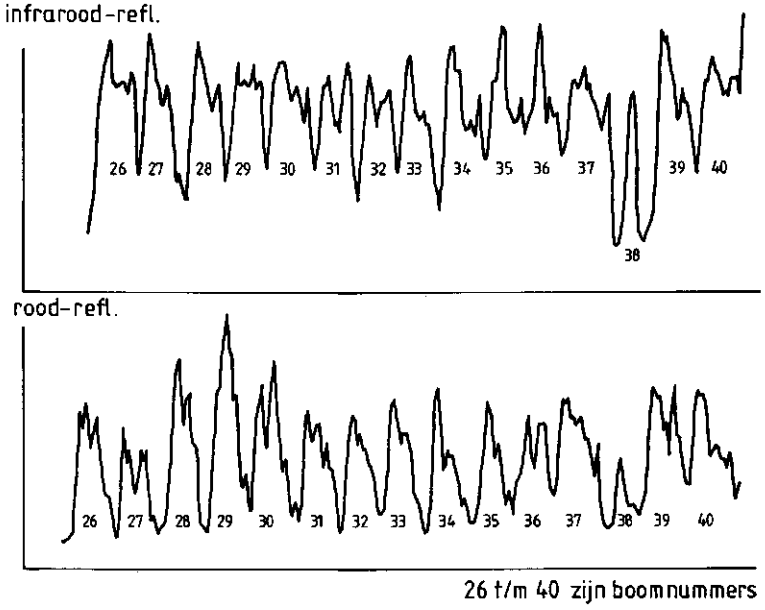
29-5 Voorbeeld van multispectrale fotografie, nabij-infrarode band, Aesculus hippocastanum, Koningskade, Den Haag, 11-8-1983.

Bij een opnameschaal van 1:6000 komt dit neer op 1 meting per 0,75 m boomkroon. Begin en einde van de scanlijn werden op de foto gemarkeerd met ondoorzichtig plakband.
Voor het automatisch verwerken van de gemeten densiteiten van een scanlijn tot reflectiefactoren per boom zijn aanvullende gegevensbestanden nodig, zoals: terreincoördinaten van begin en eindpunt van een scanlijn, positie van de bomen, hoogte en diameterklasse per boom. Hiernaast zijn gegevens nodig voor de radiometrische berekeningen (lichtafval, DlogQ-curve, brandpuntsafstand van de lens; zie paragraaf 6.4.4 en de practische uitwerking in paragraaf 9.3).
Per scanlijn is de gang van zaken als volgt:

- toevoegen van fotocoördinaten aan een gemeten densiteit via interpolatie;
- berekenen van de stralingsenergie via DlogQ en correctie voor lichtafval van de lens aan de hand van de fotocoördinaten;
- sorteren van berekende energie-waarden per boom. Dit levert een tabel op van boomnummers met bijbehorende energie-waarden;

- via betrekking (9.2) worden de constanten a en b berekend met behulp van bekende reflectiefactoren door middel van referentiepanelen, gevolgd door het omrekenen van alle stralingsenergie-waarden naar reflectiefactoren;
- statistische verwerking van reflectiefactoren per boom (gemiddelde, mediaan, standaardafwijking);
- uitvoer van de gegevens in tabelvorm of in grafische vorm.

## 29.4 Resultaten en nabeschouwing




29-6 Reflectiefactoren in de infrarode en rode band als functie van de plaats op de boomkronen (boomnrs. 26 t/m 40, Mauritskade, 1985).

Figuur 29-6 toont voor een aantal bomen de reflectiefactor als functie van de plaats op de kroon. Voor de karakterisering van de reflectiefactor-verdeling per band en per kroon werd in een eerste benadering gekozen voor de statistische kenmerken gemiddelde, mediaan en standaardafwijking. In tabel 29.4 zijn enkele resultaten van deze verwerking weergegeven. De vraag is of deze eenvoudige karakterisering van complexe verdelingen voldoende is om schadetypen van elkaar te kunnen onderscheiden. Een eerste antwoord zou kunnen worden verkregen door eerder genoemde kenmerken in verband te brengen met de veldbeoordeling. In tabel 29.5 zijn enkele resultaten van de veldbeoordeling opgenomen.

In de figuren 29-7 en 29-8 zijn de reflectiefactoren (gemiddelde per kroon) in de rode en infrarode band tegen elkaar uitgezet, respectievelijk voor 1983 en 1985. In de figuren zijn bovendien de verschillende schadetypen door symbolen weergegeven. De schadetypen 0 (laag schadeniveau) en III (hoog schadeniveau) zijn geclusterd.

Tabel 29.4 Resultaat van de statistische verwerking voor het bepalen van de reflectiefactorverdeling per boomkroon en per band, Mauritskade, Den Haag (MSP opnamedatum 11-8-'83). gem. = gemiddelde; st.afw. = standaardafwijking; v.c. = variatiecoëfficiënt; aantal = beschikbaar aantal metingen per boomkroon.

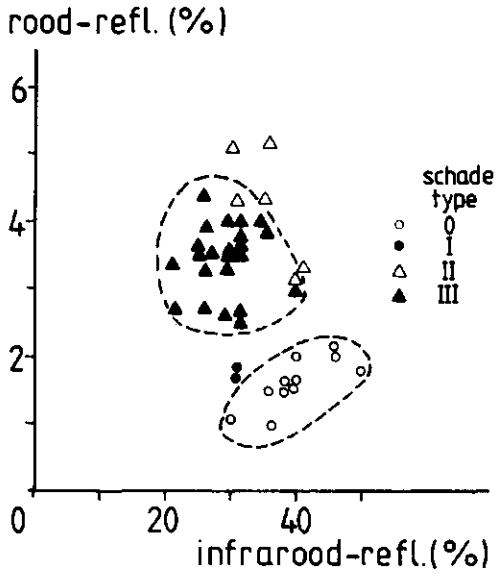
| rood reflectiepercentage | | | | | | infrarood reflectiepercentage | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| nr. | gem. | mediaan | st. afw. | v.c. | aantal | nr. | gem. | mediaan | st. afw. | v.c. | aantal |
| 25 | 2.11 | 0.45 | 1.44 | 0.69 | 5 | 25 | 27.02 | 9.58 | 10.34 | 0.38 | 4 |
| 26 | 3.30 | 0.89 | 0.86 | 0.26 | 13 | 26 | 28.29 | 6.37 | 7.49 | 0.26 | 12 |
| 27 | 2.57 | 0.68 | 0.59 | 0.23 | 12 | 27 | 33.53 | 13.33 | 6.63 | 0.20 | 13 |
| 28 | 3.12 | 0.87 | 0.63 | 0.20 | 13 | 28 | 40.88 | 14.81 | 6.74 | 0.16 | 13 |
| 29 | 3.96 | 0.68 | 1.55 | 0.39 | 12 | 29 | 34.68 | 11.74 | 5.37 | 0.15 | 13 |
| 30 | 3.47 | 1.09 | 0.74 | 0.21 | 13 | 30 | 31.96 | 12.96 | 3.54 | 0.11 | 13 |
| 31 | 3.73 | 1.02 | 0.85 | 0.23 | 12 | 31 | 31.10 | 12.57 | 3.91 | 0.13 | 13 |
| 32 | 3.83 | 0.91 | 1.30 | 0.34 | 13 | 32 | 32.62 | 11.51 | 5.65 | 0.17 | 12 |
| 33 | 3.96 | 1.30 | 0.76 | 0.19 | 13 | 33 | 32.52 | 11.15 | 6.19 | 0.19 | 13 |
| 34 | 3.27 | 1.32 | 0.27 | 0.08 | 12 | 34 | 27.68 | 11.46 | 3.49 | 0.13 | 12 |
| 35 | 3.47 | 1.37 | 0.43 | 0.12 | 13 | 35 | 30.06 | 11.17 | 5.72 | 0.19 | 12 |
| 36 | 3.49 | 1.03 | 0.65 | 0.19 | 12 | 36 | 25.77 | 9.45 | 3.81 | 0.15 | 13 |
| 37 | 3.97 | 1.42 | 0.75 | 0.19 | 12 | 37 | 28.67 | 12.59 | 2.65 | 0.09 | 13 |
| 38 | 7.22 | 1.48 | 3.99 | 0.55 | 6 | 38 | 14.44 | 5.86 | 2.20 | 0.15 | 6 |
| 39 | 4.36 | 1.70 | 0.73 | 0.17 | 13 | 39 | 26.17 | 9.41 | 3.73 | 0.14 | 13 |
| 40 | 3.85 | 1.42 | 0.67 | 0.17 | 13 | 40 | 27.03 | 11.57 | 3.17 | 0.12 | 12 |

Uit de figuren 29-7 en 29-8 valt af te leiden dat *extreme* schadetypen zich op bovenstaande wijze laten onderscheiden. Minder duidelijk is het gedrag van de middenklassen.
Het gedrag van de gemeten reflectie komt goed overeen met hetgeen in de literatuur wordt beschreven (toename roodreflectie en afname infraroodreflectie bij toename van de beschadiging; zie ook figuur 28-1). Deze eerste resultaten zijn bemoedigend te noemen. Enkele onvolkomenheden kunnen nu reeds worden gesignaleerd, met name dat de biologische definitie van schade (en vitaliteit) en de bijbehorende classificatie in schadetypen nader beschouwd dient te worden in relatie tot de eigenschappen van de RS-opname.
In dat kader dient tevens te worden nagegaan in hoeverre de *structuur van de kroon* informatie verschaft over schade. Door het gebruik van de gemiddelde reflectiefactor worden structuurverschillen veelal aan het oog onttrokken. Bij de densitometrie werd een meetopening gebruikt die groter is dan de details in de kroon. Structuurverschillen kunnen hierdoor worden genivelleerd. Ook de *technische uitvoering* van opname en reflectiefactor-berekening dient nader beschouwd te worden. De technische uitvoering verliep in feite niet geheel vlekkeloos. Normale belichtingsmeters zijn in principe niet geschikt bij opname in het

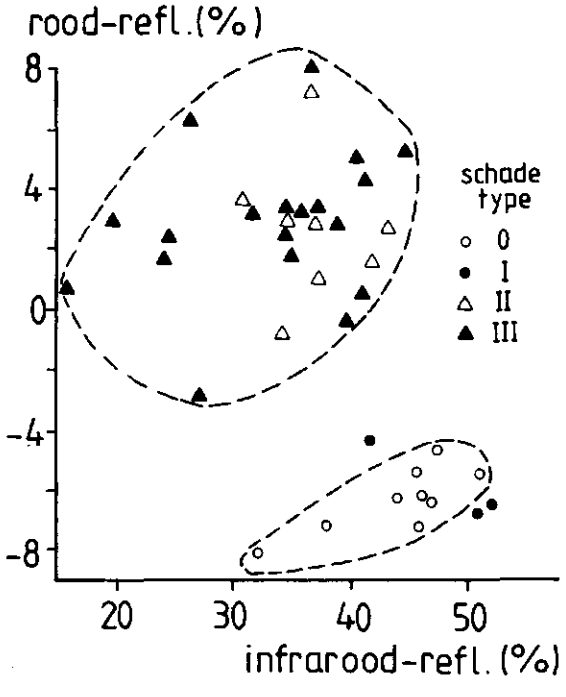
Tabel 29.5 Resultaat veldbeoordeling A. hippocastanum, Mauritskade, Den Haag (MSP opnamedata 11-8-'83, 25-8-'85). De 'diameter' betreft de kroon. Het 'schadetype' is conform de in tabel 29.1 gegeven specificaties.

| boom nr. | diameterklasse (m) | | | | schadetype | | opmerking |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | '83 | | '85 | | '83 | '85 | |
| | < 6 | > 6 | < 6 | > 6 | | | |
| 15 | | + | | + | II | III | |
| 16 | | + | + | | III | I | gerooid '84 |
| 17 | + | | + | | II | II | |
| 18 | + | | + | | II | II | |
| 19 | + | | + | | 0 | II | |
| 20 | | + | + | | III | I | gerooid '84 |
| 21 | | + | | + | II | III | |
| 22 | | + | | + | II | II | |
| 23 | | + | | + | II | III | |
| 24 | + | | + | | I | I | |
| 25 | + | | + | | 0 | I | |
| 26 | | + | | + | III | II | |
| 27 | | + | | + | III | II | |
| 28 | | + | | + | III | III | |
| 29 | | + | | + | III | III | |
| 30 | | + | | + | III | III | |
| 31 | | + | | + | III | III | |
| 32 | | + | | + | III | III | |
| 33 | | + | | + | III | III | |
| 34 | | + | | + | III | III | |
| 35 | | + | | + | III | III | |

infrarood (zie paragraaf 3.3). De belichting van de films is in enkele gevallen niet optimaal geweest tengevolge van een onjuiste instelling. Bovendien is niet zeker dat boven stedelijk gebied vergelijking (9.2) onder alle omstandigheden geldt. Het onderwerpcontrast is in stedelijk gebied veel hoger dan in agrarisch gebied. In een stad zijn bomen de objecten die ten opzichte van bestrating en gebouwen in het rood het minst reflecteren (ca. 5% respectievelijk ca. 20%). In het nabij-infrarood is de situatie juist omgekeerd (ca. 50% respectievelijk 20%). De belangrijkste aanwijzing voor een mogelijk beperkte geldigheid van vergelijking (9.2) is dat de rood-opnamen van 1985 negatieve reflectiefactoren opleverden. Dat dit zich juist in het rood manifesteert volgt uit de zeer lage reflectie van niet-beschadigde bomen (2-3%), waarbij door de extrapolatie in de ijkcurve voor de referentiepanelen al gauw een negatieve waarde kan optreden.




29-7 Relatie tussen infrarood- en roodreflectie voor de diverse schadetypen in 1983.




29-8 Relatie tussen infrarood- en roodreflectie voor de diverse schadetypen in 1985.

De luchtfototechnische problemen zullen waarschijnlijk oplosbaar blijken. Meer fundamenteel is de problematiek rond het begrip schade (en vitaliteit). Hiervoor zal een algemeen aanvaarde benadering dienen te worden gekozen. Mogelijk kunnen RS-gegevens hierbij *richtinggevend* zijn (definiërend karakter).

## 29.5 Literatuur

1 Clevers, J.G.P.W., 1986. Application of remote sensing to agricultural field trials. Agricultural University Wageningen Papers 86-4, 227 blz.

2 Eikenaar, G.J. & J.H. Loedeman, 1983. Remote sensing en straatbomen (III). NGT Geodesia 9: 266-281.

3 Hagman, F.A., 1985. Vitaliteitsbeoordeling van grove den (Pinus sylvestris) met behulp van luchtfotografie. IPO Rapport R312, 70 blz.

4 Horler, D.N.H., H. Dockray & J. Barber, 1983. The red edge of plant leaf reflectance. Int. J. Rem. Sensing 4: 273-288.

5 Loedeman, J.H., J.G.P.W. Clevers & C.A. Horton, 1986. Determination of spectral reflectance of crops during growth from calibrated multispectral small format aerial photography. Proc. Symp. on Progress in Imaging Sensors, Stuttgart, September 1986, 14 blz.

6 Murtha, P.A., 1978. Remote sensing and vegetation damage: a theory for detection and assessment. Symposium on remote sensing for vegetation assessment, Am. Society of Photogrammetry, Seattle, Washington.

7 Slater, P.N., 1980. Remote sensing: optics and optical systems. Addison-Wesley Publ. Comp., Reading, Massachusetts, 575 blz.

Documentatie

# 30 Remote sensing en de opsporing van stortplaatsen

C. Meulstee

## 30.1 Inleiding

Bodemverontreiniging vormt vooral in dicht bevolkte, geïndustrialiseerde gebieden zoals Nederland een steeds toenemend probleem.
Een van de nijpende vragen betreft de aanwezigheid van stortplaatsen van afvalstoffen die hun invloed, vroeg of laat, doen gelden op de verontreiniging van het milieu. Het zo te noemen *stortplaatsonderzoek* richt zich op zowel de opsporing van stortplaatsen als op het onderkennen van ongewenste ontwikkelingen in de bodem en in het grondwater.
Omdat het Nederlandse remote sensing-onderzoek met betrekking tot het opsporen van bodemverontreiniging tot nu toe voornamelijk gericht is geweest op stortplaatsonderzoek, zal ook dit hoofdstuk zich beperken tot de bijdrage die *remote sensing-technieken* kunnen leveren aan de aspecten van het *opsporen* en *lokaliseren* van stortplaatsen en, waar mogelijk, van het aanduiden van de ruimtelijke uitbreiding van hun invloed op de omgeving.

## 30.2 Afvalstortplaatsen

*Afval storten* betekent ergens, definitief, over een bepaalde oppervlakte een hoeveelheid afvalstoffen deponeren (Eurosense, 1982). Een onderverdeling kan gemaakt worden in legale en illegale afvalstorten. Van een *legale afvalstort* is in het algemeen de aard van het materiaal bekend. Bijvoorbeeld in geval van afvalbergen bij (voormalige) steenkoolbedrijven is bekend, dat bij contact van het afvalmateriaal met water en zuurstof onder andere zwavelzuur en ijzerzouten vrijkomen. In dit geval kunnen maatregelen worden getroffen om er voor te zorgen dat deze stoffen zich niet in de omgeving verspreiden. Anders is het wanneer er sprake is van *illegale stort* van voor het milieu schadelijk afval (bijv. HCH-schandaal in Twente).

De laatste jaren zijn veel in het verleden ontstane *stortplaatsen*, vooral van kleinere omvang, aan het licht gekomen en nog steeds wordt afvalmateriaal illegaal gestort.
Een deel van de effecten van een stortplaats is direct te zien of te ruiken. De indirecte effecten, zoals verontreiniging van grond- en oppervlaktewater door verontreinigd percolaat vormen de meest bedreigende. Deze effecten kunnen zich over grote oppervlakten verspreiden. De indirecte effecten via het grondwater zijn op lange termijn erg onvoorspelbaar, omdat dikwijls onvoldoende bekend is over grondwaterstroming (richting, reikwijdte en debiet). De aandacht bij het stortplaatsonderzoek gaat dan ook niet alleen uit naar opsporing van (illegale) stortplaatsen, maar met name ook naar die *secundaire effecten.*

## 30.3 Stortplaatsonderzoek in Nederland met behulp van Remote Sensing

Binnen Nederland zijn de afgelopen jaren door diverse instanties, meestal in opdracht van Provinciale Waterstaatsdiensten, RS-technieken ingezet als hulpmiddel bij het stortplaatsonderzoek. Enkele hiervan worden hieronder nader belicht.

Bij diverse onderzoeken is gebruik gemaakt van historisch zwart-wit fotomateriaal van de Topografische Dienst met een schaal van circa 1:18.000 (vanaf 1976) resp. 1:20.000 (vóór 1976). Voordeel van het gebruik van deze fotografie is dat deze relatief goedkoop is en dat materiaal van vele jaren terug beschikbaar is. Op grond van deze luchtfoto's kunnen voormalige, nu afgedekte storten alsnog worden opgespoord, mits deze in het jaar van de foto-opname zichtbaar waren. In 1982 is ten behoeve van de Provinciale Waterstaat Zuid-Holland een fotovlucht uitgevoerd boven een gedeelte van de provincie, onder andere het tuinbouwgebied rond Boskoop (Eurosense, 1982). Dit gebied is met name erg onoverzichtelijk door de langgerekte kavels en door de lintbebouwing langs de (inspectie-)wegen. Dit maakt het opsporen van veelal kleine stortplaatsen moeilijk. Op basis van de milieuvraagstelling en op grond van kleureninfrarood-luchtfotografie met een schaal 1:10.000 en een gerichte veldinspectie is een classificatietabel gemaakt van de stortplaatsen. Onderscheid kan worden gemaakt tussen storten op land en slootdempingen, al dan niet afgedekt met vegetatie. Ongeveer 90% van de in kaart gebrachte stortplaatsen bleek bij veldcontrole juist te zijn geclassificeerd. Vrijwel alle bij de provincie bekende en veel onbekende stortplaatsen zijn bij dit onderzoek opgespoord. Een voorbeeld van een dergelijke kleureninfrarood-luchtfotografische opname geeft Plaat XXI.

Behalve bij de opsporing van kleinere stortplaatsen is RS ook ingezet bij de opsporing van ongewenste ontwikkelingen op of rond *grotere stortterreinen.* Boven een actief stortterrein en boven een recreatieterrein dat op een voormalig stortterrein was aangelegd, werden RS-vluchten

uitgevoerd. Hier werden naast warmtebeelden simultaan ook grootschalige kleureninfrarood-luchtfoto's opgenomen. De schaal van de luchtfotografische opnamen wordt in deze gevallen gekozen rond de 1:3.000. Het gaat hier immers om van te voren geselecteerde, relatief kleine gebieden. Er worden in het algemeen *warmtebeelden* opgenomen teneinde thermische verontreiniging op en rond stortterreinen te detecteren. Omdat bijvoorbeeld ten gevolge van biologische of chemische reacties in het afvalmateriaal warmte vrijkomt, kunnen vanuit de lucht met thermisch-infrarood lijnaftastende systemen (TIR-scanners, zie paragraaf 7.2.2) temperatuurverschillen worden opgespoord, mits deze aan het oppervlak tot uiting komen en een voldoend grote oppervlakte beslaan. Een voorbeeld hiervan geeft Plaat XXII. Zogenaamde 'hot spots' kunnen op warmtebeelden eenvoudig worden opgespoord. Het bleek dat ook op de luchtfoto's deze locaties konden worden gesignaleerd.
De luchtfoto's dienden in bovengenoemde situaties ter ondersteuning van de geometrische en thematische interpretatie van de warmtebeelden. In het veld zal vervolgens moeten worden vastgesteld wat de oorzaak is van de gevonden temperatuurverschillen. Voor een goede interpretatie van de beelden moet eigenlijk kennis omtrent geohydrologische verschijnselen ingeschakeld worden.

In opdracht van de Provinciale Waterstaat Overijssel is in 1984 en 1985 een onderzoek uitgevoerd naar de opsporing van de schadelijke stof HCH (hexachloorcyclohexaan, Eurosense, 1984 en 1985). Deze stof is afkomstig van een voormalige chemische bestrijdingsmiddelenfabriek en het vermoeden bestaat dat HCH in de laatste 3 decennia op ruime schaal illegaal gestort is in het landelijk gebied van Twente. Bij het onderzoek is gebruik gemaakt van bestaand fotomateriaal van de Topografische Dienst vanaf 1951 (schalen 1:20.000 en 1:18.000) en recent fotomateriaal met een schaal 1:7.000 (multispectrale en kleureninfrarood-luchtfotografie). In eerste instantie is getracht een methode te zoeken voor directe opsporing van HCH. Dit bleek niet mogelijk. Plaatsen die op basis van fotokenmerken 'verdacht' werden, moesten in het veld worden geïnspecteerd op de aanwezigheid van HCH. Bij veldinspectie werd op 11 van de 23 bezochte locaties inderdaad HCH aangetroffen.
Onder meer vanwege de hoge kosten van RS hanteert de Provincie Zuid-Holland nu een andere methode bij het stortplaatsonderzoek. In samenwerking met Rijks- en Gemeentepolitie, gemeentes en waterschappen wordt gebruik gemaakt van een helicopter, met aan boord een fotograaf en iemand met terreinkennis. De stortplaatsen worden in kaart gebracht en eventueel gefotografeerd. Waar nodig kan de veldinspectie direct plaatsvinden. Het is duidelijk dat bij deze methode het belangrijke monitoringeffect verloren gaat.

## 30.4 Luchtfoto's en hun interpretatie

Op een luchtfoto zijn allerlei objecten van overeenkomstige en verschillende vorm, kleur, reliëf en grootte zichtbaar. Sommige objecten zijn direct herkenbaar, afhankelijk van de voorkennis en ervaring van de interpretator. Herkenning van objecten en combinatie met informatie van niet-fotografische aard is het terrein van de *foto-interpretatie* (vergelijk hoofdstuk 6 en Supplement 1).
Een belangrijk punt bij de foto-interpretatie is het formuleren van de probleemstelling. Hieruit moet blijken welke specifieke informatie uit de beelden gehaald moet worden (van Stokkom, 1983). Bij het stortplaatsonderzoek is dit bijvoorbeeld het *in kaart brengen* van alle illegale stortplaatsen in het gevlogen gebied. Na een eerste interpretatie van de foto's wordt in het algemeen steekproefsgewijs een controle in het veld uitgevoerd. Op basis van de foto-interpretatie en de *veldinspectie* wordt een definitieve classificatie van stortplaatsen vastgesteld of aangepast, op basis waarvan de overige foto's worden geïnterpreteerd. Na kartering van de stortplaatsen worden deze in het veld geïnspecteerd op aanwezigheid van milieugevaarlijke stoffen. De aard van het materiaal kan dus op grond van alleen luchtfoto's niet worden vastgesteld. Wel is het mogelijk om op basis van de foto-interpretatie het veldwerk zeer gericht uit te voeren.
De relatie fotoschaal en te verwachten stortplaatsgrootte vormt een belangrijk aspect. Uitgaande van een minimaal waarneembare oppervlakte van ongeveer 0,8 * 0,8 mm op de foto moet in het geval van de eerdergenoemde schaal van het luchtfotomateriaal van de Topografische Dienst de minimale stortplaatsgrootte 15 * 15 meter bedragen.
De fotoschaal ligt in het algemeen bij nieuw uit te voeren fotografie, afhankelijk van de grootte van het te vliegen gebied en van de te verwachten stortplaatsgrootte, in het algemeen tussen de 1:5.000 en 1:10.000. Met behulp van grootschalige fotografie kunnen meer stortplaatsen worden opgespoord, die echter vaak bestaan uit afvalhoopjes bij boerderijen. Om de kosten zo laag mogelijk te houden wordt een zo klein mogelijke schaal gekozen.

Met panchromatische, zwart-wit fotografie wordt de nabij-infrarode straling niet vastgelegd (paragraaf 4.1.1), waardoor verschillen in de vegetatie niet goed waarneembaar zijn. Op kleureninfrarood-film daarentegen wordt de nabij-infrarode straling wel vastgelegd. Met behulp van deze fotografie is het dus beter mogelijk met vegetatie bedekte stortplaatsen te lokaliseren. Een geconstateerd vegetatieverschil behoeft echter lang niet altijd te duiden op een stortplaats. Ook lokale (bodem-)verschillen of verschillen in soortensamenstelling kunnen een oorzaak zijn voor kleurverschillen op de foto. *Ondersteunende informatie*, die wijst op de aanwezigheid van gestort materiaal (reliëf, onderbrekingen in het kavelpatroon, etc.) is dan ook noodzakelijk bij de interpretatie van de foto's. *Achtergrondkennis* bij de beeldinterpretatie is dan ook onontbeerlijk. Ook hier geldt, dat in het veld moet worden

vastgesteld of er sprake is van stort van milieubedreigende materialen. Een beperking van RS is het feit, dat alleen *zich aan de oppervlakte manifesterende verschijnselen* kunnen worden waargenomen. Waar een stortplaats niet direct herkenbaar is op grond van de fotokenmerken kan deze echter dikwijls toch worden opgespoord aan de hand van een *indicator*: de vegetatie. De vegetatie op een voormalige stortplaats kan zich onderscheiden van de omringende vegetatie door een andere spectrale signatuur (hoofdstuk 9). Deze veranderde spectrale signatuur kan een gevolg zijn van bodemverstoring door onderliggend gestort materiaal (fysische oorzaak) of chemische verontreiniging door dit materiaal. Deze verschillen uiten zich behalve in het zichtbare licht met name in het nabij-infrarood.
Interpretatie van de luchtfoto's kan het beste gebeuren door de betrokken milieudienst zelf, omdat daar de achtergrondkennis van het gebied aanwezig is. Juist deze instantie kan vermoedens of kennis hebben van mogelijke *veranderingen* in het werkgebied. De opzet van een *monitoringsysteem* voor de opsporing van stortplaatsen kan er voor zorgen dat de vervuiler in een vroeg stadium kan worden aangepakt, waardoor de schade aan het milieu wordt beperkt. Tevens gaat van een dergelijk systeem een preventieve werking uit. Dat inpassing van deze gegevens in een *geografisch informatiesysteem* (zie o.a. paragraaf 2.6) nog verder bijdraagt aan de efficiëntie van het gebruik van luchtfoto's behoeft geen nader betoog.

## 30.5 Toepassingsmogelijkheden, beperkingen en perspectieven

In de voorgaande paragrafen werd alleen de inzet van *vliegtuig*-RS-technieken besproken bij de detectie van stortplaatsen.
In het kader van een voor Openbaar Lichaam Rijnmond uitgevoerd onderzoek (DHV, 1985) zijn de huidige gebruiksmogelijkheden van *satellietbeelden* in het bodemverontreinigingsonderzoek geanalyseerd. Met een schaal van 1:75.000 en 1:25.000 voor respectievelijk Landsat-TM en SPOT (hoofdstuk 7) is het gebruik van satellieten voor dit onderzoek niet ver meer weg, doch op dit moment voor Nederlandse kleinschalige omstandigheden nog te grof. Stortplaatsen van op deze beelden zichtbare grootte zijn in een dichtbevolkt land als Nederland ook zonder gebruikmaking van de beelden bekend.

*Controle* op het storten van afval zonder vergunning en het volgen van de invloeden van stortplaatsen op het omringende milieu is een *noodzaak* geworden.
Milieudiensten zijn gebaat met kennis over de locaties van stortplaatsen en de mogelijke schadelijke effecten ervan nu en in de toekomst. Men zoekt dan ook naar een methode om stortplaatsen op te sporen en de huidige situatie vast te leggen als *bewijsvoering* voor toekomstige ongewenste ontwikkelingen, zoals doordringing van in water opgeloste afvalstoffen in het grondwater. De traditionele wijze van opsporing in

het veld van illegale stortplaatsen en andere ongewenste ontwikkelingen in de bodem vormt een tijdrovende zaak voor de milieudiensten. Opsporing van illegale storten wordt bovendien bemoeilijkt, omdat ze kunnen liggen in slecht toegankelijke of onoverzichtelijke gebieden. Zowel bij de opsporing van illegale stortplaatsen als bij het onderzoek naar ongewenste ontwikkelingen op en rond grote, legale stortterreinen zijn met RS successen geboekt.
Met behulp van RS-technieken, met name luchtfotografie en thermisch-infrarood lijnaftastende systemen, wordt een groot gebied in zeer korte tijd opgenomen en wordt een overzicht van het gebied verkregen. Door dit *synoptische karakter* lijken RS-beelden een bij uitstek geschikt hulpmiddel bij het stortplaatsonderzoek. Ook stortplaatsen, die ver van de weg af liggen of schuil gaan achter bebouwing of beplanting, zijn vanuit de lucht zichtbaar. De gedetecteerde stortplaatsen kunnen met de RS-beelden als gids of kaart gemakkelijk in het veld worden teruggevonden. Vanwege de goede geometrische eigenschappen zijn vooral *luchtfoto's* een geschikt hulpmiddel bij de veldcontrole.
Naast het voordeel van het betere resultaat ten aanzien van het aantal opgespoorde stortplaatsen, is er het voordeel van de *snellere besluitvorming* doordat men hard *bewijsmateriaal* in handen heeft. Ook is er uiteindelijk het voordeel van een gunstigere kosten/baten-verhouding. Bij het in Zuid-Holland uitgevoerde RS-onderzoek kwamen veel stortplaatsen aan het licht, die buiten de bevoegdheden van de provincie lagen, maar onder de verantwoording van gemeenten vielen. *Samenwerking tussen de diverse overheden* verhoogt niet alleen de efficiëntie, maar *verlaagt* ook de *kosten* voor de samenwerkende instanties. Door meervoudig gebruik van de luchtfoto's worden de kosten nog verder verlaagd. Bijvoorbeeld bij de planning van aanleg van infrastructurele werken, bebouwing, recreatiegebieden, etc. kunnen luchtfoto's als hulpmiddel worden ingezet bij provinciale diensten en andere instellingen.
De beperking, die gelegen is in het feit, dat de aard van het afvalmateriaal louter met RS niet is vast te stellen, weegt niet op tegen het voordeel met de meer *gerichte* veldcontrole. Het dikwijls als beperking aangeduide gebrek aan personeel om de vele opgespoorde stortplaatsen in het terrein te controleren is in wezen geen beperking van de RS, maar een keuze van de desbetreffende milieudienst.

Uit voorgaande blijkt dat door de inzet van RS niet alle problemen bij het stortplaatsonderzoek kunnen worden opgelost. Dat RS-technieken een zinvolle bijdrage kunnen leveren bij het onderzoek naar bodemverontreiniging ten gevolge van vuilstorten zal een ieder duidelijk zijn (van Genderen et al., 1983). Snelle, mogelijk vroegtijdige opsporing van vervuilers en gerichte veldcontrole zorgen voor een tijdsbesparing en een beperking van de omvang van de vervuiling (en uiteindelijk ook een kostenbesparing). Bovendien gaat van een regelmatige controle ook een *preventieve werking* uit. Net als bij het preventieve geneeskundige onderzoek loopt hier echter de kost voor de baat uit. Het kost erg veel

moeite om instanties er toe te bewegen nieuwe technieken te gaan gebruiken als eerst veel geld op tafel gelegd moet worden, onafhankelijk van de uiteindelijke besparing die het oplevert. Door de toename van het aantal opgespoorde stortplaatsen zijn de kosten per stortplaats laag, maar de totale kosten inclusief inspectie van de locaties zijn zeer hoog. Daar komt bij dat mensen moeten worden opgeleid om de RS-beelden te interpreteren. Dit vergt *aanpassing van de organisatiestructuur*, hetgeen uiteraard op korte termijn moeilijk te realiseren is maar niettemin van groot belang is.

Door middel van monitoring van gebieden zal RS in de nabije toekomst een zeer waardevolle bijdrage kunnen leveren bij de aanpak van milieuproblemen. Het vastleggen van de situatie levert immers ook voor de toekomst grote voordelen op. De opzet van een geografisch informatiesysteem, waarvan vele instanties voor diverse doeleinden gebruik kunnen maken zal deze bijdrage verder verdiepen en ook de kosten voor de individuele deelnemer verlagen.

Behalve aan de opsporing van verontreining van bodem en oppervlaktewater zal RS ook een bijdrage kunnen leveren aan het onderzoek naar de vervuiling van *waterbodems*. In gebieden, waar de waterbodem sterk verontreinigd is zijn in het water naar alle waarschijnlijkheid beeldkenmerken waar te nemen die op verontreiniging duiden. Factoren zoals de hoeveelheid waterplanten, algen- en slibconcentraties en temperatuurverschillen vormen een indicator voor verontreiniging van de waterbodem. Op tijdelijk droogvallende waterbodems kan bijvoorbeeld de vegetatie als indicator dienen voor de kwaliteit van water en bodem (Meulstee et al., 1986). Met de nog te ontwikkelen RS-toepassingen kan het veldonderzoek naar de mate en aard van de verontreiniging gerichter plaatsvinden.

## 30.6 Literatuur

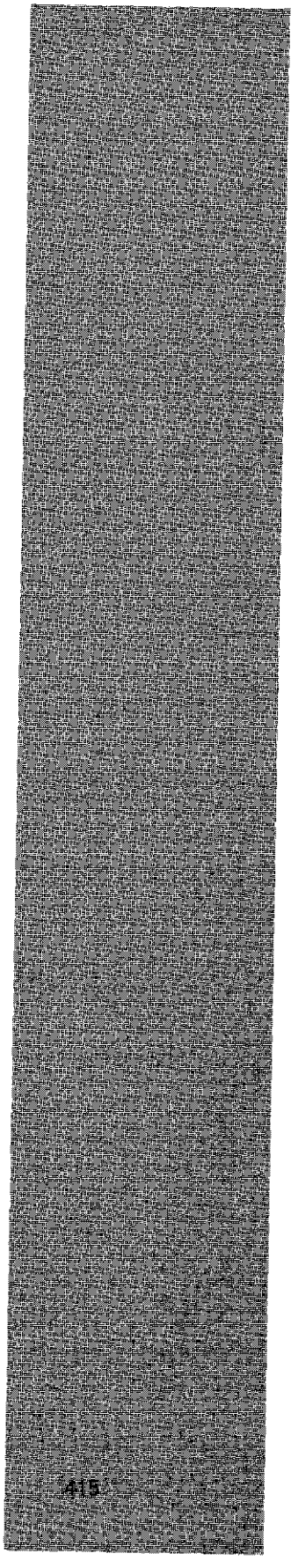
1 DHV, 1985. De toepassing van remote sensing technieken bij onderzoek naar bodemverontreiniging in Rijnmond. Onderzoek uitgevoerd in opdracht van Openbaar Lichaam Rijnmond. 36 blz. + bijlagen.

2 DHV, 1986. Analyse van bestaande luchtfotografie van drie locaties in Rijnmond. Fase 2 van het onderzoek naar toepassingsmogelijkheden van remote sensing technieken in het bodemverontreinigingsonderzoek. Onderzoek uitgevoerd in opdracht van Openbaar Lichaam Rijnmond. 31 blz.

3 Eurosense, 1982. Evaluatie van de toepassingsmogelijkheden van remote sensing technieken bij de uitvoering van controle-activiteiten in het milieubeheer. Studie uitgevoerd in opdracht van de BCRS.

4 Eurosense, 1984. Proefproject. Het gebruik van luchtfotografie bij de inventarisatie van HCH-stortplaatsen. Studie uitgevoerd in opdracht van de Provinciale Waterstaat Overijssel. 23 blz. + bijlagen.

5 Eurosense, 1985. Inventarisatie van stortplaatsen in Twente door interpretatie van bestaande luchtfotografie. Studie uitgevoerd in opdracht van de Provinciale Waterstaat Overijssel. 22 blz. + bijlagen.
6 Genderen, J.L. van, J.A. van de Griend & H.T.C. van Stokkom, 1983. An operational remote sensing methodology for the detection, inventory and environmental monitoring of waste disposal sites. EARSeL/ESA symposium Apr. 1983, Brussels, Belgium. ESA SP-188, July 1983, blz. 149-156.
7 Meulstee, C., P.H. Nienhuis & H.T.C. van Stokkom, 1986. Biomass assessment of estuarine macrophytobenthos using aerial photography. Marine Biology 91: 331-335.
8 Stokkom, H.T.C. van, 1983. Interpretatie van luchtfoto's en remote sensing beelden. Geodesia 25-4: 114-117.



# 1 Beeldinterpretatie: visueel of digitaal?

H.J. Buiten

## Twee benaderingswijzen voor beeldinterpretatie

In de beeldinterpretatie kunnen twee benaderingswijzen worden onderscheiden, die een eigen rol spelen maar ook vaak complementair zijn. De ene is die van de *visueel* en kwalitatief georiënteerde beeldinterpretatie, gebruik makend van beelden in analoge vorm (zie ook de onderscheiding in hoofdstuk 1). De andere benaderingswijze is de *digitale*, kwantitatief georiënteerde beeldinterpretatie, gebruik makend van beelden in digitale vorm. De eerstgenoemde heeft de oudste rechten en is m.b.t. het gebruik van luchtfoto's uitgegroeid tot een aantal volwassen methodieken, waarvan de verscheidenheid in aanpak en beschouwing vooral afhankelijk blijkt van de discipline of de toepassingssector en de subjectieve instelling van de ontwerper. De andere benaderingswijze maakt dankbaar gebruik van de technieken voor digitale beeldverwerking en patroonherkenning met het oog op bijv. verbetering van de beeldkwaliteit, extractie van relevante spectrale en ruimtelijke kenmerken, beeldclassificatie of combinatie van RS-beelden van verschillende sensoren of verschillende tijdstippen.
In het gebruik van deze technieken schuilt een belangrijke mate van *objectiviteit*, in zoverre er sprake is van *numerieke grootheden*, reken-algorithmen, gedefiniëerde besliscriteria of de inzet van logische operatoren. Van *subjectiviteit* is sprake als het gaat om de eigen keuze van de gebruiker uit het scala van opties in de beeldverwerkings- en patroonherkenningstechnieken.
De digitale benaderingswijze is de aanpak van de toekomst naar het zich laat aanzien; vandaar dat in thema 4 (hoofdstukken 13 t/m 17) de aandacht voornamelijk hierop is gericht.

## Grensvervaging tussen visuele en digitale beeldinterpretatie

In het licht van de huidige en toekomstige analyse-mogelijkheden mag men thans de grens tussen beide benaderingswijzen niet meer scherp trekken, laat staan tegen elkaar uitspelen (zie het slot van hoofdstuk 1). Hiertoe zijn een drietal redenen aan te voeren.

Interactieve aanpak

Bij de digitale technieken is weliswaar sprake van een automatisering van de beeldverwerking, maar men beseft dat voor een doelgerichte beeldinterpretatie de voortdurende sturing van de te kiezen digitale technieken onontbeerlijk is.
Alleen door *interactief* samenspel van de mens met zijn beeldverwerkingssysteem annex beeldscherm-presentatie kan een optimaal resultaat worden verkregen. Bovendien heeft de gebruiker de gelegenheid verschillende opties te vergelijken, en al analyserende te groeien in interpretatiekracht en toe te werken naar de kern van de informatie die in de RS-beelden latent aanwezig is.
Een bijkomend voordeel van de digitale benaderingswijze is de mogelijkheid alle beeldbewerkingshandelingen te administreren en aan anderen overdraagbaar te maken.
Dit komt ook de *reproduceerbaarheid* van de gevolgde bewerkingsgang en het mogelijk toepassen van keuze-*varianten* ten goede (zie ook bij de eigenschappen van RS in het begin van hoofdstuk 1). De objectiviteit van de digitale werkwijze is daarmee een in het oog springend aspect.

Inbreng van specifieke vakkennis en gebiedskennis

De grenzen tussen visuele en digitale beeldinterpretatie vervagen nog meer als men bedenkt dat een digitale beeldverwerking in verschillende gradaties kan worden uitgevoerd, afhankelijk van de vraag welk deel met (interactieve) automatisering kan worden bereikt, resulterend in een beeldverwerkings-*tussenproduct* dat aan de gebruiker zal worden aangeboden om door hem verder kwalitatief en visueel geïnterpreteerd te worden. Dit laatste is des te sterker het geval naarmate er meer *specifieke vakkennis* en *gebiedskennis* omtrent de te interpreteren objecten nodig is, en de objecten zelf nauwelijks op een directe wijze zijn te vangen in eenduidige 'klassen' (zoals gebruikelijk in de patroonherkenning, zie hoofdstuk 1 en hoofdstuk 13). Het numerieke (automatiserings-)gedeelte zou eventueel met de werkwijze van toekomstige *expert-systemen* ('redeneermachines') kunnen worden aangepakt, mits en in de mate waarin men in staat is, met het interpretatiedoel voor ogen, de benodigde interpretatiekennis te formaliseren en in te bouwen in de beslisstructuur van het patroonherkenningssysteem. Een geautomatiseerde bevragingstechniek staat dan centraal bij het tot stand brengen van het bovengenoemde tussenproduct.
Tot op heden bestaan de beeldbewerkingen voor het verkrijgen van het tussenproduct ondermeer uit beeldverbetering (beeldopscherping), afbeelding in zelf gekozen kleuren (pseudo-kleuren) van een of meer

variabelen zoals vegetatie-indices (zie paragraaf 9.5.2), hoofdcomponenten (zie Supplement 10), spectraalbandverhoudingen ('ratioing', zie bijv. Sabins, 1987), zowel per variabele afzonderlijk als per twee of drie variabelen tezamen in de vorm van kleurencomposieten. Onderstaand schema illustreert de consequenties van de twee hoofdwegen in de beeldclassificatie, waarbij links (A) het eerder genoemde tussenproduct als uitgangspunt dient, terwijl rechts (B) de klasse-indeling als maatgevend fungeert.

Classificatie van digitale remote sensing-gegevens langs 2 wegen:

| (A) | (B) |
|---|---|
| Tussenproduct – afbeelding als resultaat van digitale beeldvoorbewerking en kleurtoekenning. | Geclassificeerde afbeelding op basis van digitale patroonherkenning d.w.z. onderscheiden van klassen volgens beslisregel (categorieën of objecten). |
| Kleurschalen leiden tot een zekere mate van kleurverloop voor een object. | Toekenning van één bepaalde kleur aan bepaalde klasse. |
| Levert continue objectenweergave aan gebruiker (per object een zekere spreiding). | Discrete objectenweergave aan gebruiker. |
| Vraagt om interpretatie-vakbekwaamheid van gebruiker, maar laat meer aan hem over. | Brengt vereenvoudiging voor gebruikers, maar laat minder aan hen over. |
| Het interpretatiedoel is ruimer dan één classificatiemethode kan bieden. (De spectrale variatie van elk object blijft herkenbaar). | Het interpretatiedoel is beperkt tot wat die ene beslisregel kan bieden. |

Conversie analoog/digitaal en vector/raster

Een andere reden waarom de grenzen tussen visuele en digitale beeldinterpretatie vervagen is de opkomst van digitaliseringstechnieken, waarmee het mogelijk is:

a Analoge RS-beelden (zoals luchtfoto's) met een array of een matrix van CCD-detectoren (zie paragraaf 4.1.2) geometrisch fijn en radiometrisch nauwgezet om te zetten in *rasterformaat* (rooster van numerieke beeldelementen ofwel 'pixels'), waardoor het betreffende RS-beeld toegankelijk wordt voor alle denkbare beeldverwerkings- en patroonherkenningstechnieken (zie hoofdstukken 13, 14 en 15).

b Kaarten van allerlei soort met topografische, bodemkundige, hydrologische, vegetatiekundige objecten in *vectorformaat* (d.w.z.

beschreven door middel van omtreks*lijnen)* fijnmazig om te zetten in rasterformaat, waardoor het mogelijk wordt overlaycombinaties te maken tussen RS-beelden in rasterformaat en bestaande kaartinformatie (zie de hoofdstukken 17 en 16). Dit is de kracht van geografische informatiesystemen (GIS) die in de toekomst de RS-beeldinterpretatie steeds meer zullen gaan ondersteunen door de inbreng van andersoortige kennisbronnen. Ook zal de inbreng van de resultaten van RS-beeldinterpretatie in GIS de *informatie-integratie* (zoals genoemd in het slot van hoofdstuk 2) met actuele informatie versterken.

Conclusie

De vraag 'visueel of digitaal' is op grond van bovenstaande overwegingen niet meer relevant en transformeert tot de bevestiging dat digitale en visuele beeldinterpretatie hand in hand gaan, zodanig gestructureerd dat het *doel* van de RS-beeldinterpretatie optimaal wordt gediend.

## Interpretatie-elementen

In *beide* interpretatievormen wordt de beeldanalyse van objecten impliciet of expliciet, onbewust of bewust gestuurd door een negental *interpretatie-elementen* (Olson, 1969; Lillesand & Kiefer, 1987; UDC, 1987), oorspronkelijk bedoeld voor visuele beeldinterpretatie:

1 *Vorm* ('shape'): specifieke vorm van het beschouwde object.
2 *Afmetingen* ('size'): lengte, breedte, hoogte, oppervlakte, volume van het object.
3 *Tint* ('tone'): grijstint, kleurtype (zie paragraaf 4.4) van het object in de beeldweergave, m.b.t. zijn reflectie- of emissie-eigenschappen.
4 *Schaduw* ('shadow'): kenmerkende schaduw doet (eventueel verborgen) objecten herkennen zowel bij passieve sensorsystemen met de zon als belichtingsbron, als bij actieve sensorsystemen zoals het optreden van radarschaduw (hoofdstuk 16). Schaduw kan gewoonlijk ook hoogte-informatie leveren.
5 *Patroon* ('pattern'): de ruimtelijke verschijningsvorm als *ruis*patroon of als *structuur*patroon (ook de ruimtelijke repetitie) van een object in het beeld kan kenmerkend zijn voor zowel kunstmatige als natuurlijke objecten als verkavelingspatroon, landgebruik, wadden-geomorfologie, landaanwas, erosiegeulen, grondbewerking, plantrichting, zeegolfribbels, merengebied, natuurterrein, etc.
6 *Textuur* ('texture'): de ruimtelijke grijswaardenverdeling (letterlijk het 'weefsel') van een object in het beeld kan aanleiding geven tot herkenning: *kwalitatief* beschreven met termen als: grof, fijn, regelmatig, onregelmatig, vezelachtig, glad, ruw; *kwantitatief* te beschrijven met wiskundige textuurmaten, geldend binnen een gekozen beeldoppervlak (venster).
7 *Ligging* ('site'): de locatie van een object temidden van bepaalde terreinkenmerken die het beeld vertoont, kan onjuiste veronderstellingen uitsluiten bijv. in een moeras of in een oerwoud is

de ligging van een flatgebouw niet aannemelijk.

8 *Associatie* ('association'): de samenhang van objecten op basis van algemene geografische kennis, fysische basiskennis of in het bijzonder van specifieke vakkennis versterkt de beeldinterpretatie van onderdelen van het beeld, bijv. de samenhang tussen rivierloop, oevers en aangrenzende hellingen; een krachtstation met koelwaterlozing zal gelegen zijn aan een waterstroom; een industriecomplex veronderstelt gewoonlijk een nabijgelegen stadsgebied.

9 *Resolutie* ('resolution'): de ruimtelijke resolutie (zie de hoofdstukken 3 en 4) van een sensor is bepalend voor de grootte van het objectdetail dat nog net kan worden onderscheiden, uiteraard mede in afhankelijkheid van de radiometrische resolutie en het contrast met de omgeving van het detail (zie paragraaf 4.5 en hoofdstuk 6). Objecten met een omvang of een herhalingsmaat beduidend kleiner dan genoemde resoluties zullen dan ook niet in het beeld herkenbaar of benoembaar zijn. Het interpretatie-element resolutie kan ook betrokken worden op het begrip 'fenomenologische resolutie' zoals geïntroduceerd in paragraaf 4.5.2.

Sommige van deze negen interpretatie-elementen zijn typisch geschikt voor interactieve en/of visuele beeldinterpretatie (7, 8 en 9), andere elementen zijn direct bruikbaar in de patroonherkenning (vooral 3, maar thans ook 6) of geschikt voor de een of andere beeldbewerking (1, 2 en 5). Het minst te automatiseren meer niettemin erg belangrijke interpretatie-element is de schaduw (4).

Ook hier kan geconcludeerd worden dat het merendeel van de interpretatie-elementen zowel functioneren in de visuele, als in de (al of niet interactieve) digitale beeldinterpretatie.

Het zal afhangen van het interpretatie-doel, van de beschikbare materiële middelen, van het financiële budget, van de mate van routine-handelingen in de interpretatie, van de moeilijkheidsgraad van de gebruiker, en last but not least, van de mate waarin de gebruiker kennis heeft van de specificaties en verdiensten van een beeldverwerkings- en patroonherkennings-systeem, hoe de verdeling en de verbinding ligt tussen digitale en visuele beeldinterpretatie.

## Literatuur

1 Lillesand, T.M. & R.W. Kiefer, 1987. Remote Sensing and image interpretation. Second Edition. J. Wiley & Sons, New York, Chapter 3 (Introduction to airphoto interpretation), 721 blz.

2 Olson Jr, Ch.E., 1969. Some observations on photographic interpretations; interpretation of aerial photographs; multispectral camera system. Appendix to paper 'Applications of remote sensing in agriculture, including forestry'. Proceedings Paris 1969 Seminaire CNES

et l'Université du Michigan 'Principe de la detection à distance et application a l'étude des resources terrestes', blz. 303-348.
3 Sabins Jr, F.F., 1987. Remote Sensing principles and interpretation. Second Edition. W.H. Freeman & Co., New York, 449 blz.
4 UDC, 1987. Universele Decimale Classificatie, rubriek 528.87 betreffende: 'Interpretatie van gegevens. Visuele voorwaarden voor beeldinterpretatie'. Stichting Nederlands Bureau voor het Bibliotheekwezen en Informatieverzorging, Samson, 1987.

# 2 De 'color additive viewer' ter ondersteuning van de visuele interpretatie van multispectrale zwart-wit luchtfoto's

J.G.P.W. Clevers

Bij de vakgroep Landmeetkunde en Teledetectie van de Landbouwuniversiteit Wageningen is een zogenaamde *'color additive viewer'* in gebruik. Deze is gebouwd door de TFDL (Technische en Fysische Dienst voor de Landbouw) te Wageningen. Een soortgelijk instrument is bij het Rijksinstituut voor Natuurbeheer (RIN) te Arnhem in gebruik. Het instrument van de LUW is tot 'CAVIA' gedoopt ('Color Additive Viewer in Agriculture'). De color additive viewer (vergelijk figuur 4-12) is ontworpen ter ondersteuning van de visuele interpretatie van *multispectrale zwart-wit luchtfoto's* (MSP, zie de paragrafen 4.1.1 en 9.2.3).

Zwart-wit fotografie in betrekkelijk smalle spectraalbanden wordt bij voorkeur toegepast indien kwantitatieve metingen (m.b.v. een densitometer) aan de foto's verricht moeten worden. Wil men de foto's bovendien visueel interpreteren, dan stuit men op het probleem van simultane interpretatie van verschillende beelden van hetzelfde object. Indien uitsluitend een *visuele interpretatie* vereist is, dan zou dit probleem grotendeels voorkomen kunnen worden door toepassing van kleurenfotografie (TC of FC, zie paragraaf 4.1.1). Dit heeft echter als nadeel dat de kleurtoekenning aan de verschillende spectraalbanden vast ligt, terwijl ook de kleurintensiteit slechts eenmalig te beïnvloeden is via het ontwikkelproces. Bovendien hebben kleurenfilms het nadeel dat de gevoeligheidscurven van de drie emulsielagen elkaar overlappen (zie de figuren 4-3 en 4-4).

De CAVIA bestaat uit drie diaprojectoren die op één scherm gericht zijn. Elke projector heeft een regelbare intensiteit en filterkeuze. In elke projector kan men een zwart-wit-transparante positief van een bepaald object plaatsen. Door middel van rotatie, translatie en schaalverandering kan men de foto's in de verschillende projectoren exact op elkaar passend projecteren op het scherm. Door middel van de keuze van de filters kan men kleurcomposieten maken op het scherm. Naast de keuze van de filters is ook de instelling van de lichtintensiteit per projector variabel. Optische combinatie van positieven in een blauwe, groene en

rode spectraalband kan een plaatje vergelijkbaar met een normale kleurenfoto opleveren. Combinatie van positieven in een groene, rode en nabij-infrarode spectraalband levert een plaatje op dat vergelijkbaar is met een 'false colour' foto. Echter, ook andere composieten kunnen gemaakt worden. Men kan zodanig met kleur en intensiteit manipuleren dat een bepaald verschijnsel of object zo duidelijk mogelijk tot uiting komt.
In een color additive viewer kan men behalve met luchtfoto's ook met filmtransparanten van bijvoorbeeld de verschillende spectraalbanden van de Landsat-satelliet werken.

# 3 Stereoscopie

J.H. Loedeman

## Het waarnemen van ruimte

Bij het verrichten van handelingen en tijdens het bewegen van het lichaam speelt het visueel waarnemen van parallax een zeer belangrijke rol. Parallax betekent een onderlinge verschuiving van objecten die zich in ons beeldveld bevinden. Verplaatsen we tijdens het waarnemen ons lichaam, dan interpreteren we de verschuiving als een beweging van het lichaam t.o.v. stilstaande objecten, en niet als een verschuiving van objecten onderling. Indien we een onderlinge verschuiving van objecten waarnemen terwijl het lichaam zich niet beweegt, dan 'zien' we dat wij niet zelf bewegen, maar de objecten onderling. Verwarring kan optreden indien we ons niet bewust zijn van de beweging van ons lichaam of wanneer behalve ons lichaam ook de objecten onderling bewegen. In alle drie gevallen is sprake van *dynamische of bewegingsparallax*. Of we nu met één oog kijken (monoculair) of met beide ogen (binoculair) maakt voor het waarnemen van dynamische parallax geen verschil. Bewegingloos kunnen we ook een schijnbare verschuiving van objecten waarnemen door om beurten met het linker en het rechter oog te kijken. Deze *statische parallax* interpreteren we binoculair als een relatief verschil in afstand ten opzichte van de waargenomen objecten. Behalve via de beide vormen van parallax ontlenen we tevens via diverse andere indicatoren informatie over de ons omringende ruimte. De belangrijkste zijn: constantheid van grootte (geometrisch perspectief), volledigheid van vorm, herkenbaarheid van details (textuurperspectief), blauwe en wazige verten (kleurperspectief), schaduwwerking. Deze indicatoren functioneren ook bij het waarnemen van afbeeldingen. Zou dit niet zo zijn, dan zouden afbeeldingstechnieken nooit zijn uitgevonden en ontwikkeld zijn tot de huidige graad van perfectie.
RS-beelden zijn in de regel verticaal opgenomen vanaf een grote tot zeer grote hoogte. Verschillen in terreinhoogte betekenen verschillen in opname-afstand tussen object en sensor. Deze verschillen zijn veel kleiner dan bij afbeeldingen van het aardoppervlak die op de grond zijn

gemaakt. Een van de belangrijkste afstandsindicatoren, het geometrisch perspectief, speelt daarom bij het waarnemen van RS-beelden geen rol. Om dezelfde reden zijn ook het kleurperspectief en het textuurperspectief afwezig. Een zeer belangrijke indicator, de volledigheid van vorm, speelt alleen een rol bij opnamen van geringe hoogte. Op verticale opnamen komt het alleen bij bomen en gebouwen voor dat objecten elkaar gedeeltelijk afdekken. Dynamische parallax is bij voorbaat uitgesloten, omdat van een momentopname sprake is. Als enige afstandsindicatoren blijven dan over de schaduwwerking (monoculair) en de statische parallax (binoculair). In veel gevallen is de schaduwwerking onvoldoende om een nauwkeurige indruk van de verschillen in terreinhoogte te krijgen, alhoewel de monobeelden van de zijwaarts gerichte radar indicaties in dat opzicht kunnen geven (zie de paragrafen 8.4 en 16.2.3.2). Zo resteert vrijwel in alle gevallen alleen de statische parallax.

## Statische parallax en stereoscopie

Het beurtelings kijken met linker en rechter oog toont aan dat de waarneming van het linker oog geometrisch niet gelijk is aan die van het rechter oog. De oorzaak zit in de constructie van ons visuele systeem, dat primair berust op twee optische afbeeldingen die vanuit een verschillende positie worden verkregen. Het resultaat is dat de optische afbeeldingen op de beide netvliezen weliswaar goeddeels dezelfde ruimtelijke uitsnede hebben, maar geometrisch iets verschillen. De 'interpretatie' van deze ongelijkheid, de *retinale dispariteit*, leidt tot het waarnemen van afstandsverschillen.
Het is relatief eenvoudig om twee afbeeldingen te vervaardigen die hetzelfde voorstellen, maar onderling parallax vertonen. Als men er in slaagt gelijktijdig elk van beide afbeeldingen met één van beide ogen te bekijken, kijkt men naar twee platte voorwerpen, die men echter '*ziet*' (interpreteert) als één ruimtelijke voorstelling. In figuur S3-1a is een verticale afbeelding van een gelijkzijdige pyramide als stereopaar getekend. De parallax is slechts in één richting aanwezig: parallel aan de (denkbeeldige) verbindingslijnen tussen overeenkomstige punten van beide afbeeldingen. Indien deze verbindingslijnen (indien getekend) niet parallel lopen, is ook parallax aanwezig in de richting loodrecht op het vlak waarin de oogassen draaien. Deze parallax leidt tot retinale dispariteit die stereoscopisch niet geïnterpreteerd kan worden. Het resultaat is dat de twee (platte) beelden door elkaar gezien worden; stereoscopie blijft achterwege. Dit verschijnsel treedt op indien de afbeeldingen niet dezelfde maatstaf (schaal) hebben (figuur S3-1b), onderling niet in de juiste stand liggen (figuur S3-1c), of onnauwkeurig zijn vervaardigd (figuur S3-1d).
Het principe van de stereoscopie werd al lang geleden toegepast. Het oudste bekende stereopaar stamt uit ca. 1600. Het vervaardigen van stereoparen werd pas omstreeks 1840 eenvoudig toen voor de camera obscura dankzij gericht chemisch onderzoek (eindelijk) bruikbare

procédé's waren ontdekt die het fixeren van de al langer bekende fotografische afbeelding mogelijk maakten.

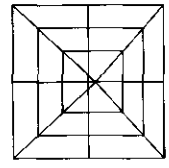
## Toepassingen van stereoscopie bij remote sensing

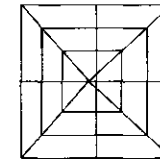
Stereoscopie wordt toegepast in kwalitatieve zin (interpretatie) en in kwantitatieve zin (fotogrammetrie). Fotogrammetrie is niet beperkt tot fotografische opnamen, maar kan worden toegepast op elk afbeeldingsproces dat wiskundig is geformuleerd. Stereoscopie wordt weliswaar vaak toegepast als hulpmiddel bij het uitvoeren van fotogrammetrische metingen, maar vormt geen absolute voorwaarde voor alle toepassingen van de fotogrammetrie.

Met stereoscopie van een beeldpaar is een retinale dispariteit te bereiken die vele malen groter is dan bij directe binoculaire waarneming optreedt. De parallax in het beeldpaar – oorzaak van retinale dispariteit – hangt af van de inwendige geometrie van de sensor inclusief de optiek, en van de uitwendige geometrie van de beide opnamepunten ten opzichte van het object (terrein). Een preciese beschrijving van de geometrie valt onder de fotogrammetrie. De factor die bepalend is voor het stereoscopisch effect is de verhouding van de afstand tussen de beide opnamepunten en de opname-afstand: de basis-hoogte-verhouding (B/H). Voor een gegeven hoogteverschil neemt de parallax tussen de afbeeldingen evenredig toe met de B/H-verhouding. Dit leidt bij stereoscopie tot een grotere retinale dispariteit en dus tot de waarneming van een toenemend (schijnbaar) hoogteverschil.
Indien de dispariteit binnen het gezichtsveld groter wordt dan ca. 20 milliradiaal moet de stand van de oogassen worden aangepast, hetgeen bij het bekijken van stereoscopische afbeeldingen storend werkt op de ruimtelijke gewaarwording. Anderzijds moet de dispariteit een drempelwaarde van ca. 0,1 milliradiaal overschrijden om tot een waarneembaar afstandsverschil te kunnen leiden. Bij gebruik van een 3-voudig vergrotende stereoscoop komt deze drempelwaarde neer op een parallax tussen de beelden van ca. 10 µm. (De normale beschouwingsafstand van 30 cm wordt dankzij de vergroting schijnbaar teruggebracht tot 10 cm.) Voor ongestoorde stereoscopie moet onder deze condities de parallax binnen het gezichtsveld niet groter zijn dan 2 mm zoals in figuur S3-1a. Figuur S3-2 vertoont parallaxen tot 6 mm, waardoor het niet meer mogelijk is de pyramide in zijn geheel ruimtelijk waar te nemen.
Bij standaard luchtfotografie (9 inch formaat en 60% stereo-overlap) geldt voor het verband tussen hoogteverschil, vlieghoogte en parallax bij benadering:

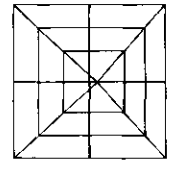
$$h = p * 0{,}01 * H \quad \text{(m)} \qquad \text{(S3.1)}$$

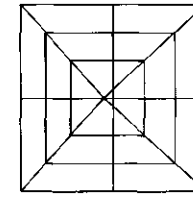
h = hoogteverschil (m)
p = parallax (mm)
H = vlieghoogte (m).
Opm.: de constante 0,01 heeft de dimensie $mm^{-1}$.



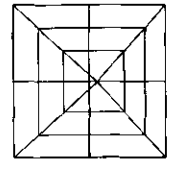


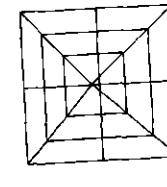
S3 - 1a





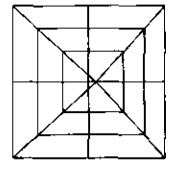
S3 - 1b

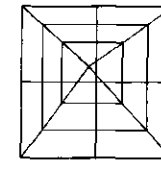




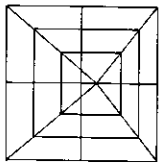
S3 - 1c

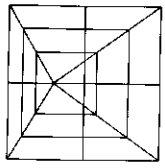
**S3-1 t/m S3-5**
Stereogrammen van een pyramide.
Alleen bij de figuren S3-1a, S3-3, S3-4 en S3-5 is sprake van een ongestoorde stereoscopie; bij de overige figuren is stereoscopie lastig of onmogelijk. Zie de tekst voor een verklaring.



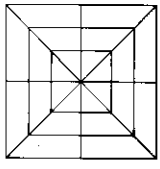


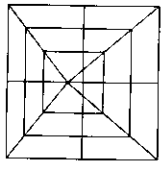
S3 - 1d



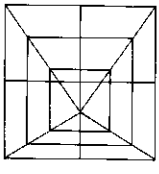


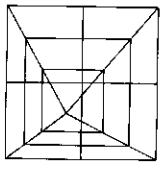
S3 - 2



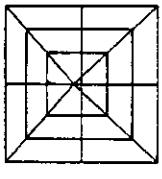


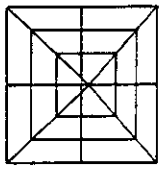
S3 - 3





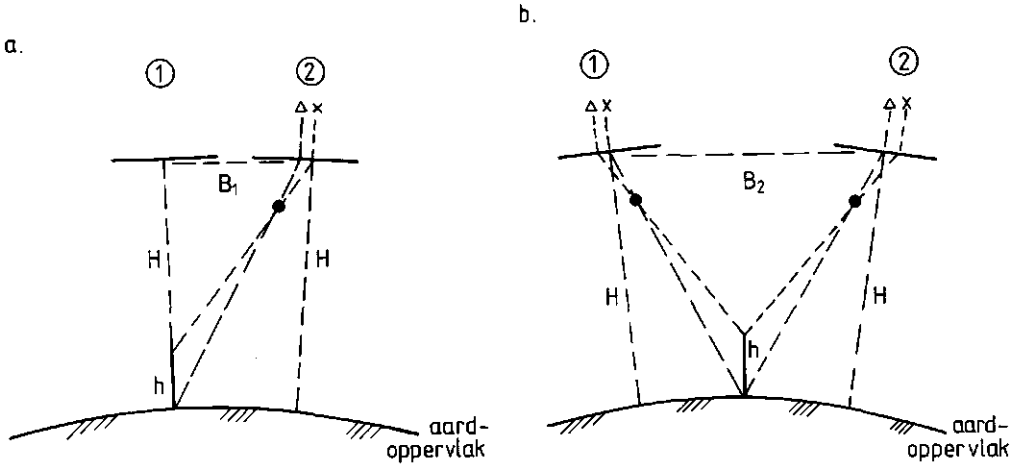
S3 - 4





S3 - 5

Ook met SPOT-opnamen (paragraaf 7.5.4) is stereoscopie mogelijk. De B/H-verhouding kan dankzij de draaibare hulpspiegel in de sensor en een geschikte baankeuze variëren van 0,1 voor spiegelstanden van 0° en 5° t.o.v. de verticaal tot 1,2 voor spiegelstanden van +27° en -27° vanuit de verticaal. In figuur S3-6 wordt een voorbeeld van de basis-hoogte-verhouding gegeven voor twee verschillende stereoscopische opname-situaties. Het tijdsverschil tussen de opnamen kan variëren tussen 1 en 26 dagen afhankelijk van de geografische ligging en de baankeuze. De overlap bedraagt 100%. SPOT-IMAGE claimt dat de drempelwaarde voor stereoscopisch waargenomen terreinhoogteverschillen bij ca. 5 m ligt. Bij een pixelafmeting van 10 m en een B/H-verhouding van 1,0 komt dit neer op een parallax van een halve pixel. Gebruikt men voor het stereoscopisch bekijken van SPOT-beelden ook een 3-voudig vergrotende stereoscoop, dan moet een halve pixel niet kleiner afgebeeld worden dan 0,01 mm, de drempelwaarde voor de parallax. Men zou dan kunnen volstaan met afbeeldingen op schaal 1:500.000. SPOT-IMAGE biedt beelden van 60 bij 60 km aan op schalen van 1:400.000 tot 1:25.000. In het eerste geval zijn de afmetingen van de beelden slechts 15 cm bij 15 cm. Bij een schaal 1:250.000 zijn de afmetingen vergelijkbaar met het standaardformaat van luchtfoto's (24 cm bij 24 cm).




**S3-6** Stereoscopie bij SPOT-beelden.
Bovenstaande twee figuren laten een voorbeeld zien van de stereoscopische opnamesituatie van de HRV ('High Resolution Visible') sensoren van SPOT (paragraaf 7.5). De stand van de draaibare spiegel westwaarts (+) of oostwaarts (−) ten opzichte van nadir (vertikaal 'kijken') is met de hoek $\alpha_i$ aangegeven voor twee opname-tijdstippen (1) (i = 1) en (2) (i = 2).

**a.** Als $\alpha_1 = 0°$ en $\alpha_2 = +22{,}6°$, dan is de basis-hoogte-verhouding: $B_1/H = 0{,}44$.

**b.** Als $\alpha_1 = -21{,}5°$ en $\alpha_2 = +22{,}6°$, dan is de basis-hoogte-verhouding: $B_2/H = 0{,}88$.
De parallax is $2.\Delta x$, dus dubbel zo groot als in situatie a.

Beeldvormende radar (SLAR en SAR) biedt weliswaar de mogelijkheid stereo-opnamen te maken, maar deze zijn niet altijd gemakkelijk stereoscopisch te bekijken. De oorzaak schuilt in de moeite die men heeft met het stereoscopisch beoordelen van echoparallaxen en radarschaduwen (paragraaf 16.2.3.2). Dit komt vooral door het actieve karakter van de sensor. Indien de beelden duidelijke schaduwen vertonen, dan zullen deze stereoscopisch niet samenvallen wegens het effect van het verschil in de opnameposities. De parallax van de schaduwen is niet in overeenstemming te brengen met de parallax ten gevolge van het reliëf. Stereoscopie is dan uitgesloten.
In het optisch venster doet zich een vergelijkbaar probleem voor indien de beide opnamen zijn gemaakt bij sterk uiteenlopende zonnestanden. Bij satellieten die zon-synchroon om de aarde cirkelen kan dit euvel dus niet optreden. De schaduwrichting is weliswaar steeds dezelfde (azimuth hoek), maar de schaduwwerking verschilt door een verschil in zonshoogte (zenith hoek).

## Het vervaardigen van stereoparen via beeldbewerking

De geometrie van een topografische kaart wijkt af van die van een satellietbeeld of een luchtfoto. Dit geldt te meer naarmate het terrein meer reliëf vertoont. Het is juist dit verschil in geometrie dat de stereoscopie mogelijk maakt: de geometrie hangt immers mede af van de opnamepositie.
Via beeldbewerking is het mogelijk de geometrie van een luchtfoto of een ander RS-beeld om te rekenen naar die van een topografische kaart (hoofdstuk 16). Brengt men bij een stereopaar dezelfde geometrische correcties die daarvoor nodig zijn tevens aan in het tweede beeld van een stereopaar, dan blijft de parallax tussen beide beelden gelijk.
Stereoscopie levert zodoende dezelfde ruimtelijke informatie op als de ongecorrigeerde beelden, terwijl een van beide beelden de geometrische eigenschappen van een topografische kaart heeft gekregen. Figuur S3-3 is volgens dit principe geconstrueerd uit figuur S3-1a. De linker helft van figuur S3-3 is geometrisch gelijk aan een orthogonale projectie van de pyramide.

## Stereomodel, stereobeeld, visuele waarneming

Hoewel in figuur S3-4 de parallax gelijk is aan die in figuur S3-3 zien de beide pyramides er verschillend uit. Verschuift men bij figuur S3-4 de stereoscoop naar boven, dan ontstaat een schuin zij-aanzicht en trekt men de pyramide recht. In figuur S3-5 staat de pyramide op z'n punt. Deze ruimtelijke omkering is verkregen door van figuur S3-1a de linker en rechter helft te verwisselen. Deze merkwaardige verschijnselen vergen enige toelichting.
In het voorgaande is verschillende malen de rol naar voren gebracht die de stereoscopie speelt bij het achterhalen van de geometrie van het aardoppervlak. Fotogrammetrische uitwerking (kartering) van twee

luchtfoto's die samen een stereopaar vormen levert een *stereomodel* op. Dit 'model' bestaat uit een beschijving van het aardoppervlak met behulp van 3-D coördinaten. Zo'n model is *onzichtbaar*. Om het zichtbaar te maken zou men aan de hand van de coördinaten een maquette moeten maken.
Het stereomodel is dan ook iets volslagen anders dan het *stereobeeld* dat we zien als we het stereopaar stereoscopisch bekijken. Weliswaar is het stereobeeld *zichtbaar*, maar het is beslist *geen afbeelding*. Wat het wel is valt niet beter te definiëren dan als de uitkomst van een wisselwerking tussen de waarnemer in kwestie en zijn omgeving. Visuele waarnemingen zijn persoonsgebonden (dus uniek), niet uitwisselbaar, en niet reproduceerbaar. Hoe 'eigenaardig' een visueel 'beeld' is kan men zelf ervaren met het volgende eenvoudige experiment. Bekijkt men figuur S3-4 stereoscopisch dan ziet men een ruimtelijke pyramide. Verschuift men de stereoscoop naar boven terwijl de blik gefixeerd is op de top, dan 'zwaait' de top mee in de richting waarin de stereoscoop verschuift. Het hoeft geen betoog dat dynamische parallax onmogelijk de oorzaak kan zijn. Toch is het resultaat van de waarneming dat een bewegende top wordt gezien. De verklaring zit hem in de combinatie van drie factoren: het optreden van statische parallax (waardoor de ruimtelijke gewaarwording ontstaat), het *ontbreken* van dynamische parallax, en het gewaar zijn van de eigen beweging ten opzichte van de ruimtelijk waargenomen pyramide.
Dynamische parallax ontstaat zowel bij beweging van het lichaam als bij beweging van objecten onderling. De effecten van beide oorzaken kunnen elkaar volledig opheffen, zodat geen dynamische parallax optreedt. Het bewegen ten opzichte van een ruimtelijk waargenomen object *induceert* het zien van een beweging of vervorming van dat object wegens het ontbreken van dynamische parallax in het netvliesbeeld.

Eerder is gesteld dat een ruimtelijke gewaarwording niet louter hoeft te berusten op een binoculaire waarneming. Bij het stereopaar van de pyramide vormt de statische parallax weliswaar de enige indicator, maar bij gewone foto's spelen meerdere indicatoren een rol. Verschuiven of kantelen we een gewone foto (bijvoorbeeld van een gevel met een openstaand draairaam) ten opzichte van ons hoofd, dan treedt ook inductie van vervorming of beweging op in de objecten die op de foto staan afgebeeld. Van stereoscopie is geen sprake.

Kortom wat zichtbaar is, is *niet betrouwbaar* als representatie van de werkelijkheid; wat betrouwbaar is in relatie tot de werkelijkheid (bijv. een stereomodel) is *niet zichtbaar*. Misschien verdient deze paradox meer aandacht dan er nu aan wordt besteed. Ook remote sensing is zonder zien niet goed voorstelbaar.

# 4 'Ruis' van fotografische receptoren

J.H. Loedeman

In de paragrafen 6.3.1 en 6.3.2 zijn de volgende begrippen gebruikt:
- korreldichtheid
- korrelverdeling
- korrelvorming
- korreling (graininess); subjectieve beoordeling
- korreligheid (granularity); objectieve bepaling
- RMS-granularity; maatstaf voor de korreligheid
- korreligheidsfactor ('scale value of granularity').

Al deze termen hebben (impliciet) betrekking op het fotografische beeld, dus op zilver*korrels* die via chemische ontwikkeling uit zilverhaloïde *kristallen* zijn gevormd.
Het ligt voor de hand dat er een verband bestaat tussen deze op 'korrels' (eng. 'grains', 'granules') betrekking hebbende termen en andere niet genoemde begrippen die slaan op kristallen (eng. 'grains'). Tot de laatste categorie behoren:
- korrelgrootte en -vorm
- korrelgrootte-verdeling
- gemiddelde korrelgrootte
- korreldichtheid.

Uit beide opsommingen blijkt dat in het Nederlands het begrip korrel in relatie tot een fotografische receptor voor tweeërlei uitleg vatbaar is. In het Engels geldt hetzelfde voor het woord 'grain'. Het woord 'granularity' (korreligheid) is geïntroduceerd ter aanduiding van een (objectieve) maat voor hetgeen visueel ervaren wordt als 'graininess' (korreling).
De dubbele betekenis van de woorden 'grain' en 'korrel' is geen probleem, omdat vrijwel zonder uitzondering uit de context blijkt of sprake is van 'unexposed emulsion grains' of van 'exposed and developed image grains' (Dainty & Shaw, 1974, blz. 92).
Het merendeel van de opgesomde termen is gedefiniëerd. In gevallen waar een definitie ontbreekt is sprake van een betekenis die ontleend is aan het normale spraakgebruik. Aan de hand van verschillende bronnen

(Arnold et al., 1971; Dainty & Shaw, 1974; Thomas, 1973) is onderstaande lijst samengesteld (vgl. hoofdstuk 6).

1 *Korrelverdeling* ('grain distribution'):
Is geen officiële term; betreft de manier waarop de zilverhaloïde kristallen in de film verdeeld liggen (bijv. toevallig, systematisch, onregelmatig verdeeld).
De verdeling hangt af van:
- 'grain *size* distribution'; zie 2).
- 'grain *density*'; zie 3).

2 *Korrelgrootte-verdeling* ('grain size distribution'):
Officiële term voor het histogram van kristalgrootten. Des te groter het gemiddelde, des te gevoeliger (sneller) is de film.

3 *Korreldichtheid* ('grain density'):
(geen officiële term) ='total number of grains over an area' (officiële omschrijving); aantal zilverhaloïde kristallen per oppervlakte-eenheid film.

N.B. Termen 1), 2) en 3) hebben vrijwel altijd betrekking op de zilverhaloïde kristallen, *niet* op de zilverkorrels van de ontwikkelde film.

4 *Korreling* ('graininess'):
Officiële term voor de *subjectieve* (visuele) indruk van het korrelig karakter (de korrelige textuur) van het filmbeeld na uniforme bestraling en na ontwikkeling (bijv. grove of fijne korreling).

5 *Korreligheid* ('granularity'):
Officiële term voor de *objectieve* (gemeten) onregelmatigheid van de zilverkorrelverdeling van een uniform bestraalde fotografische emulsie na de ontwikkeling. De meting gebeurt indirect via densitometrie en wordt uitgedrukt als standaardafwijking $\sigma(D)$. Granularity is equivalent met 'noise' (*ruis*).

6 *RMS-granularity*:
Officiële aanduiding voor de korreligheid (standaardafwijking), soms aangegeven in promilles, bij een cirkelvormige standaardopening met een diameter van 48 µm en een standaard-densiteit van D = 1,0.

7 *Korreligheidsfactor*:
Grootheid (geen officiële term) met betrekking tot de densitometrische bepaling van de korreligheid. Voor deze grootheid G (ook korreligheids-constante genoemd) geldt bij constante densiteit: $G = A * \sigma^2(D)$ waarin A de oppervlakte van het meetvenster is en $\sigma(D)$ de standaardafwijking van metingen bij die opening (zie vergelijking 6.2).
Een officiële term is de 'Selwyn granularity coefficient':
$S = \sigma(D) * \sqrt{2A}$, zodat $G = \frac{1}{2}S^2$.

Dainty & Shaw (1974) gebruiken voor G de aanduiding 'scale value of granularity'.
Gegeven A, geldt bij variabele densiteit D (zie vergelijking 6.4): G = a.D, waarin a een constante is die evenredig is met de gemiddelde korrelgrootte; zie 2).

8 *S/N-ratio* (SNR):
Officiële term voor de verhouding van een gemeten densiteitsverschil ΔD ('signal') t.o.v. de korreligheid σ(D) ('noise') die optreedt over de oppervlakte A die het signaal ΔD in beslag neemt (zie voor de practische implicaties paragraaf 6.3.4). Het moge duidelijk zijn dat bij fotografische afbeeldingen, wegens A, het begrip *'ruis' 2-dimensionaal* moet worden opgevat.
De SNR definiëert de resolutie van een fotografische receptor in stochastische zin als een 2-dimensionaal criterium. De uitdrukking 'lijnparen per mm' suggereert dat een resolutiecriterium 1-dimensionaal gedefiniëerd zou kunnen zijn. Gelet op het 2-dimensionale karakter van de SNR is een dergelijk resolutiecriterium vanuit theoretisch oogpunt weinig gelukkig (zie paragraaf 6.3.4.). Ook bestaan er practische bezwaren tegen het gebruik ervan (zie paragraaf 6.2.1).

# 5 Specificaties van de voornaamste remote sensing opname-instrumentaties in het optische venster

H.J. Buiten

Bijgaande twee tabellen (tabel S5.1 en S5.2) geven een overzicht van de specificaties van de voornaamste opname-instrumentaties in het *optische venster* (hoofdstuk 3), gerangschikt naar satelliet-opname en vliegtuig-opname. Deze tabellen zijn speciaal gemaakt om een goede vergelijking van de verschillende *spectraalbanden* (kanalen) en *resoluties* (hoofdstuk 3) te vergemakkelijken.
Het gebruik van Supplement 6 naast dit supplement is zeer aan te bevelen.

De meteorologische europese satelliet METEOSAT komt in het kader van dit boek niet ter sprake, maar is voor de weersvoorspelling en het monitoren van wolkenvorming en wolkenverplaatsing van eminente betekenis, niet in het minst tengevolge van de hoge temporele resolutie (elk half uur een opname). Ook kan deze satelliet dienen voor het bestuderen en gebruiken van de relatie tussen regenval en de thermisch-infrarood (TIR)-waarden van wolkactiviteiten in de hogere atmosfeerlagen. Dit is uiteraard van belang voor de landbouwkundige weersvoorspelling en voor de kennis omtrent vochtvoorziening op langere termijn. De METEOSAT staat als 'geostationaire satelliet' in figuur 1-4.

De Amerikaanse satellieten van de serie NOAA-n (National Oceanic and Atmospheric Administration) hebben behalve een grote meteorologische betekenis, ook een groeiende betekenis voor de bepaling van de vegetatie-ontwikkeling over grotere gebieden (zie ook hoofdstuk 25) en voor gewasopbrengstschatting (hoofdstuk 18). De meest recente NOAA-satellieten zijn genummerd 6 (gelanceerd in 1979), 7 (1981), 8 (1983), 9 (1984) en 10 (1986). Opvolgers met nieuwe of gewijzigde spectraalbanden zijn gepland (zie Mather, 1987). De sensor AVHRR/1 van NOAA-6, 8 en 10 verschilt in zoverre van de nieuwere sensor AVHRR/2 van NOAA-7, 9 dat kanaal 5 (11,5-12,5 μm) ontbreekt en dat het spectraalbereik van kanaal 1 nog tussen de waarden 550-900 nm is

Tabel S5.1 Specificaties van enkele satelliet-opname-instrumentaties in het optische venster

| | SATELLIET-OPNAME | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | METEOSAT-2 | NIMBUS-7 CZCS | NOAA-9 AVHRR/2 | LANDSAT-4,5 -MSS | LANDSAT-4,5 -TM | SPOT-1 HRV-CCD |
| zichtb. licht 400-700 (nm) | band<br>400-1100 "visible" | (nr) band<br>(1) 433-453<br>(2) 510-530<br>(3) 540-560<br>(4) 660-680 | (nr) band<br>(1) 580-680 | (nr) band<br>(1) 500-600<br>(2) 600-700 | (nr) band<br>(1) 450-520<br>(2) 520-600<br>(3) 630-690 | (nr) band<br>panchrom(P) 510-730<br>Multisp(XS)<br>(1) 500-590<br>(2) 610-680 |
| nabij IR 700-1300 (nm) | | (5) 700-800 | (2) 725-1100 | (3) 700-800<br>(4) 800-1100 | (4) 760-900 | (3) 790-890 |
| midden IR 1.3-3.0 (µm) | | | | | (5) 1.55-1.75<br>(7) 2.08-2.35 | |
| therm. IR 3.0-14.0 (µm) | 5.7-7.1 "water vapour"<br>10.5-12.5 "thermal IR" | (6) 10.5-12.5 | (3) 3.55-3.93<br>(4) 10.3-11.3<br>(5) 11.5-12.5 | | (6) 10.4-12.5 | |
| strook-breedte: | - (nadir) | 1566 km (nadir) | 3000 km | 185 km | 185 km | 60+60 km |
| ruimtelijke resolutie: | 5 km (WV+IR)<br>2½ km (Vis.) | 0.825 km | 1.1 km | 57x83 m digitaal | 30x30 m (120x120 m voor band 6) | 20 m (XS)<br>10 m (P) |
| hoogte | 36000 km | 955 km | 805-870 km | 715 km | 715 km | 832 km |
| temporele resolutie: | ½ uur | 6 dagen | ½ dag via afwisseling met NOAA-10 (AVHRR/1) | 16 dagen (7 dagen in Sidelap) | 16 dagen (7 dagen in Sidelap) | 26 dagen (5 dagen met off-nadir viewing) |

gelegen. De thermisch-infrarood-kanalen 4 en 5 zijn vooral bedoeld voor temperatuurbepaling, het volgen van wolkenvorming en voor bodemvochtstudies. Het thermisch kanaal 3 (3,55-3,93 µm) nabij de onscherpe overgang van reflectie naar emissie (zie paragraaf 3.3) kan gebruikt worden voor het monitoren van bosbranden, vulkanische activiteit of voor stroverbranding op grote schaal.

Tabel S5.2 Specificaties van enkele vliegtuig-opname-instrumentaties in het optische venster

| | VLIEGTUIG-OPNAME | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | DAEDALUS -1260 | CAESAR -CCD | LUFO | | | | |
| | | | zwart-wit film | | | kleurenfilm | |
| | | | MSP | PAN | IR | true-color | false-color |
| zichtb. licht 400-700 (nm) | (nr) band<br>(1) 380-420<br>(2) 420-450<br>(3) 450-500<br>(4) 500-550<br>(5) 550-600<br>(6) 600-650<br>(7) 650-690 | banden land-observatie<br>(in zee-observatie 9 kanalen<br>535-565<br>655-685 | (filter keuze<br>W21+W57A<br>W70<br>W87C )<br>555-580<br>665-700 | 300-<br>720 | 300-<br>920<br>zonder filter | banden<br>ongeveer<br>400-510<br>490-590<br>570-670 | banden (+filter W12)<br>ongeveer<br>520-590<br>550-680<br>620-850 |
| nabij IR 700-1300 (nm) | (8) 700-790<br>(9) 800-890<br>(10) 920-1100 | 845-895 | 840-900 | | 700-<br>920<br>met filter | | |
| midden IR 1.3-3.0 (µm) | | | | | | | |
| therm. IR 3.0-14.0 (µm) | (11) 3.0-5.5<br>(12) 8.0-14.0 | | | | | | |
| strook-breedte:<br>ruimtelijke resolutie:<br><br>hoogte<br>temporele resolutie: | FOV 86°<br>2.5 m rad x vlieghoogte<br>keuze<br>keuze | FOV 25.7°<br>≥ 50 cm<br>keuze<br>keuze | ---------- {optisch systeem ter keuze} ---------- | | | | |

Verklaring:

CZCS : Coastal-Zone Colour Scanner
AVHRR : Advanced Very High Resolution Radiometer
MSS : Multi Spectral Scanner
TM : Thematic Mapper
HRV : High Resolution Visible
CAESAR: CCD Airborne Experimental Scanner for Applications in Remote Sensing
CCD : Charge Coupled Devices
LUFO : Luchtfotografie
MSP : Multi Spectral Photography
PAN : Panchromatisch
IR : Infrarood
nm : nanometer = $10^{-9}$ meter
µm : micrometer = $10^{-6}$ meter

De oceanografische sensor CZCS ('Coastal Zone Colour Scanner'), die werd gedragen door de satelliet Nimbus-7, is inmiddels buiten bedrijf, maar is van betekenis gebleken voor het meten en volgen van de kleur en de temperatuur van kustwateren en oceanen. In het bijzonder was het oog gericht op de bepaling van het chlorofyl-gehalte (van belang voor de

schatting van de fytoplankton-concentratie in de voedselketen) en van de concentratie zwevende stof, in het bijzonder in kustgebieden. Dit laatste legt het verband tussen landobservatie zoals beschreven in dit boek, en zee-observatie.
De kanaalkeuze van de CZCS in het reflectieve deel van het optische venster houdt sterk verband met de spectrale reflectiekarakteristiek van (helder) water, zoals weergegeven in de grafiek van Supplement 6, en met de verschuiving van de grafiek naar rood en infrarood tengevolge van organische en anorganische bestanddelen van het zeewater. Sommige spectraalbanden zijn zeer smal gekozen (20 nm). Dit lukte alleen ten koste van de ruimtelijke resolutie, die betrekkelijk laag was (825 m in het nadir); vergelijk de overwegingen met betrekking tot de keuze van sensorparameters in paragraaf 4.5.4.

De sensoren van de satellietsystemen Landsat-MSS, Landsat-TM en SPOT zijn beschreven in paragraaf 7.5, zodat een nadere toelichting hierbij niet nodig is.

De vliegtuigopname-instrumentaties Daedalus-1260 (MSS) en Caesar-CCD (MSS) zijn eveneens beschreven in paragraaf 7.5. Voor Caesar is daar alleen de landobservatie-uitvoering weergegeven. Voor zee-observatie bestaat overigens de mogelijkheid om 9 kanalen te kiezen, maar deze zullen in het kader van dit boek buiten beschouwing worden gelaten.

Tenslotte wordt de luchtfotografie, met name de multispectrale luchtfotografie (MSP) in de paragrafen 4.1.1 en 9.2.3, en de filmsoorten PAN, ZWIR, TC en FC in paragraaf 4.1.1, besproken.

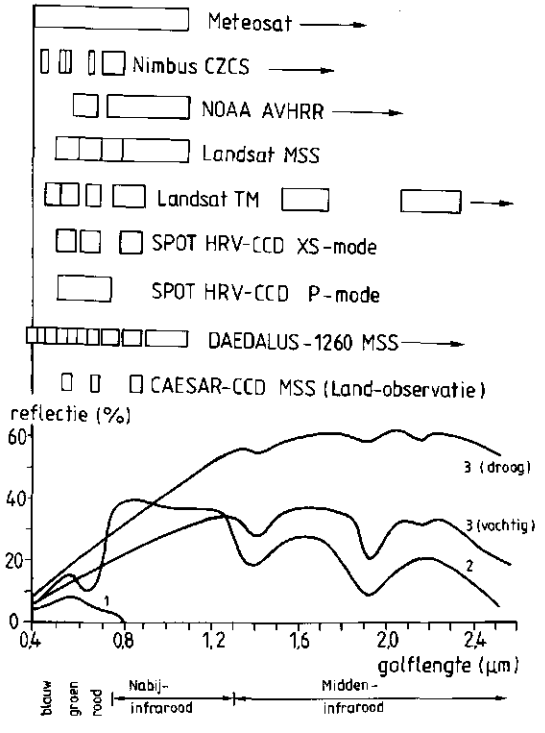
## Literatuur

1 Mather, P.M., 1987. Computer processing of remotely-sensed images. Section 2.3. J. Wiley & Sons, New York, 352 blz.

# 6 Algemene spectrale reflectiekarakteristieken (spectrale signaturen) en de positie van de spectraalbanden van enige remote sensing sensorsystemen in het optische venster

H.J. Buiten

Algemene spectrale reflectie-karakteristieken (spectrale signaturen) van WATER (1), VEGETATIE (2), BODEM (3) droog en vochtig, in het zichtbare en het nabij- en midden-infrarode golflengtebereik.
De positie van de spectrale banden van de voornaamste remote sensing sensorsystemen in het optische venster is in de figuur met blokken aangegeven (zie ook Supplement 5).
Een PIJLTJE verwijst naar één of meer banden in het thermisch-infrarood.



# 7 Specificaties van enkele microgolf-satellietsystemen en de nomenclatuur van radar-frequentiebanden

H.J. Buiten

## Microgolf-satellietsystemen

In paragraaf 8.4 is aangetoond dat het zondermeer toepassen van een SLAR-systeem bij aardobservatie vanuit een *satelliet*, dus vanaf grote hoogten, leidt tot onaanvaardbare afmetingen van de ruimtelijke resolutie in de voortbewegingsrichting van het sensorplatform. Daarom is alleen het SAR (Synthetische Apertuur Radar)-principe bruikbaar in de actieve microgolfdetectie vanuit de ruimte (zie ook Krul, 1987). Enige voorbeelden van SAR-systemen in verleden en toekomst zullen nu de revue passeren.

(a) *SEASAT*

Op 28 juni 1978 werd door de Amerikaanse ruimtevaart-organisatie NASA de eerste microgolfsatelliet voor oceanografische observatie gelanceerd. Hoewel deze SEASAT (evenals de LANDSAT-serie in een bijna-polaire baan) slechts functioneerde tot oktober 1978 toen kortsluiting in het voedingssysteem een einde aan zijn leven maakte, werden toch een groot aantal gegevens verzameld en is zijn betekenis groot gebleken. Ten dele werden daarbij ook, bij wijze van experiment, observaties boven land verricht. In tabel S7.1 worden specificaties gegeven (zie ook Skolnik, 1988).

De radar werd gebouwd volgens het *'chirp'-principe*. Dit houdt in dat de frequentie van de uit te zenden puls geen constante $f_o$ is, maar tijdens de puls lineair wordt gezwaaid van ($f_o$) naar ($f_o + \Delta f$), met interval $\Delta f$ als een soort bandbreedte. Het echosignaal wordt in de ontvanger, voordat detectie plaats vindt, eerst door een vertragingslijn gestuurd. Deze vertraging is zo ontworpen dat de hogere frequenties meer worden vertraagd dan de lagere. Hierdoor wordt de totaal ontvangen energie samengedrukt tot een kortere puls. Deze bewerking wordt daarom wel *pulscompressie* genoemd. Deze compressie heeft twee belangrijke voordelen, namelijk de afstandsresolutie wordt aanzienlijk beter, en vervolgens ontstaat er een schijnbaar hoger pulsvermogen omdat de

Tabel S7.1 Enige specificaties van de SEASAT-SAR

| | |
|---|---|
| Frequentie | L-band (1275 MHz; 23,5 cm) |
| Type | chirp radar (lineair gezwaaide frequentie en pulscompressie), beeldvormende SAR |
| Bandbreedte | 19 MHz |
| Antenne | 11 m × 2 m |
| Polarisatie | HH: zenden horizontaal, ontvangen horizontaal |
| Invalshoek | 20 ° (17,5 tot 22,5 t.o.v. verticaal) |
| Strookbreedte | 100 km (ongeveer) |
| Geometrische grondresolutie | 5,5 m (afstandsres.) × 23 m (azimuthres.) |
| Pixelgrootte | 25 m × 25 m (4 looks); digitale SAR-dataverwerking |
| Baanhoogte | 800 km |

zendenergie van de puls bij ontvangst in de tijd gecomprimeerd wordt. Hierdoor kan de gevoeligheid van de radar belangrijk toenemen bij eenzelfde piekvermogen van de radar. Het chirp-principe wordt tegenwoordig in radar-satellietsystemen algemeen gebruikt.
De ontwikkeling van digitale correlatiemethoden voor de SAR-data, in plaats van alleen optische verwerking, maakte mogelijk dat de SEASAT-SAR-beelden digitaal konden worden verstrekt. Dit opende perspectieven voor alle mogelijkheden van digitale beeldbewerking en voor combinatie met andere (bijvoorbeeld LANDSAT) beelden.
De SEASAT heeft inspirerend gewerkt voor volgende experimenten, mede met het oog op de constructie en de lancering van een blijvende reeks beeldvormende radarsatellieten.

(b) *SIR-experimenten*
Om meer ervaring op te doen met de techniek en de beeldkarakteristiek van SAR-opnamen werd in november 1981 door de NASA het SIR-A (Shuttle Imaging Radar A) experiment uitgevoerd via het bemande spacelab van het Amerikaanse ruimteveer Space Shuttle. De SIR-A sensor was een gemodificeerde versie van de SEASAT-SAR (eveneens L-band, maar met smallere bandbreedte namelijk 6 MHz tegenover 19 MHz voor SEASAT). Gedurende drie dagen werden een aantal stroken van de aardbol opgenomen. Frappant waren de opnamen van een woestijngebied waarop patronen van voormalige, onder een pakket van minstens één à twee meter zand bedolven waterlopen en beddingen werden ontdekt. Dankzij de uitzonderlijke droogte van het zand kon de L-band radar veel verder in de bodem doordringen dan normaal gesproken kon worden verwacht.
De dataverwerking geschiedde, in tegenstelling tot SEASAT, langs optische weg waardoor er van SIR-A alleen filmbeelden beschikbaar zijn. De invalshoek werd ook anders gekozen (47°). In tabel S7.2 worden specificaties gegeven van SIR-A en van zijn opvolgers (ondermeer

Tabel S7.2 Enige specificaties van de SIR-radarexperimenten

| | (1981) SIR-A | (1984) SIR-B | (1992, 1993, 1995) SIR-C |
|---|---|---|---|
| Frequentie | L-band (1,28 GHz) | L-band | X-/C-, L-band |
| Polarisatie | HH | HH | VV/HH, VV, HV, VH |
| Invalshoek | 47 ° | 15-60 ° | instelbaar (15-60 °) |
| Baanhoogte | 245 km | 230 km | 225 km |
| Strookbreedte | 50 km | 20-50 km | 15-65 km |
| Afstandsresolutie | 40 m | 58-17 m | 1) 60-20 m<br>2) 30-10 m |
| Azimuthresolutie | 40 m (6 looks) | 30 m (4 looks) | 30 m (4 looks) |

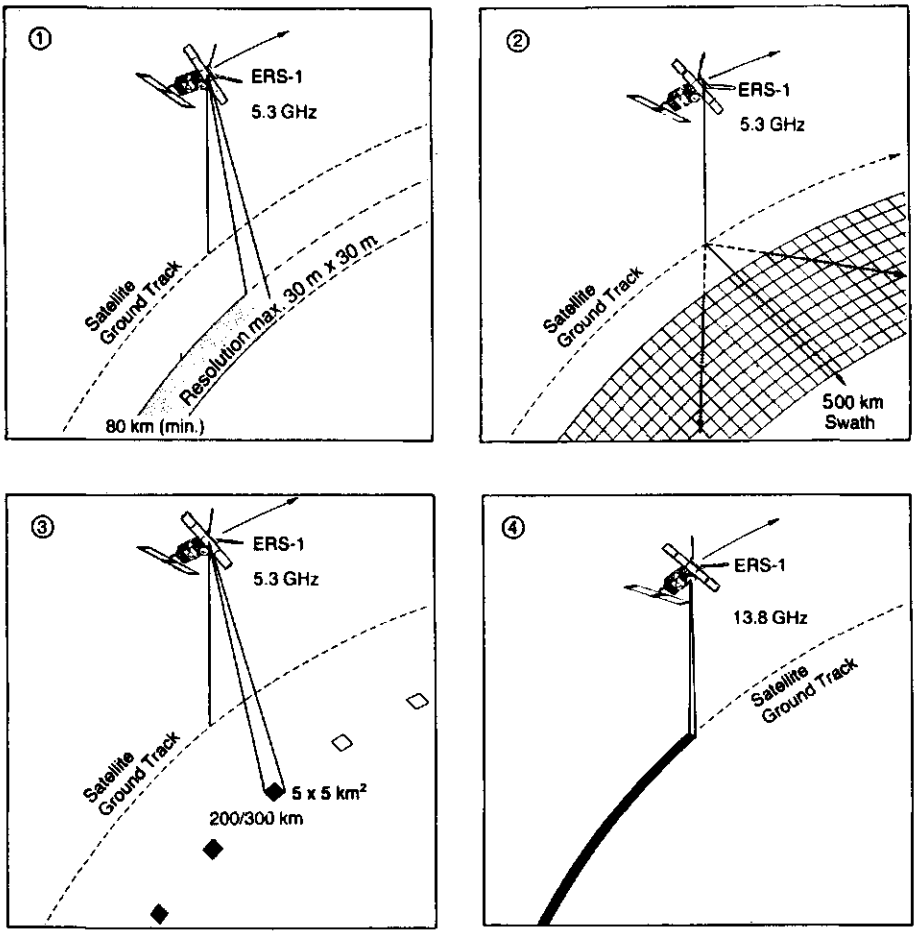
1) lage resolutie bij bandbreedte 10 MHz
2) hoge resolutie bij bandbreedte 20 MHz

ontleend aan Richards, 1986; Skolnik, 1988; Evans & Elachi, 1988).
Het tweede radarexperiment (SIR-B) vond plaats in oktober 1984 gedurende 8 dagen. De sensor was nagenoeg gelijk aan die van SEASAT en SIR-A, echter met dit verschil dat de antenne tijdens de ruimtevlucht selectief gericht kon worden, resulterend in invalshoeken tussen 15° en 60°. Door de invoering van deze keuzemogelijkheid werd een belangrijke stap gezet naar het gebruik van de inkijkhoek van de sensor (ofwel van de invalshoek ter plaatse van het object) als één van de sensorparameters om het reflectiegedrag van objecten te kunnen karakteriseren. Ook werd daadwerkelijk aangetoond dat het mogelijk is om stereobeelden van een gedeelte van het aardoppervlak te verkrijgen dankzij de instelbaarheid van de inkijkhoek van de sensor.
De bandbreedte van de SIR-B sensor bedroeg 12 MHz.
Een deel van de gegevens kon digitaal verwerkt worden. Helaas ging een belangrijk deel van de opnamegegevens verloren, ondermeer door storing in de telemetrische transmissie, zodat een aantal van de geplande onderzoeksactiviteiten achterwege moest blijven of slechts gedeeltelijk kon worden uitgevoerd.

De voorbereiding voor een derde radarexperiment (SIR-C), achtereenvolgens uit te voeren in de jaren 1992, 1993 en 1995, is in volle gang. De invalshoek staat wederom ter keuze voor de onderzoekers; ook kan men kiezen tussen een hoge en een lage resolutie (zie tabel S7.2). Nieuw is het multi-frequentie karakter van de SIR-C, omdat SAR-metingen in zowel de L-band (1,25 GHz) en de C-band (5,3 GHz) met vier soorten polarisatie- instrumentatie, als in de X-band (9,6 GHz) met VV-polarisatie, mogelijk zullen zijn. Bovendien is de SIR-C voor wat betreft de L-band en de C-band een *polarimetrisch* systeem (zie ook paragraaf 19.5). Het radarsysteem verschaft niet alleen beelden van de echostèrkten in HH, VV en beide kruispolarisaties, maar levert ook de

relatieve fáseverschillen tussen de echo's in die vier polarisatie-instrumentaties. Het maakt op pixelbasis de afleiding mogelijk van een complete verstrooiings-matrix van het geobserveerde terreingedeelte. Hieruit kan elke polarisatie-configuratie (lineair, circulair of elliptisch) worden gegenereerd bij de beeldverwerking.
Dit betekent een aanzienlijke vooruitgang ten opzichte van voorgaande experimenten met betrekking tot het verkrijgen van multidimensionale datasets van objecten op aarde. Deze ontwikkelingen zijn ongetwijfeld van grote betekenis voor de toepassingsmogelijkheden van radar, met name de landtoepassingen.

(c) *ERS-serie (Europa)*
Naar verwachting lanceert ESA (European Space Agency) eind 1990 de eerste Europese remote sensing satelliet ERS-1. Het oogmerk van deze satelliet en van zijn opvolgers is de wereldwijde monitoring van oceanen, kustwateren, poolzeeën en ijs en zal ook – in beperkte mate – van betekenis kunnen zijn voor landtoepassingen. De satelliet zal mede door middel van een passieve radarinstrumentatie (Along Track Scanning Radiometer and Microwave Sounder: ATSR-M) een aanzienlijke bijdrage kunnen leveren aan het onderzoek naar veranderingen in het wereldklimaat. Een Ku-band (13 GHz) hoogtemeter (Radar-Altimeter) zal in staat zijn met hoge relatieve precisie (namelijk met een standaardafwijking van 10 cm) de hoogte van oceaangolven en de topografie van ijsoppervlakken te meten. Voor geodetische doeleinden is de betekenis vooral gelegen in een betere bepaling en monitoring van de (theoretische) geoïde die de vorm van de aarde definieert. Ook bevindt zich aan boord van de ERS-1 een precisie-instrument (Precise Range & Range Rate Equipment, PRARE) waarmee de satellietbaan met decimeter-nauwkeurigheid kan worden bepaald en gevolgd, gepaard gaande met geodetische toepassingen via een netwerk van mobiele grondstations en een Laser-retroreflector (LRR) aan de satelliet. Boven land is meting ook mogelijk mits het terrein niet te bergachtig is.
Naast enkele andere instrumenten is in het kader van dit boek de sensor AMI (Active Microwave Instrument) in hoofdzaak van belang. Van deze actieve microgolf-sensor is het met name de beeldvormende SAR (Image Mode) die van belang is voor de detectie van landkenmerken (zie figuur S7-1). De andere gebruiksmogelijkheden betreffen de AMI als windscatterometer voor de meting van wind-snelheid en -richting op zee ten behoeve van meteorologische modellen (Wind Mode) en vervolgens als golfscatterometer voor de meting van golfspectra van oceanen (Wave Mode). De AMI-SAR is werkzaam in de C-band (5,3 GHz, golflengte 5,7 cm) volgens het eerder genoemde 'chirp'-principe. Enige specificaties geeft tabel S7.3. Meer details zijn gegeven door Van Swol (1987).
De puls wordt in de ontvanger circa 1000 maal korter gemaakt dan de zendpuls. Dit heeft niet alleen consequenties voor de resolutie maar ook voor het piekvermogen van de zender; deze kan daardoor een factor 1000 kleiner worden, hetgeen uiteindelijk resulteert in een piekvermogen van 5 kW (gemiddeld vermogen 400 W).




**S7-1** Schematische voorstelling van de bedekking door actieve microgolfsensoren van de ERS-1: (1) AMI-SAR, (2) AMI-windscatterometer, (3) AMI-golfscatterometer, (4) radar hoogtemeter (bron: Van Swol, 1987).

ad (1): De beeldvormende sensor 'kijkt' onder een nominale hoek van 23° en beeldt een strook op aarde af ter breedte van 100 km. Deze strook ligt aan stuurboordzijde 294 km naast en parallel aan het grondspoor van de satelliet.

ad (2): Windrichting en windsterkte boven de oceanen op een 25 x 25 km grid kunnen afgeleid worden uit de radarreflecties die door de windscatterometer over een 500 km brede strook gemeten worden. Deze strook ligt aan stuurboord 225 km naast het grondspoor van de satelliet. De radarecho van eenzelfde stukje zee-oppervlak wordt achtereenvolgens gemeten door drie antennes die een hoek maken met de snelheidsvector van de satelliet van respectievelijk 45°, 90° en 135°.

ad (3): Wanneer de AMI als golfscatterometer functioneert, wordt er iedere 200-300 km een klein 'SAR-beeldje' van 5 x 5 km gemaakt. Het af te beelden gebied kan dan overal binnen de 100 km brede SAR-strook gekozen worden.

ad (4): Een 'Radar Altimeter' (RA), waarmee de afstand van de satelliet tot het zeeoppervlak, de significante golfhoogte (SWH) en de windsnelheid boven de oceaan bepaald kunnen worden. De hoogtemeter 'kijkt' recht naar beneden en levert uiteindelijk iedere seconde een meetpunt langs het grondspoor van de satelliet. De hoogtemeter is hoofdzakelijk bruikbaar boven oceanen en ijsgebieden.

Tabel S7.3 Enige specificaties van de beeldvormende SAR van de europese radarsatelliet ERS-1

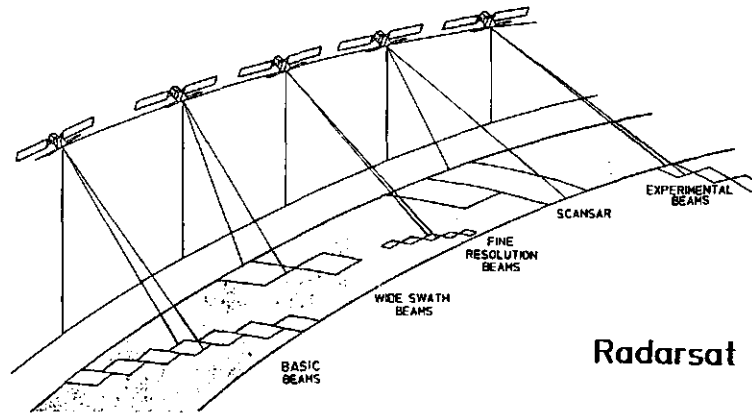
| | |
|---|---|
| Frequentie | C-band (5,3 GHz; golflengte 5,7 cm) |
| Type | chirp radar, SAR |
| Bandbreedte | 13,5 MHz |
| Antenne | lengte 10 m, breedte 1 m |
| Polarisatie | VV (verticaal zenden, verticaal ontvangen) |
| Invalshoek | 23 ° in het midden van de opnamestrook; door kanteling van de satelliet is ook 35 ° mogelijk |
| Baanhoogte | 785 km (745-825 km) |
| Baangegevens | zonsynchrone bijna-polaire baan; herhalingsperiode 3 dgn |
| Strookbreedte | 80-100 km |
| Resolutie | 1) 100 m × 100 m 2) 30 m × 30 m |

1) lage ruimtelijke resolutie bij radiometrische resolutie 1 dB
2) hoge ruimtelijke resolutie bij radiometrische resolutie 2,5 dB

Sterke nadruk zal worden gelegd op de nauwkeurigheid van de intensiteitsmeting; gestreefd wordt naar één dB absoluut. Calibratie is daarbij één van de belangrijke factoren. Reden waarom aan boord in een calibratielus is voorzien, die het mogelijk maakt de instrumentatie, met uitzondering uiteraard van de antenne, periodiek te ijken. De antenne kan alleen worden gecalibreerd met behulp van gronddoelen. Over de gehele wereld zullen ontvangststations worden ingericht. De eigen ESA-stations zullen liggen in Zweden, Italië, Canada en op de Canarische Eilanden.
De bandkeuze (C-band) van de actieve microgolfsensor van de ERS-1 staat meer in relatie tot zeetoepassingen dan tot landtoepassingen. Elders in dit boek (zie paragraaf 11.2.5 en figuur 11-7) is al getoond dat de C-band op zich niet de gelukkigste keuze is voor de onderscheiding van boomsoorten. In combinatie met andere frequenties (bijv. X-band of L-band) zijn echter wel goede gebruiksmogelijkheden te verwachten, ook voor gewasclassificatie en landgebruiksinventarisatie. Zou een toekomstige radarsatelliet met meerdere frequenties zijn uitgerust die bovendien instelbaar zouden zijn met betrekking tot de inkijkhoek (zoals bij de SIR-B en -C experimenten), dan zou dit een doorbraak kunnen betekenen voor de aardobservatie, met name de monitoring van tal van landobjecten en hun veranderingen. Radar heeft ook een goede toekomst door zijn weersonafhankelijkheid en door zijn specifieke eigenschappen zoals de detectie van verschillen in materiaal, vochttoestand, ruwheid van het objectoppervlak en van verschillen in geometrische structuur van het land na grondbewerking, van gewassen en van vegetatiedekken. De ontwikkeling van de polarimetrie (zie paragraaf 19.5) zou bovendien de kansen op objectherkenning en objectkarakterisering kunnen vermeerderen.

De komst van de ERS-1 zal een belangrijke ontwikkeling in gang zetten en betekent een stap in bovengenoemde richting. Tal van onderzoeksinstellingen en commerciële gebruikers hebben bij ESA projecten ingediend om de verschillende toepassingsmogelijkheden van de satelliet te beproeven, zowel meteorologisch, oceanografisch als met betrekking tot landsobservatie. In Nederland is in het kader van het Nationaal Remote Sensing Programma (NRSP) en onder beleidsvoering van de Beleidscommissie Remote Sensing (BCRS) een zogenaamd 'flankerend programma' rond de ERS-1 opgezet. Voor wat betreft de landobservatie gaat het daarbij enerzijds om technische aspecten als passieve calibratie (met hoekreflectoren) en beeldverwerkingstechnieken (filters en textuuranalyse), anderzijds om landgebruiksclassificatie en monitoring van gewassen, bossen en natuurgebieden. Hierbij wordt ook de relatie gelegd met (DUTSCAT) multiband-scatterometer-gegevens in heden en verleden (zie hoofdstuk 11), met de resultaten van voorgaande ESA-radarcampagnes in de Flevopolder en met andere bronnen van geografische informatie (GIS). Door min of meer gelijktijdige remote sensing-opnamen in het optische venster wordt getracht zicht te krijgen op het synergetisch aspect van optische en microgolfgegevens, in relatie tot reflectiemodellen (zie paragraaf 27.4).
De komst van een nieuw observatiesysteem is ingrijpend voor een organisatie of bedrijf. Het is dan ook de wens en de verwachting van de gebruikerswereld dat de ERS-1 het begin is van een permanente serie van (radar)observatie-satellieten. De lancering van de ERS-2 als opvolger van de ERS-1 wordt gedacht in 1994 plaats te vinden; meer op landtoepassingen gerichte sensoren worden voor de periode daarna overwogen.

(d) *RADARSAT (Canada)*
Canada ontwerpt en bouwt een radar-satelliet RADARSAT genaamd, waarvan men de lancering in 1994 hoopt uit te voeren. Met het Verenigd Koninkrijk wordt samengewerkt voor wat betreft de bouw van het platform; de Verenigde Staten zullen de lancering uitvoeren. Het systeem zal naar verwachting gedurende vijf jaren operationeel zijn. Het observatiesysteem bestaat uit een beeldvormende C-band SAR die dankzij verschillende keuzemogelijkheden een scala van strookbreedten (gerekend loodrecht op de voortbewegingsrichting van het platform), invalshoeken en resoluties kan beslaan. Deze varieteit is mogelijk geworden mede dankzij het recente ontwerp, ScanSAR genaamd, waarin een af te beelden strook wordt opgedeeld in sub-stroken (segmenten) en waarbij de pulsherhalingsfrequentie dienovereenkomstig wordt aangepast, een en ander met behoud van de coherente combinatie van de echo's van het object ten behoeve van de vorming van de SAR-afbeelding. Het ScanSAR-principe wordt nader beschreven door Luscombe (1988).




**S7-2** Beeld van de verschillende opnamemogelijkheden van de Canadese SAR-satelliet RADARSAT; lanceerdatum 1994 (bron: Luscombe, 1988).

Figuur S7-2 brengt de keuzemogelijkheden in beeld. Tabel S7.4 geeft enige sensorspecificaties van de RADARSAT (zie eveneens Luscombe, 1988 en RADARSAT Update, 1988). Men zij er op verdacht dat deze specificaties aanzienlijk afwijken van hetgeen eerder in publicaties of op congressen is gepresenteerd.
Door de instelmogelijkheid van de inkijkhoek zal ook een *stereoscopische* gebiedsbedekking met radarbeelden mogelijk zijn. Een andere belangrijke gebruiksmogelijkheid is de bijna real-time monitoring van de ijssituatie van scheepvaartroutes langs Canada's noordwestkust. Andere gebruiksmogelijkheden worden verwacht voor de monitoring van gewassen; de kartering van bosarealen en houtvolumes; detectie van olielozingen op zee; kartering van sneeuwbedekkingen en het verschaffen van informatie over ijsbewegingen met het oog op offshore activiteiten. RADARSAT is in de eerste plaats bedoeld voor commerciële doeleinden, meer dan voor wetenschappelijke oogmerken.

Tabel S7.4 Enige specificaties van de RADARSAT

| | |
|---|---|
| Frequentie | C-band (5,3 GHz; golflengte 5,7 cm) |
| Type | chirp-radar, SAR |
| Bandbreedte | 11,6; 17,3 en 30,0 MHz |
| Antenne | lengte 15 m; breedte 1,5 m |
| Polarisatie | HH |
| Invalshoek | 20-60 °, instelbaar |
| Baanhoogte | 792 km nominaal |
| Baangegevens | zonsynchrone bijna-polaire baan; herhalingsperiode 3 dagen |
| Strookbreedte | ter keuze; 65-500 km |
| Afstandsresolutie | 25-45 m (1 look) |
| Azimuthresolutie | 24-37 m (1 look) |

Tabel S7.5 Enige specificaties van de JERS-1

| | |
|---|---|
| Frequentie | L-band (1,2 GHz; golflengte 25 cm) |
| Type | SAR |
| Bandbreedte | 15 MHz |
| Antenne | lengte 12 m; breedte 2,2 m |
| Polarisatie | HH |
| Inkijkhoek | 44 ° |
| Baanhoogte | 568 km |
| Strookbreedte | 75 km |
| Resolutie | 20 m |

Tabel S7.6 Nomenclatuur van radarfrequenties

| Band-benaming | Nominaal frequentiebereik (GHz) | Radar-frequentiebereik f (GHz) | Omgerekend naar golflengtebereik λ(cm) |
|---|---|---|---|
| UHF | 0,3 – 1 | 0,42 – 0,45 (1) | 71,43 – 66,67 |
| | | 0,89 – 0,94 (2) | 33,71 – 31,91 |
| L | 1 – 2 | 1,22 – 1,40 | 24,57 – 21,41 |
| S | 2 – 4 | 2,30 – 2,50 | 13,03 – 11,99 |
| | | 2,70 – 3,70 | 11,10 – 8,10 |
| C | 4 – 8 | 5,25 – 5,93 | 5,71 – 5,06 |
| X | 8 – 12 | 8,50 – 10,68 | 3,53 – 2,81 |
| Ku | 12 – 18 | 13,40 – 14,00 | 2,24 – 2,14 |
| | | 15,70 – 17,70 | 1,91 – 1,69 |
| K | 18 – 27 | 24,05 – 24,25 | 1,25 – 1,24 |
| Ka | 27 – 40 | 33,40 – 36,00 | 0,90 – 0,83 |
| V | 40 – 75 | 59 – 64 | 0,51 – 0,47 |
| W | 75 – 110 | 76 – 81 | 0,40 – 0,37 |
| | | 92 – 100 | 0,33 – 0,30 |
| mm | 110 – 300 | 126 – 142 | 0,238 – 0,211 |
| | | 144 – 149 | 0,208 – 0,201 |
| | | 231 – 235 | 0,130 – 0,128 |
| | | 238 – 248 | 0,126 – 0,121 |

1) wordt soms P-band genoemd

2) wordt soms bij de L-band gerekend

(e) *JERS-1 (Japan)*
De Japanse ruimtevaartorganisatie beoogt een radarsatellietsysteem genaamd JERS-1 (Japanese Earth Resources Satellite) te lanceren in 1992. Het systeem heeft een L-band SAR aan boord. De sensor zal werken onder een vaste inkijkhoek van 44° en met een resolutiemaat van 20 meter. Enige specificaties van de radarsensor geeft tabel S7.5 (naar Elachi, 1988). Ook zal de satelliet een sensor dragen, werkzaam in het zichtbaar licht en in het nabij-infrarood ten behoeve van landobservatie.

## Nomenclatuur van radar-frequentiebanden

Tenslotte wordt in tabel S7.6 een overzicht gegeven van de *nomenclatuur* van radar-frequenties zoals deze internationaal zijn vastgelegd in de vorm van standaard letter-aanduidingen volgens de IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands, IEEE Std 521-1984 (zie ook de afbeelding van deze banden in figuur 3-5).

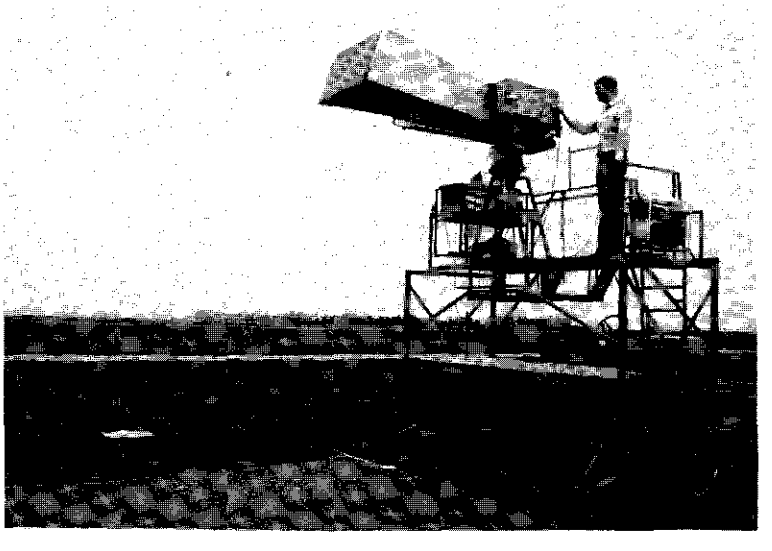
## Literatuur

1 Elachi, C., 1988. Spaceborn radar remote sensing: applications and techniques. IEEE Press Inc., New York, 255 blz.
2 Evans, D. & C. Elachi, 1988. Overview of the Shuttle Imaging Radar (SIR-C). Proc. IGARSS '88 Symposium, Edinburgh, Scotland, 13-16 Sept. 1988. Publ. ESA SP-284, Volume II, blz. 1015-1017.
3 Krul, L., 1987. A look at SAR. EARSel News, Sept./Dec. 1988 no. 33/34, blz. 9-13.
4 Luscombe, A.P., 1988. Taking a broader view: RADARSAT adds ScanSAR to its operations. Proc. IGARSS '88 Symposium, Edinburgh, Scotland, 13-16 Sept. 1988. Publ. ESA SP-284, Volume II, blz. 1027-1032.
5 RADARSAT Update, 1988. Remote Sensing in Canada. EARSel News, Sept./Dec. 1988 no. 37, blz. 61-62.
6 Richards, J.A., 1986. Remote sensing digital image analysis. Chapter 1. Springer-Verlag, Berlijn/Heidelberg, 281 blz.
7 Skolnik, M.I., 1988. Radar Applications. IEEE Press Inc., New York, 477 blz.
8 Swol, R.W. van, 1987. Studie naar de opzet van een nationaal ERS-1 data-centrum. Rapport Beleidscommissie Remote Sensing, BCRS-87-11, juli 1987.

# 8 Veldspectrometer voor onderzoek in het veld naar het spectrale gedrag van gewas of bodem in het optische venster

J.G.P.W. Clevers

De veldspectrometer (zie figuur S8-1) is een apparaat om spectrale reflectie-metingen te verrichten in smalle banden over een relatief groot bereik van het spectrum. De beschreven veldspectrometer is vooral tijdens de NIWARS-periode (1971-1977) (NIWARS = Nederlandse Interdepartementale Werkgemeenschap voor het Applicatie-onderzoek van Remote Sensing technieken) intensief gebruikt voor het verrichten van achtergrondonderzoek naar de fysische relatie tussen objecteigenschappen en het spectrale gedrag van het object (waarbij het object in het algemeen bestond uit landbouwgewassen). Dit apparaat is uitvoerig beschreven door Bunnik (1978).
Het apparaat is ontworpen en gebouwd door het TNO-TH (TPD) Instituut voor Toegepaste Fysica (Delft).
Om de meetomstandigheden zoveel mogelijk constant te houden, meet het instrument simultaan een object en een diffuus-reflecterend



S8-1
Veldspectrometer.

referentieplaatje, beide blootgesteld aan dezelfde instraling. Het referentieplaatje is bedekt met 'Eastman Kodak White Reflectance Paint' (gebaseerd op bariumsulfaat). Dit plaatje is in het laboratorium geijkt aan een standaardplaat met bekende absolute reflectie-eigenschappen. De spectrometer is zodanig geconstrueerd dat de openingshoek naar het object toe 8° bij 20° en de openingshoek naar het referentieplaatje toe 5 mrad bedraagt. Twee spiegels, geplaatst onder een hoek van 45°, worden gebruikt om zowel het object als het referentieplaatje vertikaal te meten. Door de veldspectrometer op een platform op te stellen kan een wisselende afstand tussen meter en object bereikt worden, hetgeen een wisselend oppervlak van het object dat gemeten wordt, inhoudt. Zowel het object als het referentieplaatje moeten vrij van schaduw zijn.
Met behulp van de spectrometer kunnen spectrale metingen in 153 golflengtebanden in het golflengte-interval van 361 nm tot 2360 nm verkregen worden. Het aftasten van het gehele meetbereik duurt ongeveer 2 minuten, waarbij per golflengte-interval twee herhalingsmetingen uitgevoerd worden. Na digitalisatie van het signaal door een datalogger, worden de metingen op magneetband opgeslagen. Naderhand worden de data verder verwerkt door een computer, waarbij een correctie voor het absolute reflectiepercentage van het referentieplaatje in de diverse golflengtebanden en een compensatie voor systematische verschillen in uitvoer tussen object-optiek en referentie-optiek wordt toegepast.
Enige specificaties van de veldspectrometer worden in onderstaande tabel gegeven.

Tabel S8.1 Specificaties voor de spectrale resolutie van de veldspectrometer

| interval | detector | spectrale interval | bandbreedte |
|---|---|---|---|
| 1 | Si | 361 – 753 nm | 17 nm |
| 2 | Si | 629 – 1226 nm | 25 nm |
| 3 | PbS | 1165 – 2360 nm | 42 nm |

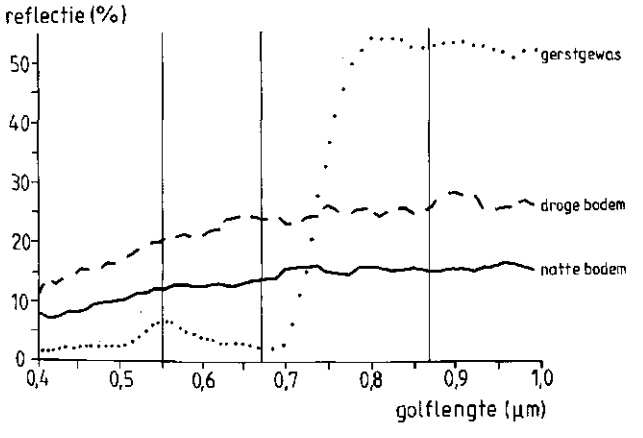
## Literatuur

1 Bunnik, N.J.J., 1978. The multispectral reflectance of shortwave radiation by agricultural crops in relation with their morphological and optical properties. Thesis, Meded. Landbouwhogeschool Wageningen 78-1, 175 blz.
2 Eindrapport NIWARS (bevattende de resultaten van het onderzoek naar de civiele toepassingsmogelijkheden in Nederland van remote sensing technieken uitgevoerd in de jaren 1971-1977).
Stuurgroep van het beleidsruimte-project NIWARS, 1 juni 1977, blz. 44-47.

# 9 Handspectrometer voor het verzamelen van reflectie-waarden in het veld

J.G.P.W. Clevers

In het landbouwkundig onderzoek is behoefte aan een snelle en non-destructieve methode voor de bepaling van de hoeveelheid bladmassa (of biomassa). Er is een duidelijke relatie tussen de hoeveelheid gereflecteerde straling en de biomassa van een gewas. Door het CABO (Centrum voor Agrobiologisch Onderzoek te Wageningen) is samen met de TFDL (Technische en Fysische Dienst voor de Landbouw te Wageningen) een draagbaar instrument ontwikkeld dat gebruik maakt van deze relatie (Uenk, 1982). Een soortgelijk instrument wordt door de Landbouwuniversiteit Wageningen gebruikt om snel, lokaal de reflectieve eigenschappen van gewassen te bepalen. Dit instrument wordt ook gebruikt voor het verzamelen van incidentele *veldgegevens* ten behoeven van de (externe) *ijking* van remote sensing-metingen zoals multispectrale luchtfotografie en multispectrale aftasting.
In de literatuur bestaat een zekere eenstemmigheid over de optimale banden nodig om karakteristieke spectrale informatie over vegetatie te verkrijgen. Deze banden liggen in het zichtbare (groen en rood) en het nabij-infrarode deel van het electromagnetische spectrum. Bunnik (1978)




**S9-1** Voorbeeld van spectrale reflectie van een groen gewas, een droge bodem en een natte bodem. Met verticale lijnen zijn de golflengten voor optimale spectrale informatie aangegeven (vergelijk figuur 9-3).

wees drie golflengten aan op basis van optimale informatie over variatie in een aantal belangrijke gewaskenmerken. Deze golflengten zijn: in het groen bij 550 nm, in het rood bij 670 nm en in het infrarood bij 870 nm (zie figuur S9-1).

S9-2
Handspectrometer.

De handspectrometer van de Landbouwuniversiteit verricht reflectiemetingen in drie spectrale banden (zie figuur S9-2). De ontvanger van de radiometer bestaat uit twee foto-elektrische cellen, die gemonteerd zijn in het centrum van een roterende trommel. Eén cel meet naar boven toe gericht de inkomende straling (totaal van directe en indirecte straling) en de andere cel meet vertikaal naar beneden gericht de gereflecteerde straling. Het oppervlak van de trommel bevat drie interferentie-filters (zie paragraaf 4.1.1), waarvan de specificaties gegeven zijn in onderstaande tabel S9.1. De keuze van de filters is gebaseerd op de resultaten van Bunnik. Het instrument meet de inkomende straling van de hemel-halfruimte via een zogenaamde cosinus-gecorrigeerde bol. Door verwisselbare diafragma's kan de grootte van het benedenwaartse gezichtsveld worden gekozen. De metingen worden opgeslagen (en deels verwerkt) met een zakrekenmachine, die gekoppeld is aan de radiometer. De resultaten zijn *reflectiepercentages.*

Tabel S9.1 Specificaties van de filters gebruikt in de handspectrometer

| centrale golflengte | maximale transmissie | golflengte-interval (50% rel. transmissie) | bandbreedte |
|---|---|---|---|
| 577 nm | 45% | 565-590 nm | 25 nm |
| 660 nm | 70% | 645-675 nm | 30 nm |
| 840 nm | 45% | 834-846 nm | 12 nm |

Doordat vrijwel simultaan de inkomende en de gereflecteerde straling gemeten wordt, zijn de resultaten nagenoeg onafhankelijk van de lichtomstandigheden. Het verdient echter aanbeveling om zoveel mogelijk onder gelijke weersomstandigheden te meten.

## Literatuur

1 Bunnik, N.J.J., 1978. The multispectral reflectance of shortwave radiation by agricultural crops in relation with their morphological and optical properties. Thesis, Meded. Landbouwhogeschool Wageningen 78-1, 175 blz.

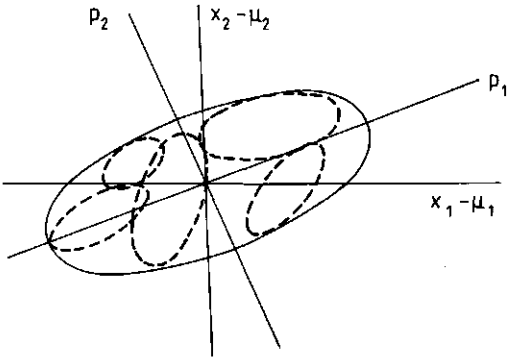
2 Uenk, D., 1982. Bepaling van grondbedekking en biomassa met behulp van een reflectiemeter. CABO-Verslag nr. 41, 18 blz.

# 10 Hoofdcomponenten-transformatie en datareductie

H.J. Buiten

De *hoofdcomponenten-transformatie* ('Principal Component Transformation') is een orthogonale en lineaire transformatie, die door rotaties de N oorspronkelijke, gecorreleerde variabelen (te weten de waargenomen stralingswaarden in de verschillende spectraalbanden) over voert in N nieuwe, *ongecorreleerde variabelen* (synthetische banden, *hoofdcomponenten* genoemd).
Teneinde de omvang van de berekening van de transformatieparameters binnen de perken te houden, wordt gewoonlijk eerst een steekproef uitgevoerd op het waarnemingspakket. Van elke te herkennen klasse wordt een beperkt aantal representatieve pixels uitgezocht (trainingsset). De meetwaarden van de uitgekozen pixels worden samengevoegd tot één pakket meetpunten waarop de berekening van de transformatie wordt gebaseerd. Het klassemerk wordt daarbij genegeerd. Voor een uitvoerige beschrijving van de theorie van de hoofdcomponenten-transformatie, waarbij de berekening van eigenwaarden en eigenvectoren een centrale plaats inneemt, wordt verwezen naar Buiten (1986).
Hoofddoel van de hoofdcomponenten-transformatie is te komen tot een *datareductie*. Aangezien de variabelen van een aantal spectraalbanden meestal vrij sterk gecorreleerd zijn, zoals bijvoorbeeld het geval is bij landobservatie met de Landsat-Thematic Mapper (paragraaf 7.5), is er sprake van een zekere overtalligheid in het getallenpakket van de opname. Door de hoofdcomponenten-transformatie zou, bij een zo gering mogelijk verlies van informatie-inhoud, de hoeveelheid getallen gecomprimeerd kunnen worden. Na berekening van de transformatieparameters uit de steekproef, wordt de transformatie uitgevoerd op het totale waarnemingspakket en kan deze als een *voorbewerkingsstap* worden beschouwd voor de verdere beeldverwerking, zoals classificatie en andere vormen van digitale beeldinterpretatie (zie hoofdstuk 13).
Zou men de stralingswaarden (pixelwaarden) uitzetten in een N-dimensionale kenmerkruimte met de variabelen $x_k$ (k=1, .., N) van de

originele spectraalbanden als coördinaten (kenmerken), dan zal men bij correlatie tussen de variabelen een puntenwolk in de vorm van een hyperellipsoïde kunnen verwachten.
Figuur S10-1 illustreert dit voor een 2-dimensionale kenmerkruimte, waar de pixelwolk een sigaarvorm heeft door correlatie tussen de variabelen $x_1$ en $x_2$. Het is zinvol vooraf een translatie van de coördinaten uit te voeren zodat het gemiddelde $\mu_k$ voor elke $x_k$ in de oorsprong komt te liggen.




**S10-1** Totale pixelwolk in de kenmerkruimte (gestreepte ellipsen: de afzonderlijke klassewolken). De nieuwe variabelen $p_1$ en $p_2$ zijn ongecorreleerd.

Elke nieuwe variabele, hoofdcomponent $p_i$ , is een *lineaire combinatie* van de oude variabelen $x_k$ (k=1, .., N):

$$p_i = b_{i1}(x_1 - \mu_1) + b_{i2}(x_2 - \mu_2) + \ldots + b_{iN}(x_N - \mu_N) \qquad \text{(S10.1)}$$

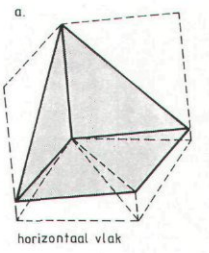
Voor i=1, ..., N.

De *component-coëfficiënten* $b_{i1}$ t/m $b_{iN}$ zijn de gewichten ('loadings') van de oorspronkelijke variabelen op de betreffende hoofdcomponent $p_i$. Deze transformatie wordt op de waarnemingsvector van *elk pixel* toegepast, zodat de hoofdcomponenten-transformatie een *pixelsgewijze gewogen sommatie* geeft van de oorspronkelijke N stralingswaarden, volgens het in de aanhef gegeven principe. De gewichten zijn positief of negatief van teken, al naar gelang hun plaats in de betreffende hoofdcomponentberekening.

Worden de varianties van de nieuwe kenmerken $p_i$ (i=1, .., N) gerangschikt in volgorde van grootte, dan blijken deze een zeer snel aflopende rij te vertonen als de oorspronkelijke kenmerken $x_k$ (k=1, .., N) sterk gecorreleerd zouden zijn. Hierin ligt de mogelijkheid van datareductie besloten. Door alleen nog maar de eerste twee à vier hoofdcomponenten in de verdere beeldverwerking te betrekken, kan men bezuinigen op het oorspronkelijke aanbod van waarnemingsgetallen, terwijl toch de informatie-inhoud volgens de ervaring voor 97-99% behouden blijft ten behoeve van de beeldinterpretatie.

## Literatuur

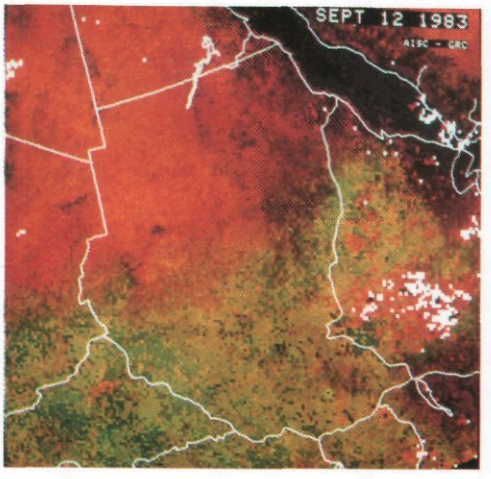
1 Buiten, H.J., 1986. Teledetectie deel 2 (Remote Sensing, informatieverwerking), paragraaf 13.5.4.1, collegedictaat CM 06.19.1510, vakgroep Landmeetkunde, Landbouwuniversiteit Wageningen, 182 blz.
2 Richards, J.A., 1986. Remote sensing digital image analysis. An introduction. Chapter 6. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 281 blz.



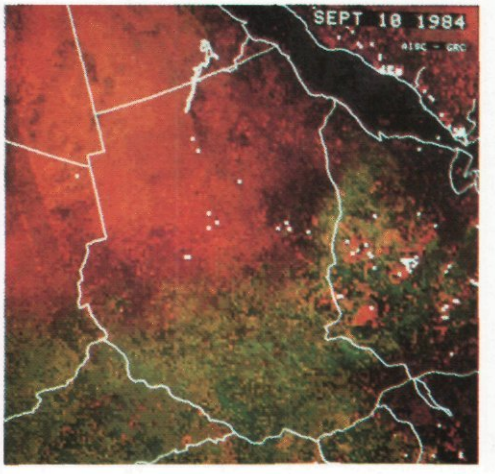

## Plaat I *(zie paragraaf 11.3.1)*

Hoekreflector ten behoeve van radar-experimenten.
De schuine stand van de hoekreflector houdt verband met de richting van waaruit de radarbundel kan worden verwacht tijdens de radaropname.
De hoekreflector wordt samengesteld uit drie metalen platen (waarvan er enkele driehoekig kunnen zijn). De platen zijn te beschouwen als gedeelten van de drie platte vlakken die de hoek van een kubus kunnen vormen (zie tekening *a)*.
De platen dienen aan gespecificeerde eisen van vlakheid te voldoen, ondermeer in afhankelijkheid van de golflengte van de te gebruiken radarband(en). Ook dienen de platen zorgvuldig loodrecht op elkaar gesteld te worden. In dat geval is de richting van de gereflecteerde golf evenwijdig aan de richting van de invallende golf (zie schematische tekening *b)*, zodat de stand van de hoekreflector ten opzichte van de te verwachten richting van de radarbundel niet zo kritisch komt.
De afmetingen van de hoekreflector zijn behalve van de achtergrondreflectie, ook afhankelijk van de te gebruiken radarfrequentie. Om hiervan een indruk te geven kan gezegd worden dat de lengte van een rechthoekzijde van een metalen plaat in het geval van X-band radar ongeveer 0,65 meter kan bedragen, in het geval van L-band radar ongeveer 2,0 meter.

a.

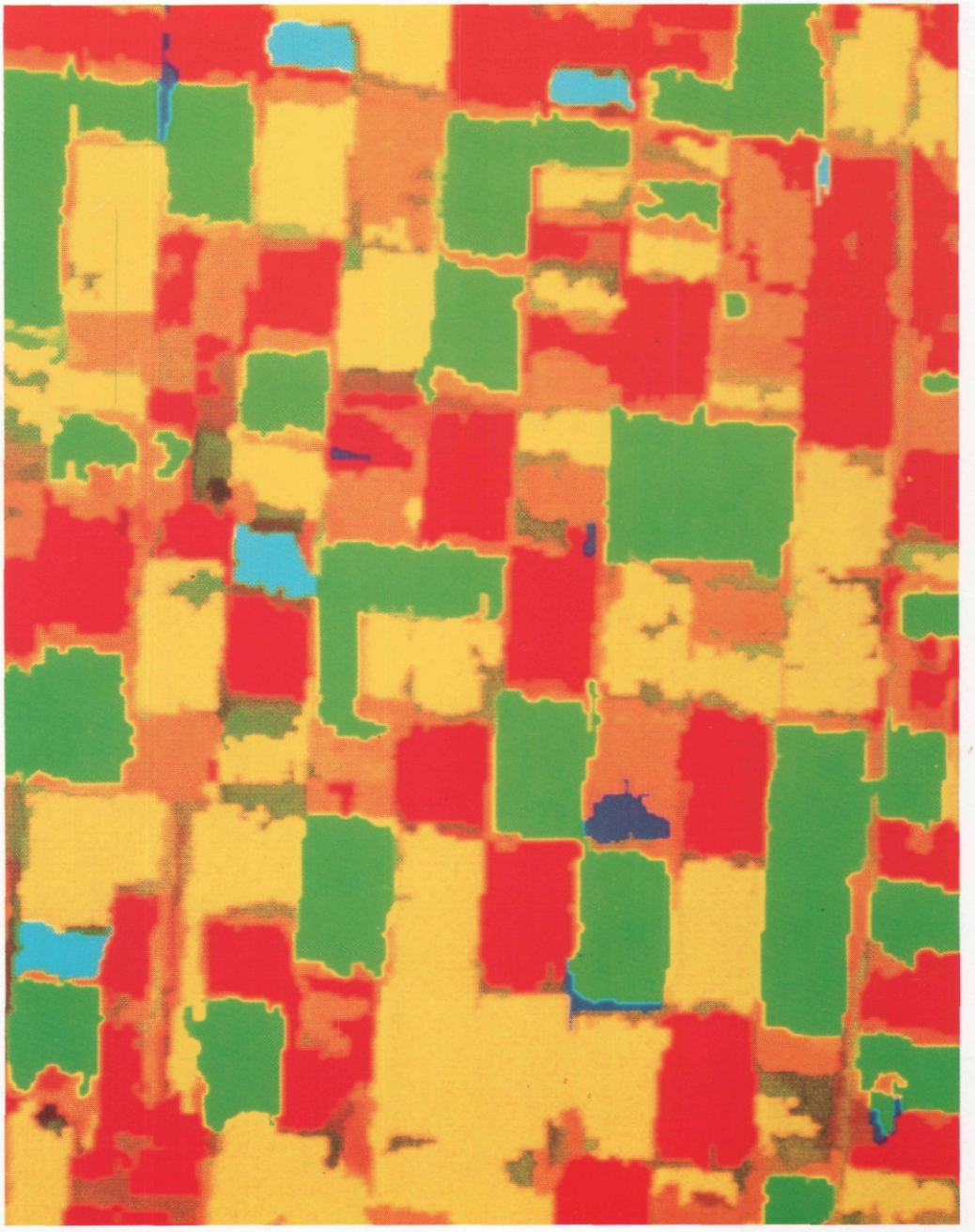



b.



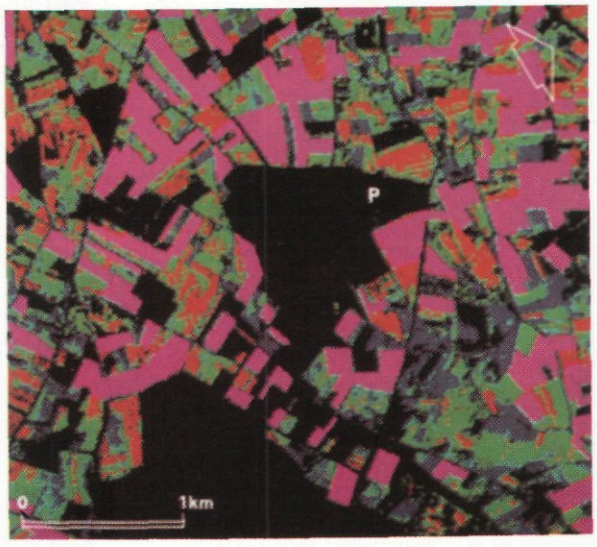

## Plaat II *(zie paragrafen 18.3 en 18.5)*

II (a): Kleurencomposiet van de banden 1 en 2 van de NOAA-AVHRR voor Soedan op 12 september 1983.
II (b): Kleurencomposiet van de banden 1 en 2 van de NOAA-AVHRR voor Soedan op 10 september 1984.



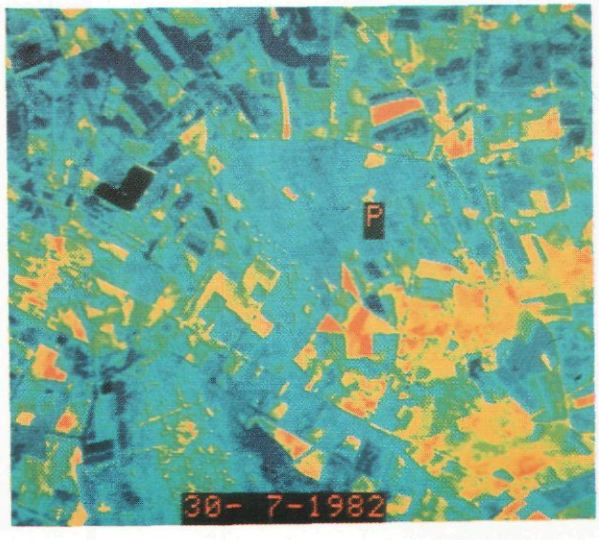
**Plaat III** *(zie paragraaf 19.4.2)*

Classificatie van landbouwgewassen met behulp van de digitale X-band SLAR (9,4 GHz, HH polarisatie), Oost-Flevoland, juli 1984. Classificatieresultaat: gemiddeld 90% goed.
Geel: tarwe; Rood: aardappelen; Groen: bieten; Lichtblauw: bonen; Donkerblauw: blauwmaanzaad; Lichtbruin: uien.
Opname: NLR. Verwerking: CABO, FEL-TNO, TU-Delft.



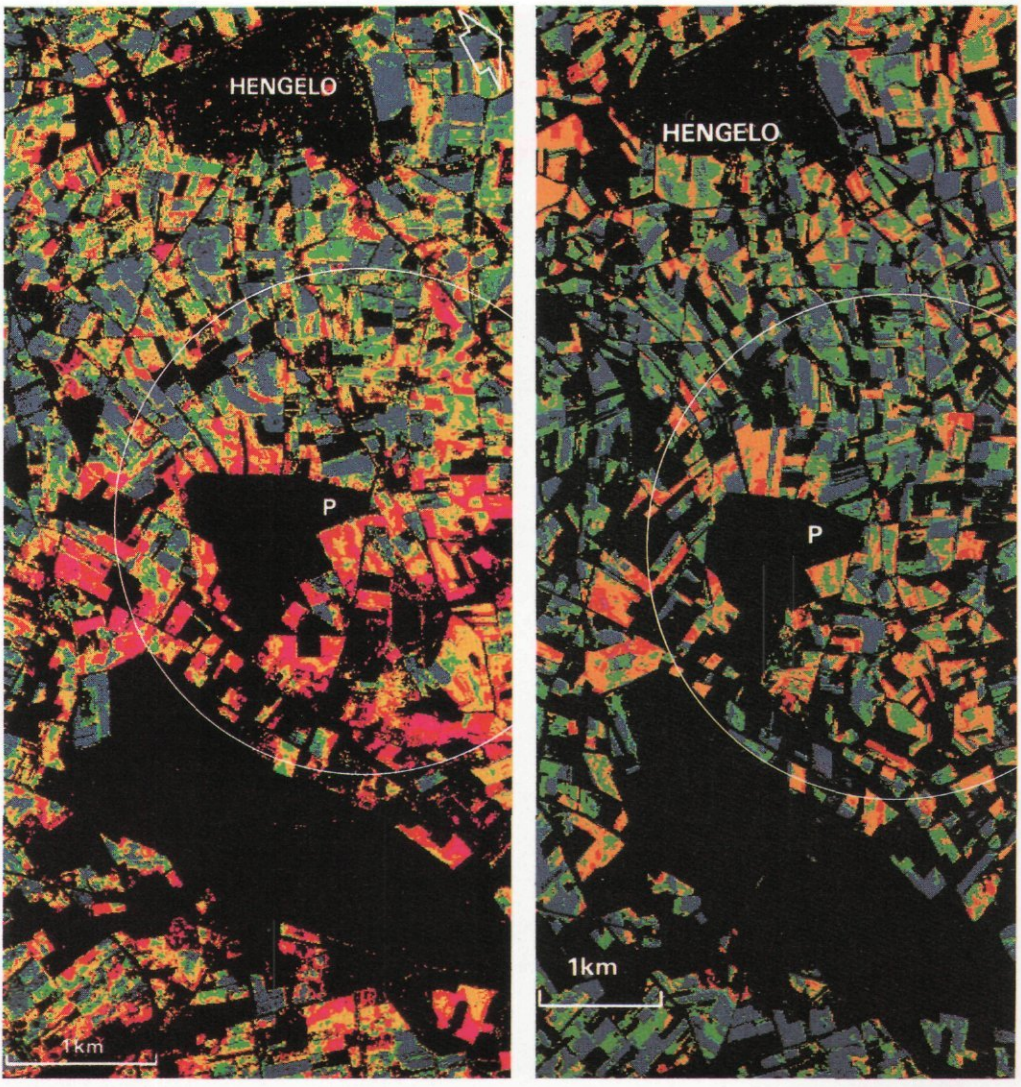

## Plaat IV *(zie paragraaf 20.3)*

Resultaat van een computerclassificatie voor het onderzoeksgebied 't Klooster. De klasse mais (paars) is interactief gecorrigeerd. Blauw, groen en rood betreft grasland in hoogte toenemend van laag, middelhoog naar hoog. Zwart is niet geclassificeerd.
P = pompstation.



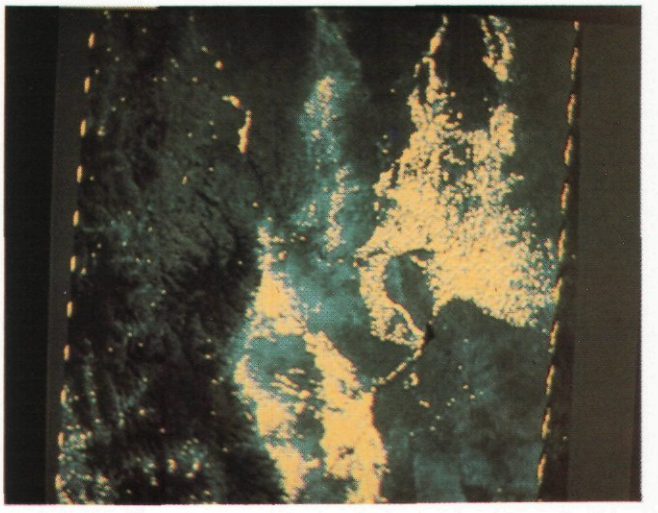

## Plaat V *(zie paragraaf 20.3)*

Gedeelte van het warmtebeeld (TIRS) van het onderzoeksgebied 't Klooster, opgenomen op 30 juli 1982. De waargenomen temperaturen nemen toe in de reeks van donkerblauw, lichtblauw, groen, geel, oranje, rood van 28 °C naar 40 °C.
P = pompstation.



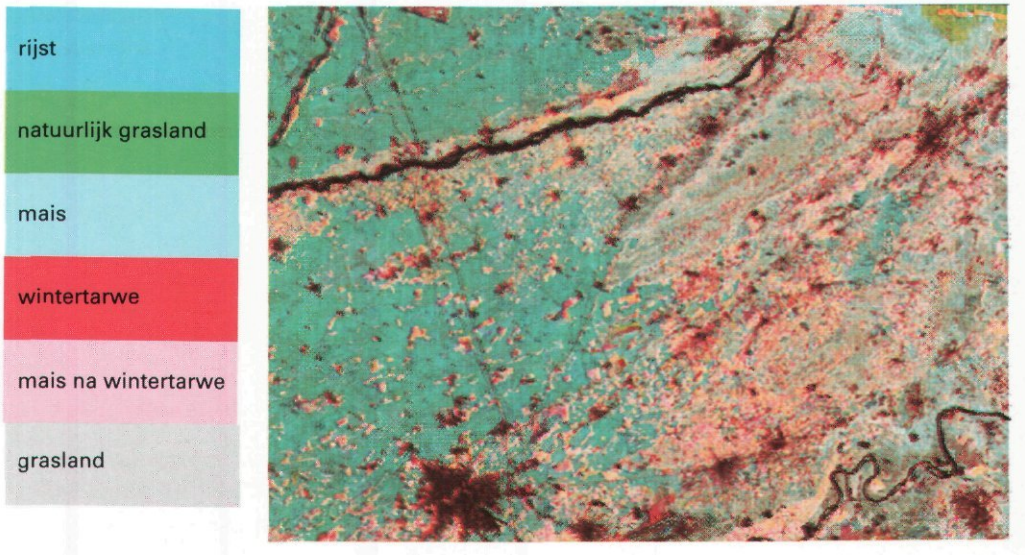

**Plaat VI** *(zie paragraaf 20.3)*

Verdampingskaarten van het gebied in de omgeving van het pompstation 't Klooster voor 30 juli 1982 (links) en 17 juli 1983 (rechts) die zijn afgeleid uit de op de desbetreffende dagen opgenomen reflectie- en warmtebeelden. De relatieve dagverdamping neemt van blauw (> 90%), groen (70-90%), geel (50-70%), rood (30-50%) naar magenta (< 30%) af. Zwart betekent niet geclassificeerd. De 10 cm verlagingslijn door de onttrekking van grondwater door het pompstation (P) is aangegeven.



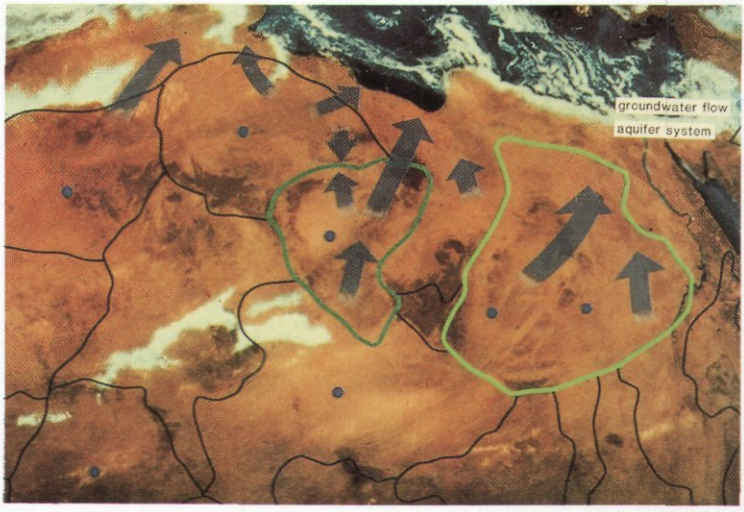
**Plaat VII**
*(zie paragraaf 21.3.1)*

Geïrrigeerd areaal in het noordelijk deel van de provincie Mendoza. Ge-el = geïrrigeerd land. Bewerking van Landsat MSS-beeld (full scene), 27 februari 1985.



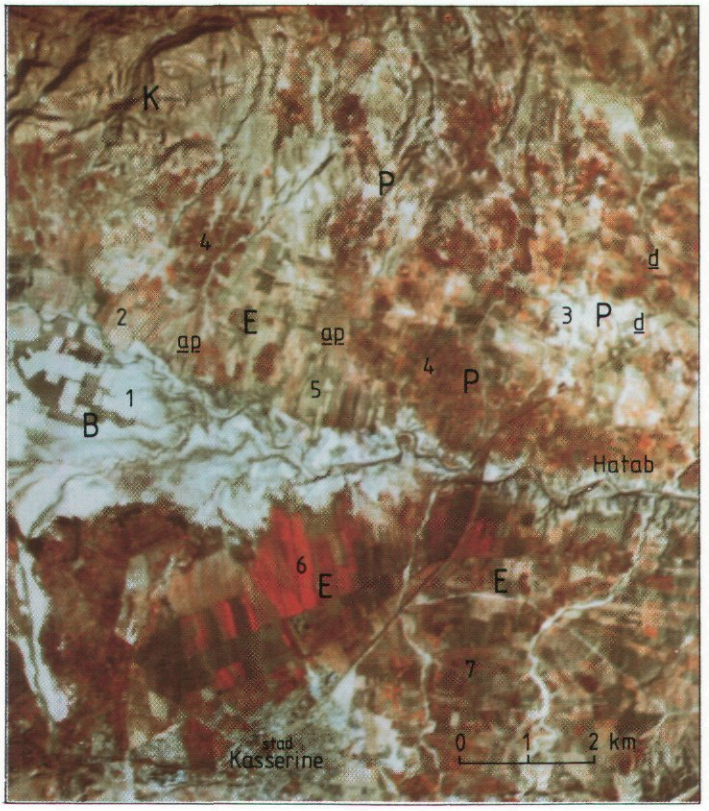

**Plaat VIII** *(zie paragraaf 21.3.1)*

Multitemporeel VI-beeld, verkregen door het combineren van een drietal Landsat-beelden, opgenomen in april, mei en juli. De legenda is vooraf vastgelegd op basis van fenologische gegevens en reflectiemetingen uit literatuur.




**Plaat IX** *(zie paragraaf 21.3.2)*

Globaal overzicht van grondwaterreservoirs in de woestijngebieden van het noorden van Afrika. De uit geo-hydrologische studies bekende watervoerende systemen (Eng. aquifer systems) zijn als omkringde gebieden en voorzien van een stip aangeduid, ondermeer in Libyë (donkergroen omkringd) en in Egypte (lichtgroen omkringd). Richting en omvang van de grondwaterstromingen in de woestijngebieden zijn met pijlen aangegeven.




## Plaat X *(zie paragraaf 22.4)*

Landsat-Thematic Mapper beeld van januari 1983 van het Kasserine gebied.
De TM-spectraalbanden 2, 3 en 4 (groen 0,52-0,60 μm, rood 0,63-0,69 μm en nabij-infrarood 0,76-0,90 μm) zijn afgebeeld als kleurencomposiet in respectievelijk de kleuren blauw, groen en rood (beeldbewerking, uitgevoerd door het ITC te Enschede).
De stad Kasserine bevindt zich onderin het beeld. De rivier zichtbaar in het centrum van het beeld is de Hatab.

Toelichting:
De sterke variatie in het afgebeelde terrein is frappant. Deze variatie betreft zowel het landschappelijk beeld herkenbaar aan het drainagepatroon, als de vegetatie en het landgebruik herkenbaar aan de schakering in kleurtinten. Hieronder volgt een beschrijving van de landschapseenheden (in hoofdletters), de kleurtinten (in cijfers), en aanduidingen voor landevaluatie (in kleine letters en onderstreept), zoals deze in Plaat X zijn aangegeven.

*Landschapseenheden*
K = Laaggebergte met kalksteen (dipslope configuratie, dat wil zeggen met het gesteente meelopende terreinhellingen) en ondiepe bodems.
P = Golvend tot het heuvelachtig plateauland.
Pleistocene glacis met conglomeraat en leem series, en bodems met door kalk verharde lagen; de hoogste niveau's liggen aan de rand van het bekken. Op de hellingen en in de dalen wordt voornamelijk colluvium aangetroffen van genoemde series, en van de daaronder liggende Miocene sedimenten (zand en klei).
In het colluvium is een zwakke bodemontwikkeling met minder dan 5% kalkaccumulatie.
E = Zwak golvend land met een mengsel van aeolische, fluviatiele en colluviale afzettingen; vrijwel geen bodemprofielontwikkeling tot locaal gipsaccumulatie.
B = Vlakte met klei-afzettingen en locaal sterke verzouting.

*Kleurtinten versus terreineigenschappen*

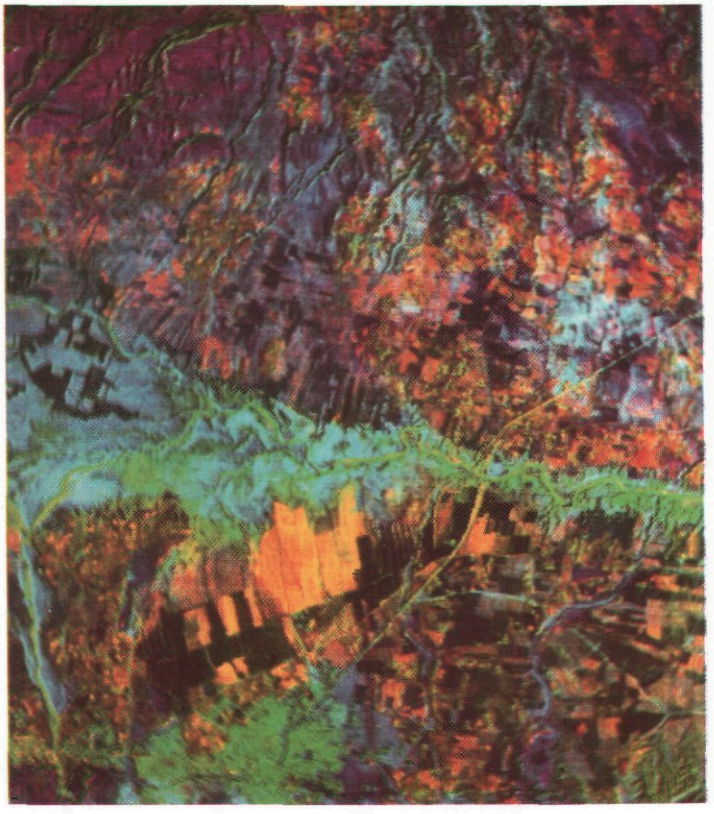
1 = wit door geringe vegetatiebedekking, braak liggend terrein en locaal zoutaccumulatie aan het bodemoppervlak
2 = licht rood door geringe graanbedekking
3 = wit door verharde kalklagen aan het bodemoppervlak
4 = bruinachtig rood: dorpen met door opuntia omringde akkertjes
5 = grijsachtig groen: akkers met matige bodembedekking door graan, onkruid en bladstrooisel
6 = rood: geïrrigeerde graan- en fruitbomencultuur
7 = bruinachtig rood en groen: olijfboomgaarden met wisselende onkruidbedekking

*Aanduidingen met betrekking tot landevaluatie*

Naar voren komend zijn:

- de droge dalen en rivierbeddingen; de geringe watervoering van de rivier de Hatab;
- badlands, het gebied met sterke geulvorming langs de Hatab
- de uitbundige plantengroei, daar waar irrigatie mogelijk is gemaakt
- de moeilijk te cultiveren gebieden, zoals het B-landschap met verzouting en de plateau's met kalkaccumulatiehorizonten aan het oppervlak in het P-landschap.

Reeds na een kort veldbezoek is met de beelden een idee te verkrijgen over de benutting van het land. Bij nadere bestudering valt ook op, dat gebieden met meer vocht, zoals alluviale puinwaaiers *(ap)* in het E-landschap en depressies *(d)* in het P-landschap een detecteerbare en naar omstandigheden redelijke graanbedekking hebben.
De regenafhankelijke landbouw is in dit gebied marginaal aangezien de gemiddelde jaarlijkse neerslag 200-250 mm bedraagt. Het is daarom van het grootste belang om de plaatsen aan te geven waar oppervlakkig afstromend water zich concentreert en in de bodem penetreert.
Hiervoor is echter stereoscopische analyse van luchtfoto's ter aanduiding van de configuratie van het terrein in morfografische eenheden en een verdere onderverdeling in toppen, plateau's, hellingen en dalbodems noodzakelijk.
De vaak smalle en langgerekte plateau's, en lange plateauhellingen, zijn niet als zodanig aan te duiden op het Landsat-TM-beeld, zodat de aanduiding *d* niet direct overtuigend zal zijn. Ze is dan ook naar voren gekomen na combinatie van Landsat-TM met de resultaten van luchtfoto-interpretatie.
Waar sterke reliëfverschillen aanwezig zijn kunnen ook stereobeelden, welke verkregen zijn met de Franse SPOT-satelliet, voor reliëfanalyse gebruikt worden (zie hoofdstuk 7 en Supplement 3).
Is eenmaal een fysiografische analyse voorhanden, dan zijn voor de in landevaluatie geïnteresseerde gebruiker de betrekkelijk lage kosten verbonden aan het toepassen van multitemporele satelliet-gegevens voor het vastleggen van gewasgroei-toestanden in verschillende landeenheden en bij verschillende klimatologische omstandigheden, zeer aantrekkelijk.



## Plaat XI *(zie paragraaf 22.4)*

Landsat-Thematic Mapper beeld van januari 1983 van het Kasserine gebied na hoofdcomponenten-transformatie; PC-kenmerken 1-2-3 kleurencomposiet (beeldbewerking, uitgevoerd door het ITC te Enschede).

Toelichting:
Plaat XI is een kleurencomposiet van de hoofdcomponenten PC 1, 2 en 3. Deze synthetische kenmerken dekken tezamen het leeuwedeel van de variatie in zes TM-banden (de TIR-band niet meebeschouwd). Kale bodemoppervlakken worden nu in blauw weergegeven. Verschillen treden op tussen kale grond in de B- met die in de P-landschappen, doch ook binnen het B-landschap zelf waar zand en mergel lichtblauw zijn tegenover het blauw van de kleiige oppervlakken. Geploegde bovengrond, welke grijs is afgebeeld op de Landsat-TM 2, 3, 4 kleurencomposiet (Plaat X), is op het PC-beeld van Plaat XI zeer donker in contrast met de onmiddellijke omgeving aangegeven. Groene vegetatie is geel afgebeeld; voorts komen de badlands duidelijk naar voren in groene tinten.
Het moge duidelijk zijn, dat beide beeldtypen (TM-banden combinatie en PC-combinatie) voordelen bieden, de laatstgenoemde in dit geval vooral voor onderscheid in kale bodemoppervlakken. De TM 2-3-4 bandencombinatie is daarentegen zeer geschikt voor onderscheid tussen de mate van vegetatiebedekking en vegetatietype.

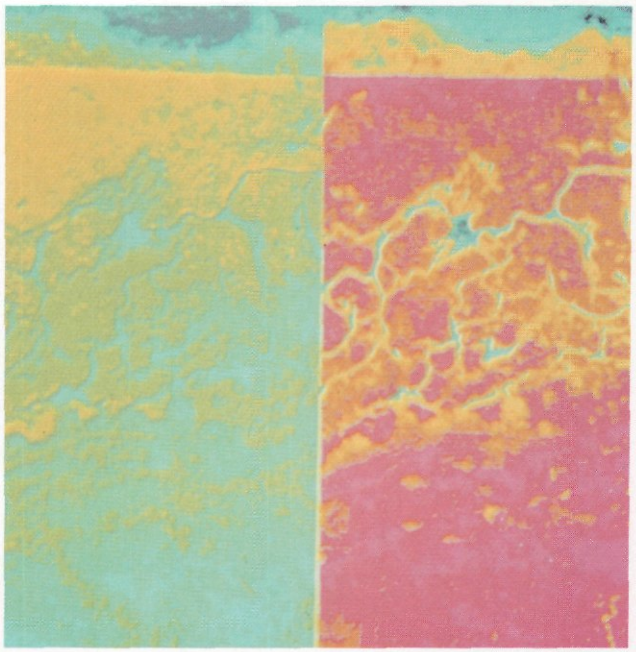
Voor meer gegevens over de interpretatie en bewerking van Landsat-TM-beelden van dit gebied wordt verwezen naar Epema (1986), Menenti et al. (1986) en Mulders & Epema (1986).
Voor hoofdcomponenten (PC) transformatie, zie Supplement 10.

## Plaat XII *(zie paragraaf 24.6)*

Schiermonnikoog, Oude Beweide Kwelder. Aan de bovenzijde van het beeld is de grens tussen kwelder en Waddenzee te zien. Dubbelbeeld van een vegetatie-index (VI) op 19.4.85 (links) en 17.5.85 (rechts), berekend uit gedigitaliseerde kleuren-infrarood-opnamen. De originele beelden zijn radiometrisch gecalibreerd. Als vegetatie-index is de arctangens van het quotiënt IR/R gebruikt (0-90 graden). Van een goed ontwikkelde vegetatie is sprake als VI > 45 (oranje-magenta trajekt). Merk op:

- de scherpe grens tussen het door vee begraasde deel van de kwelder en de door een afrastering daarvan gescheiden onbegraasde strook nabij de Waddenzee (lagere VI voor het onbegraasde deel op beide tijdstippen);
- op 19.4 hogere VI voor kweldergras-vegetaties op lage kwelder t.o.v. zwenkgras-vegetaties op hoge(re) kwelder (geel resp. groen-cyaan)
- op 17.5 is de VI van beide typen vrijwel gelijk geworden

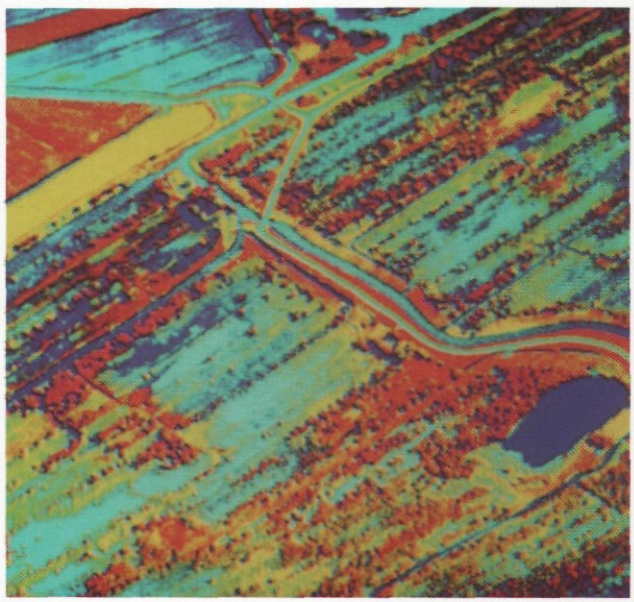
(Uit: Bijlsma 1988)



Kleurenbalk (cyaan → magenta)

## Plaat XIII *(zie paragraaf 24.6)*

NW-Overijssel, Weerribben. NIWARS-vlucht 28.5.75. Het beeld is opgebouwd uit de Daedalus-1250 kanalen 9 (nabij infrarood) en 7 (rood) en het negatief van kanaal 9 (pixelwaarde = 255 – pixelwaarde). Deze beelden zijn afzonderlijk gecorrigeerd voor de gradiënt loodrecht op de vliegrichting en vervolgens histogram-geëgaliseerd. De kleurtoekenning is: kanaal 9 in rood, kanaal 7 in groen, negatief kanaal 9 in blauw. Deze kleurtoekenning is zo uitgebalanceerd dat kleurdifferentiatie in het eindbeeld kan worden geïnterpreteerd in termen van grondbedekkingstypen tussen open water en natte slaapmos-vegetatie (donkerblauw), schrale droge vegetatie, dorre vegetatie en wegdekken (cyaan-wit), en dichte groene vegetatie (rood).
Merk op: In de afzonderlijke trilveenpercelen is van het open water naar de meer geïsoleerde terreindelen een gradiënt waarneembaar van jong riet (rood) via slaapmosvegetatie (blauw) naar veenmos-vegetatie (geelgroen). Ongemaaid riet, pijpestrootje en galigaanvegetatie is cyaan gekleurd. Grasbermen (langs de weg) zijn eveneens rood.

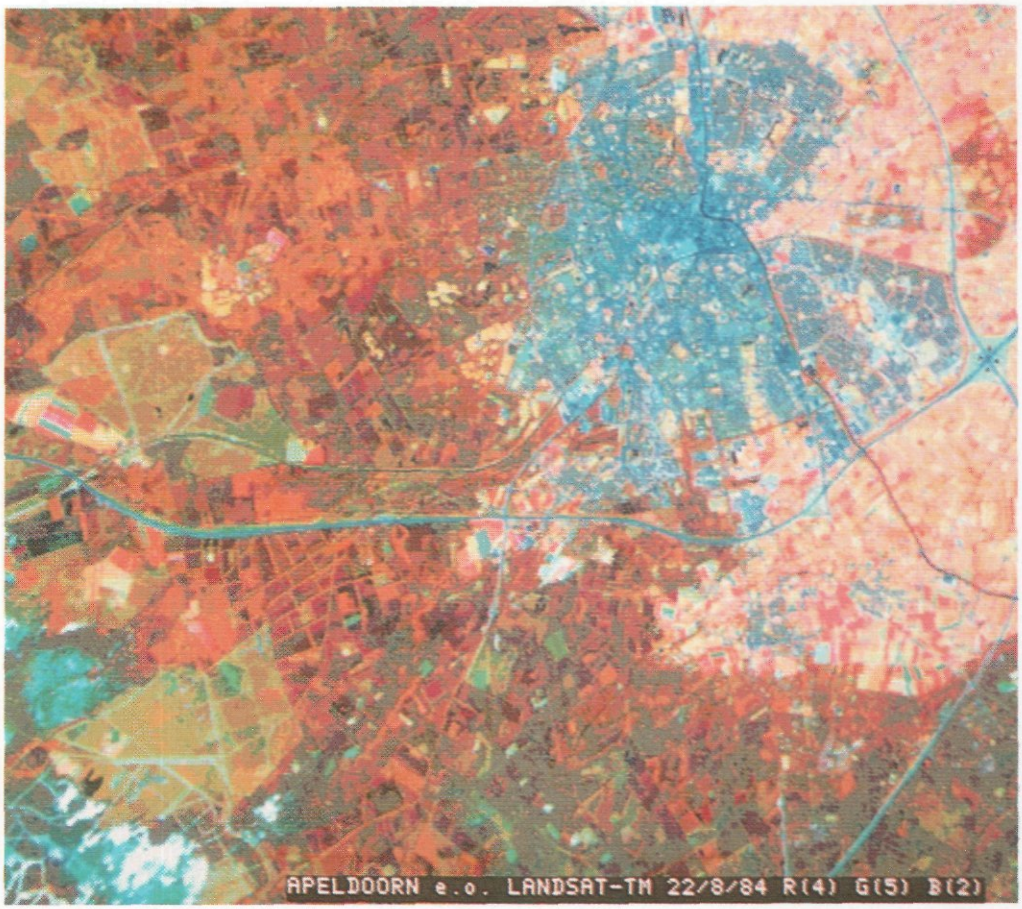


## Plaat XIV *(zie paragraaf 26.2)*

Luchtfoto (TC, normale kleurenfilm, Hasselblad 70 mm-filmformaat) van bosopstanden (in de Zuid Ginkel nabij Ede) van verschillende gedaante en met verschillende boomsoorten. De opname vond in het najaar (2 november) plaats. Afgezien van een graslandperceel, zijn diverse naaldhoutpercelen (larix, douglas, grove den) te zien, zowel pas aangeplant als volgroeid. Bovenin de foto vertoont zich de verkleurende larix; in aangrenzende opstanden treedt naaldhout (grove den) en loofhout (eik en beuk) gemengd op. De bomen zijn afzonderlijk zichtbaar, in 't bijzonder bij stereoscopische beschouwing van fotoparen.

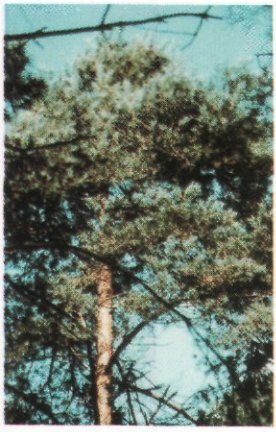
## Plaat XV *(zie paragraaf 26.2)*

Luchtfoto, (TC, normale kleurenfilm, Hasselblad 70 mm-filmformaat) van een bosterrein in de Zuid Ginkel, bij hellende camerastand opgenomen op lage vlieghoogte, in het najaar (2 november). Individuele bomen (grove den) zijn in detail te onderkennen.

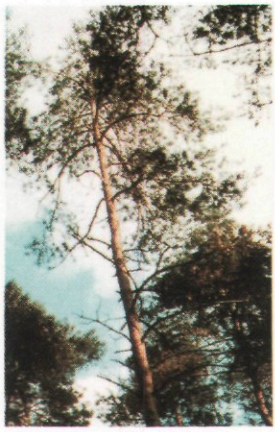



**Plaat XVI** *(zie paragraaf 26.5)*

Voorbeeld van een kleurencomposiet van de spectraalbanden 4, 5 en 2 van Landsat-5 Thematic Mapper (zie paragraaf 7.5.3), weergegeven in de kleuren rood, groen en blauw. Het beeld, opgenomen op 22 augustus 1984, betreft de bos- en heidegebieden ten westen van Apeldoorn. Bij de beeldpresentatie is het accent gelegd op bos en heide door toepassing van een herschaling van het beeld (zie paragraaf 14.4) op de pixelwaarden van deze categorieën. Een grote kleurvariatie is daarin het resultaat. Het gevolg is wel dat de stad en het akker- en weidegebied ten oosten van Apeldoorn nauwelijks meetellen in de interpretatie van deze beeldweergave.
Het loofhout presenteert zich in het algemeen in lichtere tinten bruin, het naaldhout in donkere tinten bruin en roodbruin. Zonder hier op interpretatie-details in te gaan blijkt dat met classificatie-technieken (zie hoofdstuk 13) en gebruik van de (zes of minder) reflectieve spectraalbanden van Landsat-TM, van zowel loofhout als van naaldhout minstens 2 à 3 boomsoorten per categorie zijn te onderscheiden.
Van links naar rechts in het beeld vertonen de vloeiende lijnen van de snelweg (A1) en de spoorlijn Amersfoort-Apeldoorn zich duidelijk. Ten zuiden van de snelweg hebben een aantal bospercelen scherpe belijningen ten gevolge van de brede loofhoutsingels langs de boswegen.
In de afbeelding zijn drie heidegebieden te zien, namelijk het Hoog Soerense Veld (boven), de Asselsche Heide (midden; grenzend aan de spoorlijn) en de Hoog Buurlosche Heide (onder). In deze heidegebieden zijn verschillende frappante vegetatiepatronen te zien, waarvan de verklaring hier echter achterwege wordt gelaten. Het dorp Hoog Soeren (ten noorden van de Asselsche Heide), omgeven door akkers, grasland en een golfterrein, ligt centraal in het loofhoutgebied. Het loofhout-complex ten noorden van de Hoog Buurlosche Heide is eveneens markant. Door vergelijking met de geometrie van de topografische kaart zijn tal van landkenmerken in het TM-beeld herkenbaar, met een rijke schakering aan thematisch detail. Ten zuidwesten van de Asselsche Heide ligt een gebied van akkerbouwgewassen (rose tot rode tinten), kale akkergrond (lichtblauwe tint) en graslanden (geel tot groene tint).

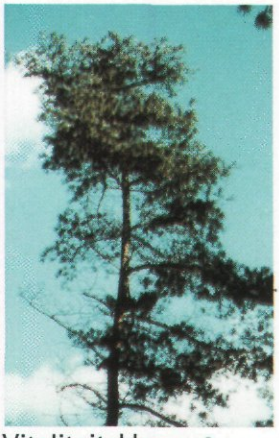


Vitaliteitsklasse 1



Vitaliteitsklasse 4

Vitaliteitsklasse 7



Vitaliteitsklasse 2

Vitaliteitsklasse 5

Vitaliteitsklasse 8

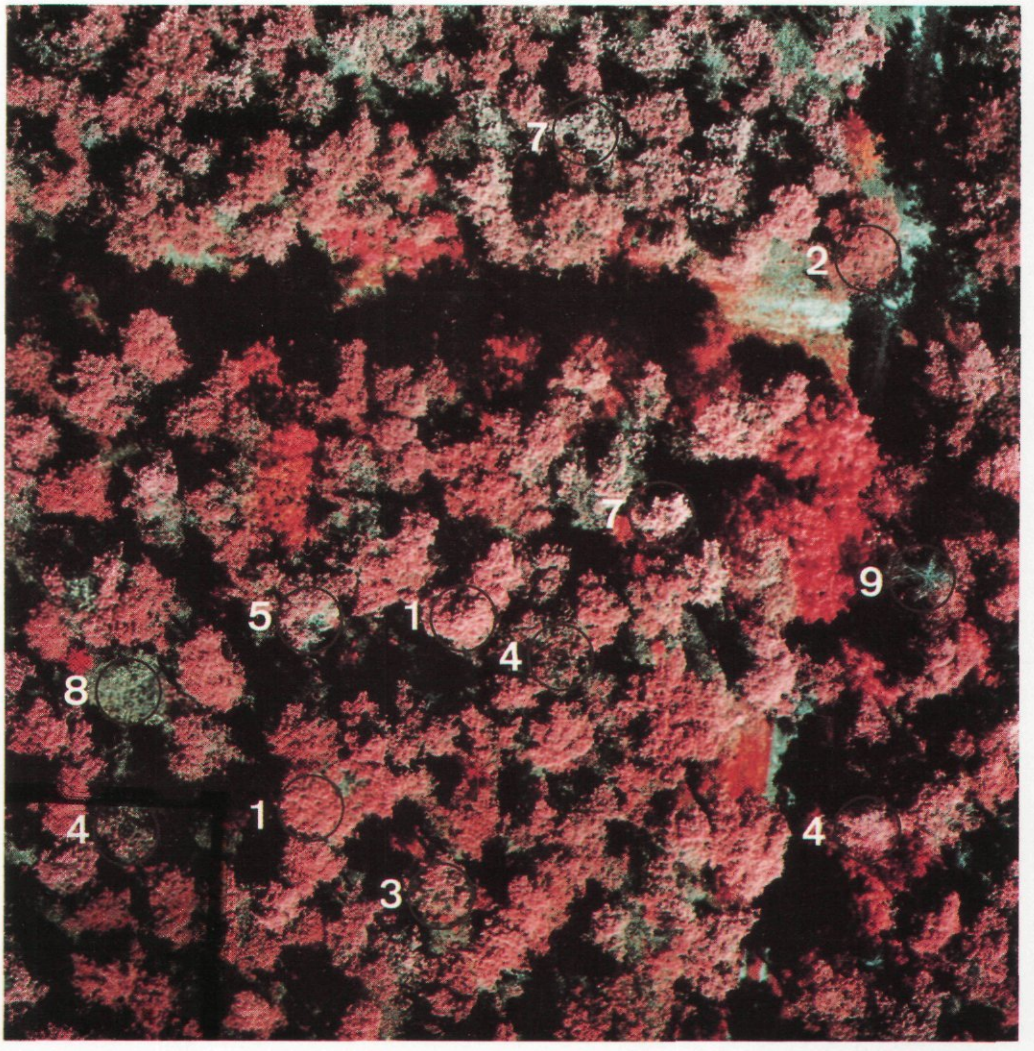
Vitaliteitsklasse 3

Vitaliteitsklasse 6

Vitaliteitsklasse 9

**Plaat XVII** *(zie paragraaf 28.3)*

Veldopnamen van grove den in verschillende vitaliteitsklassen. Deze klassen komen overeen met de indeling volgens de interpretatiesleutel.

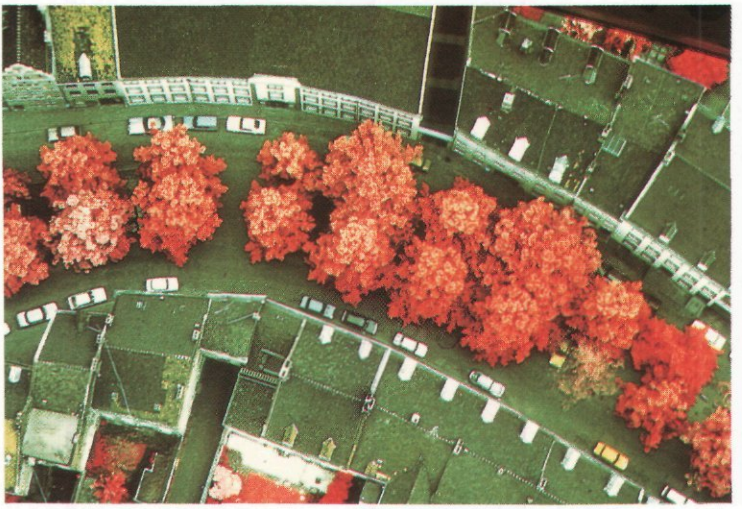



**Plaat XVIII** *(zie paragraaf 28.3)*

Kleureninfrarood-opname van een grove dennen-opstand in Boswachterij 'de Pan', ten zuiden van Eindhoven (N.Br.). De originele opnameschaal 1:2000 is vergroot weergegeven.

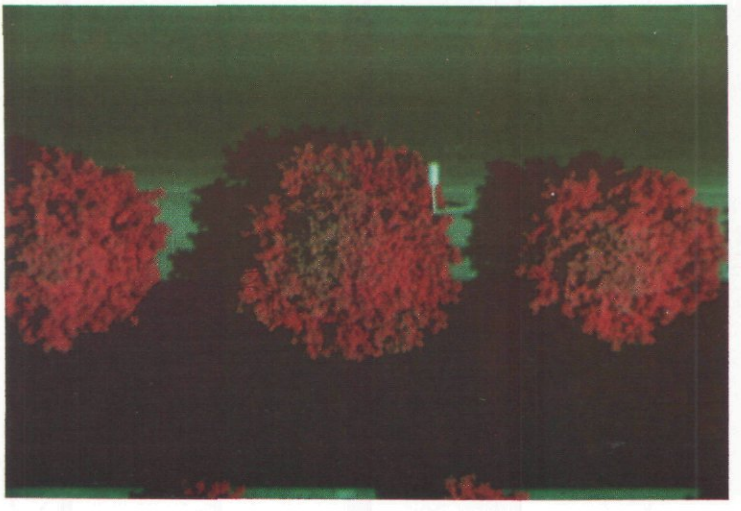
Opnamedatum 20 augustus 1984.

De nummers verwijzen naar de vitaliteitsklassen in de interpretatiesleutel (zie plaat XVII, pagina 475). De nummers zijn steeds links van het omkringde fotogedeelte geplaatst.



**Plaat XIX** *(zie paragraaf 29.2)*

Detailvergroting van een kleureninfrarood (false colour) luchtfoto (9 juli opname) van een dubbele rij linden in een binnenstad. Daken van huizen verschijnen hier overwegend in groen. Een algeheel rode kleur van een boom in deze afbeelding wijst op een gezonde toestand. Vitaliteitsverschillen door standplaatsfactoren en schade zijn herkenbaar door een verkleuring naar een lichtere tint rood, hetgeen wijst op een zichtbare vergeling van de normale groene bladkleur. Rechtsonder in het beeld laat een gedeeltelijk ontbladerde linde een geparkeerde auto zien.



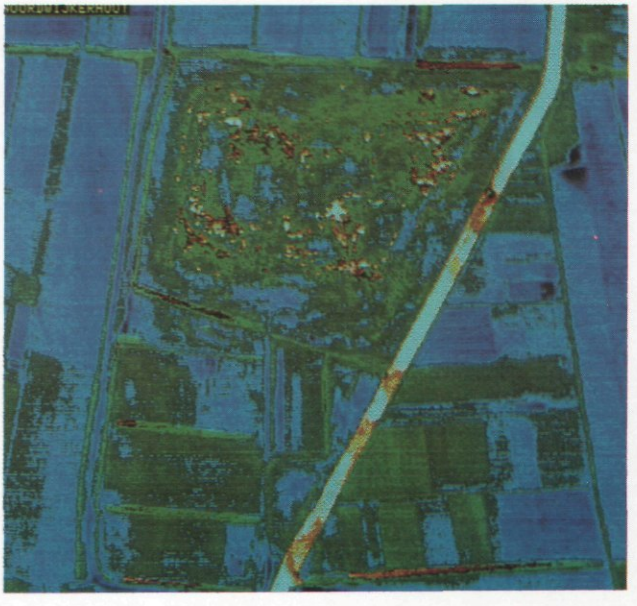
**Plaat XX** *(zie paragraaf 29.2)*

Detailvergroting van een kleureninfrarood (false colour) luchtfoto (3 augustus opname) van een rij kastanjebomen langs een stadsgracht. Opmerkelijk is de bladverkleuring die zich manifesteert in het bovenste deel van de kroon, herkenbaar aan de bruingrijze vlek in het centrum. Hier treedt ook groeivertraging op en is de kroon in het centrum kegelvormig geworden in plaats van bolvormig. Dit is op de afbeelding herkenbaar aan het schaduwpatroon in het linker gedeelte van de kruin.

## Plaat XXI *(zie paragraaf 30.3)*

Typerend voorbeeld van verschillende fasen van een slootdemping in het midden van de kleureninfrarood (false colour) luchtfoto. Bovenaan is de sloot geheel bedekt met kroos (roze kleur). Dan volgt het gedeelte van de actieve slootdemping, die herkenbaar is aan een grove textuur; ook aan de vorm, hoogte en breedte is te zien dat de sloot nog niet volledig is volgestort in dit gedeelte. Verder naar beneden volgt een zone waarin de slootdemping is afgewerkt en met een laag aarde is afgedekt (lichtblauwe en donkerblauwe kleur). In het onderste gedeelte is de afgewerkte slootdemping weer begroeid.
Stortplaatsen in de vorm van slootdempingen en erfophogingen, kunnen effectief opgespoord worden met kleureninfrarood-luchtfotografie omdat ze in de regel een afwijkende kleur en structuur veroorzaken op de foto. In matig tot slecht toegankelijke gebieden is deze wijze van opsporen eigenlijk dè aangewezen weg. Bovendien wordt het gefotografeerde gebied geheel vastgelegd zodat bij vergelijking met luchtfoto's van een eerdere of latere datum veranderingen opgespoord kunnen worden.
De aard van het gestorte materiaal zal door middel van veldonderzoek vastgesteld moeten worden.
De afbeelding werd ter beschikking gesteld door de Provincie Zuid-Holland.

## Plaat XXII *(zie paragraaf 30.3)*



Afbeelding in kleur van een digitale thermische opname (warmtebeeld) van een grote, legale vuilstortplaats. De opname vond 's nachts plaats.
Het temperatuurbereik van −4,7 °C tot en met +0,5 °C is ingedeeld in 16 kleurtrappen. Temperaturen lager dan −4,7 °C worden in zwart, hoger dan +0,5 °C in 'wit' (op de afbeelding zwak lichtblauw getint) weergegeven. Daartussen variëren de kleuren van blauw via groen, rood en oranje tot geel. In dit nachtbeeld is duidelijk de relatief hoge temperatuur van het kanaal ten opzichte van de omgeving waarneembaar. De plaats waar percolatiewater uittreedt in het kanaal is op het warmtebeeld duidelijk zichtbaar. (De stroomrichting van het water is van boven naar beneden in het beeld georiënteerd.)
Alle geel tot 'witte' plekken op de stortplaats stemmen overeen met broeiplaatsen. Terreincontrole bevestigde dit.
De afbeelding werd ter beschikking gesteld door de Provincie Zuid-Holland.

# De auteurs

**Drs. P.Binnenkade** was van 1978-1987 verbonden aan het Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium te Amsterdam. Hij is fysicus en studeerde in Hamburg, München en Leiden. Binnen de afdeling Remote Sensing van de Hoofdafdeling Ruimtevaart was hij met name betrokken bij de ontwikkeling en toepassing van airborne remote sensing technieken alsmede digitale beeldverwerking.
Thans is hij Hoofd Technische en Wetenschappelijke Toepassingen (informatie systemen) bij Akzo Chemicals te Amersfoort.

**Ir. Th.A.de Boer** is gepensioneerd adjunct-directeur van het Centrum voor Agro Biologisch Onderzoek (CABO), tevens hoofd van de Afdeling Vegetatiekunde. Hij had zitting in de Begeleidings Commissie Remote Sensing namens het Ministerie van Landbouw en Visserij en was voorzitter van diverse werkgroepen op dit gebied. Hij nam deel aan verschillende projecten in Afrika op het gebied van ecologisch onderzoek in semi-aride gebieden van savannes. Ook ontwikkelde hij een karteringsmethodiek voor korte vegetaties waarbij vaststelling van de gebruikswaarden een belangrijk element is. Momenteel verricht hij nog advieswerk op ecologisch en Remote Sensing gebied.

**Ir. H.J.Buiten** is sedert 1967 als universitair hoofddocent verbonden aan de vakgroep Landmeetkunde en Teledetectie van de LU te Wageningen. Hij studeerde in '55 als geodetisch ingenieur af aan de TU te Delft met de mathematisch-statistische geodesie als specialisatie. Begin jaren '70 oriënteerde hij zich op de remote sensing en is sedertdien nauw betrokken bij de introductie en de ontwikkeling van dit kennisgebied aan de LU.
In '82, '87 en '88 was hij cursusleider van de postacademische cursus 'Remote Sensing in landbouw, natuur- en milieubeheer'. Sedert 1979 is hij voorzitter van het overlegorgaan Onderwijs en Onderzoek Teledetectie (OOT) van de universiteit. In de vakgroep zette hij zich in voor de opbouw van het vak teledetectie als grondslag voor het gebruik

ervan in verscheidene toepassingen. Hij initieerde en is ook nu actief betrokken bij verscheidene onderzoeksprojecten, die de relatie leggen tussen remote sensing technieken, geografische informatiesystemen en toepassingsvelden in de Wageningse sfeer.

**Prof.dr. P.A.Burrough** is sinds 1984 hoogleraar in de fysische geografie (landschapskunde) aan de Rijksuniversiteit te Utrecht. Hij promoveerde in '69 aan de Universiteit van Oxford en werkte een aantal jaren in Maleisië en Australië. Daarna was hij in Nederland achtereenvolgens verbonden aan de Stichting voor Bodemkartering ten behoeve van de opzet van geografische informatiesystemen voor bodem- en landschapskartering ('76-'80) en aan de Vakgroep Bodemkunde en Geologie van de Landbouwuniversiteit te Wageningen, met specialisatie in de toepassing van geostatistiek in de bodemkartering ('80-'83).
Van zijn hand verscheen in 1986 een leerboek over geografische informatiesystemen. Zijn huidig onderzoek is gericht op de ruimtelijke verspreiding en verplaatsing van natuurlijke en milieuvreemde stoffen. Hij is voorzitter van de Stichting NEXPRI, welke als doel heeft de ruimtelijke informatieverwerking in Nederlandse universiteiten te ondersteunen.

**Dr.ir. J.G.P.W.Clevers** is sinds 1981 werkzaam bij de Vakgroep Landmeetkunde en Teledetectie van de Landbouwuniversiteit te Wageningen, waar hij onderzoek verricht naar de toepassingsmogelijkheden van remote sensing in de landbouw. Hij studeerde in '81 af in de Landbouwplantenteelt aan de LU en promoveerde in '86 op een proefschrift over de toepassing van multispectrale luchtfotografie bij akkerbouwveldproeven. Hij ontwikkelde daarin een practisch bruikbaar reflectiemodel voor het schatten van gewaskenmerken. Zijn huidige activiteiten zijn met name gericht op de verdere ontwikkeling van reflectiemodellen, op de koppeling met gewasgroeimodellen en op het synergie-idee waarin het gecombineerd gebruik zowel van optische en microgolfinformatie als ook van voorkennis beoogd wordt.

**Dr.ir. A.van Dijk** is sinds 1986 werkzaam bij DHV Raadgevend Ingenieursbureau BV als remote sensing specialist. In die functie is hij met name actief op het gebied van de oogstvoorspelling en de land- en landschapskartering. In '77 studeerde hij als bodemkundige af aan de LU Wageningen en in '86 promoveerde hij bij de Universiteit van Missouri op een proefschrift getiteld 'A crop condition and crop yield estimation method based on NOAA/AVHRR satellite data'.

**Ir. L.J.M.van der Eerden** werkt sinds 1978 op het Instituut voor Plantenziektenkundig Onderzoek (IPO) te Wageningen. Hij studeerde Milieuhygiëne aan de Landbouwuniversiteit. Hij houdt zich bezig met het onderzoek naar de invloed van luchtverontreiniging op planten. Een belangrijk onderdeel van zijn werk is het onderbouwen van normen voor de luchtkwaliteit.

**Ing. G.J.Eikenaar** is werkzaam bij de sector Milieu van de Dienst der Gemeentewerken van de gemeente 's-Gravenhage, als hoofd (ad interim) van de afdeling Bodem en Water.
Van 1980 tot 1986 was hij werkzaam bij de Dienst Groenvoorzieningen en Milieueducatie van deze gemeente. Als hoofd van de afdeling Onderzoek hield hij zich bezig met onderzoek naar het gedrag (groei en ontwikkeling) van stadsbomen onder invloed van het stadsklimaat, met het oog op het beheer van de bomen in de stad. In dit kader onderzocht hij, in samenwerking met de Vakgroep Landmeetkunde en Teledetectie van de Landbouwuniversiteit Wageningen, de gebruiksmogelijkheden van remote sensing technieken, met name luchtfotografie.

**Dr.ir. J.J.Gerbrands** is sinds 1974 werkzaam aan de Faculteit der Electrotechniek van de TU te Delft, vakgroep Informatietheorie, waar hij als universitair hoofddocent gespecialiseerd is in het onderwijs en het onderzoek van digitale beeldverwerking.
Van zijn hand verschenen tal van wetenschappelijke publicaties over dit onderwerp, speciaal met betrekking tot de beeldanalyse en de patroonherkenning. Hij is actief lid van de Europese associatie voor signaalverwerking EURASIP. In '88 promoveerde hij te Delft op een proefschrift over de segmentatie van verruiste beelden.

**Ir. D.H.Hoekman** studeerde electrotechniek aan de Technische Universiteit te Delft. Hij is sinds 1981 verbonden aan de Landbouwuniversiteit te Wageningen, waar hij onderzoek verricht en onderwijs geeft in de toepassing van remote sensing in de land- en bosbouw. Zijn activiteiten zijn met name gericht op de radar remote sensing en het synergie-vraagstuk. Voor ESA voerde hij werkzaamheden uit ten behoeve van radar campagnes in Europa (AGRISCATT '87 en '88) en Brazilië (tropisch regenwoud).

**Ir. P.Hoogeboom** is sinds 1975 werkzaam bij het Fysisch en Electronisch Laboratorium TNO, waar hij onderzoek verricht op het terrein van de aardobservatie, met gebruikmaking van microgolftechnieken. Zijn belangstelling gaat vooral uit naar de radarwaarneming van land en zee. Daarbij speelt de bestudering van fysische verschijnselen aan het aardoppervlak een belangrijke rol.
Hij studeerde in '75 af aan de Technische Universiteit te Delft als electrotechnisch ingenieur, met als specialisatie de microgolftechniek.

**Dr.ir. A.R.P.Janse** was tot zijn pensionering (1987) werkzaam bij de Vakgroep Bodemkunde en Plantevoeding van de LUW. Naast zijn opleiding Cultuurtechniek, studeerde hij in Delft en promoveerde hij op een theoretisch akoestisch onderwerp.
In de periode '71-'77 nam hij aktief deel aan de toenmalige interdepartementale remote sensing werkgroep NIWARS. Hij initieerde vele projecten, waarbij hem zijn gelijktijdig adviseurschap bij de Heidemaatschappij zeer te stade kwam. Vele publicaties, in- en extern,

volgden. Ook werden verschillende vormen van presentatie voorbereid en uitgevoerd, waarbij remote sensing of een bijzondere toepassing voor derden werd belicht. Met ir. Th.A.de Boer redigeerde hij in 1987 de Spectrum-uitgave over remote sensing 'Met het oog op de aarde'. Nog steeds is dr. Janse in de remote sensing werkzaam.

**Prof.ir. L.Krul** is als hoogleraar in de microgolftechniek werkzaam in de vakgroep 'Telecommunicatie- en tele-observatietechnologie' van de faculteit der Electrotechniek van de TU te Delft. Sinds 1974 houdt hij zich in het bijzonder bezig met de toepassing van microgolven voor aardobservatie. Zowel de instrumentele aspecten als de fundamentele interactie-problematiek hebben daarbij zijn aandacht.
Ook op het Europese vlak is prof. Krul actief. Zo was hij eerst lid en daarna voorzitter van een van de Earsel Werkgroepen en draagt hij regelmatig bij aan het werk van ESA; op dit ogenblik als lid van de SAR-expertgroep die adviseert met betrekking tot de specificaties van toekomstige microgolfsensoren ten behoeve van aardobservatie.

**Drs. W.D.Langeraar** is als senior consultant en representative verbonden aan een Noors high-tech bedrijf, Scan-Tech. Zijn belangrijkste activiteiten bij Scan-Tech zijn ontwikkeling en internationale marketing van een geavanceerd grondwaterdetectiesysteem, waarin gebruik gemaakt wordt van UHF-radar. Hij studeerde geologie aan de Rijksuniversiteit te Groningen, Utrecht en Leiden en volgde een cursus aan het ITC. Na zijn studie was hij vier jaar werkzaam bij de FAO (Remote Sensing Centre). Hij was vervolgens zes jaar in dienst bij Euroconsult als remote sensing specialist, betrokken bij grote remote sensing projecten in Indonesië en verantwoordelijk voor het rendabel maken van een in-house remote sensing beeldverwerkingssysteem.

**Ir. J.H.Loedeman** studeerde cultuurtechniek aan de LU te Wageningen en doceerde gedurende enige jaren Luchtfotografie en Luchtfoto-interpretatie aan de HBCS te Velp en de LU te Wageningen. Sinds 1985 is hij volledig verbonden aan de Vakgroep Landmeetkunde en Teledetectie van de LU. Hij heeft zich vooral toegelegd op theoretische en uitvoeringstechnische vraagstukken van multispectrale luchtfotografie met kleine camera's. Vanaf '89 is hij docent fotogrammetrie.
Ir. Loedeman is secretaris van het Overlegorgaan Teledetectie (OOT) van de LUW en secretaris van de Werkgemeenschap voor Remote Sensing in Landbouw en Natuurbeheer (WRSLN).

**Dr.ir. G.P.de Loor** is sinds 1951 als fysicus werkzaam bij TNO (Fysisch en Electronisch Laboratorium) waar hij vanaf 1960 werkt aan aardobservatie (remote sensing). Zijn belangstelling gaat in het bijzonder uit naar de fysica van de verschijnselen die bijdragen aan de beeldvorming door de nieuwe sensoren voor aardobservatie. Dit zowel om deze sensoren optimaal te dimensioneren als ook om ze goed te gebruiken.

**Dr. M.Menenti** werkt sinds 1981 op het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (ICW), thans Staringcentrum, waar hij verantwoordelijk is voor het onderzoek betreffende de waterhuishouding van aride gebieden. Hij studeerde af in de Natuurkunde aan de Universiteit van Rome en promoveerde in '84 aan de LU te Wageningen op een proefschrift over de fysische aspecten en de bepaling van de verdamping in woestijnen met toepassing van remote sensing technieken.

**Mw.ir. C.Meulstee** is sinds 1983 werkzaam bij de afdeling Remote Sensing van de Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat waar zij onderzoek uitvoert en begeleidt, gericht op remote sensing toepassingen voor de Rijkswaterstaat. Tevens heeft zij een adviserende taak op dit gebied.
Ir. Meulstee studeerde in '82 af aan de Landbouwuniversiteit te Wageningen in de studierichting Bosbouw.

**Prof.dr.ir. M.Molenaar** is sinds 1983 hoogleraar in de landmeetkunde en de teledetectie aan de LU te Wageningen. Hij verricht onderzoek op het gebied van de geografische informatiesystemen en de teledetectie, waarbij de aandacht vooral gericht is op gegevensinwinning, data- en database-structuren en het gebruik van voorkennis bij de beeldanalyse. Hij studeerde in '72 als geodetisch ingenieur af aan de TU Delft, met als onderwerp de geodetische plaatsbepaling m.b.v. satellieten. Van '73 tot '83 was hij wetenschappelijk medewerker van de afdeling Fotogrammetrie van het ITC in Enschede, waar zijn onderzoek zich richtte op de kwaliteitsaspecten van de fotogrammetrische puntsbepaling. Hij promoveerde in 1981 aan de TU te Delft op een proefschrift over de kriteriumtheorie voor de kwaliteitsbeoordeling van geodetische metingen.
Hij is op het ogenblik ondermeer voorzitter van de Nederlandse Vereniging voor Fotogrammetrie en van de Nederlandse Federatie voor Aardobservatie en Geo-informatica. Binnen de International Society for Photogrammetry and Remote Sensing is hij voorzitter van een werkgroep met als onderwerp Geo Information Theory.

**Prof.ir.ing. N.J.Mulder** is sinds 1984 hoogleraar in de remote sensing, in het bijzonder de digitale gegevensverwerking en informatie-extractie, aan het ITC te Enschede. Tevens is hij hoofd van het Image Processing Lab IPL. Hij studeerde fysische technologie aan de HTS in Dordrecht, technische natuurkunde aan de TU te Delft en studeerde aldaar af in de werkgroep Patroonherkenning op 'zelflerende' computers en medische beeldanalyse.
Zijn huidig onderzoek richt zich vooral op het ontwikkelen van software en hardware voor beeld-acquisitie en -verwerking. Ook het integreren van diverse gegevensstromen en het gebruik van heuristische kennis in beslissingsmodellen heeft zijn speciale belangstelling. Prof. Mulder is ondermeer voorzitter van de ISPRS III/5 werkgroep

'Knowledge Based Systems' en is betrokken bij de Nederlandse Vereniging voor Patroonherkenning en Beeldbewerking.

**Dr. M.A.Mulders** is sinds 1975 als universitair docent verbonden aan de vakgroep Bodemkunde en Geologie van de Landbouwuniversiteit te Wageningen, waar hij belast is met de interpretatie van teledetectie-gegevens voor de bodeminventarisatie en landevaluatie. Een 'reflectie' van zijn werk is te vinden in het boek 'Remote Sensing in Soil Science' (Elsevier: Developments in Soil Science 15/1987). Hij studeerde af in geologie en bodemkunde aan de Universiteit van Utrecht in 1966, en promoveerde daar op een proefschrift waarin de aride gronden van het Balikh Bekken (Syrië) behandeld worden. Naast een aantal korte missies in de tropen, is hij vijf jaar werkzaam geweest in Suriname bij de Dienst Bodemkartering ('69-'74).

**Ir. G.J.A.Nieuwenhuis** is sinds 1977 werkzaam op het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (ICW), thans Staringcentrum, en is Hoofd van de afdeling Remote Sensing. Hij heeft zich met name toegelegd op de toepassing van de thermografie in de landbouw-waterhuishouding.
In '77 voltooide ir. Nieuwenhuis de studie Cultuurtechniek aan de LU te Wageningen. Momenteel is hij nauw betrokken bij de ontwikkeling van Remote Sensing als operationeel hulpmiddel bij de landbouw-waterhuishouding in binnen- en buitenland en bij de landinrichting.

**Ir. G.Sicco Smit** is sinds 1966 als docent verbonden aan de afdeling Bosbouw van het ITC (International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences) te Enschede. Zijn onderwijstaak is gericht op de visuele interpretatie van verschillende soorten remote sensing beelden (waaronder radar), speciaal met betrekking tot 'Forest Hydrology'. Hij studeerde af in '58 aan de LU te Wageningen, waarna hij tot 1966 werkzaam was in een FAO bosbouwinventarisatie-project van de Braziliaanse Amazone, als docent aan de Universidad Distrital te Bogota en tevens als bosbouwkundig adviseur voor de Federacion de Cafeteros te Manizales in Colombia. Voor het ITC was hij van '68 tot '73 werkzaam als hoofd van de bosbouwkundige afdeling voor het CIAF (Centro Interamericano de Foto-interpretación) en van '82 tot '89 als supervisor voor een bosbouwkundig onderzoeksprogramma te Bogota.

**Prof.dr. D.C.P.Thalen (overleden in 1988)** studeerde biologie in Groningen, werkte drie jaar in Irak en promoveerde op het daar verrichte onderzoek. Na een aantal jaren gewerkt te hebben bij het ITC te Enschede werd hij benoemd tot Hoofd van de afdeling Botanie bij het Rijksinstituut voor Natuurbeheer (RIN) in Leersum en Arnhem. Daarnaast richtte hij zich ook op het opbouwen van het werk van dat Instituut in ontwikkelingslanden.
Prof. Thalen was sedert november '88 als hoogleraar verbonden aan de vakgroep Natuurbeheer van de LU te Wageningen. Hij bekleedde als

eerste de nieuwe leerstoel 'Natuurbehoud en -beheer in de tropen'.

**Drs. G.van Wirdum** is werkzaam bij het Rijksinstituut voor Natuurbeheer (RIN) te Arnhem op het gebied van de relatie waterhuishouding – natuurlijke vegetatie. Hij studeerde biologie aan de Universiteit van Amsterdam en specialiseerde zich in de ecohydrologie en vegetatiekunde van moerassen. Vanaf 1970 leverde hij een substantiële bijdrage aan de ontwikkeling van het gebruik van kleuren-infrarood fotografie, multispectrale aftasting en digitale verwerkingsmethoden in landbouw en natuurbeheer. Thans is hij sectieleider Ecohydrologie en Remote Sensing binnen de afdeling Botanie van het RIN.

# Verklarende woordenlijst

Absorptie: het proces van uitdoving waardoor EM-straling door een object wordt opgenomen en omgezet in andere energievormen.

Absorptiecoëfficiënt: de verhouding van de door een lichaam per eenheid van oppervlak geabsorbeerde straling ten opzichte van de totale inkomende straling.

Absorptiefactor: zie absorptiecoëfficiënt.

Actieve sensor: sensor met een ingebouwde stralingsbron, zodat zowel zenden als ontvangen plaatsvindt (bijv. radar, lidar).

AD-conversie: omzetting van analoge signaalstroomwaarden naar digitale waarden; zie ook kwantiseren.

Additieve kleuren: blauw, groen en rood. Lichtbundels van deze kleuren geven door samenvoeging (optelling) wit licht.

Afbeeldingsmaatstaf: zie schaal.

Antenne: (bij het radarprincipe) dat deel van de radarbron dat de door een zender opgewekte straling ruimtelijk verdeeld of dat de door een object gereflecteerde straling opvangt.

Antennepatroon: functie die de relatieve ruimtelijke verdeling over de hemisfeer beschrijft voor zowel stralingsintensiteit (bij zenden) als gevoeligheid (bij ontvangen).

Antennetheorie: theorie, waarin bewezen wordt dat er voor antennes die zowel voor zenden als ontvangen worden gebruikt, een vaste relatie bestaat tussen de versterking in de zendsituatie en het opvangend oppervlak in de ontvangsituatie.

Antivignetteringsfilter: speciaal filter waarvan de transmissie toeneemt met de afstand tot het centrum, ter correctie van de invloed van vignettering.

Aride gebieden: landoppervlakken die zich kenmerken door 'droogte'. De criteria voor het toekennen van deze aanduiding aan gebieden op aarde hangen af van de klimaatgegevens, of baseren zich op de gesteldheid van bodem, vegetatie en afwateringssituatie.

Arrayscanner: zie pushbroom-scanner.

Band-pass filter: filter dat alleen EM-straling binnen een bepaald golflengte-interval doorlaat.

Beeld: een twee-dimensionale afbeelding (in formele zin) van de ruimtelijke structuur van een object met betrekking tot zijn spectrale kenmerken, ook 'beeldrooster' of 'beeldmatrix' te noemen ter onderscheiding van de 'beeldprent' die de zichtbare afbeelding op beeldscherm of papier vertegenwoordigt volgens de wensen van de gebruiker.

Beeldanalyse: computer- en beeldscherm-gesteunde analyse van de beeldinhoud met het oog op de extractie van informatie ten behoeve van de gebruiker; ook digitale beeldinterpretatie te noemen.

Beeldbeweging: onscherpte in een fotografische opname ten gevolge van beweging van het vliegtuig of de satelliet; in het bijzonder gezegd van de voorwaartse beweging.

Beeldcodering: speciale bemonstering van een beeld via datacompressie of datareductie voor efficiënte en betrouwbare transmissie of opslag van RS-beelden.

Beeldelement: zie pixel.

Beeldinterpretatie: het in het beeld herkennen en identificeren van objecten in het terrein; onderdeel van patroonherkenning. De beeldinterpretatie kan zowel op visuele als op digitale wijze plaats vinden.

Beeldpunt: zie pixel.

Beeldrestauratie: het terugwinnen van het originele beeld vanuit een door ruis en vervorming verstoorde versie.

Beeldruimte: de wiskundige ruimte die de positie (plaatscoördinaten) van pixels in het beeld beschrijft (bijv. de x- en y-coördinaten in de beeldmatrix of op het beeldscherm).

Beeldsegmentatie: het opsplitsen van een beeld in samenhangende deelgebieden of componenten, die ieder op zich min of meer homogeen zijn in een bepaalde eigenschap. Bovendien moeten elkaar rakende deelgebieden onderling verschillend zijn.

Beeldverbetering: het verduidelijken van beelden ('beeldprent') om visuele interpretatie of verdere digitale beeldverwerking te vergemakkelijken.

Beeldverwerking (digitale): optische, fotografische, analoog-electronische en vooral digitale technieken, bestaande uit een aantal beeldbewerkingen die als hulpmiddel dienen om de informatie-inhoud van beelden zo duidelijk mogelijk te doen uitkomen.

Beeldverwerking (menselijk-organische): het verwerken door de mens van met de zintuigen waargenomen beelden door middel van de hersenen als verwerkingsorgaan, waarin ondermeer cognitieve en associatieve functies bij de 'beeldinterpretatie' een rol spelen.

Bestralingsdosis: ('radiant exposure') de totale bestralingssterkte geïntegreerd over de integratie- (of belichtings-)tijd van de sensor.

Bestralingssterkte: ('irradiance') de stralingsenergiestroom vallend op een oppervlak per oppervlakte-eenheid.

BIL: 'band interleaved by line'; wijze van organisatie van digitale RS-

waarden op een magneetband, waarbij per aftastlijn de pixelwaarden van alle spectraalbanden op volgorde van aftasting staan alvorens de volgende aftastlijn komt.

BIP: 'band interleaved by pixel'; wijze van organisatie van digitale RS-waarden op een magneetband, waarbij per pixel de pixelwaarden van alle spectraalbanden op volgorde geplaatst staan alvorens het volgende pixel komt.

Bitslicing: het analyseren of weergeven van de opeenvolgende bitniveau's van elke getalwaarde binnen een RS-beeld. Bijvoorbeeld, wanneer de digitale pixelwaarden van 0 tot 255 (8 bits) lopen, dan zou men het 0e, 1e, 2e, 3e ..... bit elk als binair beeld kunnen weergeven.

Brekingsindex: (van een medium) verhouding tussen de golflengte (of snelheid) van EM-straling in het medium tot die in vacuüm. Deze is gelijk aan de wortel uit de complexe diëlectrische constante voor een homogeen en isotroop medium.

Brightness: zie helderheid.

BSQ: 'bandsequential'; wijze van organisatie van digitale RS-waarden op een magneetband, waarbij per spectraalband alle pixels van het beeld op volgorde van aftasting staan alvorens de volgende spectraalband komt.

CCD: zie 'charge-coupled device'.

Charge-coupled device: (CCD) halfgeleider-detector, die gebruikt wordt voor de electronische beeldvorming; meestal geplaatst in een rij ('array').

Classificatie: het indelen van afzonderlijke pixels of groepen van pixels in klassen; onderdeel van patroonherkenning.

Cluster: puntenwolk; de verdeling van punten rondom een voor een bepaalde klasse karakteristiek punt in de kenmerkruimte.

Coherent: de EM-golven uitgaande van een of meer bron(nen) zijn coherent als deze golven eenzelfde frequentie bezitten en dezelfde fase hebben, zowel in uitbreiding naar de tijd als naar de ruimte.

Color additive viewer: instrument dat aan drie multispectrale zwart-wit foto's gekleurde lichtbundels toekent en deze vervolgens over elkaar projecteert om tot een beter te interpreteren kleurencomposiet te komen.

Contrast: de verhouding voor een bepaalde stralingsgrootheid tussen de lichtste en de donkerste partij in een beeld of tussen twee willekeurige plaatsen in het beeld waarvoor het contrast bepaald moet worden.

Contrastverhouding: het relatieve verschil in grijswaarde tussen twee aangrenzende beeldgedeelten of pixels, voor verschillende objecten in het beeld.

Contrastverbetering: zie herschaling.

Cross-over point: bij radar, de invalshoek waarbij het effect van de bodemruwheid verdwijnt en de radarreflectie uitsluitend wordt bepaald door het vochtgehalte van de bodem.

Data: gegevens, in casu RS-waarden in verschillende spectrale banden, in analoge vorm of numeriek.

Database: gegevensbank; gestructureerde verzameling van digitale gegevensbestanden ('files'), met een hoge mate van inhoudelijke en organisatorische samenhang.

Dataverwerking: gegevensverwerking met behulp van een computersysteem.

dB: decibel (dB), maat om vermogensverhouding ($10.\log(Q_2/Q_1)$) of spanningsverhouding ($20.\log(V_2/V_1)$) aan te geven.

Densiteit (van een beeld): maat voor de ondoorlatendheid van een transparant medium, met name de zwarting van een filmnegatief of dia-positief (densiteit = -log(transmissiefactor)).

Densiteitscurve: zie karakteristieke curve.

Densitometer: instrument om densiteiten te meten.

Densitometrie: het meten van de opaciteit (ondoorlatendheid) van een transparant medium.

Detector: onderdeel van een RS-systeem, voor het waarnemen van EM-straling, en dat deze ontvangen stralingshoeveelheid omzet in een signaalwaarde.

Diëlectrische constante: electrische eigenschap van materie die mede bepalend is voor de radarreflectie. Deze wordt ook complexe diëlectrische constante genoemd.

Differentie-operator: zie rand-detectie.

Differentiële radardoorsnede: de radardoorsnede per oppervlakte-eenheid (van het belichte gebied); zie vervolgens bij radardoorsnede.

Diffuse reflectie: zie reflectie.

Digitaal terreinmodel: beschrijving van de hoogte van het terrein in een regelmatig x,y-netwerk van coördinaten.

DlogH-curve: zie karakteristieke curve.

DlogQ-curve: zie karakteristieke curve.

Drempeling: zie grijswaarde-drempeling.

Dynamisch bereik: (van een sensor) de verhouding van het maximaal waarneembare vermogen ($Q_{max}$) en het minimaal nog zinvolle vermogen (ruisniveau, $Q_{min}$) uitgedrukt in decibel (dB; $10.\log(Q_{max}/Q_{min})$. Voor decibel zie ook onder dB.

Echoparallax: het verschijnsel dat bij radar de top van een hoog object eerder afgebeeld wordt dan zijn voet, doordat de top zich dichter bij de antenne bevindt dan de voet (of zijn denkbeeldige verticale projectie op het referentievlak). Bij radarbeelden is deze echoparallax dus naar het nadirpunt toe gericht.

Electromagnetisch: zie EM.

Electronische detectie: de bepaling van plaats en van stralingsintensiteit in microgolfsystemen door middel van electronische vergelijking van de fysische toestand van de uitgezonden microgolven (actief systeem) met die van de echo, afkomstig van het object. Bij passieve systemen vindt vergelijking met een intern referentiesignaal plaats.

Electro-optische detectie: foto-electrische vastlegging van straling door

middel van interactie van straling ofwel met een foto-electrisch oppervlak dat als stralingsdetector fungeert (beeldbuissystemen), ofwel met een fotondetector, waarbinnen electronen worden losgemaakt. In beide gevallen wordt uiteindelijk een electrisch signaal opgewekt.

Emissie: het zelf uitzenden van EM-straling door een object als gevolg van zijn kinetische temperatuur.

Emissiecoëfficiënt: zie emissiviteit.

Emissiefactor: zie emissiecoëfficiënt.

Emissief-infrarood: het gebied van thermisch-infrarood tot aan het microgolfvenster; golflengten 3 – 1000 μm. In de praktijk van de RS wordt dit gebied beperkt tot het golflengtegebied 3,5 – 20 μm.

Emissiviteit: de verhouding van de uitgezonden stralingsenergie door een object met een bepaalde temperatuur bij een bepaalde golflengte ten opzichte van de uitgezonden stralingsenergie door een zwart lichaam bij dezelfde temperatuur en golflengte (een zwart lichaam heeft emissiviteit 1, andere objecten liggen tussen 0 en 1).

EM-golf: ElectroMagnetische golf.

EM-spectrum: ElectroMagnetisch spectrum; het totale golflengtegebied dat door de electromagnetische golven wordt bestreken.

Expert systeem: een digitaal verwerkingssysteem waarin bepaalde interpretatiekennis is opgeslagen en waarmee in vraag- en antwoordvorm het systeem met zichzelf en met de gebruiker kan converseren en het interpretatie-vraagstuk in stappen (iteraties) kan proberen op te lossen (ook wel 'redeneermachine' te noemen).

Externe ijking: ijking ter correctie van storende of ongewenste invloeden buiten de sensor, zoals de atmosfeer of het niveau van de inkomende straling; uitgevoerd door bijvoorbeeld gebruik te maken van referentiepanelen, referentie-terreinobjecten of referentiemetingen in het veld.

False colour (FC) film: zie kleureninfraroodfilm.

FC: zie 'false colour'.

Feature space plot: 2-dimensionale grafische datapresentatie in de kenmerkruimte.

Fenomenologisch model: model, waarin formele, theoretische redeneringen in de plaats treden van fysische definities en verklaringen en waarin het menselijk waarnemen en handelen en de besluitvorming een belangrijke rol spelen.

Fenomenologische resolutie: de omvang van de voor herkenning benodigde omgeving van een detail.

Field of view: het totale gezichtsveld-bereik van een sensor; zie daarentegen IFOV, Instantaneous field of view met betrekking tot het momentane gezichtsveld van de sensor.

Filmgevoeligheid: zie gevoeligheid.

Filter: zie vensteroperatie.

Fluorescentie: het verschijnsel dat bij chemische systemen na absorptie van licht emissie van lichtquanta van grotere golflengte optreedt. Bij

planten wordt een klein deel van de geabsorbeerde stralingsenergie in het zichtbare gebied weer uitgezonden in het rood en nabij-infrarood (0,65 – 0,75 μm).

Foto: het analoge, reële beeld dat met behulp van fotografie wordt verkregen.

Fotografische detectie: foto-chemische vastlegging van straling door middel van de interactie van straling (licht) met de zilverhaloïde kristallen in de filmemulsie.

Fotogrammetrie: de bepaling van de afmetingen van een voorwerp uit de fotografie; de wetenschap en de techniek van de terreinopname en de vervaardiging van databases en/of kaarten uit luchtfoto's, met speciale aandacht voor de geometrisch juiste positie van de vast te leggen of weer te geven terreinobjecten.

Fotometer: lichtmeter met een spectrale gevoeligheid volgens de fotopische curve.

Fotopische curve: ooggevoeligheidscurve; een internationale standaardcurve die nauwkeurig de monochrome spectrale gevoeligheid van het menselijke oog voor daglicht benadert.

Fotosynthese: de synthese van koolhydraten door groene planten met behulp van $CO_2$ uit de lucht en water uit de bodem en onder invloed van licht.

Fysiografische beeldinterpretatie: beeldinterpretatie gericht op het onderscheiden van landtypes en de onderverdeling in landeenheden.

Gedistribueerd doel: samengesteld object; bij aardobservatie m.b.v. radar is elke resolutiecel te beschouwen als een verzameling puntdoelen met een bepaalde verdeling (distributie), waarbij het object bovendien groter kan zijn dan de antenne-bundel.

Geografisch informatiesysteem: GIS, doordachte combinatie van naar elkaar verwijzende datasets van verschillende soorten positiegebonden thematische gegevens (database) en de noodzakelijke software om de database zichtbaar te maken, interactief te manipuleren en te analyseren om te komen tot doelgerichte resultaten. De data kunnen in raster- of in vectorformaat of als afzonderlijke punten voorkomen. De datasets dienen in geometrisch opzicht dekkend te zijn.

Geometrische resolutie: een theoretische maat voor het kleinste detail dat waargenomen kan worden (ofwel de kleinste ruimtelijke afstand tussen twee objecten; meestal uitgedrukt in radialen of meters). In de fotografie wordt deze uitgedrukt in het aantal optische lijnen per millimeter. De geometrische resolutie bepaalt mede de practische keuze van de IFOV (zie aldaar).

Geometrisch scheidend vermogen: zie geometrische resolutie.

Gevoeligheid: mate waarin een detector gevoelig is voor EM-straling.

GIS: zie Geografisch InformatieSysteem.

Grijswaarde-drempeling: vorm van beeldsegmentatie, waarbij van een beeld een tweewaardige plattegrond wordt opgesteld op basis van een bepaalde drempel.

Ground truth: veldgegevens. Meer algemeen: referentiedata; data over

de fysische toestand van het aardoppervlak, die verkregen worden van andere bronnen dan de primaire RS-databronnen en die gebruikt worden ter ondersteuning van de analyse van de RS-data.

Helderheid: de in het microgolfvenster gehanteerde term voor radiantie; zie radiantie.

Herbemonstering: bij een lijnscanner (zie aldaar) het opnieuw indelen van elke aftastlijn (i.c. de resolutiecellen) in geometrisch gelijke terreinpartjes (geometrische herindeling) door het creëren van kunstmatige pixels waarvan de spectrale stralingsgegevens worden berekend uit de originele waarden in evenredigheid met de oppervlakte-bedekking van de nieuwe pixels ten opzichte van de originele resolutiecellen. In het algemeen volgt een herbemonstering op een geometrische herindeling van de beeldelementen ten gevolge van het tot dekking brengen van twee verschillende beelden van hetzelfde gebied met behulp van een transformatieberekening. De herbemonstering betreft dan het toekennen van kunstmatige pixelwaarden aan de nieuwgevormde beeldelementen krachtens een gekozen bemonsteringsalgoritme.

Herindeling (geometrisch): zie bij herbemonstering.

Herschaling: in het algemeen het op een andere schaal (op een andere eenheid) brengen van (meet)waarden, waarbij meestal een lineaire wiskundige afbeeldingsfunctie wordt gebruikt; in het geval van beeldverbetering is herschaling een vorm van verduidelijking van de beeldweergave ('beeldprent') waarbij het beschikbare aantal opeenvolgende grijswaarde- of kleurtrappen wordt toegekend aan een ander getalleninterval dan het bereik behorende bij de originele pixelwaarden, bijvoorbeeld aan het interval gelegen tussen de minimale en de maximale pixelwaarde in plaats van het bereik van 0 tot 255.

High-pass filter: absorptiefilter dat alleen EM-straling boven een bepaalde golflengte doorlaat.

Histogram: grafische voorstelling van een dataset die de frequentie van voorkomen (langs de y-as) geeft voor individuele metingen of voor opeenvolgende intervallen van (pixel)waarden (langs de x-as).

Histogram-egalisatie: vorm van beeldvisualisatie (zie ook bij beeldverbetering), waarbij door een niet-lineaire herindeling van de opeenvolgende intervallen van pixelwaarden het histogram (zie aldaar) zodanig wordt gewijzigd dat het zo vlak mogelijk verloopt. Ten behoeve van de beeldprent wordt nu het beschikbaar aantal opeenvolgende grijswaarde- of kleurtrappen toegekend aan de nieuwe intervallen.

Hoekreflector: opstelling waarbij drie platte oppervlakken (metalen platen) onderling loodrecht op elkaar staan. Hoekreflectoren worden als referentie gebruikt bij radarmetingen en hebben een bekende radardoorsnede.

Hoofdcomponenten-analyse: hoofdcomponenten-transformatie; orthogonale, lineaire transformatie, die door rotaties N

oorspronkelijke, gecorreleerde variabelen (bijv. de waargenomen stralingswaarden in de verschillende spectrale banden) over voert in N nieuwe, ongecorreleerde variabelen (hoofdcomponenten genoemd).

Ideale zendantenne: antenne die het zendvermogen zo verdeelt dat in elk punt van het met een beperkte ruimtehoek corresponderende deeloppervlak van de bol met de straler als middelpunt, een gelijke vermogensdichtheid ontstaat terwijl in alle andere punten van de bol de vermogensdichtheid gelijk aan nul is.

IFOV: 'Instantaneous field of view'; het momentane gezichtsveld van de sensor, namelijk de openingshoek waarin een sensor gevoelig is voor EM-straling (uitgedrukt in graden of radialen); zie ook resolutiecel. Deze openingshoek is instrumenteel vastgelegd, in relatie tot de theoretische geometrische en radiometrische resolutie van de sensor.

Instantaneous field of view: zie IFOV.

Interferentiefilter: filter dat straling in zeer nauwe spectraalbanden selectief kan reflecteren.

Inkijkhoek: ('look angle') hoek van inzien ten opzichte van de verticaal (nadir) in de sensor.

Interne ijking: ijking ter correctie van storingen of onregelmatigheden in het detector-gedeelte van een sensor, meestal uitgevoerd door controle van het signaal afkomstig van een standaard.

Invalshoek: ('angle of incidence') hoek van inzien ten opzichte van de verticaal ter plaatse van het beschouwde object.

Inwendige oriëntering: zie oriëntering.

IRLS: 'infrared line scanner'; lijnaftastend sensorsysteem van het opto-mechanische type, uitsluitend voor RS-detectie in thermisch-infrarode kanalen; een betere benaming is TIR-scanner.

Isotrope straler: straler die het toegevoerde zendvermogen gelijkmatig verdeeld over het oppervlak van een bol met de straler als middelpunt.

Karakteristieke curve: DlogH-curve of DlogQ-curve; de grafische voorstelling van het verband tussen de logaritme van de bestralingsdosis en de gemeten densiteit van de film.

Kenmerkruimte: de wiskundige ruimte die de stralingswaarden (kenmerken) van pixels beschrijft (bijv. in het 2-dimensionale geval kunnen de stralingswaarden van twee spectrale banden tegen elkaar uitgezet worden).

Kirchhoff's stralingswet: stralingswet die aangeeft dat, bij gegeven absolute temperatuur en golflengte, emissie en absorptie voor een willekeurig object gelijk zijn.

Kleurenfilm: normale kleurenfilm, die opgebouwd is uit een drietal afzonderlijke lagen, waarbij de rood-afbeeldende laag gevoelig is voor rode straling, de groen-afbeeldende laag gevoelig is voor groene straling, en de blauw-afbeeldende laag gevoelig is voor blauwe straling.

Kleurengrafisch systeem: electronisch werkend systeem met de mogelijkheid van beeldbuisweergave van op magneetband vastgelegde

latente beelden, gewoonlijk gekoppeld aan een computersysteem ten behoeve van de beeldbewerking.

Kleureninfraroodfilm: vorm van kleurenfilm, waarbij de rood-afbeeldende laag gevoelig is voor nabij-infrarode straling, de groen-afbeeldende laag gevoelig is voor rode straling, en de blauw-afbeeldende laag gevoelig is voor groene straling.

Kleursoort ('hue'): kleurtoon, de 'kleur' van het algemene spraakgebruik.

Kleurverzadiging ('saturation', 'chroma'): verzadigingsgraad, kleurdichtheid, het aantal kleurpuntjes per eenheid van oppervlakte.

Kleurwaarde ('brightness', 'value'): de grijstoon van de kleur.

Korreldichtheid ('grain density'): het aantal zilverhaloïde kristallen per oppervlakte-eenheid film.

Korrelgrootte-verdeling ('grain size distribution'): de verdeling (het histogram) van kristalgrootten in een film.

Korreligheid: ('granularity') de objectieve (gemeten) onregelmatigheid van de zilverkorrelverdeling van een uniform bestraalde fotografische emulsie na de ontwikkeling. Dit is equivalent met ruis.

Korreligheidsfactor: grootheid met betrekking tot de densitometrische bepaling van de korreligheid.

Korreling: ('graininess') subjectieve (visuele) indruk van het korrelig karakter (de korrelige textuur) van het filmbeeld na uniforme bestraling en na ontwikkeling.

Korrelverdeling ('grain distribution'): de manier waarop de zilverhaloïde kristallen in de film verdeeld liggen.

Kortgolvig: het gebied tot 3,5 μm.

Kwantiseren: het indelen van het bereik aan meetwaarden in een eindig aantal discrete niveau's (digitale bemonstering).

LAI: leaf area index; de totale, eenzijdige (groene) bladoppervlakte per eenheid bodemoppervlak.

Lambert oppervlak: zie Lambertse straler.

Lambertse straler: object waarvoor de geëmitteerde of gereflecteerde radiantie onafhankelijk van de hoek van inzien van de sensor is. Met betrekking tot reflectie spreekt men ook van een diffuus reflecterend oppervlak.

Landevaluatie: het vaststellen van het optimale landgebruik voor een bepaalde landeenheid door vergelijking van landgebruiksbehoeften en landhoedanigheden.

Langgolvig: het gebied vanaf 3,5 μm.

Latent beeld: (in tegenstelling tot een reëel beeld) onzichtbaar beeld dat ontstaat bij de fotografische of bij de electro-optische detectie en dat zichtbaar wordt na de fotografische filmontwikkeling dan wel kan worden vertoond door middel van een kleurengrafisch systeem.

Leaf area index: zie LAI.

Lichtafval: zie stralingsafval.

Lichtmeter: betreft hetzij een fotometer (zie aldaar) dan wel een radiometer (zie aldaar).

Lidar: LIght Detection And Ranging; techniek waarbij een coherente laser straling (in het gebied tussen 0,3 en 10 μm) uitzendt en waarbij de reflectie door of absorptie in de atmosfeer wordt bepaald.

Lijnobject: pixels met overeenkomstige stralingswaarden die een lijn vormen; ofwel: terreinobject dat in de objectdefinitie beschouwd mag worden als een (al of niet gebogen) lijn zonder breedte van betekenis in de RS-afbeelding, gelet op de afbeeldingsschaal en op zijn stralingscontrast met de omgeving ten opzichte van de ruimtelijke en de radiometrische resolutie van de RS-opname.

Lijnscanner: lijnaftastend sensorsysteem van het opto-mechanische type; zie opto-mechanische scanner.

Low-pass filter: absorptiefilter dat alleen EM-straling beneden een bepaalde golflengte doorlaat.

Microgolfvenster: het venster in het EM-spectrum, waarbij men te maken heeft met straling met golflengten van cm's (0,1 – 50 cm).

Microgolven: EM-straling in het microgolfvenster.

Midden-infrarood: golflengten 1,3 – 2,5 à 3,0 μm; onderdeel van het reflectief-infrarood.

MIR: zie midden-infrarood.

Mixel: 'mixed pixel'; pixel waarvan de radiometrische getalwaarde een mengwaarde is van verschillende objecten binnen de ruimtelijke resolutie van het RS-systeem.

Modulatie: het variëren van frequentie, fase of amplitudo van een EM-golf. Bij radar-systemen wordt vaak het principe toegepast dat de in de zender opgewekte, sinusvormige trilling telkens slechts voor korte tijd wordt uitgezonden.

Monitoring: bewaking, controle, het volgen (van veranderingen).

Monotemporeel: een enkel tijdstip betreffend.

MSP: zie MultiSpectrale Fotografie.

MSS: zie MultiSpectrale Scanning.

Multilook-techniek: de techniek van middeling over een aantal onafhankelijke bemonsteringen per pixel, die bij radar toegepast wordt om de spikkel te reduceren.

Multispectraal: twee of meer spectrale banden bevattend.

Multispectrale aftasting: RS-opnamevorm, waarbij een sensor gelijktijdig hetzelfde gebied door middel van aftasting (scanning) in digitale vorm vastlegt in verschillende golflengtebanden.

Multispectrale classificatie: classificatie, gebaseerd op meerdere spectrale banden; zie classificatie.

Multispectrale fotografie: vorm van fotografie waarbij, door keuze van films en filters, de straling in afzonderlijke (smalle) golflengtebanden wordt geregistreerd op zwart-wit films.

Multispectrale scanning: zie multispectrale aftasting.

Multitemporeel: meerdere tijdstippen betreffend.

Nabij-infrarood: golflengten 0,7 – 1,3 μm; onderdeel van het reflectief-infrarood.

NEP: 'noise equivalent power'; de kleinst detecteerbare stralingseenheid.
Netwerk: weergave van het nabuurschap tussen pixels, waarbij een pixel wordt weergegeven door een knooppunt en de nabuurschapsrelatie door een zijde die twee knooppunten verbindt.
NIR: zie nabij-infrarood.
Noise equivalent power: zie NEP.

Objecten: voorwerpen in algemene zin, die in het terrein gekenmerkt worden door hun aard (thematiek) en hun vorm en afmetingen (geometrie). Bij de definitie van 'object' kan de thematiek van het object leiden tot de indeling in een objectklasse, terwijl de geometrie van het object aanleiding kan geven tot de toekenning van een objectsoort (vlak-, lijn- of puntobject).
Objectparameter: veranderlijke grootheid met betrekking tot het object (zie aldaar), die van invloed is op de actuele RS-waarneming, als daar zijn (waar toepasselijk): vochtgehalte, temperatuur, oppervlakteruwheid, grondbewerking, plantrichting, ruimtelijke geometrische structuur en stand ten opzichte van de sensor, volume, dichtheid, bodembedekkingsgraad, aantal bladlagen, variatie in de tijd, etc.
Opaciteit: mate van ondoorlatendheid voor licht.
Openingshoek: zie IFOV.
Optische venster: het venster in het EM-spectrum van ultraviolet (UV) tot en met thermisch-infrarode straling (TIR); golflengten 0,35 – 14 μm.
Opto-mechanische detectie: vorm van electro-optische detectie, waarbij gebruik gemaakt wordt van een oscillerende of roterende spiegel toegepast in een lijnaftastende zwaaiscanner ('whiskbroom- scanner').
Opto-mechanische scanner: sensorsysteem van het opto-mechanische detectietype (zie aldaar), dat een oscillerende of roterende spiegel plus de eigen voortbeweging van het platform gebruikt om het aardoppervlak punt voor punt en lijnsgewijs af te tasten; werkzaam hetzij in slechts één spectrale band (bijvoorbeeld een thermisch-infrarode band; zie IRLS), of in verschillende spectrale banden (multispectrale aftasting); ook zwaaiscanner ('whiskbroom- scanner') genoemd.
Oriëntering
Inwendige oriëntering: de onderlinge positie van de detecterende en afbeeldende componenten van de sensor.
Uitwendige oriëntering: de plaats en de stand van het sensorplatform in de voorwerpsruimte.

Panchromatisch: een brede band, het zichtbare deel van het EM-spectrum, bevattend.
Panchromatische film: zwart-wit film die gevoelig is voor het gehele zichtbare deel (0,4 – 0,7 μm) van het EM-spectrum.
Panoramische vertekening: vertekening in het beeld die optreedt bij scanners doordat de afbeelding loodrecht op de vliegrichting

plaatsvindt met een constante hoeksnelheid, dus evenredig met de inkijkhoek, terwijl de aftasting over de grond (loodrecht op de vliegrichting) evenredig met de tangens van de inkijkhoek verloopt. Het resultaat van de beeldvorming is dat het terrein naar de zijkanten van het beeld toe samengedrukt wordt weergegeven.

Parallax: verschilzicht; onderlinge verschuiving van objecten die zich in ons beeldveld bevinden.

Paspunten: denkbeeldige of fysiek aanwijsbare punten in het terrein die in een beeld te herkennen zijn ('ground control points'); ook gebruikt voor denkbeeldige of fysiek aanwijsbare punten in het ene beeld die herkenbaar corresponderen met punten van gelijke strekking in het andere beeld ('image control points').

Passieve sensor: sensor zonder eigen lichtbron (meet bijv. de reflectie van zonnestraling door objecten op het aardoppervlak).

Patroon (spectraal): de waarnemingsvector van een pixel, bevattende de spectrale waarden van dat beeldpunt in de verschillende spectraalbanden.

Patroon (ruimtelijk): de rangschikking en positie-verdeling in het beeldvlak van kleur- of grijstintverschillen die tezamen een min of meer bepaalde samenhang vertonen. Men kan onderscheid maken tussen ruispatronen (met een toevallige ruimtelijke verdeling) en structuurpatronen (met een gedetermineerde ruimtelijke verdeling).

Patroonherkenning: het meten van de voornaamste patroonkenmerken en het indelen in klassen (al dan niet door vergelijking met een bekend patroon van oefengebieden); zie ook bij classificatie.

Pixel: acroniem voor 'Picture Element'; beeldelement, waarvan de ligging wordt bepaald door middel van de positie in het beeldrooster en waarvan de bijbehorende getalwaarde langs kunstmatige weg wordt ontleend aan gehele of gedeeltelijke resolutiecellen; ook soms beeldpunt genoemd. De omvang van een pixel wordt bij RS-afbeelding van het aardoppervlak gewoonlijk gerelateerd aan een bepaalde terreinafmeting, bijv. 30 m bij 30 m.

Pixelwaarde: de (digitale) stralingswaarde van een pixel, uitgedrukt als digitale getalwaarde (DN, 'digital number'), radiantiewaarde, reflectiefactor of andere stralingswaarde.

Planck's stralingswet: stralingswet die de temperatuur van een zwart lichaam relateert aan de uitgezonden radiantie als functie van de golflengte (of van de frequentie).

Polarisatierichting: het trillingsvlak van het electrisch veld van een EM-golf.

Pulsbreedte: tijdsduur van uitzenden van elke afzonderlijke puls.

Pulsherhalingsfrequentie: frequentie van uitzenden van een radarpuls.

Puntdoel: (bij radar) object zonder afmetingen (in de praktijk: zeer klein ten opzichte van de golflengte).

Puntobject: terreinobject dat in de objectdefinitie beschouwd mag worden als een punt in de RS-afbeelding, gelet op de afbeeldingsschaal en op zijn relatief geringe vorm en afmetingen en op zijn stralingscontrast met de omgeving ten opzichte van de ruimtelijke en

de radiometrische resolutie van de RS-opname.

Puntoperatie: bewerking op of analyse van de stralingswaarden per pixel afzonderlijk; in tegenstelling tot vensteroperaties. Anders gezegd: het bepalen van een nieuwe waarde ('output') voor een bepaald pixel in een RS-beeld op grond van de waarde van dit enkele pixel ('input') in het oorspronkelijke beeld.

Pushbroom-scanner ('linear array scanner'): lijnsgewijs aftastsysteem, waarbij alle punten van een beeldlijn simultaan worden opgenomen (dus niet punt voor punt zoals bij opto-mechanische aftasting) door een rij CCD-elementen.

Radar: RAdio Detection And Ranging; techniek waarbij microgolven worden uitgezonden en vervolgens de door een object weerkaatste golven worden geregistreerd.

Radarbeeld: de twee-dimensionale afbeelding verkregen d.m.v. een beeldvormend radarsysteem.

Radardoorsnede: het denkbeeldig oppervlak van een object van zodanige grootte dat het door dit oppervlak onderschepte vermogen, als dit isotroop over de ruimte wordt verdeeld, ter plaatse van de ontvangantenne dezelfde vermogensdichtheid geeft als die welke daar in werkelijkheid, als gevolg van de aanwezigheid van het object, optreedt. Het is gebruikelijk voor samengestelde doelen de radardoorsnede te normeren: hetzij als radardoorsnede per oppervlakte-eenheid (differentiële radardoorsnede), hetzij als radardoorsnede per eenheid van in de zendrichting geprojecteerd oppervlak (verstrooiingscoëfficiënt).

Radarecho: zie radarreflectie.

Radarformule: radarvergelijking; vergelijking, die de formele relatie tussen het door de radar ontvangen vermogen en de radardoorsnede van een object beschrijft.

Radarontvanger: (bij het radarprincipe) dat deel van de radar dat de door een antenne opgevangen straling detecteert.

Radarprincipe: het principe waarbij het waar te nemen object door een microgolf-bron bestraald wordt en vervolgens de straling gemeten wordt die door het object in de richting van de radar wordt gereflecteerd (actief systeem).

Radarreflectie: radarecho; radarverstrooiing ('backscatter'); bij radar, het proces van weerkaatsing van microgolf-energie door een object, beschouwd in de richting van de antenne.

Radarschaduw: het verschijnsel dat bij zijwaartse radar het terrein achter hoge objecten niet waargenomen kan worden, m.a.w. er komt geen echo van terug.

Radarsignatuur: de radarresponsie (met name de verstrooiingscoëfficiënt) voor een bepaald materiaal of object als functie van de frequentie, scheerhoek, polarisatie of tijd.

Radarvergelijking: zie radarformule.

Radarverstrooiing: zie radarreflectie.

Radarverstrooiingscoëfficiënt: de radardoorsnede per eenheid van in de

zendrichting geprojecteerd oppervlak; zie verder bij radardoorsnede.

Radiantie: ('radiance') van een waargenomen punt op een oppervlak in een gegeven richting ten opzichte van de normaal op het oppervlak, is de stralingsenergiestroom vanuit een element op het oppervlak dat het betreffende punt omgeeft en gaande in de richting gedefinieerd door een kegel rondom de gegeven richting, gedeeld door het produkt van de ruimtehoek van de kegel en de oppervlakte van de orthogonale projectie van het beschouwde element op een vlak loodrecht op de gegeven richting.

Radiometer: stralingsmeter, met een uniforme spectrale gevoeligheid over de spectrale bandbreedte waarvoor hij gemaakt is.

Radiometrie: stralingsmeting.

Radiometrische resolutie: het kleinst waarneembare verschil in stralingsenergie met betrekking tot reflectie, emissie, temperatuurverschillen, intensiteitsverschillen, vermogensverschillen, enz.

Radiometrisch scheidend vermogen: zie radiometrische resolutie.

Rand-detectie: vorm van segmentatie, waarbij randen tussen aangrenzende homogene gebieden worden opgespoord door middel van differentie-operatoren, d.w.z. vensteroperaties die de partiële afgeleide bepalen en testen of deze waarde hoog genoeg is om te besluiten dat het onderhavige punt inderdaad een rand-punt is.

Rasteren: het in rasterformaat omzetten van gegevens (bijv. lijnenkaarten).

Rasterformaat: de weergave van punt-, lijn- en vlakobjecten in de beeldruimte in de vorm van een beeldmatrix, als een rooster (raster) van pixels; vergelijk vectorformaat.

Raster-overlay-structuur: wijze van presentatie van gegevens in rasterformaat, waarbij de afmetingen van het raster van verschillende gegevens gelijk is, zodat de inhoudelijke aspecten van verschillende gegevenssoorten vergeleken kunnen worden.

RBV: zie 'Return Beam Vidicon'.

Referentiepaneel: kunstmatig object met bekende reflectie-eigenschappen, dat in de optische RS soms gebruikt wordt voor de ijking (als referentie) van de opnamen.

Reflectie: het proces van weerkaatsing van EM-straling door een object. Bij diffuse reflectie is de radiantie van de gereflecteerde straling in alle richtingen gelijk (bijv. weerkaatsing van een ruw oppervlak). Bij speculaire (spiegelende) reflectie is er sprake van een voorkeursrichting van weerkaatsing (bijv. spiegeling van een glad oppervlak). De hantering van de termen 'glad' en 'ruw' is overigens golflengte-afhankelijk.

Reflectiecoëfficiënt: de radiantie van een object in een bepaalde richting onder bepaalde bestralingsomstandigheden, relatief ten opzichte van een ideaal, wit, diffuus oppervlak in dezelfde richting en onder dezelfde bestralingsomstandigheden (afhankelijk van de golflengte).

Reflectiefactor: zie reflectiecoëfficiënt.

Reflectief-infrarood: het gebied van nabij- en midden-infrarood;

golflengten 0,7 – 2,5 à 3,0 μm.

Reflectiemodel: model dat de reflectie van een object beschrijft als functie van sensorparameters en objectparameters.

Reflectiepercentage: de reflectiecoëfficiënt uitgedrukt als percentage. Soms ook: het percentage van de inkomende instraling dat door een object wordt weerkaatst (vaak gedefinieerd in de richting van een sensor en in een gedefinieerde golflengteband).

Remote sensing: de instrumentele middelen, de technieken en de methoden om op afstand het aardoppervlak waar te nemen en de verkregen beelden of getallen te kunnen interpreteren teneinde van bepaalde objecten op aarde doelgerichte informatie te verkrijgen.

Resolutie: scheidend vermogen, met name van een sensor; gezegd van ruimtelijke of geometrische, radiometrische, spectrale en temporele resolutie.

Resolutiecel: de kleinste oppervlaktemaat op de grond die door een sensor onder de heersende condities gemeten kan worden. Bij een scanner wordt deze bepaald door de IFOV en door de hoogte van de sensor boven het aardoppervlak.

Resolutie-element: zie resolutiecel.

Return Beam Vidicon: panchromatisch beeldbuissysteem voor electro-optische detectie; gebruikt bij de eerste Landsat-satellieten.

RMS-granularity: 'root mean square granularity'; standaardafwijking van de korreligheid van een film, soms aangegeven in promilles.

RS: zie Remote Sensing.

Ruimtelijke resolutie: de in de praktijk werkzame maat van het (theoretische) geometrisch scheidend vermogen, en corresponderende met een resolutiecel.

Ruimtelijk scheidend vermogen: zie geometrische resolutie.

Ruis: ongewenst patroon; verstoringseffecten in de orde van grootte van het scheidend vermogen met een toevallig of een zich repeterend karakter, die de informatie-inhoud van data verminderen.

Ruwheid: oneffenheid van een oppervlak; deze is afhankelijk van de golflengte van de invallende straling. Zo kan een oppervlak voor kortgolvige straling reageren als een 'ruw' oppervlak, terwijl het tegelijkertijd voor langgolvige straling reageert als een 'glad' oppervlak.

SAR: 'Synthetic Aperture Radar'; zie synthetische apertuur radar.

Scanner: aarde-aftastend sensorsysteem in het optische venster, hetzij een opto-mechanische scanner dan wel een pushbroom-scanner.

Scatterometer: in het algemeen niet-beeldvormend onderzoeksinstrument dat de radarverstrooiingscoëfficiënt van objecten meet.

Schaal: de verhouding tussen een bepaalde afstand op een beeld en de overeenkomstige afstand in het terrein.

Scheerhoek: ('grazing angle') hoek van inzien ten opzichte van de horizontaal ter plaatse van het beschouwde object.

Scheidend vermogen: zie resolutie.

Segmentatie: zie beeldsegmentatie.
Semantisch: betrekking hebbend op de betekenis van een object.
Sensitometrie: het controleren en ijken van het filmontwikkelproces in de fotografie met behulp van een karakteristieke curve, nodig voor een kwantitatieve radiometrische analyse van filmmateriaal.
Sensitometrische curve: zie karakteristieke curve.
Sensitometrische gevoeligheid: de reciproke van de bestralingsdosis H die nodig is om een bepaalde densiteit D te bereiken, gebaseerd op de ligging van de DlogH-curve ten opzichte van de geijkte logH-as.
Sensor: instrument dat gevoelig is voor een bepaalde fysische grootheid (i.c. straling) en deze kan omzetten in een fotografische of electrische waarde.
Sensorparameter: veranderlijke grootheid met betrekking tot sensoren waarmee de gebruiker door zijn keuze invloed kan uitoefenen op het RS-waarnemingsproces, als daar zijn (waar toepasselijk): detectortype, spectrale band, inkijkhoek, polarisatie, diafragma, brandpuntsafstand, opnameduur, opnametijdstip, etc. Ook zou men bij sensorparameters kunnen denken aan de instrumentele keuze met betrekking tot de gewenste sensorresoluties (zie aldaar).
Signaal-ruisverhouding: de verhouding tussen het amplitudo-niveau van de stralingsenergiestroom van het informatie bevattende signaal en dat van de ruis, ook aangeduid als de S/N-verhouding. Deze wordt soms ook uitgedrukt in dB: 20.log(S/N). Zie verder onder dynamisch bereik.
Signatuur: zie radarsignatuur, spectrale signatuur, temporele signatuur.
SLAR: 'Sideways Looking Airborne Radar'; SLR toegepast vanuit een vliegtuig. De resolutie in de vliegrichting wordt bepaald door het scheidend vermogen van de antenne (azimuth-resolutie).
SLR: 'Sideways Looking Radar'; het principe waarbij de antenne een vaste hoek met het aardoppervlak maakt en met zijn uitgaande stralingsbundel dwars op de vliegrichting een langgerekte sector van het terrein bestrijkt (SAR of SLAR systeem).
Snelheid (van een film): zie sensitometrische gevoeligheid.
Spatiële resolutie: zie ruimtelijke resolutie.
Spectraalband: zie spectrale band.
Spectraal scheidend vermogen: zie spectrale resolutie.
Spectrale band: een goed gedefinieerd, continu bereik (interval) van golflengten in het EM-spectrum; spectraalband, golflengte-band, frequentie-band, kanaal.
Spectrale gevoeligheid: de gevoeligheid van een sensor voor invallende EM-straling als functie van de golflengte.
Spectrale resolutie: een maat voor de breedte van een golflengteband (ook spectraalband of kanaal genoemd).
Spectrale signatuur: de RS-respons (reflectie) van een bepaald object (materiaal, soort, klasse, etc.) als functie van de golflengte.
Spectroradiometer: radiometer, die spectrale metingen kan verrichten in een groot aantal (smalle) golflengtebanden.
Speculaire reflectie: zie reflectie.

Spikkel: 'speckle'; het verschijnsel van sterke variatie in echosignaal van resolutiecel tot resolutiecel dat bij radar optreedt, doordat de ontvangen echo bestaat uit de sommatie van de bijdragen van een verzameling puntdoelen per resolutiecel, in steeds wisselende combinaties (interferentie).

Stefan-Boltzmann's stralingswet: stralingswet die aangeeft dat de totale uitgezonden hoeveelheid energie door een zwart lichaam evenredig is met de vierde macht van de absolute temperatuur van dat lichaam.

Stereoscopie: het ruimtelijk driedimensionaal waarnemen van vlakke, aan elkaar gerelateerde, beelden, die dezelfde objecten onder verschillende inkijkhoeken weergeven.

Stralingsafval: (lichtafval) afname van de bestralingssterkte naar de rand van een foto toe, afhankelijk van de hoek van inval ten opzichte van de optische as van een camera.

Stralingsemittantie: ('radiant exitance') de door een oppervlak uitgezonden stralingsenergiestroom per oppervlakte-eenheid.

Stralingsenergie: ('radiant energy') de energie in de vorm van electromagnetische golven of fotonen.

Stralingsenergiestroom: ('radiant flux') de hoeveelheid stralingsenergie die zich verplaatst van een punt naar een ander punt per eenheid van tijd (ook vermogen genoemd).

Stralingsmeter: zie radiometer.

Stralingssterkte: ('radiant intensity') de stralingsenergiestroom komende van een bron per eenheid van ruimtehoek in de beschouwde richting.

Stralingsstroom: stralingsenergiestroom.

Strooilicht: stralingsenergie die op een film valt na interne reflectie binnen in de camera, en dus niet direct van een gefotografeerd object afkomstig is.

Structuurbouwsteen: bouwsteen voor de structurele patroonherkenning, opgebouwd uit pixels of resolutiecellen. Deze kunnen bijvoorbeeld verkregen worden via grijswaarde-drempeling binnen een 3x3 venster, hetgeen binaire bouwstenen oplevert die in een beperkt aantal klassen kunnen worden gegroepeerd. Deze zijn in hoofdzaak topologisch bepaald.

Subtractieve kleuren: geel, magenta en cyaan. Deze worden verkregen door van wit licht een additieve kleur af te trekken.

Synergie: het geheel bezit meer kracht dan de som van de delen. Gezegd van het doordacht verkrijgen en combineren van de waarnemingsgegevens van optische en microgolfsensoren van operationele aardobservatiesystemen mede in samenhang met voorkennis en andere gegevensbronnen, waardoor bij toepassingen meer kans op succes kan worden verwacht dan hetgeen met gescheiden aardobservatie in de afzonderlijke vensters mogelijk zou zijn geweest.

Synopsis: overzicht, met RS over een groter deel van het aardoppervlak, waardoor de samenhang van de afgebeelde objecten of verschijnselen in een wijder verband tot uitdrukking komt.

Synthetische apertuur radar: SAR; radarsysteem, waarbij een hoge

ruimtelijke resolutie in de vliegrichting wordt verkregen doordat elk beeldelement gedurende langere tijd wordt waargenomen in de vliegrichting. Door opslag en speciale verwerking van deze meervoudige echo's wordt het effect van een veel grotere antenne bereikt. De SAR-methode geldt alleen als de radarstraling coherent is.

TC: zie 'true colour'.

Temporele resolutie: de frequentie (in de tijd) waarmee RS-opnamen met een bepaalde sensor verkregen kunnen worden.

Temporele signatuur: de RS-respons (reflectie) van een object (materiaal, soort, klasse, etc.) als functie van de tijd.

Textuur: beeldeigenschap met een lokaal karakter, die gerelateerd wordt aan een zekere oppervlakte of uitgebreidheid en die omschreven kan worden als het weefsel dat binnen het beeldsegment wordt opgebouwd uit basiselementen. Met name kan beeldtextuur staan voor het ruimtelijk patroon van grijswaardenverdeling in het beeldsegment, dat het karakter van een ruispatroon dan wel een structuurpatroon kan vertonen. Kwalitatief kan beeldtextuur beschreven worden met termen als grof, fijn, regelmatig, onregelmatig, vezelachtig, glad. Kwantitatief kan beeldtextuur beschreven worden met textuurmaten.

Textuuranalyse: onderzoek naar de textuur-eigenschappen van een beeld; zie textuur.

Textuurmaat: functie die aan oorspronkelijke beeldtextuur een numerieke grootheid toekent.

Thematiek: (o.a. thematische informatie) betreffende de inhoud, aard of eigenschappen van een object of objectklasse.

Thematische beslisregel: aan de hand van de spectrale signatuur (thematiek) van pixels wordt aangegeven tot welke objectklasse ze behoren; vergelijk topologische beslisregel.

Thermische ruis: het detector-signaal (bij een TIR-scanner) ten gevolge van de thermische energie van de detector zelf, optredend bij een onvoldoende gekoeld systeem.

Thermisch-infrarood: golflengten 3,5 – 14 μm; onderdeel van het emissief-infrarood.

Thermografie: onderdeel van de remote sensing, betrekking hebbend op het thermisch-infrarood (warmtebeelden).

TIR: zie thermisch-infrarood.

TIR-scanner: thermisch-infrarood lijnaftastend systeem; zie ook IRLS.

Topologisch: betrekking hebbend op de formele liggingsrelatie (samenhang) tussen objecten of tussen pixels.

Topologische beslisregel: aan de hand van het nabuurschap (topologie) van pixels wordt aangegeven tot welk object als zodanig ze behoren (niet alleen de objectklasse maar ook de objectsoort); vergelijk thematische beslisregel.

Trainingspixels: pixels van bekende objectklasse, waarvoor men bij een classificatie bepaalt tot welke puntenwolk in de kenmerkruimte ze behoren en waarna men beslist dat alle pixels die tot dezelfde

puntenwolk behoren ook tot dezelfde objectklasse behoren.
Trainingsset: een verzameling trainingspixels of -meetwaarden.
Transmissie: het proces van doorlaten van EM-straling.
Transmissiecoëfficiënt: de verhouding van de door een lichaam (object) per eenheid van oppervlak doorgelaten straling ten opzichte van de totale opvallende straling.
Transmissiefactor: zie transmissiecoëfficiënt.
True colour (TC) film: zie kleurenfilm.

Uitwendige oriëntering: zie oriëntering.
UV: UltraViolet.

Vectorformaat: de weergave van vlakobjecten in de beeldruimte door middel van hun omtrek; vergelijk rasterformaat.
Vector-overlay-structuur: wijze van presentatie van gegevens in vectorformaat en zodanig verwerkt tot een gezamenlijk coördinatenstelsel, dat de inhoudelijke aspecten van verschillende gegevenssoorten vergeleken kunnen worden.
Vegetatie-index: een wiskundige functie van reflectiewaarden (reflectiepercentages, digitale pixelwaarden) in verschillende spectrale banden, die gebruikt wordt om vegetatiekenmerken te schatten. Een dergelijke functie dient tevens om te corrigeren voor ongewenste invloeden van bijvoorbeeld verschillen in bodemreflectie of atmosferische omstandigheden.
Venster (electromagnetisch): golflengtegebied waarin de atmosfeer (grotendeels) transparant is voor EM-straling; zie bij optisch venster en bij microgolfvenster.
Venster (in de beeldverwerking): aanduiding voor de grootte van de omgeving van een pixel, die bij een bepaalde bewerking op dat pixel betrokken wordt (bijv. 3x3 venster, 5x5 venster, etc).
Vensteroperatie: bewerking op de stralingswaarden van pixels binnen een vooraf gedefinieerd venster, meestal beperkt tot een spectrale band; ook wel filter genoemd.
Vermogen: de in het microgolfvenster gehanteerde term voor stralingsstroom; zie stralingsenergiestroom.
Vermogensdichtheid: de in het microgolfvenster gehanteerde term voor bestralingssterkte; zie bestralingssterkte.
Vignettering: afname van de bestralingssterkte naar de rand van een foto toe bij grote diafragma's ten gevolge van gedeeltelijke afscherming door het huis van camera en lens.
VIS: 'visible'; zie zichtbaar licht.
Vlakobject: samenhangend gebied in een RS-beeld, waarin pixels overeenkomstige stralingswaarden vertonen; ofwel: terreinobject dat in de objectdefinitie beschouwd mag worden als een vlak in de RS-afbeelding, gelet op de afbeeldingsschaal en op zijn stralingscontrast met de (niet tot het vlak behorende) omgeving ten opzichte van de ruimtelijke en de radiometrische resolutie van de RS-opname.

Warmtebeeld: de beeldregistratie van door het aardoppervlak uitgezonden thermisch-infrarode straling.
Waterabsorptiebanden: golflengtebanden waarbij water (vrij of gebonden) in sterke mate straling absorbeert.
Wien's verschuivingswet: stralingswet die aangeeft dat de golflengte, waarbij de uitgezonden hoeveelheid energie door een zwart lichaam maximaal is, omgekeerd evenredig is met de absolute temperatuur van dat lichaam.

Zender: (bij het radarprincipe) dat deel van de radar waarin straling van de gewenste golflengten wordt opgewekt, gemoduleerd en uitgezonden.
Zichtbaar licht: golflengten 0,4 – 0,7 μm.
Zwaaiscanner ('whiskbroom-scanner'): lijnaftastend sensorsysteem van het opto-mechanische type; zie opto-mechanische scanner.
Zwart lichaam: een hypothetische, ideale straler die alle opvallende straling volledig absorbeert en bij iedere temperatuur voor elke golflengte maximaal emitteert.

# Trefwoordenregister

*: ook opgenomen in verklarende woordenlijst


aardobservatie: zie Remote Sensing
* absorptie 26, 38 ev., 74, 150 ev.
* - coëfficiënt 41
* actieve sensor, zie sensor
* AD-conversie 61 ev., 116, 137 220 ev., 419
* additieve kleuren, zie kleuren
* afbeeldingsmaatstaf, zie schaal
afbeeldingsproces 51 ev., 87 ev., 91, 245 ev., 427 ev.
afstands
- maat 207 ev.
- resolutie 129, 136 ev., 184 ev., 443 ev.
amplitudo 36 ev., 134, 221
* antenne 45 ev., 59, 125 ev., 243 ev., 445
* - ideale 126
* - patroon 289
* - theorie 128 ev.
* antivignetteringsfilter, zie filter
* aride (semi-) gebieden 278, 309 ev., 329, 351 ev.
* arrayscanner, zie pushbroom-scanner
aspect, zie kenmerk
atmosfeer 37 ev., 103 ev.
atmosferische correctie, zie correctie
AVHRR, zie NOAA/AVHRR
azimuth-resolutie 137, 444 ev.
* band
* - interleaved by line 62
* - interleaved by pixel 62
* - sequential 62
* - spectrale 26, 62, 97 ev., 111 ev., 146 ev., 209 ev., 273 ev., 357 ev., 386 ev., 424, 437 ev., 440, 441, 459
* band-pass filter, zie filter
bedekkingsgraad 81, 155 ev., 368
- schijnbare 158, 199
* beeld 9 ev., 21 ev., 60, 62, 87, 206, 217, 417 ev., 273 ev., 343
* - analyse 16 ev., 172, 216, 219 ev., 230 ev., 343 ev., 418 ev.
- bemonstering 61 ev., 140, 138
* - beweging 101 ev., 147
- classificatie, zie classificatie
* - codering 219 ev.,
* - context 69, 345
* - element, zie pixel
* - interpretatie 10 ev., 65 ev., 205 ev., 219 ev., 260 ev., 343 ev., 410, 417 ev.
* - interpretatie fysiografisch 327
- koppeling 245
- kwaliteit 87 ev.
* - latent 22, 52, 56 ev.

* - matrix 60
* - prent 488
- punt, zie pixel
- reëel 51 ev., 59 ev.
* - restauratie 219 ev.
* - rooster 419
* - ruimte 16, 206 ev.
* - segmentatie 16, 224 ev., 230 ev., 292, 260, 348
* - verbetering 212, 219 ev., 418 ev.
* - verwerking 15 ev., 56, 62, 90 ev., 216, 219 ev., 336, 342 ev., 375, 417 ev.
- vorming 9, 21, 35, 44 ev., 60 ev., 126, 135 ev.
belichten 52 ev.
belichtings
- dosis 90 ev.
- meter 44, 104 ev., 402 ev.
bemonsteringstheorema 63 ev., 220 ev.
beoordelingsmaat 211 ev.
* beslisregel
* - thematische 206 ev.
* - topologische 212 ev.
beslissingsdrempel, zie drempelwaarde
* bestralingsdosis 42 ev., 53 ev., 90 ev.
bestralingsfunctie 126 ev.
* bestralingssterkte 27, 42 ev., 94 ev., 300
* BIL, zie 'band interleaved by line'
* BIP, zie 'band interleaved by pixel'
* bitslicing 65, 212 ev.
blue shift, zie red edge
bodemverontreiniging 28, 411 ev.
boomkadaster 393 ev.
* brekingsindex 189
* brightness, zie helderheid
* BSQ, zie 'bandsequential'

Caesar-scanner 123, 441
camera 12, 51, 100 ev.
- constante 100, ev., 238 ev.
* CCD, zie 'charge-coupled devices'
* charge-coupled devices 18, 57 ev., 112 ev., 123, 242, 419
chirp-radar 443 ev.
* classificatie 15 ev., 28 ev., 169, 172, 177, 205 ev., 234, 287 ev., 351 ev., 369 ev., 375 ev., 402 ev., 408, 417 ev., 448
- maximum likelihood 208 ev., 229 ev.
- naaste buren 208
- naaste midden 208 ev., 229
- parallellopipedum 209, ev., 315 ev.
CLOUD-model 170 ev.
* cluster 207, ev., 229 ev., 262
* coherent 42, 59, 135 ev., 163 ev., 176 ev., 374 ev.
* color additive viewer 66, 147 ev., 346, 423 ev.
connectiviteitsanalyse 224 ev.
contour 88 ev.
* contrast 53, 94 ev., 219 ev.
* contrastverbetering, zie herschaling
convolutie 222 ev., 251
correctie
- atmosferisch 16, 118 ev.
- geometrisch 16, 61, 117, 220 ev., 241 ev., 256 ev., 291 ev.
- radiometrisch 61, 121 ev., 220 ev., 289
correlatiefilters 124
* cross-over point 165 ev., 195 ev.
CZCS 439 ev.

Daedalus-scanner 119 ev., 441
data
- integratie 262 ev., 255 ev.
decibel 46 ev., 63 ev., 129, 177 ev., 198 ev., 221 ev., 290 ev., 448
deeltjes-theorie 36
* densiteit 51 ev., 64, 219 ev., 245, 400 ev., 434

* densiteitscurve, zie karakteristieke curve
* densitometer 66, 92 ev., 106, 147 ev., 399 ev., 423
* densitometrie 66, 90 ev., 387 ev., 402, 434
detecteerbaarheid 69
* detectie 9 ev., 51 ev., 112 ev., 327 ev., 411 ev., 443 ev.
* - electronische 51 ev.
* - electro-optische 58, 238 ev.
* - fotografische 51 ev.
* - opto-mechanische 112 ev., 238 ev.
* - rand 225 ev.
* detector 9 ev., 46, 56 ev., 112 ev.
diafragma 100 ev.
diazo-drukken 334 ev.
* diëlectrische constante 189 ev.
* differentie-operator, zie filter
* differentiële radardoorsnede, zie radardoorsnede
* diffuse reflectie, zie reflectie
* digitaal terreinmodel, zie terreinmodel
digitalisatie 64, 375, 419
direct-positief procédé 97 ev.
* DlogQ-curve, zie karakteristieke curve
* drempeling, zie grijswaarde-drempeling
drempelwaarde 208 ev., 224 ev., 232 ev.
droogteschade 301 ev.
Dutscat 180 ev., 378 ev., 449
* dynamisch bereik 46 ev., 53, 63, 94 ev., 119 ev.

echo, zie radarecho
* echoparallax 175 ev., 243 ev., 379, 431
* electromagnetisch, zie EM
* electronische detectie, zie detectie
* electro-optische detectie, zie detectie
* emissie 12 ev., 24 ev., 114 ev., 193 ev., 299 ev., 386 ev., 438
* - coëfficiënt, zie emissiviteit
* emissief-infrarood,
* emissiviteit 24 ev., 41 ev., 300 ev.
emittantie 41
* EM
* - golf 9 ev., 35 ev., 61
* - spectrum 10 ev., 22 ev., 75, 146 ev., 206 ev., 306, 331
- straling 9 ev., 22 ev., 63
energiebalans 190, 198, 299 ev.
ERS-1 297, 370, 446 ev.
* expert systeem 216, 260, 346, 418
* externe ijking, zie ijking

facetmethode 249 ev.
* false colour film, zie film
fase 36 ev., 132, 189
* FC, zie 'false colour'
* feature space plot 294 ev.
* fenomenologisch model, zie model
* fenomenologische resolutie, zie resolutie
* field of view, zie instantaneous field of view
* film
* - false colour, zie kleureninfraroodfilm
* - gevoeligheid, zie gevoeligheid
* - kleuren 51 ev., 97, 355 ev.
* - kleureninfrarood 54 ev., 97 ev., 146 ev., 355 ev., 368 ev., 387 ev., 395 ev., 408 ev.
* - panchromatische 54, 346 ev., 355 ev., 368 ev.
* - true colour, zie kleurenfilm
- zwart-wit 52 ev., 97 ev., 147, 346 ev., 355 ev., 368 ev.
* filter (zie ook vensteroperatie) 44, 97, 100 ev., 399ev., 449
* - antivignetterings 99 ev.
* - band-pass 56
- differentie, zie gradient

filter
- effenings 222 ev.
- gradient 224 ev.
* - high-pass 56
* - interferentie 56, 456
- Laplace 211 ev.
- lineair 211
* - low-pass 56
- mediaan 223
- niet-lineair 211 ev., 223 ev.
- variantie 223
fixeerproces 52
* fluorescentie 75
forward mode 123
forward Motion Compensation (FMC) 102 ev.
* foto 56, 60, 87 ev.
fotografie (zie ook film) 14, 44, 55 ev., 103 ev., 152 ev., 237 ev., 327 ev., 333 ev., 343 ev., 355 ev., 369 ev., 389 ev., 394 ev., 427 ev.
* fotografische detectie, zie detectie
* fotogrammetrie 13, 53, 87, 90 ev., 242 ev., 427
foto-interpretatie 87, 106 ev., 325 ev., 345, 374, 410
* fotometer 44
foton 36, 52, 57, 112
- detector 57 ev., 112 ev.
* fotopische curve 44 ev., 104 ev.
* fotosynthese 74 ev., 97
foutopsporing 247 ev.
* fysiografische beeldinterpretatie, zie beeldinterpretatie
fysisch kenmerk, zie kenmerk

gamma (v.e. film) 53 ev.
gebied, zie venster
* gedistribueerd doel 164
* geografisch informatiesysteem 10 ev., 32, 216, 233, 237, 249 ev., 255 ev., 297, 348, 411, 420, 449
* geometrische
- correctie 16, 117, 244 ev.
- eigenschappen 29 ev., 189 ev., 191 ev., 237 ev.
* - resolutie, zie resolutie
* geometrisch scheidend vermogen, zie scheidend vermogen
* gevoeligheid
* - film 104 ev.
* - sensitometrische 94 ev.
* - spectrale 44, 54
gewasopbrengst 271
* GIS, zie Geografisch Informatie Systeem
golf
- theorie 35 ev.
- transversaal 35
grenswaarde-berekening 247 ev.
grijstrap 53 ev., 66
grijswaarde 176 ev., 219 ev., 291 ev., 376 ev., 420
* grijswaarde-drempeling 224 ev., 230 ev., 293 ev.
grondwater 303 ev., 310 ev., 407 ev.
* ground truth 17, 258 ev.

* helderheid 125 ev., 157
* herbemonstering 244 ev., 256
- bilineaire 251
- kubische 251
- naaste buren 251
herkenbaarheid 69 ev., 421
* herschaling 97, 219 ev.
* high-pass filter, zie filter
* histogram 222 ev., 293 ev., 434
* - egalisatie 222 ev.
* hoekreflector 163 ev., 183 ev.
* hoofdcomponenten-analyse 262, 293, 419, 459 ev., 471

* ideale zendantenne, zie antenne
* IFOV, zie instantaneous field of view
* ijking
- absoluut 47, 118 ev., 129, 150 ev., 291, 375, 378, 399
* - extern 118 ev., 290 ev., 455 ev.

* - intern 116 ev., 177 ev., 290
- relatief 47, 292
impuls 129 ev.
* informatiesysteem, zie geografisch informatiesysteem
* inkijkhoek 15, 42, 61, 277, 455
* instantaneous field of view 59 ev., 113 ev., 128 ev., 136 ev., 240 ev., 454 ev.
* interferentiefilter, zie filter
interferentiepatroon 134
* interne ijking, zie ijking
* invalshoek 42, 59, 74, 99, 132 ev., 164 ev., 185 ev., 189 ev., 244, 287 ev., 373 ev., 444 ev.
inventarisatie 11 ev., 333 ev., 342 ev., 448
* inwendige oriëntering, zie oriëntering
* IRLS,
irrigatie 310 ev.
- efficiëntie 310 ev.
isolijn 260 ev.
* isotrope straler, zie straler

* karakteristieke curve 52 ev., 90 ev., 150 ev., 400 ev.
kartering/karteren 11 ev., 237, 302 ev., 311 ev., 329 ev., 354 ev., 367 ev., 373 ev., 410 ev., 431, 450
kenmerk (aspect)
- fysisch 23, 30
- geometrisch 255 ev., 336, 412
- inhoudelijk 255 ev.
- polarisatie 16
- ruimtelijk 16, 23, 30, 231, 354, 417 ev.
- spectraal 15 ev., 417 ev.
- temporeel 16, 23, 30, 354
* kenmerkruimte 207 ev., 229 ev., 292 ev., 349, 376 ev., 459 ev.
* Kirchhoff's stralingswet, zie stralingswet
* kleuren
* - additieve 67 ev.
- composiet 220 ev., 318 ev., 334, 419 ev., 423
* - subtractieve 67 ev.
* kleurenfilm, zie film
kleurengrafisch systeem 62
* kleureninfraroodfilm, zie film
* kleur
* - soort 51 ev., 66, 275
* - verzadiging 66, 275
* - waarde 66, 275
* korrel
* - dichtheid 91 ev., 433 ev.
* - grootteverdeling 433 ev.
* korreligheid 92 ev., 433 ev.
* korreligheidsfactor 93 ev., 433 ev.
* korreling 92 ev., 433 ev.
* korrelverdeling 88 ev., 433 ev.
* kortgolvig 300 ev.
* kwantiseren 64, 221 ev.
kwantiseringsruis 221 ev.

label 206 ev., 231 ev., 292 ev.
* LAI, zie leaf area index
* Lambert oppervlak, zie Lambertse straler
* Lambertse straler, zie straler
landbouwwaterhuishouding, zie waterhuishouding
land
- eenheid 325 ev.
- eigenschap 325 ev.
* - evaluatie 325 ev.
- gebruiksbehoefte 325 ev.
- geschiktheid 325 ev.
- hoedanigheid 325 ev.
- type 327 ev.
Landsat 56, 65, 241, 331 ev., 355, 368 ev., 424
- MSS 70, 119 ev., 156 ev., 273 ev., 315 ev., 332 ev., 370, 441
- TM 18, 70, 221, 255 ev., 305, 316 ev., 329 ev., 370, 411 ev., 441, 459
* langgolvig 300 ev.
* latent beeld, zie beeld

* leaf area index 145 ev.
lens 45, 98 ev.
* licht
* - afval, zie stralingsafval
- emittantie 41
- grootheid 42 ev.
- hoeveelheid 42 ev.
* - meter, zie fotometer
- meting 101 ev.
- sterkte 42 ev.
- stroom 42 ev.
* Lidar 12 ev., 58 ev.
* lijn
- detectie 233 ev.
- element, zie lijnobject
* - object 29 ev., 206 ev., 231 ev., 249
* - scanner 57
* low-pass filter, zie filter
luchtfotografie, zie fotografie
luchtverontreiniging 58, 385 ev.
luminantie 43, 98, 103

master 245 ev.
meta-teledetectie 22
Meteosat, 355, 437 ev., 441
* microgolfvenster, zie venster
* microgolven 13, 45 ev., 59, 83, 183 ev., 374 ev., 443 ev.
* midden-infrarood 82
* MIR, zie midden-infrarood
* mixel 68, 235, 290, 370
model
- agrometeorologisch 271 ev.
- CLOUD, zie CLOUD-model
- fenomenologisch 344 ev.
- hydrologisch 262, 303 ev.
- radar, zie radarmodel
- reflectie, zie reflectiemodel
- SAIL, zie SAIL-model
- TERGRA, zie TERGRA-model
* modulatie 129 ev.
* monitoring 12, 273 ev., 287 ev., 315 ev., 333 ev., 342 ev., 355 ev., 375 ev., 378 ev., 409 ev., 446 ev.
* monotemporeel 312 ev.
* MSP, zie MultiSpectrale Fotografie
* MSS, zie MultiSpectrale Scanning
* multilook-techniek 139 ev., 290
multisensor 14
* multispectraal 13 ev., 90 ev., 212 ev., 220, 229 ev., 312 ev., 325 ev., 370 ev.
* multispectrale
* - aftasting 13 ev., 108, 111 ev., 146 ev., 237 ev., 242 ev., 255 ev., 305 ev., 325 ev., 332 ev., 346 ev., 389, 455
* - classificatie 212 ev.
* - fotografie 18, 55 ev., 108, 328 ev., 399 ev., 409 ev., 423, 440, 455
* - scanning, zie multispectrale aftasting
multistage 14
* multitemporeel 90 ev., 111 ev., 156, 252, 312 ev., 325 ev., 334

* nabij-infrarood 26, 80 ev., 99 ev., 116 ev., 146 ev., 387 ev., 399 ev., 410 ev., 424, 452, 455 ev.
nabuur 212 ev.
- volle 213 ev.
natuurbescherming 341 ev.
negatiefprocédé 97 ev.
* NEP, zie 'noise equivalent power'
* netwerk 213 ev.
* NIR, zie nabij-infrarood
NOAA/AVHRR 272 ev., 355, 437, 441
* noise equivalent power 63 ev.
Normalized Vegetation Index 156 ev., 273 ev.
NVI, zie Normalized Vegetation Index

* objectparameter 28, 31, 170 ev.,

176 ev., 374 ev.
off-nadir-viewing 122, 356
omvalling 238 ev.
onderscheidbaarheid 69
ontwikkelproces 52 ev.
ooggevoeligheidscurve, zie fotopische curve
oogstvoorspelling 82, 275 ev.
* opaciteit 92 ev.
* openingshoek, zie Instantaneous field of view
operatie, zie filter
- globaal 224 ev.
- lokaal 224 ev.
oplossend vermogen, zie resolutie
optische lijn 53 ev.
* optische venster, zie venster
opto-mechanische
* - detectie, zie detectie
* - scanner, zie scanner
* oriëntering
* - inwendig 237 ev.
* - uitwendig 238 ev.
overspraak 130

pad 214 ev.
* panchromatisch 121
* panchromatische film, zie film
* panoramische vertekening, zie vertekening
* parallax 89 ev., 243 ev., 425 ev.
- bewegings, 425 ev.
- dynamische, 425 ev.
- statische, 425 ev.
* - echo, zie echoparallax
parameter, zie object- en sensorparameter
* paspunt 147 ev., 245 ev., 335
* passieve sensor, zie sensor
* patroon 229, 343 ev., 368 ev., 374 ev., 420 ev.
* - ruimtelijk 205, 309 ev., 328 ev., 345 ev., 354 ev., 389 ev.
* - spectraal 16, 205, 344 ev.
* patroonherkenning 9 ev., 62, 205, 219 ev., 229 ev., 417 ev.
permittiviteit 189 ev.
pitch 238 ev., 335
* pixel 16, 29, 46 ev., 61 ev., 115 ev., 140, 176 ev., 205 ev., 230 ev., 251 ev., 256 ev., 273 ev., 290 ev., 335 ev., 342 ev., 375 ev.
- GAC 273 ev.
- LAC 273 ev.
- PSG 273 ev.
* pixelwaarden 27 ev., 65 ev., 156 ev., 200, 219 ev., 251, 430 ev., 459 ev.
plaatsbepaling 237 ev.
* Planck's stralingswet, zie stralingswet
polarimetrie 297, 448 ev.
* polarisatie 35, 44 ev., 166 ev., 189 ev., 297, 373 ev., 378 ev., 445 ev.
projectie
- centrale 238 ev.
- cylindrische 238 ev.
- optische 238 ev.
pseudo-kleuren 55, 219 ev., 418 ev.
* puls 129 ev., 243 ev., 443 ev.
* - breedte 138 ev.
* - herhalingsfrequentie 131, 138, 449
- compressie, 443 ev.
* punt
* - doel 126 ev.
* - object 206 ev.
* - operatie 222 ev.
- spreidingsfunctie 223
* pushbroom-scanner 115, 121 ev., 242 ev.

* radar 12 ev., 26 ev., 45 ev., 60 ev., 125 ev., 163 ev., 237 ev., 446 ev.,
* - beeld 172, 178 ev., 234, 287 ev., 337 ev., 367 ev., 373 ev.
* - doorsnede 27 ev., 127 ev., 163 ev.
* - differentiële 163 ev.

* - echo, zie radarreflectie
* - formule 126 ev., 163 ev.
- letterband nomenclatuur, 452
- model 170, 183, 198 ev., 375
* - ontvanger 126 ev.
* - principe 125 ev.
* - reflectie 59, 83, 125 ev., 164 ev., 178 ev., 189 ev., 287 ev., 375
* - schaduw 175 ev., 194 ev., 243 ev., 379, 369, 431
* - signatuur, zie signatuur
- systeem 126 ev.
* - vergelijking, zie radarformule
* - verstrooiing, zie radarreflectie
* - verstrooiingscoëfficiënt (gamma) 198 ev., 287 ev., 374
* radiantie 24 ev., 42 ev., 66, 118 ev., 150
* radiometer 44, 105 ev., 146 ev., 456
* radiometrie 90 ev., 125 ev., 289 ev., 399 ev.
* radiometrische resolutie, zie resolutie
* radiometrisch scheidend vermogen, zie scheidend vermogen
* rand-detectie, zie detectie
* rasteren 257 ev.
* rasterformaat 213 ev., 245 ev., 255 ev., 419 ev.
* raster-overlay-structuur 259 ev.
* RBV, zie 'Return Beam Vidicon'
receptor 51 ev., 87 ev.
red edge 97, 386, 397 ev.
referentie
* - object 26
* - paneel 107 ev., 150 ev., 399 ev.
* reflectie 14, 24 ev., 55, 76 ev., 81, 100 ev., 104, 114, 130, 150 ev., 193 ev., 314 ev., 344 ev., 397 ev., 438, 453
* - coëfficiënt 26, 47, 219 ev., 300 ev., 399 ev.
* - diffuus 165 ev.
* - factor, zie reflectiecoëfficiënt
* - model 157 ev.
* - percentage 26, 151 ev., 456
* - speculair 165 ev.
* reflectief-infrarood 38
region growing 224, 230
* remote sensing 1, 9 ev., 21 ev.
- concept 30 ev.
residu 246 ev.
* resolutie (scheidend vermogen), 44 ev., 53 ev., 74, 95, 421 ev., 435, 437 ev., 446 ev.
* - fenomenologische 69 ev., 421
* - geometrische, zie ruimtelijke resolutie
* - radiometrische 44 ev., 61 ev., 88 ev., 140, 180 ev., 346, 391, 421
* - ruimtelijke spatiële 44 ev., 53, 59 ev., 77, 88, 116 ev., 140, 240 ev., 273 ev., 289 ev., 316 ev., 328 ev., 332 ev., 346 ev., 355 ev., 391, 440, 443 ev.
* - spectrale 44 ev., 56, 121 ev., 346, 355 ev., 391, 399 ev.
* - temporele 44 ev., 70, 276, 355 ev.
* resolutiecel 61, 130 ev., 163 ev., 230 ev., 241 ev., 315 ev.
* resolutie-element, zie resolutiecel
restitutie 245 ev.
retinale dispariteit, 426 ev.
* Return Beam Vidicon 56 ev.
* RMS-granularity 93 ev., 194 ev., 433 ev.
roll 238 ev., 335
* RS, zie Remote Sensing
* ruimtelijke resolutie, zie resolutie
* ruimtelijk
- kenmerk, zie kenmerk
* - scheidend vermogen, zie

scheidend vermogen
* ruis 63 ev., 92 ev., 114 ev., 219 ev., 232, 263 ev., 420, 434
- ecologische 288 ev.
- fotografische 92 ev., 433
* - thermische 114 ev.
* ruwheid 165 ev., 190 ev.

SAIL-model 158 ev.
* SAR, zie synthetische apertuur radar
* scanner, zie lijnscanner
* - opto-mechanische 115 ev., 239 ev.
* scatterometer 60, 180 ev., 201, 287 ev., 446
* schaal 89, 101 ev., 240 ev., 346, 355, 367 ev., 376 ev., 387 ev., 400, 408 ev., 430 ev.
* scheerhoek 176 ev., 377 ev.,
* scheidend vermogen, zie resolutie
* segmentatie, zie beeldsegmentatie
* semantiek/semantisch 216
* sensitometrie 94 ev.
* sensitometrische curve, zie karakteristieke curve
* sensitometrische gevoeligheid, zie gevoeligheid
* sensor 9 ev., 22 ev., 36 ev., 53 ev., 113 ev., 237 ev., 255 ev., 277 ev., 347, 373, 417 ev., 425, 444 ev.
* - actief 12, 113 ev., 378 ev., 420
* - parameter 31, 183 ev., 375, 440
* - passief 12, 113 ev., 420
* Sideways Looking Airborne Radar 138 ev., 176 ev., 240 ev., 369 ev., 373 ev., 431
* Sideways Looking Radar 136 ev., 184 ev., 225 ev., 287 ev., 332 ev., 373 ev., 443 ev.
* signaal-ruisverhouding (S/N) 106 ev., 221 ev., 435
* signatuur
* - radar 137 ev., 167 ev., 176 ev., 193, 288
* - spectrale 77, 151 ev., 205, 235, 276 ev., 345, 353, 386 ev., 411 ev., 441
* - temporele 152 ev., 168 ev., 276 ev., 288
* SLAR, zie 'Sideways Looking Airborne Radar'
slave 245 ev.
* SLR, zie 'Sideways Looking Radar'
sluiter 100 ev.
- centraal 100 ev.
- spleet 100 ev.
* snelheid (van een film), zie sensitometrische gevoeligheid
S/N-ratio, zie signaal-ruisverhouding
Sourcescat 186 ev.
* spatiële resolutie, zie resolutie
* spectraal
* - band, zie spectrale band
- kenmerk, zie kenmerk
* - scheidend vermogen, zie scheidend vermogen
* spectrale
* - band, zie band
* - gevoeligheid, zie gevoeligheid
* - resolutie, zie resolutie
* - signatuur, zie signatuur
- uitkomen 275
spectrometer 18, 80 ev., 152 ev., 453 ev., 455 ev.
* spectroradiometer 107 ev.
* speculaire reflectie, zie reflectie
* spikkel 139 ev., 164, 176, 289 ev., 377
split-and-merge 172, 225, 230
SPOT 121 ev., 234 ev., 243 ev., 255 ev., 305 ev., 331 ev., 355, 368 ev., 411 ev., 430, 441
SRF, zie 'Systematic Reconnaissance Flight'
* Stefan-Boltzmann's stralingswet, zie stralingswet
* stereoscopie 108, 244, 369 ev.,

389, 425 ev., 450
stortplaats 407 ev.
* straler
* - isotrope 126 ev.
* - Lambertse 42, 164 ev., 193 ev.
* stralings
* - afval 98 ev., 150 ev., 400 ev.
* - emittantie 25, 40 ev.
* - energie 25 ev., 42 ev., 114 ev., 150 ev., 299 ev.
* - energiestroom 42 ev.
- grootheid 14, 42 ev.
* - meter, zie radiometer
* - sterkte 36 ev.
* - stroom 92 ev.
* stralingswet
* - Kirchoff's 41
* - Planck's 24 ev.
* - Stefan-Boltzmann's 40 ev.
* - Wien's 40 ev.
* strooilicht 98 ev., 150 ev.
* structuurbouwsteen 229 ev.
* subtractieve kleuren, zie kleuren
* synergie 378
* synopsis 9, 10, 66, 111 ev., 349, 358, 412
* synthetische apertuur radar (SAR) 332 ev., 431, 443 ev.
Systematic Reconnaissance Flight 56 ev., 356

* TC, zie 'true colour'
teledetectie, zie Remote Sensing
* temporele
- kenmerk, zie kenmerk
* - resolutie, zie resolutie
* - signatuur, zie signatuur
TERGRA-model 300 ev.
* terreinmodel
* - digitaal 242 ev., 259 ev.
* textuur 172, 230 ev., 368, 375, 389, 420 ev.
* - analyse 16, 235, 348, 375 ev., 449
* - maat 29, 212, 376
Thematic Mapper, zie Landsat-TM
* thematiek/thematisch 11, 205 ev., 237 ev., 255, 333 ev.
* thematische beslisregel, zie beslisregel
* thermische ruis, zie ruis
* thermisch-infrarood 25 ev., 38 ev., 83, 114 ev., 264 ev., 387 ev., 400, 437 ev.
* thermografie 19, 58, 299 ev.
* TIR, zie thermisch-infrarood
* TIR-scanner 13, 112 ev., 250, 264 ev., 328 ev., 409 ev.
* topologie/topologisch 16, 30, 205 ev., 231
* topologische beslisregel, zie beslisregel
* trainings
* - pixels 207 ev.
* - set 159 ev., 345 ev., 459 ev.
* transmissie 37 ev., 52 ev., 92 ev., 103, 150 ev., 184 ev., 379 ev., 445
trendfunctie 245 ev.
* true colour film, zie film

* uitwendige oriëntering, zie oriëntering
* ultraviolet (UV) 37 ev.

variantie-verhouding toets 247 ev.
* vectorformaat 214 ev., 233 ev., 255 ev., 419 ev.
* vector-overlay-structuur 259 ev.
* vegetatie-index 156 ev., 273 ev., 312 ev., 344 ev., 355, 385 ev., 419
vegetatiekartering, zie kartering
veldsegment, zie vlakobject
* venster 29, 37 ev., 206 ev., 231 ev., 376, 428
* - optische 24 ev., 36 ev., 343 ev., 431 , 437 ev., 441
* - microgolf 24 ev., 36 ev., 47, 70, 125 ev., 195
* vensteroperatie 211 ev.
verbeeldingsproces 87 ev., 348
verdamping 300, 313 ev., 328 ev.

verdampings
- kartering 302 ev., 313, 320
- warmte 300 ev., 314 ev.
verlichtingssterkte 53 ev.
* vermogen 46, 123
* vermogensdichtheid 127 ev.
versterking 64 ev., 127
* vertekening
* - panoramische 241 ev.
* vignettering 98 ev., 150 ev.
* VIS, 'visible', zie zichtbaar licht
vitaliteit 181, 388 ev., 394 ev.
* vlakobject 29, 206 ev., 232 ev., 249

* warmtebeeld 25 ev., 299 ev., 328 ev., 409 ev.
warmtestraling 40 ev.
warmtestroom 300 ev.
- latente 300 ev.
* water
* - absorptiebanden 80, 388
- beheer 309 ev.
- diepte 311
- huishouding 299 ev.
weersatelliet 273, 437
* Wien's verschuivingswet, zie stralingswet

yaw 238 ev.

* zendantenne, zie antenne
* zender 26, 126 ev.
zendvermogen 126
* zichtbaar licht 38 ev., 51, 74, 146 ev.
* zwaaiscanner 113 ev.
* zwart lichaam 24, 40, 114