

## 10 De radarreflectie van gewassen

G.P. de Loor

### 10.1 Inleiding; definities

De *radardoorsnede*  $\sigma$  (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

$$\sigma^0 = \sigma/A_k \quad (10.1)$$

waarbij  $\sigma$  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*  $\gamma$ . Deze  $\gamma$  is de radardoorsnede per eenheid van in de zendrichting geprojecteerd oppervlak.

$$\gamma = \sigma A_i \text{ waarin } A_i = A_k \sin \theta_i \quad (10.2)$$

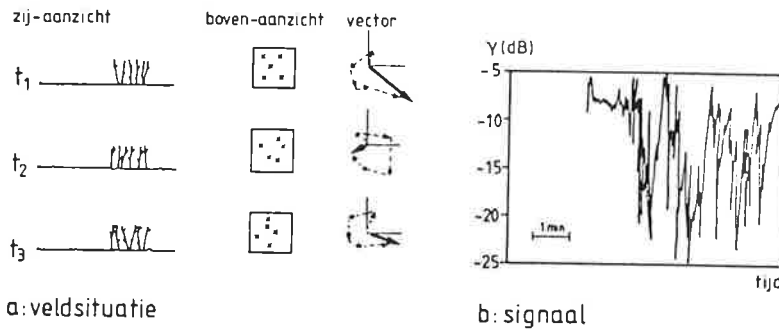
De relatie tussen  $\sigma^0$  en  $\gamma$  wordt dan gegeven door:

$$\sigma^0 = \gamma \sin \theta_g \text{ of } \sigma^0 = \gamma \cos \theta_i$$

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.

10-2 Afhankelijk van de radarreflectie van de invalshoek. I: speculair deel; II: c deel; III: totaal.

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



Willen we  $\sigma^0$  (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  $\sigma^0$  (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).

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

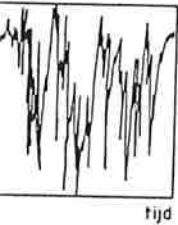
## 10.2 De radarreflectie

### 10.2.1 Hoekafhankelijkheid

Cosgriff et al. (1960) gebruikten ook de radarreflectie (beter: verstrooiingscoëfficiënt)  $\gamma$ , omdat deze grootte 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)

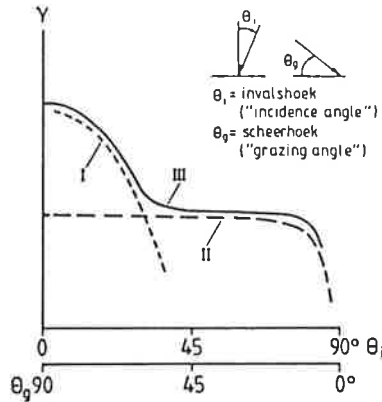
invalshoek  
voor de  
prefereren daar  
aal (scheerhoek)



houden met het  
objecten,  
noemde  
en bladeren)  
strooiing of in  
an steeds  
sterktes  
orzaakt het  
ekle'). Om de  
niermede  
n worden over  
er waar te  
de

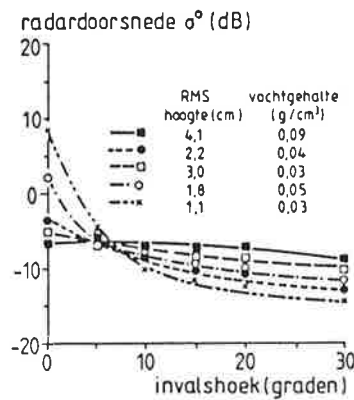
er:  
constant bleef  
natuurlijke  
achter lang niet  
ding worden

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



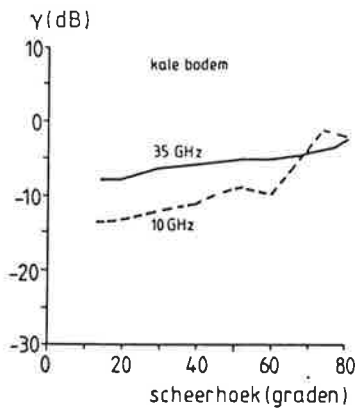
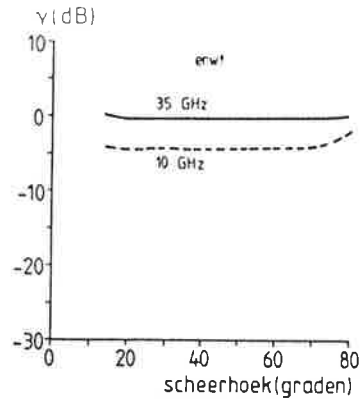
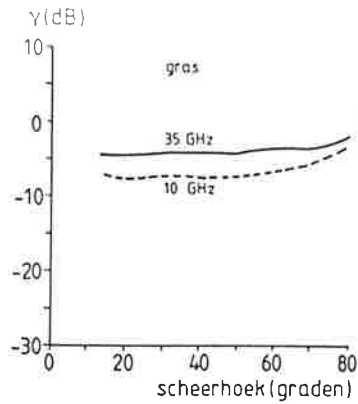
beschreven als bestaande uit twee componenten: een *speculair* en een *diffuus* deel (zie figuur 10-2). Het speculaire deel is belangrijk bij loodrecht inzien, terwijl het diffuse deel belangrijk is voor de overige hoeken. Hoe 'ruwer' een oppervlak wordt, hoe belangrijker het diffuse deel wordt, terwijl 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  $\frac{1}{4} \lambda$  blijven. Dit kan bijv. betekenen dat een oppervlak dat in de X-band ( $\lambda = 3$  cm) 'ruw' is in de L-band ( $\lambda = 25$  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  $\theta_p$ . 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 Seizoensafhankelijkheid

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  $\theta_p = 30^\circ$ . 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.

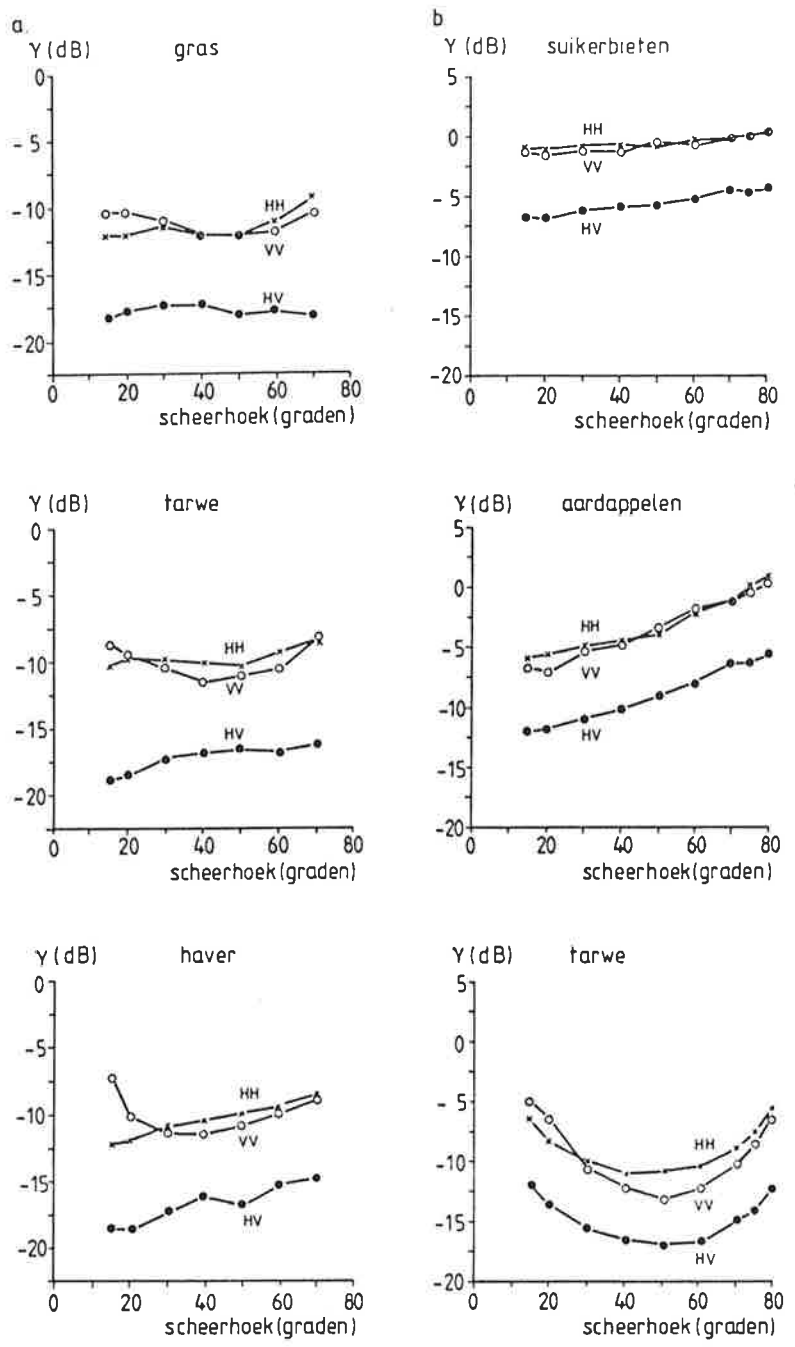
\* ROVE staat voor 'radaronderzoek vegetatie'. In deze werkgroep werken onderzoekers van diverse Nederlandse instellingen samen.

10-5 Voorbeelde data-series gemeten door het ROVE-team voor horizontale (HH), verticale (VV) en ' (HV) polarisatie, 1-a: 14 augustus 1981, b: juni 1981.



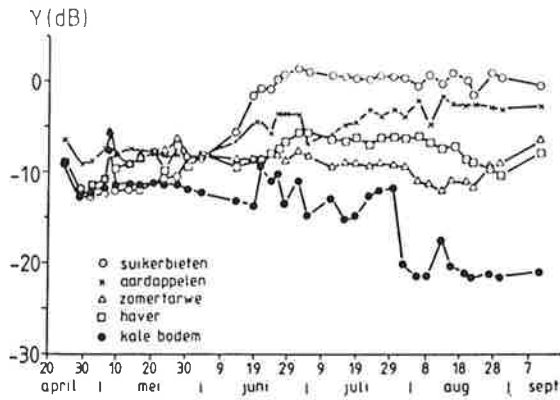
k van de  
 oor gras (zie  
 al gewassen,  
 30°. Tot begin  
 speelde de  
 tussen de  
 e schrijven aan  
 lke pieken  
 atiedek, maar  
 . Zoals we uit  
 ein, in de orde  
 gewassen of  
 or de radar

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.



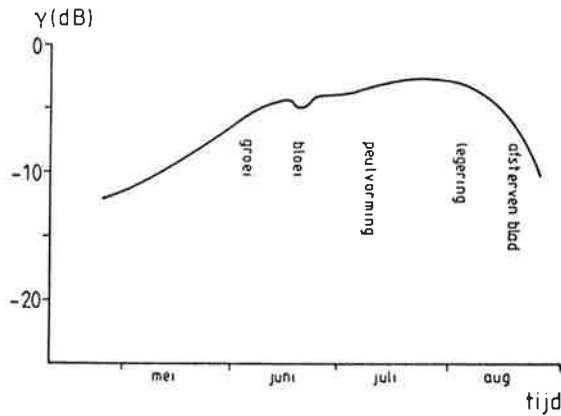
Vele tijdseries aan metingen staan ons thans ter beschikking door het werk van het Nederlandse ROVE-team. Analyse van deze curves toonde aan dat de vorm van deze curves typisch is voor een bepaald gewas. Groeistadia kunnen in zo'n curve worden aangegeven (zie figuur 10-7). Dit algemene gedrag kan van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

10-6 Seizoensafhankelijkheid van de radarreflectie, ROVE-data, 1980, horizontale polarisatie,  $\theta_0 = 30^\circ$ , 10 GHz.



10-9 Algemene vorm van de temporele radarsignatuur voor gewassen. S: suikerbieten; P: aardappelen; W: tarwe; O: haver. a: bloei; b: pluimer komen; c: begin afsterven bladeren, begin van legering. 10 GHz,  $\theta_0 = 50^\circ$ , verticale polarisatie

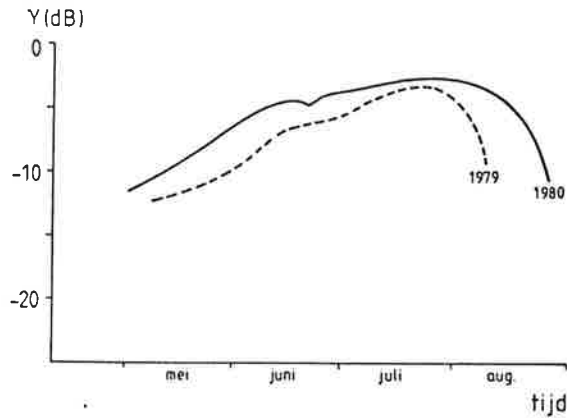
10-7 De temporele radarsignatuur voor erwten. VV-polarisatie,  $\theta_0 = 20^\circ$ , 10 GHz.



10-10 Temporele signatuur voor drie gewassen in Kansa (USA), 17 GHz,  $\theta_0 = 50^\circ$  = verticale polarisatie (bron: Ulaby & Bare, 1986). Opm.: as voor  $\sigma^0$  is lineair en niet in dB

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,  $\theta_0 = 20^\circ$ , 10 GHz.



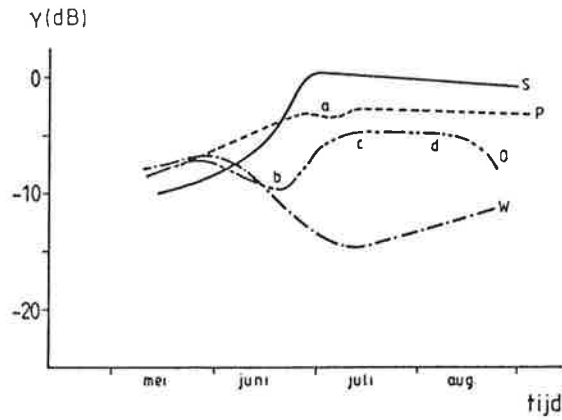
10.2.4 Frequentieafhankelijkheid

10-9 Algemene vorm van de temporele radarsignatuur voor vier gewassen.

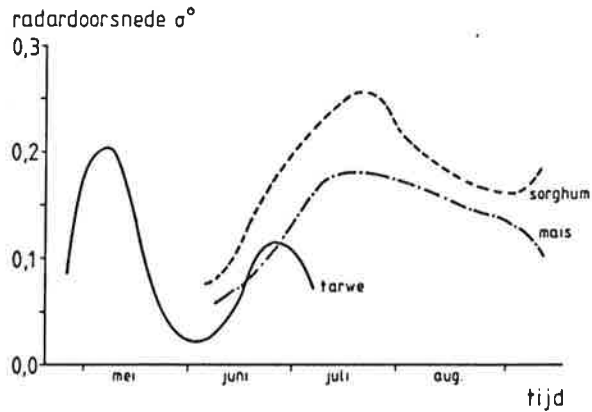
S: suikerbieten; P: aardappelen; W: tarwe; O: haver.

a: bloei; b: pluimen komen; c: begin afsterven bladeren; d: begin van legering.

10 GHz,  $\theta_g = 50^\circ$ , verticale polarisatie.



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

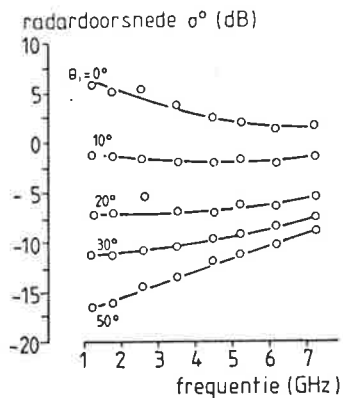


buitenland (zie figuur 10-10), dan blijkt ook daar een zelfde vorm gevonden te worden, alleen zijn er verschillen t.a.v. tijdsduur en de plaats in de tijd. Dit is verklaarbaar, aangezien de groei van een gewas afhankelijk is van de plaats op aarde en de daar geldende meteorologische condities. Een en 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 microgolfg gebied 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 belangrijkste). 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).

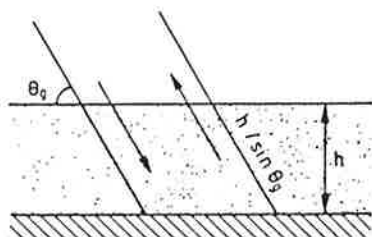
10-11 Frequentie-afhankelijkheid van de radardoorsnede voor een combinatie van gewassen, HH-polarisatie (bron: Ulaby & Bare, 1978).



### 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  $\text{kg/m}^3$ . Met  $\eta$  de doorsnede per volume-eenheid ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ ),  $\alpha$  de verzwakking per meter en  $N$  het aantal druppeltjes per  $\text{m}^3$ , krijgen we:  $\eta = N\sigma$  ( $\text{m}^{-1}$ ) en  $\alpha = NQ$  ( $\text{m}^{-1}$ ), 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:



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

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

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

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:

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

waarbij  $G(\theta)$  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:

$$\gamma = (\sigma/2Q) \cdot [1 - \exp(-DWh/\sin \theta_g)] + G(\theta) \cdot \exp(Km_s) \cdot \exp(-DWh/\sin \theta_g) \quad (10.6)$$

Deze formule kunnen we ook schrijven als:

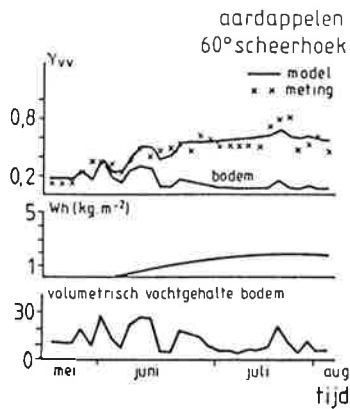
$$\gamma = C \cdot (1 - \tau) + \gamma_{\text{bodem}} \cdot \tau \quad (10.7)$$

met  $\tau$  de 'doorlatendheid' van het vegetatiedek.

Bovenstaande formule bevat naast de grootheden  $W$ ,  $h$  en  $m_s$ , die in het veld gemeten kunnen worden, de constanten:  $C$ , 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  $G(\theta)$ ,  $C$  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  $\sigma^{\circ}$  ( $\gamma$ ) 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  $\gamma$  ( $\sigma^{\circ}$ ) 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.

n  
urigheid van een  
onafhankelijke  
worden gedaan  
ere kant zagen  
 $\gamma$  ( $\sigma^0$ ) tussen  
van  
ng moeten  
andsat en SPOT  
mogelijk door  
e 2,5 dB) en zelfs  
ordt de variatie  
r volgende op  
graaf 14.5)  
aald.  
bepaald en met  
Succes-

sleutels voor het  
lijkt de  
niet. De invloed  
is zal men  
n heeft in een

delled as a water

atic  
ARSeL

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

**Remote Sensing,  
theorie en toepassingen  
van landobservatie**

Dynamiek, inrichting en beheer van landelijke gebieden 2



**Pudoc** Wageningen 1990