NN31545.1942

ICW Nota 1942
januari 1989

nota

instituut voor cultuurtechniek en waterhuishouding, wageningen

DETEKTIE VAN BODEMVOCHT MET X-BAND SLAR OPNAMEN IN EEN ZANDGEBIED

LANDBOUWHOGESCHOOL
Bibliotheek Cultuurtechniek,
Hydraulica en Afvoerhydrologie, en
Weg- en Waterbouwkunde en Irrigatie
Nieuwe Kanaal 11, Wageningen

Frank P. Hagedoorn

CENTRALE LANDBOUWCATALOGUS
0000 0419 7691

32/017(1942)

Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatiemiddelen, dus geen officiële publikaties.
Hun inhoud varieert sterk en kan zowel betrekking hebben op een eenvoudige weergave van cijferreeksen, als op een concluderende discussie van onderzoeksresultaten. In de meeste gevallen zullen de conclusies echter van voorlopige aard zijn omdat het onderzoek nog niet is afgesloten.
Bepaalde nota's komen niet voor verspreiding buiten het Instituut in aanmerking

NN 31545 2048

NOTA/1942

INHOUD

	Blz.
VOORWOORD	
1. INLEIDING	1
2. ACHTERGRONDEN VAN DE RADARWAARNEMING	3
2.1. Algemeen	3
2.1.1. Inleiding	3
2.1.2. Toepassingen van radar	3
2.1.3. Amplitude, polarisatierichting en frekwentiebanden	4
2.3. Radarwaarneming	6
2.3.1. Indeling van radarmeetsystemen voor aardobservatie	6
2.3.2. De radarvergelijking	7
2.4. SLAR-meetsysteem	8
2.4.1. Ruimtelijke resolutie	8
2.4.2. Opbouw van een SLAR-beeld	10
2.5. Interaktie tussen mikrogolven en het kale bodemoppervlak	12
3. HET RADAREXPERIMENT	20
3.1. Literatuur radaronderzoek naar de gebiedsgewijze bepaling van het bodemvochtgehalte	20
3.2. Werkwijze	21
3.2.1. Vluchtplan en selektie van proefpercelen	21
3.2.2. Veldwerk en verwerking van veldgegevens	23
3.2.3. Projektie van de digitale topografische kaart over de radarbeelden	25
3.2.4. Bepaling van het gemiddelde perceelsvochtgehalte	26
3.2.4.1. Bepaling van de gemiddelde backscatter en de invalshoek per perceel	26
3.2.4.2. Het model van ATTEMA, VAN KATS en KRUL	27
3.2.4.3. Bepaling van de mikroruwheid van de proefpercelen	28
3.2.5. Visuele interpretatie van de radarbeelden	31
3.2.5.1. Inleiding	31
3.2.5.2. Werkwijze	31
3.3. Resultaten en diskussie	32
3.3.1. Perceelsvochtgehalte en de backscatterwaarden	32
3.3.2. Visuele interpretatie van de radarbeelden	34
3.4. Konklusies en aanbevelingen	34
SAMENVATTING	38
LITERATUUR	40
BIJLAGE	

CENTRALE LANDBOUWCATALOGUS
0000 0361 5743

ISNS 20480

BIBLIOTHEEK
LANDBOUWUNIVERSITEIT
WAGENINGEN

NOTA/1942

VOORWOORD

In de periode februari tot oktober 1988 heb ik op het ICW voorliggend onderzoek verricht.
Mijn verblijf op het ICW heb ik als een prettige periode ervaren waar ik met plezier aan terugdenk. Langs deze weg wil ik dan ook alle medewerkers van de "remote-sensing club" bedanken voor de aangename (werk)sfeer.
Tevens wil ik mijn dank laten uitgaan naar G. Nieuwenhuis en H. Thunnissen voor hun adviezen en W. Droesen voor de prettige samenwerking.

Frank Hagedoorn

1. INLEIDING

Voorliggend verslag is gemaakt als onderdeel van het projekt "Operationalisering Remote Sensing voor de Landinrichtingspraktijk". De doelstelling van dit projekt is vast te stellen of, en in welke mate remote-sensing technieken behulpzaam kunnen zijn in de voorbereidingsfase van landinrichtingsprojekten. Hierbij wordt in het bijzonder gedacht aan de volgende inventarisaties:

- Bodem- en grondwatertrappenkartering
- Hydrologisch onderzoek
- Vegetatiekartering
- Cultuurtechnische inventarisatie

Voorgaande jaren is reeds een aantal remote-sensing vluchten met de bovenstaande doelstellingen over het proefgebied Ulvenhout-Galder uitgevoerd (voor de ligging van het proefgebied zie Paragraaf 3.2).
In eerste instantie is toen getracht om de punten genoemd bij de eerste drie gedachtenstreepjes meer inhoud te geven (DROESEN en VAN LIESHOUT, 1988); later is ook de Cultuurtechnische inventarisatie uitgevoerd (JAARSMA, 1989).
Voor het hydrologisch onderzoek waren de resultaten van dien aard dat, ondanks enkele achteraf gekonstateerde tekortkomingen in het veldmeetprogramma, aanleiding bestond om het experiment in enigzins gewijzigde opzet te herhalen.
De doelstelling van het hydrologische remote sensing onderzoek in het vroege voorjaar is uiteindelijk lokaties in het veld aan te wijzen, welke gevoelig zijn voor wateroverlast.
Een onderdeel van deze wateroverlast-inventarisatie vormt de bepaling van het bodemvochtgehalte aan de hand van remote sensing beelden. Tot op heden is in dit projekt hiervoor alleen gebruik gemaakt van optische sensorsystemen, welke gevoelig zijn voor straling in het reflektieve en thermische golflengtegebied van het elektro-magnetische spektrum. In het voorjaar van 1988 zijn multispektrale en thermische opnamen alsmede false color foto's gemaakt en is een radarvlucht uitgevoerd met de SLAR van het Nationaal Lucht- en Ruimtevaart laboratorium (NLR).
De resultaten van de vochtkartering met behulp van multispektrale en ther-

mische beelden afzonderlijk en in kombinatie zijn vastgelegd door DROESEN (1989).
De doelstelling van het radarexperiment was om na te gaan of radargegevens extra informatie bevatten of wellicht als aanvulling kunnen dienen op de informatie over bodemvocht welke uit multispektrale beelden afgeleid wordt. Een ander aspekt van dit experiment vormt het testen van de mogelijkheden van de verschillende opnametechnieken onder praktijkomstandigheden.
Tot op heden zijn radarexperimenten vooral uitgevoerd onder doelbewust gekozen gunstige randvoorwaarden, zodat de invloed van verstorende elementen beperkt was. Daarom zijn in Nederland vooral experimenten uitgevoerd in de Flevopolders of op de grootschalige kleigebieden. Meer gekompliceerde omstandigheden, zoals die in de landinrichtingspraktijk op het oude land en dan in het bijzonder op de zandgronden regelmatig voorkomen, zijn te vinden in het proefgebied Ulvenhout-Galder.
Het proefgebied is in grote lijnen representatief voor de nederlandse zandgronden. Een gebiedsbeschrijving van het herinrichtingsgebied is te vinden bij DROESEN en VAN LIESHOUT (1988). Kenmerkend voor dit gebied is dat de perceelsgrootte aanzienlijk varieert en de perceelsgrenzen vaak grillig zijn. Bovendien is ook de variatie in bodemvochtgehalte van de toplaag niet alleen tussen percelen, maar ook binnen een enkel perceel vaak aanzienlijk.
Hoofdstuk 2 gaat nader in op algemene achtergronden van de radarwaarneming; in hoofdstuk 3 komen de opzet, uitwerking en resultaten van het experiment ter sprake.

2. ACHTERGRONDEN VAN DE RADARWAARNEMING

2.1. ALGEMEEN

2.1.1. Inleiding

De aardatmosfeer bezit drie vensters waardoor het mogelijk is elektro-magnetische golven van het aardoppervlak op te vangen zonder dat de atmosfeer de straling te zeer absorbeert of verstrooit. Het eerste venster van ongeveer 0.3-3 µm, ligt in het zichtbare licht, het nabij en deels het midden infrarood; de waarneming bestaat hier vooral uit het registreren van gereflekteerde zonnestraling. Dit houdt impliciet in dat waarneming alleen overdag kan plaatsvinden onder gunstige weeromstandigheden.
Het thermisch venster is het volgende golflengtegebied van 8-14 µm; dit is het gebied waar de eigen stralingsemissie van de aardse objekten hun maximale intensteit hebben. Waarnemingen in dit venster kunnen ook 's nachts geschieden. Een derde venster ligt in het mikrogolfgebied (1 mm - 1 m). Vanwege de grote golflengte hebben atmosferische omstandigheden in principe weinig invloed op waarnemingen in dit venster; de mikrogolfwaarneming wordt dan ook wel een "all-weather capability" toegeschreven.
De interakties van elektro-magnetische straling uit de drie genoemde golflengtebanden met de bodem is het gevolg van drie fysisch verschillende processen in of aan de toplaag van de bodem. Met de registratie van de stralingsintensiteit in de drie vensters worden zodoende verschillende gegevens vastgelegd over het bodemoppervlak.

2.1.2. Toepassingen van radar

Het gebruik van radar bestond oorspronkelijk uit een vroegtijdige signalering van schepen en vliegtuigen. In de loop van de tijd is het aantal toepassingsgebieden verder uitgegroeid, zoals blijkt uit het onderstaande:

- Bosbouw : inventarisatie van bos en boomgrootten, bos monitoring
- Oceanografie: zeeijslokalisering, olieopsporing, bestudering van oceaanstromingen
- Landbouw : landgebruiksinventarisatie, vegetatiekartering, gewasklassifikatie

- Geologie : detektie van breuken, beschrijving van formaties
- Hydrologie : bepaling van stroomgebieden en sneeuwbedekkingsgraad en schatting van oppervlakkige afvoer en bodemvochtgehalten

Deze toepassingen stellen ieder hun eigen eisen aan de te gebruiken radar-waarnemingsapparatuur wat betreft de optimale ruimtelijke resolutie van de beelden, de meest geschikte golflengte, de opname-herhalingstijd, de polarisatierichting en de invalshoek van de radar. Deze eisen kunnen voor bepaalde toepassingen zeer specifiek zijn. De invalshoek is de hoek met de vertikaal.

2.1.3. Amplitude, polarisatierichting en frekwentiebanden

De relatie tussen de golflengte (λ) en de frequentie (f) in vacuüm wordt gegeven door:

$$c = \lambda \cdot f \quad (m.s^{-1}) \qquad (1)$$

waarin c = snelheid van het licht ($m.s^{-1}$)

Een golf kan voorts worden gekarakteriseerd door zijn amplitude (figuur 1). Bij de wisselwerking tussen twee golven van gelijke frekwentie is de fase-verschuiving ϕ van belang: de verschilhoek tussen twee punten welke zich in hetzelfde trillingsmoment van de golfbeweging bevinden (figuur 1).

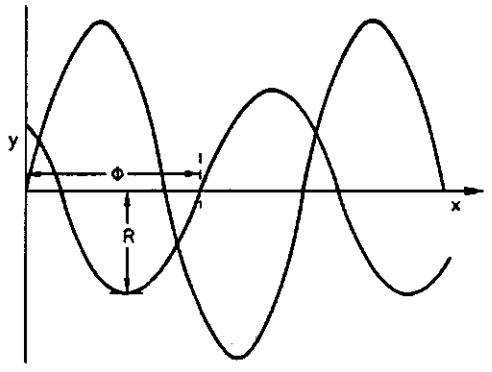


fig. 1. Faseverschuiving ϕ tussen twee golven met gelijke frekwentie. De amplitude van een van de golven wordt aangegeven door R

Een elektromagnetische golf wordt gedacht te bestaan uit een elektrische en een magnetische komponent, welke beide een golfbeweging uitvoeren. De beide golfbewegingen vinden plaats in onderling loodrechte vlakken en tegelijkertijd loodrecht op de voortbewegingsrichting van de golf. Als de ligging van het trillingsvlak van een van de beide komponenten bekend is, dan is tegelijkertijd dat van de andere bekend.
Door de wisselwerking tussen twee loodrecht op elkaar staande golfbewegingen met een onderlinge faseverschuiving, maar met gelijke frekwentie en welke bovendien hun trilling in een plat vlak uitvoeren, neemt een punt P op tijdstip t deel aan elk van beide golfbewegingen. Door sommatie van elke afzonderlijke elektrische (of magnetische) komponent van deze golven ontstaat de trillingsrichting (= polarisatierichting) van punt P. De faseverschuiving tussen de golven bepaalt de vorm van het resulterende trillingsvlak. Als de faseverschuiving nul is, dan is de sommatie van twee elektro-magnetische golven een lineaire beweging in een plat vlak.
Bij radar is deze polarisatierichting belangrijk voor de mate van interaktie met het aangestraalde objekt. Het blijkt dat het opgevangen backscattervermogen samenhangt met de uitgezonden en ontvangen polarisatierichting (bijv. ULABY et al., 1978). Bij radarsystemen kan HH- en HV- en VV-polarisatie worden onderscheiden, waarbij HV staat voor Horizontaal gepolariseerd uitzenden en Vertikaal gepolariseerd ontvangen. Onder horizontale polarisatie wordt verstaan dat de elektrische komponent van de golf in een horizontaal vlak ligt. De radarwaarneming vindt plaats in een aantal frekwentiebanden (Zie tabel 1).

Tabel 1. Frekwentiebanden van de radarwaarneming

Band	Frekwentie (GHz)	Band	Frekwentie (GHz)
P	0.225 - 0.39	X	5.75 - 10.9
L	0.39 - 1.55	K	10.9 - 36.0
S	1.55 - 4.2	V	46.0 - 56.0
C	4.2 - 5.75	W	56.0 - 100.0

(naar Ulaby et al., 1981)

2.3. RADARWAARNEMING

2.3.1. Indeling van radarmeetsystemen voor aardobservatie

Metingen in het mikrogolfgebied kunnen op verschillende manieren geschieden, afhankelijk van de doelstelling van het onderzoek. De mikrogolfwaarneming voor aardobservatie laat zich als volgt onderverdelen:

passief - radiometrie: het meten van de intensiteit van de door de aarde zelf uitgezonden mikrogolven

aktief - radar : RADAR, RAdio Detection And Ranging, zie het navolgende

De radarwaarnemingssystemen voor aardobservatie zijn onder te verdelen in:

1. Niet-beeldvormende radar - scatterometer: dit type radar heeft een smalle antennebundelbreedte en is geschikt voor een nauwkeurige bepaling van de weerkaatsingskarakteristieken van objekten onder verschillende aanstraalhoeken, frequenties en polarisaties.
2. Beeldvormende radar: Het ruimtelijk overzicht dat deze radar verschaft is een belangrijk voordeel. De beeldkwaliteit is belangrijk voor de praktische bruikbaarheid. Een maatstaf hiervoor is ruimtelijke en radiometrische eigenschappen van deze systemen.

De twee belangrijkste radarsystemen voor aardobservatie zijn:

1. - SAR (Synthetic Aperture Radar)
   Bij dit radarsysteem is de ruimtelijke resolutie onafhankelijk van de afstand tot het objekt, zodat ook van grote hoogte een hoog ruimtelijk onderscheidend vermogen mogelijk is.
2. - SLAR (Side Looking Airborne Radar)
   De ruimtelijke resolutie van dit type verschilt "along-track" en "across-track". Hierop gaat paragraaf 2.4.2 nader in. Dit type radar is vooral in vliegtuigplatforms geïnstalleerd.

2.3.2. De radarvergelijking

De relatie tussen het door een willekeurige antenne uitgezonden en ontvangen vermogen wordt door de algemene radarvergelijking gelegd:

$$P_o = \frac{G.P_z}{4.\pi.d^2} \cdot \sigma \cdot \frac{A_o}{4.\pi.d^2} \quad (W) \qquad (2)$$

waarin P_o = ontvangen vermogen van de radarantenne (W)

G = Gainfaktor; de versterking van het signaal als gevolg van het richten van het uitgezonden vermogen door de antennevorm (-)

P_z = uitgezonden vermogen van de radarantenne (W)

A_o = oppervlak van de ontvangstantenne (m^2)

$4.\pi.d^2$ = oppervlak van een denkbeeldige bol met straal d met in het centrum de zend/ontvangst antenne (m^2)

σ = een denkbeeldig oppervlak dat het teruggekaatste vermogen, als dit isotroop over de ruimte wordt verdeeld, ter plaatse van de ontvangstantenne eenzelfde vermogensdichtheid geeft als de vermogensdichtheid welke ter plekke van het (geïsoleerde) objekt daadwerkelijk optreedt (m^2)

Bij aardobservatie worden bepaalde doelen gemeten zoals landbouwgewassen, bossen, zee en bodems. Aangezien dit geen geisoleerde objekten zijn, is het noodzakelijk de radardoorsnede σ vast te leggen per eenheid van oppervlak, zodat de backscatter onafhankelijk wordt van de oppervlakte van het aangestraalde gebied. Hiertoe wordt de differentiële radardoorsnede γ per eenheid van oppervlak geïntroduceerd:

$$\gamma = \frac{\sigma}{A_i} \quad (-) \qquad (3)$$

waarin: $A_i = A \cdot \sin(\alpha)$

De verhouding tussen een uitgangsvermogen P1, bijvoorbeeld het backscattervermogen van een referentiesignaal, en het vermogen van een ontvangstsignaal P2 kan dienen als basis waarin het ontvangen vermogen wordt uitgedrukt.

Op deze wijze is de dimensieloze eenheid Decibel van γ gedefinieerd:

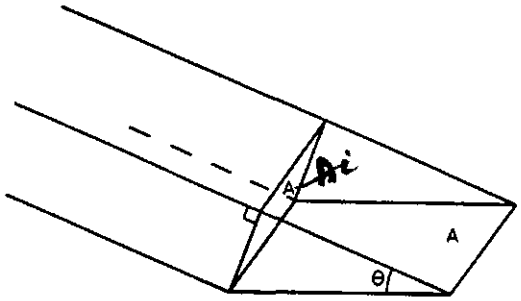


Fig. 2. Geometrie van de backscattereenheid γ (naar HOEKMAN, 1986)

$$\gamma(dB) = 10. \log(\frac{P2}{P1}) \quad (-) \qquad (4)$$

2.4. SLAR-MEETSYSTEEM

Als een remote sensing systeem bruikbaar wil zijn voor de schaal waarop in landinrichtingsprojekten in Nederland gewerkt wordt, dan dient een dergelijk systeem beelden met een redelijke mate van detail aan te leveren. Naast de ruimtelijke resolutie is voor een goede beeldkwaliteit ook de radiometrische resolutie belangrijk: dat wil zeggen de gevoeligheid van de sensor voor verschillen in stralingsintensiteit afkomstig van het objekt. Een radarbeeld vormt zowel wat betreft de radiometrische als de spatiële resolutie een andersoortige weergave van de terreintoestand dan een thermisch of reflektief beeld. In het navolgende wordt hier iets nader op ingegaan.

2.4.1. Ruimtelijke resolutie

Bij de radar wordt onderscheid gemaakt tussen de resolutie evenwijdig aan de vliegrichting (along-track) en loodrecht op de vliegrichting (across-track). Voor een SLAR geldt dat de spatiële resolutie G(along-track) (m) evenredig is met de afstand D (m) in slant range naar het - midden van het - aangestraalde objekt, en de openingshoek β (rad) van de antenne. Onder slant range wordt de afstand verstaan welke de radargolven afleggen naar het aangestraalde objekt.

$$G(\text{along-track}) = \beta \cdot D \quad (m) \qquad (5)$$

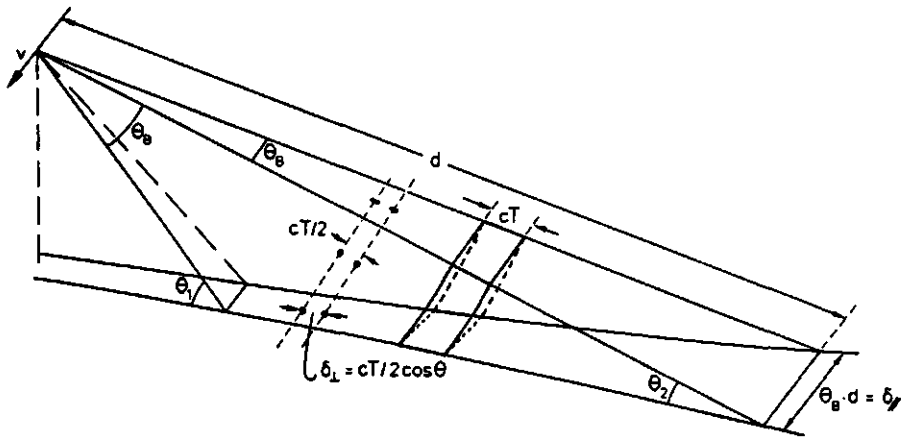


fig. 3. De belangrijkste kenmerken van de SLAR-geometrie. θ geeft de invalshoek aan, voor de overige symbolen zie tekst (naar HOEKMAN, 1986)

Uit deze relatie blijkt dat de resolutie along-track vermindert naarmate de afstand in slant range van de antenne toeneemt.
Het uitgangspunt voor de resolutie across-track van de beeldvormende radar berust op het gebruik maken van het verschil in tijd tussen het uitgezonden en het echosignaal van de verschillende aangestraalde oppervlakken across-track.
De tijdsduur T (s) tussen zenden en ontvangen van een backscatter van een oneindig korte puls van een aangestraald punt bedraagt:

$$T = \frac{2 \cdot D}{c} \quad (s) \qquad (6)$$

De backscatter van een aangrenzend, verder van de antenne verwijderd, punt, wordt een tijd dT later geregistreerd. De extra afgelegde weglengte van het backscattergolf in slant range is dan:

$$2 \cdot dD = dT \cdot c \quad (m) \qquad (7)$$

Een SLAR zendt gedurende een kort tijdsinterval τ een puls uit met een pulslengte $c \cdot \tau$.
Twee objekten kunnen nog net niet van elkaar onderscheiden worden als ze zich in hetzelfde pulspakket ter lengte van $c \cdot \tau$ bevinden:

$$dT \cdot c = \tau \cdot c \quad (m) \qquad (8)$$

derhalve hangt de resolutie across-track in slant range hangt af van τ.
Door invulling van (8) in (7) volgt:

$$dD = \frac{c \cdot \tau}{2} \quad (m) \qquad (9)$$

Deze afleiding laat zien dat de ruimtelijke resolutie across-track van het SLAR-systeem onafhankelijk is van de afstand tot de antenne. Vanwege de optredende hoekafhankelijkheid, varieert de resolutie G over het terrein gemeten (ground range) wel:

$$G(\text{ground, across-track}) = \frac{c \cdot \tau}{2 \cdot \sin(\theta)} \quad (m) \qquad (10)$$

waarin: θ = invalshoek (hoek met de vertikaal)

2.4.2. Opbouw van een SLAR-beeld

Een beeldelement (pixel) in een radarbeeld van de NLR X-band SLAR kan naar voorkeur van de gebruiker 7.5*7.5 m^2 of 15*15 m^2 terreinoppervlak vertegenwoordigen.
Hiernaast heeft elk pixel nog een bepaalde getalwaarde, de zogenaamde pixelwaarde, welke een uitdrukking is voor de geregistreerde stralingsintensiteit, in dit geval de backscatter.
De reflektie van radargolven door een ruw bodemoppervlak vertoont aanzienlijke variatie, zodat ter verkrijging van een betrouwbare backscatterwaarde voor een willekeurig terreinoppervlak het noodzakelijk is een aantal backscattermetingen te verrichten. Dit aantal hangt af van de bemonsteringsfrekwentie van het binnenkomende signaal, de voorwaartse snelheid van het vliegtuig en de pulsfrekwentie.
Door de SLAR worden afhankelijk van de invalshoek hoogstens 15 onafhankelijke weernemingen per beeldelement verricht.
Het door de SLAR aangestraalde oppervlak in het terrein is zowel in ground als slant range variabel, zodat de overlap van de aangestraalde vlakken toeneemt met de afstand in slant range. Zo bedraagt bijvoorbeeld de aangestraalde oppervlakte voor perceel 8, track 6 (zie bijlage 1 voor de invalshoek): resolutie across-track 7.5/sin(58.3) = 9.5 m en resolutie

along-track (D = 1250 m, openingshoek antenne: 10 mrad) 1250*0.01= 12.5 m, zodat de aangestraalde oppervlakte bedraagt: 9.5*12.5 = 118.75 m^2. Dit is ongeveer tweemaal groter dan een beeldelement van 7.5*7.5 m^2. De oppervlakte van de pixels in een beeld komt dus niet overeen met de resolutie van de oorspronkelijke meting, hetgeen wellicht gevolgen kan hebben op de informatie inhoud van het radarbeeld.

Uit de literatuur is bekend (b.v. REEVES et al., 1975) dat de stochastische variatie in de ontvangen backscatter te benaderen is middels een negatieve exponentiele verdeling. Afhankelijk van de gewenste betrouwbaarheid voor de schatting van het weerkaatste vermogen zijn k onafhankelijke backscattermetingen nodig.

De invalshoek in de dataset varieert tussen 30 en 70 graden. Voor de 50 graden invalshoek blijkt door toepassing van vergelijking (10) dat het aantal onafhankelijke waarnemingen k per pixel 11.5 is. Volgens de grafiek in Figuur 4 houdt dit in dat γ voor een 90% tweezijdig betrouwbaarheidsinterval ligt in het interval: $\gamma - 1.5 < \gamma < \gamma + 2.5$.

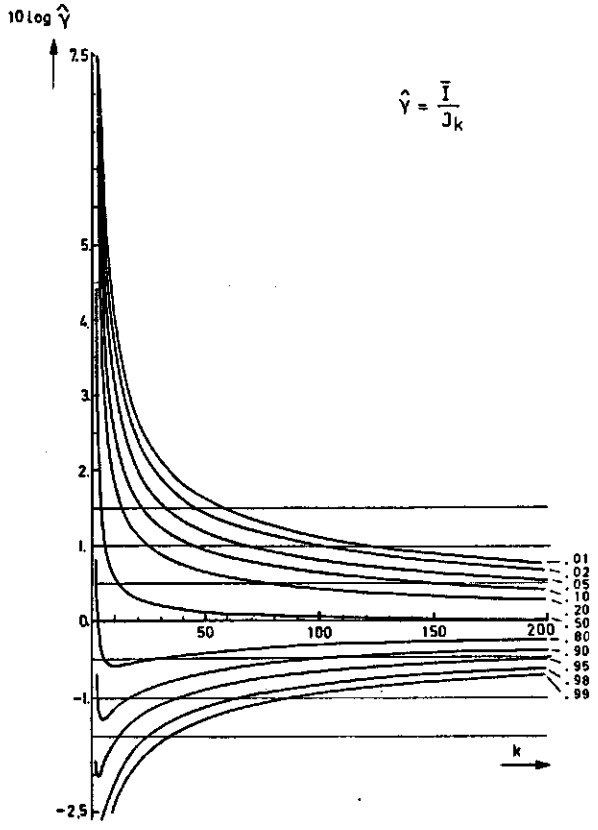


Fig. 4. Kurven voor een konstante overschrijdingskans van de gemiddelde intensiteit van de backscatter gamma voor k waarnemingen (naar HOEKMAN, 1986).

De lengte van dit interval is in de orde van grootte van de variatie in gamma die samenhangt met de te meten grootheid in het veld. Voor een nauwkeurige bepaling van γ zijn tenminste zo'n 200 onafhankelijke waarnemingen nodig en bij voorkeur meer (mondelinge mededeling van DE LOOR). De enige manier om dit te realiseren is door over een aantal pixels een gemiddelde backscatter te bepalen, hetgeen ten koste gaat van de ruimtelijke resolutie.

2.5. INTERAKTIE TUSSEN MIKROGOLVEN EN HET KALE BODEMOPPERVLAK

Bij de aanstraling van een kaal bodemoppervlak met golven uit het mikrogolfgebied zijn bij de verstrooiing van het signaal twee soorten wisselwerkingen van belang:

1. bodemeigenschappen ten aanzien van elektro-magnetische golven;
2. ruwheid van het aangestraalde oppervlak gekombineerd met de kijkrichting van de radar.

ad 1. Elektro-magnetisch beschouwd bestaat de bodem uit een vier komponentenmengsel van lucht, bodemdeeltjes, vrij water en gebonden water. De reaktie van de toplaag van de bodem op een elekromagnetisch golffront hangt af van de hoeveelheid vrij water in de bodemmatrix, de frekwentie, de (opgeloste) zoutkoncentratie in de bodem, de bodemtemperatuur, de bulkdichtheid en de vorm van de bodemdeeljes.
Het gedrag van de interaktie tussen een elektromagnetisch golffront en een medium kan in principe beschreven worden met behulp van de permittiviteit ten opzichte van een vakuüm, de zogenaamde relatieve permittiviteit, de relatieve permeabiliteit en het elektrisch geleidend vermogen.
Omdat de bodem niet magnetisch is wordt de relatieve permeabiliteit nul verondersteld. De permittiviteit wordt ook wel diëlektrische konstante genoemd. De geleidbaarheid en de permittiviteit van de bodem kunnen worden weergegeven in een enkele maat, de zogenaamde effektieve relatieve permittiviteit (ϵ):

$$\epsilon = \epsilon' - i \cdot \epsilon'' \qquad (11)$$

waarin: ϵ' = reële deel van de permittiviteit

ϵ'' = imaginaire deel van de permittiviteit

$i = -1^{0,5}$

De grootte van de permittiviteit bepaalt de mate van backscatter van de radargolven op een vlak oppervlak. Een grote permittiviteit betekent dat een relatief groot deel van het uitgezonden vermogen door de ontvangstantenne kan worden opgevangen. Het vermogen van een elektromagnetische golf is evenredig met het kwadraat van de amplitude R van de golf. Het vermogen van de backscatter bij loodrechte inval van een golffront wordt gegeven door:

$$R^2 = \left(\frac{\epsilon^{\frac{1}{2}} - 1}{\epsilon^{\frac{1}{2}} + 1}\right)^2 \qquad (12)$$

Bij een vochtgehalte van 30 volumeprocent vocht blijkt uit Figuur 5 dat voor een "silty clay" en een frewentie van 10 GHz $\epsilon' \sim 10.6$ en $\epsilon'' \sim 3.8$. Bij loodrechte inval is de permittiviteit te berekenen met behulp van Pythagoras, waaruit volgt dat $R^2 = 0.29$.

De hoeveelheid door de bodemdeeltjes gebonden water bepaalt de grootte van de beide komponenten van de permittiviteit. HALLIKAINEN et al. (1986) stellen dat de permittiviteit van droge grond onafhankelijk is van de gebruikte frekwentie en de verhouding van de textuurklassen van de bodemdeeltjes, maar wel afhangt van de bulkdichtheid van de grond. Wordt vervolgens aan de bodem water toegevoegd dan wordt er -elektro-magnetisch gezien- een hoeveelheid dipolen aan de bodemmatrix toegevoegd, hetgeen leidt tot een verandering van de permittiviteit. Daarom wordt bij experimenten veelal het volumetrisch vochtgehalte van de bodem gekorreleerd met de backscatter in plaats van het gravimetrisch vochtgehalte.

Als voorbeeld is in Figuur 5 voor een aantal frekwenties het verloop gegeven van de permittiviteit van enkele gronden met verschillende textuur.

De kromming in het begin van de kurve is opvallend. SCHMUGGE (1983) schrijft het gebogen trajekt van de kromme toe aan de direkte binding van watermolekulen aan bodemdeeltjes en het rechte deel aan het volume vrij water in de bodemmatrix. Om dit effekt in rekening te brengen stelde hij voor om het vochtgehalte van de bodem als percen-

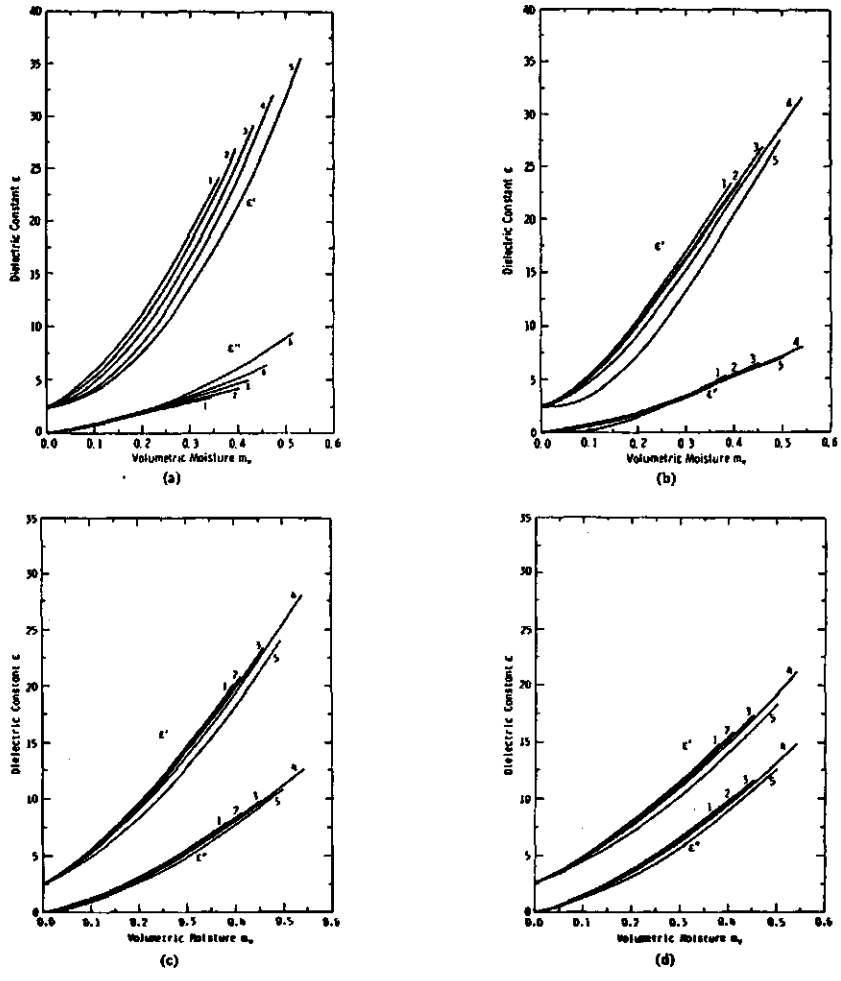


fig. 5. Gemeten waarden van de permittiviteit voor 5 verschillende textuurmengsels bij frekwenties van (a)1.4, (b)5, (c)10 en (d)18 GHz (naar HALLIKAINEN et al., 1982)

	zand(%)	silt(%)	klei(%)
(1) Sandy Loam	51.5	35.0	13.5
(2) Loam	42.0	49.5	8.5
(3) Silt Loam	30.4	55.9	13.5
(4) Silt Loam	17.2	63.8	19.0
(5) Loam	5.0	47.6	47.4

tage veldkapaciteit (in volumeprocenten) te nemen. Hoewel de keuze van deze maat theoretisch niet goed onderbouwd is, blijken korrelaties op deze wijze kwalitatief te verbeteren.

De hoeveelheid door de gronddeeltjes direkt gebonden water hangt samen met het bodemtype, zoals uit Figuur 5 blijkt. Is er veel vrij water in de bodem aanwezig dan is de reële komponent van de permittiviteit groot ten opzichte van de imaginaire komponent, en andersom. Een kleigrond zal bijvoorbeeld bij de lagere frekwenties bij gelijke

vochtgehalte een lagere backscatter vertonen dan een zandgrond.
Uit de grafieken van Figuur 5 valt af te lezen dat verschillende bodemtypen een geleidelijk veranderend diëlektrisch gedrag vertonen onder invloed van veranderingen in frekwentie.
Bij lage frekwenties bijvoorbeeld is de imaginaire komponent van "silty clay" groter dan die van "sandy loam", bij 18 GHz is dit juist andersom.
De oorzaak hiervan moet gezocht worden in het verschijnsel dat bij 18 GHz het door kleideeltjes gebonden water meer invloed heeft op het diëlektrisch gedrag, terwijl voor lage frekwenties het geleidingsvermogen van voornamelijk Ca-ionen meer relevant is. Voor een meer komplete uitleg zie bijvoorbeeld HALLIKAINEN (1986) of DE LOOR (1983).
Naast de interaktie op de grenslaag tussen lucht en bodem is uit experimenten gebleken dat radargolven het bodemoppervlak tot op zekere diepte kunnen doordringen; de backscatter bestaat dan ook niet alleen uit het door het oppervlak teruggekkaatste vermogen, maar ook uit een volume scatter. De mate waarin dit gebeurt hangt enerzijds af van de frekwentie van de radar en anderzijds van het vochtgehalte van de gepenetreerde bodemlaag. Een indikatie van het doordringend vermogen geeft Figuur 6.

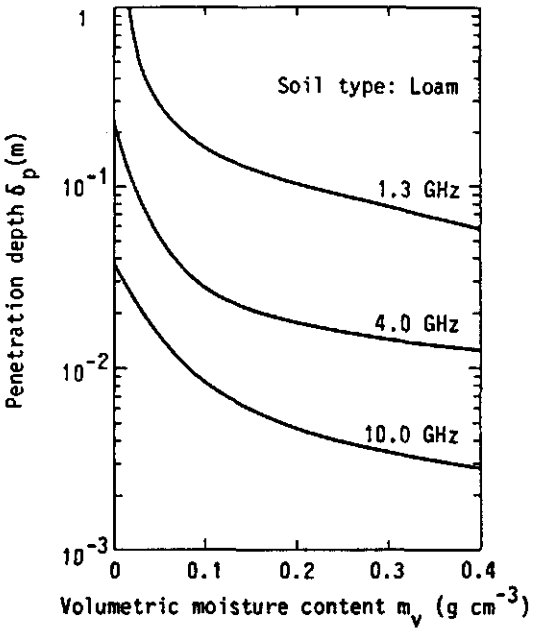


fig. 6. Een indikatie van het doordringend vermogen van enkele radarbanden als funktie van het bodemvochtgehalte (naar ULABY et al., 1982)

Het voorkomen van een zogenaamde volumescatter betekent dat niet alleen de permittiviteit van het bodemoppervlak een rol speelt bij het teruggekaatste vermogen, maar ook de (gemiddelde) permittiviteit van de gepenetreerde bodemlaag. De aanwezigheid van volumescatter naast een oppervlakte-scatter zou moeten leiden tot een toename van het gemeten backscattervermogen.
Bij nauwkeurige backscattermetingen aan proefobjekten is waargenomen dat de backscatter echter minder is dan verwacht wordt op grond van berekeningen op basis van de grootte van de permittiviteit. ALLEN geciteerd door DOBSON en ULABY (1986) konkludeert uit metingen dat het vochtgehalte van de toplaag van de bodem op het sub-centimeter-niveau grote invloed heeft op de het backscattervermogen. Dit betekent dat het voor de verklaring van de backscatter in de veldsituatie van belang kan zijn om het vochtgehalte van dit laagje te kennen; praktisch is het meten van het bodemvochtgehalte in een dergelijk dun laagje echter een lastig karwei.

ad 2. De ruwheid van een oppervlak hangt samen met de golflengte van de radar. ULABY et al. (1982) stelt voor de vaststelling van ruwheid te toetsen aan de hand van het Fraunhoferkriterium:

$$h < \frac{\lambda}{32.\cos(\theta)} \quad (m) \qquad (13)$$

waarin: h = hoogte van mikro-elementen in het terrein (kluiten e.d)
λ = golflengte
θ = invalshoek

Als het linkerlid kleiner is dan het rechterlid in vergelijking (13), dan is een oppervlak glad voor de betreffende golflengte. De beschrijving van de mikroruwheid van het oppervlak in backscatter-modellen vormt een vooralsnog niet afdoende opgelost probleem in de mikrogolfwaarneming. Er zijn verschillende semi-empirische modellen opgesteld voor de relatie tussen radarbackscatter en de oppervlakte ruwheid, waarbij ruwheidsmaten zoals de Root Mean Square-hoogte (RMS) of autokorrelatielengte naast andere parameters worden gebruikt.
Zoals het Fraunhofer-kriterium al aangeeft hangt de ruwheid samen met

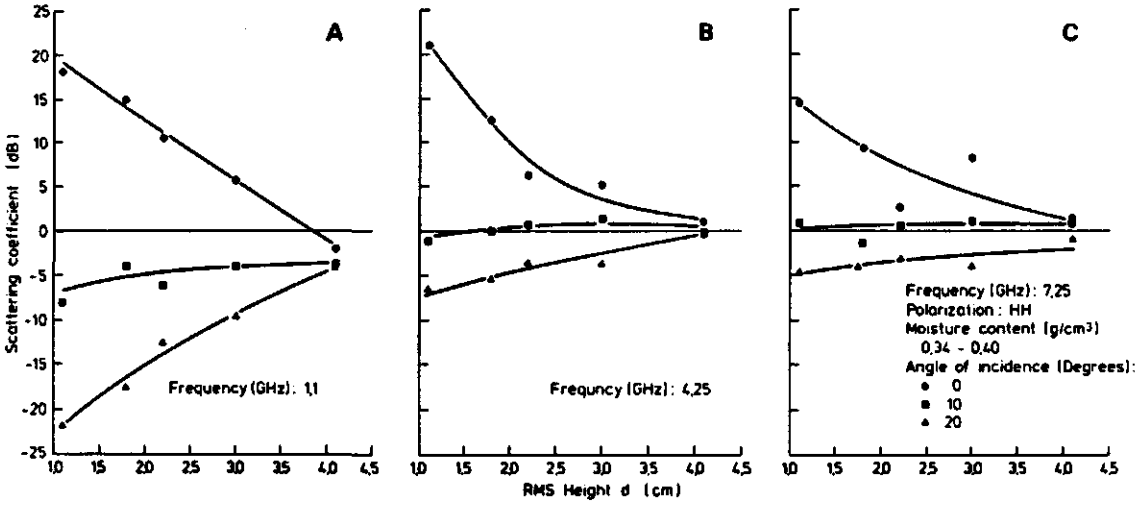


fig. 7. Invloed van de oppervlakte ruwheid (RMS) voor drie frekwenties en drie invalshoeken (naar ULABY, 1978)

de hoek van aanstraling van het objekt: Figuur 7 is hiervan een illustratie. Het blijkt dat bij toename van de frekwentie - een afname van de golflengte- de gevoeligheid van de backscatter voor verschillende ruwheden afneemt, wat af te leiden valt uit het afvlakken van de verschillende ruwheidskurves. Dit effekt ligt ook in het Fraunhofer kriterium besloten.

Bij een gegeven frekwentie en een oplopende invalshoek blijkt dat het backscattervermogen afneemt voor een gegeven ruwheid. Hoe groter deze ruwheid echter, hoe keiner dit verschil is. Als de frekwentie toeneemt, vlakt het backscatterverschil tussen de verschillende hoeken ook af. Met een afnemende frekwentie neemt tegelijkertijd ook het indringingsvermogen af (Figuur 6), zodat het vermogen om bodemvocht te meten in de bovenste bodemlaag ook afneemt.

In dit verband moet ook het snijpunt van de verschillende backscatterkurves vermeld worden dat ligt tussen 10 en 20 graden invalshoek (zie Figuur 8). De ligging van het snijpunt is afhankelijk van het meetsysteem. De backscatter is voor alle ruwheden (in dit geval gedefinieerd als a/λ; zie formule 15) bij deze invalshoeken voor een gegeven frekwentie gelijk. Alleen het vochtgehalte van het aangestraalde oppervlak bepaalt hier het weerkaatste vermogen.

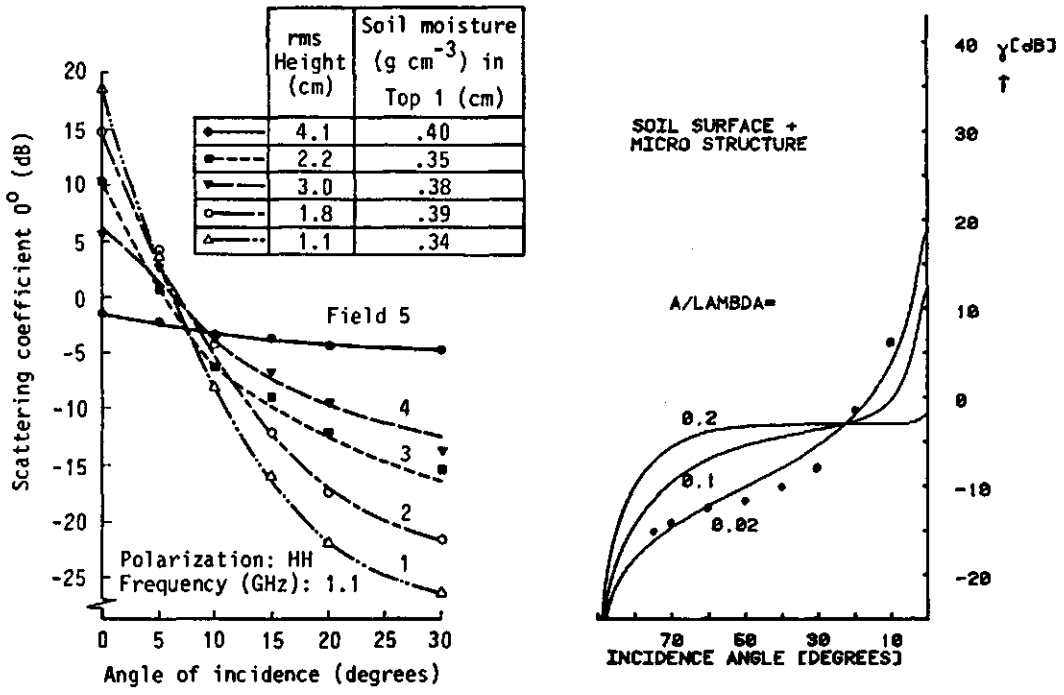


Fig. 8. (links) Responskurven van de radarbackscatters van vijf bodems van vergelijkbare vochtgehalte en verschillende ruwheden (naar ULABY et al., 1978).
(rechts) Responskurven van een kale bodem met kleine ruwheidsverschillen. De punten zijn werkelijk waargenomen backscatter-waarden (naar ATTEMA et al., 1982)

Naast de mikroruwheid, welke een min of meer random karakter heeft, vormt de bewerkingsrichting van een perceel juist een regelmatig ruwheidspatroon. KOOLEN e.a. (1979) konkluderen dat een verandering in de bewerkingsrichting, het type bewerking en de ligging van de voren/ruggen ten opzichte van de radarwaarneming grote invloed heeft op de backscatter. Voren evenwijdig aan de vliegrichting van de SLAR vertonen onder een bepaalde invalshoek een maximum backscatter, terwijl voren die loodrecht op de vliegrichting liggen geen verhoogde backscatter vertonen. Als de backscatter uitgezet wordt tegen de invalshoek, dan doet een ruwheidsverandering de vorm van de kurve van waarnemingen veranderen, terwijl de vochtgehalte van de toplaag de offset van de kurve bepaalt.
ULABY en BARE (1979) vonden dat hogere frekwenties, vanaf 4 GHz, minder invloed ondervinden van de bewerkingsrichting in afhankelijkheid van de invalshoek dan lagere frekwenties. ULABY, KOUYATE, FUNG en SIEBER (1982) laten zien dat naast de ligging van ruggen en voren de ruwheid ook afhangt van de door de bewerking gelijke oriën-

tatie van bodemdeeltjes. In het algemeen wil men de faktor ruwheid uit de backscatter elimineren om het bodemvochtgehalte te kunnen schatten; de ruwheid kan echter soms ook de gewenste parameter zijn. STOLP en JANSE (1986) deden in Groningen onderzoek naar de mate van verslemping van zeeklei bouwlandpercelen. Zij vonden een redelijk verband tussen de backscatter, ploegrichting, afstand tot de vlieglijn en de te verklaren mate van verslemping.

3. HET RADAREXPERIMENT

3.1. LITERATUUR RADARONDERZOEK NAAR DE GEBIEDSGEWIJZE BEPALING VAN HET BODEMVOCHTGEHALTE

Onderzoek naar de bepaling van bodemvocht vanuit viegtuigplatforms van heterogene gebieden heeft nog niet veel plaatsgevonden. De resultaten van enkele onderzoeken worden hier kort weergegeven.
JACKSON en O'NEILL (1980) voerden een aantal scatterometerexperimenten uit op een viertal kleine stroomgebieden. Zij vonden dat verschillende ruwheden van de toplaag korrespondeerden met verschillen in backscatterniveau. Na een twee aan twee opdeling van de stroomgebieden op basis van overeenkomst in biomassa (grasbedeking) en ruwheid leidden zij voor een invalshoek van 10 graden korrelatiekoëfficiënten van r = 0.75 en r = 0.89 af voor het verband tussen de backscatter en het vochtgehalte van de bodemtoplaag voor waarneming in de C-band. Voor de L-band vonden zij respektievelijk korrelaties van r = 0.77 en r = 0.91. Voor beide banden stemde de richtingskoëfficiënten van de hellingen van de gefitte kurven, de zogenaamde gevoeligheid, overeen met datgene wat eerdere onderzoekers vonden.
SOARES et al. (1987) vlogen met een C-band scatterometer en een stralingsthermometer over een grootschalig agrarisch gebied ten zuidwesten van Parijs. Zij bepaalden het verband tussen de backscatter en het bodemvochtgehalte gemeten van een 10 cm. toplaag, voor een invalshoek van 11 graden. Na verwerking van de data bleek de korrelatiekoëfficiënt r = 0.89 te zijn. Voorts wordt gekonkludeerd dat een nauwkeurige vergelijking van radar -scatterometer- data met de situatie op een specifieke lokatie in het terrein (ground truth) op moeilijkheden stuit vanwege het probleem om een bepaalde positie op de radaropname te markeren. Daarnaast komt het onderzoeksteam tot de konklusie dat voor de vergelijking van de backscatter tussen percelen alleen een statistische benadering van de kontinu gemeten backscatter zinvol is vanwege de stochastische variatie in terreingesteldheid voor zowel vocht als ruwheid.
De stalingstemperatuur is in beginsel een indikator voor het vochtgehalte van de bodemtoplaag (IDSO et al., 1979). Daarom werd als onderdeel van dit

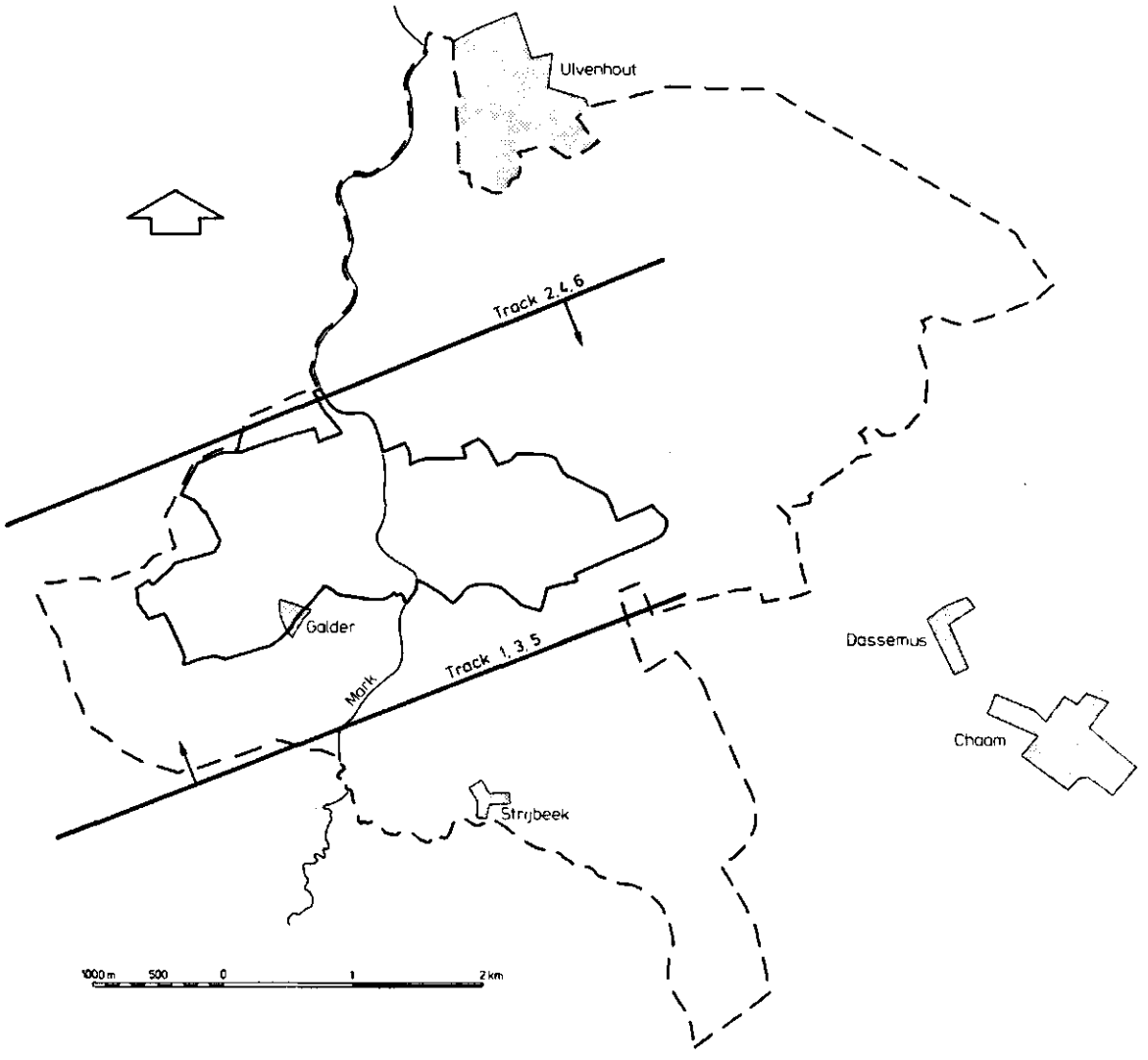


Fig. 9. Ligging van het proefgebied Galder en de ligging van de twee tracks over het proefgebied en kijkrichtingen.

DE LOOR (1987) naar onder andere de backscatter van met vegetatie bedekte bodems, zijn alleen kale bouwland percelen in het experiment betrokken. In de periode voorafgaand aan de vluchtdag zijn in het proefgebied negen kale bouwlandpercelen geselekteerd (zie Figuur 10). Hiervan zijn op de vluchtdag vochtmonsters genomen en is ook de ruwheid vastgelegd. Vanwege de ruimtelijke resolutie van de radaropname werden aan de hand van de FC-foto's

experiment tegelijkertijd met de backscatter ook de stralingstemperatuur van de proefpercelen gemeten. De reden is dat als beide grootheden gevoelig zijn voor bodemvocht er een verband tussen deze twee maten moet bestaan. Er werd echter een matige korrelatie (r = 0.76) gevonden. SOARES et al. verklaren deze uitkomst door het feit dat de radarbackscatter de resultante is van een dikker bodemlaagje dan de stralingstemperatuur.
VISSERS en STOLP (1987) gebruikten de SLAR X-band radar, dezelfde waarmee dit experiment is uitgevoerd, om een relatie te vinden tussen bodemvochtgehalte en backscatter voor een aantal kleipercelen. Zij vonden een gevoeligheid van de radar van 0.24 dB per volumeprocent vocht met een korresponderende korrelatiekoëfficiënt van r = 0.75. DE LOOR (1987) en HOEKMAN (1982) komen met behulp van de X-band SLAR respectievelijk tot een gevoeligheid van 0.24 en 0.22 dB per Volume procent vocht voor kleigronden. Bovenstaande experimenten laten zien dat de gevonden korrelaties van een redelijke kwaliteit kunnen zijn. Veelal is gemeten in de C-band, het frekwentiegebied dat in ieder geval als geschikt wordt beschouwd om bodemvocht op (bijna) kale bodems te registreren (b.v. ULABY et al., 1978).

3.2. WERKWIJZE

3.2.1. Vluchtplan en selektie van proefpercelen

Op 6 april 1988 is een radarvlucht uitgevoerd met een X-band SLAR (HH-polarisatie) van het NLR in het herinrichtingsgebied Ulvenhout-Galder. Hierbij zijn twee tracks gevlogen op drie verschillende hoogtes. De vluchtlijnen en de kijkrichting van de radar staan aangegeven in Figuur 9.
De opnamen 1, 3 en 5 zijn gevlogen op hoogtes van respectievelijk 1722, 1198 en 648 meter; de opnamen 2, 4 en 6 op respektievelijk 1731, 1209 en 654 meter hoogte. De hoogteverschillen zijn aangebracht met de bedoeling om backscatter-waarden van de proefpercelen onder zes verschillende hoeken te verkrijgen.
Naar aanleiding van resultaten met betrekking tot de gevoeligheid van de X-band radar voor het bodemvochtgehalte voor met vegetatie bedekte bodems van HUYGEN (1982) en naar aanleiding van een gevoeligheidsonderzoek van

Bij veel radarexperimenten wordt de toplaag van de bodem in laagjes van een of twee centimeter bemonsterd. Dit in verband met de indringingsdiepte van de radargolven enerzijds en verschillen in vochtgehalte in de bodemtoplaag anderzijds. Op basis van de uitkomsten van de gelaagde vochtbemonstering tijdens het voorjaarsexperiment in Ulvenhout-Galder van 1987 (DROESEN en VAN LIESHOUT, 1988) is in dit experiment afgezien van een laagsgewijze bemonstering.
Het volumetrisch vochtgehalte is bepaald door het gewichtsverschil te meten van een monster voor en na drogen gedurende vier dagen bij een temperatuur van 60 graden C. Drogen bij een temperatuur van 105 graden C was niet mogelijk omdat de bodemmonsters in plastic zakjes uit het veld zijn meegenomen. Na het drogen van enkele monsters bij 105 graden C bleek een correctie niet noodzakelijk. De vochtgehalten van percelen zijn vervolgens bepaald door middeling. In gevallen waar het verschil in vochtgehalte over het perceel een systematisch verschil vertoonde tussen voor en rug, of tussen wagenspoor en zaaibed, is een naar oppervlakte gewogen gemiddelde van het vochtgehalte berekend. De oppervlakteschatting vond plaats aan de hand van de situatiefoto's die van iedere monsterplek zijn gemaakt. Een logaritmische middeling is uit fysisch oogpunt korrekter, omdat de radarbackscatter logaritmisch van het bodemvochtgehalte afhankelijk is. Gezien de kleine korrekties (kleiner dan 2 volumeprocent vocht) is het effect van de middelingsmethodiek echter gering.
De ruwheid van de percelen is gemeten met behulp van de spuitplaten methode. In dit veldexperiment zijn evenwijdig aan en loodrecht op de bewerkingsrichting van het perceel, voor zover deze duidelijk aanwezig was, 3 metalen platen in elkaars verlengde horizontaal de grond ingedrukt. De kontouren van het bodemoppervlak zijn vervolgens door middel van een verfspuitbus op de platen overgebracht. De omtrekken van de bodemoppervlakken van verschillende percelen zijn gedigitaliseerd. Uit deze gegevens is de standaardafwijking van de bodemomtrek ten opzichte van een gemiddeld vlak berekend. Deze maat is de zogenaamde RootMeanSquare-waarde (afgekort: RMS-waarde). De gemiddelde waarden van deze maat staan voor elk perceel vermeld in bijlage 1.
De toestand van de percelen is de dag na de vlucht op kleurenfoto vastgelegd.

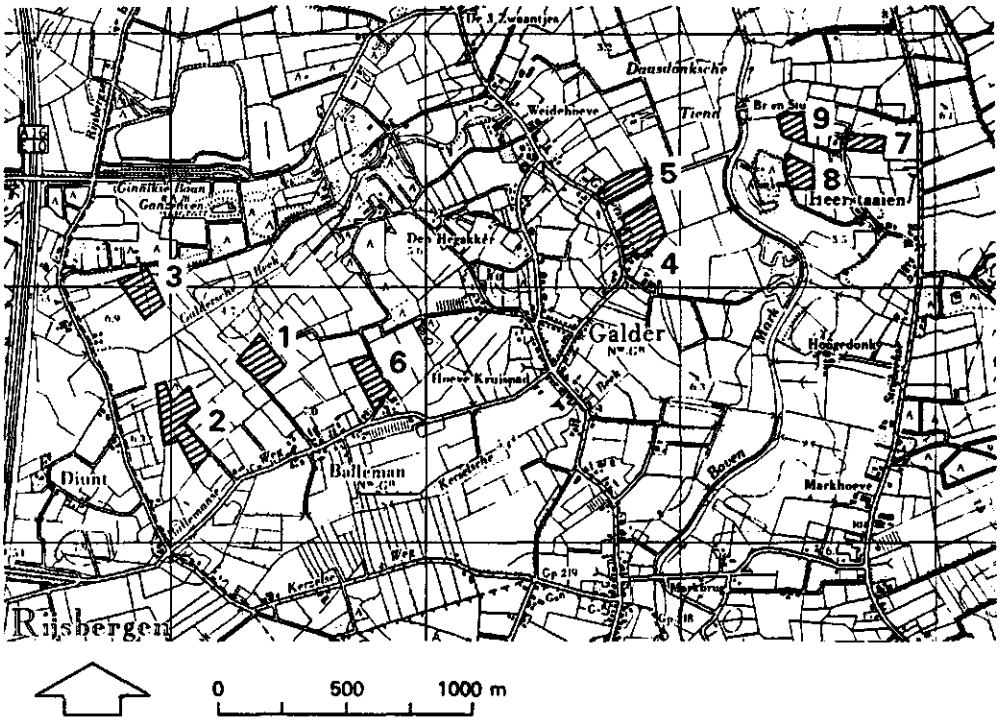


Fig. 10. Percelen in het proefgebied waarvan de bodemvochtmonsters zijn genomen en de oppervlakte-ruwheden zijn gemeten

van het voorjaar 1987 proefpercelen geselekteerd op basis van homogeniteit en grootte. In het proefgebied komen echter niet veel grote percelen voor, zodat de proefpercelen vrijwel alleen zijn gekozen vanwege de afwezigheid van vegetatie. Naast de radaropnamen zijn false color foto's en scanner-opnamen gemaakt in het zichtbare licht (rood, groen), het nabij-infrarood en het thermisch infrarood. Voor een beschrijving van dit onderdeel van het vluchtplan wordt verwezen naar DROESEN (1989).

3.2.2. Veldwerk en verwerking van veldgegevens

De werkzaamheden tijdens de vlucht betroffen de bepaling van het bodem-vochtgehalte van de toplaag, de ruwheid van het perceelsoppervlak en de bewerkingstoestand van de proefpercelen.
Ter bepaling van het bodemvochtgehalte zijn met behulp van 100 cc ringen volume monsters genomen van de 5 cm toplaag. Per perceel zijn langs drie raaien door drie monsternemers op vijf plaatsen steeds twee monsters gestoken, welke vervolgens bij elkaar zijn gevoegd. Dit leverde 15 monsters van 200 cc. per perceel. Genoteerd is of de monsters in de voor of op de rug, dan wel in het zaaibed of het wagenspoor zijn gestoken.

3.2.3. Projektie van de digitale topografische kaart over de radarbeelden

Op de geometrisch gekorrigeerde radarbeelden zoals die door het NLR afgeleverd worden, zijn perceelsgrenzen niet duidelijk onderscheidbaar. Om dit probleem te ondervangen is de digitale topografische kaart over de zes radarbeelden heen geprojekteerd.
Uit een vergelijk van de radarbeelden met de digitale topografiche kaart 1:10 000 bleek dat de onnauwkeurigheid van het radarbeeld along track varieert van 70 tot 50 m per 1000 m. De onnauwkeurigheid across track varieert ongeveer van 80 tot 50 m per 1000 m. Een aanvullende geometrische correctie is dan ook noodzakelijk. Per afzonderlijk beeld zijn hiertoe tenminste 6 zogenaamde Ground Control Points aangewezen, drie meer dan strikt noodzakelijk. Deze overbepaling introduceert een fout, welke een maat is voor de geometrische nauwkeurigheid van de aangewezen paspunten, de zogenaamde RMS-fout.
Deze waarde is vastgelegd als:

$$\text{RMS-fout} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\sqrt{(x-x_p)^2 + (y-y_p)^2}}{n} \qquad (14)$$

waarbij: x = de aangewezen x-koördinaat van een paspunt
y = de aangewezen y-koördinaat van een paspunt
y_p = de berekende y-koördinaat van een paspunt
x_p = de berekende x-koördinaat van een paspunt
n = het aantal paspunten

De RMS-fout van de projektie van de digitale topografische kaart over de beelden bedroeg in elk van de zes projekties minder dan 1.5 pixel, hetgeen betekent dat de gemiddelde fout van de ligging van elke GCP op de digitale kaart plus of min 1.5 pixel is ten opzichte van een foutloze projektie. Bij een pixelgrootte van 7.5 m betekent dit dat de aanwijzing van de GCP's in het terrein met een nauwkeurigheid van ongeveer 11 meter kan geschieden. Onder de aanname dat de kwaliteit van de geometrische korrektie van het NLR over het gehele radarbeeld konstant is, kan dan ook een willekeurig punt in het radarbeeld aangewezen worden met een gemiddelde nauwkeurigheid van 1.5 pixel ten opzichte van de werkelijke ligging in het terrein.

3.2.4. Bepaling van het gemiddelde perceelsvochtgehalte

3.2.4.1. Bepaling van de gemiddelde backscatter en de invalshoek per proefperceel

De pixelwaarden in het radarbeeld zijn een uitdrukking van de waargenomen echosterkte door de radar (Paragraaf 2.4.2). In dit verband kan onderscheid gemaakt worden tussen de zogenaamde absolute en relatieve kalibratie. Absolute kalibratie betekent dat de absolute waarde van de backscatter bekend is. In deze proefopzet zijn de backscatterwaarnemingen relatief gekalibreerd; dit houdt in dat de hoogst mogelijke pixelwaarde (255) het maximum backscatter vermogen vertegenwoordigt. Alle pixelwaarden zijn zodoende bepaald ten opzichte van dit maximale backscatterniveau. Volgens de specifikaties van het NLR komt elke toename van pixelwaarde met 1 eenheid overeen met een verandering in ontvangen vermogen van 0.2 dB.
De pixelwaarden van de "gehele" proefpercelen zijn allereerst volgens de grenzen zoals de geprojekteerde topkaart die aangeeft uit de zes beelden geëxtraheerd. Vervolgens zijn de pixelwaarden van de zogenaamde "verkleinde" proefpercelen uit de beelden geëxtraheerd door steeds ongeveer drie pixels van de perceelsgrenzen verwijderd te blijven. Dit is gedaan om te kijken of op deze wijze randinvloeden zijn te ondervangen, welke veroorzaakt worden door de onnauwkeurigheid van de projektie van de topkaart over elk van de zes radarbeelden en door het verschil in werkelijk reflekterend oppervlak van het aangestraalde objekt (zie Paragraaf 2.4.3) en het oppervlak van een pixel in het radarbeeld.
Na achtereenvolgens delogaritmisering, middeling en logaritmisering is voor elke vluchthoogte per perceel een gemiddelde backscatterwaarde (in dB) berekend.
Daarnaast is per perceel per track de invalshoek berekend. Aangezien er twee vluchtlijnen zijn gevlogen op elk drie hoogtes, resulteert dit in zes invalshoeken per perceel. In Figuur 11. zijn de gemiddelde backscatterwaarden per perceel uitgezet tegen de invalshoek.
Het verloop van de de backscatterwaarden is zoals dat kan worden verwacht voor kale percelen in het betreffende hoek interval (zie Paragraaf 2.5), namelijk een afname van de backscatter-waarden met een toenemende invalshoek. Toepassing van het in de volgende paragraaf te bespreken model lijkt dan ook gerechtvaardigd.

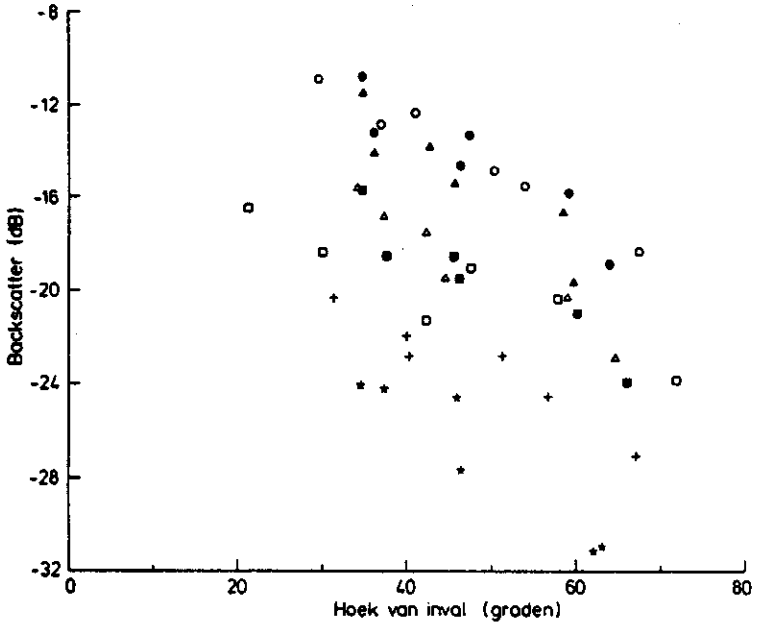


Fig. 11. Verloop van de gemiddelde backscatter-waarden van de negen gehele proefpercelen. Elk perceel wordt aangegeven door een afzonderlijk symbool

3.2.4.2. Het model van ATTEMA, VAN KATS en KRUL

ATTEMA et al. (1982) hebben het verloop van de backscatter van de kale bodem (zie Figuur 11) beschreven met een model, waarbij de backscatter γ een funktie is van het vochtgehalte, de ruwheid, de invalshoek en de golflengte. Op deze wijze kan inzicht worden verkregen in de relatie tussen γ en het vochtgehalte en de invloed van andere faktoren op deze relatie. Het model beschrijft de backscatter van een kale bodem in termen van ruwheid, invalshoek en vochtgehalte.

$$\gamma = F.(1-e^{-p^2}) + Rcoh \qquad (15)$$

waarin: $p = (4.\pi a.\cos(\beta))/\lambda$

a = mikroruwheid (mm)

β = invalshoek (rad)

λ = golflengte van de radar (mm)

F = een faktor welke enkel afhangt van het vochtgehalte van het aangestraalde objekt

$Rcoh$ = een faktor welke optredende coherentieverschijnselen in rekening brengt

kunnen worden met golfverschijnsel.

Het gebruikte SLAR-systeem meet alleen het incoherente deel van de backscatter, zodat de coherente term Rcoh vervalt. De bruikbaarheid van het model wordt vergroot indien de backscatter γ in decibels wordt uitgedrukt. Deze transformatie doet het model veranderen in:

$$\gamma(dB) = F' + 10.^{10} LOG(1-e^{-p^2}) \qquad (16)$$

waarin: $F' = 10. LOG(F)^{10}$

De faktor F' bepaalt het niveau van de kromme, welk samenhangt met het vochtgehalte van de toplaag volgens:

$$F' = A + B.\theta_v \qquad (17)$$

waarin: A = de backscatterfaktor voor een droge bodem (dB)
B = de gevoeligheid van de backscatter voor het bodemvochtgehalte ($dB/cm^3.cm^{-3}$)
θ_v = volumetrisch vochtgehalte ($cm^3.cm^{-3}$)

3.2.4.3. Bepaling van de mikroruwheid van de proefpercelen

Om het vochtgehalte te kunnen verklaren is een ruwheidsparameter noodzakelijk die onafhankelijk van het gebruikte radarsysteem bepaald moet worden.
ATTEMA et al. (1981) geven voor de a-parameter in dit model de voor elk perceel afzonderlijk gemeten RMS-ruwheidswaarde aan. Met behulp van de RMS-waarden worden de F'-waarden voor de proefpercelen berekend zoals staat beschreven in VISSERS en STOLP (1987) (zie Tabel 2).
Het blijkt dat de inpassing van de kromme aan de hand van de ruwheden en de F'-waarden slecht van kwaliteit is.

tabel 2. F'-waarden per proefperceel

perceel	1	2	3	4	5	6	7	8	9
F'	-20.0	-17.1	-16.4	-16.4	-14.4	-24.4	-12.7	.	.

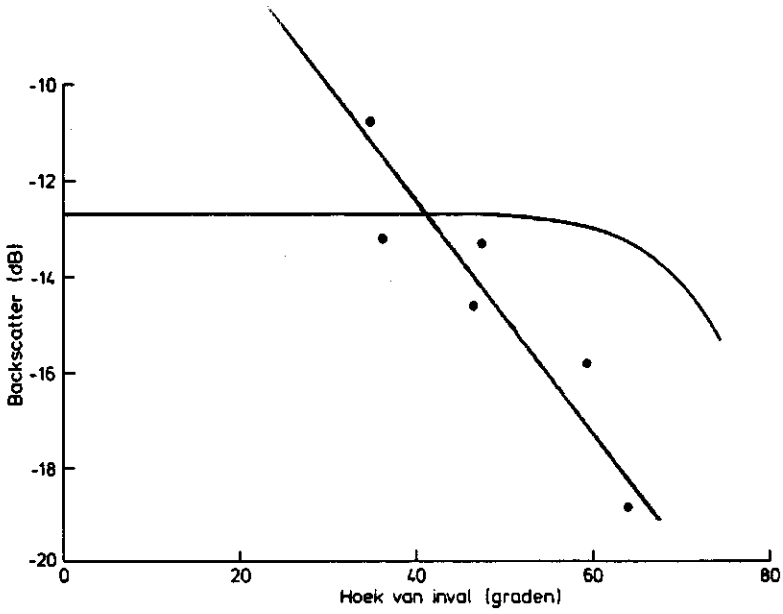


Fig. 12. Inpassing van de kurve door de gemeten backscatter-waarden voor 'geheel' perceel 7 met gebruikmaking van de berekende F'-waarde en de RMS-ruwheidswaarde

Een voorbeeld hiervan geeft Figuur 12. Naar aanleiding hiervan kan de konklusie getrokken worden dat in dit experiment de RMS-ruwheidswaarden geen goede maat blijken voor de faktor a in vergelijking (15). VISSERS en STOLP (1987) komen in hun experiment tot een gelijke konklusie.
De korrelatiekoëfficiënt (r) van de gevonden F'-waarden met het gemiddeld volumetrisch vochtgehalte van de proefpercelen is dan ook laag (r = 0.53).

$$\gamma_1(dB) - \gamma_2(dB) = 10.^{10}\,LOG(1-e^{-P_1^2}) - 10.^{10}\,LOG(1-e^{-P_2^2}) \qquad (18)$$

Per twee hoeken is in principe een a-waarde te berekenen. Hiermee kan dan via een "best-fit" procedure een F-waarde kunnen worden berekend. Het bleek echter dat de bovenstaande niet-lineaire vergelijking lang niet voor elk van de 15 mogelijke hoekkombinaties en bijbehorende backscatter-waarden een oplossing voor a opleverd; voor in totaal 9*15 vergelijkingen bleken slechts 44 een oplossing te hebben. Op basis van deze uitkomsten is besloten niet verder via deze methode te werken.
In tweede instantie is met behulp van de FITNONLINEAR-procedure van het GENSTAT statistisch-pakket getracht op statistisch verantwoorde wijze een kurve volgens vergelijking (16) door de backscatter-waarden te passen. Dit

bleek in niet meer dan twee gevallen mogelijk. Dit kan verklaard worden door het feit dat zes waarnemingen uiteindelijk een te gering aantal is om de gekromde kurve doorheen te passen zeker wanneer via twee kijkrichtingen wordt gemeten. Dit laatste is van belang in verband met bodemvocht-verschillen in samenhang met de expositie. Anderzijds blijkt ook uit backscattermetingen in gekontroleerde proefopstellingen (b.v. KOOLEN et al., 1978), dat over eenzelfde hoektrajekt beschouwd, dergelijke metingen beter door een rechte lijn dan door een meer theoretisch verantwoorde radarbackscatter-kromme benaderd kunnen worden. Dit verschijnsel werd door DE LOOR in een mondelinge mededeling bevestigd.

Daarop is besloten per perceel een visuele 'best-fit' te maken door de zes backscatter-waarden van elk perceel, waarbij de a- en F'-waarden werden vastgelegd. De verkregen inpassing is vervolgens aan enkele personen ter beoordeling voorgelegd en zonodig aangepast. De ingepaste kurves zijn gegeven in bijlage 2. Uit deze benadering bleek dat het keuze van de parameterwaarde van de mikroruwheid a een grote invloed heeft op de uiteindelijke F'-waarde. Figuur 13 toont hiervan een voorbeeld. Zowel a = 2.4 mm met F' = -16.5(dB) als a = 1.1 met F' = -10.5 (dB) vertonen een kwalitatief gelijkwaardige inpassing. Blijkbaar kan de keuze van a en daarmee van F variëren zonder dat de kwaliteit van de inpassing vermindert. Dit lijkt derhalve geen goede methode om uit de backscatterdata een waarde te verkrijgen, welke direkt gekorreleerd kan worden met het volumetrisch vochtgehalte van een perceel.

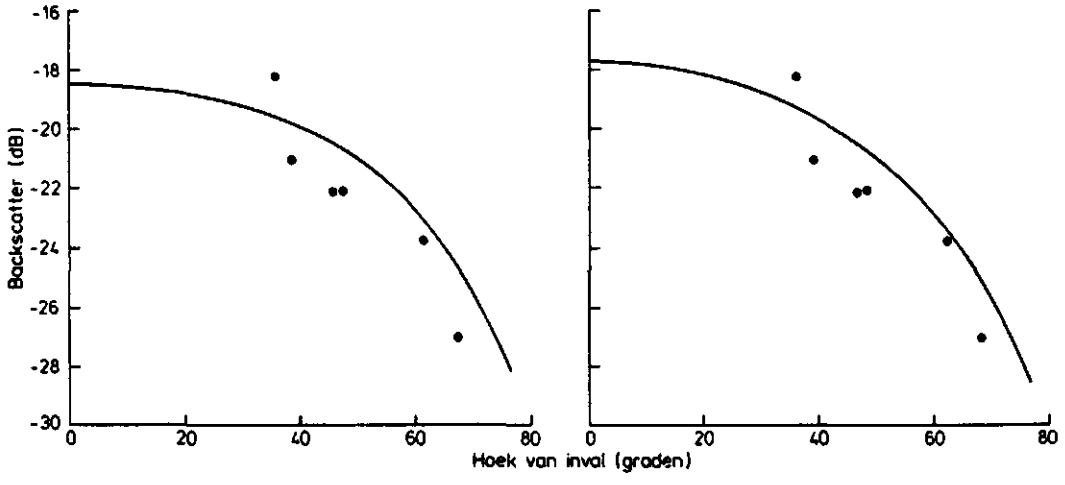


Fig. 13. Invloed van de keuze van de ruwheidsparameter a en de vochtgehalte afhankelijke parameter F' op de kwaliteit van de inpassing van de theoretische radarback-scatterkurve. In de linker fig. F' = -16.5 en a = 2.4 mm, in de rechter fig. F' = -10.5 en a = 1.1 mm

Zoals eerder opgemerkt in Paragraaf 2.5 zijn er aanwijzingen dat voor de backscatterkurve rond de 10 en 20 graden invalshoek een zogenaamd cross-over point bestaat, waar de invloed van de ruwheid minimaal is en het vochtgehalte van de bodemtoplaag het intenstiteitsnivo van de backscatter (grotendeels) bepaalt. In dit trajekt speelt echter ook de coherente term in de formule van ATTEMA et al. een rol. Het is dan ook niet mogelijk de gefitte curven voor deze invalshoeken te extrapoleren.

3.2.5. Visuele interpretatie van de radarbeelden

3.2.5.1. Inleiding

Op de afbeelding van de radarbeelden zijn binnen de bouwlandpercelen patronen onderscheidbaar. Uit figuur 7 blijkt dat de indringsdiepte van de X-band radar beperkt is, zodat vooral patronen waargenomen zullen worden welke aan de oppervlakte van de bodemtoplaag voorkomen. Een FC-foto is eveneens een vastlegging van de toestand van de toplaag van de bodem. Bovendien is bekend dat de licht-donker patronen van kale bodems op de FC-foto's in het algemeen overeenstemmen met verschillen in vochtgehalte van de bodemtoplaag (IDSO et al., 1979)

3.2.5.2. Werkwijze

Op de vluchtdag zijn naast de digitale beelden ook FC-foto's op schaal 1:6500 en 1:13 000 genomen. Van de radarbeelden van de tracks 1,2,3 en 5 zijn plots gemaakt op schaal 1:13 000. De patronen op radarbeelden zijn vervolgens vergeleken met de patronen op de FC-foto's. Er werd daarbij gekeken naar de overeenkomst in ligging van de vochtpatronen volgens de FC-foto's en de patronen op de radarbeelden. Tevens is gekeken naar de overeenkomst van de patronen in de vier radarbeelden onderling.
Naast een vergelijking van de patronen binnen enkele percelen zijn ook komplexen van kale bouwlandpercelen beoordeeld, waarbij geen rekening werd gehouden met de ploegrichting. De beoordelingsschaal bestond uit kwalificaties in termen van een goede, matige en slechte overeenkomst.
Naast de inherente subjektiviteit van een visuele interpretatie wordt de interpretatie mogelijk ook beïnvloed door een drietal andere verschijnselen:

1. De projektie van de digitale topografische kaart over de radarbeelden heeft een bepaalde onnauwkeurigheid. Een gemiddelde onnauwkeurigheid van 1.5 pixel in zowel x- en y-richting betekent in het veld een gemiddelde fout in ligging van plus of min 11 meter. In het bijzonder wordt de interpretatie van details langs perceelsgrenzen onzeker, hetgeen vooral bij kleine percelen lastig is.
2. De pixelwaarden zijn berekend op basis van 18.7 onafhankelijke backscatterwaarnemingen per pixel, wat inhoudt dat de waarschijnlijkheid van het voorkomen van een onbetrouwbare en daarmee een afwijkende backscatterwaarde (en dus kleur) aanzienlijk is.
3. De toewijzing via een verdeelfunktie van verschillende kleuren aan pixelwaarden, de zogenaamde scaling, kan in zekere mate de interpretatieresultaten beïnvloeden. Ter kontrole is daarom een beeld op twee verschillende wijzen afgebeeld. De beelden zijn vervolgens onderzocht op verschillen in patronen. De verschillen bleken minimaal te zijn.

3.3. RESULTATEN EN DISKUSSIE

3.3.1. Perceelsvochtgehalte en de backscatterwaarden

De resultaten van de vochtmiddeling over de percelen zijn opgenomen in Tabel 3. Te konstateren valt dat er een redelijke spreiding zit in het gemiddelde vochtgehalte van de percelen; tegelijkertijd valt ook de grote standaardafwijking op welke voor een aanzienlijk deel kan worden toegeschreven aan de variabiliteit van het vochtgehalte van de toplaag binnen vrijwel elk perceel.
In Paragraaf 3.2.4 bleek dat toepassing van het model van ATTEMA et al. (1982) op de beschikbare dataset niet mogelijk is.
Hierdoor kunnen de waargenomen backscatterwaarden niet worden geëxtrapoleerd naar het invalshoekbereik van 10 tot 20 graden, waar de invloed van de bodemruwheid minimaal is. De kwantitatieve analyse van de radarbeelden is daardoor beperkt tot het korreleren van backscatter-waarden onder een gelijke invalshoek met het bodemvochtgehalte.
De korrelaties zijn berekend voor de gemiddelde backscatter-waarden van de 9 "gehele" proefpercelen bij de kleinste ($21.4 < \theta < 34.9$) invalshoek, een

tabel 3. Gemiddelde perceelsvochtgehalte en standaardafwijking (s.d.)

Perceel nr	Volume vochtgehalte (% cm^3/cm^3)	s.d.
1	17.4	3.2
2	21.3	5.7
3	23.7	6.7
4	21.0	5.6
5	42.0	4.0
6	14.9	2.5
7	23.3	4.1
8	29.6	7.6
9	29.8	3.1

invalshoek van 40 graden, een invalshoek van 55 graden en de grootste ($53.8 < \theta < 66.9$) invalshoek. De gevonden korrelatiekoëfficiënten bedragen respektievelijk $r = 0.66$, 0.61, 0.68 en 0.60.
Bovenstaande resultaten laten zien dat er een matige relatie bestaat tussen het bodemvochtgehalte en de backscatter. Er treedt geen eenduidige tendens op die afhankelijk is van de invalshoek. De gevonden relaties worden door een tweetal verschijnselen negatief beinvloed:

1. Bij de uitwerking wordt gewerkt met gemiddelden van de volumetrische vochtgehalte van de toplaag van percelen. Het vochtgehalte en de ruwheid van de toplaag zijn in veel gevallen binnen de percelen aan behoorlijke variatie onderhevig. Daarnaast is op een aantal percelen sprake van een gedeeltelijke afdroging van de toplaag, zodat het gemiddelde vochtgehalte van het genomen vochtmonster door de afdroging verschilt met het "waargenomen" vochtgehalte van de -afgedroogde- toplaag door de oppervlakkig indringende X-band radar.
2. Op de percelen 3, 5, 7, 8 en 9 stonden in ruime mate stoppels op het veld en kwam plaatselijk aanzienlijke onkruidopslag voor. Volgens De Loor beinvloedt dit zeer waarschijnlijk de relatie tussen bodemvochtgehalte en de backscatter.

3.3.2. Visuele interpretatie van de radarbeelden

Om een indruk te geven op welke wijze de interpretatie heeft plaatsgevonden zijn in Figuur 14 enkele voorbeelden aangegeven. De lichte en donkere patronen 1 en 2 betekenen respektievelijk een hoge en lage reflektie, welke kan worden toegeschreven aan respektievelijk een hoog en laag bodemvochtgehalte van toplaag.
Patroon 3 bestaat uit twee percelen met een sterk verschillend vochtgehalte. Dit komt niet tot uiting op het radarbeeld. Dit wordt veroorzaakt doordat het natte perceel recent bewerkt is en een geringere ruwheid heeft dan het drogere perceel. De bewerkingsrichting van beide percelen is gelijk en evenwijdig aan de vliegrichting.
Ook in enkele andere gevallen zijn afwijkingen opgemerkt waarin het radarbeeld niet overeenkomt met de vochtpatronen op de False Color foto. Niet altijd kon de ploegrichting als mogelijke oorzaak worden aangewezen. Naar aanleiding van de uitgevoerde visuele interpretatie kunnen de volgende konklusies worden getrokken:

1. er kan vaak een algemene indruk worden verkregen van (de toplaag van) een perceel in termen van droog of nat.
2. de vocht-patronen op de FC-foto zijn in het radarbeeld voor veel percelen in meer of mindere mate terug te vinden.
3. de patronen in de radarbeelden die onder verschillende invalshoeken zijn opgenomen, komen veelal in redelijke mate overeen.

3.4. KONKLUSIES EN AANBEVELINGEN

Ten aanzien van de toepassing van de X-band radar en het gebruik van het model van ATTEMA et al. (1982) voor het schatten van het vochtgehalte in de bodemtoplaag onder veld-omstandigheden zoals die in Ulvenhout Galder voorkomen, worden de volgende konklusies getrokken:

1. Backscatterwaarden waargenomen onder een bepaalde invalshoek vertonen een verband met het gemiddelde perceelsvochtgehalte. De korrelatiekoëfficiënten zijn echter te laag. Een nauwkeurige schatting van het bodemvochtgehalte van de toplaag uit backscatterwaarden in dan ook niet mogelijk.

Fig. 14. Fragment van een radarbeeld van het proefgebied met geprojekteerde topografische kaart (Boven) en de overeenkomstige false colour (FC) foto (Beneden).

1. Donkere tint op FC-foto en lichte tint op het radarbeeld komt overeen met een hoog bodemvochtgehalte.
2. Lichte tint op FC-foto en donkere tint op radarbeeld komt overeen met een laag bodemvochtgehalte.
3. Verschil in vochtgehalte van twee percelen komt niet tot uiting op het radarbeeld

De veldomstandigheden zijn variabel voor wat betreft plantenresten, opslag van onkruid en oppervlakte ruwheid en hebben de resultaten ongunstig beinvloed.

2. Toepassing van het backscattermodel voor kale grond van ATTEMA et al. (1982) is niet bruikbaar gebleken ter verklaring van het vochtgehalte van de bodemtoplaag van de percelen op basis van de gegevens uit de gebruikte dataset.
   De RMS-ruwheidswaarden blijken ook in dit experiment niet de juiste ruwheidsparameter. Een verklaring hiervoor is dat per perceel de ruwheidstoestand gevarieerd is. De bepaling van een andere, wel passende, ruwheidswaarde is problematisch. Met de inpassing van het model door de gemeten backscatterwaarnemingen blijkt het niet mogelijk om eenduidige waarden van voor ruwheid en de daaraan gekoppelde F-waarde te genereren. De inpassing van de modelkurve blijkt problematisch vanwege de spreiding en het geringe aantal waarnemingen. De spreiding is mede veroorzaakt, doordat langs twee zijden van het proefgebied is gevlogen. Hierdoor wordt de invloed van de ruwheid van en vochtverdeling in de bodem niet uniform opgenomen. Door het vliegen van meer tracks worden meer waarnemingen verkregen. Omdat de gebruikte X-band SLAR het coherente deel van de backscatter niet meet is het niet mogelijk het model van ATTEMA et al. voor invalshoeken beneden de 30 graden te extrapoleren. Daarom is het niet mogelijk gebruik te maken van de ruwheidsonafhankelijke backscatterwaarden tussen de 10 en 20 graden invalshoek.
3. De kwaliteit van de radarbeelden van de verschillende tracks is zodanig dat de projektie van een digitale topografische kaart over de beelden noodzakelijk is om proefpercelen met een redelijke nauwkeurigheid te lokaliseren. De plaatsing van corner-reflectoren tijdens de opnamen kan de aanwijzing van paspunten vergemakkelijken.
4. Uit de visuele interpretatie van de X-band SLAR beelden komt naar voren dat ook binnen percelen in zekere mate patronen zijn te onderscheiden die overeenkomst vertonen met de vochtpatronen op de FC-foto's. Mede gezien de spreiding in de vochtgehalten per perceel kan gekonkludeerd worden dat een perceel in het proefgebied niet de juiste eenheid is voor vochtbemonstering.
   Een intensievere bemonstering van qua vochtgehalte meer homogene gedeelten van percelen, geeft waarschijnlijk minder problemen bij de vaststelling van de gemiddelde vochtgehalte van de toplaag.

Bij de bepaling van de grootte van deze lokaties moet rekening worden gehouden met de fout van de projektie van de digitale kaart en het minimale aantal onafhankelijke backscatterwaarnemingen dat benodigd is om een betrouwbaar backscatter-gemiddelde te verkrijgen.

5. Uit het voorkomen van patronen binnen perceelsgrenzen kan worden afgeleid dat de ruimtelijke resolutie van de radaropnamen in verhouding tot de gemiddelde oppervlakte van de percelen in het proefgebied voldoende lijken.

   Radarsystemen met grotere pixelafmetingen en een kleiner aantal backscatterwaarnemingen per pixel (zoals dat bijvoorbeeld bij de ERS1-satelliet het geval zal zijn), zijn voor dit soort kleinschalige gebieden waarschijnlijk niet bruikbaar.

Konkluderend kan worden gesteld dat er een relatie bestaat tussen het gemiddelde perceelsvochtgehalte en radarbackscatter. De betrouwbaarheid van de geschatte bodemvochtgehalten is echter beperkt. Uit de literatuur blijkt dat voor bodemvochtdetektie het gebruik van een radar met een langere golflengte dan de gebruikte X-band radar betere resultaten oplevert. Toepassing van verbeterde modellen om de invloed van de oppervlakte ruwheid en het bodemvochtgehalte op de backscatter te bepalen is noodzakelijk.

SAMENVATTING

Op 6 april 1988 zijn multispektrale en thermische opnamen en X-band radarbeelden gemaakt van het proefgebied Ulvenhout-Galder. Dit verslag behandelt de bevindingen ten aanzien van de samenhang tussen de X-band radarbeelden en het bodemvochtgehalte. Dit alles onder omstandigheden zoals die voorkomen in de landinrichtingspraktijk, zoals in dit geval het herinrichtingsgebied Ulvenhout-Galder.
Uit radaronderzoek is bekend dat de echo van een radar (backscatter) van kale grond wordt bepaald door een aantal parameters: de hoek van aanstraling, de gebruikte frekwentie, de ruwheid van het aangestraalde perceel en het vochtgehalte van het aangestraalde oppervlak.
Het blijkt dat als de backscatterwaarden van de verschillende aangestraalde objekten worden uitgezet tegen de bijbehorende invalshoeken een verloop ontstaat waarbij bij toenemende invalshoek de backscatter afneemt. Het niveau van de kromme wordt bepaald door het vochtgehalte, terwijl de kromming door de ruwheid van het aangestraalde objekt wordt bepaald.
Bovendien blijkt uit literatuur dat voor invalshoeken van 10 tot 20 graden de backscatterkurven elkaar snijden. Dan heeft de oppervlakteruwheid van het aangestraalde objekt een gelijke invloed op de backscatterwaarde. Bij een gegeven frekwentie van de radar is de backscatter in een dergelijk geval slechts afhankelijk van het vochtgehalte van het objekt.
De vorm van deze kromme is door ATTEMA et al (1982) in een vergelijking met de genoemde parameters als variabelen vastgelegd. De toepassingsmogelijkheid van dit model is onderzocht.
Over de 6 radarbeelden is een gedigitaliseerde topografische kaart van het projektgebied geprojekteerd. Vervolgens zijn de pixelwaarden van elk van de de 9 percelen per radarbeeld bepaald, waarmee de gemiddelde radarbackscatter van elk perceel is berekend. De 6 beelden leveren per perceel 6 hoeken met bijbehorende backscatters op. Door de 6 backscatterwaarden van ieder perceel is getracht de kurve van Attema et al. (1982) te fitten. Het bleek niet mogelijk uit de fitprocedure betrouwbare parameters voor het vochtgehalte en de ruwheid af te leiden. Toepassing van de in het veld gemeten ruwheidsparameter bleek evenmin mogelijk. Het model kan niet gebruikt worden voor extrapolatie van de meetgegevens naar 10 tot 20 graden

invalshoek, omdat het coherente deel van de backscatter niet wordt gemeten door de SLAR. De kwantitatieve analyse is zodoende beperkt tot het korreleren van backscatterwaarden met een gelijke invalshoek en het vochtgehalte van percelen ($0.60 < r < 0.68$).
Een visuele interpretatie is uitgevoerd aan de hand van plots van de radarbeelden op schaal 1:13 200. Er is gekeken of de patronen welke zichtbaar zijn in de percelen, of klusters van percelen, op de false color foto's ook op de radar-beelden traceerbaar zijn. Met de ruwheid en invalshoek wordt bij deze beoordeling geen rekening gehouden. Uit de visuele interpretatie blijkt dat de vocht-patronen op de false color foto in het radarbeeld voor veel percelen in meer of mindere mate terug te vinden zijn.
Konkluderend kan gesteld worden dat er een relatie bestaat tussen het gemiddelde perceelsvochtgehalte en de backscatter van de X-band SLAR. De kwaliteit van de relatie is matig. Enerzijds is dit te verklaren uit variabele veldomstandigheden (onkruid opslag en stopel) en de niet optimale geschiktheid van X-band radar voor bodemvochtdetektie. Anderzijds dient een verbeterd backscattermodel gebruikt te worden om een betere relatie tussen de backscatter en het bodemvochtgehalte te verkrijgen.

LITERATUUR

ATTEMA, E.P.W., P.J. VAN KATS and L.KRUL, 1982. A radar signature model for partially coherent scattering from irregular surfaces. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol GE-20: 76-84.

BRADLEY, G.A., F.T. ULABY, 1981. Aircraft radar response to soil moisture. Remote Sensing of Environment, Vol 11: 419-438.

DOBSON, M.G. and F.T. ULABY, 1986. Active microwave soilmoisture research, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol GE-24: 23-36.

DROESEN, W.J., 1989. Detektie van bodemvocht met behulp van reflektie- en stralingstemperatuurmetingen in een zandgebied. ICW nota, in voorbereiding.

DROESEN, W.J. en A.M. VAN LIESHOUT, 1988. Toepassingsmogelijkheden van remote sensing in de voorbereidingsfase van een landinrichtingsprojekt. ICW nota 1832, Wageningen.

HALLIKAINEN, M.T., F.T. ULABY, DOBSON M.C., M.A. EL-RAYES and L. WU, 1985. Microwave dielectric behavior of wet soil, Part 1: Emperical models and experimental observations.IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol GE-23: 25-34.

HOEKMAN, D.H., 1983. Radar verstrooiingsmodellen voor vegetatie en kale bodems. Cultuurtechnisch Tijdschrift, jg 22, nr 5: 315-326.

HOEKMAN, D.H., 1986. Teledetektie in het mikrogolfgebied. Syllabus van de vakgroep Landmeetkunde en Teledetektie, LUW, Wageningen.

HUYGEN, J., 1982. Detektie van bodemvocht in een weidegebied met behulp van X- en C-band radar. deel 1: beschrijving van het gebied, Principes van radar, Interpretatie van SLAR-beelden. ICW nota 1329, Wageningen.

IDSO S.B., R.D. JACKSON, R.J. REGINATO, B.A. KIMBALL and F.J. NAKAYAMA, 1975. The dependence of bare soil albedo on soil water status. Journal of applied Meteorology, Vol 14: 109-113.

JAARSMA, M.N. en W.J. DROESEN, 1989. Mogelijkheid van remote sensing bij de inventarisatie ten behoeve van landinrichtingsprojecten: Kartering van grondgebruik en vegetatie. ICW-nota in voorbereiding.

JACKSON T.J. and P.E. O'NEILL, 1980. Aircraft scatterometer observations of soil moisture on rangeland watersheds. USDA-Hydrology lab, Beltsville & NASA Goddard space flight centre, Greenbelt.

LOOR, G.P. DE, 1987. Moisture determinations in and under vegetation canopies: Part II, results after parametrization of the Cloud model. Fysisch en Elektronisch Lab. TNO, Den Haag, report FEL 1986-63. Report BCRS-87-03.

LOOR, G.P. DE, 1983. The dielectric properties of wet materials. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol GE-21: 364-369.

KOOLEN, A.R., F.F.R. KOENIGS and W. BOUTEN, 1979. Remote sensing of surface roughness and top soil moisture of bare tilled soil with a X-band radar. Netherlands Journal of Agricultural Science, Vol 27: 286-296.

REEVES, G.R., A. ANSON and D. LANEN (editors), 1975. Manual of Remote Sensing, Vol 1 Theory, instruments, and techniques. American Society of Photogrammetry, Londen.

SCHMUGGE, T.J., 1983. Remote sensing of soil moisture: Recent advances. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol GE-21: 336-344.

SOARES J.V., BERNARD and D. VIDAL-MADJAR, 1987. Spatial and temporal behaviour of a large agricultural area as observed from airborne C-band scatterometer and thermal infrared radiometer. International Journal of Remote Sensing, Vol 8, no 7: 981-996.

STOLP, J. and A.R.P. JANSE, 1986. X-band radar backscattering for spatial distribution of soil slaking. ITC-Journal. Vol 1: 82-87.

ULABY, F.T., P.P. BATLIVALA and M.C. DOBSON, 1978. Microwave backscatter dependance on surface roughness, soil moisture and soil texture: Part 1 - Bare soil. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol GE-16: 286-295.

ULABY, F.T. and J.E. BARE, 1979. Look direction modulation function of the radar backscattering coefficient of agricultural fields. Photogrammetric Engeneering, Vol 45: 1495-1506.

ULABY, F.T., F KOUYATE, A.K. FUNG and A.J. SIEBER, 1982. Backscatter model for a randomly preturbed periodic surface. IEEE transactions on Remote Sensing and Geoscience, Vol GE-20: 518-528.

ULABY, F.T., R.K. MOORE and A.K. FUNG , 1981-82. Microwave Remote Sensing, Vol I en II, Adison Wesley Publ, London.

VISSERS M.A.M. and J. STOLP, 1987. Onderzoek naar de toepassing van radar X-band gegevens van kale grond in een radarverstrooiingsmodel. STIchting voor BOdemKArtering, rapportnr. 2021, Wageningen.

BIJLAGE 1

GEMIDDELDE BACKSCATTERWAARDEN, INVALSHOEK EN RMS-WAARDEN PER PROEFPERCEEL

Perceel	bscat1* (dB)	invalshoek (gr)	bscat3** (dB)	RMS (mm)
1	-24.55	56.6	-25.27	8.9
1	-27.01	66.9	-28.62	8.9
1	-22.84	40.4	-23.62	8.9
1	-22.83	51.2	-25.32	8.9
1	-20.34	31.4	-21.63	8.9
1	-22.01	40.0	-23.85	8.9
2	-21.01	60.0	-23.73	8.4
2	-23.89	65.9	-26.99	8.4
2	-18.56	45.5	-22.11	8.4
2	-19.52	46.1	-22.08	8.4
2	-15.72	34.8	-18.21	8.4
2	-18.54	37.7	-21.02	8.4
3	-21.31	42.3	-19.16	5.6
3	-23.84	71.6	-22.38	5.6
3	-18.45	30.1	-16.72	5.6
3	-20.37	57.7	-18.05	5.6
3	-16.54	21.4	-13.69	5.6
3	-19.06	47.5	-16.75	5.6
4	-20.34	58.8	-20.23	6.5
4	-22.93	64.4	-23.29	6.5
4	-17.60	42.3	-17.53	6.5
4	-19.51	44.5	-19.66	6.5
4	-15.62	34.2	-15.36	6.5
4	-16.88	37.3	-17.20	6.5
5	-15.56	53.8	-13.91	4.0
5	-18.36	67.2	-17.06	4.0
5	-12.87	37.0	-11.23	4.0
5	-14.88	50.2	-13.25	4.0
5	-10.90	29.6	- 9.00	4.0
5	-12.37	41.0	-11.06	4.0
6	-31.16	61.9	-25.32	6.9
6	-30.99	62.9	-23.69	6.9
6	-27.67	46.3	-21.35	6.9
6	-24.58	45.9	-18.39	6.9
6	-24.21	37.4	-18.30	6.9
6	-24.07	34.7	-17.89	6.9
7	-15.81	59.0	-12.11	7.7
7	-18.87	63.7	-15.22	7.7
7	-13.31	47.3	- 9.52	7.7
7	-14.62	46.3	-11.30	7.7
7	-10.75	34.8	- 7.24	7.7
7	-13.21	36.1	- 9.22	7.7

BIJLAGE 1 (vervolg)

GEMIDDELDE BACKSCATTERWAARDEN, INVALSHOEK EN RMS-WAARDEN PER PROEFPERCEEL

Perceel	bscat1* (dB)	invalshoek (gr)	bscat3** (dB)	RMS (mm)
8	-16.77	58.3	-12.33	*
8	-19.75	59.5	-14.39	*
8	-13.93	42.6	- 9.52	*
8	-15.52	45.5	-11.49	*
8	-11.56	34.9	- 7.42	*
8	-14.19	36.2	- 9.30	*
9	-16.26	54.7	-12.30	*
9	-19.36	66.5	-15.43	*
9	-13.97	37.7	- 9.69	*
9	-15.22	42.9	-11.41	*
9	-11.31	30.8	- 7.47	*
9	-14.21	40.0	- 9.36	*

* gemiddelde backscatter van een geheel perceel
**gemiddeide backscatter van een verkleind perceel