

NN31545.1329

1329

maart 1982

Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding  
Wageningen

**DETEKTIE VAN BODEMVOCHT IN EEN WEIDEGEBIED  
MET BEHULP VAN X- EN C-BAND RADAR**

Deel I:

Beschrijving van het gebied

Principes van radar

Interpretatie SLAR beelden

ir. J. Huygen

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

ISBN 159195-02

96 JUNI 1982

## I N H O U D

	blz.
1. INLEIDING	1
2. BESCHRIJVING DOELGEBIED	4
2.1. Inleiding	4
2.2. Geologie	4
2.3. Beschrijving eenheden bodemkaart	6
3. PRINCIPES VAN MIKROGOLFWAARNEMINGEN	10
3.1. Inleiding	10
3.2. Principe van de SLAR	11
3.3. Het scheidend vermogen van SLAR systemen	13
3.4. Verbetering scheidend vermogen	17
3.5. De Synthetic Aperture Radar	17
3.6. Geometrische karakteristieken van SLAR beelden	20
3.7. Interactie tussen mikrogolven en aardoppervlak	23
4. DE SLAR OPNAMEN VAN HET LANDGOED DE SLANGENBURG	25
4.1. Veldmetingen	25
4.2. De eerste vluchtdag 18-6-1981	25
4.3. De tweede vluchtdag 3-7-1981	28
LITERATUUR	29

## 1. INLEIDING

Gedurende de zomermaanden van 1981 is door het European Space Agency (ESA) en het Joint Research Centre (JRC, Ispra (I)) de Convair SAR-580 van het Canadees Centrum voor Remote Sensing naar Europa gehaald. Het doel was belangstellende Europese onderzoeksinstellingen in staat te stellen gebruik te maken van de geavanceerde SAR (Synthetic Aperture Radar) apparatuur in een zo breed mogelijk scala van remote sensing experimenten.

Radar remote sensing is sterk in opkomst. Het is een zogenaamde actieve techniek waarbij door het meetinstrument zelf straling wordt uitgezonden die vervolgens na terugkaatsing tegen het te onderzoeken object of oppervlak weer wordt geregistreerd. Het grote voordeel van radar ten opzichte van de meer conventionele luchtwaarnemingstechnieken als false colour fotografie, MSS en IRLS is, dat de kwaliteit van de beelden onafhankelijk is van de weersgesteldheid tijdens de opname.

Nederland heeft de beschikking over een zogenaamde SLAR (Side Looking Airborne Radar). Deze SLAR heeft een betrekkelijk gering oplossend vermogen en kan alleen waarnemingen doen in de zogeheten X-band (frequentie  $f = 9.5$  GHz, golflengte  $\lambda = 3$  cm). Door het ROVE team (Radar Onderzoek aan VEgetatie, waaraan deelnemen TH Delft, TNO, CABO en LH) wordt al jarenlang geëxperimenteerd met 3 cm radar, voornamelijk op het gebied van gewasherkenning. Voor detectie van bodemvocht moeten de radargolven de bodem kunnen binnendringen, de 3 cm radar is daarom voor dit doel niet optimaal. Radargolven met een golflengte van 3 cm of minder worden namelijk vrijwel geheel gereflekteerd door gewas of bodemoppervlak. Voor radargolven met een grotere golflengte is een gewas meer transparant. Een eenvoudige vuistregel zegt, dat de indringingsdiepte van radargolven in de bodem

ruwweg gelijk is aan de halve golflengte. De C- ( $\lambda=7$  cm) en de L-band ( $\lambda=25$  cm) zijn in principe dan ook meer geschikt voor de bepaling van de vochteigenschappen van de toplaag van de bodem.

De reflectie van radargolven is naast de diëlektrische eigenschappen van de bodem (vanwege de hoge diëlektrische konstante van water worden deze voornamelijk bepaald door het vochtgehalte van de grond) afhankelijk van observatiehoek en oppervlakteruwheid. Vanwege deze effecten kwam ULABY (1978 en 1979) tot de konklusie dat voor de bepaling van de diëlektrische eigenschappen van de bodem de C-band de voorkeur verdient. Over deze keuze is evenwel het laatste woord nog niet gesproken.

Omdat de SAR wel in de geschikte golflengtegebieden opnamen kan maken is er als Nederlands aandeel in de zogenaamde SAR-580 campagne onder andere een proef opgezet waarbij de mogelijkheden van radar als bodemvochtdetektor worden nagegaan.

In dit kader zijn op 18-6-1981 en 3-7-1981 radaropnamen (zowel SLAR als SAR) gemaakt van een gebied in de omgeving van Doetinchem, op het landgoed de Slangenburg (fig. 1).

Tegelijkertijd zijn in het veld vochtmonsters genomen van de toplaag (0-10 cm) van de bodem in een aantal geselecteerde grasland percelen. Dit doelgebied was uitgekozen omdat op grond van topografie en bodemgesteldheid vochtverschillen verwacht konden worden. Bovendien is het betreffende gebied in detail bestudeerd en gekarteerd door de Stiboka (VRIELINK en VAN DEN HURK, 1979).

Van de monsters zijn zowel volume- als gewichtsvochtgehalten bepaald. Hieruit bleek dat er tijdens de vluchten inderdaad aanzienlijke vochtverschillen in de toplaag voorkwamen zodat hiermee de mogelijkheden van radar moeten kunnen worden aangetoond. Door omstandigheden zijn de tapes met de gedigitaliseerde SAR-opnamen voorlopig nog niet beschikbaar (januari 1982). Daarom is de rapportage van een en ander in tweeën gesplitst. Het voorliggende deel I bevat een beschrijving van het gebied, een uitleg over het principe van mikrogolfwaarnemingen en een interpretatie van de SLAR-beelden. Deel II zal dan de interpretatie van de SAR-opnamen bevatten alsmede een evaluatie van de mogelijkheden van radar voor detektie van bodemvocht.

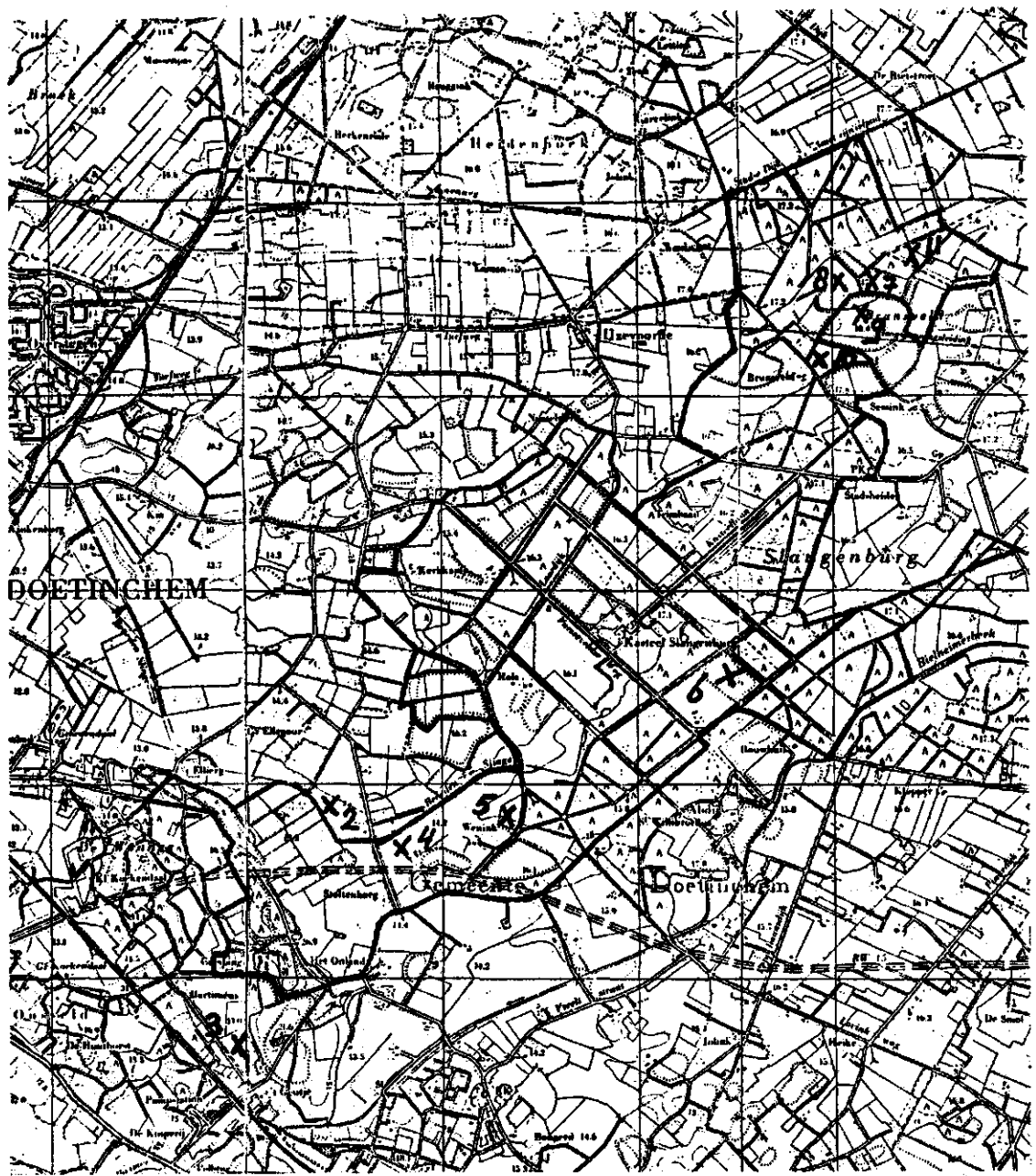


Fig. 1. Landgoed de Slangenburg met daarbij aangegeven de voor het radar experiment geselekteerde percelen

## 2. BESCHRIJVING DOELGEBIED

### 2.1. I n l e i d i n g

De Slangenburg vormt een langgerekt grillig begrensd gebied ongeveer 6 km ten oosten van Doetinchem. De oppervlakte bedraagt ongeveer 600 ha (fig. 1). Het gebied bestaat grotendeels uit een zwak golvend dekzandlandschap, het wordt in de lengterichting doorsneden door de Beneden Slinge en aan de oostzijde over een korte afstand begrensd door de Bielheimerbeek. Beide beken stromen in zuidwestelijke richting en monden uit in de Oude IJssel, langs de oevers vindt men brede stroken vlakke, sterk lemige en kleiïge beekafzettingen.

In het zuiden ligt een noordwest-zuidoost gerichte reeks oude rivierduinen, 'De wrange Bulten' geheten, die hoog boven de omgeving uitsteken.

Een groot deel van de Slangenburg ligt op 15-20 m boven NAP. Een kleiner deel ligt op het niveau van het Oude IJssel gebied (10-15 m +NAP) en een groot deel van de rivierduinen in het uiterste zuidelijke (westelijke) deel op 20-25 m hoogte.

### 2.2. G e o l o g i e

Het huidige landschap heeft zijn ontstaan voor een groot deel te danken aan de rivier de Oude IJssel die in de laatste ijstijd (Weichselien) nog deel uitmaakte van het stroomgebied van de Rijn. De Oude IJssel had in het pleistoceen het karakter van een verwilderde rivier. Aanvankelijk werden zeer grove zanden en grind afgezet maar later, bij het afnemen van de stroomsnelheid, kon ook fijner zandig materiaal tot afzetting komen. In het laatste stadium tenslotte werden met name in de lagere delen van het rivierland- schap alleen zware sedimenten afgezet, de zogenaamde rivierlemen. De rivierafzettingen vormen de ondergrond van het hele gebied.

Reeds tijdens de afzetting van het rivierzand en het rivier- leem, maar vooral gedurende de daarop volgende koude en droge periode van het Weichselien speelde de wind een belangrijke rol

bij de vorming van het landschap. Er ontstonden uitgebreide verstuivingen die het oude dekzand afzetten. Aangenomen wordt dat het fijnste materiaal uit het toen droogliggende Noordzeebekken afkomstig was en dat de grovere bestanddelen van lokale herkomst waren. Het reliëf van het oude dekzand landschap is zeer zwak golvend tot vlak.

In het laatste deel van het Weichselien zijn als gevolg van de droogte en de schrale begroeiing vooral de hoogste delen van het oude dekzand landschap opnieuw in verstuiving geraakt. Het zand werd echter over betrekkelijk korte afstanden verplaatst. Het landschapsreliëf van dit zogenaamde jonge dekzand is eveneens zwak golvend, maar opmerkelijk onrustiger. Goed waarneembare ruggen en koppen wisselen op korte afstand af met vlakke gedeelten. Veel van de in het huidige Achterhoekse landschap opvallend hoog gelegen oude bouwland- of esgronden liggen op ruggen of koppen van jong dekzand; zo ook enkele van de in het gebied de Slangenburg aanwezige essen.

Tussen jong dekzand en oud dekzand enerzijds en oud dekzand en rivierzand anderszijds komen overgangslagen voor die men heel toepasselijk mengzand genoemd heeft.

Tijdens droge perioden in het laatste deel van het Weichselien is zelfs een deel van de droge rivierbeddingen in verstuiving geraakt. Leemarme rivierzanden werden door de wind uit de bedding van de Oude IJssel opgenomen en op korte afstand van de rivier op oudere sedimenten afgezet. Landschappelijk vallen deze afzettingen van rivierstuifzanden op als langgerekte, vrij smalle, duinachtige complexen (rivierduinen) aan de oostzijde van de Oude IJssel, zoals in het zuidelijk deel van de Slangenburg, waar deze duinen plaatselijk meer dan 10 meter boven de omgeving liggen.

In het Holoceen stroomde de Oude IJssel reeds in een min of meer vaste bedding. Smalle zijtakken, de beken, voerden water aan vanuit de hooggelegen gebieden van de Achterhoek. Tevens vormden deze beken het natuurlijke ontwateringsstelsel van het door dekzanden en rivierstuifzanden gedeeltelijk afgedekte gebied van de rivierzanden en de rivierleem. De af te voeren hoeveelheden water moeten groot genoeg zijn geweest om de beken een sterk eroderende werking te geven. Materiaal van het aangesneden landschap werd in natte

perioden door de beken opgenomen en als een vrij dun dek elders in het gebied weer afgezet. Deze als beekbezinking bekende afzetting bestaat meestal uit een pakket fijne zanden met leemlaagjes, dat op veel plaatsen is afgedekt door een laag sterk of zeer sterk lemig, lutumhoudend zand.

De Slinge heeft vermoedelijk de meeste beekbezinkingsgronden van de Slangenburg afgezet. De geologische opbouw van het gebied is schematisch weergegeven in fig. 2.

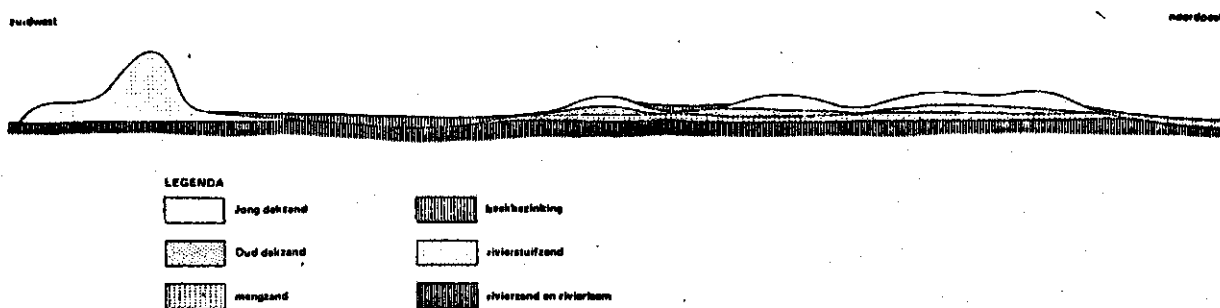


Fig. 2. Schematische dwarsdoorsnede door het gebied  
Uit /8/

### 2.3. B e s c h r i j v i n g e e n h e d e n b o d e m k a a r t

De bodemkaart van het gebied is weergegeven in fig. 3.

#### H - humuspodzolgronden

De humuspodzolgronden treft men aan in het noorden van de boswachterij over een vrij aaneengesloten oppervlak en verder verspreid over de boswachterij in de hogere dekzandopduikingen tussen de zandeerdgronden en de leemgronden. Ze zijn gevormd onder vochtige tot natte omstandigheden. De podzolen hebben op het



ogenblik grondwatertrap VI of VII, hetgeen betekent dat er ook in normale gemiddelde jaren een groeistagnatie kan optreden door vochttekort. Dit geldt vooral voor de leemarme typen (leemgehalte 1), omdat hier de kapillaire nalevering geringer is. Het bodemgebruik is zowel grasland als bos.

#### EZ - dikke enkeerdgronden

Enkeerdgronden zijn zandeerdgronden met een dikke (> 50 cm) humeuze bovengrond, ontstaan door een zeer langdurig toegepaste bemesting met materiaal dat vanuit de potstal werd aangevoerd. In dit gebied komen vooral de zogenaamde zwarte enkeerdgronden voor. Dit komt omdat de plaggen die in de potstal werden gebruikt van gronden kwamen waarin een humuspodzol was ontwikkeld. De enkeerdgronden hebben grondwatertrap VII. Dit betekent dat de vochtvoorziening vrijwel geheel afhankelijk is van de gevallen neerslag. Het dikke humeuze dek heeft echter een groot vochthoudend vermogen, zodat droge perioden kunnen worden overbrugd zonder een ernstige produktieverlaging van de gewassen. Het bodemgebruik is bouwland en grasland.

#### Z - kalkloze zandgronden

Deze kunnen worden onderverdeeld in gooreerdgronden, beekeerdgronden en vorstvaaggronden.

Gooreerdgronden zijn zandeerdgronden met een dunne (< 30 cm) of matig dikke (30-50 cm) humeuze bovengrond. De bodemvorming heeft plaatsgevonden onder invloed van het grondwater. Ze komen hoofdzakelijk voor in het midden en zuiden van de boswachterij en vormen zowel bodemkundig als landschappelijk de overgang van de podzolgronden naar de beekeerdgronden of de leemgronden. Het bodemgebruik is bos en grasland.

Ook beekeerdgronden zijn zandeerdgronden met een dunne of matig dikke humeuze bovengrond. Ze zijn onder nog nattere omstandigheden gevormd dan de gooreerdgronden. De bovengrond is veelal sterk lemig of zelfs lutumhoudend. Het bodemgebruik is bos en vooral grasland. De gooreerd- en beekeerdgronden hebben nu grondwatertrap V\* en VI. Het zijn vrij goede gronden die alleen in droge jaren enig vochttekort hebben.

De vorstvaaggronden treffen we vooral aan in het zuidwesten, in de hoge rivierduinen. Ze hebben noch een minerale eerdlaag noch een podzol-B horizont. Het zijn gronden met weinig mogelijkheden. Ze zijn zeer droogtegevoelig (grondwatertrap VII\*) en arm. Ze zijn voornamelijk beplant met pinus soorten.

#### KR - oude rivierkleigronden

Deze zogenaamde leemgronden treft men in de beekdalen over vrij grote aaneengesloten oppervlakten aan. Ze bestaan uit zandige leem (50-85% leem). Het lutumgehalte varieert van 8 tot 20%. Ze hebben grondwatertrap III en V\*. De gronden met grondwatertrap III zijn geregeld te nat en alleen geschikt als grasland. Waar grondwatertrap V\* voorkomt treft men naast grasland ook bos aan.

#### Legenda bodemkaart 1 : 50 000

Hoofdklasse	letters voor en na hoofdklassekodering
H = humuspodzol-	n = nat, grond heeft duidelijk hydromorfe kenmerken
EZ = dikke enkeerdgronden	z = zwarte enkeerdgrond b = bruine enkeerdgrond
Z = kalkloze zandgronden	n = nat, grond heeft duidelijk hydromorfe kenmerken b = hydromorfe kenmerken beginnen onder de B2 p = dunne enkeerdlaag
KR = oude rivierkleigronden	f = plaatselijk ijzerrijk, binnen 50 cm beginnend en tenminste 10 cm dik

#### Cijferkode

Bij de zandgronden (H, EZ en Z) duidt het eerste cijfer de mediaan van de zandfractie aan.  
2 = fijn zand  
Het tweede cijfer heeft betrekking op het leemgehalte van de bouwvoor van 15-30 cm beneden maaiveld.  
1-3 = leemarm tot zwak lemig zand.  
Bij de kleigronden duidt het eerste cijfer het lutumgehalte van de bouwvoor aan op 15-30 cm diepte.  
1 = 8 - 17.5% lutum: lichte zavel.

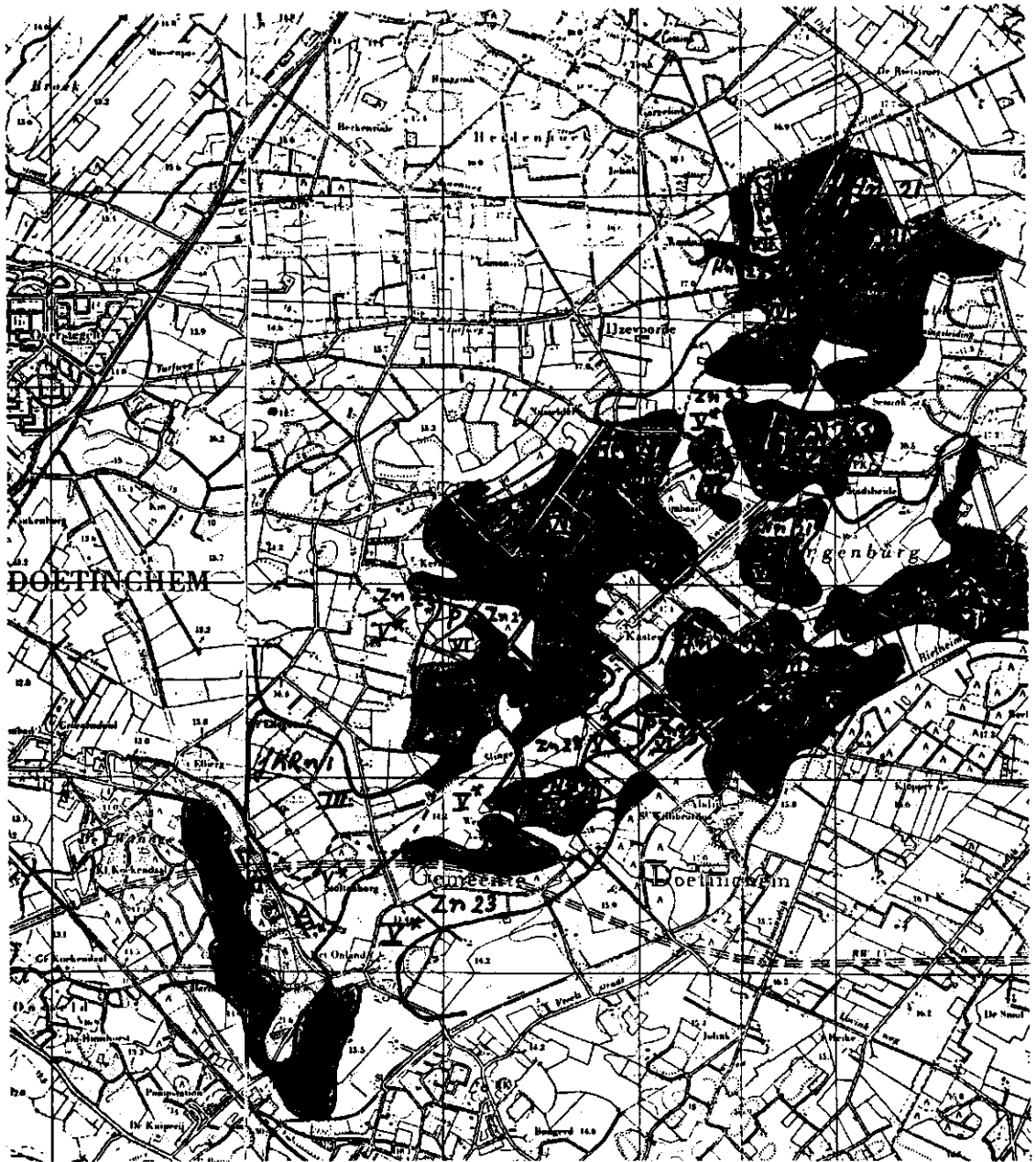


Fig. 3. Bodemkaart 1 : 50 000 van het landgoed de Slangenburg  
(STIBOKA)

### 3. PRINCIPES VAN MIKROGOLFWAARNEMINGEN

#### 3.1. In l e i d i n g

Mikrogolfwaarneming komt tot stand door middel van de meting van emissie en/of reflectie van elektromagnetische straling in het golflengtegebied van  $\pm 1$  mm tot 1 m. Mikrogolven zijn dus tot enige miljoenen malen langer dan lichtgolven. Ondanks dat de meetresultaten van mikrogolf sensoren veelal worden gepresenteerd als een soort foto heeft het feit dat met veel langere golven wordt gewerkt een zo vergaande invloed op de objekt-sensor interactie, dat er weinig overeenkomst is met fotografische opnamen, noch wat betreft de techniek, noch wat betreft de informatie inhoud.

Voor remote sensing doeleinden is de toepassing van mikrogolven bijzonder aantrekkelijk omdat de atmosfeer voor deze golven vrijwel transparant is. Men kan dus waarnemen door regen, mist en wolken heen en dit zowel overdag als 's nachts.

Mikrogolf sensoren kunnen worden onderverdeeld in passieve en actieve systemen. Passieve sensoren of radiometers registreren de straling die door objekten van nature wordt uitgestraald. In combinatie met een bundelende antenne wordt een beeldvormend instrument verkregen. De geringe intensiteit van de natuurlijke straling in het mikrogolfgebied maakt passieve mikrogolf remote sensing evenwel weinig interessant, zeker voor toepassingen die een grote resolutie (= oplossend vermogen) vereisen.

Bij actieve systemen, die bekend staan onder de naam RADAR (akroniem voor RADio Detection And Ranging), maakt naast een ontvanger voor mikrogolfstraling ook een stralingsbron deel uit van de sensor. De ontvanger meet de door het objekt gereflekteerde fraktie van het 'eigen' signaal van de zender. Naast niet-beeldvormende radar systemen (zoals zogenaamde scatterometers of ruheidsmeters die wel voor remote sensing van het zeeoppervlak worden toegepast) bestaan beeldvormende systemen, waarbij het beeld met behulp van een bundelende antenne wordt verkregen.

Vooral deze laatste systemen zijn voor remote sensing toepassingen geschikt. Bij vliegtuig radar remote sensing plaatst men

hiertoe een antenne aan de onderkant van het vliegtuig en wel zodanig dat de antenne opzij kijkt. Een dergelijk systeem wordt Side Looking Airborne Radar (SLAR) genoemd. Het geheel kan eventueel tweezijdig uitgevoerd zijn.

Naast resolutieverbetering ten opzichte van passieve systemen biedt de radar ook nog de mogelijkheid de stralingsparameters zoals polarisatie en golflengte te kiezen zodat, afhankelijk van de toepassing, optimale gevoeligheid wordt verkregen voor de gewenste objekteigenschappen bij minimale interferentie door ongewenste factoren.

### 3.2. Principe van de SLAR

Via de antenne wordt een puls microgolf energie naar de aarde gezonden. De tijdsduur van de puls bedraagt minder dan 1 mikro sekonde. De gerichte puls beweegt zich radiaal van het vliegtuig af en bereikt suksessievelijk objecten op de grond al naar gelang deze verder weg staan (fig. 4a).

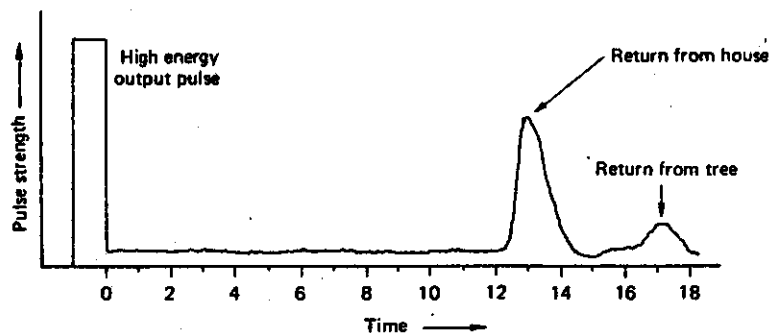
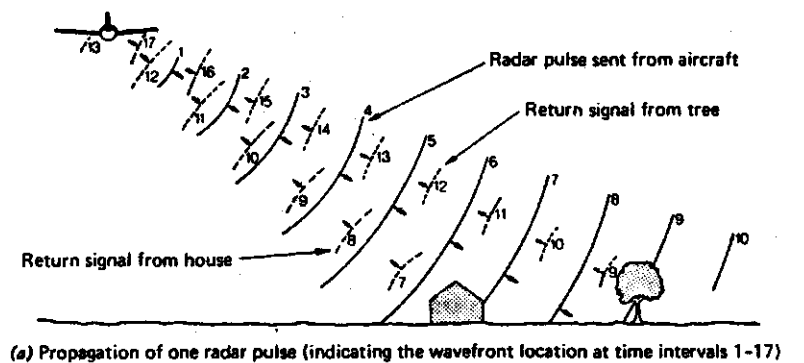


Fig. 4. Principe van side looking airborne radar (SLAR)

Uit /3/

De objecten reflektieren de stralen in een mate die voor elk oppervlak verschillend is, afhankelijk van de diëlektrische eigenschappen, het elektrisch geleidingsvermogen en oppervlakte ruheidsparementers. De sterkte van het gereflekteerde signaal dat bij de antenne terugkomt varieert in de tijd (fig. 4b). Van dit signaal kan een amplitude / tijd video signaal worden gemaakt, dat daarna op film wordt geschreven. Iedere lijn is dan een tonale representatie van de echo van een enkele radarpuls. Beweegt de film nu met een snelheid die evenredig is met de vliegsnelheid dan geeft de gecombineerde respons van veel radarpulsen een tweedimensionaal beeld van de belichte strook van het aardoppervlak. Ook kan het gereflekteerde signaal direkt in gedigitaliseerde vorm op magneetband worden gezet. Deze laatste methode is te prefereren. Bij adequate kalibratie heeft men dan de beschikking over absolute reflectiewaarden en met behulp van moderne beeldverwerkingsapparatuur kan men nadien toch op alle mogelijke manieren een beeld produceren.

Door de tijd te meten tussen uitzenden en ontvangen van signaal kan de afstand tussen transmitter en reflektierend objekt worden bepaald (zie ook fig. 5).

Deze wordt gegeven als:

$$S_r = \frac{cT}{2} \quad (1)$$

waarin:

$S_r$  = slant range, dit wil zeggen de direkte afstand tussen zender en objekt (m)

$c$  = lichtsnelheid ( $3 \cdot 10^8$  m.s.<sup>-1</sup>)

$T$  = tijd die verstrijkt tussen zenden en ontvangen van signaal (sec.)

Aangezien de tijd wordt gemeten waarin een puls de scheve afstand  $S_{rA}$ ,  $S_{rB}$ ,  $S_{rC}$  etc. heen en terug aflegt, worden onderlinge afstanden tussen objecten geregistreerd die betrekking hebben op deze scheve afstanden en niet op de werkelijke, horizontale afstanden  $G_{rA}$ ,  $G_{rB}$ ,  $G_{rC}$  etc., waarbij  $G_r$  staat voor ground range (fig. 5). Bij de beeldverwerking moet dan ook een hyperbolische

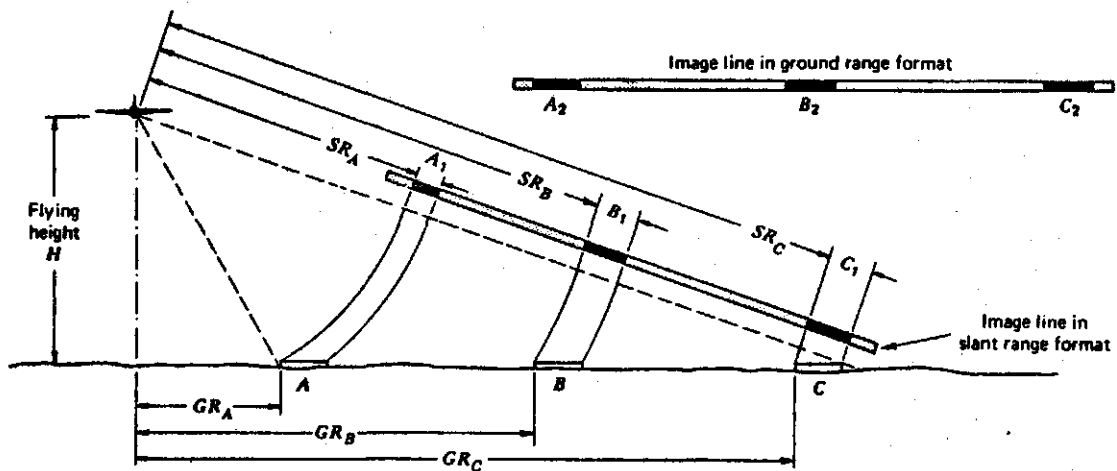


Fig. 5. Verband tussen slant range en ground range. Uit /3/

hellingkorrektie worden uitgevoerd om het geometrisch vertekend beeld tot zijn juiste verhoudingen terug te brengen.

De korrektie kan worden uitgevoerd met behulp van de betrekking

$$G_r = \sqrt{S_r^2 - H^2} \quad (2)$$

waarin:

- H = vlieghoogte (m)
- $G_r$  = ground range (m)
- $S_r$  = slant range (m)

### 3.3. Het scheidend vermogen van SLAR systemen

Het scheidend vermogen of 'resolutie' is een maat voor het vermogen om twee vlak naast elkaar liggende voorwerpen nog gescheiden te kunnen waarnemen. Bij radar is de resolutie in de 'range' richting (loodrecht op de vliegrichting) verschillend van de resolutie in de 'azimuth' richting (in de vliegrichting). De resolutie in de range richting wordt bepaald door de breedte van de puls.

Uit verg. (1) volgt namelijk dat de tijd T, nodig om de reflectie van een puls te ontvangen gelijk is aan:

$$T = \frac{2 * S_r}{c} \quad (1a)$$

T = tijd die verstrijkt tussen zenden en ontvangen van signaal, teruggekaatst door een object dat zich op schuine afstand  $S_r$  bevindt (s)

Voor een object op een grotere schuine afstand geldt:

$$T + \Delta T = \frac{2 * (S_r + \Delta S_r)}{c} \quad (3)$$

waaruit volgt:

$$\Delta T = \frac{2 * \Delta S_r}{c} \quad (4)$$

Wanneer  $\Delta T$  groter is dan de pulsduur  $\tau$ , kunnen de betreffende objecten gescheiden worden waargenomen. Voor de slant range resolutie  $\Delta S_r$  geldt daarom

$$\Delta S_r = \frac{c * \tau}{2} \quad (5)$$

De overeenkomstige afstandsresolutie in het terrein (ground range resolutie) bedraagt:

$$\Delta G_r = \frac{\Delta S_r}{\cos \alpha} = \frac{c * \tau}{2 * \cos \alpha} \quad (6)$$

waarbij  $\alpha$  de hoek voorstelt tussen de horizontaal en de lijn die antenne en object verbindt (zogenaamde depression angle) (zie fig. 6a en 6b).

De slant range resolutie  $\Delta S_r$  is dus onafhankelijk van de afstand tot het vliegtuig, de bijbehorende ground range resolutie  $\Delta G_r$  evenwel niet. Uit vergelijking (6) volgt nog dat het scheidend vermogen snel afneemt naarmate  $\alpha$  de  $90^\circ$  hoek nadert. Om deze reden kan de strook recht onder het vliegtuig dan ook nooit worden opgenomen.



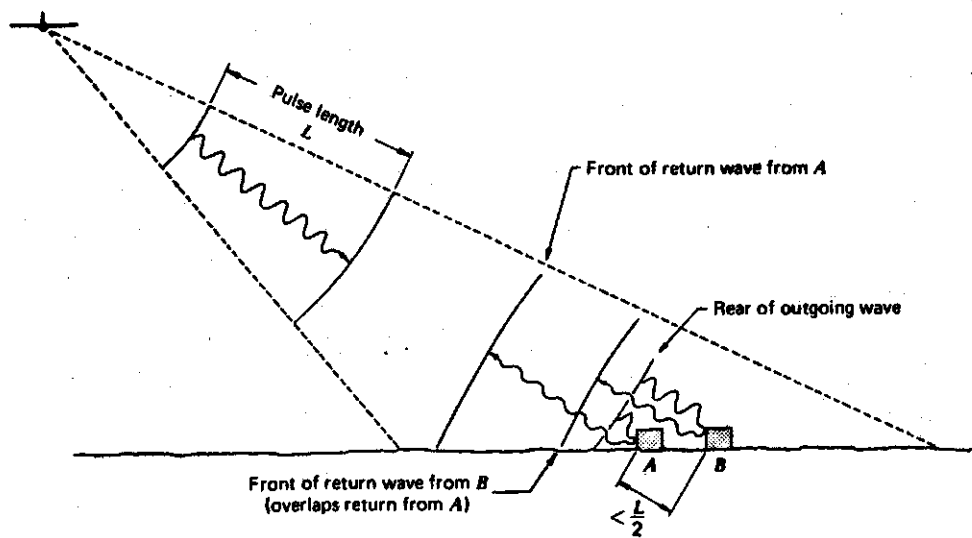


Fig. 6a. De range resolutie is afhankelijk van de pulsduur. A en B worden pas gescheiden waargenomen indien de terugkerende pulsen elkaar niet overlappen. Uit /3/

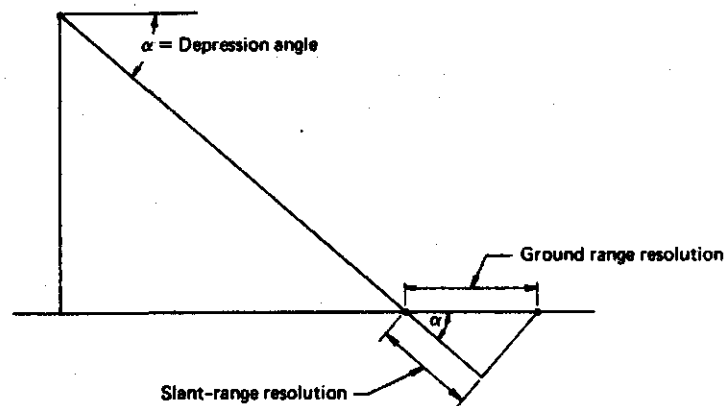


Fig. 6b. Verband tussen slant range resolutie en bijbehorende ground range resolutie. Uit /3/

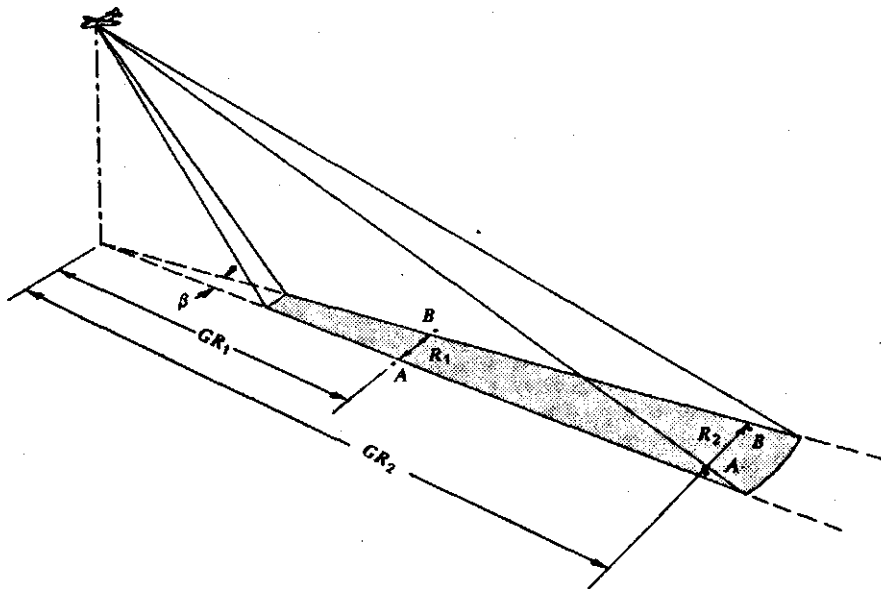


Fig. 6c. De azimuth resolutie ( $\Delta R_a$ ) hangt af van de antennebundelbreedte ( $\beta$ ) en de ground range ( $G_r$ ). Uit /3/

De resolutie in azimuth richting wordt bepaald door de bundelbreedte van de antenne en de ground range (de ground range zit in de volgende formule omdat de bundel divergeert (fig. 6c)).

$$\Delta R_a = G_r * \beta \quad (7)$$

waarin:

$\Delta R_a$  = azimuth resolutie (m)

$G_r$  = ground range (m)

$\beta$  = antenne bundelbreedte (rad)

De bundelbreedte van de antenne wordt gegeven door:

$$\beta = \frac{\lambda}{L} \quad (8)$$

waarin:

$\lambda$  = golflengte van de uitgezonden pulsen (m)

$L$  = lengte van de antenne (m)

### 3.4. V e r b e t e r i n g s c h e i d e n d v e r m o g e n

De range resolutie zou in principe verbeterd kunnen worden door de pulsduur te verkleinen. De pulsintensiteit zou dan moeten worden opgevoerd om de signaal/ruis verhouding niet te verslechteren. Dit stuit echter op praktische moeilijkheden. De azimuth resolutie zou in principe verbeterd kunnen worden door de golflengte van de uitgezonden pulsen te verkleinen of door de antenne te vergroten.

Verkleining van de golflengte heeft het bezwaar dat de invloed van de atmosfeer groter wordt en de SLAR geen 'all weather' systeem meer zou blijven. Het vergroten van de antenne stuit op praktische, konstruktie technische bezwaren.

Konkluderend kan men zeggen, dat SLAR systemen relatief eenvoudig zijn, zeker wat betreft de data verwerking. Echter door de slechte resolutie zal het gebruik beperkt blijven tot het waarnemen vanaf geringe hoogten in het golflengte gebied van de korte mikrogolven. Dit betekent dat SLAR niet geschikt is voor satelliet remote sensing.

Er zijn evenwel methoden ontwikkeld, die technisch zeer complex zijn, waarbij men toch tot een verbetering van het scheidend vermogen is gekomen. Een SLAR waarbij het scheidend vermogen speciaal in de vliegrichting is verbeterd, de zogenaamde 'Synthetic Aperture Radar', zal nu worden besproken.

### 3.5. D e S y n t h e t i c A p e r t u r e R a d a r

Bij de methode van de synthetische apertuur SLAR of SAR wordt de opening van de antenne in de vliegrichting (antenne lengte) schijnbaar vergroot door gebruik te maken van de voortbeweging van het vliegtuig. In de apparatuur moeten speciale voorzieningen worden getroffen. Bovendien moet het vliegtuig zeer exact volgens een rechte lijn kunnen navigeren.

Het basis principe is weergegeven in fig. 7. Een coherent golffront, gemoduleerd met pulsen wordt door een kleine antenne uitgezonden. De coherentie moet over een lange periode gehandhaafd

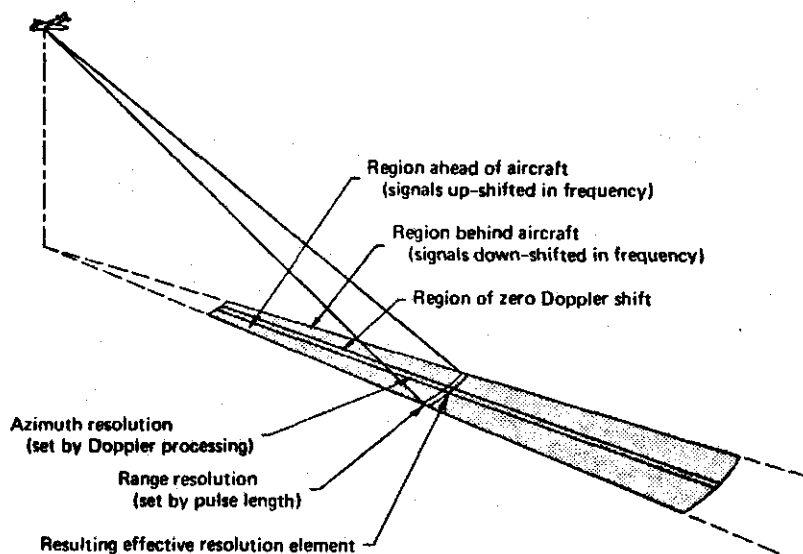


Fig. 7. De resolutie van een SLAR kan verbeterd worden met behulp van het synthetisch apertuur principe, waarbij de oorspronkelijke resolutiecel verkleind wordt door hieruit het stukje zonder frequentieverschuiving te lichten. Uit/3/

blijven, zodat de frequentie ook zeer stabiel moet zijn. De kleine antenne zendt het golffront in een brede bundel uit. Tengevolge van het bekende Doppler effect worden de golven die teruggekaatst worden door een object scheef vóór het vliegtuig in frequentie verhoogd in een mate die evenredig is met de relatieve snelheid van zender ten opzichte van het object. Bij golven die gereflekteerd worden door een object dat zich schuin achter het vliegtuig bevindt, vindt een frequentieverlaging plaats. Echo's van objecten in het midden van de bundel zullen geen frequentieverschuiving te zien geven.

Het basiskoncept van SAR is dat zowel de amplitude als de frequentie van door objecten teruggekaatste signalen worden geregistreerd gedurende de tijd dat deze objecten zich in de bundel van de voortbewegende antenne bevinden.

De informatie die in de frequentie zit wordt verkregen door de gereflekteerde signalen te mengen met een referentie signaal, dat

door een inwendige oscillator wordt opgewekt. Het interferentie patroon van de beide signalen kan ofwel op magneetband ofwel op een zogenaamde 'signaalfilm' (het radar equivalent van een optisch hologram) worden vastgelegd. Vanaf de signaalfilm kan het originele beeld van het terrein gereproduceerd worden door de film te belichten met coherent licht (laser stralen).

De resolutie in de vliegrichting kan nu worden opgevoerd door te sorteren naar doppler verschuiving en de strook met slechts een geringe verschuiving eruit te lichten. Men kan de resolutie verbetering helaas niet tot in het oneindige opvoeren door simpelweg smalbandiger filters toe te passen, want hieraan wordt een fundamentele limiet gesteld. Deze grens kan worden afgeleid uit een onzekerheidsrelatie in de kommunikatietheorie. Er geldt namelijk dat twee signalen op verschillende frequenties (ten gevolge van bijvoorbeeld doppler verschuiving) nog juist van elkaar kunnen worden onderscheiden mits ze minimaal gedurende een periode van de verschilfrequentie kunnen worden waargenomen. Het vereiste minimum wordt dus des te langer naarmate het frequentie verschil kleiner wordt. Nu is de waarnemingsperiode beperkt tot de tijd waarin het betreffende objekt door de radarbundel wordt belicht. Deze waarnemingsperiode kan worden uitgedrukt in de golflengte  $\lambda$  (m), de antenne diameter  $d$  (m), de vliegsnelheid  $v$  ( $m \cdot s^{-1}$ ) en de afstand radar-objekt  $S_r$  (m) volgens:

$$T = \frac{\lambda \cdot S_r}{d \cdot v} \quad (s) \quad (9)$$

De dopplerverschuiving is gelijk aan tweemaal de radiale snelheid (snelheidskomponent in de richting van het objekt) gedeeld door de golflengte. De verschuiving kan worden uitgedrukt in de golflengte  $\lambda$  (m), de vliegsnelheid  $v$  ( $m \cdot s^{-1}$ ), de radar-objekt afstand  $S_r$  (m) en de afstand  $\Delta$  (m) van het objekt tot het loodvlak op de vliegtuigbaan volgens:

$$f = \frac{2 \cdot v \cdot \Delta}{S_r \cdot \lambda} \quad (s^{-1}) \quad (10)$$

Uit deze formule en de onzekerheidsrelatie  $T.f \geq 1$  volgt:

$$A_{\text{min.}} = \frac{\lambda \cdot S_r}{2 \cdot v} * \frac{d \cdot v}{\lambda \cdot S_r} = \frac{d}{2} \quad (\text{m}) \quad (11)$$

Deze limiet, het oplossend vermogen in de vliegrichting, is dus gelijk aan de helft van de antenne afmeting in de vliegrichting.

Tot slot een voorbeeld van de hoge resolutie die men met synthetische apertuur radar kan bereiken.

De satelliet Seasat-A (1978) had een antenne met afmetingen van 11 m in de vliegrichting en 2 m loodrecht daarop. De effectieve pulsduur was 53 nsec. en de depression angle circa  $70^\circ$ . Dit geeft een resolutie limiet van  $5.5 \times 23$  meter. In de praktijk ging hier iets van af door systeemfouten. Toch heeft men een resolutie van  $25 \times 25$  meter weten te realiseren.

### 3.6. Geometrische karakteristieken van SLAR beelden

Naast de al eerder genoemde hyperbolische inblikhoek correctie worden er nog enige andere aspecten betreffende de geometrie van SLAR beelden toegelicht.

#### 3.6.1. Parallax

Men kan twee typen parallax in radarbeelden onderscheiden, te weten de echo-parallax en de schaduw-parallax (zie fig. 8a, b). Stel dat punt P hoger ligt dan punt Q, dat op het aardoppervlak ligt. Aangezien  $AP < AQ$  wordt P eerder geregistreerd dan Q, respectievelijk als P' en Q'.

De echoparallax P'Q' is bij benadering

$$P'Q' = PQ \tan \theta$$

waarbij  $\theta$  de invalshoek van de uitgezonden puls langs AP is. Hieruit volgt, dat de parallax toeneemt naarmate PQ, ofwel de hoogte van P, toeneemt, en/of de vlieghoogte toeneemt. De parallax neemt af bij toenemende afstand AR. In tegenstelling tot de (konventionele)

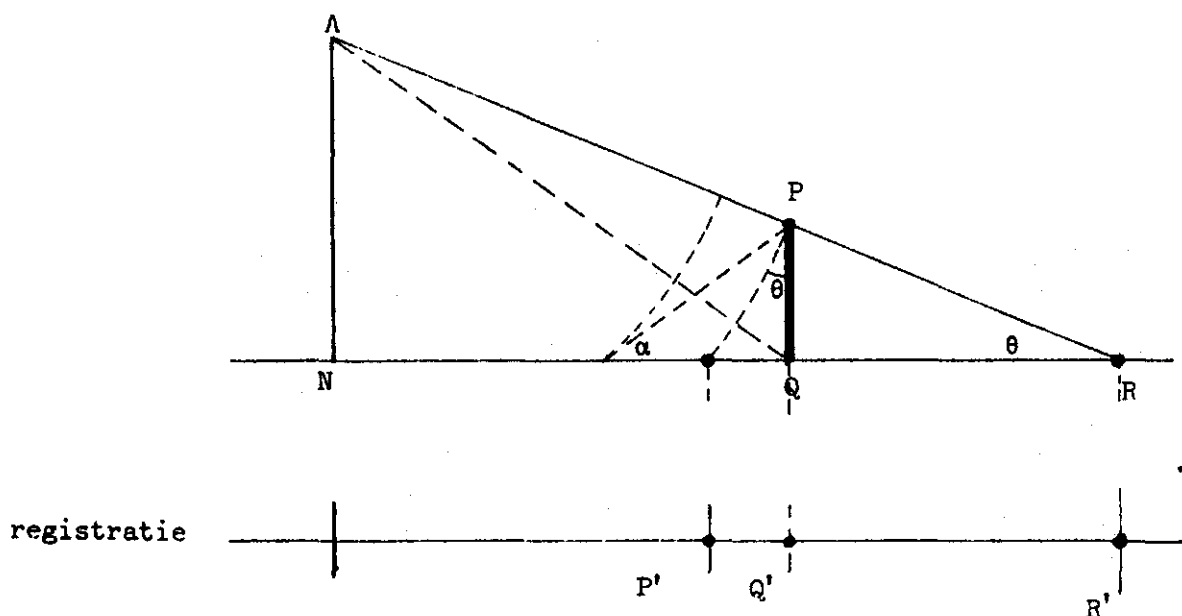


Fig. 8a. Voorbeeld van echoparallax. Uit /5/

fotogrammetrie, waarbij dit type parallax van het nadirpunt af is gericht, is bij radarbeelden de echoparallax naar het nadirpunt toe gericht (lay over effect).

Het golffront vanuit A wordt door PQ gestopt, zodat er van Q tot R niets wordt geregistreerd en in het beeld een zwarte vlek ontstaat tussen Q' en R'. Q'R' is de schaduwparallax. Zij neemt toe naarmate de vlieghoogte afneemt, of de hoogte van P toeneemt, of de afstand tot de vlieglijn toeneemt.

Door deze optredende parallax kunnen hellingen op verschillende manieren worden afgebeeld (fig. 8b). Als de helling onder hoek  $\alpha$  naar het vliegtuig is toegekeerd en de invalshoek  $\theta$  groter is dan  $(90^\circ - \alpha)$ , dan wordt de top van de helling eerst geregistreerd; als  $\theta < (90^\circ - \alpha)$ , dan wordt de voet van de helling eerst geregistreerd maar wordt de helling sterk verkort afgebeeld (foreshortening effect) en indien  $\theta = (90^\circ - \alpha)$ , dan wordt de helling als een lijn afgebeeld. Hellingen die van het vliegtuig afgekeerd zijn kunnen vallen binnen de schaduwparallax en worden dan niet afgebeeld, of worden geheel afgebeeld waarbij de reflectie echter zwak is door de schuine stand van de helling.

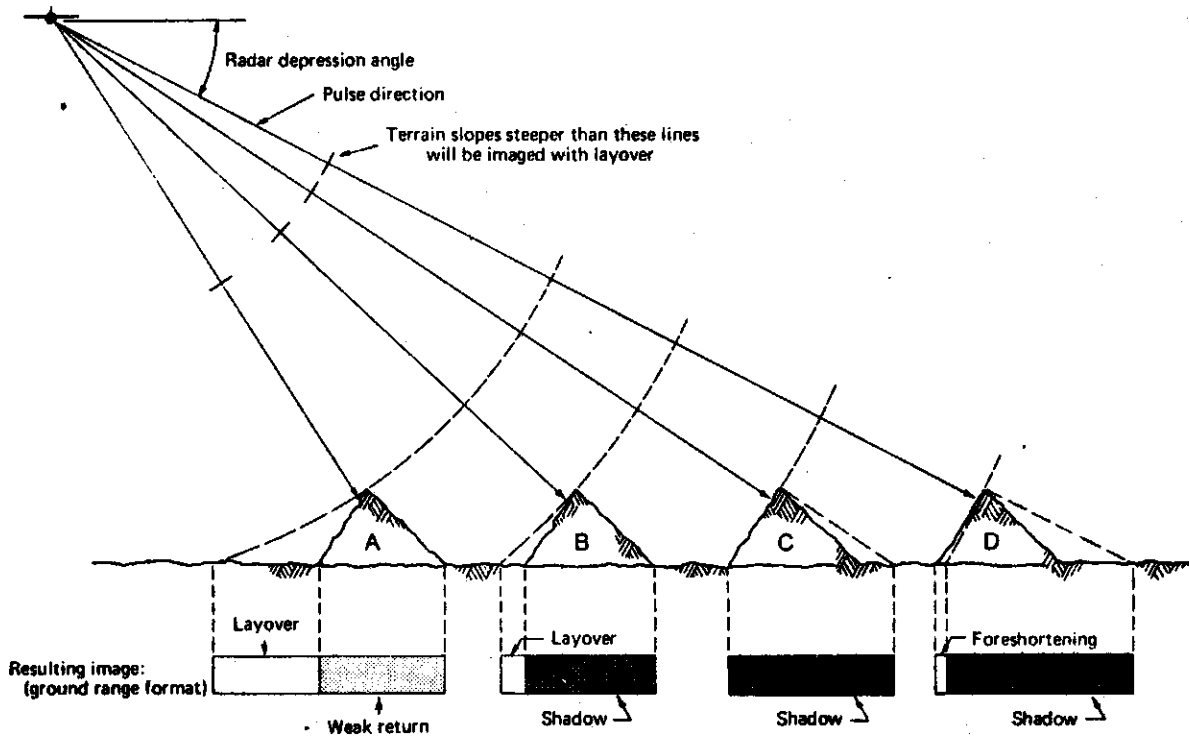


Fig. 8b. Mogelijke effecten van reliëf op SLAR-beelden. Uit /3/

### 3.6.2. Beeldvervormingen

Beeldvervorming ontstaat doordat de relatieve oriëntering van het opnameinstrument ten opzichte van het object verandert door langs-, dwarshellingsen en de rotatie van het vliegtuig. Teneinde later beeldcorrectie toe te kunnen passen is het zaak de vluchtparameterstegelijk met de eigenlijke opname te registreren, zie fig. 8c.



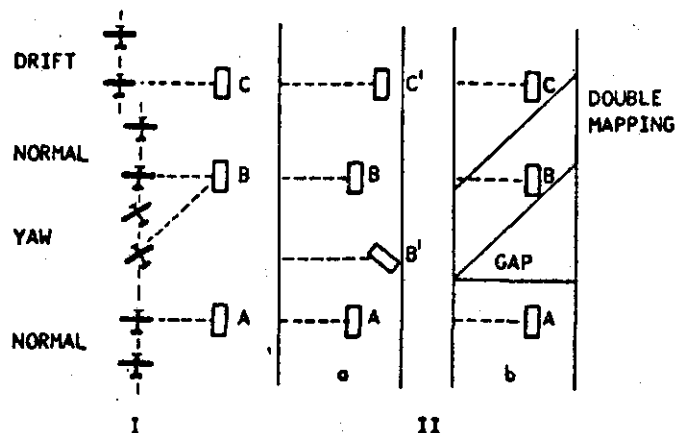


Fig. 8c. Invloed van yaw, dit wil zeggen plotselinge positie verandering en drift, een vorm van verschuiven, op de afbeelding; I. vluchtsituatie; II. afbeelding: a. ongekorrigeerd, b: gekorrigeerd. Uit /4/

### 3.7. Interactie tussen mikrogolven en aardoppervlak

Het probleem met radarwaarneming is de meerduidigheid van het verkregen beeld, dit wil zeggen vele factoren bepalen de echosterkte.

Dit probleem is op verschillende wijzen oplosbaar. Soms is een gerichte keuze van sensor parameters (frequentie, polarisatie, inkijkhoek) voor een bepaalde toepassing afdoende. In andere gevallen zal a priori kennis van het doelgebied bij de interpretatie onmisbaar zijn. Per toepassing moet een oplossing worden gevonden op basis van de radarsignatuur van het betreffende object.

De reflectie eigenschappen van het aardoppervlak zijn vooral afhankelijk van de materiaaleigenschappen en de ruwheid.

Wat betreft de materiaaleigenschappen kan worden gesteld dat met name het gehalte aan water belangrijk is. Water heeft een hoge relatieve diëlektrische konstante van ongeveer 80. Voor zowel bodem als vegetatie geldt dat de radarreflectie toeneemt met toenemend vochtgehalte.

Metalen voorwerpen hebben een hoge reflectiecoëfficiënt. Metalen bruggen, silo's en spoorrails zijn dan ook opvallend lichte

verschijningen op radarbeelden. Dit geldt ook voor bebouwing maar dit komt doordat gebouwen zich als zogenaamde hoekreflektoren gedragen.

Naast de materiaalsamenstelling wordt de radarreflektie bepaald door de oppervlakteruwheid. De invloed van de oppervlakteruwheid is echter afhankelijk van de hoek van inval. De ruwheid van een oppervlak is een functie van de voorkomende reliëf variaties in relatie tot de golflengte van de gereflekteerde straling. Wanneer de reliëf variaties veel kleiner zijn dan de golflengte van de gereflekteerde straling, (bijvoorbeeld  $< \lambda/10$ ) is een oppervlak glad. Wegen zijn bijvoorbeeld ruw voor zichtbare straling maar glad voor mikrogolven.

Radargolven die onder een bepaalde hoek invallen zullen door een relatief glad oppervlak gespiegeld worden zodat de radarontvanger weinig of geen echo registreert. Bij grotere ruwheid vindt steeds meer verstrooiing plaats in alle richtingen, zodat de radar een sterkere echo ontvangt. Bij loodrechte inval daarentegen is de echo-sterkte bij een glad oppervlak maximaal, terwijl de echo zwakker wordt naarmate de oppervlakteruwheid toeneemt.

Zoals reeds opgemerkt is een radarbeeld meerduidig. Teneinde de interpretatie van de beelden te vergemakkelijken kan een SLAR worden uitgerust met verschillende frequenties maar ook met verschillende polarisaties van de uitgezonden golven. Vele soorten vegetatie en bodemgesteldheden reageren zeer specifiek op polarisatie. Ook de ontvangen echo kan op deze wijze worden behandeld.

Op de indringingsmogelijkheid van radargolven in een bepaald medium zal in een ander hoofdstuk nader worden ingegaan.

Tenslotte mag een ander belangrijk aspect van mikrogolf-interactie hier niet onvermeld blijven. In sommige radarbeelden hebben ogenschijnlijk homogene gebieden een spikkelig voorkomen. Dit is een gevolg van het feit dat de totale reflectie van een resolutiecel ontstaat uit een vektoriele opstelling van de bijdragen van de individuele oppervlakte-elementen. Het hangt af van de toevallige oriëntatie van de bijdragende elementen of konstruktieve dan wel destruktieve interferentie optreedt. Terwijl de radar overkomt zal deze situatie zich voortdurend wijzigen. Na middeling

over een voldoende aantal onafhankelijke situaties kan een meer egale grijstoon worden verkregen. Bij de digitale SLAR van het NLR bijvoorbeeld ontstaat de grijswaarde van ieder pixel door integratie over zo'n dertig onafhankelijke observaties. De dynamische resolutie wordt hierdoor verbeterd, zij het enigszins ten koste van de ruimtelijke resolutie.

#### 4. DE SLAR OPNAMEN VAN HET LANDGOED DE SLANGENBURG

##### 4.1. V e l d m e t i n g e n

Aan de hand van het criterium dat een zo groot mogelijke diversiteit in bodemtype en ontwateringstoestand moest worden omvat zijn een tiental graslandpercelen geselecteerd op of nabij het landgoed (fig. 1). Op de beide vluchtdagen zijn gewichtsvochtmonsters genomen van de toplaag van de betreffende percelen. Per veld zijn vier herhalingen uitgevoerd. De bemonsteringsdiepten zijn in tabel 1 aangegeven. Tevens zijn bijzonderheden betreffende de vegetatie zoals lengte en dichtheid van het gras opgenomen. Op een later tijdstip zijn volumemonsters gestoken om de dichtheden van de toplagen te bepalen zodat de volumevochtgehalten achteraf konden worden berekend.

Het voorjaar van 1981 was vrij droog (tabel 2) totdat de eerste vluchtdag naderde. De laatste dagen voor deze datum is er een behoorlijke hoeveelheid neerslag gevallen.

##### 4.2. D e e e r s t e v l u c h t d a g 18-6-1981

Door het droge voorjaar waren er flinke vochtverschillen ontstaan tussen de diverse percelen. De overvloedige regenval vlak voor deze dag heeft evenwel een nivellerend effect gehad op de vochtverschillen in de bovenste 5 cm. (tabel 1).

Tabel 1. Waarnemingen betreffende volumegehalte van de toplaag van de bodem, graslengte en SLAR reflectiewaarde van de geselecteerde percelen uitgevoerd op 18-6-1981 en 3-7-1981

Perceelnr.	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Bodentype	fKrn 1	Zb 21	fKrn 1	bEz 23	zEz 23	Hn 21	Hn 21	zEz 21	Zn 23	Hn 21
Grondwatertrap	III	VII*	III	VII	VII	VII	VII	VII	V*	VII
volumevochtgeh. (%)	1e vluchtdag 18-6-1981									
op diepte: 0-5 cm	31,0±1,1	19,5±4,6		22,6±1,0	27,1±4,9	30,4±2,1	38,6±6,9	24,5±2,7	40,3±3,2	
5-10 cm	27,8±1,5	7,4±1,9		18,8±1,1	13,9±4,1	23,7±2,4	34,1±3,8	13,1±2,2	27,8±3,9	
20-25 cm	28,2±11,5	9,2±1,1		14,7±1,7	13,1±1,8	23,7±2,7	31,5±0,8	11,0±0,8	25,5±2,0	
graslengte (cm)	5	5-10		10	10	15	15	10	<5	
radarreflectie (grijswaarde)	118±11,2	131±13,2		107±13,8	119±10,4					
aantal pixels	64	56		59	71					
Volumegeh. (%)	2e vluchtdag 3-7-1981									
op diepte: 0-2,5 cm	39,7±5,9	24,1±1,6	38,9±5,9	29,8±4,4	38,0±5,0	49,4±4,8	40,0±2,7	31,6±1,8	43,9±2,4	34,8±1,9
2,5-5 cm	36,7±7,0	22,2±1,5	33,4±3,3	25,4±2,2	24,8±1,1	38,4±4,8	33,7±1,8	27,9±4,5	32,5±1,2	34,2±1,9
5-10 cm	35,6±5,0	19,8±1,0	32,3±3,3	23,8±1,0	22,7±1,7	35,5±5,6	33,8±2,7	24,5±2,3	27,6±2,4	34,7±1,9
graslengte (cm)	<5	5-10	5-10	15	5	10-15	10	15	<5	25
radarreflectie (grijswaarde)	118±13,2	112±8,6	115±18,6	110±10,9	102±9,9	123±9,9	114±11,2	114±9,0	114±13,2	123±11,4
aantal pixels	43	46	105	51	71	10	30	38	42	33

Tabel 2. Neerslagcijfers KNMI (mm), station Doetinchem

	jan.	febr.	mrt.	apr.	mei	
1981	116,0	38,4	139,7	11,2	66,3	
gem. over '51-'80	63,0	51,0	52,0	47,0	55,0	
	juni 1981					
	0-10	11-20	21-30	totaal		gem. '51-'80
	15,7	15,7	67,3	98,6		65,0
	16/6	17/6	29/6	30/6		
	6,7	5,8	31,5	20,5		

Naar verwachting zouden de percelen 7 en 8 (veldpodzolen met grondwatertrap VII) en in mindere mate perceel 10 (gooreerdgrond met grondwatertrap V\*) een droge ondergrond moeten hebben. Tabel 1 toont het tegendeel. Een gesprek met de eigenaar leerde dat hij zich terdege bewust was van de droogtegevoeligheid van de betreffende percelen. Betrokkene had daarom een beregeningsinstallatie aangeschaft, waarmee hij het zekere voor het onzekere nemend de zaak altijd goed vochtig hield.

#### Resultaten

Het op deze dag opgenomen SLAR-beeld is jammer genoeg van slechte kwaliteit. Door roll van het vliegtuig wisselen lichte en donkere banen over het beeld elkaar af. De percelen 7, 8, 9 en 10 zijn vrijwel zwart afgebeeld.

De radarreflektiewaarden van de overige velden laat weinig verband zien met het vochtgehalte van de toplaag van de bodem. Perceel 3, het droogste veld volgens de monsternamen, heeft de hoogste reflectiviteit, wat betekent dat de SLAR dit veld juist als het natste van het gebied kenmerkt. Voorlopig leggen we daarom dit beeld terzijde als minder bruikbaar.

#### 4.3. T w e e d e v l u c h t d a g

De periode tussen 18/6 en 3/7 was vrij regenachtig met als triest hoogtepunt het weekend voor vrijdag 3/7 waarin het hoegenaamd niet droog was (tabel 2). Tabel 1 laat dan ook zien dat de bovenste 10 cm overal behoorlijk bevochtigd waren. Toch waren er nog beduidende vochtverschillen aanwezig tussen de diverse percelen en voor ieder proefperceel gold dat het vochtgehalte afnam met toenemende diepte.

De op deze dag gemaakte SLAR opname is van veel betere kwaliteit en over het bemonsterde gebied zelfs van konstante kwaliteit. Dit laatste kan men nagaan door de reflektiviteit van bossen van gelijke samenstelling als referentie te nemen.

Uit tabel 1 blijkt dat er weinig spreiding is onder de radar-reflektiewaarden van de diverse percelen, hetgeen een indicatie is dat de reflektiviteit voornamelijk door de grasvegetatie bepaald wordt. Deze laatste bewering wordt enigszins ondersteund door de feiten dat een relatief droog veld met lang gras (veld 11) door de SLAR als nat gekwalificeerd wordt, terwijl daarentegen een veld met een vrij natte bovengrond maar met een bedekking van kort gras (veld 6) als droog wordt gekenmerkt.

Voorlopig kan men konkluderen dat de 3 cm SLAR weinig waarde heeft als detektor van bodemvocht in met vegetatie bedekte bodems.

## LITERATUUR

- ATTEMA, E.P.W., 1980. Satelliet aardobservatie in het mikrogolfgebied. P68-p84 van Ruimtevaart, Orgaan van de Nederlandse Vereniging voor Ruimtevaart (NVR), 29e jaargang nr. 1, februari 1980
- KASTEREN, H.W.J. VAN, 1980. Van achtergrondsonderzoek tot operationeel gebruik van remote sensing in de landbouw. P84-p94 van Ruimtevaart, Orgaan van de Nederlandse Vereniging voor Ruimtevaart (NVR), 29e jaargang nr. 1, februari 1980
- LILLESAND, T.M. en R.W. KIEFER, 1979. Remote sensing and image interpretation. John Wiley and Sons, New York
- LOOR, G.P., DE, 1980. Remote sensing; een algemene inleiding P222-p235 van Cultuurtechnisch Tijdschrift, jaargang 19 nr. 5, febr/mrt '80
- RICHARDUS, P. en H.J. BUITEN, 1975. Teledetectie. College diktaat landbouwhogeschool.
- ULABY, F.T., P.P. BATLIVALA en M.C. DOBSON. 'Microwave Backscatter Dependence on Surface Roughness, Soil Moisture and Soil Texture: Part I -- Bare Soil,' IEEE Transactions on Geoscience Electronics GE-16, no. 4, 286-295 (October 1978)
- G.A. BRADLEY and M.C. DOBSON. 'Microwave Backscatter Dependence on Surface Roughness, Soil Moisture and Soil Texture: Part II -- Vegetation-Covered Soil,' IEEE Transactions on Geoscience Electronics GE-17, no. 2, 33-40 (April 1979)
- VRIELINK, J.G. en J.A. VAN DEN HURK, 1979. Boswachterij Slangenburg, Slangenburg en Leemscherbos. Bodemgesteldheid en bodemgeschiktheid. Wageningen, Stiboka, rapport nr. 1396