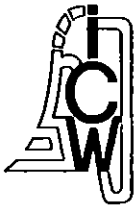


ALTERRA
Wageningen Universiteit & Research centre
Omgevingswetenschappen
Centrum Water & Klimaat
Team Integraal Waterbeheer

ICW nota 1696
december 1985



nota

— instituut voor cultuurtechniek en waterhuishouding, wageningen —

STUDIE NAAR DE INVLOED VAN LEEMPLAGEN IN DE ONDERGROND OP
DE VOCHTVOORZIENING VAN GRAS EN MAIS IN EEN GEBIED NABIJ
RUCPHEN (WEST-BRABANT); DE TOEPASSING VAN REMOTE SENSING
TECHNIEKEN EN HYDROLOGISCHE MODELBEREKENINGEN

J.H. Spaans

Deze nota dient tevens als scriptie
voor de studie Cultuurtechniek aan
de Landbouwhogeschool, Wageningen

Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatie-
middelen, 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

I N H O U D

	blz.
1. INLEIDING	1
2. THEORETISCHE ACHTERGRONDEN	3
2.1 Remote sensing benadering	3
2.1.1 Elektromagnetische straling	3
2.1.2 Opnametechnieken	5
2.1.3 Atmosferische invloeden	7
2.1.4 Reflectie van landbouwgewassen	8
2.1.5 Warmtestraling van landbouwgewassen	11
2.1.6 Temperatuur en verdamping van landbouwgewassen	12
2.2 Hydrologische modelberekening	14
3. GEBIEDSBESCHRIJVING	17
3.1 Ligging en topografie	17
3.2 Ontstaansgeschiedenis	17
3.3 Bodemtypen	19
3.4 Waterhuishouding	20
3.5 Bodemgebruik	21
4. BESCHIKBARE LUCHTOPNAMEN EN VELDGEGEVENS	22
4.1 Luchtopnamen 1983	22
4.2 Bodemkundige veldopnamen	22
4.3 Overige gegevens	23
5. METHODIEK	24
5.1 Verdampingskartering	24
5.2 Hydrologische modelberekening	30
5.3 Interpretatie veldgegevens	31

	blz.
6. RESULTATEN	34
6.1 Invloed van leemlagen in de ondergrond op de relatieve gewasverdamping	34
6.2 Invloed van de grondwaterstand op de relatieve gewasverdamping	38
6.3 Invloed van de grondwatertrap op de relatieve gewasverdamping	40
6.4 Invloed van leemgehalte en textuur op de relatieve gewasverdamping	42
6.5 Berekeningen met het LAMOS-model	43
6.6 Vergelijking van de berekeningen met het LAMOS-model met de verdampingskaart, afgeleid uit de remote sensing opnamen	45
7. SAMENVATTING EN CONCLUSIES	48
LITERATUUR	50
BIJLAGEN	53

- - -

ALTERRA
Wageningen Universiteit & Research center
Omgevingswetenschappen
Centrum Water & Klimaat
Team Integraal Waterbeheer

1. INLEIDING

Door het Technisch Secretariaat van de Commissie Grondwaterwet Waterleidingbedrijven wordt onderzoek gedaan naar de invloed van grondwateronttrekkingen door het pompstation Schijf. Het onderzoeksgebied is 6500 hectare groot en ligt rondom de plaats Rucphen (West-Brabant). De bodem bestaat hoofdzakelijk uit dekzanden waarop zich podzolen hebben ontwikkeld.

Ten behoeve van dit onderzoek is door de Stichting voor de Bodemkartering in 1982 en 1983 een bodemkundig en hydrologisch veldonderzoek verricht. Hieruit bleek dat de bodemopbouw en de waterhuishouding complex zijn. Op verschillende plaatsen komen op korte afstand grote sprongen in de grondwaterstand voor. Dit wordt mogelijk veroorzaakt door leemlagen die storend kunnen werken op het verticale watertransport.

Op 21 juli 1983 zijn na een droge periode van dit gebied scanneropnamen en false colour foto's gemaakt. In het voorliggende onderzoek is met behulp van deze beelden nagegaan in welke mate de leemlagen de vochtvoorziening van het gewas beïnvloeden. In aanvulling hierop is dit effect bepaald met behulp van hydrologische modelberekening; hiervoor is gebruik gemaakt van het computerprogramma LAMOS. Naast de invloed van leem is ook het effect van andere bodemkundige en waterhuishoudkundige factoren onderzocht.

Op het ICW is een methode ontwikkeld waarmee uit reflectie- en warmteopnamen de gewasverdamping bepaald kan worden (NIEUWENHUIS e.a., 1985; SOER, 1980, en THUNNISSEN, 1984).

Met behulp van deze methode en door middel van automatische beeldverwerking zijn de remote sensing beelden omgezet in een verdampingskaart. Door de gegevens hieruit te vergelijken met de bodemkundige veldgegevens zijn de genoemde verbanden onderzocht.

In hoofdstuk 2 wordt ingegaan op de theoretische achtergronden van de remote sensing. Tevens wordt het toegepaste hydrologische model beschreven.

Na een gebiedsbeschrijving in hoofdstuk 3 worden in hoofdstuk 4 de gebruikte luchtopnamen en veldgegevens belicht.

In hoofdstuk 5 wordt ingegaan op de methodiek die is toegepast bij de verdampingskartering, hydrologische modellering en de interpretatie van de veldgegevens.

In hoofdstuk 6 worden de resultaten gepresenteerd.

In hoofdstuk 7 volgen tenslotte de conclusies en de samenvatting.

2. THEORETISCHE ACHTERGRONDEN

In dit hoofdstuk worden de theoretische achtergronden van de bij het onderzoek gebruikte technieken behandeld.

De remote sensing theorie wordt beschreven in paragraaf 2.1; paragraaf 2.2 behandelt de hydrologische modelberekening.

2.1. Remote sensing benadering

Remote sensing kan worden vertaald als 'op afstand waarnemen'. Algemeen wordt hieronder verstaan het waarnemen van elektromagnetische straling (2.1.1). Deze elektromagnetische straling kan met behulp van verschillende technieken worden waargenomen of geregistreerd (2.1.2), waarbij de invloed van atmosferische omstandigheden een grote rol kan spelen (2.1.3).

De specifieke eigenschappen van landbouwgewassen met betrekking tot reflectie en emissie van elektromagnetische straling worden behandeld in 2.1.4 en 2.1.5.

In 2.1.6 volgt het verband tussen temperatuur en verdamping bij landbouwgewassen.

2.1.1. Elektromagnetische straling

Met behulp van remote sensing opnametechnieken kan elektromagnetische straling worden waargenomen.

Ieder object zendt elektromagnetische straling uit. De hoeveelheid uitgezonden energie is afhankelijk van de temperatuur en de emissiecoëfficiënt van het object, volgens de stralingswet van Stefan Boltzmann:

$$W = \epsilon \sigma T^4 \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (1)$$

waarin T = objecttemperatuur (K), W is de hoeveelheid uitgezonden energie (W.m^{-2}), ϵ de emissiecoëfficiënt en σ de constante van Boltzmann ($= 5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$).

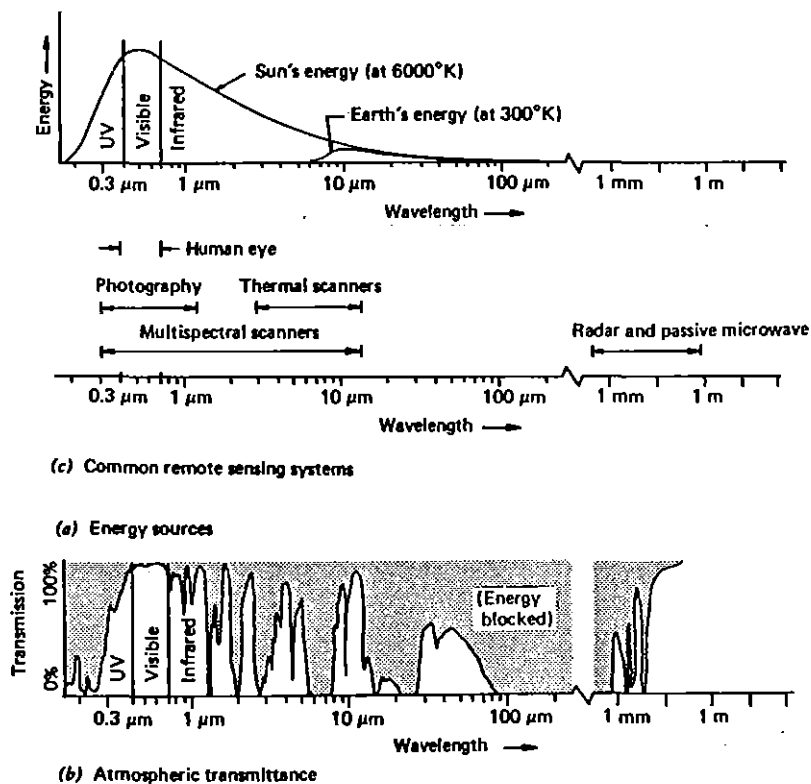
De emissiecoëfficiënt wordt gedefinieerd als de straling van een natuurlijk object gedeeld door de straling van een volkomen zwart lichaam met eenzelfde temperatuur.

De golflengte waarbij de uitstraling maximaal is, kan worden berekend met de stralingswet van Wien:

$$\lambda_{\text{max.}} = 2897 T^{-1} \quad (\mu\text{m}) \quad (2)$$

Hierin is $\lambda(\mu\text{m})$ de golflengte.

De belangrijkste stralingsbronnen zijn de zon en de aarde. In figuur (2.1a) is weergegeven hoe de stralingsintensiteit van beide samenhangt met de golflengte.



Figuur 2.1. Energiebronnen (a), atmosferische transmissie (b), remote sensing systemen (c). (LILLESAND en KIEFFER, 1979).

Maximale zonnestraling treedt op bij een golflengte van $0.48 \mu\text{m}$, aardstraling bereikt een maximum bij $9.7 \mu\text{m}$. De door de zon uitgezonden straling wordt voor een deel door de aarde gereflecteerd. Het menselijk oog is gevoelig voor een deel van deze kortgolvlige straling. Dit maakt het de mens mogelijk objecten te zien. Niet alle door de zon uitgezonden straling bereikt de aarde: in de at-

- atmosfeer wordt een deel van de straling geabsorbeerd.
- Golflengtebanden waarin atmosferische absorptie gering is, worden vensters genoemd.

2.1.2. Opnametechnieken

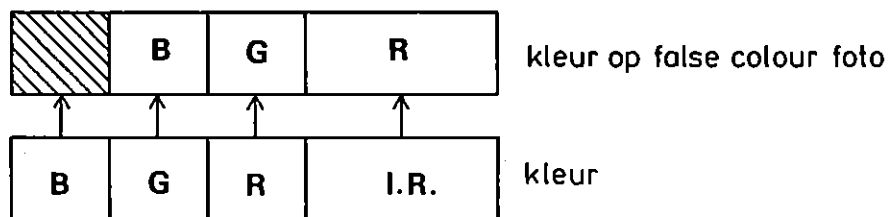
In figuur 2.1.c is weergegeven in welke delen van het spectrum kan worden waargenomen met de diverse sensoren. Behalve met het menselijk oog kunnen waarnemingen worden verricht met fotografische technieken, scanner- en microgolfttechnieken.

Fotografische technieken

Een fotografische emulsie zet een elektromagnetisch signaal om in een zichtbaar beeld. Naast zwart-wit en kleurenfotografie kent men de false colour fotografie.

Met behulp van een voor het nabije infrarood gevoelige film kan men - voor het oog onzichtbaar - gereflecteerd zonlicht zichtbaar maken. Met deze techniek wordt een object niet in zijn eigen kleur weergegeven, maar er treedt een kleurverschuiving op (false colour). In figuur 2.2 is weergegeven welke kleur op de false colour film correspondeert met de werkelijke kleur.

Een infrarood gevoelige film kan elektromagnetische straling weergeven met een golflengte van 0.50 tot 1.0 μm ; het gedeelte tussen de 0.7 en 1.0 μm is voor de mens onzichtbaar.



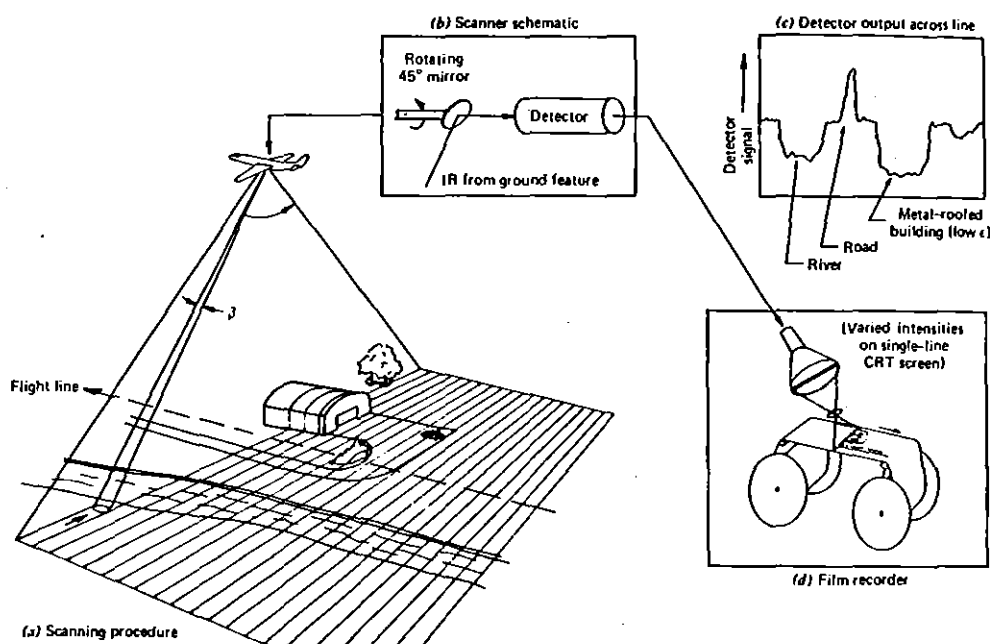
Figuur 2.2. Kleurverschuiving op een false colour foto.

B is blauw, G is groen, R is rood en I.R. is infrarood.

Scannertechnieken

Met behulp van scannertechnieken kan naast gereflecteerd zonlicht ook geëmitteerde warmtestraling worden geregistreerd. Hiertoe wordt het aardoppervlak loodrecht op de vliegrichting, in zogenaamde scanlijnen, strook voor strook afgetast. Elke scanlijn wordt weer onderverdeeld in een aantal deelelementen, genaamd pixels (picture element). Een pixel is zodoende het kleinste informatiedragend element.

De elektromagnetische straling komt via een roterende spiegel terecht op een tralie of prisma. De straling wordt gesplitst in een aantal golflengtebanden. Detectoren zetten de straling binnen deze banden om in een elektrisch signaal. De aldus verzamelde gegevens worden opgeslagen op magneetband en zijn geschikt voor computerverwerking. In figuur 2.3 is het principe van een scanner weergegeven.



Figuur 2.3. Principe van een scanner (LILLESAND and KIEFER, 1979)

Binnen de scannertechniek komen twee systemen voor, de Multi Spectral Scanner (MSS) en de Infra Red Line Scanner (IRLS). Bij MSS wordt straling in het zichtbare licht en het nabij infrarood waargenomen in een aantal gescheiden golflengtebanden. Bij IRLS wordt in het thermisch infrarode deel van het elektromagnetisch spectrum waargenomen.

Microgolftechnieken

Hieronder worden technieken verstaan, die elektromagnetische straling waarnemen met een golflengte van een millimeter tot een meter.

Men onderscheidt passieve en actieve technieken.

Passieve technieken (radar) zenden straling uit en registreren de reflectie daarvan.

Aktieve technieken nemen alleen door een object uitgezonden of gereflecteerde straling waar. Het gebruik van microgolftechnieken valt buiten het onderzoek.

2.1.3. Atmosferische invloeden

Door waterdamp, CO_2 , ozon en in de lucht zwevende deeltjes wordt straling selectief geabsorbeerd. Waar de absorptie laag is en de transmissie hoog, spreken we van atmosferische vensters. Er zijn een drietal vensters te onderscheiden, namelijk met een golflengte van respectievelijk 0,4 tot 1,1 μm , 8 tot 14 μm en groter dan 1 mm. Ook binnen de atmosferische vensters vindt - zij het in geringe mate - atmosferische interactie plaats (figuur 2.1.b).

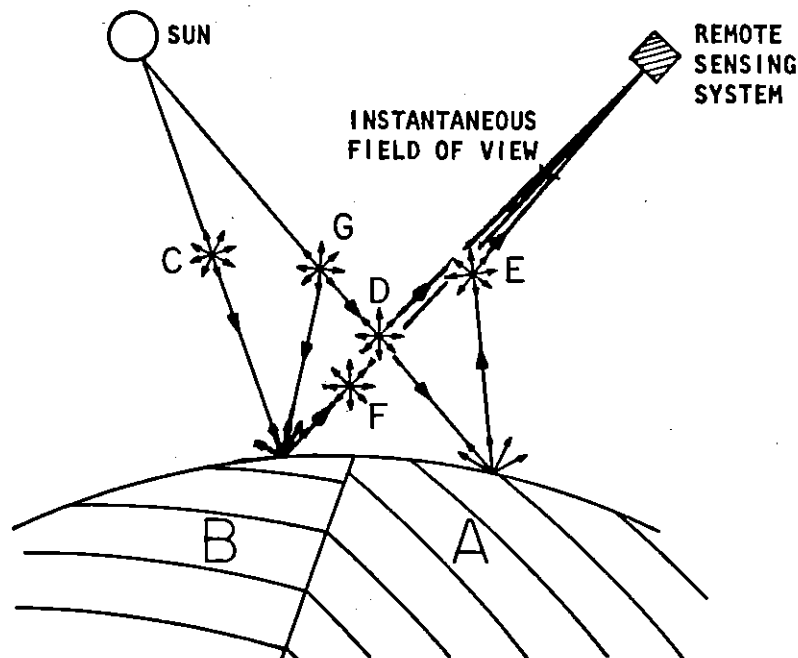
De inkomende zonnestraling wordt in de atmosfeer voor een deel verstrooid, gereflecteerd en geabsorbeerd. Voor het overige deel vindt transmissie plaats. Verstrooide zonnestraling wordt diffuse hemelstraling genoemd. In welke mate verstrooiing plaatsvindt, hangt af van de golflengte en de atmosferische omstandigheden. Op een heldere dag speelt verstrooiing een bescheiden rol; wel veroorzaakt het de blauwe kleur van het hemelgewelf.

In de atmosfeer verstrooide en gereflecteerde zonnestraling kan de opname beïnvloeden. Vooral bij luchtfotografie op grotere hoogte kunnen de opnamen daardoor minder kontrastrijk worden.

Ook de door een scanner op grotere hoogte waargenomen warmtestraling kan door atmosferische interactie beïnvloed zijn: er kan dan zowel een overschatting als een onderschatting optreden van de door de aarde uitgezonden warmtestraling. Atmosferische deeltjes absorberen niet alleen warmtestraling, maar zenden ook warmtestraling uit, overeenkomstig hun eigen temperatuur.

De beïnvloeding van zonnestraling, gereflecteerde zonnestraling en

uitgezonden warmtestraling in de atmosfeer is schematisch weergegeven in figuur 2.4.



Figuur 2.4. Atmosferische invloeden.

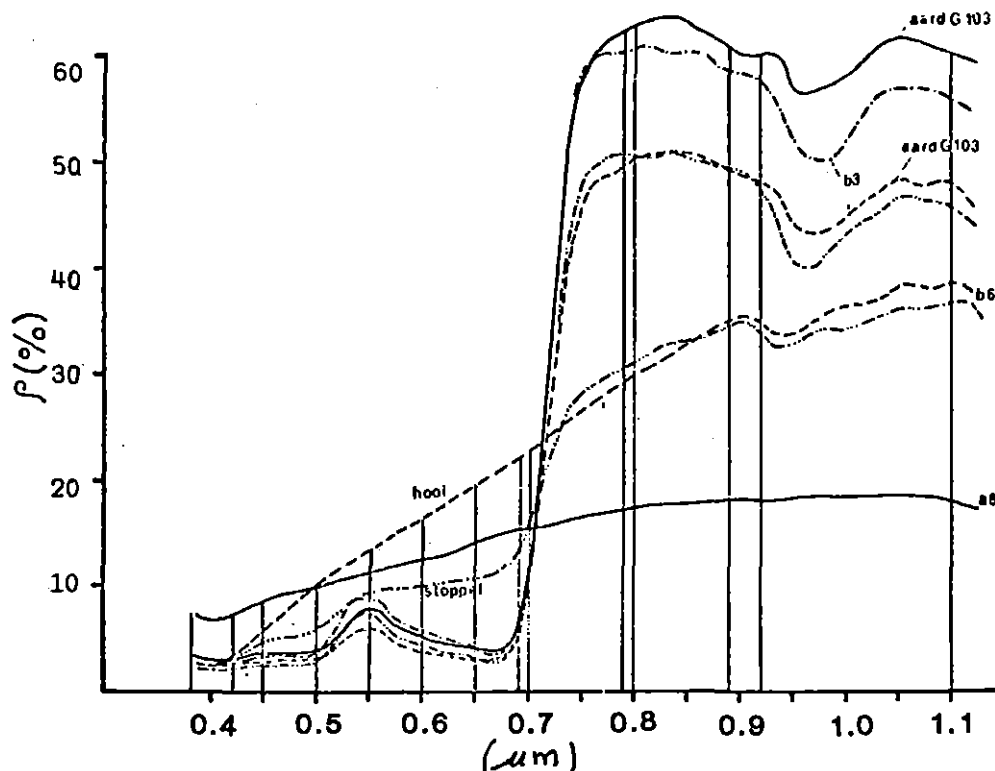
De door de zon uitgezonden straling wordt in de atmosfeer deels geabsorbeerd en gereflecteerd (C en G).

De doorgelaten straling bereikt het aardoppervlak, wordt gedeeltelijk gereflecteerd, waarna in de atmosfeer wederom interactie plaatsvindt (F). Ook door het aardoppervlak uitgezonden warmtestraling wordt in de atmosfeer beïnvloed (E). De atmosfeer zendt ook warmtestraling uit (D). (SLATER, 1980).

2.1.4. Reflectie van landbouwgewassen

De mate en richting van reflectie van zonnestraling aan het aardoppervlak wordt bepaald door de hoek van inval, de spectrale samenstelling van de straling en de spectrale eigenschappen van dit oppervlak. Zo zijn de reflectieeigenschappen van een landbouwgewas afhankelijk van het type gewas, het groeistadium en de gezondheidstoestand.

In figuur 2.5 is het reflectiegedrag weergegeven van een aantal verschillende vegetatiedekken in het zichtbare deel van het spectrum en het nabije infrarood.



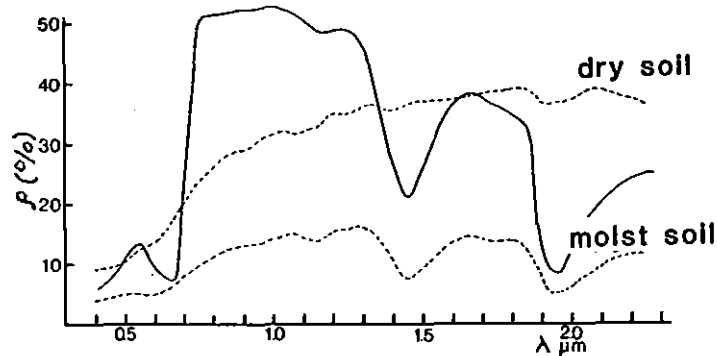
Figuur 2.5. Reflectiespectra van aardappelen (G 103), bieten (b3), stoppel en hooi op b6 en een geroooid uienperceel (a6), (NIWARS, 1977).

Opvallend zonlicht wordt door het blad voor een deel geabsorbeerd en gereflecteerd, voor het overige vindt transmissie plaats. Algemeen geldt:

$$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \quad (3)$$

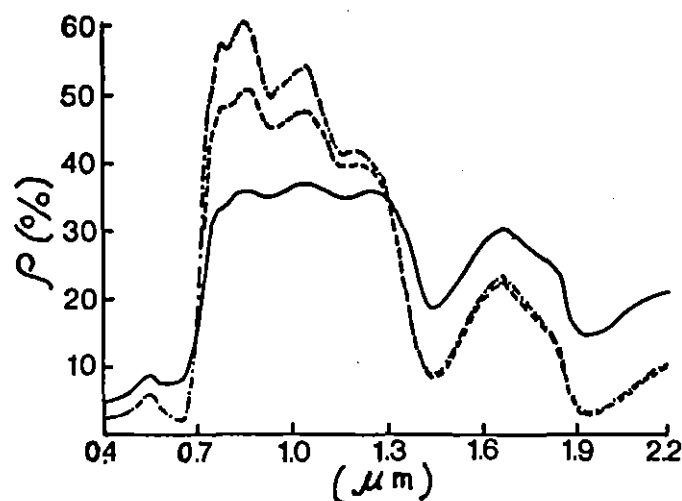
waarin α is absorptie, ρ is reflectie en τ is transmissie, alle afhankelijk van de golflengte λ (meter).

Bladgroen in de chloroplasten absorbeert het zonlicht voor het fotosyntheseprocess en vertoont absorptiemaxima tussen 0,40 en 0,45 μm . Het celwater absorbeert overwegend tussen de 1,3 en 2,5 μm , met maxima tussen de 1,45 en 1,95 μm , de zogenaamde waterabsorptiebanden (figuur 2.6).



Figuur 2.6. Spectrale diffuse reflectie van een groen blad en van een droge en natte bodem (BUNNIK, 1978).

Bij een landbouwgewas is, naast de reflectie-eigenschappen van het afzonderlijke blad, de leaf-area-index (LAI) van belang. Deze index is gedefinieerd als het op een horizontaal vlak geprojecteerde totale bladoppervlak per eenheid van bodemoppervlak. Het is daarom een maat voor de hoeveelheid foto-actief materiaal en de mate van bodembedekking. Bij een hoge LAI wordt de door het bovenste bladerendek doorge laten straling door een lager bladerendek weer deels gereflecteerd en geabsorbeerd. De totale gewasreflectie neemt bij toenemende LAI daarom af in het zichtbare licht (de hoeveelheid foto-actief materiaal neemt toe) en neemt toe in het nabije infrarood (door multiple reflectie). Zie hiervoor figuur 2.7.



Figuur 2.7. Reflectiecurven voor verschillende waarden van de LAI (BUNNIK, 1978).

Indirekt is de LAI een maat voor het aandeel van de bodem in de totale reflectie.

Bij de reflectie van zonlicht door de bodem is vooral het vochtgehalte van de bovengrond van belang. Met toenemend vochtgehalte zullen de poriën tussen de bodemdeeltjes gevuld raken met water. Door absorptie en verandering van de brekingsindex neemt dan voor alle golflengten het reflectievermogen af. Zie figuur 2.6.

2.1.5. Warmtestraling van landbouwgewassen

Alle objecten zenden warmtestraling uit, afhankelijk van hun temperatuur en emissiecoëfficiënt. De emissiecoëfficiënt van de meeste landbouwgewassen ligt rond de 0.98. Dit houdt in dat naast emissie ook in geringe mate reflectie van warmtestraling vanuit de atmosfeer plaatsvindt. De emissie wordt bij het golflengtebereik van 8-14 μm constant verondersteld.

De wet van Kirchhof zegt dat de spectrale emissiecoëfficiënt ϵ gelijk is aan de spectrale absorptiecoëfficiënt α . Vergelijking (3) kan daarom voor langgolvlige straling geschreven worden als:

$$\epsilon(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \quad (4)$$

De meeste objecten zijn ondoorlatend voor thermische straling zodat $\tau(\lambda) = 0$ en

$$\epsilon(\lambda) + \rho(\lambda) = 1 \quad (5)$$

De gewastemperatuur is sterk bepalend voor de mate waarin straling wordt uitgezonden. Uit de warmtebeelden kunnen temperatuurverschillen aan het aardoppervlak worden afgeleid. Heeft men voor het opnametijdstip voldoende veldwaarnemingen, dan kan de waargenomen warmtestraling worden omgerekend naar absolute temperaturen.

2.1.6. Temperatuur en verdamping van landbouwgewassen

Door het opstellen van een energiebalans van het aardoppervlak kan een relatie tussen temperatuur en verdamping van gewasoppervlakken worden afgeleid. De energiebalans luidt:

$$R_n = G + H + LE \quad (6)$$

waarin R_n is de nettostraling ($W.m^{-2}$), G is de bodemwarmtestroom ($W.m^{-2}$), H de voelbare en LE de latente warmtestroom ($W.m^{-2}$).

De nettostraling R_n is gelijk aan de inkomende minus de uitgaande straling. Inkomende en uitgaande straling bestaan uit een langgolvice en een kortgolvice deel:

$$R_n = (R_{li} - R_{lu}) + (R_{si} - R_{su}) \quad (W.m^{-2}) \quad (7)$$

l en s duiden op langgolvice, respectievelijk kortgolvice straling en u en i op uitgaande en inkomende straling.

De reflectie van de langgolvice straling is afhankelijk van de emissiecoëfficiënt (zie 2.1.1). De netto langgolvice straling volgt uit de vergelijkingen (1) en (7):

$$R_{nl} = \epsilon(R_{li}) - \epsilon\sigma T_c^4 \quad (8)$$

Hierin is T_c de gewastemperatuur (K)

De netto kortgolvice straling bestaat uit de inkomende minus de gereflecteerde kortgolvice straling. Reflectie van kortgolvice straling is afhankelijk van de reflectiecoëfficiënt r , dus:

$$R_{ns} = R_{su} - R_{si} = (1-r)R_{si} \quad (9)$$

Hierin is R_{ns} de netto kortgolvice straling ($W.m^{-2}$)

De uitwisseling van warmte tussen gewas en atmosfeer, het voelbare warmtetransport (H) kan worden beschreven met:

$$H = \rho_a C_p \left(\frac{T_a - T_c}{r_{ah}} \right) \quad (W.m^{-2}) \quad (10)$$

waarin ρ_a is de dichtheid van lucht (kg m^{-3}), c_p is de soortelijke warmte ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), T_a de luchttemperatuur, r_{ah} is de diffusieweerstand voor turbulent warmtetransport (s m^{-1}).

Het gewas zelf heeft vaak een geringe warmtecapaciteit. Daarom wordt de energie die voor het opwarmen benodigd is meestal verwaarloosd.

Met de vergelijkingen (6), (7), (8), (9) en (10) kan de gewasverdamping LE als volgt worden uitgedrukt:

$$LE = (1-r)R_{si} + \varepsilon(R_{li} - \sigma T_c^4) + \rho_a c_p \frac{T_a - T_c}{r_{ah}} - G \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (11)$$

Uit vergelijking (11) volgt dat de gewasverdamping een functie is van de gewas temperatuur. Indien door vochttekort de gewasverdamping afneemt, wordt meer energie gebruikt voor het opwarmen van de atmosfeer en het gewas, en in mindere mate voor het opwarmen van de bodem. Om de verdamping te berekenen zijn veel gegevens nodig met betrekking tot de meteorologie, gewasparameters en bodemfysische grootheden. Met behulp van het TERGRA-model (SOER, 1977) kan de verdamping midden overdag worden omgezet in een dagverdampingswaarde.

NIEUWENHUIS e.a. (1985) gebruikten een sterk vereenvoudigde methode. Zij stelden een relatie voor tussen de aktuele dagverdamping LE^{24} enerzijds en de potentiële dagverdamping en verschillen in gewas temperatuur anderzijds:

$$LE^{24} = LE_p^{24} - B (T_c - T_c^*)_i \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (12)$$

Hierin is LE^{24} de aktuele, LE_p^{24} de potentiële dagverdamping (W.m^{-2}), T_c de gewas temperatuur en T_c^* de gewas temperatuur bij potentiële verdamping (K), B is een te calibreren constante ($\text{W.m}^{-2} \text{K}^{-1}$) en de index i duidt op momentane waarden.

Met deze methode kan men verschillen in gewas temperatuur, afgeleid uit het warmtebeeld, direkt omzetten in verschillen in dagverdamping.

THUNNISSEN (1984) toonde aan dat het de voorkeur verdient met relatieve waarden te werken. Vergelijking (12) wordt dan:

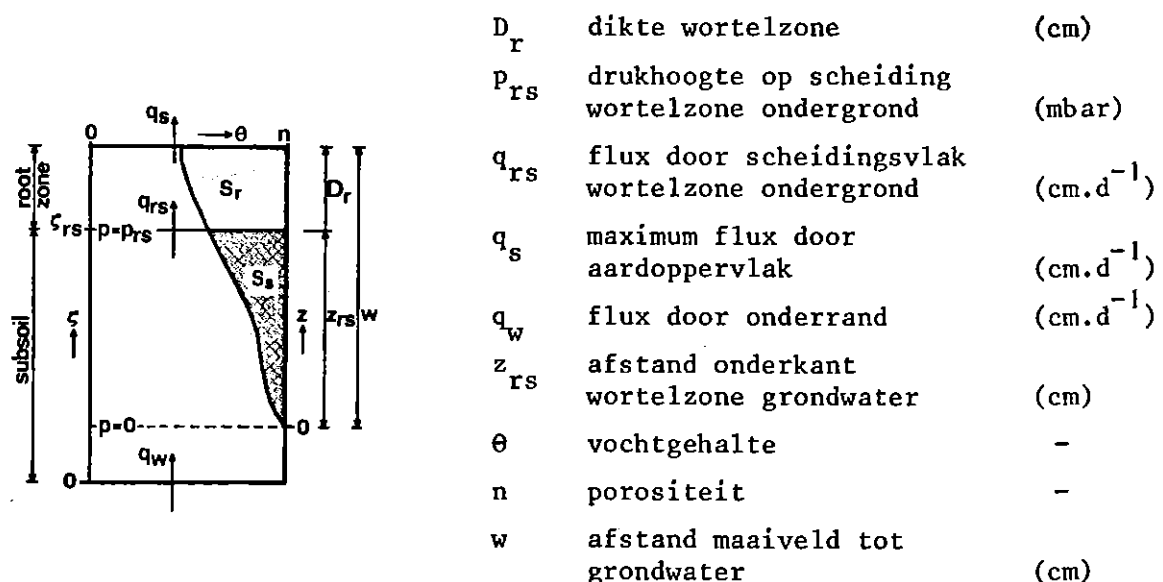
$$LE_R = \frac{LE^{24}}{LE_p^{24}} = 1 - B^r (T_c - T_c^*) \quad (13)$$

Met behulp van het TERGRA-model zijn waarden voor de constante B^r bepaald (THUNNISSEN, 1984).

2.2. Hydrologische modelberekening

Om inzicht te krijgen in het effect van leemlagen is in aanvulling op en ter vergelijking met de verdampingskartering gebruik gemaakt van het hydrologisch computerprogramma LAMOS, dat berust op een eender model van DE LAAT (1978). LAMOS (Landinrichtingsdienst Model voor Onverzadigde Strooming) is een pseudo-stationair model dat de vochtleverantie door het bodemprofiel, het optredende vochttekort en de veranderingen van de grondwaterstand berekent in tijdstappen van tien dagen. Hiertoe dienen gegevens te worden ingevoerd met betrekking tot bodemkundige en -fysische eigenschappen en de uitgangssituatie, wat betreft gewas, vochtgehalte en grondwaterstand. Van de door te rekenen periode dienen meteorologische gegevens ingevoerd te worden. Voor een meer gedetailleerde beschrijving van de belangrijkste in- en uitvoergegevens van het model LAMOS wordt verwezen naar Bijlage 1.

Voor het berekenen van de vochtleverantie wordt het bodemprofiel opgesplitst in wortelzone en ondergrond.



Figuur 2.8. Schematische voorstelling van de onverzadigde strooming in het model LAMOS (DE LAAT, 1985).

Na het inlezen van alle tijdsafhankelijke variabelen start het programma met het berekenen van de beginflux door het profiel. Uitgangspunt voor deze berekening vormt de vergelijking van Darcy voor verticale grondwaterstroming:

$$\bar{q} = -K(p) \left(\frac{dp}{dz} + 1 \right) \quad (\text{cm.d}^{-1}) \quad (14)$$

Hierin is $\bar{q}$ de stationaire flux (cm.d^{-1}), p de drukhoogte in het meetpunt (cm), z is de hoogte van dit punt ten opzichte van het referentievlak (cm). K is de doorlatendheid, die afhankelijk is van p (cm.d^{-1}).

Vergelijking (14) kan herschreven worden als:

$$z = - \int_0^p \frac{K(p)}{\bar{q} + K(p)} dp \quad (\text{cm}) \quad (15)$$

Met bekende $K(p)$ relaties kan (15) worden opgelost. Hiermee is de relatie tussen z en p bepaald voor een gegeven stationaire stroming $\bar{q}$: $z = z(p, \bar{q})$.

Met behulp van de pF curve is $z(p, \bar{q})$ te transformeren tot $z(\theta, \bar{q})$.

Om het vochtgehalte van het bodemprofiel te bepalen moeten de fluxen q_s en q_w en het grondwaterpeil bekend zijn. Stelt men $\bar{q} = q_s$ dan volgt daaruit een waarde voor p_{rs} . Met behulp van $z(\theta, \bar{q})$ is het vochtgehalte van het profiel te bepalen.

Het berekenen van de situatie op een volgend tijdstip start met het opstellen van een vochtbalans:

$$q_s = ET + ES - P_s \quad (\text{cm.d}^{-1}) \quad (16)$$

Hierin is q_s de maximaal mogelijke flux door het maaiveld, ET is de verdamping van het gewas (cm.d^{-1}), ES de verdamping van de bodem (cm.d^{-1}) en P_s is neerslag minus interceptie (cm.d^{-1}).

De maximum flux q_s kan veelal niet optreden. Door middel van een iteratie procedure wordt dan de werkelijke flux berekend.

ET en ES worden berekend uit meteorologische gegevens. De interceptie is gewasafhankelijk.

De flux van het gehele profiel wordt hierna berekend, zodanig dat de voor de ondergrond en de wortelzone bepaalde p_{rs} aan elkaar gelijk zijn.

Is de nieuwe p_{rs} bepaald, dan is daarmee de verdeling van het bodemvocht over het profiel bekend.

Voor een gedetailleerde beschrijving wordt verwezen naar DE LAAT (1985) en REULING (1983).

3. GEBIEDSBESCHRIJVING

3.1. Ligging en topografie

Het onderzoeksgebied ligt in West-Brabant, tussen Roosendaal en Etten-Leur. In het noorden vormt de spoorlijn Breda-Roosendaal de begrenzing, in het zuiden de Belgische grens. Het 6700 hectare grote studiegebied bestaat uit zwak tot sterk golvende zandgronden. De globale hoogteligging bedraagt 7 tot 8 meter + NAP in het westelijke deel, oplopend tot 11 meter + NAP in het oosten. De Rucphense bossen liggen hoger dan het omringende gebied met een hoogte van 12 tot 16 meter.

De ligging en begrenzing van het onderzoeksgebied is weergegeven in figuur 3.1.

3.2. Ontstaansgeschiedenis

De ontstaansgeschiedenis is in tabel 3.1 door middel van een stratigrafisch overzicht weergegeven.

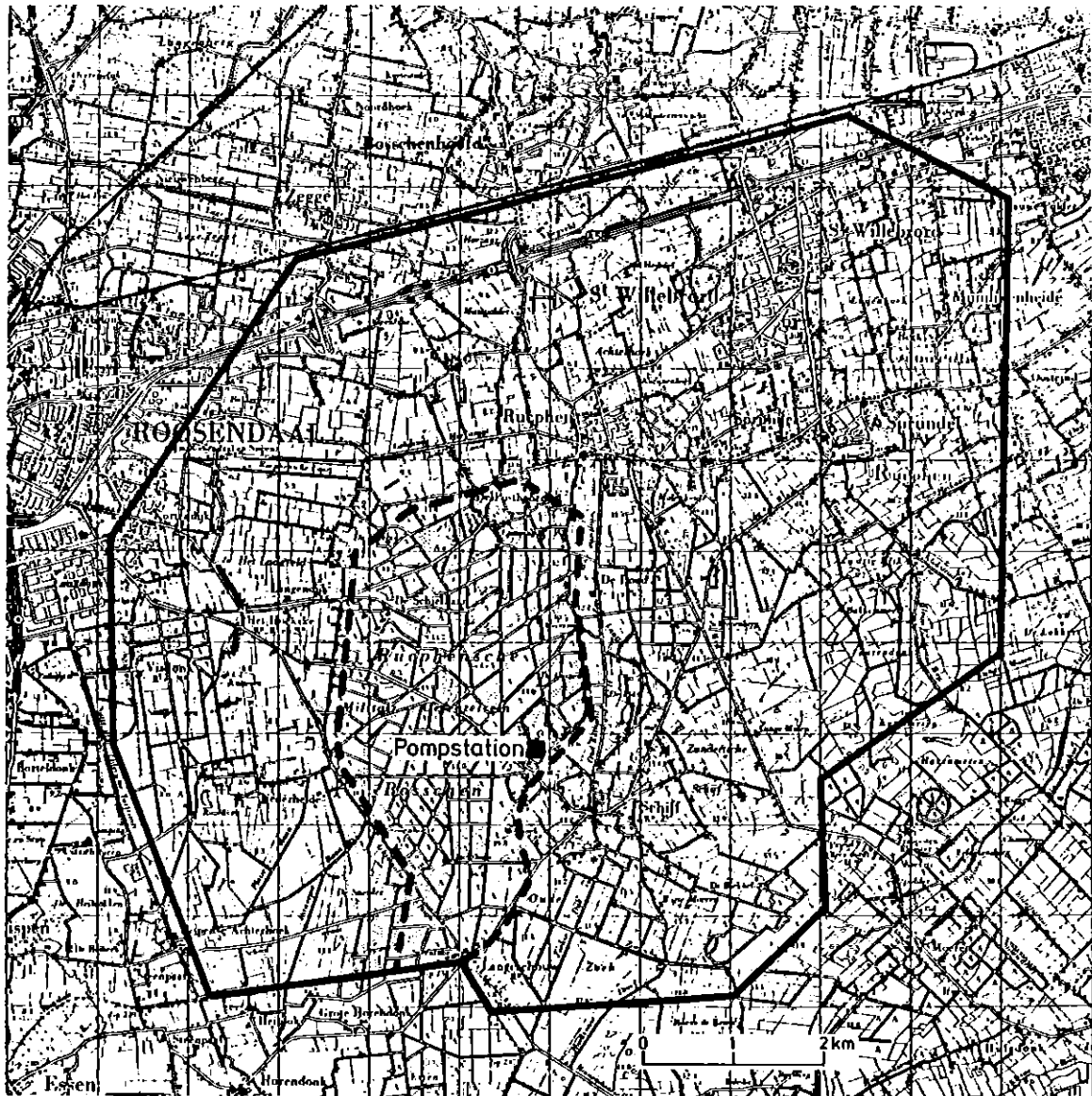
Het grootste deel van de formaties, waaruit de bodem is opgebouwd, zijn afgezet in het Pleistoceen. Op de mariene afzettingen uit het Icenien, op een diepte van ongeveer 40 meter, zijn fluviatiele zanden en kleien afgezet, in tabel 3.1 aangeduid als II-0 afzettingen. De dikte van dit pakket bedraagt enkele tientallen meters tot maximaal 40 meter. De bovenkant bestaat uit een zeer zware kleilaag, die ook wel II-0 leem genoemd wordt. Op de II-0 leem heeft zich in het Eemien een humeuze vegetatiehorizont ontwikkeld.

Na het Eemien is een dunne laag verspoeld zand van eolische oorsprong afgezet. Hierop is plaatselijk een vrij zware laag afgezet, de laag van Wouw genaamd.

Van 29 000 tot ongeveer 8000 jaar geleden is het gebied bedekt door verschillende lagen dekzand. Dit dekzandpakket heeft een dikte die varieert van enkele decimeters tot enkele meters.

In het Laatglaciaal groeide in afvoerloze kommen en verstopte beekdalen veen. De veengroei zette zich door in het Holoceen. Door afgraving is het veen later bijna geheel verdwenen.

Zandverstuivingen in het Holoceen deden leemarme reliefrijke gebieden ontstaan, zoals de Rucphense bossen.



Figuur 3.1. Ligging en begrenzing van het onderzoeksgebied.

Tabel 1. Stratigrafisch overzicht van de voorkomende afzettingen
(LEENDERS en MULDER, 1976)

Perioden				Tijdschaal	In dit gebied aangetroffen afzettingen
Holocene				heden	
				- 700	stuifzand en
				- 3 000	plaatselijk veen
				- 8 100	
Pleistoceen	Laat	Laat-Glaciaal		- 11 300	Jonger dekzand, plaatselijk veen
		Pleniglaciaal	Boven		Ouder dekzand II
					Laag van Beuningen
					Ouder dekzand I
			Midden	- 29 000	Laag van Wouw
			Onder	- 52 000	Fluvio-periglaciale afzetting
		Vroeg-Glaciaal			
		Eemien		- 90 000	Humeuze vegetatiehorizont
				- 130 000	
	Midden				
	Vroeg				Formatie van Kedichem)
					)
		Tiglien	Icenien	-1 700 000	) II0 - afz.
		Pretiglien		-2 250 000	)
				-2 500 000	)

3.3. Bodemtypen

Op de dekzanden hebben zich voornamelijk podzolgronden ontwikkeld, waarvan het leemgehalte sterk varieert.

Sterk lemige fijnzandige podzolen komen voor in het noorden en in het westen van het onderzoeksgebied en op enkele plaatsen ten zuiden en oosten van het dorp Schijf. In en rondom de dorpen Schijf en Rucphen

en ten zuiden en oosten van Roosendaal liggen oude sterk lemige bouw-landgronden, de enkeerdgronden.

In de beekdalen liggen veelal moerige gronden en smalle stroken veen.

Een overzicht van de meest voorkomende bodemtypen is opgenomen in tabel 2.

Tabel 2. Voorkomende bodemtypen in het onderzoeksgebied Rucphen

Bodemtype	Percentage van oppervlakte
Zandgronden	90%
podzol	65%
enkeerdgronden	15%
overige	10%
Moerige gronden	10%

3.4. Waterhuishouding

De vochthoudendheid van het bodemprofiel en het grondwaterstandsverloop worden in het studiegebied sterk bepaald door het leemgehalte van de bovengrond en de aanwezigheid van weinig doorlatenden lagen in de ondergrond. Fijnzandige sterk lemige gronden, voorkomend in het westen van het studiegebied, hebben een groot vochthoudend vermogen. Deze gronden zijn minder droogtegevoelig dan de grovere leemarme gronden die een geringe vochtberging hebben.

De grondwaterstanden verschillen in het gebied minder dan op grond van de hoogteligging verwacht mag worden. Door het voorkomen van voor het verticale watertransport storende lagen komen op hooggelegen gronden ondiepe waterstanden voor.

De invloed van storende lagen (laag van Wouw, II-0 leem) kan tweeledig zijn. Op hooggelegen gronden kunnen in het voorjaar schijngrondwaterspiegels ontstaan, waardoor soms verdroging in latere perioden wordt tegengegaan. In de zomer kunnen deze gronden, afhankelijk van begindiepte en dikte van de storende lagen, ook in meerdere of mindere mate verdrogen. Als de vochtvoorraad van de bovengrond is uitgeput, kan de ondergrond weinig meer naleveren.

Vijfenvijftig procent van de gronden heeft een gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG) van minder dan 40 centimeter onder het maaiveld (grondwatertrappen II, III, V en V^{*}) (Gt). Drieëntachtig procent van de gronden heeft een gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) dieper dan 120 cm - mv. (Gt's V, V^{*}, VII en VII^{*}). Hiervan is 23% dieper dan 1.60 m - mv. (Gt's VII en VII^{*}). Een overzicht van de voorkomende grondwatertrappen en de bijbehorende oppervlakten is opgenomen in tabel 3.

Tabel 3. Grondwatertrappen en bijbehorende oppervlakten in percentage van het onderzoeksgebied Rucphen

Grondwatertrap	GHG	GLG	Oppervlakte
II	<40	50- 80	3%
III	<40	80-120	14%
V	<40	>120	18%
V [*]	<40	>120	20%
VI	40-80	>120	22%
VII	<80	>160	10%
VII [*]	<80	>160	13%

3.5. Bodemgebruik

Veertig procent van het studiegebied wordt ingenomen door bos, wegen, waterlopen en bebouwing. Van de 4020 hectare landbouwgrond is ongeveer vijftien procent in gebruik ten behoeve van de akkerbouw (670 ha), vijftien procent is in gebruik als maisland en zeventig procent als grasland.

4. BESCHIKBARE LUCHTOPNAMEN EN VELDGEGEVENS

4.1. Luchtopnamen 1983

Op 21 juli 1983 zijn van het onderzoeksgebied rondom Rucphen luchtopnamen gemaakt. Er is door de firma Eurosense gevlogen met een Daedalus scanner, type Ds 1240/1260. Op bijlage 2 zijn hiervan de technische specificaties gegeven.

Met de Ds1240 scanner zijn onder andere de kanalen 5, 7 en 9 opgenomen met de bandbreedten van respectievelijk 500-550 nm (groen), 650-690 nm (rood) en 800-890 nm (nabij infrarood). Met de Ds 1260 scanner zijn thermisch infrarood opnamen gemaakt in het golflengtebreik van 8.0-14.0 μm . De Ds 1260 heeft onder gemiddelde omstandigheden een minimaal detecteerbaar temperatuurverschil van 0,2°C.

Tijdens dezelfde vlucht zijn gelijktijdig false colour foto's gemaakt (23 cm, diapositief).

Het onderzoeksgebied is tijdens het middaguur opgenomen in drie stroken, vlieghoogte 3000 meter, vliegrichting Zuid/West.

De geografische resolutie (= kleinste waarneembare geografisch element) bedraagt 8x8 meter.

4.2. Bodemkundige veldopnamen

Ten behoeve van het Technisch Secretariaat van de Commissie Grondwaterwet Waterleidingbedrijven van de Landinrichtingsdienst (Cogrowa), is door de Stichting voor Bodemkartering in 1980 een bodemkundig-hydrologisch onderzoek uitgevoerd (TE RIELE, 1981).

Het onderzoek vond plaats op een aantal bedrijven die binnen de invloedssfeer liggen van het grondwaterpompstation Seppe te Hoeven en/of het pompstation Schijf te Rucphen. Het doel was de bodemkundige en de hydrologische situatie te inventariseren op perceelsniveau, en de oorspronkelijke situatie te reconstrueren.

De inventarisatie heeft bestaan uit een profielbeschrijving van een 118-tal boringen, gedaan op 50 hectare. Tevens is van de bodem de bewortelbare diepte en het humusgehalte bepaald en is de grondwaterstand opgenomen in de herfst van 1980 en in het voorjaar van 1981.

Ten behoeve van de toepassing van het model LAMOS zijn de gegevens gecategoriseerd en verwerkt tot een reeks bovengronden en standaard-ondergronden, waarvan de hydrologische eigenschappen zijn bepaald.

Na de detailstudie van 1980 is in 1982/1983 de bodemkundige en hydrologische situatie van het gehele onderzoeksgebied geïnventariseerd. De benodigde informatie werd verkregen door op 1073 verspreid door het gebied gelegen boorpunten het profiel te beschrijven en de grondwaterstanden op te nemen (TE RIELE, 1982).

De bodemkundige opname is verricht in de zomer van 1982 en in het voorjaar van 1983.

Doel van de studie was informatie te verkrijgen over de samenstelling van de bovengrond en de diepere ondergrond, en in het bijzonder over het voorkomen van storende lagen. Voorts zijn de oorspronkelijke en de huidige GLG en GHG bepaald; de oorspronkelijke aan de hand van de profielbeschrijvingen, de huidige door metingen.

4.3. Overige gegevens

Veldgegevens tijdens de vlucht

Ten behoeve van de interpretatie van de luchtopnamen zijn op 21 en 22 juli 1983 veldopnamen gedaan.

Van een dertigtal percelen zijn gegevens verzameld met betrekking tot gewastemperatuur, gewastype, gewashoogte en bedekkingsgraad. De situatie is vastgelegd op dia en foto.

Grondwaterstandsgegevens TNO

De Dienst Grondwaterverkenning van TNO beheert een uitgebreid meetnet van landbouwbuizen, peilbuizen en brandputten. Tweemaal per maand wordt de grondwaterstand opgenomen.

In het onderzoeksgebied liggen zestien landbouwbuizen, behorende tot dit meetnet.

5. METHODIEK

De gewastemperatuur en de relatieve verdamping hangen samen, zoals beschreven in paragraaf 2.1.6. Met behulp van de hierin aangegeven relatie zijn de remote sensing beelden getransformeerd tot een verdampingskaart. Deze methode is beschreven in paragraaf 5.1.

Paragraaf 5.2 beschrijft de methodiek volgens welke de hydrologische modelberekening met LAMOS is uitgevoerd.

De hydrologische en bodemkundige factoren zijn ontleend aan het rapport Waterwinning Rucphen II (TE RIELE, 1982). Ten einde een statistisch betrouwbaar resultaat te verkrijgen, zijn de gegevens van 1100 boorpunten geschematiseerd als beschreven in paragraaf 5.3.

5.1. Verdampingskartering

De automatische verwerking van de reflectie- en warmtebeelden is uitgevoerd op het RESEDA-systeem van Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium te Amsterdam. Figuur 5.1. toont een stroomschema van de beeldverwerking, die daar is uitgevoerd.

Gestart is met het corrigeren van de reflectiebeelden voor lichtafval naar de rand. De lichtafval wordt bepaald door de vliegrichting ten opzichte van de zonnestand.

Door de reflectiewaarden kolomsgewijs te vermenigvuldigen met correctiefactoren wordt de reflectie over de gehele breedte van de opnamestrook tot eenzelfde gemiddeld niveau teruggebracht. Figuur 5.2 toont een histogram waarop de oorspronkelijke en de gecorrigeerde reflectiewaarden staan weergegeven. De gecorrigeerde banden vormen het uitgangspunt voor de gewasklassificatie.

De automatische gewasklassificatie is verricht met behulp van de zogenaamde interactieve klassificatiemethode. Deze methode maakt gebruik van een tweetal banden, in dit geval de banden 7 en 9. De reflectiewaarden in beide banden kunnen grafisch worden weergegeven in een feature space plot, de ruimte van spectrale kenmerken.

De klassificatie is beperkt tot de meest verbreide gewassen: gras en mais. Begonnen is met het aanwijzen van trainingspixels. Dit zijn pixels waarvan de te onderzoeken eigenschap bekend is. Het pixel betreft bijvoorbeeld een perceel grasland. Van dit perceel worden de spectrale kenmerken in de feature space plot zichtbaar gemaakt. Grasland en mais zijn als twee goed begrensde gebieden in de feature space plot te onderscheiden, hoewel een kleine overlap enkele misklassificaties veroorzaakt. De misklassificaties zijn na afloop met de hand gecorrigeerd. De correctie werd uitgevoerd door middel van een visuele interpretatie van de false colour foto's. Op deze opnamen is mais namelijk goed van grasland te onderscheiden.

Het verband tussen temperatuur en verdamping is bij grasland afhankelijk van de grashoogte. Een klassificatie naar grashoogte wordt verkregen door het toepassen van de Vegetatie Index (DE NIES en LEBOUILLE, 1986). Deze luidt (TUCKER, 1977):

$$\frac{\text{band 7} - \text{band 9}}{\text{band 7} + \text{band 9}} = x \cdot 100\% = \text{Vegetatie Index}$$

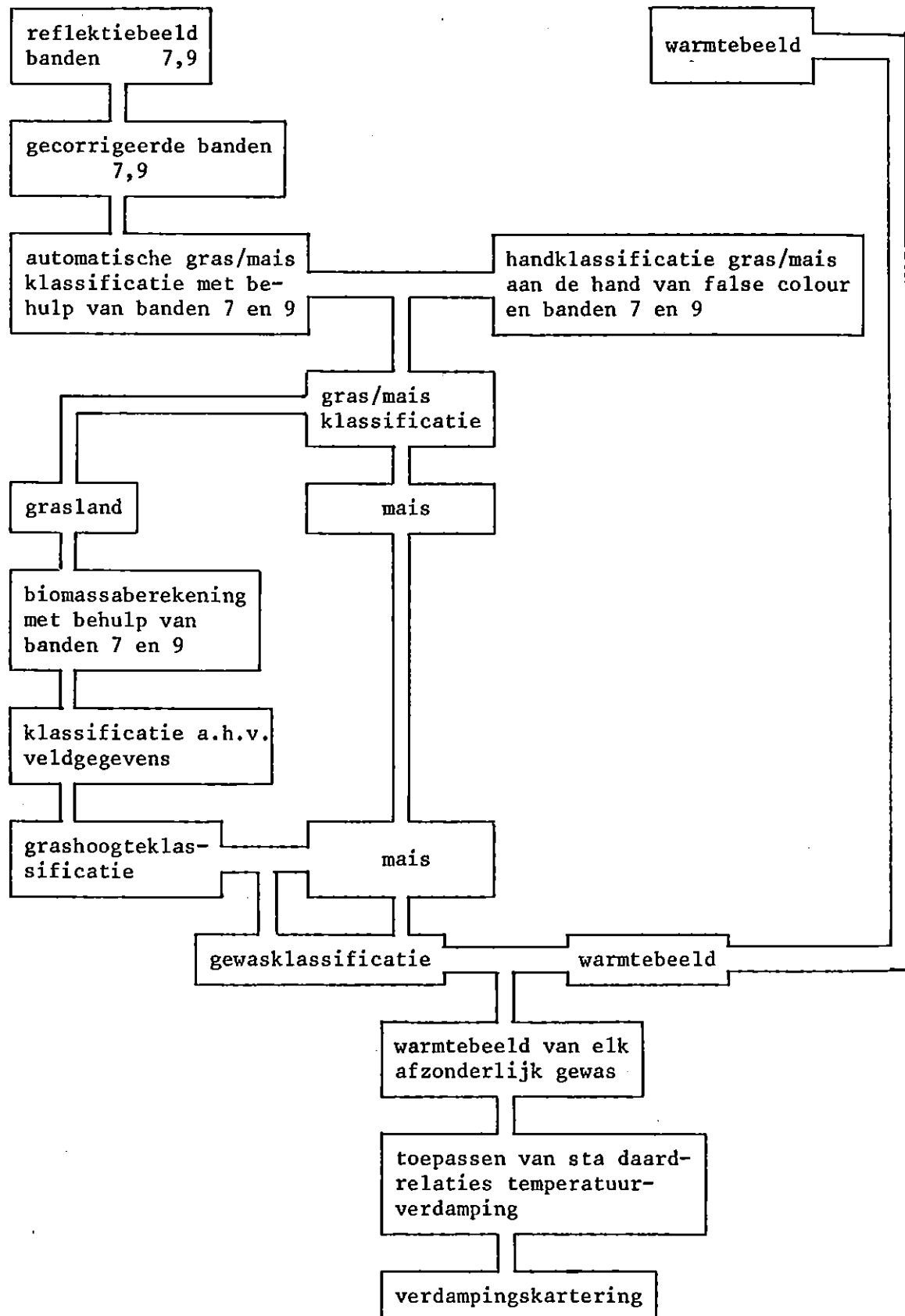
De laatste handeling om de verdampingskaart te verkrijgen bestaat uit het combineren van de gewasklassificatie met het warmtebeeld en het hierop toepassen van de standaardrelaties.

In figuur 5.3 zijn deze relaties weergegeven.

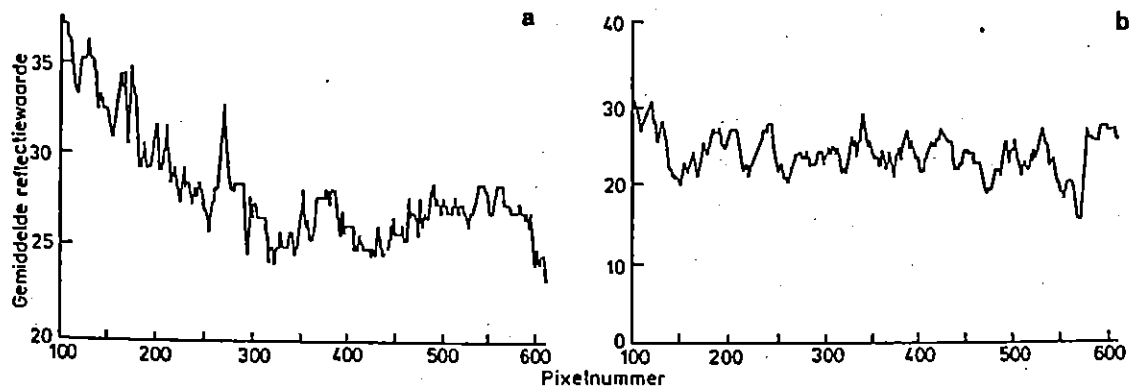
De standaardrelaties gelden alleen voor een representatieve heldere zomerse dag in Nederland. De vluchtdag voldeed hieraan.

In figuur 5.4 is de gewassenkaart gegeven.

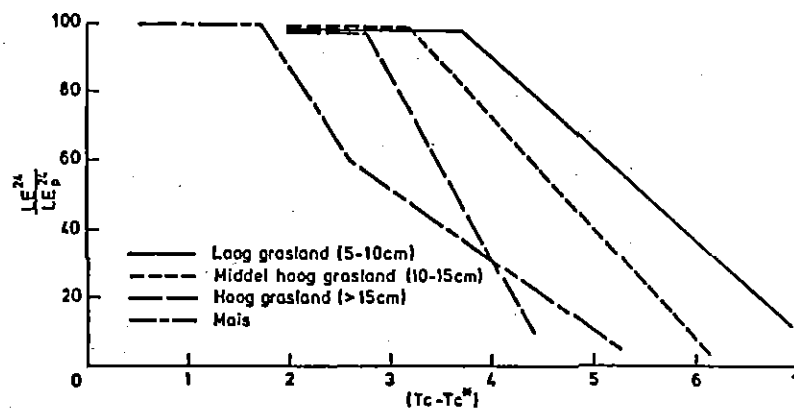
Figuur 5.5 toont het eindresultaat: de verdampingskaart.



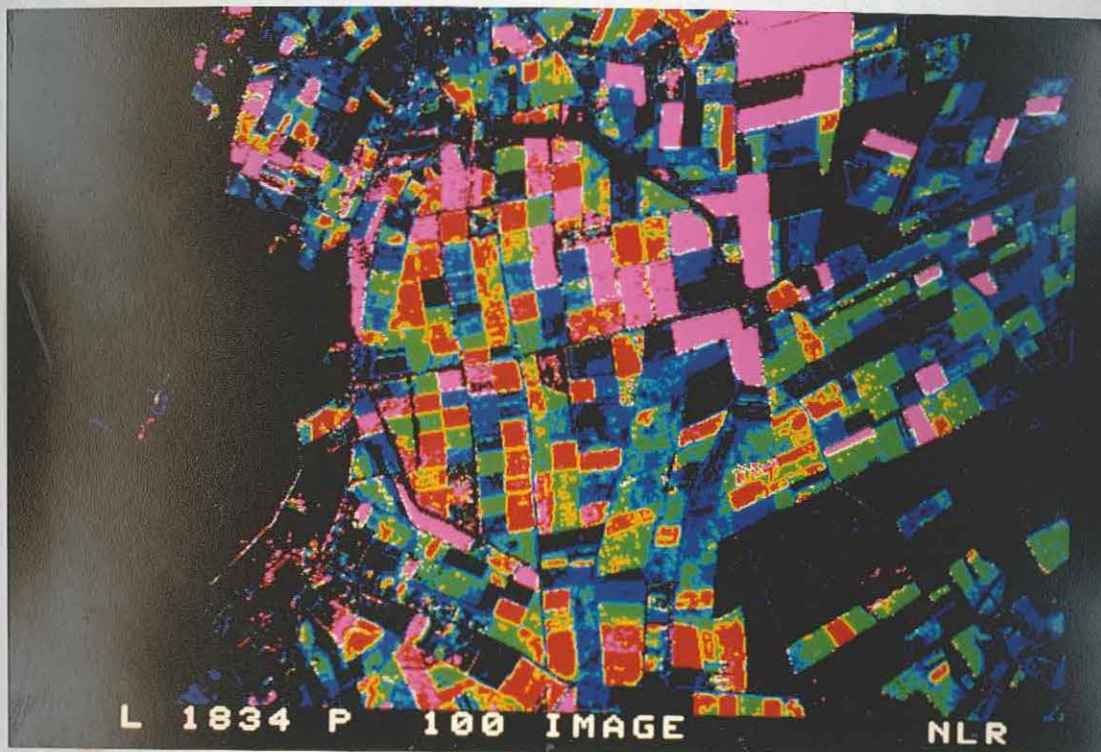
Figuur 5.1. Stroomschema van de toegepaste beeldverwerking



Figuur 5.2. Histogram van oorspronkelijke reflectiewaarden in band 7 (a) en de gecorrigeerde reflectiewaarden (b). Hiermee wordt een beeld verkregen van het verloop in reflectiewaarden loodrecht op de vliegrichting.



Figuur 5.3. Standaardrelaties tussen de relatieve dagverdamping (LE_p^{24} / LE_s^{24}) en de opwarming van het gewas ($T_c - T_c^*$) op 21 juli 1983 voor grasland met verschillende gewashoogten en mais. Bij de relatie voor mais is rekening gehouden met de invloed van de kale grond op de waargenomen wartmestraling bij sterke verdroging.



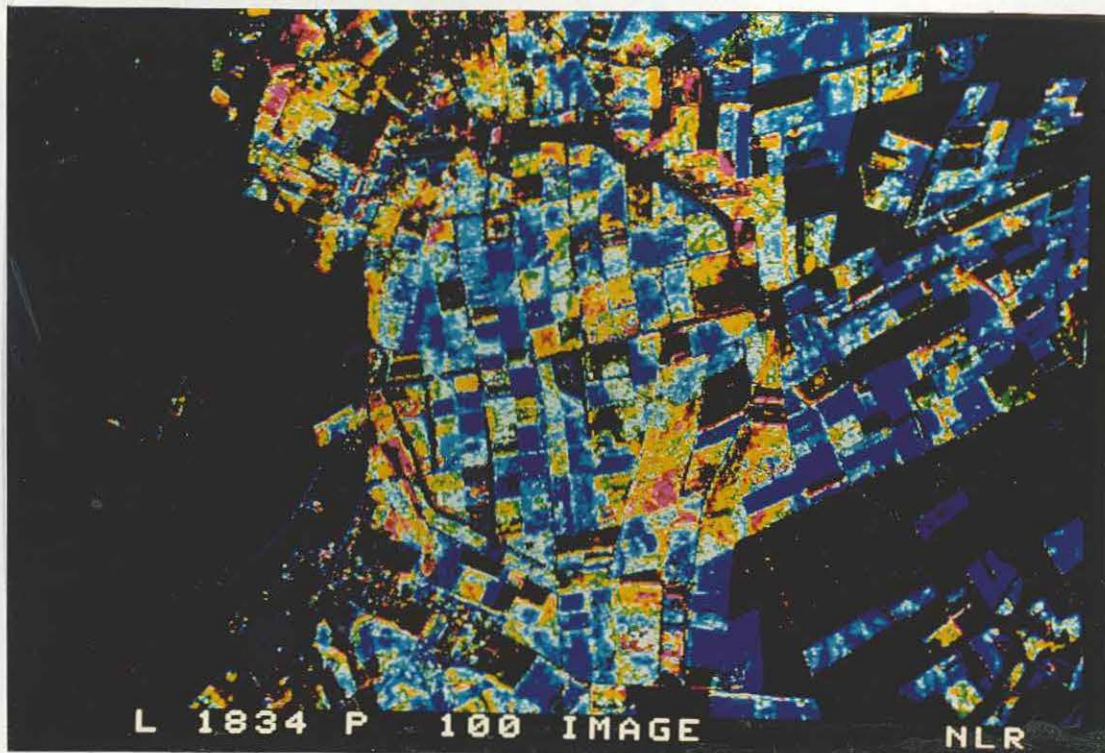
Figuur 5.4. Gewassenkaart van een deel van het onderzoeksgebied Rucphen verkregen door een interactieve klassificatiemethode aan de hand van de reflectiebeelden rood (band 7) en nabij infrarood (band 9), die zijn opgenomen op 21 juli 1983.

Paars - mais

Blauw - laag grasland (5-10 cm)

Groen - middelhoog grasland (10-15 cm)

Rood - hoog grasland (>15 cm)



Figuur 5.5. Verdampingskaart van het in figuur 5.4 getoonde gebied, vervaardigd aan de hand van de remote sensing opnamen van 21 juli 1983.

De relatieve dagverdamping neemt af van

blauw	(100%)
cyaan	(90-100%)
grijs	(80- 90%)
donkergroen	(70- 80%)
geel	(60- 70%)
oranje	(50- 60%)
rood	(40- 50%) naar
magenta	(<30%)

Zwart betekent niet geklassificeerd.

5.2. Hydrologische modelberekening

Het doel van de berekeningen met het LAMOS-model was het effect van storende lagen te bepalen en de uitkomsten te vergelijken met de verdampingskartering. Om het rekenwerk te beperken, is gekozen voor het doorrekenen van een bodemprofiel met als bodembedekking grasland. Hierbij zijn de laagdikten en de begindiepten van de leem gevarieerd, evenals het grondwaterstandsverloop. Als referentie diende een profiel zonder storende laag.

De voor de invoer benodigde meteorologische gegevens zijn betrokken van het weerstation Oudenbosch en betroffen tiendaagse neerslag- en verdampingssommen. Als begintijdstip van de berekeningen is april aangehouden, het begin van het groeiseizoen.

De bodemkundige gegevens zijn ontleend aan TE RIELE (1981). Te Riele heeft ten behoeve van de toepassing van het model LAMOS de bodemkundige en fysische eigenschappen geschematiseerd tot een tiental in het onderzoeksgebied voorkomende ondergrondtypen. De eigenschappen van de hierin onderscheiden lagen zijn ontleend aan RIJTEMA (1969) en RIJTEMA (1971) en zijn beschreven in termen van vochtkarakteristiek en capillair geleidingsvermogen.

De meest voorkomende standaardondergrond is een zogenaamde Rijtema 3 (R3) ondergrond. De onderscheiden vochtkarakteristiek van de wortelzone is die van een leemarme humusarme zandgrond.

De aangetroffen leemlagen behoren veelal tot de laag van Wouw en hebben fysische en hydrologische eigenschappen, die overeenkomen met die van een Rijtema 6 (R6) standaardondergrond.

Een overzicht van de vochtkarakteristieken en $K(h)$ relaties van de gronden is opgenomen in tabel 4.

Als verschillende door te rekenen begindiepten van de storende laag is aangehouden 50, 100, 150 en 200 cm onder het maaiveld. De laagdikte bedroeg 25, 50 en 100 cm.

Op basis van gemeten grondwaterstanden zijn een zevental voor het onderzoeksgebied representatieve trajekten bepaald, waarover het verloop van de grondwaterstand gedurende het groeiseizoen is gemeten.

De uitvoer van het LAMOS-model bestaat onder andere uit een berekende grondwaterstand en het aktuele en potentiële verdampingsoverschot.

De relatieve verdamping is dan gedefinieerd als het aktuele verdampingsoverschot plus de neerslag, gedeeld door het potentiële verdampingsoverschot plus de neerslag. Deze is omgerekend tot procenten.

Tabel 4. Vochtgehalte (θ) en capillair geleidingsvermogen (K) afhankelijk van pF voor de bodemlagen R3 en R6

pF	R3		R6	
	θ	K (cm.d ⁻¹)	θ	K (cm.d ⁻¹)
0	35.0	70.0	39.4	2.3
1.0	32.5	30.0	37.4	1.3
1.3	31.6	12.8	36.2	7.5E-1
1.5	30.5	5.0	35.3	4.0E-1
1.7	26.0	1.0	32.9	1.4E-1
2.0	15.5	1.4E-2	28.0	8.3E-3
2.4	7.7	1.1E-3	23.2	2.3E-3
2.7	6.1	4.2E-4	20.5	8.8E-4
3.0	5.0	1.6E-4	18.0	3.3E-4
3.4	4.3	4.4E-5	15.1	9.2E-5
3.7	3.2	1.7E-5	13.0	3.5E-5
4.0	2.5	6.3E-6	11.1	1.3E-5
4.2	2.3	3.3E-6	10.0	6.8E-6

5.3. Interpretatie veldgegevens

De bodemkundige en hydrologische gegevens zijn ontleend aan TERIELE (1983). De geografische ligging van de 1100 hierin beschreven boorpunten is overgebracht op de verdampingskaart, zodat van elk punt de verdampingswaarde kon worden bepaald. Hiermee is er een verband gelegd tussen de verdamping van het betreffende gewas op 21 juli 1983 en de bodemkundige en hydrologische omstandigheden.

Deze relatie wordt verstoord indien berekening is toegepast. Met behulp van false colour foto's en warmtebeelden zijn de beregende percelen gelokaliseerd. Op de foto's zijn beregeningspatronen goed te herkennen. Ook op de warmtebeelden onderscheiden beregende percelen zich van niet beregende percelen, en wel door een lage temperatuur. Bij de interpretatie zijn dergelijke percelen niet in beschouwing genomen.

Verder zijn een aantal boorpunten weggevallen, omdat hiervan de verdampingswaarde niet bepaald is. Het betreft hier bouwlandpercelen, bos en heide. Er resteerden 450 boorpunten.

Bij het onderzoek naar het effect van leemlagen, de invloed van grondwaterstand, grondwatertrap en textuur is onderscheid gemaakt in grasland en mais. Mais is hoger, wortelt dieper en vormt later in het seizoen een gesloten gewas. Hierdoor verschilt de verdamping van de grasverdamping onder gelijke omstandigheden.

Van de in het onderzoeksgebied voorkomende bodemtypen zijn hoofdzakelijk de podzolgronden onderzocht.

Bij het onderzoek naar het effect van leemlagen is een schematisering toegepast. Dit is veroorzaakt door een betrekkelijk gering aantal overgebleven boorpunten met leem.

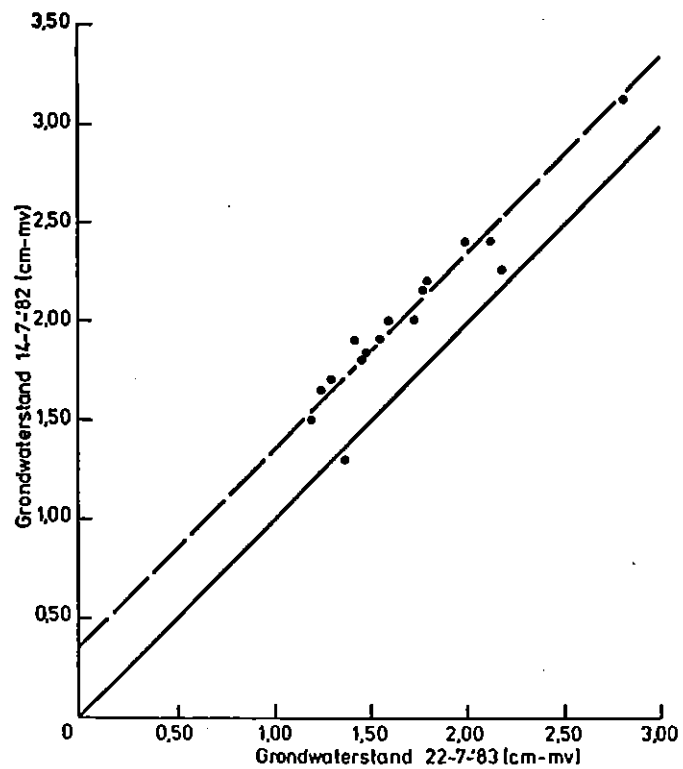
De toegepaste schematisering is de volgende:

- alleen de boorpunten waarbij de begindiepte van de leem gelijk is aan of ondieper dan de grondwaterstand in de zomer zijn onderzocht
- de leemlaagdikte dient ten minste 20 cm te bedragen
- de fysische eigenschappen van de leem worden constant verondersteld in het gehele onderzoeksgebied
- er is onderscheid gemaakt in een drietal grondwaterstandsklassen om de invloed van de grondwaterstand te elimineren. Deze zijn: grondwaterstand tot 1,40 meter onder het maaiveld, van 1,40-1,80 m en dieper dan 1,80 meter.

De drie grondwaterstandsklassen zijn afgeleid uit een analyse van de in het onderzoeksgebied voorgekomen grondwaterstanden in juli 1982.

Op de vluchtdag is helaas geen opname gedaan van de grondwaterstand. De grondwaterstanden van de TNO-landbouwbuizen, gemeten op 14 juli 1982 en 22 juli 1983 zijn evenwel goed gecorreleerd (figuur 5.6). Er is daarom aangenomen dat de grondwaterstand op de vluchtdatum kan worden afgeleid uit de gemeten zomergrondwaterstand in 1982.

Uit de analyse van de landbouwbuizen bleek dat de grondwaterstand op 22 juli 1983 gemiddeld 35 cm hoger was dan op 14 juli 1982. Deze correctie is daarna toegepast op alle grondwaterstanden die op 12 en 13 augustus 1982 zijn waargenomen.



Figuur 5.6. Het verband tussen de grondwaterstand op 14-7-1982 en 22-7-1983 van zestien landbouwbuizen

6. RESULTATEN

De relatie gewasverdamping is afgeleid uit de verdampingskaart (fig. 5.5), die is samengesteld aan de hand van de remote sensing opnamen van 21 juli 1982. De invloed van diverse factoren op deze verdampingswaarden is onderzocht.

Daarnaast zijn berekeningen met het LAMOS-model uitgevoerd. De resultaten worden vergeleken met de remote sensing benadering.

6.1. Invloed van leemlagen in de ondergrond op de relatieve gewasverdamping

In tabel 5 is de relatieve gewasverdamping van percelen grasland op podzolgronden gegeven, waarbij onderscheid is gemaakt in percelen met en zonder leemlaag.

Tabel 5. Relatieve gewasverdamping van gras op podzolgronden met en zonder leemlaag in de ondergrond

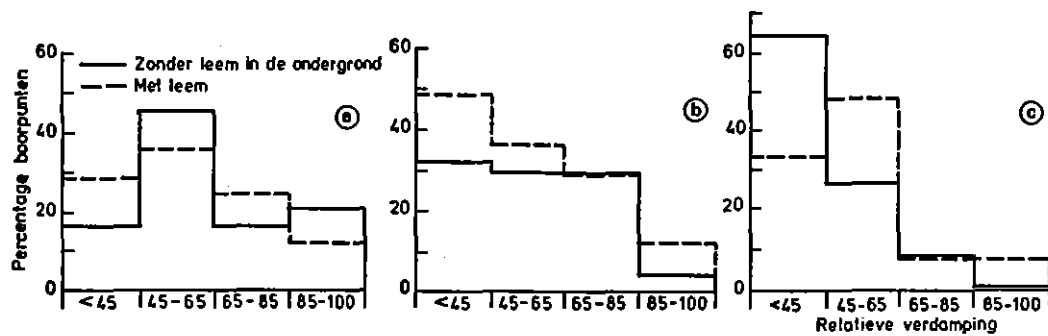
Grondwaterstandsklasse	Aantal onderzochte boorpunten		Relatieve verdamping	
	met leem	zonder leem	met leem	zonder leem
< 1,40 m	15	80	58	63
1,40 - 1,80 m	8	35	53	55
> 1,80 m	12	46	46	44

De relatieve verdamping is gemiddeld per grondwaterstandsklasse. Een drietal klassen zijn onderscheiden: grondwater tot 1,40 m onder het maaiveld, van 1,40-180 m en dieper dan 1,80 m.

Uit tabel 5 blijkt duidelijk de invloed van de grondwaterstand. Deze neemt af van ongeveer 60 tot 45% bij een toename van de grondwaterstand. Dit geldt zowel voor profielen met leem als voor profielen zonder leem.

Het verschil in verdamping tussen boorpunten met leem en zonder leem blijkt gering. Dit duidt erop dat de bodemfysische en hydrologische eigenschappen van bodems met leem niet bijzonder afwijken van die van andere bodems. In deze benadering is uitgegaan van gemiddelde verdampingswaarden. Belangrijk is ook de spreiding te weten in de verdamping.

In figuur 6.1 is daarom per grondwaterstandsklasse de relatieve verdamping uitgezet tegen het percentage boorpunten van de onderscheiden klasse.



Figuur 6.1. Boorpunten met en zonder leem in de ondergrond in procenten per verdampingsklasse van gras op veldpodzolgronden voor a boorpunten met een grondwaterwaterstand tot 1,40 m onder het maaiveld, b 1,40 m tot 1,80 m en c dieper dan 1,80 m

Uit de grafieken in figuur 6.1 blijkt weer de invloed van de grondwaterstand.

In grafiek a heeft 62% van de onderzochte boorpunten zonder leem een relatieve gewasverdamping lager dan 65%. Naarmate de grondwaterstand dieper is, neemt de relatieve gewasverdamping nog verder af. Bij grondwaterstanden tussen 1,40 en 1,80 m onder het maaiveld heeft 65% van de onderzochte boringen een relatieve verdamping lager dan 65%. Bij grondwaterstanden dieper dan 1,80 m bedraagt dit percentage 90%.

Vergelijkt men bodemprofielen waarbij leem in de ondergrond is aangetroffen met profielen zonder leem, dan valt het volgende op: bij een gemiddelde grondwaterstand tot 1,80 m onder het maaiveld (grafiek a en b) heeft de leem een licht negatieve invloed op de vochtvoorziening van het gewas. Vooral is dit te zien in de zeer sterk verdrogende klasse (relatieve verdamping < 45%).

Is de grondwaterstand dieper dan 1,80 m onder het maaiveld, dan blijkt de leem een positieve invloed te hebben op de vochtvoorziening van het gewas. Bij aanwezigheid van leem verdroogt 35% van de onderzochte profielen zeer sterk (relatieve verdamping < 45%). Bij bodemprofielen zonder leem bedraagt het percentage sterk verdrogende profielen 66%.

Bij de interpretatie van figuur 6.1 dient er rekening mee te worden gehouden, dat het aantal profielen zonder leem in de ondergrond per verdampingsklasse gering is.

De positieve invloed van de leem bij diepe grondwaterstanden wordt daarom wellicht in hoge mate bepaald door het toeval.

Aan de andere kant sluit de conclusie goed aan bij de bodemkundige veldopname: in het voorjaar van 1983 werd op verschillende plaatsen een schijngrondwaterspiegel waargenomen, veelal bij diepe grondwaterstanden. De vochtlevering aan het gewas is dan groter dan bij afwezigheid van leem in de ondergrond.

Gezien het gemiddeld geringe en wellicht niet eenduidige effect van de leem, is in dit geval de lokatie van de leem niet vast te stellen aan de hand van remote sensing opnamen.

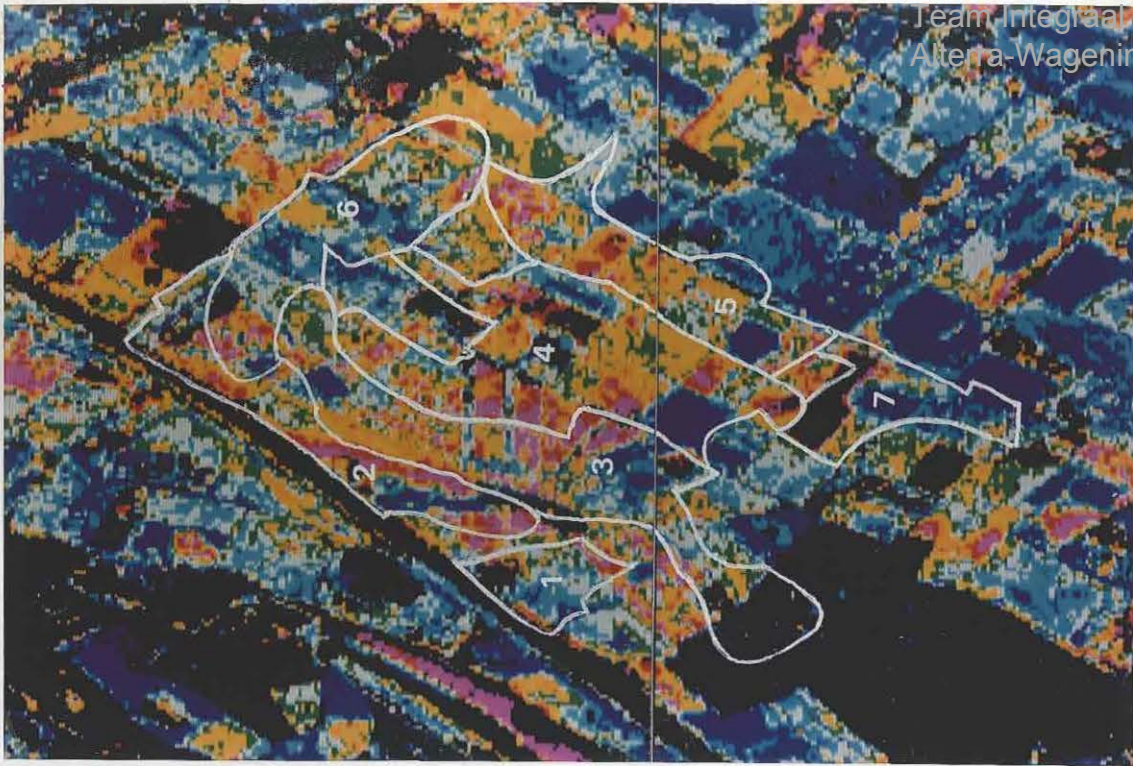
In één bijzonder geval leverde de verdampingskaart hierover wel informatie op. Tussen St. Willebrord en 'de Mastpolder' verdroogt het grasland en de mais over een groot oppervlak.

Noch de grondwaterstand en grondwatertrap, noch het bodemtype geeft hiervoor een verklaring. (Voor het verband tussen bodemtype, grondwaterstand, grondwatertrap en de relatieve verdamping wordt verwezen naar de paragrafen 6.2 en 6.3).

Het verdrogende gebied is onder te verdelen in een zevental kleinere gebieden, waarbij onderscheid wordt gemaakt in bodemtype en grondwaterstand. In tabel 6 is voor elk deelgebied de gemiddelde verdamping gegeven en de verdampingswaarde gemiddeld voor het hele onderzoeksgebied. Figuur 6.2 toont de verdampingskaart van het verdrogende gebied, waarin de onderscheiden deelgebieden met het bodemtype en de grondwatertrap zijn aangegeven.

Tabel 6. Verdamping van enkele deelgebieden in het onderzoeksgebied Rucphen, waarbij onderscheid is gemaakt in bodemtype en grondwatertrap.

Gebied nummer	Bodemtype	Grondwatertrap	Relatieve ver- damping deelgebieden	Relatieve ver- damping onderz.gebied
1	Hn32	VI	40	49
2	zWz	III	30/40	78
3	tZn32	V*	30/40	50
4	cHn32	VI	50/60	53
5	cZn32	V*	40/50	50
6	tZn52	V	50/60	60
7	cZn32	III	30/40	68



Figuur 6.2. Verdampingskaart voor 21 juli 1983 afgeleid uit de remote sensing opnamen, waarin aangegeven de onderscheiden deelgebieden.

Voor de beschrijving van de 7 deelgebieden zie tabel 6.

Een opvallend verschil in verdamping met de rest van het studiegebied doet zich voor bij grondwatertrap III. Een veldbezoek aan de hand van de verdampingskaart bracht ondiepe leemlagen aan het licht, die zeer zwaar en ondoorlatend zijn en behoren tot de II-0 leem. Waar zij dicht onder het maaiveld voorkomt, verdroogt het gewas in sterke mate.

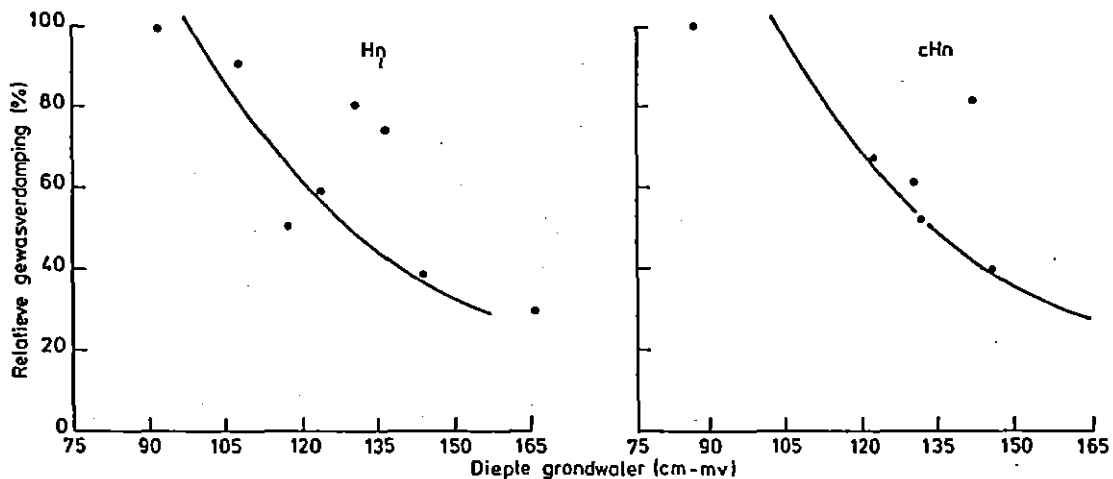
De samenvattende conclusie ten aanzien van de leemlagen is de volgende:

Het effect van de leem lijkt niet eenduidig, en is gemiddeld genomen gering. Het tweeledige karakter is wellicht te wijten aan de invloed van schijngrondwaterspiegels, die ontstaan in het voorjaar. De leemlagen zijn met behulp van de beschikbare remote sensing opnamen niet te lokaliseren. Uitzondering is één geval waar de leem afwijkende fysische eigenschappen bezit.

6.2. Invloed van de grondwaterstand op de relatieve gewasverdamming

Naarmate de grondwaterstand dieper is, neemt bij bodemprofielen zonder leem, de relatieve gewasverdamming af. Dit blijkt ook uit figuur 6.1. in paragraaf 6.1.

In figuur 6.3 is het effect van de grondwaterstand meer gedetailleerd weergegeven. Voor de bodemtypen Hn (bewortelbare bovenlaag tot 30 cm) en cHn (bewortelbare diepte 30-50 cm) is de relatieve gewasverdamming uitgezet tegen de grondwaterstand.



Figuur 6.3. Relatieve gewasverdamming als functie van de grondwaterstand voor gras op podzol met bewortelbare diepte tot 30 cm (Hn) en van 30-50 cm (cHn)

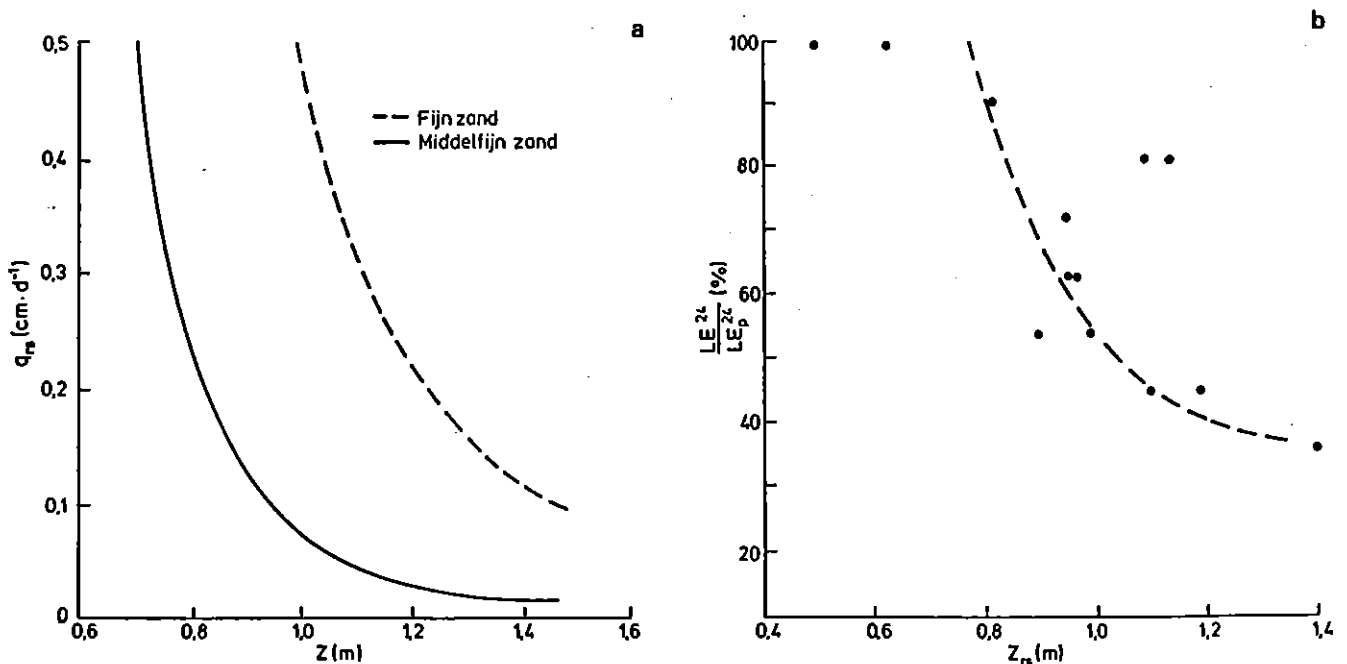
Uit de beide figuren blijkt een verband tussen de grondwaterstand en de gewasverdamming. Een uitzondering vormen de punten behorende bij de verdampingswaarden van 70 tot 80%. De afwijkende ligging wordt waarschijnlijk veroorzaakt door beregening. Indien de periode tussen de beregening en de luchtopname meerdere dagen bedraagt, zijn de betreffende percelen op false colour foto's moeilijk te herkennen. Bij de beregende percelen is de correlatie tussen grondwaterstand en gewasverdamming gering. Een grote standaardafwijking is daarom te verwachten van de gemiddelde grondwaterstand per verdampingswaarde, hetgeen ook blijkt uit bijlage 4.

In bijlage 4 is het aantal onderzochte punten per verdampingsklasse weergegeven, de gemiddelde grondwaterstand en de standaardafwijking daarvan.

Bij de Hn bodems neemt de verdamping sterk af vanaf een grondwaterstandsdiepte van 1,10 m onder het maaiveld. Bij een diepte van 1,70 m verdroogt het grasland maximaal. De cHn bodems verschillen hierin niet, ondanks een dikkere bewortelbare bovenlaag. De reden hiervoor kan zijn dat de invloed van de bewortelingsdikte beperkt is in vergelijking met het effect van de grondwaterstand.

De curve die het verband weergeeft tussen de relatieve gewasverdamping, afgeleid uit de remote sensing opnamen, en de grondwaterstand vertoont grote gelijkenis met figuur 6.4a.

Hierin is met behulp van de reeks standaardondergrond, ontleend aan RIJTEMA (1969), de relatie bepaald tussen de afstand tot het grondwater en de maximale flux die de wortelzone kan bereiken.



Figuur 6.4. De hoogte van capillaire opstijging (Z) bij pF4.2, uitgezet tegen de maximale flux (q_{rs}) voor middellijn en fijn zand (naar RIJTEMA, 1969) (a) en het verband tussen grondwaterstand Z_{rs} en de relatieve gewasverdamping LE^{24}/LE_p^{24} voor podzol met gras (b)

Omdat bij de standaardcurven wordt uitgegaan van een homogene profielopbouw, is het aangegeven verband gunstiger dan in de praktijk wordt gevonden.

Omgekeerd lijkt het met behulp van de verdampingskartering mogelijk te zijn voor homogene gebieden een schatting te maken van de capillaire eigenschappen van de bodem.

6.3. Invloed van de grondwatertrap op de relatieve gewasverdam- ping

De invloed van de voorjaarsgrondwaterstand en daarmee van het grondwaterstandsverloop gedurende het groeiseizoen op de gewasverdam-
ping op 21 juli 1983 is gegeven in tabel 7. Het verloop wordt geka-
rakteriseerd door een indeling in grondwatertrappen. Een overzicht
van de voorkomende grondwatertrappen en hun betekenis is opgenomen
in paragraaf 3.4.

In tabel 7 is het verband gegeven tussen bodemtype, grondwater-
trap en de relatieve gewasverdam-
ping, afgeleid uit de remote sensing
opnamen.

Tabel 7. Gemiddelde gewasverdam-
ping van gras voor een aantal in het
onderzoeksgebied Rucphen voorkomende bodemtypen en grondwa-
tertrappen

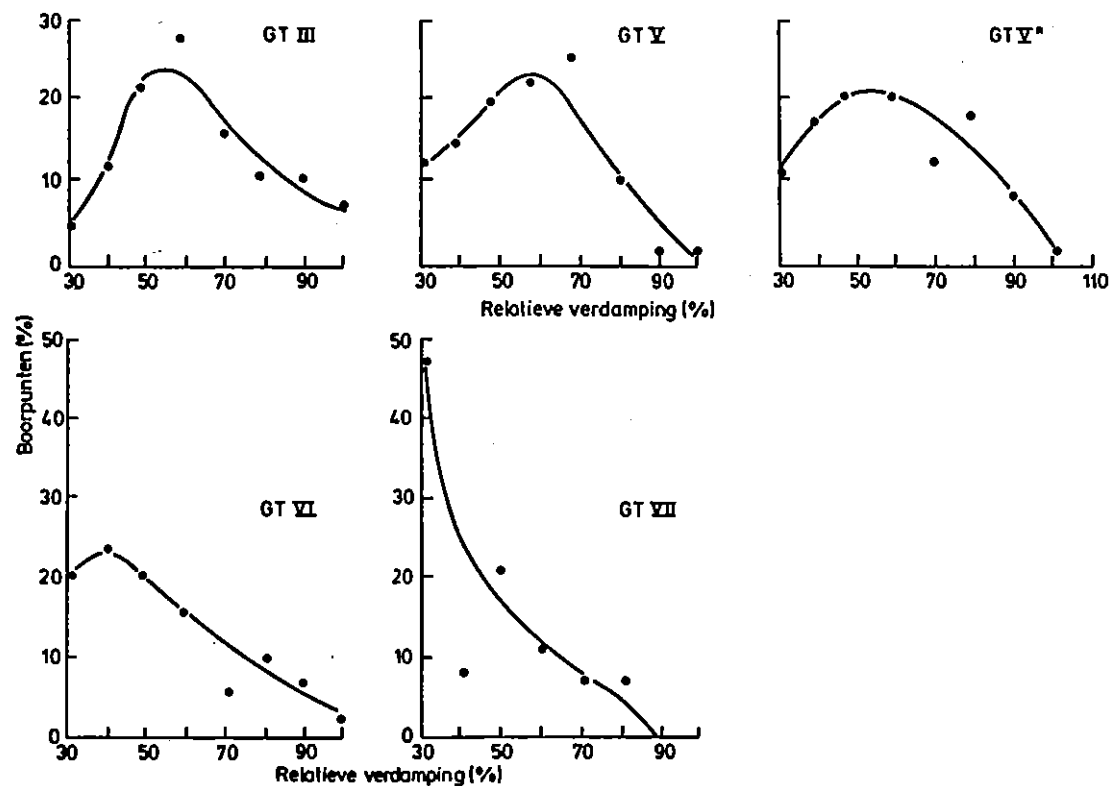
Bodemtype	Grondwatertrap	Relatieve gewasverdam- ping
W	III	78
Ez (enkeerd)	VII	76
Hn/cHn (podzolen)	III	61/65
	V	57/60
	V*	57/63
	VI	53/52
	VII	44/45
Zn (zand)	III	68
	V	60
	V*	50
	VI	50

In bijlage 5a is hiervan per bodemtype het aantal onderzochte boorpunten gegeven, de gemiddelde relatieve verdamping en de standaardafwijking daarvan.

De gemiddelde relatieve gewasverdamping van gras bij grondwatertrap III is voor de moerige gronden (w) duidelijk hoger dan voor de podzolen (Hn/cHn) en de zandgronden (Zn), het gevolg van een groter vochtleverend vermogen. Ook het goede vochtleverend vermogen van enkeleerdgronden blijkt uit de remote sensing beelden.

De gewasverdamping van grasland blijkt voor zandgronden en podzolen met elkaar overeen te komen.

Voor de podzolgronden is een verdere uitsplitsing gemaakt. In figuur 6.5 is voor een vijftal grondwatertrappen de relatieve gewasverdamping uitgezet tegen het aantal boorpunten, uitgedrukt in percentage van het totaal aantal boorpunten per onderscheiden grondwatertrap.



Figuur 6.5. Aantal boorpunten in percentage uitgezet tegen de verdampingswaarde voor gras op podzol bij 5 verschillende grondwatertrappen

Uit figuur 6.5 blijkt dat de gewasverdamping afneemt van grondwatertrap III naar VII. Een grote rol speelt hierbij het in paragraaf 6.2 gevonden verband tussen de zomergrondwaterstand en de verdamping. De invloed van de voorjaarsgrondwaterstand blijkt uit de figuren van de grondwatertrappen V en VI. De zomergrondwaterstand verschilt niet veel, respektievelijk 1,60 en 1,70 m onder het maaiveld. De grondwaterspiegel in het voorjaar 0,53 tegenover 0,88 m en dus is het grondwaterstandsverloop voornamelijk de reden van het verschil in verdamping. Met deze resultaten lijkt het belang van de voorjaarsgrondwaterstand en het grondwaterstandsverloop voor de zomergewasverdamping met behulp van de remote sensing benadering aangetoond.

6.4. Invloed van leemgehalte en textuur op de relatieve gewasverdamping

Het leemgehalte en de textuur worden bij de bodemklassificatie weergegeven door middel van een cijfercode. Het eerste cijfer is een aanduiding voor de textuur: matig grof zand wordt het cijfer 3 toegekend, fijn zand het cijfer 5.

Het tweede getal is een maat voor het leemgehalte, in oplopende leemsterkte weergegeven met de cijfers 1 (leemarm) tot 7 (sterk lemig).

Het verband tussen gewasverdamping en leemgehalte en textuur is voor podzolgrond gegeven in tabel 8. Hierbij is tevens de gemiddelde grondwaterstand en het aantal onderzochte boringen vermeld.

De invloed van het leemgehalte en de textuur wordt in sterke mate overheerst door het effect van de grondwaterstand. In de gevallen met vergelijkbare grondwaterstanden is de invloed niet duidelijk. Het verschil in dikte van de bewortelbare bovenlaag tussen de Hn en cHn gronden heeft geen gevolgen voor de verdampingswaarden. Dit werd ook in paragraaf 6.2 gevonden.

Het hogere leemgehalte van de bodem Hn37 ten opzichte van Hn35 uit zich niet in de verdamping. Ook bij de bodems cHn52 en cHn53 is dit niet het geval. Alleen het verschil in verdamping van cHn33 en cHn35 is wellicht het gevolg van het leemgehalte.

De relatieve verdamping van cHn32 is bijzonder hoog. Dit wordt vermoedelijk veroorzaakt door het geringe aantal boorpunten, waardoor het toeval een rol is gaan spelen.

Tabel 8. Invloed van het leemgehalte en de textuur op de relatieve gewasverdamping van grasland op podzolbodem.

Tevens is vermeld het aantal onderzochte boorpunten, de standaardafwijking van de gemiddelde verdamping en de gemiddelde grondwaterstand (voor de codering zie tekst).

Bodem	Relatieve verdamping	Grondwaterstand	Aantal boorpunten	Standaardafwijking
Hn32	54	217	9	24
Hn35	67	185	10	14
Hn37	67	188	5	21
Hn51	46	194	29	14
Hn52	61	184	16	19
Hn53	60	181	49	19
cHn32	69	186	7	24
cHn33	55	170	15	19
cHn35	73	166	16	20
cHn51	46	218	9	9
cHn52	46	194	16	19
cHn53	65	164	23	15

De conclusie is, dat voorzover de grondwaterstandsdiepte de waarneming niet beïnvloedt, in dit geval het leemgehalte en de textuur zich niet weerspiegelen in de relatieve gewasverdamping, die is afgeleid uit de remote sensing opnamen van 21 juli 1983.

6.5 Berekeningen met het LAMOS-model

In tabel 9 is de relatieve gewasverdamping gegevens, die is berekend met het model LAMOS voor de opnamedag 21 juli 1983. Het onderzochte bodemprofiel is een zogenaamde R3 standaardgrond met R6 tussenlaag en een wortelzone die bestaat uit leemarme, humusarme zandgrond. Meer gegevens omtrent aard en eigenschappen van de onderscheiden lagen zijn vermeld in paragraaf 5.2.

Met het LAMOS-model is voor elk van de bodemprofielen het verloop van de gewasverdamping bepaald in het groeiseizoen van 1983.

De berekeningen zijn uitgevoerd voor gras op een R3-standaardondergrond en R6- tussenlaag met verschillende begindiepten en laagdikten. Ingevoerd zijn een zevental trajekten waartussen de grondwaterstand varieert. Aangegeven zijn de voorjaarsgrondwaterstand en de GLG. Als referentie is het bodemprofiel zonder leem doorgerekend.

Tabel 9. Met het LAMOS-model berekende relatieve gewasverdamping in procenten voor de opnamedag 21 juli 1983.

Grond- water- stands- verloop	Geen leem	Begindiepte van de leem											
		50 cm			100 cm			150 cm			200 cm		
		Dikte			Dikte			Dikte			Dikte		
		25	50	100	25	50	100	25	50	100	25	50	100
80-160	99	97	97	97	99	99	99	99	99	99	99	99	99
110-160	51	51	52	53	53	53	53	51	52	52	51	52	52
80-200	77	72	72	76	80	80	80	78	79	79	78	79	79
110-200	46	45	46	50	50	50	50	47	48	49	47	47	47
140-200	40	39	39	41	41	41	41	40	41	41	40	40	40
110-120	43	42	43	48	48	48	48	44	45	47	42	45	45
140-240	38	37	37	40	40	40	40	38	39	39	38	38	39

De voor de vluchtdag berekende grondwaterstand bedraagt voor de zeven grondwaterstandsverlopen respektievelijk: 111, 130, 130, 148, 165, 163 en 184 cm minus maaiveld.

Uit de berekeningen met het LAMOS-model blijkt dat leemlagen met de in paragraaf (5.2) beschreven eigenschappen geen invloed hebben op de relatieve gewasverdamping op 21 juli 1983.

Opvallend is de invloed van de voorjaarsgrondwaterstand op de uiteindelijke gewasverdamping. Volgens het LAMOS-model zou een verschil in voorjaarsgrondwaterstand van 30 cm in de zomer een verschil in ver-

damping kunnen betekenen van maar liefst 48%

RIJTEMA (1969) vindt voor het standaardprofiel met een overeenkomstige vocht karakteristiek als voor de met het LAMOS-model doorgerekende bodemtype na uitdroging van de wortelzone bij een flux van 2 mm per etmaal een capillaire nalevering over een hoge van 81 cm. Indien het water over een hoogte van 111 cm (grondwaterstandsverloop b) moet worden nageleverd, verminderd de flux tot $0,06 \text{ à } 0,1 \text{ cm.d}^{-1}$. Deze hoeveelheid is onvoldoende om aan de verdampingsvraag in de zomer te voldoen, hetgeen de plotselinge verdroging verklaart. Bij een gelijke zomergrondwaterstand kan de verdamping tot 20% verschillen als gevolg van een verschil in voorjaarsgrondwaterstand.

In paragraaf 6.1 werd uit de analyse van de remote sensingbeelden geconcludeerd, dat ondiep gelegen leemlagen in geringe mate een belemmering kunnen vormen voor het vochttransport naar het gewas. Bij zeer diepe grondwaterstanden (dieper dan 1,80 m) zou de leem mogelijk enige positieve invloed op de vochtvoorziening kunnen hebben. De berekeningen met het LAMOS-model bevestigen deze conclusies echter niet.

De invloed van het grondwaterstandsverloop op de zomergewasverdamping, zoals berekend met het LAMOS-model, bevestigt de resultaten van de remote sensing benadering, die zijn gepresenteerd in paragraaf 6.3. Bij een gelijke grondwaterstand kan de verdamping sterk verschillen.

6.6. Vergelijking van de berekeningen met het LAMOS-model met de verdampingskaart, afgeleid uit de remote sensing opnamen

De verdampingswaarden hebben betrekking op 21 juli 1983. Uit het aanbod van boorpuntgegevens zijn die boringen gekozen waarvan de voorjaars- en zomergrondwaterstand met het LAMOS-model zijn doorgerekend.

Naast de berekende verdamping zijn de met het LAMOS-model voor de opname berekende grondwaterstanden en de uit de metingen van 1982 geschatte grondwaterstanden gegeven.

Tabel 10. Vergelijking van de relatieve gewasverdamping berekend met het LAMOS-model en de relatieve verdamping afgeleid uit de remote sensing opnamen

Grondwater- standsverloop	Grondwaterstand		Verdamping	
	LAMOS	geschat	LAMOS	Remote sensing
80-160	110	115	100	60
		125		50
		120		60
		130		60
110-160	130	142	50	30
		160		60
		160		60
		165		30
		155		50
		140		80
80-200	130	125	80	70
		155		70
100-200	150	170	50	60
		153		40
140-200	165	190	40	60
		200		40
		196		40
110-240	165	165	45	30
140-240	185	200	40	30

De overeenkomst in gewasverdamping met beide benaderingen duidt erop dat de bodemfysische en hydrologische eigenschappen van de onderzochte bodems voor de berekeningen goed zijn gekozen.

Het verschil in grondwaterstand heeft voor diepere grondwaterstanden geen invloed op de bepaalde verdamping. Bij de ondiepere grondwaterstanden heeft het echter wel gevolgen. Figuur 6.4 toont dat vooral de grondwaterstand tussen 1,10 en 1,30 meter minus het maaiveld kritisch is: de verdamping neemt dan af van 100 tot 60%.

De grondwaterstand hangt samen met het vochtgehalte. Ook door THUNNISSEN (1984a) werd gevonden dat een geringe verandering in vochtgehalte een grote daling van de verdamping kan veroorzaken.

Veel vergelijkingen worden in dit onderzoek gemaakt aan de hand van gemiddelden. Zowel de verdampingscijfers als de grondwaterstanden vertonen echter een grote variatie binnen elke in beschouwing genomen categorie. De standaardafwijking is dan groot. De verdampingskartering met remote sensing lijkt niettemin, gezien de resultaten in paragraaf 6.4, een goed middel op als toetsing te dienen voor hydrologische modelberekeningen.

7. SAMENVATTING EN CONCLUSIES

Dit verslag heeft betrekking op een onderzoek naar de invloed van leemlagen in de ondergrond en van enkele bodemkundige en hydrologische factoren op de vochtvoorziening van grasland en mais. Hierbij is gebruik gemaakt van remote sensing opnamen en hydrologische modelberekeningen.

Het studiegebied is een 6700 hectare groot dekzandgebied, gelegen tussen Roosendaal en Breda.

De remote sensing opnamen zijn gemaakt op 21 juli 1983 en bestaan uit false colour foto's en scanneropnamen in het groene, het rode, het nabij infrarode en het thermisch infrarode deel van het elektromagnetisch spectrum.

Door middel van computerbewerking van de beschikbare scanneropnamen is een relatieve verdampingskaart samengesteld. Deze geeft de dagverdamping van het gewas weer als percentage van de potentiële dagverdamping.

De hydrologische modelberekeningen zijn uitgevoerd met behulp van het computermodel LAMOS (Landinrichtingsdienst Model voor Onverzadigde Strooming). Dit is een eendimensionaal model, dat de grondwaterstroming beschrijft in het onverzadigde deel van de bodem.

In tijdstappen van tien dagen worden onder andere berekend de grondwaterstand, de aktuele en de potentiële verdamping.

Met het LAMOS-model is voor een bodemtype het effect van leemlagen met diverse laagdikten en begindiepten bij verschillende grondwaterstanden bepaald.

Het effect van leemlagen in de ondergrond op de gewasverdamping bleek volgens de remote sensing benadering gering. De berekeningen met het LAMOS-model stemmen hiermee overeen.

Geconcludeerd moet worden dat de fysische en hydrologische eigenschappen van de leem niet dusdanig zijn, dat de verticale grondwaterbeweging wordt belemmerd. In het geval dat geen veldgegevens voor handen zijn, zijn de leemlagen met behulp van remote sensing niet te lokaliseren. Uitzondering vormde een deel van het onderzoeksgebied, waar grasland en mais sterk verdrogen als gevolg van II-0 leem, die dicht onder het maaiveld voorkomt. Dit type leem wijkt sterk af van op andere plaatsen in het onderzoeksgebied voorkomende leem.

Zowel uit de remote sensing benadering als de berekeningen met het LAMOS-model blijkt een duidelijk verband tussen de zomergrondwaterstand en de relatieve gewasverdamping. Bij podzolgronden is de verdamping van grasland optimaal tot een grondwaterstand van 1,10 meter minus maaiveld. Daarna neemt zij sterk af. Deze resultaten komen goed overeen met THUNNISSEN (1984a), die vond dat een geringe verandering in vochtgehalte een sterk dalende verdamping tot gevolg kan hebben.

Uit de modelberekening en de remote sensing benadering blijkt ook de invloed van de voorjaarsgrondwaterstand en daarmee het grondwaterstandsverloop op de relatieve verdamping in de zomer. Een verschil in voorjaarsgrondwaterstand van 30 cm kan maximaal 58% schelen in de verdamping van grasland op podzolgrond.

Het onderzoek naar de invloed van textuur en leemgehalte op de relatieve gewasverdamping, bepaald met de remote sensing benadering, wijst uit dat de invloed van de grondwaterstand overheerst. De verwachting dat gronden met een hoger leemgehalte en een fijnere textuur en daardoor een groter vochthoudend vermogen, betere capillaire eigenschappen en een hogere verdamping hebben, kan niet worden aangetoond. Ook blijkt dat in dit geval de bewortelingsdiepte nauwelijks invloed heeft.

Gezien de resultaten kan men zich afvragen of de bodemkundige informatie voor de gebruikte toepassing geschikt is. Een bodembeschrijving aan de hand van hydrologische eigenschappen van de diverse lagen en de invloed van de bodemgeometrie op de vochtvoorziening voldoet wellicht beter.

Bij alle onderzochte relaties valt een grote spreiding in verdampingswaarden op per onderscheiden klasse. Deze spreiding is voor een deel een weergave van de natuurlijke situatie, Voor een deel is zij ook terug te voeren op de gebruikte informatie. Bodemkundige vlakinformatie is gekoppeld aan de informatie van de remote sensing opnamen.

Door deze methode wordt een deel van de kaartonzuiverheid overgenomen en komen andere verdampingswaarden voor, dan op grond van bodemtype en dergelijke verwacht zou worden.

LITERATUUR

- BLES, B.J., 1978. De bodemgesteldheid van de ruilverkaveling Etten-Leur
Rapport nr. 1272. Stichting voor Bodemkartering, Wageningen.
- BUNNIK, N.J.J., 1978. The multispectral reflectance of shortwave radiation by agricultural crops in relation with their morphological and optical properties. Mededelingen Landbouwhogeschool Wageningen, 78-1. Veenman & Zonen, Wageningen.
- JACKSON, R.D., J.L. HATFIELD, R.J. REGINATO, S.B. IDSO and P.J. PINTER, 1983. Estimation of daily evapotranspiration from one time-of-day measurements. Agric. Water Managem. 7: 351-362.
- JACKSON, R.D., R.J. REGINATO and S.B. IDSO, 1977. Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. Water Resour. Res. 13: 651-656.
- KLAASSEN, W. and G.J.A. NIEUWENHUIS, 1978. Estimation of the regional evapotranspiration from remotely sensed crop surface temperature. Part II: arable land. Nota ICW 1057, Wageningen.
- LAAT, P.J.M. DE en R.H.C.M. AWATER, 1978. Groundwater flow and evapotranspiration. A simulation model. Part: Theory. Basisrapport ten behoeve van de Commissie Bestudering Waterhuishouding Gelderland. Provinciale Waterstaat van Gelderland, Arnhem.
- LAAT, P.J.M., DE, 1985. Must - a simulation model for unsaturated flow. Reportseries no. 16. International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering, Delft.
- LEBOUILLE, M.F.M. en N. DE NIES, 1984. Vegetatiekundig onderzoek in Oost-Gelderland: klassificatie van biomassa en vegetatie. Deelrapport 5, Remote Sensing Studieproject Oost-Gelderland. ICW, Wageningen.
- LEENDERS, W.H. en J.R. MULDER, 1976. De bodemgesteldheid in de ruilverkaveling Nispen-Schijf. Rapport nr. 1209. Stichting voor Bodemkartering, Wageningen.
- LILLESAND, T.M. and R.W. KIEFFER, 1979. Remote sensing and image interpretation, John Wiley & Sons, New York.
- NIES, N. DE en M. LEBOUILLE. Vegetatiekundig onderzoek in Oost-Gelderland; resultaten en conclusies. Deelrapport Remote Sensing Studieproject Oost-Gelderland (in voorbereiding).

- NIEUWENHUIS, G.J.A. and W. KLAASSEN, 1978. Estimation of the regional evapotranspiration from remotely sensed crop surface temperatures. Part I: grassland. Nota ICW 1055, Wageningen.
- NIEUWENHUIS, G.J.A. and C.L. PALLAND, 1982. Verdamping van een aardappelgewas en de meting daarvan via remote sensing. Rapport ICW 2, Wageningen.
- NIEUWENHUIS, G.J.A., E.H. SMIDT and H.A.M. THUNNISSEN, 1985. Estimation of regional evapotranspiration of arable crops from thermal infrared images. Int. J. Remote Sensing (accepted).
- NIWARS, 1977. Onderzoek naar de toepassingsmogelijkheden van multispectrale scanning. Niwars publ. no. 44, Delft.
- REULING, T.H.M., 1983. Gebruikershandleiding voor het model LAMOS. Landinrichtingsdienst, Utrecht.
- RIELE, W.J.M. te, 1981. Waterwinning Rucphen. Rapport nr. 1561. Stichting voor Bodemkartering, Wageningen.
- RIELE, W.J.M. te, 1982. Waterwinning Rucphen II. Profielstudie en grondwaterstandswaarnemingen bij boorpunten. Stichting voor Bodemkartering, Wageningen.
- RIJTEMA, P.E., 1969. Soil moisture forecasting. ICW nota 513, Wageningen.
- RIJTEMA, P.E., 1971. Een berekeningsmethode voor de benadering van landbouwschade ten gevolge van grondwateronttrekking. Nota ICW 586, Wageningen.
- SLATER, P.N., 1980. Remote sensing. Optics and optical systems. Addison Wesley Publishing Company. Massachusetts.
- SOER, G.J.R., 1977. The TERGRA-model - a mathematical model for the simulation of the daily behaviour of crop surface temperature and actual evapotranspiration. Nota ICW 1014, Wageningen.
- SOER, G.J.R., 1980 Estimation of regional evapotranspiration and soil moisture conditions using remotely sensed crop surface temperatures. Remote Sensing of Environment 9: 27-45.
- THUNNISSEN, H.A.M., 1981. Vochtleverend vermogen van enkele bodems in Oost-Gelderland met en zonder grondwateronttrekking. Nota ICW 1348, Wageningen.
- THUNNISSEN, H.A.M., 1984a. Hydrologische beschrijving van een studiegebied rond het pompstation 't Klooster: toepassing van hydrologische modellen en remote sensing. Nota ICW 1542, Wageningen.

- THUNNISSEN, H.A.M., 1984b, Eenvoudige methode voor de bepaling van de regionale verdamping van een gewas met remote sensing. Nota ICW 1580, Wageningen.
- THUNNISSEN, H.A.M., H.W.M. HESEN en H.A.C. VAN POELJE, 1985. Interpretatie van uit remote sensing opnamen afgeleide verdampingskaarten. Deelrapport, Remote Sensing Studieproject Oost-Gelderland. ICW, Wageningen (in voorbereiding).
- THUNNISSEN, H.A.M. en H.A.C. VAN POELJE, 1984. Bepaling van de regionale gewasverdamping met behulp van remote sensing in een studiegebied ten oosten van Hengelo (Gld.). Nota ICW 1525, Wageningen.
- TUCKER, C.J., 1977. Use of near infrared/red radiance ratios for estimating vegetation biomass and physiological status. Proc. 11th Int. Symp. of Remote Sensing of Environ., vol I, 493-494.
- WERKGROEP LANDBOUWKUNDIGE ASPECTEN, 1984. Landbouwkundige aspecten van grondwateronttrekkingen. Commissie Grondwaterwet Waterleidingbedrijven.

Overzicht van de belangrijkste in- en uitvoergegevens van het model
LAMOS (WERKGROEP LANDBOUWKUNDIGE ASPECTEN, 1984)

<u>INVOER</u>	
- Weersgegevens (invoer per tijdstap)	: Verdampingsoverschot of open water verdamping, neerslag en gewasfactor (f) of luchttemperatuur, rel. luchtvochtigheid, netto straling en neerslag
- Randvoorwaarde onderzijde systeem	: Basisafvoer (varierend per tijdstap dan wel constant) of grondwaterstand (variabel dan wel een benaderend verloop op basis van opgegeven waarden voor de GHG en GLG) of grondwaterstand-afvoer relatie (lineair dan wel exponentieel)
- Bodemfysische gegevens	: Vochtkarakteristiek van de effectieve wortelzone (max. 10 verschillende bodemlagen) Vochtkarakteristiek en capillair geleidingsvermogen van de ondergrond per onderscheiden bodemlaag Hysterisfactor
- Geometrie bodemsysteem	: Diepte van de onderscheiden bodemlagen in de eff. wortelzone en de ondergrond Aanduiding slecht-doorlatende laag (facultatief)
- Beginvoorwaarde	: Begin-grondwaterstand en initiële basisafvoer
- Gewasgegevens	: Bodemgebruik (maximaal 8 onderscheidingen) Opneembaarheid bodemvocht (volledig gemakkelijk opneembaar dan wel lineair afnemend met de pF-waarde of de drukhoogte) Gemiddelde bruto potentiële opbrengst per periode (gras)
- Berekening (facultatief)	: pF-waarde waarboven berekend wordt en grootte van de toe te dienen berekeningsgift
- Karakterisering van het grondwaterstands- verloop	: GHG, GVG en GLG in de uitgangssituatie(s) en in de verlaagde of verhoogde situatie(s)
- Wateroverlast	: Opbrengstdepressie door wateroverlast per jaar in de uitgangssituatie(s) en in de verlaagde of verhoogde situatie(s) in % van de potentiële opbrengst
<u>UITVOER</u>	
- Bij de vochttekort- berekening worden nevenstaande gegevens zowel per tijdstap als cumulatief per jaar uitgevoerd	: . potentieel en actueel verdampingsoverschot . verzadigingstekort in de eff. wortelzone en in de gehele onverzadigde zone . grondwaterstand . flux door de onderkant v.d. wortelzone en door de grondwaterspiegel . pF-waarde aan de onderkant v.d. eff. wortelzone . vochttekort . berekeningsgift
- Bij de berekening van de opbrengstverandering worden nevenstaande gegevens per jaaren als gemiddelde over de gehele rekenperiode (meestal 30 jaar) uitgevoerd.	: . potentiële verdamping en neerslag over de rekenperiode . vochttekort in de uitgangssituatie(s) en de verlaagde of verhoogde situatie(s) in mm en in % van de potentiële verdamping. . gemiddelde bruto potentiële opbrengst (gras) . actuele bruto en netto potentiële opbrengst (gras) . opbrengstderving per mm vochttekort (gras) . opbrengstdepressie door vochttekort en door wateroverlast in de uitgangs- situatie(s) en in de verlaagde of verhoogde situatie(s) in % v.d. potentiële opbr. . verschil in opbrengstdepr. door vochttekort en door wateroverlast in de uitgangs- situatie(s) en de verlaagde of verhoogde situatie(s) in % v.d. potentiële opbr. . totaal netto opbrengst verandering in % van de potentiële opbrengst

RIJLAGE 2

Specificaties Daedalus 1240/1260 scanner

Positie spectrale banden en radiome- trisch scheidend vermogen	Nr.	Banden nm	NE $\Delta\rho$ NE ΔT %
	1	380-420	3.00
	2	420-450	1.20
	3	450-500	0.40
	4	500-550	0.30
	5	550-600	0.20
	6	600-650	0.20
	7	650-690	0.20
	8	700-790	0.20
	9	800-890	0.20
	10	920-1100	0.35
	11	3.0- 5.5 m	0.2 K
	12	8.0-14.0	0.2
	FOV	77.2%	
	IFOV	2.5 mrad	
Vlieghoogte 21/7/83		3000 m	
Strookbreedte		5700 m	
Ruimtelijke resolutie		8 x 8 m	

Hierbij zijn NE $\Delta\rho$, NE ΔT de reflectie c.q. stralingstemperatuurverschillen welke equivalent zijn aan het gemiddelde ruisniveau. FOV is Field Of View (graden).

2. Inventarisatie van boorpunten waarbij leem in de ondergrond is aangetroffen.

Naast de begindiepte is aangegeven de grondwaterstand.

a: Grondwaterstanden tot 1,40 meter.

Begindiepte	Aantal boorpunten	Bijbehorende grondwaterstanden		
30	3	55	82	125
50	2	50	85	
60	2	87	100	
80	3	95	100	115
90	1	105		
100	1	130		
110	2	110	137	
120	1	107		

b: Grondwaterstanden van 1,40 tot 1,80 meter.

50	1	150
80	1	150
100	1	143
110	1	170
120	1	170
130	1	152
150	1	155
160	1	160

c: Grondwaterstanden dieper dan 1,80 meter.

60	2	200	>275
100	1	235	
110	1	>210	
120	1	>200	
150	2	195	210
160	1	>230	
180	1	>210	
190	2	>200	>220
200	1	>210	

Verband tussen grondwaterstand en relatieve gewasverdamping voor veldpodzolen met bodembedekking grasland. Tevens is aangegeven het aantal onderzochte boorpunten en de standaardafwijking van de grondwaterstanden. Hn zijn bodems met een bewortelbare diepte van maximaal 30 cm, cHn van 30 tot 50 cm.

Bodemtype Hn:

Relatieve gewasverdamping	Aantal boorpunten	Grondwaterstand	Standaardafwijking
30	20	169	42
40	18	143	43
50	14	118	32
60	24	125	37
70	12	138	34
80	12	132	46
90	3	111	17
100	6	92	18

Bodemtype cHn:

30	9	161	37
40	9	148	38
50	16	128	30
60	15	125	42
70	9	124	41
80	8	143	33
90	0	—	—
100	7	78	18

Gemiddelde graslandverdamping op 21 juli 1983 volgens de remote sensing benadering voor een aantal bodemtypen en grondwatertrappen, het aantal onderzochte boringen, de gemiddelde grondwaterstand en de standaardafwijking van de verdampingscijfers.

Bodem- type	Grondwa- tertrap	Aantal boorpunten	Gemiddelde verdamping	Standaard afwijking
W	III	18	78	17
Ez	VII	7	76	29
Hn/cHn	III	22/11	61/65	18/19
	V	37/10	57/60	16/19
	V*	31/24	57/63	19/18
	VI	23/28	53/52	21/18
	VII	14/14	44/45	15/18
Zn	III	19	68	23
	V	7	60	20
	V*	10	50	12
	VI	7	50	13

BIJLAGE 5b

Relatie tussen gewasverdamping op 21 juli 1983 volgens de remote sensing benadering en grondwatertrap voor grasland op podzolgronden. Gegeven is de verdeling van de boorpunten over de verdampingsklassen, uitgedrukt in percentage van de boorpunten per grondwatertrap.

Grondwatertrap	V e r d a m p i n g							
	30	40	50	60	70	80	90	100
III	3	12	21	27	13	9	9	6
V	11	13	19	21	23	9	2	2
V*	9	17	19	19	11	17	6	2
VI	20	23	20	15	4	10	6	2
VII	46	8	21	11	7	7	-	-