

REMOTE SENSING STUDIEPROJECT OOST GELDERLAND

DEELRAPPORT 7

INTERPRETATIE VAN UIT REMOTE SENSING OPNAMEN AFGELEIDE VERDAMPINGSKAARTEN

H.A.M. Thunnissen
H.W.M. Hesen
H.A.C. van Poelje

Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding
Wageningen

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

REMOTE SENSING STUDIEPROJECT

OOST-GELDERLAND

Interpretatie van uit remote sensing opnamen
afgeleide verdampingskaarten van enkele gebieden in Oost-Gelderland

ir. H.A.M. Thunnissen, H.W.M. Heslen en ing. H.A.C. van Poelje

Rapporten in deze serie zijn tot stand gekomen in het kader van het Remote Sensing Studieproject in Oost-Gelderland en zijn in principe bedoeld als interne communicatiemiddelen, dus geen officiële publikaties.

Dit rapport wordt verspreid door het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Postbus 35, Wageningen

In het kader van het Remote Sensing Studieproject Oost-Gelderland zijn reeds verschenen:

Titel	Auteur	Datum
1. Beschrijving van het onderzoek	Projectteam Remote Sensing Studieproject	sept. 1981
2. Remote Sensing vluchten in 1982 en 1983: organisatorische aspecten	G.J.A. Nieuwenhuis	juni 1983
3. Bepaling van de regionale gewasverdamping met behulp van remote sensing in een studiegebied ten oosten van Hengelo (Gld.)	H.A.M. Thunnissen en H.A.C. van Poelje	jan. 1984
4. Hydrologische beschrijving van een studiegebied rond het pompstation 't Klooster; toepassing van hydrologische modellen en remote sensing	H.A.M. Thunnissen	juni 1984
5. Vegetatiekundig onderzoek in Oost-Gelderland; classificatie van biomassa en vegetatie	M.F.M. Lebouille en N. de Nies	1984
6. Eenvoudige methode voor de bepaling van de regionale dagverdamping van een gewas met remote sensing	H.A.M. Thunnissen	okt. 1984
7. Interpretatie van uit remote sensing opnamen afgeleide verdampingskaarten van enkele gebieden in Oost-Gelderland	H.A.M. Thunnissen, H.W.M. Hes en H.A.C. van Poelje	juli 1985

Deze rapporten kunnen worden aangevraagd bij ir. G.J.A. Nieuwenhuis, Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Postbus 35, Wageningen. Tel. 08370-19100

I N H O U D

	blz.
1. INLEIDING	1
2. REMOTE SENSING OPNAMEN EN GEBIEDSBESCHRIJVING	1
2.1. Remote sensing opnamen en opnameomstandigheden	1
2.2. Beschrijving studiegebied	3
3. METHODIEK VAN AUTOMATISCHE VERDAMPINGSKARTERING	4
3.1. Standaardrelatie tussen gewastemperatuur en dag- verdamping	4
3.2. Automatische verdampingskartering	6
4. INTERPRETATIE VERDAMPINGSKAARTEN	8
4.1. Vergelijking tussen automatisch en met de hand vervaardigde verdampingskaart	10
4.2. Betekenis van uit remote sensing opnamen afge- leide verdampingskaarten voor het agrohydrologisch onderzoek	12
4.2.1. Meteorologische voorgeschiedenis en gewas- soort	12
4.2.2. Berekening	13
4.2.3. Invloed van grondwateronttrekking, bodem- fysische eigenschappen en grondwaterstands- verloop op de gewasverdamping	14
4.2.4. Bepaling droogteschade met remote sensing en agrohydrologische simulatiemodellen	16
5. VERDAMPINGSKAARTEN AFGELEID UIT REMOTE SENSING OPNAMEN EN DROOGTEGEVOELIGHEIDSKAARTEN	18
5.1. Samenstelling van droogtegevoeligheidskaarten	18

	blz.
5.2. Vergelijking van de droogtegevoeligheidskaarten met de uit remote sensing opnamen afgeleide verdampingskaarten	20
5.3. Oorzaken van de spreiding in de relatieve dagverdampingswaarden binnen de droogtegevoeligheidsklassen	23
5.3.1. Onnauwkeurigheid verdampingskaarten	23
5.3.2. Kaartonzuiverheden	24
5.3.3. Variatie in bodemfysische eigenschappen en grondwaterstanden	24
5.3.4. Invloed van de grondwateronttrekking	25
6. ONDERLINGE VERGELIJKING VAN DE DEELGEBIEDEN	25
7. SAMENVATTING EN CONCLUSIES	26

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

1. INLEIDING

Op 30 juli 1982 en 17 juli 1983 zijn vanaf respectievelijk 3 en 5 km hoogte remote sensing opnamen gemaakt van het studiegebied in Oost-Gelderland (PROJECTTEAM REMOTE SENSING STUDIEPROJECT, 1981). Aan de hand van de beschikbare reflectiebeelden is een automatische gewasklassifikatie uitgevoerd (DE NIES en LEBOUILLE, 1985). Voor de gewasklassen hoog en middelhoog gras en mais zijn de temperaturen, afgeleid uit het warmtebeeld, omgezet in verdampingswaarden (THUNNISSEN, 1984b). Zo werden door digitale verwerking van scanneropnamen op het RESEDA-systeem van het Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium (NLR) van enkele delen van het studiegebied verdampingskaarten verkregen. In dit rapport worden die verdampingskaarten besproken.

Er wordt ingegaan op de voordelen van de automatische verdampingskartering ten opzichte van de kartering met de hand. Tevens komt de betekenis van verdampingskaarten in het agrohydrologisch onderzoek aan de orde.

Tenslotte wordt de verdampingskaart van het studiegebied vergeleken met een droogtegevoeligheidskaart, die is afgeleid uit de bodem- en grondwatertrappenkaart in combinatie met hydrologische modelberekeningen (THUNNISSEN, 1981).

2. REMOTE SENSING OPNAMEN EN GEBIEDSBESCHRIJVING

2.1. Remote sensing opnamen en opnameomstandigheden

In 1982 en 1983 zijn in Oost-Gelderland diverse vluchten uitgevoerd (NIEUWENHUIS, 1983). Voor het hydrologisch onderzoek zijn vooral de vluchten die werden uitgevoerd op 30 juli 1982 en 17 juli 1983 van belang, daar deze vluchten werden uitgevoerd na relatief droge perioden.

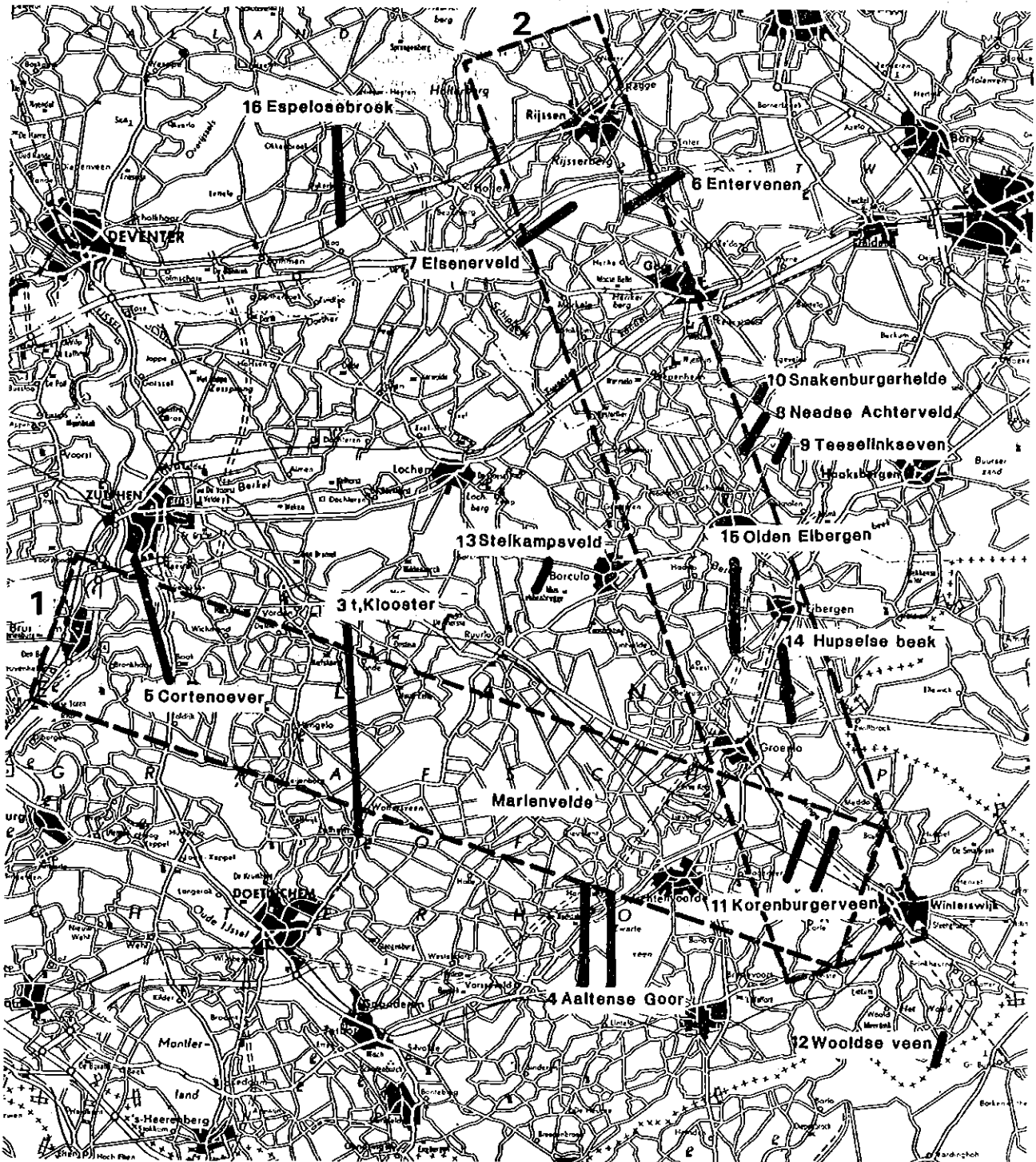


Fig. 1. Ligging van het onderzoeksgebied. De twee grote vluchtstroken zijn omkaderd

Op 30 juli 1982 en 17 juli 1983 zijn onder andere opnamen gemaakt van twee grote vluchtstroken. De eerste strook loopt vanuit Winterswijk naar het westen over het drinkwaterpompstation 't Klooster nabij Hengelo (Gld.) loodrecht op het IJsseldal. De tweede strook loopt min of meer evenwijdig aan het IJsseldal vanuit Winterswijk naar het noorden. De ligging van de vluchtstroken is aangegeven in fig. 1. Op deze beide data zijn reflectiewarmtebeelden en false colour foto's opgenomen.

De opnamen op 30 juli 1982 zijn gemaakt omstreeks 12.40 MET vanaf 3 km hoogte (resolutie 7,5 m) na een zeer droge periode. Na een natte juni maand is er in 1982 in de periode van 3 tot 30 juli maximaal 7 mm neerslag gevallen in het studiegebied. In dezelfde periode bedroeg de openwaterverdamping volgens Penman in Winterswijk ± 120 mm.

De opnamen op 17 juli 1983 zijn gemaakt omstreeks 11.00 MET vanaf een hoogte van 5 km (resolutie 12,5 m) na een vrij droge periode. De omstandigheden waren echter minder extreem dan in 1982. Na een natte periode eind juni is er in 1983 in de periode van 1 tot 17 juli geen neerslag gevallen in het studiegebied, terwijl de openwaterverdamping volgens Penman te Winterswijk in dezelfde periode ± 82 mm bedroeg. Het voorjaar van 1983 is uitzonderlijk nat geweest.

2.2. B e s c h r i j v i n g s t u d i e g e b i e d

De oost-west strook bestaat voornamelijk uit een zwak golvend dekzandlandschap dat wordt doorsneden door een aantal beekdalen. Langs de IJssel komt een smalle strook met rivierkleigronden voor. Op een aantal plaatsen wordt door drinkwaterpompstations freatisch water onttrokken. Daarnaast vindt verspreid over het gebied tijdens droge perioden in het groeiseizoen onttrekking plaats ten behoeve van beregning. De oppervlakte cultuurgrond wordt bijna uitsluitend in beslag genomen door grasland en mais.

Voor een gedetailleerde beschrijving van het studiegebied rondom het pompstation 't Klooster wordt verwezen naar THUNNISSEN en VAN POELJE (1984).

3. METHODIEK VAN AUTOMATISCHE VERDAMPINGSKARTERING

3.1. Standaardrelatie tussen gewastemperatuur en dagverdamping

Een warmtebeeld verschaft informatie over de temperatuurverdeling en daarmee over de verdamping van een gebied op een bepaald moment; het opnametijdstip (SOER, 1980).

Remote sensing vluchten, die worden uitgevoerd voor het waarnemen van droogteschade in de landbouw, worden in het algemeen in de zomerperiode uitgevoerd op zonnige dagen. Voor deze dagen is een eenvoudige lineaire relatie afgeleid tussen de gewastemperatuur midden overdag en de dagverdamping (THUNNISSEN, 1984b; NIEUWENHUIS, e.a., 1985). Deze luidt:

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

De termen LE^{24} en LE_p^{24} zijn respectievelijk de actuele en potentiële 24-uurs verdamping (mm.d^{-1}) van een bepaald gewas, terwijl T_c en T_c^* (K) de daarmee overeenkomende gewastemperaturen zijn. De relatie in (1) wordt standaardrelatie genoemd. Factor B^r is een calibratieconstante waarvan de waarde afhankelijk is van gewassoort, gewashoogte en windsnelheid. Uit berekeningen met het TERGRA-model (SOER, 1977) leidde THUNNISSEN (1984b) een lineaire relatie af tussen B^r en de windsnelheid rond het opnametijdstip, gemeten op een hoogte van 2 m boven het maaiveld van een vlak en open terrein $u(2)$ (m.s^{-1}):

$$B^r = a + bu(2) \quad (\text{K}^{-1}) \quad (2)$$

De regressiecoëfficiënten a (K^{-1}) en b ($\text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}$) zijn afhankelijk van de gewassoort en -hoogte. Tabel 1 toont voor een aantal gewassen met bekende gewashoogte waarden voor de coëfficiënten a en b .

Tabel 1. Waarden voor de coëfficiënten a en b uit vergelijking (2) voor een aantal gewassen met gewashoogte H (naar THUNNISSEN, 1984b)

gewas	H (cm)	a (K^{-1})	b ($K^{-1} \cdot m^{-1} \cdot s$)
gras	< 15	0,050	0,010
gras	> 15	0,050	0,017
aardappelen/suikerbieten	60	0,050	0,023
granen	100	0,090	0,030
mais	200	0,100	0,047

Uit een gevoeligheidsanalyse met het TERGRA-model en toetsing van de standaardrelatie op drie willekeurige vluchtdagen in 1982 en 1983 is gebleken dat op die vluchtdagen, waarop gewoonlijk opnamen worden gemaakt in Nederland voor het waarnemen van droogteschade, de resultaten bij toepassing van de standaardrelatie en de waarden voor B^r berekend met (2) goed overeenkomen met de resultaten bij toepassing van het TERGRA-model. Alleen bij sterke verdroging ($LE^{24}/LE_p^{24} < 50\%$) kunnen de resultaten met de standaardrelatie afwijken van de resultaten die zouden zijn verkregen met het TERGRA-model. In dit traject bevatten echter ook de berekeningen met het TERGRA-model onzekerheden in verband met het afsterven van het gewas bij extreme verdroging. Bovendien levert onder deze omstandigheden het afleiden van gewastemperaturen uit een warmtebeeld problemen op daar als gevolg van structuurverandering van het gewas bij sterke verdroging de waargenomen stralingstemperatuur mede wordt bepaald door de kale grond.

Voor een nauwkeurige bepaling van de actuele dagverdamping zijn met name bij sterke verdroging referentiemetingen in het veld van gewastemperaturen en verdamping onmisbaar. Warmtebeelden zijn vooral van belang voor het vaststellen van verdampingsverschillen en voor het extrapoleren van lokale waarnemingen.

3.2. A u t o m a t i s c h e v e r d a m p i n g s k a r t e r i n g

De in paragraaf 3.1. gepresenteerde standaardrelatie tussen de gewastemperatuur midden overdag en de dagverdamping (verg. 1) leent zich goed voor automatisering van de verdampingskartering. In deze paragraaf wordt uiteengezet hoe de verdampingskartering wordt uitgevoerd. Vervolgens worden in het volgende hoofdstuk enkele resultaten getoond.

De automatische verwerking van de reflectie- en warmtebeelden is uitgevoerd op het RESEDA-systeem van het Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium in Amsterdam.

Aan de hand van de beschikbare reflectiebeelden is een automatische gewasklassifikatie van gedeelten van de oost-west strook uitgevoerd (DE NIES en LEBOUILLE, 1985). Hierbij is onderscheiden: bos, mais, hoog (> 15 cm), middelhoog (5-15 cm) en laag (< 5 cm) grasland, kale grond en nog enkele andere minder belangrijke klassen.

Met behulp van (1) en (2) is voor de gewasklassen hoog en middelhoog gras en mais het warmtebeeld op het RESEDA-systeem omgezet in een verdampingskaart. De toegepaste standaardwaarden van B^r voor middelhoog en hoog grasland en mais zijn gegeven in tabel 2.

Tabel 2. Standaardwaarden voor B^r voor een aantal gewassen met gewashoogte H op 30 juli 1982 om 12.40 MET en op 17 juli 1983 om 11.00 MET

gewas	H (cm)	B^r (K^{-1})	
		30-7-1982	17-7-1983
gras	5-15	0,112	0,083
gras	> 15	0,174	0,116
mais	200	0,391	0,255

De bij de kartering gebruikte lineaire relaties tussen de relatieve dagverdamping en de opwarming van middelhoog en hoog gras en mais zijn gegeven in fig. 2.

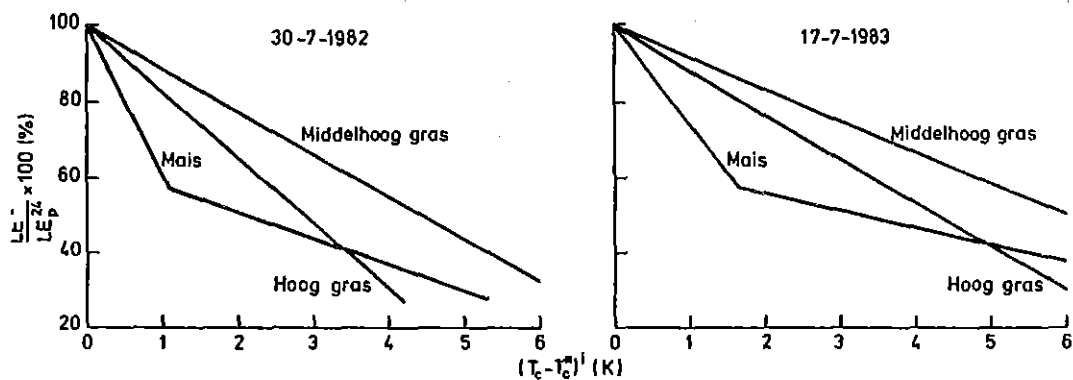


Fig. 2. Standaardrelaties tussen de relatieve dagverdamping (LE^2_2/LE^2_p) en de opwarming van het gewas $(T_c - T_c^*)^i$ om 12.40 MET op 30 juli 1982 en om 11.00 MET op 17 juli 1983 voor grasland en mais met verschillende gewashoogten. Bij de relaties voor mais is rekening gehouden met de invloed van de kale grond op de waargenomen warmtestraling bij sterke verdroging

Bij toenemende verdroging van mais gaan de bladeren krullen, waardoor de bodembedekking afneemt. Omdat onder die omstandigheden de waargenomen oppervlaktetemperatuur mede wordt bepaald door de relatief hoge temperatuur van de kale grond vertoont bij mais de genoemde relatie een exponentieel verloop (THUNNISSEN, 1984a). Deze relatie is benaderd door 2 lineaire relaties met een knikpunt bij een relatieve dagverdamping van 57%.

De referentietemperaturen bij potentiële verdamping (T_c^*) van middelhoog en hoog grasland en mais zijn afgeleid uit het warmtebeeld. De benodigde referentiepercelen zijn gevonden aan de hand van de bodem- en grondwatertrappenkaart en veldmetingen.

Voor enkele minder belangrijke gewassen en laag grasland worden geen verdampingswaarden gegeven. Laag grasland gaf problemen bij de verdampingskartering. Door de geringe bodembedekking van deze (pas gemaaide) percelen werd de waargenomen warmtestraling in belangrijke mate bepaald door de relatief hoge temperatuur van de kale grond. De temperatuur van de vegetatie kon daardoor niet voldoende nauwkeurig uit het warmtebeeld worden afgeleid. Bossen zijn ook niet in de verdampingskartering betrokken. Door de hoogte en grillige vorm van de bomen vindt er gemakkelijk

warmteuitwisseling plaats tussen bomen en atmosfeer. Daardoor zijn bij bomen verdampingsreducties niet betrouwbaar uit warmtebeelden af te leiden.

4. INTERPRETATIE VERDAMPINGSKAARTEN

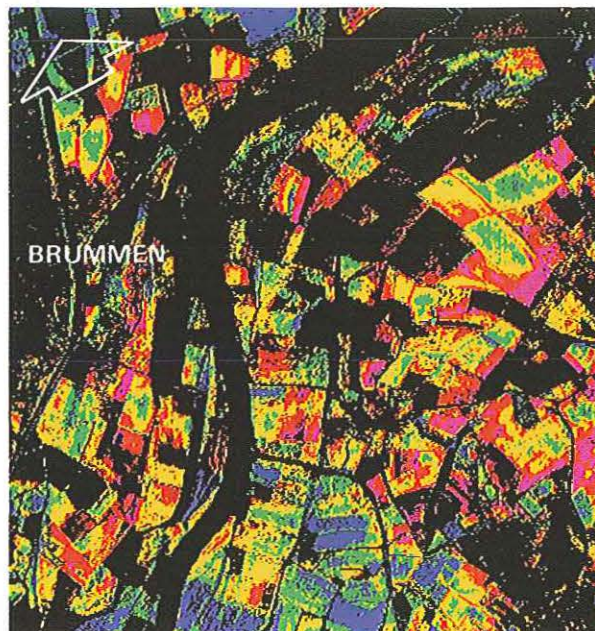
Voor drie deelgebieden van de oost-west strook zijn de automatisch vervaardigde verdampingskaarten voor 30 juli 1982 gegeven in fig. 3. De betreffende deelgebieden zijn gelegen ten oosten van Brummen in het IJsseldal, ten oosten van Hengelo (Gld.) rond het pompstation 't Klooster en ten westen van Lichtenvoorde.

Voor 17 juli 1983 is in fig. 3 alleen de verdampingskaart van het gebied rond het pompstation 't Klooster gegeven. De betekenis van de kleuren in fig. 3 staat in tabel 3.

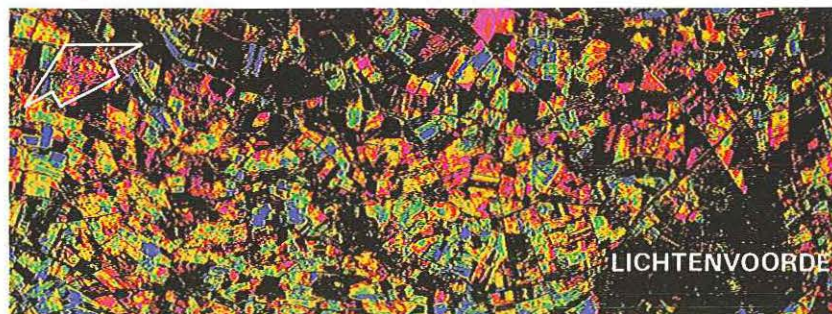
Tabel 3. Verband tussen de kleur in
fig. 3 en de relatieve dagver-
damping (LE^{24}/LE_p^{24})

kleur	LE^{24}/LE_p^{24} (%)
blauw	> 90
groen	70-90
geel	50-70
rood	30-50
magenta	< 30
zwart	niet geklassificeerd

In dit hoofdstuk worden de automatisch vervaardigde verdampingskaarten van 't Klooster vergeleken met een met de hand vervaardigde kaart. Vervolgens wordt ingegaan op de betekenis van uit remote sensing opnamen afgeleide verdampingskaarten voor het agrohydrologisch onderzoek.

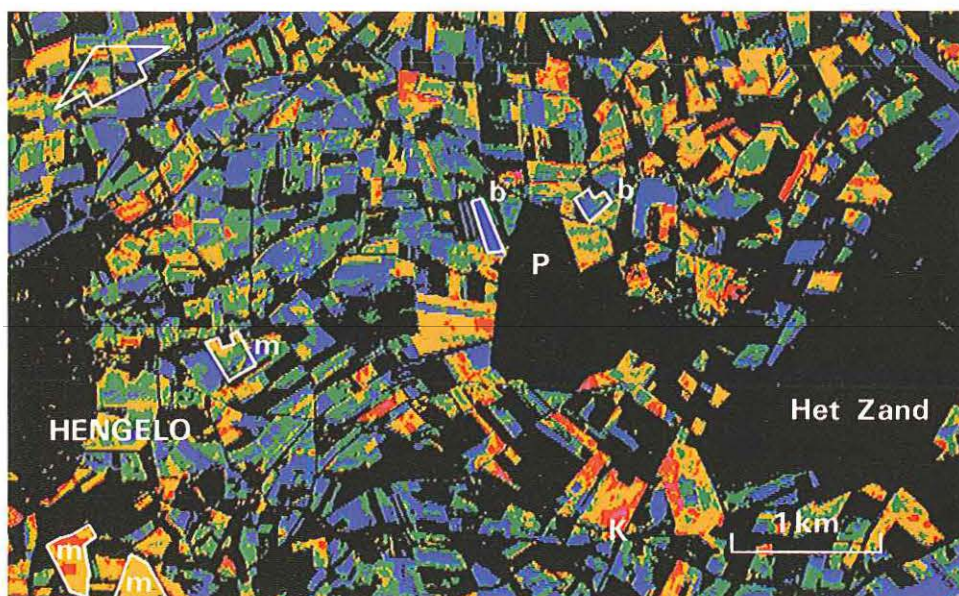


DEELGEBIED BRUMMEN 30 JULI 1982



DEELGEBIED LICHTENVOORDE 30 JULI 1982

Fig. 3. Uit reflectie- en warmtebeelden door middel van automatische verwerking samengestelde verdampingskaarten voor 30 juli 1982 en 17 juli 1983. Voor de betekenis van de kleuren zie tabel 3. Voor de betekenis van de omkadering en de letters wordt verwezen naar de tekst.



DEELGEBIED 'T KLOOSTER 17 JULI 1983



DEELGEBIED 'T KLOOSTER 30 JULI 1982

4.1. Vergelijking tussen automatisch en met de hand vervaardigde verdampingskaart

Van een klein gebied ten westen van het pompstation 't Klooster is voor 30 juli 1982 met de hand een verdampingskaart vervaardigd (THUNNISSEN en VAN POELJE, 1984). Het resultaat in de vorm van een zwart-wit kaartje wordt getoond in fig. 4. De begrenzing van dit gebied is voor het deelgebied Hengelo aangegeven in fig. 3.

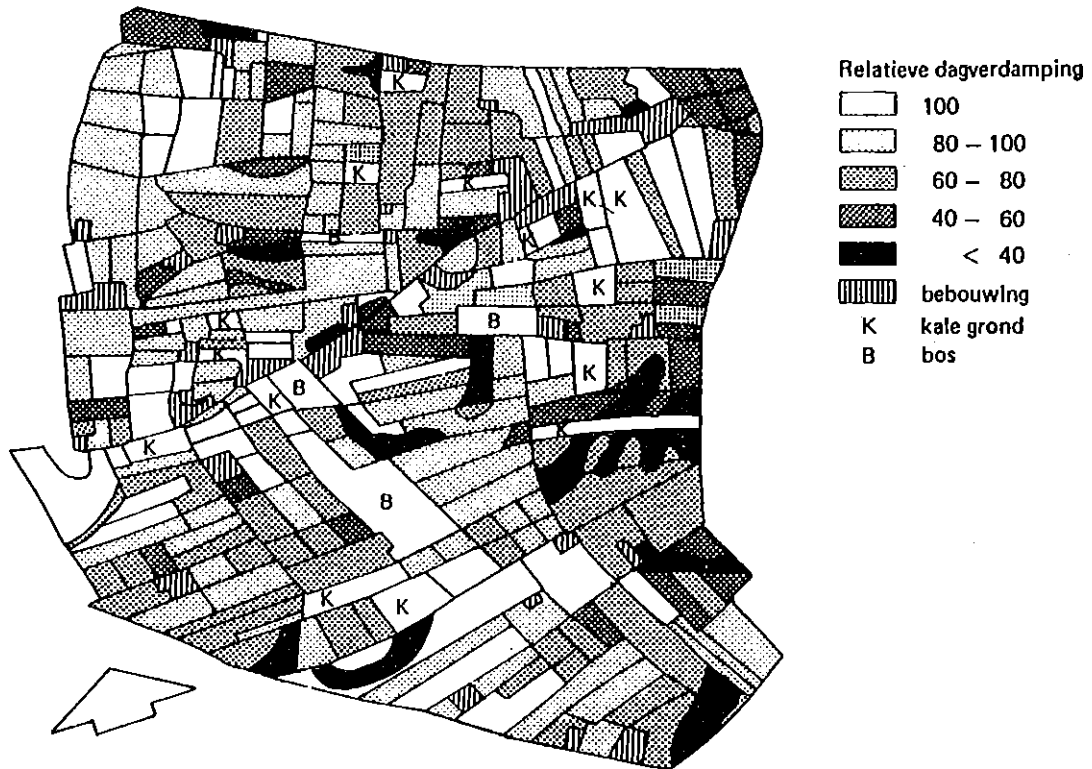


Fig. 4. Met de hand vervaardigde verdampingskaart van een deel van het studiegebied ten westen van het pompstation 't Klooster voor 30 juli 1982 (naar THUNNISSEN en VAN POELJE, 1984)

Bij een vergelijking van de automatisch vervaardigde verdampingskaart met die vervaardigd met de hand kunnen een aantal verschillen worden gesignaleerd, zowel wat betreft het resultaat als wat betreft de methodiek.

Voorafgaand aan de verdampingskartering moet een klassifikatie naar gewassoort en -hoogte worden uitgevoerd. Bij de automatische kartering is de klassifikatie uitgevoerd aan de hand van reflectiebeelden, bij de met de hand uitgevoerde kartering aan de hand van false colour foto's. De automatische gewas(hoogte)klassifikatie komt voornamelijk tot stand op basis van objectieve klassifikatiecriteria, in tegenstelling tot de met de hand uitgevoerde klassifikatie. Bij de laatstgenoemde methode spelen kennis en ervaring van de betreffende onderzoeker een belangrijke rol. Omdat de automatische gewashoogteklassifikatie op pixelbasis geschiedt, komt de binnen een perceel aanwezige heterogeniteit duidelijk naar voren. Bij de met de hand uitgevoerde klassifikatie wordt aan ieder perceel slechts een 'gemiddelde' gewashoogte toegekend.

Voor beide klassifikatiemethoden geldt dat het resultaat van de verdampingskartering staat of valt met de kwaliteit van de gewas(hoogte)-klassifikatie. Immers omdat de opwarming van een ruw gewas als mais ongeacht de vochtvoorziening een aanzienlijk lagere gewastemperatuur vertoont dan gras, kunnen als gevolg van misklassifikaties foutieve verdampingswaarden worden toegekend.

Ook bij de automatische verdampingskartering geschiedt de toekenning van verdampingswaarden op pixelbasis. Hierdoor komen eventuele verschillen in vochtvoorziening binnen een perceel duidelijk naar voren (zie fig. 3). Bovendien zijn verdrogingspatronen vaak niet gebonden aan perceelsgrenzen, maar lopen door in aangrenzende percelen. Wanneer de verdampingskartering met de hand wordt uitgevoerd, wordt aan een perceel over het algemeen een 'gemiddelde' verdampingswaarde toegekend (zie fig. 4). Slechts opvallende verdrogingspatronen kunnen afzonderlijk worden aangegeven. Het gevolg is dat aanwezige verdrogingspatronen worden afgevlakt en dat informatie over de heterogeniteit binnen een perceel verdwijnt.

Tenslotte dient er, wellicht ten overvloede op te worden gewezen dat de automatische verdampingskartering een snelle methode is ten opzichte van de kartering met de hand. Dit voordeel doet zich met name gelden wanneer het grote gebieden betreft.

4.2. Betekenis van uit remote sensing opnamen afgeleide verdampingskaarten voor het agrohydrologisch onderzoek

Aan de hand van de verdampingskaarten van 't Klooster in fig. 3 zal worden ingegaan op de betekenis van dergelijke kaarten voor het agrohydrologisch onderzoek.

Of op een vluchtdag verdampingsreducties aanwezig zijn, is afhankelijk van verschillende factoren, te weten: meteorologische voorgeschiedenis, gewassoort, capillaire eigenschappen van de ondergrond, dikte en vochtbergend vermogen van de wortelzone, natuurlijke diepte van de grondwaterstand beneden maaiveld, kunstmatige verlaging van de grondwaterstand en toepassing van beregening. Op enkele van deze factoren zal hieronder nader worden ingegaan. Bovendien komen de toepassingsmogelijkheden van de verdampingskaarten bij het vaststellen van opbrengstreducties als gevolg van grondwateronttrekking aan de orde.

4.2.1. Meteorologische voorgeschiedenis en gewassoort

De opnamen van 30 juli 1982 zijn gemaakt onder drogere omstandigheden in het veld dan de opnamen van 17 juli 1983 (zie paragraaf 2.1). Dit verschil in omstandigheden komt duidelijk naar voren bij vergelijking van de verdampingskaarten van het studiegebied 't Klooster voor beide data (zie fig. 3).

In het algemeen zijn op 30 juli 1982 op niet beregende percelen lagere verdampingswaarden aanwezig dan op 17 juli 1983. Een uitzondering hierop vormen een aantal maispercelen, die volgens de verdampingskaarten op 17 juli 1983 juist een lagere verdampingswaarde vertonen. Een aantal van deze percelen is in fig. 3 aangeduid met de letter m. Aan de hand van veldwaarnemingen en false colour foto's kon worden vastgesteld dat hier sprake is van schade door wateroverlast als gevolg van het zeer natte voorjaar van 1983. Wateroverlast is vaak zeer lokaal opgetreden (lage plekken met al dan niet slechtdoorlatende lagen in de ondergrond) en manifesteert zich op de false colour foto's van 17 juli 1983 meestal in de vorm van min of meer kale plekken met scherpe overgangen naar het goed groeiende gewas. Droogtepatronen tonen daarentegen een veel geleidelijker overgang met de omgeving (NIEUWENHUIS en BOWMANS, 1984).

De overvloedige neerslag in het voorjaar van 1983 is er ook de oorzaak van geweest, dat het zaaien van mais op veel plaatsen pas laat kon worden uitgevoerd, waardoor de bodem op 17 juli nog niet volledig door het gewas werd bedekt. Omdat onder die omstandigheden de waargenomen oppervlaktetemperatuur mede wordt bepaald door de relatief hoge temperatuur van de kale grond, is de gewasverdamping waarschijnlijk enigszins onderschat.

Als gevolg van verschillen in potentiële verdampingsflux en bewortelingsdiepte tussen grasland en mais kunnen grasland- en maispercelen, gelegen op eenzelfde bodemtype, op de vluchtdag uiteenlopende relatieve verdampingswaarden vertonen (THUNNISSEN, 1984a).

4.2.2. Berekening

Gedurende droge perioden wordt op uitgebreide schaal berekend in Oost-Gelderland. Door middel van een enquête gehouden in de zomer van 1982, is vastgesteld welke (grasland-)percelen in het gebied in de omgeving van het pompstation 't Klooster in 1982 zijn berekend (VEGT, 1982). Van deze percelen heeft op 30 juli 1982 ongeveer 60% een stralingstemperatuur, die gelijk is aan of lager dan de referentietemperatuur bij potentiële verdamping (T_c^*). Volgens (1) vallen de percelen met een stralingstemperatuur lager dan T_c^* in de klasse met een relatieve dagverdamping hoger dan 100%. Op de verdampingskaart zijn deze percelen ondergebracht in de klasse $LE_p^{24}/LE_c^{24} > 90\%$ (blauw in fig. 3). Een aantal beregende percelen is in fig. 3 aangeduid met de letter b.

De laagste stralingstemperaturen (vaak enkele graden lager dan de overeenkomende referentietemperatuur) worden aangetroffen op de percelen, die tijdens of kort vóór de vlucht zijn berekend. Op deze percelen wordt de stralingstemperatuur sterk beïnvloed door het nog op het maaiveld aanwezige koude grondwater, dat wordt gebruikt voor de berekening. Van deze percelen kan aan de hand van het warmtebeeld i.c. de verdampingskaart eenduidig worden vastgesteld dat ze worden berekend.

Wanneer de directe invloed van het koude beregeningswater op de stralingstemperatuur is verdwenen, zullen afhankelijk van de weersomstandigheden nog gedurende tenminste enkele dagen de gewassen op de betreffende percelen potentieel verdampen. Wanneer deze percelen zich bevinden op droogtegevoelige gronden, kan aan de hand van de verdampingskaart met vrij grote zekerheid worden gesteld dat ze worden berekend.

Op minder droogtegevoelige gronden kunnen deze percelen echter worden verward met percelen, die van nature goed van water zijn voorzien.

Op een aantal percelen is de met berekening toegediende hoeveelheid water uitgeput. Bovendien zijn enkele beregende percelen kort voor de vluchtdag gemaaid of gescheurd, waardoor de stralingstemperatuur geheel of gedeeltelijk wordt bepaald door de relatief warme kale grond. Dergelijke percelen kunnen dan ook niet aan de hand van de verdampingskaart worden herkend als beregende percelen.

4.2.3. Invloed van grondwateronttrekking, bodemfysische eigenschappen en grondwaterstandsverloop op de gewasverdamping

Het van nature aanwezige verloop van de grondwaterstand kan worden gewijzigd door menselijke ingrepen in de waterhuishouding van een gebied. Zo zal een grondwateronttrekking over het algemeen een verlaging van de gemiddelde grondwaterstand tot gevolg hebben. Het pompstation 't Klooster (aangeduid met een P in fig. 3) onttrekt op jaarbasis ongeveer $30 \times 10^6 \text{ m}^3$ freatisch grondwater. Als gevolg van de homogene geohydrologische opbouw van het gebied is het resulterende grondwaterstandsverlagingspatroon nagenoeg concentrisch (DE LAAT en AWATER, 1978). Op de verdampingskaart van 30 juli 1982 is aangegeven waar volgens modelberekeningen 10 cm grondwaterstandsval optreedt (zie fig. 3).

Een verlaging van de grondwaterstand kan door vermindering van de capillaire nalevering van invloed zijn op de actuele plantverdamping. In de directe omgeving van het pompstation treedt zowel op 30 juli 1982 als 17 juli 1983 (sterke) verdroging op, die voor een groot deel wordt veroorzaakt door de onttrekking (THUNNISSEN, 1984a). Deze verdrogingsstrook wordt op enkele plaatsen onderbroken door beregende percelen. Uit de optredende verdampingsreducties rond het pompstation blijkt duidelijk dat de omstandigheden in het veld op 30 juli 1982 droger waren dan op 17 juli 1983.

Op grotere afstand van het pompstation is geen concentrisch verdrogingspatroon waarneembaar, maar komt de verdroging voor in een onregelmatig patroon. Hier kan de verdroging echter niet zonder meer aan de invloed van de onttrekking worden toegeschreven. De verdroging in het gebied gelegen ten zuidwesten en in het verlengde van het natuurgebied 'Het Zand' wordt bijvoorbeeld veroorzaakt door de aanwezigheid van sterk droogtegevoelige vaaggronden. Ten westen van het pompstation

blijft de verdroging beperkt door de aanwezigheid van minder droogtegevoelige gronden (laaggelegen zwak en sterk lemige beekeerd- en podzolgronden). Bovendien wordt hier op uitgebreide schaal berekening toegepast. Als gevolg van deze factoren hebben de verdrogingspatronen op de verdampingskaart een grillige vorm.

Bij meer systematische studie van de verdamping op 30 juli 1982 per gewassoort, bodemtype en grondwatertrap blijkt, dat voor een aantal bodemtypen en grondwatertrappen er een duidelijke afname van de verdamping van gras en mais wordt waargenomen naarmate de afstand tot de onttrekking geringer en derhalve de verlaging van de grondwaterstand groter wordt (THUNNISSEN, 1984a). Een voorbeeld wordt gegeven in fig. 5.

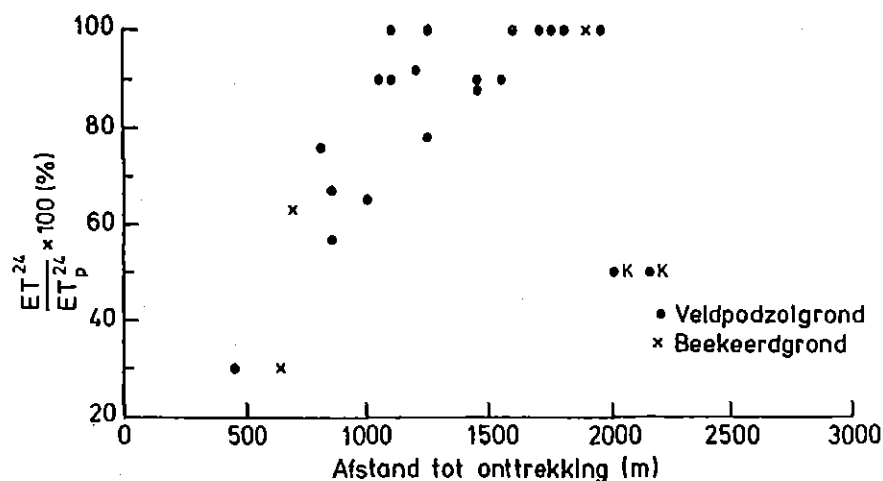


Fig. 5. Relatieve dagverdampingswaarden (LE^{24}/LE_p^{24}) op 30 juli 1982 afgeleid uit de in fig. 3 getoonde verdampingskaart voor gras op veldpodzolgrond met grondwatertrap V uitgezet tegen de afstand tot het centrum van de grondwateronttrekking door het pompstation 't Klooster. De grondwatertrap is van toepassing op de situatie zonder onttrekking (naar THUNNISSEN, 1984a).

Fig. 5 toont, dat de verdamping van gras op veldpodzol- en beekeerdgronden met grondwatertrap V op 30 juli 1982 afneemt in de richting van het pompstation. Bij een afstand tot de onttrekking van meer dan ongeveer 1300 m heeft de grondwaterwinning geen waarneembare invloed meer op de verdamping. Bovendien is dan door voldoende capillaire

nalevering vanuit het grondwater de gewasverdamping vrijwel potentieel. De beekkeerdgronden in fig. 5 hebben vergelijkbare capillaire eigenschappen als de veldpodzolgronden.

In fig. 5 vertonen 2 percelen (aangegeven met de letter k) een afwijkend gedrag. Deze beide percelen liggen op korte afstand van elkaar in een sterk verdrogend gebied ten zuiden van het pompstation (aangegeven met de letter k in fig. 3). In dit gebied zijn in het groeiseizoen van 1983 nadere waarnemingen gedaan. De k-h relatie van de ondergrond is bepaald uit de korrelgrootteverdeling en het humusgehalte volgens een door Bloemen(1980) ontwikkelde methode. Bovendien zijn grondwaterstanden en vochtspanningen gemeten. Hieruit bleek dat de grondwaterstanden in dit gebied 30 à 60 cm lager en de vochtspanningen duidelijk hoger waren dan in een referentiegebied met grondwatertrap V. De capillaire eigenschappen waren vergelijkbaar met die van podzolgronden elders in het gebied. Uit berekeningen met het SWATRE model is gebleken dat bij een verlaging van de grondwaterstand met meer dan 30 cm ten opzichte van die in het referentiegebied de verdamping van grasland op een veldpodzolgrond met grondwatertrap V zeer sterk afneemt (THUNNISSEN 1984 a). Uit de waarnemingen van de grondwaterstand kan worden geconcludeerd dat een grondwatertrap VI in dit qua grondwaterstandsverloop afwijkende gebied waarschijnlijk meer op z'n plaats is dan grondwatertrap V.

4.2.4. Bepaling droogteschade met remote sensing en agrohydrologische simulatiemodellen.

Gebleken is dat remote sensing een belangrijk hulpmiddel kan zijn bij het vaststellen van droogteschade. Uit remote sensing opnamen wordt echter slechts informatie verkregen over de regionale gewasverdamping op de opnamedagen, terwijl voor het vaststellen van opbrengstderiving informatie over de verdamping(-sreducties) gedurende een heel groeiseizoen nodig is.

Met hydrologische modellen kan afhankelijk van de meteorologische omstandigheden, bodemopbouw, grondwaterstand en gewassoort de optredende verdamping gedurende het groeiseizoen worden gesimuleerd. Voor de vluchtdagen moeten de resultaten verkregen met dergelijke modellen overeenkomen met de remote sensing benadering. Met behulp van verdampingskaarten, afgeleid uit remote sensing opnamen, kan de

extrapolatie van lokale modelsimulaties beter worden onderbouwd. Bovendien kunnen op de vluchtdagen de modelresultaten worden getoetst.

THUNNISSEN (1984a) voerde voor het groeiseizoen van 1982 berekeningen uit met de modellen SWATRE (BELMANS e.a., 1983) en GELGAM (DE LAAT en AWATER, 1978) voor het studiegebied rondom het pompstation 't Klooster. De resultaten van de berekeningen zijn vergeleken met de verdampingskaart. Over het algemeen kwamen de resultaten verkregen met het SWATRE-model goed overeen met die verkregen uit de remote sensing opnamen. In enkele gevallen vertoonden de resultaten van beide methoden verschillen. Waarschijnlijk zijn voor die gevallen in het model onjuiste bodemfysische eigenschappen toegepast. De met het GELGAM-model berekende ruimtelijke spreiding in de gewasverdamping vertoonde slechts geringe overeenkomst met de patronen op de verdampingskaart. In belangrijke mate wordt dit bepaald door de schematisering in het GELGAM-model.

Door berekeningen uit te voeren met het SWATRE-model voor de situatie met en zonder grondwaterstandsaling konden de verdampingsreducties gedurende het groeiseizoen van 1982 als gevolg van de grondwateronttrekking door het pompstation 't Klooster worden vastgesteld.

Door remote sensing opnamen toe te passen in combinatie met hydrologische modellen kan de hydrologische beschrijving van een gebied worden verbeterd.

Doordat voor percelen met een geringe bodembedekking geen betrouwbare verdampingswaarden uit het warmtebeeld kunnen worden afgeleid, geven de verdampingskaarten over het algemeen geen kaartdekkend beeld. Indien bijvoorbeeld in verband met schaderegelingen een kaartdekkend beeld is gewenst, zullen dan ook meerdere vluchten moeten worden uitgevoerd. Door het beschikbaar komen van meerdere warmtebeelden binnen één groeiseizoen zal tevens de betrouwbaarheid van de toetsing van hydrologische modelberekeningen toenemen.

5. VERDAMPINGSKAARTEN AFGELEID UIT REMOTE SENSING OPNAMEN EN DROOGTEGEVOELIGHEIDSKAARTEN

De traditionele werkwijze voor het vaststellen van de vochtlev-
rantie van de bodem is gebaseerd op berekeningen met hydrologische
modellen. Voor beide grote vluchtstroken zijn met behulp van model-
berekeningen droogtegevoeligheidskaarten vervaardigd (THUNNISSEN,
1981). Vanwege de omvang van het gebied konden de droogtegevoelig-
heidskaarten slechts worden vervaardigd met behulp van de beschik-
bare informatie over bodem en grondwatertrappen op kaartbladen van
de Bodemkaart van Nederland, schaal 1:50 000.

In paragraaf 5.1 wordt ingegaan op de samenstelling van de droog-
tegevoeligheidskaarten. Vervolgens worden in de paragrafen 5.2 en
5.3 de droogtegevoeligheidskaarten vergeleken met de uit remote
sensing opnamen afgeleide verdampingskaarten.

5.1. Samenstelling van droogtegevoe- ligheidskaarten

Voor de in het onderzoeksgebied voorkomende kaarteenheden
(= bodemeenheid + grondwatertrap), afgeleid uit de bodemkaarten
(schaal 1:50 000) van het gebied, zijn met behulp van het onverzadig-
de deel van het model GELGAM (DE LAAT en AWATER, 1978) de vochtleve-
ranties berekend voor een 90,50,20,10, en 1% droog jaar (een 90%
droog jaar is een jaar met 90% kans dat het betreffende verdampings-
overschot wordt overschreden, enz.). De berekeningen zijn uitgevoerd
voor gras als kengewas. Dit heeft tot doel de onderlinge vergelijk-
baarheid te vereenvoudigen. Bovendien is grasland de vorm van bodem-
gebruik, die in het onderzoeksgebied het meest voorkomt.

Voor alle profielen zijn, uitgaande van de standaardprofielbe-
schrijvingen zoals verkregen uit rapporten behorend bij de bodemkaart,
een pF-curve van onder- en bovengrond en een k-h relatie voor de onder-
grond geschat, alsmede een diepte van beworteling. Voor het merendeel
van de profielen konden schattingen van pF-curven en k-h relaties
worden overgenomen van een eerder onderzoek uitgevoerd door Stiboka
in opdracht van de Commissie Bestudering Waterhuishouding Gelderland
(BOUMA, J. ed., 1979).

Voor de overige profielen zijn schattingen uitgevoerd in samenspraak met Stiboka.

Aangenomen is dat in een 90% droog jaar de verdamping potentiëel is en dus de relatieve verdamping $R=1$. De relatieve verdamping R is gedefinieerd als het quotiënt van de over het groeiseizoen gesommeerde werkelijke en potentiële verdamping. In drogere jaren kan afhankelijk van het optredende verdampingsoverschot en de door het profiel geleverde hoeveelheid vocht een vochttekort optreden. In dat geval is de relatieve verdamping $R < 1$. Combinatie van de berekende vochtleverantie en de bijbehorende potentiële verdampingssom levert voor het 50,20,10 en 1% droog jaar de relatieve verdamping R .

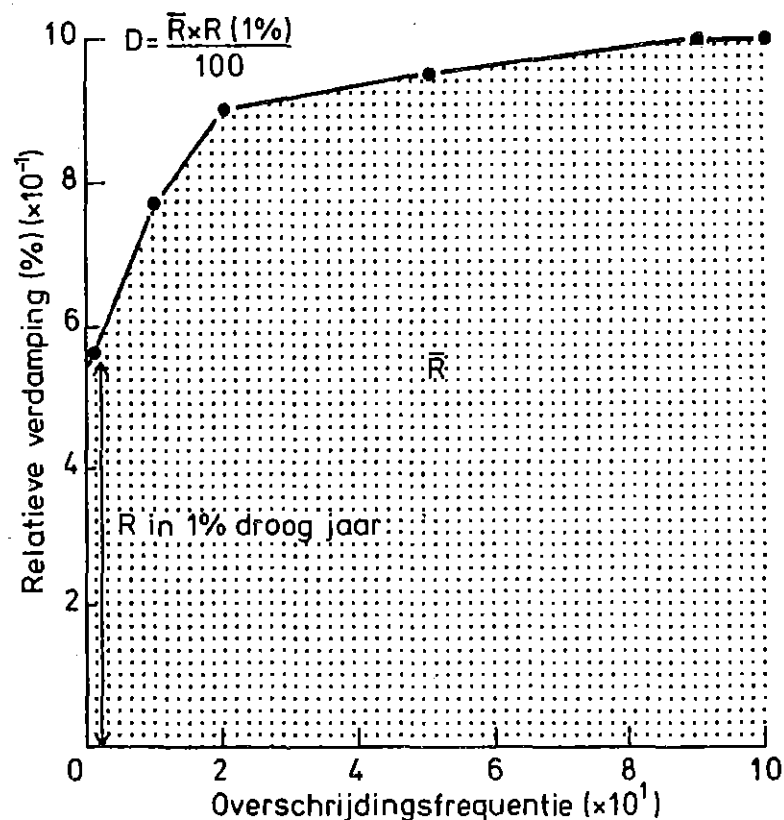


Fig. 6. Grafische weergave van de berekende relatieve verdamping R van gras op een willekeurig bodemtype, uitgaande van een 1,10,20, 50 en 90% droog jaar. De droogte gevoeligheidsmaat D wordt bepaald uit de gewogen gemiddelde relatieve verdamping $\bar{R}$ en de relatieve verdamping R in een 1% droog jaar (naar THUNNISSEN, 1981)

In fig. 6 is voor een willekeurig profiel de relatieve verdamping R , die optreedt in respectievelijk een 1, 10, 20, 50, 90 en 100% droog jaar, uitgezet tegen de overschrijdingsfrequentie (een 10% droog jaar is een jaar met 10% kans dat het betreffende verdampingsoverschot wordt overschreden, de overschrijdingsfrequentie is dus 10, enz.). Integratie van 0 tot 100% resulteert in een gewogen gemiddelde waarde $\bar{R}$ in procenten.

Als gevoeligheidsmaat voor droogte wordt nu gebruikt: het produkt D van de gewogen gemiddelde relatieve verdamping $\bar{R}$ met de relatieve verdamping R in een 1% droog jaar gedeeld door 100 (zie fig. 6). Het is duidelijk dat een lage en een hoge waarde van D duidt op respectievelijk een grote en geringe gevoeligheid voor droogte.

Met behulp van de boven beschreven vochtleverantieberekeningen zijn voor alle in het onderzoeksgebied voorkomende combinaties van bodemeenheden en grondwatertrappen waarden uitgerekend voor de gevoeligheidsmaat voor droogte D . Aan de hand van de waarden voor D is een indeling gemaakt in vijf klassen lopend van "niet tot weinig gevoelig" (klasse 0) tot "zeer gevoelig" (klasse IV) voor droogte. Met behulp van een aan iedere gevoeligheidsklasse toegekende arcering is met de 1:50 000 bodemkaart als basis een droogtegevoeligheidskaart voor beide grote vluchtstroken vervaardigd.

In de volgende paragraaf zal aan de hand van vergelijking van deze kaarten met de uit remote sensing opnamen afgeleide verdampingskaarten voor 30 juli 1982 worden ingegaan op de praktische bruikbaarheid van de droogtegevoeligheidskaarten

5.2. V e r g e l i j k i n g v a n d e d r o o g t e g e v o e - l i g h e i d s k a a r t e n m e t d e u i t r e m o t e s e n s i n g o p n a m e n a f g e l e i d e v e r d a m - p i n g s k a a r t e n

De droogtegevoeligheidskaart en de verdampingskaart zijn in absolute zin niet met elkaar vergelijkbaar, immers beiden zijn tot stand gekomen via geheel verschillende procedures. De verdampingskaart geeft de actuele situatie op een bepaald moment weer, namelijk de relatieve dagverdamping op de vluchtdag. De droogtegevoeligheidskaart geeft een indicatie voor de droogtegevoeligheid per kaarteenheden, waarbij het onderling vergelijken van deelgebieden belangrijker

is dan het vaststellen van absolute niveau's. Er mag echter worden verwacht dat verschillen op de droogtegevoeligheidskaarten ook waarneembaar zijn op de verdampingskaarten, immers de verdamping zal na een droge periode over het algemeen lager zijn naarmate de betreffende kaarteenheden meer droogtegevoelig is.

De vergelijking tussen beide kaarten is uitgevoerd voor de drie deelgebieden van de oost-west strook waarvan de verdampingskaarten zijn gegeven in fig. 3. Hierbij is alleen gebruik gemaakt van de verdampingskaarten voor 30 juli 1982. De betreffende gebieden worden voortaan aangeduid als de deelgebieden 't Klooster, Lichtenvoorde en Brummen.

Begonnen is met een visuele vergelijking van patronen op beide kaarten. Hiertoe zijn de grenzen tussen droogtegevoeligheidsklassen overgebracht op de verdampingskaarten. Deze methode leverde geen eenduidige conclusie op over de overeenkomst van beide kaarten. Daarom is vervolgens een meer kwantitatief onderbouwde vergelijking uitgevoerd. Per droogtegevoeligheidsklasse zijn per deelgebied het gemiddelde en de standaardafwijking bepaald van de uit de verdampingskaart afgeleide relatieve dagverdampingswaarden voor een groot aantal grasland- en mais percelen. Het resultaat is gegeven in tabel 4. Wanneer een perceel in de relatieve dagverdampingsklasse 50-70% viel, is aan dat perceel een relatieve dagverdamping van 60% toegekend enz. Komen binnen één perceel de verdampingsklassen 50-70% en 70-90% voor dan is een relatieve dagverdampingswaarde van 70% toegekend. Bij de analyse van deelgebied 't Klooster zijn alle beregende percelen buiten beschouwing gelaten. Van dit deelgebied is bekend welke percelen in 1982 zijn beregend (VEGT, 1982). Van de deelgebieden Lichtenvoorde en Brummen zijn alleen de percelen waarvan aan de hand van het warmtebeeld en de false colour foto's kon worden vastgesteld dat ze zijn beregend, buiten beschouwing gelaten. Uit tabel 4 blijkt dat de gemiddelde verdampingswaarden over het algemeen afnemen naarmate de gevoeligheid voor droogte toeneemt. Een uitzondering vormen de droogtegevoeligheidsklassen 0, I en III in het deelgebied Brummen, die onderling nauwelijks verschillen wat betreft de gemiddelde verdampingswaarden. Bovendien heeft in deelgebied 't Klooster droogtegevoeligheidsklasse IV* een hogere gemiddelde verdampingswaarde dan klasse III*.

Tabel 4. Gemiddelde (μ) en standaardafwijking (σ) van de uit verdampingskaarten afgeleide relatieve dagverdampingswaarden op 30 juli 1982 per droogtegevoeligheidsklasse voor n grasland- en mais percelen voor de deelgebieden 't Klooster, Lichtenvoorde en Brummen. Voor deelgebied 't Klooster zijn de resultaten gegeven met en zonder percelen in de directe omgeving van het pompstation.

Deel- gebied	Droogtegevoelig- heidsklasse	GRAS			MAIS		
		μ	σ	n	μ	σ	n
't Klooster	0	-	-	-	81,0	12,8	15
	I*	73,6	14,4	33	76,9	13,8	51
	I	70,6	17,3	54	72,8	15,0	67
	II*	66,9	20,0	37	65,8	22,8	71
	II	62,4	19,9	66	61,3	22,6	94
	III*	47,5	10,9	4	-	-	-
	IV*	57,5	19,1	8	43,3	10,9	9
Lichtenvoorde	I	65,4	18,8	101	71,5	15,4	64
	II	60,6	17,5	54	61,9	19,1	60
	III	-	-	-	45,0	23,3	7
Brummen	0	63,1	12,9	49	61,1	9,0	9
	I	63,3	8,7	9	-	-	-
	II	-	-	-	-	-	-
	III	67,2	17,8	18	61,7	13,8	18
	IV	58,5	10,7	13	47,1	16,3	12

*exclusief percelen in de directe omgeving van het pompstation
't Klooster

In het laatste geval zijn, gezien het geringe aantal percelen (respectievelijk 8 en 4), de resultaten in tabel 4 echter twijfelachtig.

Opvallend is verder de relatief grote spreiding in verdampingswaarden binnen de verschillende droogtegevoeligheidsklassen (zie tabel 4). In fig. 7 is voor mais de spreiding rond het gemiddelde van een aantal droogtegevoeligheidsklassen in de deelgebieden 't Klooster en Lichtenvoorde grafisch weergegeven. Het blijkt dat de droogtegevoeligheidsklassen elkaar in ruime mate overlappen. Dit betekent dat een duidelijke bepaling van de verbreiding van de verschillende droogtegevoeligheidsklassen op grond van relatieve dagverdampingswaarden op 30 juli 1982 niet mogelijk is.

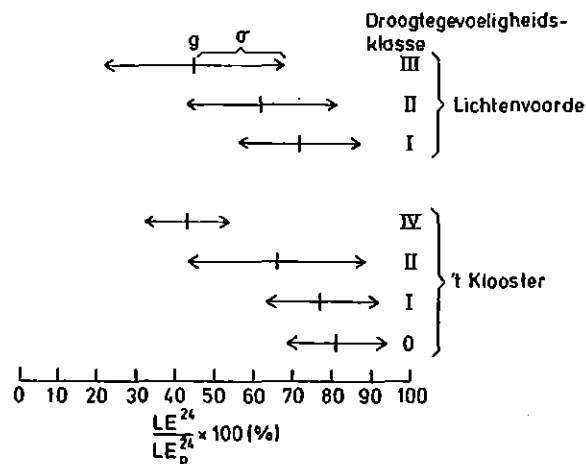


Fig. 7. Gemiddelde (g) en standaardafwijking (σ) van de uit verdampingskaarten afgeleide relatieve dagverdampingswaarden (LE^{24}/LE_p^{24}) voor mais op 30 juli 1982 voor verschillende droogtegevoeligheidsklassen in de deelgebieden 't Klooster en Lichtenvoorde. De resultaten voor het deelgebied 't Klooster zijn van toepassing voor het gebied buiten de invloed van de onttrekking.

De resultaten gevonden voor gras en mais verschillen weinig van elkaar (zie tabel 4), hoewel de droogtegevoeligheidskaart is afgeleid voor gras. Bovendien liet THUNNISSEN (1984a) zien, dat gras en mais op dezelfde kaartenheid op 30 juli 1982 sterk verschillende verdampingswaarden kunnen hebben.

In paragraaf 5.3. zal nader worden ingegaan op mogelijke oorzaken van de relatief grote spreiding in verdampingswaarden binnen verschillende droogtegevoeligheidsklassen. Vervolgens komen in hoofdstuk 6 de verschillen tussen de deelgebieden onderling aan de orde.

5.3. Oorzaken van de spreiding in de relatieve dagverdampingswaarden binnen de droogtegevoeligheidsklassen

5.3.1. Onnauwkeurigheid verdampingskaarten

Als gevolg van de invloed van kale grond op de gewastemperatuur, fouten bij de gewas(hoogte)klassificatie en de vereenvoudiging van

de relatie tussen de dagverdamping en de gewastemperatuur kunnen de uit remote sensing opnamen afgeleide verdampingskaarten onnauwkeurigheden bevatten. Omdat bij het bepalen van het gemiddelde en de standaardafwijking van de verdampingswaarden per droogtegevoeligheidsklasse bovendien is uitgegaan van verdampingsklassen en niet van werkelijke verdampingswaarden, kunnen de resultaten in tabel 4 enigszins afwijken van de werkelijke waarden.

5.3.2. Kaartonzuiverheden

De droogtegevoeligheidskaart is vervaardigd op basis van de 1:50 000 bodem- en grondwatertrappenkaart. De schaal van de kaart bepaalt de mate van detail waarmee de bodemgesteldheid en het grondwaterstandsverloop kan worden weergegeven. Bij een schaal van 1:50 000 kunnen de opbouw van de bodem en het grondwaterstandsverloop binnen een kaarteenhed grote verschillen vertonen. De schaal van de kaart maakt het bovendien moeilijk oppervlakten van minder dan circa 10 ha (1 cm^2 op de kaart is 25 ha in het terrein) weer te geven. Als gevolg hiervan komen kaartvlakken in droogtegevoeligheidsklassen terecht waar ze eigenlijk, gezien de bodemfysische eigenschappen en/of het grondwaterstandsverloop, niet thuis horen.

5.3.3. Variatie in bodemfysische eigenschappen en grondwaterstanden

De bodemfysische eigenschappen, gebruikt bij de vervaardiging van de droogtegevoeligheidskaarten, zijn bepaald aan de hand van standaardprofielbeschrijvingen zoals verkregen uit rapporten behorend bij de bodemkaart. Bodems, die identiek zijn uit pedogenetisch oogpunt, kunnen echter verschillende bodemfysische eigenschappen hebben bijvoorbeeld als gevolg van verschillen in textuur van de ondergrond. De nadruk op het verkrijgen van representatieve gemiddelde fysische gegevens voor bodemeenheden gaat voorbij aan het feit dat een reeks van eigenschappen vaak meer relevant is dan een of andere gemiddelde waarde.

Bij de berekening van de droogtegevoeligheidsmaat D voor de verschillende kaarteenheden is per grondwatertrap uitgegaan van een karakteristiek grondwaterstandsverloop. In werkelijkheid is binnen een grondwatertrap echter een aanzienlijke variatie in grondwaterstanden mogelijk. Uit berekeningen met het SWATRE model is gebleken

dat afhankelijk van de meteorologische omstandigheden, de capillaire eigenschappen van het bodemprofiel en de grondwaterstand de verdamping zeer sterk kan variëren bij relatief geringe veranderingen in de grondwaterstand (THUNNISSEN, 1984a).

De variatie in bodemfysische eigenschappen binnen een bodemeenheid en de variatie in grondwaterstanden binnen een grondwatertrap verklaren voor een deel de optredende spreiding in verdampingswaarden binnen verschillende droogtegevoeligheidsklassen.

5.3.4. Invloed van de grondwateronttrekking

Bij de vervaardiging van de droogtegevoeligheidskaart is geen rekening gehouden met verlagingen van de grondwaterstand als gevolg van grondwateronttrekkingen. Daarom zijn in tabel 4 voor het deelgebied 't Klooster ook gemiddelden en standaardafwijkingen gegeven voor het gebied exclusief de percelen in de directe omgeving van het pompstation 't Klooster. Zoals te verwachten was nemen de gemiddelde verdampingswaarden enigszins toe ten opzichte van de waarden die zijn berekend voor het gehele deelgebied. De standaardafwijkingen worden iets lager of blijven nagenoeg gelijk.

6. ONDERLINGE VERGELIJKING VAN DE DEELGEBIEDEN

Bij bestudering van de verdampingskaarten in fig. 3 valt het grote aantal niet geklassificeerde percelen in deelgebied Lichtenvoorde op. Over het algemeen betreft het hier gemaaide graslandpercelen met een geringe bodembedekking.

De aanwezigheid van veel percelen met geringe bodembedekking duidt er op dat de hergroei vanwege de droge omstandigheden in het veld moeilijk op gang komt. In dit gebied is in de zestiger jaren de ontwatering sterk verbeterd. Hierdoor is de wateroverlast verminderd maar de droogtegevoeligheid toegenomen.

De aanwezigheid van veel percelen met geringe bodembedekking betekent verder dat indien een kaartdekkende verdampingskaart nodig is, op meerdere data opnamen moeten worden gemaakt.

Uit tabel 4 blijkt dat de gemiddelde verdampingswaarden voor de verschillende droogtegevoeligheidsklassen in het deelgebied Brummen

onderling relatief weinig uiteenlopen. Daarnaast verschillen de gemiddelde verdampingswaarden in deelgebied Brummen voor een aantal klassen aanzienlijk van de gemiddelde waarden voor de overeenkomstige droogtegevoeligheidsklassen in de deelgebieden 't Klooster en Lichtenvoorde. Met name droogtegevoeligheidsklasse 0 met 49 grasland- en 9 maispercelen heeft een te lage gemiddelde verdampingswaarde vergeleken met de overige klassen en deelgebieden.

Droogtegevoeligheidsklasse 0 in deelgebied Brummen bestaat volgens de 1:50 000 bodemkaart geheel uit kalkhoudende ooivaaggronden (Rd90A: rivierkleigronden bestaande uit zware zavel en lichte klei). Deze liggen gedeeltelijk in de uiterwaarden van de IJssel. De aan deze bodemeenheden toegewezen k-h relatie maakt voor een flux van $2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ een maximale stijghoogte van 168 cm mogelijk. Uit de toelichting bij de 1:10 000 bodemkaart van het ruilverkavelingsgebied Steenderen (SCHOLTEN e.a., 1977) blijkt dat de bodemopbouw binnen droogtegevoeligheidsklasse 0 in werkelijkheid zeer heterogeen is. De ondergrond varieert van lichte klei tot grof zand met grind. In de uiterwaarden wisselen bovendien laaggelegen stroken af met hoger gelegen oeverwallen. Verder is in het grootste deel van deelgebied Brummen het peil van de IJssel van invloed op het grondwater. Het zal duidelijk zijn dat voor een beschrijving van de capillaire eigenschappen van deze gronden niet kan worden volstaan met één k-h relatie.

De heterogene bodemopbouw, de onregelmatige maaiveldshoogte en de variatie in de grondwaterstand onder invloed van de IJssel in het deelgebied Brummen verklaren de optredende verschillen tussen de resultaten verkregen met modelberekeningen (de droogtegevoeligheidskaart) en de uit remote sensing opnamen afgeleide verdampingskaart.

7. SAMENVATTING EN CONCLUSIES

Door automatische verwerking van digitale reflectie- en warmtebeelden is een verdampingskaart samengesteld. Hiervoor zijn eenvoudige lineaire relaties afgeleid voor het omzetten van uit warmtebeelden afgeleide gewastemperaturen in 24-uurs verdampingswaarden.

In dit rapport zijn verdampingskaarten gepresenteerd van gebieden in oost Gelderland voor 30 juli 1982 en 17 juli 1983.

De nauwkeurigheid van de verkregen verdampingskaart wordt voor-

namelijk bepaald door de nauwkeurigheid van de gewasklassificatie. Grasland kon redelijk goed worden onderscheiden van mais. Verder is gebleken dat het grasland kon worden onderverdeeld in hoog (> 15 cm), middelhoog (5-15 cm) en laag (< 5 cm) grasland.

Vanwege de geringe bodembedekking kon voor laag (pas gemaaid) grasland niet voldoende nauwkeurig de temperatuur van het gewas zelf uit warmtebeelden worden afgeleid. De waarneming werd voornamelijk bepaald door de relatief hoge temperatuur van de kale grond. Voor laag grasland konden daarom geen verdampingswaarden worden bepaald. Dit betekent dat, wanneer van een gebied een kaartdekkend beeld nodig is, vaak meerdere opnamen moeten worden gemaakt.

Aan de hand van een vergelijking van de automatisch vervaardigde verdampingskaart met een met de hand vervaardigde kaart konden duidelijke verschillen tussen beide kaarten worden gesignaleerd. Met het oog op de objectiviteit van het resultaat en de snelheid van werken heeft de automatische kartering de voorkeur boven kartering met de hand. Bij een kartering met de hand verdwijnt bovendien informatie over de heterogeniteit binnen een perceel en worden aanwezige verdrogingspatronen afgevlakt.

Als gevolg van de drogere omstandigheden in het veld op 30 juli 1982 vergeleken met de situatie op 17 juli 1983 waren de verdampingswaarden op 30 juli 1982 over het algemeen lager dan die op 17 juli 1983. Door de overvloedige neerslag in het voorjaar van 1983 trad bovendien schade op door wateroverlast, hetgeen op de opnamen van 17 juli 1983 met name door het gewas mais waarneembaar was. Door de wateroverlast in het voorjaar is de maïsgroei op veel plaatsen niet of pas zeer laat op gang gekomen, waardoor de bodem op 17 juli vaak nog niet volledig door het gewas werd bedekt. Omdat onder die omstandigheden de waargenomen oppervlaktetemperatuur mede wordt bepaald door de relatief hoge temperatuur van de kale grond, is de gewasverdamping van dergelijke percelen enigszins onderschat.

De invloed van berekening is in een aantal gevallen waarneembaar op het warmtebeeld i.c. de verdampingskaart. Met name de percelen, die tijdens of kort vóór de vlucht zijn berekend, vertonen als gevolg van het relatief koude beregeningswater een oppervlaktetemperatuur die vaak enkele graden lager is dan de overeenkomstige referentietemperatuur bij potentiële verdamping. Wanneer de directe invloed van het koude beregeningswater op de stralingstemperatuur is verdwenen, zullen afhankelijk

van de weersomstandigheden nog gedurende tenminste enkele dagen de gewassen op de betreffende percelen potentieel verdampen.

Door een visuele interpretatie van de verkregen verdampingskaart werd slechts beperkte informatie verkregen over de invloed van de grondwateronttrekking door het pompstation 't Klooster op de verdamping van landbouwgewassen. Een systematische analyse van de verdamping per gewassoort, bodemtype en grondwatertrap in relatie tot de afstand tot het centrum van de onttrekking leverde wel het gewenste resultaat op. Tijdens deze analyse vertoonde één bepaald gebied afwijkende resultaten. Nadere veldwaarnemingen wezen uit dat de grondwaterstand in het betreffende gebied 30 à 60 cm lager was dan in een vergelijkbaar gebied. Het is niet uitgesloten dat de grondwatertrap op de bodemkaart hier niet (meer) overeenkomt met de situatie in het veld. Voor het vaststellen van de grondwatertrap zijn echter grondwaterstandsmetingen over een groot aantal (minimaal 8) jaren nodig.

Voor het vaststellen van opbrengstreducties als gevolg van grondwateronttrekking zijn gegevens over de verdamping(sreductie) gedurende een heel groeiseizoen nodig. Met hydrologische modellen als SWATRE kan voor een beperkt aantal lokaties de verdamping gedurende een heel groeiseizoen worden gesimuleerd. Op de vluchtdagen moeten voor deze lokaties de resultaten verkregen met dergelijke modellen overeenstemmen met de remote sensing benadering. Door toepassing van remote sensing opnamen wordt de extrapolatie van modelberekeningen naar andere percelen beter onderbouwd. Bovendien kunnen op de vluchtdagen de modelresultaten worden geverifieerd.

Voor een aantal gebieden in oost Gelderland zijn de verdampingskaarten vergeleken met droogtegevoeligheidskaarten. De droogtegevoeligheidskaarten zijn vervaardigd op basis van de 1:50 000 bodem- en grondwatertrappenkaart. Als gevolg van het voorkomen van kaartonzuiverheden op de 1:50 000 kaarten, de variatie in bodemfysische eigenschappen binnen een bodemeenheid en de variatie in grondwaterstanden binnen een grondwatertrap is de spreiding in verdampingswaarden binnen verschillende droogtegevoeligheidsklassen groot. De droogtegevoeligheidskaarten lenen zich niet voor het beoordelen van percelen. Deze kaarten zijn overzichtskaarten en dus niet geschikt voor gedetailleerd gebruik.

LITERATUUR

- BELMANS, G., J.G. WESSELING and R.A. FEDDES, 1983. Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE. *Journal of Hydrology* 63, 271-286.
- BLOEMEN, G.W., 1980. Calculation of hydraulic conductivities of soils from texture and organic matter content. *Techn. Bull. no. 120 ICW*, Wageningen.
- BOUMA, J. (ed.), 1979. Overzichtskaarten met betrekking tot een aantal aspecten van de waterhuishouding in Gelderland. Basisrapport Commissie Bestudering Waterhuishouding Gelderland Rapport nr. 1434 Stiboka, Wageningen.
- LAAT, P.J.M. de en R.H.C.M. AWATER, 1978, Groundwater flow and evapotranspiration. A simulation model. Part 1: Theory. Basisrapport ten behoeve van de Commissie Bestudering Waterhuishouding Gelderland. Provinciale Waterstaat Gelderland, Arnhem.
- 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., 1983. Remote Sensing vluchten in 1982 en 1983: organisatorische aspecten. Deelrapport 2. Remote Sensing Studieproject Oost-Gelderland. Nota 1432 ICW, Wageningen.
- en J.M.M. BOUWMANS, 1984. Remote sensing als hulpmiddel bij wateroverlast en droogte. *Landbouwkundig Tijdschrift* 19 nr. 2, 13-17.
- , E.H. SMIDT and H.A.M. THUNNISSEN, 1985. Estimation of regional evapotranspiration of arable crops from thermal infrared images. *Int. J. Remote Sensing* (in press).
- PROJECTTEAM REMOTE SENSING STUDIEPROJECT, 1981. Beschrijving van het onderzoek. Deelrapport 1. Remote Sensing Studieproject Oost-Gelderland Nota 1296 ICW, Wageningen.

SCHOLTEN, A., G. EBBERS en G. RUTTEN, 1977. Ruilverkavelingsgebied Steenderen. De bodemgesteldheid. Rapport nr.1270 Stiboka, Wageningen.

SOER, G.J.R., 1977. The TERGRA model-mathematical model for the simulation of the daily behaviour of crop surface temperature and actual evapotranspiration. Nota 1014 ICW, Wageningen.

———, 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 1348 ICW, Wageningen.

———, 1984a. Hydrologische beschrijvingen van een studiegebied rond het pompstation 't Klooster: toepassing van hydrologische modellen en remote sensing. Deelrapport 4. Remote Sensing Studieproject Oost-Gelderland. Nota 1542 ICW, Wageningen.

———, 1984b. Eenvoudige methode voor de bepaling van de regionale dagverdamping van een gewas met remote sensing. Deelrapport 6. Remote Sensing Studieproject Oost-Gelderland. Nota 1580 ICW, Wageningen.

———, 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.). Deelrapport 3. Remote Sensing Studieproject Oost-Gelderland. Nota 1525 ICW, Wageningen.

VEGT, J., 1982. Berekening rondom het pompstation 't Klooster (niet gepubliceerd).