

32/mub(191)24)

**De hydrologische interpretatie voor het proefgebied Gasselternijveen
met remote sensing en hydrologische modellen**

A.J. Bijkerk

**BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW**

Rapport 191

DLO-Staring Centrum, Wageningen, 1992



8 MEI 1992

18n553074

*

REFERAAT

Bijkerk, A.J., 1992. *De hydrologische interpretatie voor het proefgebied Gasselternijveen met remote sensing en hydrologische modellen*. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 191; 98 blz.; 19 fig.; 25 tab.; 7 aanh.

Voor de hydrologische interpretatie van het proefgebied Gasselternijveen zijn met remote-sensingtechnieken een gebiedsdekkende grondgebruiksinventarisatie en verdampingskartering uitgevoerd. False-colourfoto's en reflectiebeelden van satelliet- en vliegtuigscanner-opnamen leveren informatie voor een automatische gewasclassificatie. Gecombineerd met een warmtebeeld valt hieruit een verdampingsbeeld af te leiden. Een visuele vergelijking tussen de gesimuleerde verdamping en die welke is afgeleid met remote-sensingtechnieken, levert meer informatie op dan een zuiver kwantitatieve vergelijking. Geen eenduidige relaties werden gevonden tussen bodemeenheden en grondwatertrappen met remote-sensingparameters. Daardoor is de kartering van kwel- en wegzijgingsgebieden alleen gebaseerd op remote-sensinginformatie niet haalbaar.

Trefwoorden: hydrologische onderzoek, remote-sensingtechnieken, hydrologische modellen

ISSN 0927-4499

©1992 DLO-Staring Centrum, Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied (SC-DLO)
Postbus 125, 6700 AC Wageningen
Tel.: 08370-74200; telefax: 08370-24812; telex: 75230 VISI-NL

Het DLO-Staring Centrum is een voortzetting van: het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (ICW), het Instituut voor Onderzoek van Bestrijdingsmiddelen, afd. Milieu (IOB), de Afd. Landschapsbouw van het Rijksinstituut voor Onderzoek in de Bos- en Landschapsbouw "De Dorschkamp" (LB), en de Stichting voor Bodemkartering (STIBOKA).

Het DLO-Staring Centrum aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van het DLO-Staring Centrum.

INHOUD

	Blz.
WOORD VOORAF	9
SAMENVATTING	11
1 INLEIDING	13
2 GEBIEDSBESCHRIJVING	15
2.1 Topografie	15
2.2 Geologie	15
2.3 Ontginningsgeschiedenis	17
3 THEORETISCHE ACHTERGRONDEN VAN VERDAMPING EN REFLECTIE	19
3.1 Electromagnetische straling, gewastemperatuur en verdamping	19
3.2 Reflectie van natuurlijke oppervlaktes en het begrip Vegetatie-index	24
4 REMOTE-SENSINGOPNAMEN EN VELDGEGEVENS	27
4.1 Algemeen	27
4.2 Waarnemingen op 2 april 1989	28
4.3 Waarnemingen op 20 juni 1989	28
4.4 Waarnemingen op 23 augustus 1989	29
5 AFLEIDING THEMAKAARTEN MET BEHULP VAN REMOTE SENSING	31
5.1 Bewerking van de ruwe data	31
5.1.1 Radiometrische correctie	32
5.1.2 Geometrische correctie	32
5.2 Grondgebruiksinventarisatie	33
5.2.1 Multitemporele effecten	34
5.2.2 Gewasclassificatie	34
5.3 Afleiding verdampingsbeeld	35
5.3.1 Calibratie scanneropnamen met referentiemetingen	35
5.3.2 Bepaling van T_c^* , $U(2)$ en B_r	37
5.4 Resultaten	39
5.4.1 Classificatieresultaten	39
5.4.2 Verdampingsresultaten	43
6 SIMULATIE VAN WATERTRANSPORT IN DE ONVERZADIGDE ZONE	47
6.1 Het simulatiemodel SWACROP	47
6.1.1 Grondwaterstroming in de onverzadigde zone	47
6.1.2 Randvoorwaarden aan de onderkant van het systeem	48
6.1.3 Randvoorwaarden aan de bovenkant van het systeem	49

	blz.
6.1.4 Invoergegevens voor de bodemfysische en meteorologische parameters	52
6.1.5 Invoergegevens voor het gewas	53
6.1.6 Invoergegevens voor de hydrologie	57
6.1.7 Invoergegevens voor de discretisatie van het systeem	58
6.1.8 Overige invoergegevens	59
6.2 Resultaten	59
 7 HYDROLOGISCHE INTERPRETATIE DEELGEBIED GASSELTERNIJVEEN	 61
7.1 Werkwijze	61
7.2 Resultaten	62
7.2.1 Dynamiek van de waterhuishouding	62
7.2.2 Verdampingsbeeld en grondwatertrappenkaart	63
7.2.3 Verdampingsbeeld en bodemkaart	65
7.2.4 Verdampingsbeeld en gesimuleerde verdamping	68
7.2.5 Verdampingsbeeld en kwel/wegzijgingskaart naar kwelindicatoren	69
 8 CONCLUSIES EN OPMERKINGEN	 73
 LITERATUUR	 77
 AANHANGSELS	
1 Korte toelichting op de "Maximum Likelihood"-classificatie (MLHD)	81
2 De per hoofdeenheid toegewezen legenda-eenheden	83
3 De opbouw van de hoofdeenheden door de bouwstenen	85
4 De stijghoogten van de bouwstenen	89
5 Bij de SWACROP-berekeningen toegepaste invoerfile met meteorologische gegevens (Eelde) en neerslaggegevens (Gieterveen)	91
6 Het globale verloop van de worteldiepte bij diverse gewassen op veldpodzol- en dampodzolgronden gedurende het groeiseizoen	95
7 Het verloop van de gemeten grondwaterstand in de peilbuizen	97
 FIGUREN	
1 Topografische ligging van het proefgebied Gasselternijveen	14
2 Reflectiepercentages van de bodem bij verschillende vochtgehalten	24
3 Verdeling van straling bij verschillende golflengten over reflectie, absorptie en transmissie als gevolg van de interactie met een groen blad	25
4 Fictieve bijdrage van verschillende bladlagen in de totale reflectie van zichtbaar licht en Nabij Infrarood	25
5 Afwijkingen in radiometrie als gevolg van schaduwwerking	31
6 De relatie tussen de stralingstemperatuur van de scanner en die van het gewas op 20 juni 1989	36
7 De relatie tussen de stralingstemperatuur van de scanner en die van het gewas op 23 augustus 1989	37
8 Het radiometrisch en geometrisch ongecorrigeerde augustus reflectiebeeld van het proefgebied Gasselternijveen	40

9	Het radiometrisch en geometrisch gecorrigeerde augustus reflectiebeeld van het proefgebied Gasselternijveen	40
10	Referentiegegevens van het proefgebied Gasselternijveen	44
11	Classificatie als resultaat van de objectgerichte classificatie	44
12	Relatieve verdamping van het proefgebied Gasselternijveen op 20 juni 1989 voor gras en granen	45
13	Relatieve verdamping van het proefgebied Gasselternijveen op 23 augustus 1989 voor gras, maïs, aardappelen en bieten	45
14	Verschillende mogelijkheden voor de onderrandvoorwaarden bij de simulering met het model SWACROP	49
15	Het verloop van de Sink term variabele als functie van de drukhoogte	54
16	Relatieve verdamping van het proefgebied Gasselternijveen op 20 juni 1989 volgens simulaties met het model SWACROP	60
17	Relatieve verdamping van het proefgebied Gasselternijveen op 23 augustus 1989 volgens simulaties met het model SWACROP	60
18	Relatieve verdamping op 20 juni 1989 gecorrigeerd voor wateroverlast	64
19	Relatieve verdamping op 23 augustus 1989 gecorrigeerd voor 64 wateroverlast	64

TABELLEN

1	Albedo voor enkele oppervlakken en vegetatiesoorten	20
2	Emissiecoëfficiënt voor enkele oppervlakken	21
3	Gravimetrisch en volumetrisch vochtgehalte van enkele percelen in het onderzoeksgebied Gasselternijveen	28
4	Temperatuur van percelen met potentieel verdampend gewas in Digital Counts en graden Celcius, afgeleid uit het warmtebeeld voor de vluchtdagen 20 juni en 23 augustus	37
5	De waarden behorend bij verschillende gewassen met standaardhoogten voor een windsnelheid U_2 van $1,81 \text{ m.s}^{-1}$	39
6	Classificatieresultaat met gebruik van Daedalusbanden 5, 7, 9 (juni) en SPOT-banden 1, 2, 3 (mei)	41
7	Classificatieresultaat met gebruik van de VI van SPOT, en SPOT- en Daedalusreflectiebanden van juni en augustus	41
8	Classificatieresultaat met gebruik van de VI van SPOT, en SPOT- en Daedalusreflectiebanden van juni en augustus in procenten na een objectclassificatie	42
9	De gemodelleerde gewassen met de gebruikte zaai- en oogstdata	53
10	De drukhoogten die het verloop van de Sink term variabele beschrijven van de gemodelleerde gewassen	54
11	Gebruikte waarden voor regressiecoëfficiënten voor de berekening van de LAI	55
12	De bodembedekkingsgraad op enkele dagen gedurende het groeiseizoen. Het dagnummer is het "Julian Daynumber"	55
13	De gewasfactoren voor aardappelen, gras, graan en maïs per decade	56

14	Bodem-hydrologische eenheden per bodemeenheid, grondwatertrap, hoofdeenheid volgens Tus-10-plan, eventuele associaties van hoofdeenheden en peilbuisgegevens	58
15	Verdeling van de natte plekken en overige kale grond op 20 mei 1989 over de verdampingsklassen op 23 augustus 1989	62
16	Verdeling van de natte plekken en de overige kale grond op 20 mei 1989 over de grondwatertrappen zoals die gekarteerd zijn op de gereviseerde bodemkaart	63
17	Variatie van de grondwatertrappen over de verdampingsklassen op 20 juni 1989	63
18	Variatie van de grondwatertrappen over de verdampingsklassen op 23 augustus 1989	63
19	Verdeling in procenten van de bodemeenheden ingedeeld naar hoofdeenheden over de verdampingsklassen op 20 juni 1989	66
20	Verdeling in procenten van de bodemeenheden ingedeeld naar hoofdeenheden over de verdampingsklassen op 23 augustus 1989	67
21	Kwantitatieve vergelijking tussen het verdampingsbeeld en de gesimuleerde verdamping voor 20 juni 1989	69
22	Kwantitatieve vergelijking tussen het verdampingsbeeld en de gesimuleerde verdamping voor 23 augustus 1989	69
23	Verdeling van de locaties met kwelindicatoren over de verschillen de grondwatertrappen zoals die gekarteerd zijn op de gereviseerde bodemkaart	70
24	Verdeling van de locaties van kwelindicatoren over de verdampingsklassen op 20 juni 1989	71
25	Verdeling van de locaties van kwelindicatoren over de verdampingsklassen op 23 augustus 1989	71

WOORD VOORAF

Voor het remote-sensingproject Drenthe, waarbij toepassingsmogelijkheden worden onderzocht om provinciale waterhuishoudingsplannen op te stellen, is als deelstudie voor het Waterhuishoudingsplan Drenthe een hydrologisch onderzoek uitgevoerd in het onderzoeksgebied Gasselternijveen. In 1989 zijn de benodigde vliegtuig remote-sensingopnamen gemaakt. Daarna is deze deelstudie uitgevoerd in de periode van juli 1990 tot maart 1991. In de vervolgstudie wordt de ontwikkelde methodiek van gewas- en verdampingskartering op provinciale schaal toegepast.

De provincie Drenthe leverde een financiële bijdrage en subsidie werd verkregen in het kader van het Nationaal Remote Sensing Programma dat wordt gecoördineerd door de Beleids Commissie Remote Sensing.

Dit rapport maakt deel uit van een reeks van vier deelrapporten die in het kader van het remote-sensingproject Drenthe verschijnen. De andere drie deelrapporten, waarvan bij deze rapportage gebruik is gemaakt, zijn nog in voorbereiding. Het betreft een rapport van H. van Middelaar over de veldverwerking op provinciale schaal, en rapport van K. de Zeeuw over hydrologisch onderzoek in Oost-Drenthe en een rapport van T.W. Hobma over het ecohydrologisch onderzoek.

SAMENVATTING

Voor het remote-sensingproject Drenthe dienen een gebiedsdekkende gewasclassificatie en verdampingskaart van de provincie gemaakt te worden. Het doel van het onderzoek is om in samenhang met de grondwatertrappenkaart, de bodemkaart, model-simulaties en locaties van kwelindicatoren inzicht te krijgen in de hydrologische situatie. Hierbij valt de nadruk op de dynamiek van de waterhuishouding, het vochtleverend vermogen bij verschillende grondwatertrappen (Gt) en bodemeenheden, en de mogelijkheid voor een kwel/wegzijgingskartering.

Dit onderzoek heeft betrekking op het proefgebied Gasselternijveen. Het betreft een landbouwgebied van ongeveer 1100 ha in de Drentse veenkoloniën. De voornaamste landbouwgewassen zijn aardappelen, bieten en graan.

Tijdens het groeiseizoen van 1989 zijn 3 remote-sensingvluchten uitgevoerd: op 2 april zijn false colour-foto's opgenomen en op 20 juni en 23 augustus false colour-foto's en digitale reflectie- en warmtebeelden. Op de eerste 2 data zijn onder bijzonder goede weersomstandigheden opnamen gemaakt van de gehele provincie. Op 23 augustus konden vanwege de bewolking alleen maar opnamen worden gemaakt van het oostelijke deel van de provincie. Behalve van de vliegtuigopnamen is in dit onderzoek gebruik gemaakt van een SPOT-satellietopname van 22 mei 1989.

De beschikbare vliegtuig- en satelliet-reflectiebeelden zijn verwerkt tot een grondgebruikskaart. Vervolgens zijn de warmtebeelden van 20 juni en 23 augustus verwerkt tot verdampingsbeelden. Hierbij is de verdamping gekarteerd voor die gewassen, die op het opnametijdstip de bodem volledig bedekken. Voor 20 juni is een verdampingsbeeld gemaakt voor de gewassen gras en graan en voor 23 augustus voor gras, aardappelen, bieten en maïs.

De verdampingsbeelden zijn in combinatie met de beschikbare false colour-foto's gebruikt bij de hydrologische beschrijving van de provincie. De verdampingsbeelden geven aan, waar reducties in verdamping optreden. Eventuele reducties in verdamping duiden op problemen met de watervoorziening in de landbouw. De false colour-foto's van 2 april geven met name aanvullend informatie over het optreden van wateroverlast.

De verdamping is gesimuleerd met een grondwaterstromingsmodel voor de onverzadigde zone, namelijk de nieuwste versie van SWATRE, SWACROP. De simulering heeft plaatsgevonden per bodem-hydrologische eenheid en gewas. Een bodemhydrologische eenheid is een combinatie van grondwatertrap en hoofdeenheid. Een hoofdeenheid is een bodemeenheid die representatief is voor één of meer legenda-eenheden van de gereviseerde bodemkaart. De indeling van de legenda-eenheden aan de verschillende hoofdeenheden is gebaseerd op bodemfysisch onderzoek voor het tussen-10-plan.

Aan de bovenkant van het systeem vindt evaporatie en onttrekking door plantenwortels plaats. Deze onttrekking vindt bij de simulering op gelijke wijze plaats over de gehele

worteldiepte. De gewasafhankelijke parameters die ingevoerd moeten worden, hebben o.a. betrekking op het verloop van de "Sink" term, Leaf Area Index, bedekkingsgraad, gewasfactor en wortelgroei.

Als randvoorwaarde aan de onderkant van het systeem is de grondwaterstand genomen. Deze gegevens zijn ontleend aan metingen van het peilbuizenet van IGG/TNO. Binnen een bodemkundig-hydrologische eenheid worden de gemeten grondwaterstanden van een buis binnen die eenheid gebruikt. Bij onvoldoende gegevens zijn de waarden van de dichtstbijzijnde buis binnen die grondwatertrap gebruikt. Voor de meteorologische gegevens zijn meetgegevens van de meteostations Gieterveen en Eelde gebruikt.

De dynamiek van de waterhuishouding is onderzocht door een classificatie van plekken met hoog bodemvochtgehalte te maken op het SPOT beeld en deze te vergelijken met zowel de verdampings- als de grondwatertrappenkaart. De groeiachterstand van gewassen bij een hoge grondwaterstand ($\text{GHG} < 40 \text{ cm} - \text{mv.}$) bleek zo sterk, dat op de verdampingskaart van 23 augustus voor een fors areaal geen verdamping kon worden gekarteerd en een nieuwe klasse, wateroverlast, moest worden ingevoerd. Voor de verdampingskaart van 20 juni bleek dit in veel mindere mate het geval. Het ging hier slechts om enkele locaties waar zomergraan verbouwd werd. Met de gecorrigeerde verdampingskaarten zijn vervolgens vergelijkingen gemaakt met de bodemkaart, de simulatiekaart en een kaart met de locaties van kwelindicatoren.

Bij de vergelijking met de bodemkaart is eerst gecorrigeerd voor de invloeden van de verschillende Gt's door een verdamping te berekenen per bodemeenheid aan de hand van de gemiddelde verdamping per Gt en de verdeling van die bodemeenheid over de verschillende Gt's. De oorzaak van verschillen in verdamping kan liggen aan de bodemfysische eigenschappen van de bodemeenheid of aan deze eigenschappen in combinatie met een Gt.

Bij kwantitatieve vergelijking van de gesimuleerde verdampingskaart is in de extreme verdampingsklassen enige correlatie te vinden, maar over het algemeen is de gesimuleerde verdamping veel hoger dan die berekend met Remote Sensing door het schaalverschil. Bij de simulatie gaat het om bodem-hydrologische eenheden. Kleine lokale afwijkingen komen niet voor, terwijl de Remote Sensing op pixelschaal deze effecten wel registreert. Patronen in de verschillende verdampingsbeelden komen wel overeen. Een visuele interpretatie levert dan ook meer informatie op.

De vergelijking met de kaart met locaties van kwelindicatoren is interessant, omdat het de mogelijkheid van kwelkartering in dit gebied aangeeft. Om de invloed van kwel op de grondwatertrap te onderzoeken is eveneens een vergelijking gemaakt tussen de plaatsen met kwelindicatoren en de grondwatertrappenkaart, zowel voor een kaart met locaties van alle kwelindicatoren als voor alleen die van holpijp. Alle kwelindicatoren zijn eerder verwarrend dan verhelderend. Zeer waarschijnlijk valt door de zeer specifieke omstandigheden van de verschillende kwelindicatoren en daarmee van de kwel nauwelijks iets te merken van de kwelstroom(verschillen) op maaiveldniveau en daarmee in de gewasverdamping. Door de sterke kwelstroom zijn de resultaten met alleen holpijp als kwelindicator beter.

1 INLEIDING

In 1989 werden met het uitvoeren van het remote-sensingproject Drenthe de mogelijkheden van remote sensing onderzocht op het gebied van de waterhuishouding voor het opstellen van het provinciaal waterhuishoudingsplan. Met remote-sensing-opnamen werden voor de hele provincie Drenthe een gewas- en verdampingskartering uitgevoerd. Binnen de provincie zijn vier deelgebieden aangewezen voor het veldwerk. Eén daarvan is het gebied rond het dorp Gasselternijveen. Dit verslag behandelt de verdampingskartering van dit proefgebied. Ook worden vergelijkingen gemaakt met verdampingswaarden zoals die gesimuleerd worden met het model SWACROP en andere kaarten die de hydrologie en bodem betreffen. Het doel hiervan is inzicht te krijgen in de hydrologische situatie en de mogelijkheid te onderzoeken een kwelkartering uit te voeren met behulp van remote-sensingtechnieken voor dit gebied.

Gasselternijveen ligt in de Drentse veenkoloniën. In het proefgebied komen veengronden, al dan niet met een koloniaal dek, en podzolgronden voor. De belangrijkste gewassen zijn aardappelen, granen en bieten.

In dit onderzoek is gebruik gemaakt van vliegtuig- en satelliet remote-sensing-opnamen, die betrekking hebben op het groeiseizoen van 1989. Behalve van digitale reflectie- en warmtebeelden is gebruik gemaakt van false colour-fotografie.

Hoofdstuk 2 geeft een beschrijving van het proefgebied en de ontstaansgeschiedenis van het huidige veenkoloniale landschap. In hoofdstuk 3 wordt ingegaan op de achtergronden van verdamping en reflectie. Hierbij komt de relatie met netto-straling en de gewastemperatuur aan de orde. Vervolgens wordt in hoofdstuk 4 een overzicht gegeven van de gemaakte remote-sensingopnamen en de tijdens de opnamen verzamelde veldgegevens. In hoofdstuk 5 wordt de beeldverwerking besproken. Achtereenvolgens worden de verschillende correcties, de gevolgde werkwijze om tot een voldoende nauwkeurige gewasclassificatie te komen en de verdampingskartering toegelicht. Hoofdstuk 6 gaat over de simulering van het watertransport in de onverzadigde zone. Het simulatiemodel SWACROP wordt beschreven evenals de invoergegevens en de resultaten. In hoofdstuk 7 wordt ingegaan op de hydrologische interpretatie van het proefgebied. Hierbij komt de dynamiek van de waterhuishouding aan de orde en worden de verdampingsbeelden, afgeleid uit de remote-sensingopnamen, vergeleken met de grondwatertrappenkaart, de bodemkaart, de gesimuleerde verdamping en de locaties van kwelindicatoren. Hierna volgen in hoofdstuk 8 de conclusies en opmerkingen, waarbij zowel de verdampingskartering en de simulatie van de verdamping als de vergelijking met de bestaande kaarten uit hoofdstuk 7 aan de orde komen. Tenslotte volgen een lijst met publikaties en de aanhangsels.

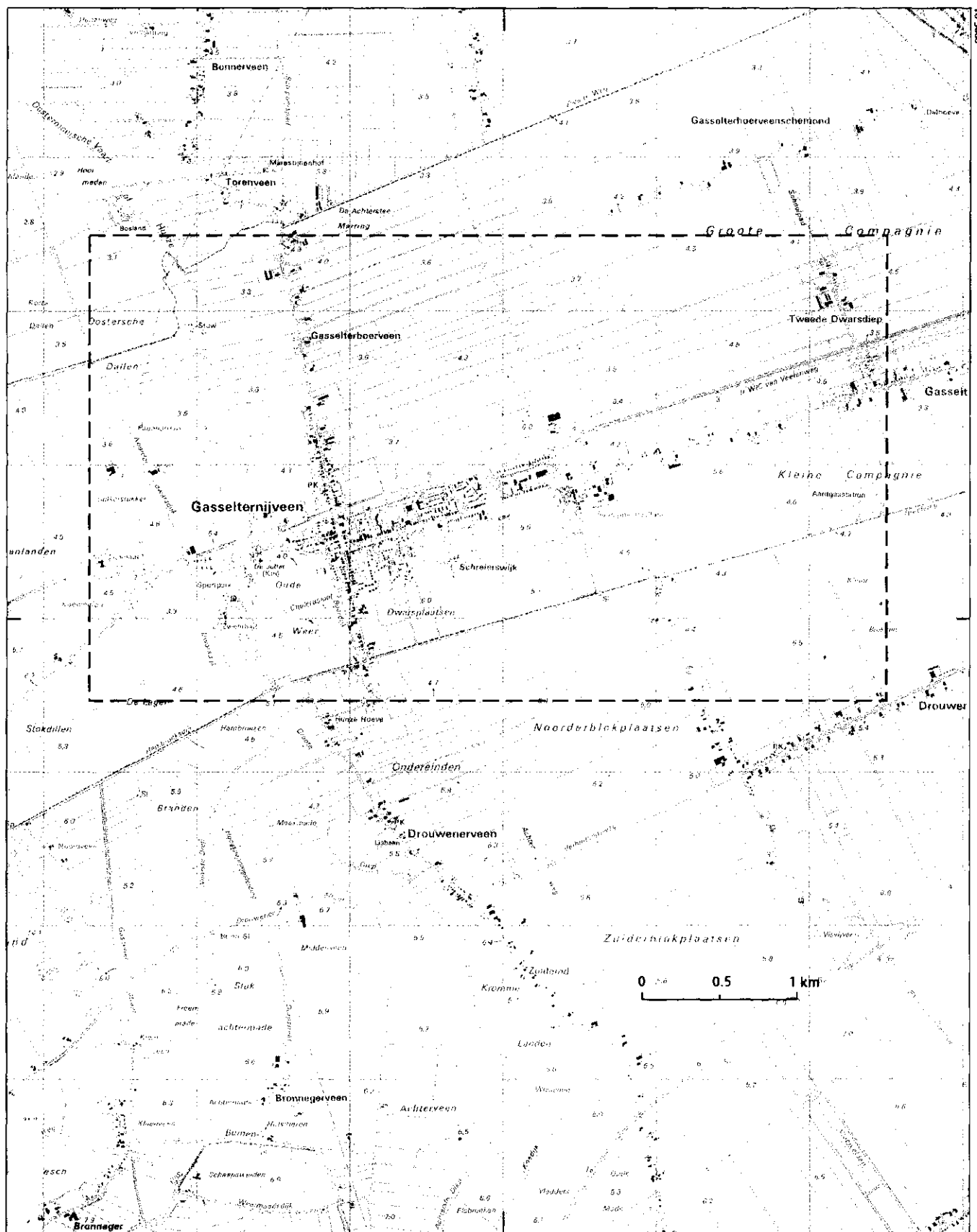


Fig. 1 Topografische ligging van het proefgebied Gasselternijveen.

2 GEBIEDSBESCHRIJVING

2.1 Topografie

Het onderzoeksgebied bevindt zich rond het dorp Gasselternijveen op de rand van het Drentse veenkoloniale gebied en het dal van de Hunze (fig. 1). Dit stroomdal vormt de overgang van het veenkoloniale gebied naar de Hondsrug. De oppervlakte is 1500 ha waarvan ongeveer 1100 ha landbouwgrond is. De afwateringsrichting is noordwest. Kenmerkend is het zeer vlakke landschap. De bodem is opgebouwd uit een veenkoloniaal dek op een zwakgolvende ondergrond. Het landgebruik is voornamelijk akkerbouw. De belangrijkste gewassen zijn aardappelen (450 ha), bieten (200 ha) en granen (200 ha). Het areaal grasland neemt toe in de nabijheid van de Hondsrug.

Tussen de Hunze en het Stadskanaal zijn haaks op het Stadskanaal en aansluitend hierop de monden (diepen) gegraven. Tussen de monden zijn de wijken aangelegd. Dit stelsel van waterlopen was van oorsprong bedoeld om de ontoegankelijkheid van het grote hoogveencomplex, het Bourtanger Veen, op te heffen. Tegenwoordig zijn de monden en wijken alleen nog voor de waterhuishouding van belang. Door de manier van ontginning is de voor de veenkoloniale gronden zo kenmerkende perceelsvorm ontstaan: relatief zeer lang en smal.

De beschrijving van de geologie en ontginningsgeschiedenis is ontleend aan de Bodemkaart van Nederland, 1977.

2.2 Geologie

De afzettingen die van invloed zijn op de landschapsvorm en de bodemgesteldheid zijn van pleistocene en holocene oorsprong. De klimaatsomstandigheden en veranderingen daarvan in die perioden waren zo afwijkend van de voorgaande tijd dat ze ook van grote invloed waren op de morfologie en de huidige hydrologische situatie.

Aan het begin van het Pleistoceen is door rivieren een grofzandig pakket gedeponneerd. De bovenkant van deze afzetting ligt tussen 10 m-NAP en 30 m-NAP. Het Pleistoceen wordt gekenmerkt door een afwisseling van koude en warme perioden, de glacialen en interglacialen. Tijdens de glacialen kwam het landijs vanaf Scandinavië en de Baltische streek naar noordwest Europa.

Of tijdens de eerste koude periode, het Elsterien, deze streek bedekt is geweest met ijs, is niet zeker. Wel dateert uit deze periode een in dikte sterk variërend pakket van fijne tot zeer fijne zanden met klei en leem, en plaatselijk grof zand met grind. Dit pakket bedekt de onderliggende grove rivierzanden. De fijne zanden zijn van eolische oorsprong. Het geheel vormt de Formatie van Peelo.

Tijdens de volgende glaciale periode, het Saalien, is een gedeelte van Nederland,

waaronder dit gedeelte, vergletsjerd. In eerste instantie kwam het ijs via grote rivierdalen uit noordelijke richting. Later was de richting meer zuidwest gericht. De verschillende fasen van de vergletsjering worden gekenmerkt door verschillende stuwwallencomplexen. Het landijs bracht zowel grote rotsblokken als kleine zand- en kleideeltjes mee. Deze kwamen uit de fluviatiele afzettingen waar het ijs overheen stroomde. Door de ijsbeweging werd het onderliggende materiaal vermengd tot een massa van keien, zand en leem. Samen met het materiaal dat zich op en in de ijsmassa bevond en dat vrijkwam na het smelten van het ijs, vormt deze morene de keileem. Alle afzettingen die tijdens of door de ijsbedekking zijn ontstaan, vormen samen de Formatie van Drente.

Tijdens het terugschrijden van het ijsfront heeft enige stagnatie plaatsgevonden. Tijdens deze periode heeft het oerstroomdal van de Hunze smeltwater afgevoerd. Eventueel aanwezige keileem ten oosten van de Hondsrug moet hierdoor zijn verdwenen.

In de hierna volgende warmere periode trad een stijging van de zeespiegel op door het smelten van het landijs. De zee vulde onder andere het Hunzedal en er vond sedimentatie plaats van kleiig materiaal. Op enkele plaatsen ontstond vegetatie en vond veenvorming plaats. In deze warme tijd vond ook een diepgaande ontkalking plaats van het keileem, wat nu nog te merken valt aan de geringe stugheid en soms lager kleigehalte van de bovenste 50-100 cm.

Gedurende de hierna volgende ijstijd, het Weichselien, heeft het landijs Nederland niet bereikt. Het had wel een sterke invloed op het klimaat en er heersten periglaciaire omstandigheden. De zeespiegel was laag door de grote hoeveelheden landijs. Ondanks de lage temperatuur was het tamelijk vochtig. Onder deze omstandigheden vond door erosie een sterke aantasting plaats van het Drentse keileemplateau. De Hondsrug, de oostelijke rand van het keileemplateau, werd voornamelijk aangetast door terugschrijdende erosie vanuit het Hunzedal.

Gedurende het Weichselien werd het bijzonder koud en droog. Van vegetatie was nauwelijks sprake. Er heerste een polair woestijnklimaat en de ondergrond was permanent bevroren. Erosie of sedimentatie vond nauwelijks plaats. Uit deze fase van het Weichselien dateert slechts een dunne grindlaag.

In het laatste gedeelte van het Weichselien bleef het tamelijk droog, maar werd het warmer. In deze periode zijn grote hoeveelheden zand verplaatst. Deze eolische zanden werden opgenomen in het geërodeerde keileemgebied en de beekdalen waar het los en droog aan de oppervlakte lag. Het zand kwam terecht op vochtige en begroeide plaatsen. De hierdoor ontstane dekzanden komen in dit gebied over een groot gedeelte tot aan het maaiveld voor. De dikte is doorgaans 60-150 cm. Op de Hondsrug is het dekzand meestal dunner dan 120 cm. In de zijdalen van de Hunze is dit pakket meestal veel dikker. Dat komt door de gunstige ligging ten opzichte van de overheersende westelijke windrichting. In het Hunzedal ligt een brede dekzandgordel bestaande uit lage zandruggen. Dit materiaal is onder andere afkomstig van de Hondsrug. In de depressies tussen de ruggen ontwikkelde zich veen evenals in de kwelzone aan de voet van de Hondsrug. Later zijn deze veenpakketten geheel of

gedeeltelijk ondergestoven met materiaal uit de eerder ontstane dekzandruggen. Ten oosten van de Hunze, waar tegenwoordig de veenkoloniën liggen, is ook dekzand afgezet. Zij vormen een reeks dekzandruggen die min of meer evenwijdig aan de Hunze liggen. Door de verstuiwing van het zand zijn afvoersystemen verstoord en ontstonden op uitgebreide schaal met water gevulde depressies. Dit bevorderde de veengroei sterk.

Het gestaag warmer worden en verbeteren van het klimaat markeert het begin van het Holoceen. In het begin vond nog enige verstuiwing plaats, maar door de oprukkende vegetatie werd dit proces tenslotte geheel beëindigd. Door het warme klimaat en de slechte afwateringssituatie waren de omstandigheden ideaal voor veengroei. Door het verschil in reliëf (dekzandruggen) ontstonden verschillende soorten veen. Het belangrijkste veen was het oude veenmosveen dat vanuit de laagst gelegen delen alle kanten opgroeide. Eerst werden de laaggelegen, met berken, dennen of gras begroeide zandgronden bedekt, maar na verloop van tijd waren ook de hoogste zandruggen met veen overgroeid. Het hierdoor ontstane grote hoogveengebied, het Bourtanger Veen, is tot in de zeventiende eeuw blijven bestaan.

2.3 Ontginningsgeschiedenis

De vervening is in dit gebied begonnen in de twaalfde eeuw. De ontginning vond aanvankelijk uitsluitend plaats aan de rand van het hoogveengebied. Het doel was behalve de brandstofwinning een uitbreiding van het landbouwareaal.

In de zeventiende eeuw is de systematische vervening op gang gekomen. Het doel was de brandstofvoorziening. De vervening vond plaats vanuit het noorden, waarbij omstreeks 1630 onder andere het Winschoterdiep ontstond. In het gebied rond Gasselternijveen was toen al een kleine, systematische ontginning op gang gekomen. In 1766 is begonnen met het graven van het Stadskanaal. Hierdoor werd ook in Drenthe op grote schaal ontginning mogelijk. De ontginningen vonden plaats vanaf de monden die vanaf het Stadskanaal het veen in werden gegraven.

De randveenontginningen begonnen vanaf de plek waar mensen zich reeds gevestigd hadden. Kenmerkend voor de randveenontginningen is het opstreckende karakter. De ontginning werd onafhankelijk van het naastliggende perceel uitgevoerd, waarbij de voortgang voornamelijk afhing van de behoefte aan brandstof voor eigen gebruik. Door de hoge grondwaterstand werd het veen niet altijd afgegraven tot op het zand. Voor het geschikt maken van de grond voor de landbouw werden stalmest en boerderijafval gebruikt.

De ontginning van het centrale veengebied vond systematischer plaats dan de randveenontginningen. Het werk begon met het graven van de hoofddiepen die met het voortschrijden van de ontginning elk jaar langer werden. Vervolgens werden loodrecht hierop de wijken aangelegd. De afstand tussen de wijken ligt doorgaans tussen de 150 en 200 m. De aanleg van een wijk begon met het graven van een sleuf van ongeveer 180 m in het veen (splitting) op de plaats waar de wijk moest komen

en met dezelfde breedte als de wijk. Vervolgens werd een jaar later de sleuf aan beide kanten uitgebreid zodat hij twee keer zo breed werd. Op die uitbreiding werd het zand gestort dat uit de te graven wijk kwam. De vervening vond plaats in stroken (in Drenthe tot 5 m breed) die evenwijdig aan de wijken werden aangelegd. Met het oog op de ingebruikname van het land als cultuurgrond was het niet zinvol om de ontginning tot beneden het wijkpeil voort te zetten. Ook liet men vast veen evenwijdig aan de wijk zitten om het instromen van water uit de hoger gelegen, afgegraven stukken tegen te gaan. Onder andere hierdoor is op korte afstand van elkaar een variërende diepte van het bodemprofiel ontstaan. Als de vervening afgelopen was werd, na enige egalisatie, het zand uit de wijken over het terrein verspreid.

Het profiel van de veengronden is niet ideaal voor de landbouw. Er zijn problemen met de worteldiepte door een zure ondergrond, waterstagnatie op ondoorlatende lagen, vast veen en een geringe draagkracht van de bovengrond. Om deze problemen tegen relatief lage kosten op te lossen is in het verleden op grote schaal gemengwoeld. Hierdoor vond vermenging plaats van het veen en het onderliggende zand. Het resultaat was dat storende lagen verbroken werden, de zuurgraad verminderde, de bewortelbaarheid toenam, door een daling van het humusgehalte in de bouwvoor de nachtvorstgevoeligheid minder werd en de overtollige neerslag sneller naar de ondergrond verdween.

3 THEORETISCHE ACHTERGRONDEN VAN VERDAMPING EN REFLECTIE

Zowel kale grond als gewassen verdampen water. Bij de plantverdamping (transpiratie) gaat het in tegenstelling tot de bodemverdamping (evaporatie) niet alleen om diffusie maar speelt ook het proces van de fotosynthese een belangrijke rol.

3.1 Electromagnetische straling, gewastemperatuur en verdamping

Uitgaande van de energiebalans aan het aardoppervlak is een relatie af te leiden tussen de gewastemperatuur en de verdamping. De energiebalans ziet er als volgt uit:

$$R_n = G + H + LE \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (1)$$

Hierin is: R_n = nettostraling (W.m^{-2})

G = warmtestroom in de bodem (W.m^{-2})

H = voelbare warmtestroom in de lucht (W.m^{-2})

L = verdampingswarmte van water (J.kg^{-1})

E = verdampingsflux ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)

De netto straling is op te splitsen in een kortgolvig en een langgolvig deel:

$$R_n = R_{si} - R_{so} + R_{li} - R_{lo} \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (2)$$

Hierin is: R_{si} = kortgolvige, inkomende stralingsflux (W.m^{-2})

R_{so} = kortgolvige, gereflecteerde stralingsflux (W.m^{-2})

R_{li} = langgolvige, inkomende stralingsflux (W.m^{-2})

R_{lo} = langgolvige, uitgaande stralingsflux (W.m^{-2})

Vastgesteld is dat de zon (oppervlaktetemperatuur is 6000 K) vrijwel alle straling (98%) uitzendt in het golflengtegebied van 0,25 tot 3 μm (Lillesand and Kiefer, 1979). Voor de langgolvige straling is met name de terrestrische straling van belang. De warmtestraling van een lichaam met een temperatuur gelijk aan de oppervlaktetemperatuur van de aarde vindt vrijwel geheel plaats in het traject van 3 tot 30 μm (Nieuwenhuis, 1986).

De dagelijkse hoeveelheid kortgolvige inkomende straling kan worden berekend met:

$$R_{si} = R_{sit} * (a + b * n/N) \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (3)$$

Hierin is: R_{sit} = kortgolvige, inkomende stralingsflux aan de top van de atmosfeer (W.m^{-2})

n = werkelijke zonnestraling aan het aardoppervlak (u.d^{-1})

N = maximum zonnestraling aan het aardoppervlak (u.d^{-1})

a, b = constanten, afhankelijk van de breedtegraad

R_{sit} en N zijn te berekenen of uit tabellen te halen. De factor n wordt gemeten op meteorologische stations. Voor a en b worden in Nederland (52 °NB) de waarden 0,2 resp. 0,55 gebruikt (Nieuwenhuis en Palland, 1982).

De hoeveelheid kortgolvlige gereflecteerde straling wordt weergegeven door:

$$R_{so} = \alpha * R_{si} \quad (W.m^{-2}) \quad (4)$$

Hierin is: α = reflectiecoëfficiënt of albedo (-)

De albedo kan sterk variëren voor verschillende oppervlakken (tabel 1).

Tabel 1 Albedo voor enkele oppervlakken en vegetatiesoorten

Oppervlak	Albedo (-)
water - 0 °NB	0,06
- 30 °NB, winter	0,09
- 30 °NB, zomer	0,06
- 60 °NB, winter	0,21
- 60 °NB, zomer	0,09
verse sneeuw	0,75-0,95
droog zand	0,35-0,45
nat zand	0,20-0,30
gemengd bos	0,10-0,20
naaldbos	0,05-0,15
landbouwgewassen	0,15-0,25

De stralingsflux van een zwarte straler (een voorwerp dat in alle golflengten de straling volledig absorbeert) kan worden beschreven door de formule van Stefan-Boltzmann. Voor de langgolvlige stralingsflux vinden we dan:

$$R_l = \sigma T_s^4 \quad (W.m^{-2}) \quad (5)$$

Hierin is: R_l = langgolvlige straling ($W.m^{-2}$)

σ = Stefan-Boltzmann constante ($5,67 \cdot 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$)

T_s = temperatuur van het aardoppervlak (K)

Het blijkt echter dat natuurlijke oppervlakken niet aan deze formule voldoen. Daarom moet in (5) een oppervlak afhankelijke constante worden ingevoerd, de emissiecoëfficiënt ϵ_s . Voor de langgolvlige uitgaande straling bij gewassen geldt dan:

$$R_{lo} = \epsilon_c \sigma T_c^4 \quad (W.m^{-2}) \quad (6)$$

Hierin is: ϵ_c = emissiecoëfficiënt van het gewasoppervlak (-)

T_c = temperatuur van het gewas (K)

De emissiecoëfficiënt hangt af van de golflengte en temperatuur en heeft voor objecten aan het aardoppervlak vrijwel altijd een waarde tussen 0,9 en 1,0. In tabel 2 staan de

waarden voor de emissiecoëfficiënt voor enkele oppervlakken.

Tabel 2 Emissiecoëfficiënt voor 3 natuurlijke oppervlakten (naar Lillesand and Kiefer, 1979)

Oppervlak	Emissiecoëfficiënt (-)
water	0,95
verse sneeuw	0,99
gras	0,90-0,98

Hiermee is ook de effectieve temperatuur van een voorwerp gedefinieerd. Dat is de temperatuur van een voorwerp zoals die op grond van vergelijking (6) en uitgaande van de gemeten straling berekend kan worden. Bij meting op afstand (vanuit een vliegtuig of satelliet) is de temperatuur gemeten door de scanner meestal lager dan de werkelijke temperatuur, omdat langgolvlige straling gedeeltelijk door de atmosfeer geabsorbeerd wordt. Dit houdt tevens in dat bij opnamen in het langgolvlige stralingstraject voor atmosferische absorptie gecorrigeerd dient te worden (par. 5.3.1).

De langgolvlige inkomende stralingsflux is de moeilijkste term om vast te stellen. Uitgaande van een wolkloze atmosfeer geldt:

$$R_{lih} = \epsilon_a \sigma T_a^4 \quad (W.m^{-2}) \quad (7)$$

Hierin is: R_{lih} = langgolvlige, inkomende stralingsflux zonder bewolking
($W.m^{-2}$)

ϵ_a = effectieve emissiecoëfficiënt van de atmosfeer (-)

T_a = effectieve temperatuur van de atmosfeer (K)

Brunt (1939) vond voor de waarde van ϵ_a :

$$\epsilon_a = c1 + c2\sqrt{e_a} \quad (-) \quad (8)$$

Hierin is: e_a = dampspanning (mbar)

$c1$ = constante (-)

$c2$ = constante ($mbar^{-0,5}$)

Onder Nederlandse omstandigheden worden voor $c1$ en $c2$ meestal de waarden 0,53 respectievelijk 0,067 aangenomen.

Als er bewolking is, moet hiervoor worden gecorrigeerd. Empirisch is de volgende formule opgesteld (Monteith, 1973):

$$\epsilon_{ac} = \epsilon_a (1 + n * c^2) \quad (-) \quad (9)$$

Hierin is: ϵ_{ac} = effectieve emissiecoëfficiënt van de atmosfeer bij bewolking (-)

c = fractie bewolking (-)

n = constante (-)

De waarde van n is 0,2 voor lage en 0,04 voor hoge (cirrus) bewolking.

Iets eenvoudiger is de aanpassing:

$$R_{li} = R_{lih} + d * c \quad (W.m^{-2}) \quad (10)$$

Hierin is: R_{li} = langgolvige inkomende stralingsflux bij bewolking ($W.m^{-2}$)
 d = constante ($W.m^{-2}$)

De waarde van d is 60 voor lage en 20 voor hoge (cirrus) bewolking.

Bij een goed van water voorzien oppervlak wordt het grootste gedeelte van de beschikbare energie R_n gebruikt voor de verdamping. Neemt de vochtvoorraad af dan zal ook de verdamping afnemen. Hierdoor stijgt de temperatuur en dat betekent een toename voor de voelbare warmtestroom H . Deze term is als volgt te definiëren (bijv. Feddes et al., 1978):

$$H = \rho * C_p (T_c - T_a)/r_a \quad (W.m^{-2}) \quad (11)$$

Hierin is: ρ = soortelijke massa van de lucht ($kg.m^{-3}$)
 C_p = soortelijke warmte van de lucht ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
 T_c = temperatuur van het oppervlak (gewas) (K)
 T_a = temperatuur van de atmosfeer (K)
 r_a = aerodynamische diffusieweerstand ($s.m^{-1}$)

Bij deze formulering wordt aangenomen dat de aerodynamische weerstand voor momentum (door wind) (r_{am}) gelijk is aan die voor warmte (r_{ah}) en waterdamp (r_{av}). Onderzoek heeft uitgewezen dat dit echter niet klopt (Thom, 1972; en Brutsaert, 1975), doordat de ruwheidslengtes Z_{om} , Z_{oh} en Z_{ov} totaal verschillend zijn. Alleen onder stabiele omstandigheden zijn de formules om r_{am} , r_{ah} en r_{av} te berekenen aan elkaar gelijk (Bastiaanssen et al., 1989).

De bodemwarmtestroom, G , is uit te drukken in de formule (Koorevaar et al., 1983):

$$G = -\lambda * dT/dz \quad (W.m^{-2}) \quad (12)$$

Hierin is: λ = warmtegeleidingsvermogen ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
 T = temperatuur in de bodem (K)
 z = verticale coördinaat (m) (pos. naar beneden)
 dT/dz = temperatuurgradiënt ($K.m^{-1}$)

Deze formule staat bekend als de Wet van Fourier.

Een combinatie van 1, 2, 3, 4, 6, 7, 10, 11 en 12 levert de volgende formule op (Soer, 1980):

$$LE = (1 - \alpha) * R_{sit} * (a + b * (n/N)) + \epsilon_a \sigma T_a^4 + d * c - \epsilon_c \sigma T_c^4 - \rho C_p * (T_c - T_a)/r_{ah} + \lambda * dT/dz \quad (W.m^{-2}) \quad (13)$$

Uit vergelijking (13) blijkt dat de verdamping afhankelijk is van meteorologische en gewasafhankelijke parameters en de gewastemperatuur. Voor de meteorologische data wordt aangenomen dat ze constant zijn voor een gebied. De gewasparameters worden verkregen door de interpretatie van de reflectiebeelden (zie par. 5.2.1). De gewastemperatuur kan worden afgeleid uit warmtebeelden (zie par. 5.3.1). Met vergelijking (13) kan de verdamping op het tijdstip van een scannervlucht worden berekend.

Om een verdampingsflux over de hele dag te kunnen berekenen met als uitgangspunt de verdamping tijdens het opnametijdstip is het TERGRA-model ontwikkeld (Soer, 1977). Uitgaande van een stationaire situatie en afwezigheid van bodemverdamping zijn de waterflux in de bodem en de plant gelijk aan de verdamping door de plant. Bij de beschrijving van de waterflux wordt onder andere gebruik gemaakt van de bladwaterpotentiaal (Pa) en aangezien die mede de dampdiffusieweerstand (s.m^{-1}) bepaalt, die weer van invloed is op de waterdampflux, zijn beide processen gekoppeld. De verdamping wordt berekend bij verschillende, over de dag variërende, drukhoogten in de wortelzone. Dit gecombineerd met de verdamping tijdens de opname levert een relatie op tussen de dagverdamping en de verdamping op het opnametijdstip. Voor nadere informatie over het TERGRA-model wordt verwezen naar Thunnissen (1984a).

De praktische toepassing van het model TERGRA is niet eenvoudig mede vanwege het grote aantal inputparameters. Jackson et al. (1977) gaven voor de relatie tussen de gewastemperatuur en de dagverdamping een eenvoudige empirische relatie:

$$LE^{24} = R_n^{24} - B * (T_c - T_a) \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (14)$$

Hierin is: LE^{24} = dagverdamping (W.m^{-2})

R_n^{24} = nettostraling gedurende 24 uur (W.m^{-2})

B = parameter afhankelijk van windsnelheid, gewasruwheid en atmosferische stabiliteit ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) Seguin en Itier, 1983)

Gebaseerd op de benadering van Jackson et al. stelde Thunnissen (1984b) voor de actuele gewastemperatuur te relateren aan de temperatuur van het gewas bij potentiële verdamping. In plaats van de benadering van JACKSON et al. stelde hij voor:

$$E^{24}/E_p^{24} = 1 - B_r * (T_c - T_c^*) \quad (-) \quad (15)$$

Hierin is: E^{24}/E_p^{24} = fractie relatieve dagverdamping over 24 uur (-)

B_r = calibratie constante (K^{-1})

T_c = scannertemperatuur van het gewas ($^{\circ}\text{C}$)

T_c^* = scannertemperatuur van het gewas bij optimale watervoorziening ($^{\circ}\text{C}$)

Vergelijking (15) wordt toegepast voor de kartering van de verdamping en is algemeen toepasbaar voor de vluchtdagen in Nederland. De waarde voor T_c en T_c^* wordt verkregen uit het warmtebeeld. Voor de bepaling van T_c^* is het noodzakelijk te weten waar gewassen optimaal van water voorzien zijn. In de praktijk wordt dus met temperatuurverschillen gewerkt die worden afgeleid uit een warmtebeeld. Op deze wijze worden aanzienlijk betrouwbaarder resultaten verkregen dan wanneer gewerkt wordt

met absolute gewastemperaturen. De waarde voor B_r hangt af van het gewas, enkele regressiecoëfficiënten en de windsnelheid (Thunnissen, 1984b). Het gewas wordt bepaald door de classificatie van het gewas aan de hand van gelijktijdig met het warmtebeeld opgenomen reflectiebeelden. De regressiecoëfficiënten zijn bepaald door berekeningen met het model TERGRA. De windsnelheid wordt bepaald via standaard meteodata.

3.2 Reflectie van natuurlijke oppervlaktes en het begrip Vegetatie-index

Een natuurlijk oppervlak reflecteert en transmittiert zonnestraling in meer of mindere mate in het golflengtetraject van 0,4 tot 3 μm . De reflectie bij golflengten groter dan 3 μm is vrijwel gelijk aan nul (Monteith, 1973).

De oppervlaktes van belang voor dit onderzoek zijn kale grond en vegetatie.

De reflectie van kale grond hangt voornamelijk af van het vocht- en organische-stofgehalte, de textuur en invalshoek van de inkomende straling. De reflectie neemt af bij toenemend vochtgehalte (fig. 2), omdat een deel van het licht nadat het door een bodemdeeltje is weerkaatst, door interne reflectie bij het grensvlak waterfilm-lucht wordt weggevangen. Bij toenemende golflengte neemt de reflectie toe tot het maximum tussen 1 en 2 μm . Als water aanwezig is, is dat te merken aan de twee lokale minima bij 1,45 en 1,95 μm .

Uit onderzoek is gebleken dat de reflectie sterk afneemt bij toenemend organische-stofgehalte. Kleigronden met een gewichtspercentage organische stof van slechts 0,8% vertoonden een reflectie die twee keer zo hoog was, nadat de organische stof na gloeien verwijderd was (Monteith, 1973).

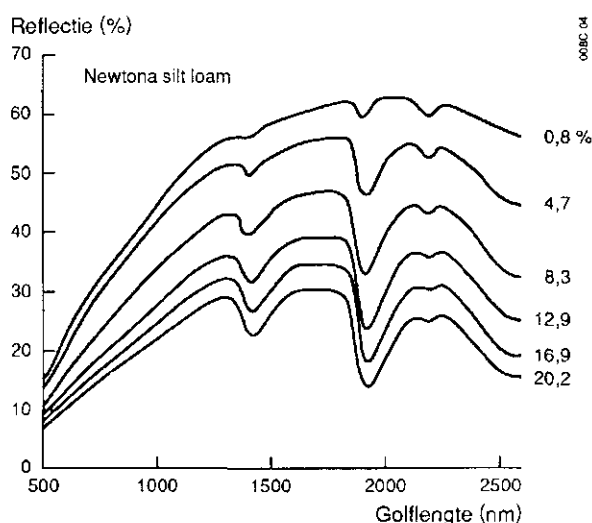


Fig. 2 Reflectiepercentages van de bodem bij verschillende vochtgehalten (Bowers and Hanks, 1967)

De reflectie is voor kaolinet bepaald als een functie van de deeltjesgrootte. De reflectie nam in het golflengtegebied 0,4-2 μm toe van 56% voor deeltjes van 1600 μm tot 78% voor deeltjes van 22 μm . Ook neemt de reflectie af als de aggregaten groter en onregelmatiger worden, omdat de reflectie tussen de aggregaten toeneemt (Monteith, 1973).

De reflectie van een vegetatiedek hangt voornamelijk af van de bedekkingsgraad en het aantal bladlagen. Ook de vochtvoorziening van het gewas beïnvloedt het reflectiegedrag, omdat bij verdroging het chlorophylgehalte afneemt en de celstructuur verandert. Hierdoor neemt de reflectie af in het rode en infrarode golflengtegebied (Droesen en Van Lieshout, 1988).

Verder is de reflectie van een gewas anders dan die van kale grond, omdat de plant door het proces van de koolstofassimilatie het licht in het blauw en rode golflengtegebied absorbeert. De reflectie en transmissie in het Nabij Infrarood zijn hoog (fig. 3). Hierdoor draagt niet alleen de bovenste bladlaag in de reflectie bij (fig 4).

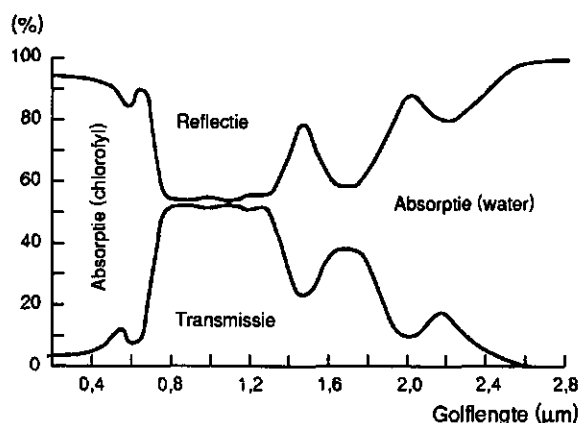


Fig. 3 Verdeling van straling bij verschillende golflengten over reflectie, absorptie en transmissie als gevolg van interactie met een groen blad (naar Knipling, 1970)

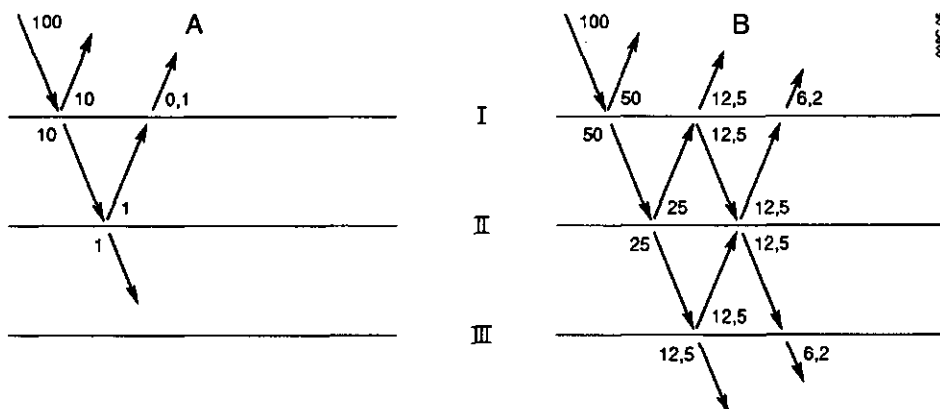


Fig. 4 Fictieve bijdrage van verschillende bladlagen in de totale reflectie van zichtbaar licht (A) en nabij infrarood (B)

Het verschil in reflectie in het zichtbare licht en het Nabij Infrarood wordt vaak uitgedrukt in de vorm van een Vegetatie-index (VI) (Tucker, 1977). De waarde van deze vegetatie-index wordt bepaald door het aantal bladlagen en is een maat voor de hoeveelheid biomassa (groene vegetatie). De waarde ervan is een relatief begrip en is voor elke opname en situatie anders. De berekening is als volgt:

$$VI = (IR - R)/(IR + R) \quad (16)$$

Hierin zijn IR en R de reflectiewaarden in respectievelijk het nabij infrarode en het rode golflengtegebied.

4 REMOTE-SENSINGOPNAMEN EN VELDGEGEVENS

4.1 Algemeen

Het doel van de remote-sensingopnamen is het vervaardigen van een verdampingsbeeld. Dat is een beeld dat de relatieve verdamping voor de opnamedag aangeeft als percentage van de potentiële verdamping over de hele dag. Hiervoor is het nodig dat met de opnamen een voldoende nauwkeurige gewasclassificatie gemaakt kan worden en dient tevens een warmtebeeld beschikbaar te zijn.

Om bruikbare remote-sensingopnamen te maken voor het onderzoek naar de hydrologische situatie dienen de opname- en veldomstandigheden aan bepaalde eisen te voldoen. Voor de opnameomstandigheden moet het helder weer zijn met geen of zeer weinig bewolking. Bij bewolking ontstaat de situatie dat de gewastemperatuur en verdamping omstreeks het middaguur niet representatief zijn voor de verdamping over de hele dag. Bovendien worden de opnamen teveel verstoord door de atmosfeer om bruikbaar te zijn.

De Franse SPOT satelliet heeft op 20 mei 1989 opnamen gemaakt van de provincie Drenthe. De pixelgrootte is 20 bij 20 meter. De opnamen zijn gemaakt in het groene, rode en nabij infrarode golflengtegebied. De akkerbouwgewassen (met uitzondering van graan) waren nog niet of nauwelijks boven de grond. De opname is gemaakt om in combinatie met vliegtuigscannerbeelden op andere tijdstippen een zo nauwkeurig mogelijke grondgebruikskartering te maken. Voor de kale grondpercelen zijn de SPOT-opnamen ook gebruikt voor de inventarisatie van wateroverlastsituaties. De overige opnamen betreffen False Colour(FC)fotografie (2-4-1989, 20-6-1989 en 23-8-1989), en Multi Spectral Scanning (MSS) en InfraRed Line Scanning (IRLS) (20-6-1989 en 23-8-1989). FC-foto's zijn foto's waarvan de film voor golflengtegevoeligheid een verschuiving heeft ondergaan en reageert op het traject van 0,45 tot 0,9 μm (groen, rood en Nabij Infrarood (NIR)). De rode kleur op de foto's is een goede indicatie voor de toestand waarin het gewas verkeert (zie par. 3.2). MSS-opnamen zijn opnamen waarbij electromagnetische straling van het aardoppervlak wordt gescheiden in verschillende golflengtetrajecten. De intensiteit van de straling wordt door sensoren in de scanner vastgelegd. Bij de toegepaste vlieghoogte van 5 km is de ruimtelijke resolutie recht onder het vliegtuig 12,5 bij 12,5 meter. Bij IRLS wordt de straling waargenomen in het thermisch infrarood en is het resultaat een temperatuurbeeld van het aardoppervlak. De ruimtelijke resolutie is dezelfde als bij de reflectiebanden.

Voor vastlegging van zowel de reflectie als de thermisch infrarode straling is een Deadalussscanner van de firma Eurosense gebruikt. De volgende banden zijn toegepast:

band 5	0,55- 0,60 μm	groen/geel
band 7	0,65- 0,69 μm	rood
band 9	0,80- 0,89 μm	nabij infrarood
band 11	8,50- 13,50 μm	thermisch infrarood

Bij de verwerking van de beelden bleek dat de geometrie van de reflectiebeelden en de thermische beelden niet exact met elkaar overeen kwamen. Alvorens met de beelden gewerkt kon worden, moest hiervoor worden gecorrigeerd.

Het onderzoek naar de hydrologische situatie is gericht op de kartering van verdrogingsverschijnselen (verdampingsreductie). Om verdrogingsverschijnselen te kunnen waarnemen moet daarom in de periode voorafgaande aan de opnamevlucht een duidelijk verdampingsoverschot optreden. Via een regelmatige monsternamen kan een indicatie worden verkregen van het vochtgehalte. In tabel 3 staan enkele vochtgehalten zoals die tijdens het groeiseizoen 1989 bepaald zijn.

Tabel 3 Gravimetrisch (GV) en volumetrisch (VV) vochtgehalte van enkel percelen in het onderzoeksgebied Gasselternijveen (%) op drie data in 1989. De percentages zijn bij benadering bepaald tussen 5-10 cm - mv. Het percentage voor aardappels is een gemiddelde tussen monsters in de rug en in de voor.

Gewas	15-6-'89		8-7-'89		20-7-'89	
	GV	VV	GV	VV	GV	VV
tarwe1	15	19	12	15	9	11
tarwe2	17	22	28	36	22	29
gerst	17	22	33	43	52	68
aardappel	*	*	47	61	33	43
erwten	*	*	20	26	21	27

4.2 Waarnemingen op 2 april 1989

Op 2 april 1989 is een vlucht uitgevoerd, waarbij alleen FC foto's zijn gemaakt. De schaal van de positieven is 1 : 32 800. Omdat de akkerbouwgewassen nog niet op het veld stonden, was relatief veel kale grond te zien. De plekken met wateroverlast waren te herkennen aan de donkere tint (zie par. 3.2). Het verschil tussen deze plekken en plaatsen waar de reflectie laag is door een bepaalde bodemsoort (b.v. veel humus in de toplaag) zijn de scherpe overgangen in reflectie bij natte plekken. Bij twijfel moet de bodemkaart in de beoordeling betrokken worden. Het doel van de vlucht was het vastleggen van wateroverlast.

Tijdens de vluchtdag zijn kleurenfoto's gemaakt om de wateroverlastsituaties en verdrogingspatronen in de toplaag van nabij vast te leggen. Deze kleurenfoto's vormen bij de interpretatie van de FC-foto's een belangrijke sleutel.

4.3 Waarnemingen op 20 juni 1989

Tijdens de vlucht op 20 juni 1989 zijn zowel FC-foto's als scanneropnamen gemaakt. De schaal van de foto's is 1 : 32 500. De opnameomstandigheden waren ideaal en de kwaliteit van de opnamen is uitstekend. Verstoring door de atmosfeer is nauwelijks

waarneembaar. Verder was de atmosfeer stabiel. De geometrische correctie van de scannerbeelden was goed uitvoerbaar.

Het doel van de vlucht was een verdampingskartering mogelijk te maken voor gras- en graanpercelen. De verwachting was, mede op grond van monsternamen, dat de overige akkerbouwgewassen nog niet stonden te verdrogen. Verder zijn de opnamen gebruikt voor de grondgebruiksinventarisatie.

De veldgegevens die op deze dag verzameld zijn, betreffen gewasinventarisaties en referentiemetingen voor de temperatuur gemeten met de scanner. Dit is gedaan met stralingsthermometers. Vanaf ongeveer 1 meter hoogte worden hiermee de gemiddelde temperaturen van de verschillende referentieoppervlakken gemeten. Van de gewassen is per perceel op kaart ingetekend welk gewas daar geteeld werd, wat de hoogte was en wat de bodembedekking bedroeg. Het is noodzakelijk te weten wat het bodemgebruik is, omdat die gegevens bij de gewasclassificatie nodig zijn en tevens dienen als referentie voor de classificatie. De gewashoogte en bodembedekking zijn met name van belang voor de verdampingskartering. De temperatuurmetingen dienen om een calibratie mogelijk te maken van de thermische band (par. 5.3.1) en vonden plaats bij Wapse en Gasteren.

4.4 Waarnemingen op 23 augustus 1989

De opnamen die op 23 augustus 1989 zijn gemaakt betreffen eveneens FC-foto's en scanneropnamen. De schaal van de FC-foto's is 1 : 32 800. De opnameomstandigheden waren in vergelijking met 20 juni minder goed. Halverwege de vlucht kwam er bewolking opzetten, waardoor de opnamen van het westelijke deel van Drenthe niet meer gemaakt konden worden. De atmosfeer was onstabiel, waardoor de opnamen moeilijk geometrisch te corrigeren zijn. Het doel van de opnamen was een verdampingskartering van de zomergewassen te maken, omdat de verdroging daar later op gang komt dan in de percelen met gras of wintergranen. De zomergewassen liggen voornamelijk in het veenkoloniale gebied. De veenkoloniën waren wolkloos en hier zijn de opnamen gelukt. Het onderzoeksgebied rond Gasselternijveen is in het geheel opgenomen.

Op 23 augustus zijn dezelfde veldgegevens verzameld als op 20 juni. De gewassen werden niet opnieuw ingetekend. Alleen de hoogte en bedekkingsgraad waren veranderd (door groei of oogst). De temperatuurmetingen in het veld vonden plaats bij Sleen dat ook niet onder de bewolking lag.

5 AFLEIDING THEMAKAARTEN MET BEHULP VAN REMOTE SENSING

De ruwe opnamedata zoals die beschikbaar komen, vertonen allerlei fouten en afwijkingen in geometrie en radiometrie. Voordat met de data gewerkt kan worden zal hiervoor moeten worden gecorrigeerd. Pas daarna is het mogelijk de data van de verschillende opnametijdstippen met elkaar te combineren, een grondgebruiks-classificatie en vervolgens een verdampingskartering uit te voeren.

Om tot de vervaardiging van een verdampingsbeeld te komen dienen naast een gewas-classificatie en een warmtebeeld nog meteorologische gegevens, veldwerkgegevens en gewasafhankelijke parameters beschikbaar te zijn. Verder is het noodzakelijk te weten wat per gewas de temperatuur is van potentieel verdampende percelen. Uitgegaan wordt van de veronderstelling dat de percelen met de laagste temperatuur potentieel verdampen. Dat is echter alleen te bepalen als het gewas geheel gesloten is. Voor het onderzoeksgebied kan geen gebiedsdekkend verdampingsbeeld voor een datum worden gemaakt, omdat sommige gewassen nog niet gesloten of reeds geoogst zijn.

De data zijn bewerkt met het beeldverwerkingssysteem ERDAS. De geografische vastlegging van de veldgegevens en ondersteuning van de beeldverwerking vond plaats met het Geografisch Informatie Systeem ARC/INFO.

5.1 Bewerking van de ruwe data

Fouten en afwijkingen in radiometrie kunnen ontstaan, doordat de hoek tussen scanner en zon niet gelijk is over de hele breedte van de track (fig. 5) en hierdoor de reflectie niet uniform is. Een ander gevolg kan zijn dat aan één kant van de track de zonkant en aan de andere kant juist de schaduwkant van de objecten waargenomen wordt. Ook kan een systematische, hoekafhankelijke fout worden gemaakt in de scanner. Deze fouten zorgen voor een verloop in stralingsintensiteit haaks op de vliegrichting.

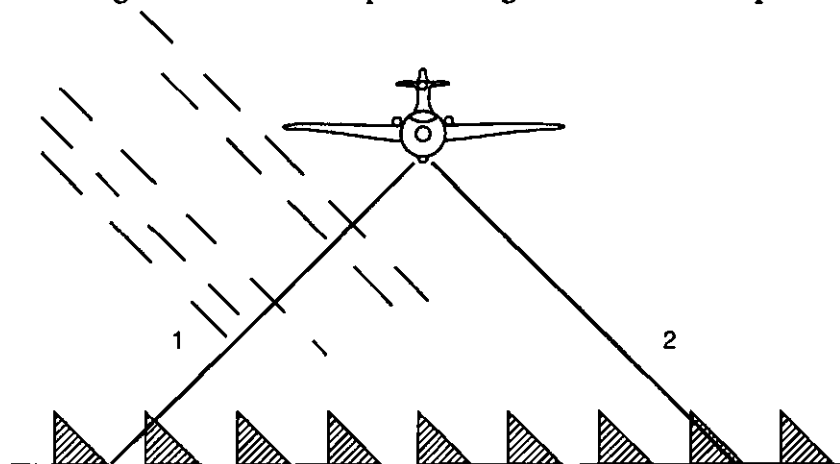


Fig. 5 Afwijkingen in radiometrie als gevolg van schaduwwerking. Bij 1 is de reflectie daardoor minder dan bij 2.

Afwijkingen in geometrie ontstaan doordat het vliegtuig tijdens de opnamen allerlei onregelmatige bewegingen maakt zoals veranderingen in hoogte, snelheid en drift gecombineerd met draaiingen rond de lengte-, breedte-as en verticale as van het vliegtuig. Hierdoor ontstaan niet alleen afwijkingen die voor het hele beeld hetzelfde zijn (bijvoorbeeld een systematisch schaalverloop zoals bij satellietopnamen), maar vooral zeer lokale vervormingen. De geometrische correctie van vliegtuigscannerbeelden is dan ook totaal verschillend van die van satellietscannerbeelden.

5.1.1 Radiometrische correctie

Het correctieprogramma dat voor de radiometrische correctie is ontwikkeld heet RADCOR (Miltenburg en Beekman, 1989). Dit programma werkt in het kort als volgt: over de gehele breedte van een track wordt een strook pixels aangewezen met een uniform grondgebruik (bijv. akkerbouw). Per kolom van deze strook wordt de gemiddelde pixelwaarde bepaald per golflengteband. Deze waarden worden in een grafiek uitgezet. Vervolgens wordt door een eerste of tweede graadsfunctie door deze grafiek een regressielijn bepaald. De waarde van de regressielijn in iedere kolom wordt gebruikt om een correctiewaarde voor die kolom te berekenen. Vervolgens worden de kolommen in de gehele track gecorrigeerd met de bijbehorende correctiewaarden.

5.1.2 Geometrische correctie

Om verschillende typen remote sensingbeelden onderling en met andere geografische thematische kaarten (bijv. bodemkaart, topografische kaart) te kunnen combineren moeten deze beelden worden gecorrigeerd naar een bepaald coördinatenstelsel. Hiervoor is het stelsel van de Rijks Driehoeks Meting gebruikt. Bij de correctie van zowel de satelliet- als de vliegtuigscannerbeelden is de pixelgrootte teruggebracht naar 10 bij 10 meter. Deze pixelgrootte komt vrijwel overeen met de ruimtelijke resolutie van de scanner op vijf kilometer hoogte. Hierdoor blijft de volledige informatie behouden.

De geometrische correctie van het satellietbeeld gebeurt door zowel op een topografische kaart (een coördinatenstelsel waarnaar de beelden gecorrigeerd worden) als op het beeld (datacoördinaten) dezelfde punten aan te wijzen en de beide coördinaten sets in een tabel op te slaan. Als een minimum van drie punten wordt aangewezen, is het mogelijk een transformatie uit te voeren waarbij de volgende vergelijkingen gebruikt worden om de uiteindelijke coördinaten te berekenen:

$$X_{\text{data}} = B_1 + X_{\text{kaart}} * B_2 + Y_{\text{kaart}} * B_3 \quad (17)$$

$$Y_{\text{data}} = A_1 + X_{\text{kaart}} * A_2 + Y_{\text{kaart}} * A_3 \quad (18)$$

De coëfficiënten worden met de kleinste kwadratenmethoden bepaald. Als meer dan

drie Ground Control Points (GCP's) worden aangewezen is het mogelijk om per punt de afwijking te berekenen. Eventueel kunnen punten met een ontoelaatbaar grote afwijking verwijderd worden. Voor de correctie van een deel van het SPOT-satellietbeeld bleken 8 GCP's een voldoende nauwkeurig resultaat te geven.

Vanwege de onregelmatige vertekeningen bij vliegtuigscanneropnamen moet het beeld per deelgebied worden gecorrigeerd. Hiervoor is het programma FATRAS gebruikt. Voor deze correctie dienen zeer veel punten zowel in data- als in kaartcoördinaten te worden vastgelegd. De dichtheid van het puntenet hangt af van de mate van vervorming en de gewenste nauwkeurigheid. Voor het deelgebied (15 km²) betekende dit voor de juni-opnamen 93 GCP's en voor de augustusopnamen 121 GCP's. Tussen de GCP's worden lijnen getrokken, zodat het hele beeld opgedeeld wordt in driehoeken. Gelijkzijdige driehoeken geven het beste resultaat. Aangezien van elke driehoek de hoekpunten bekend zijn in data- en kaartcoördinaten, is het mogelijk per driehoek een transformatie uit te voeren. Hierbij liggen de hoekpunten en zijden van te voren vast en vormen de paspunten de verbinding naar de naastliggende driehoek. Een controle van deze correctie is pas achteraf te geven. Een afwijking per punt zoals bij de satellietbeelden wordt niet berekend. Dit is niet alleen onmogelijk (er wordt een transformatie uitgevoerd met drie punten) maar ook niet zinvol. De kracht van dit programma is namelijk dat grote lokale vervormingen gecorrigeerd worden die los staan van de vervormingen elders in het beeld. Controle van de geometrische correcties heeft plaatsgehad door een gedigitaliseerd bestand van perceelsgrenzen over de beelden te leggen.

5.2 Grondgebruiksinventarisatie

Een gewasclassificatie gaat in het kort als volgt: per te classificeren gewas worden aan de hand van veldgegevens representatieve oppervlakken uitgekozen. Binnen deze trainingsgebieden worden van alle pixels de reflectiewaarden bepaald voor de golflengtebanden die bij de classificatie gebruikt gaan worden. Per gewas worden stochastische parameters bepaald zoals gemiddelde, standaardafwijking en covariantie. Bij de classificatie worden de stralingswaarden van elk pixel vergeleken met die van de trainingsset. Met een bepaald algoritme (in dit geval Maximum Likelihood, zie aanhangsel 1) wordt berekend met welk gewas de spectrale kenmerken van het pixel het meest overeenkomen.

Voor het proefgebied Gasselternijveen is in eerste instantie een classificatie gemaakt met de opnamen van 20 mei (SPOT) en 20 juni (Deadalus). Het percentage pixels dat goed werd geclassificeerd, bedroeg slechts 61% (par. 5.4.1). Daarom is besloten gerichter gebruik te maken van de beschikbare gegevens en met name het multitemporele aspect van de opnamen uit te buiten.

5.2.1 Multitemporele effecten

Op het SPOT-beeld van 20 mei is duidelijk onderscheid te maken tussen kale grond en gewassen. Het betreft hier (winter)graan, gras, koolzaad en gedeeltelijk erwten, tuinbonen en maïs. Aardappelen en bieten zijn nog niet zichtbaar. Dit verschil tussen met name granen en aardappelen moet voor een optimaal resultaat gebruikt worden. Hierdoor wordt tevens verwarring voorkomen op de scannerdata van augustus als het gaat om gerooide aardappel- en geoogste graanpercelen.

Aangezien alle gewassen op het veld stonden op 20 juni zijn de scannerbeelden van deze datum zeer geschikt voor het vastleggen van bebouwing en wegen. De invloed van kale grond wordt hierbij ondergeschikt geacht aan die van het gewas. Hierdoor wordt vermenging voorkomen tussen bebouwing en wegen enerzijds en kale grond door oogst anderzijds.

De reflectiebanden van de augustusbeelden (Deadalusbanden 5, 7 en 9) zijn naast de bijdrage voor de classificatie gebruikt om de kale grond in augustus weer te geven. Bij dit laatste is niet meer gekeken naar de verschillen tussen de gewassen.

5.2.2 Gewasclassificatie

Het basisidee achter een multitemporele classificatie (gebruik van banden die op verschillende tijdstippen opgenomen zijn) is dat gewassen door het doorlopen van verschillende groeistadia zowel absoluut als wel ten opzichte van elkaar andere reflectiekenmerken gaan vertonen. Twee gewassen kunnen dus in mei een sterk overeenkomende reflectie vertonen, terwijl in juni het verschil zeer groot is. Bij een derde gewas kan in juni de reflectie sterk op één van deze twee lijken, maar in mei sterk afwijken.

In eerste instantie is bij de gewasclassificatie de meest voor de hand liggende bandencombinatie gebruikt, namelijk de reflectiebanden van SPOT (mei) en Deadalus (juni).

Geprobeerd is het resultaat te verbeteren door de keuze van de trainingsgebieden te optimaliseren. Aangezien dit geen verbetering van het resultaat opleverde, is besloten de informatie in de opnamebanden van SPOT te gebruiken voordat de eigenlijke classificatie uitgevoerd ging worden. Deze informatie in de SPOT-beelden is geschikt om het gebied op te splitsen in een deel met aardappelen en bieten, en een deel met graan en gras. Als sleutel voor deze indeling is de Vegetatie-Index gebruikt (par. 3.3). Boven een bepaalde waarde (in dit speciale geval 120) omvatte de VI een gebied met daarin graan, gras, maïs, erwten, tuinbonen, koolzaad en bos. In het overige gedeelte ging het behalve om erwten, maïs en tuinbonen om aardappelen en bieten.

Het gedeelte met de VI-waarde kleiner dan 120 bleek onderling het grootste onderscheid te geven op de reflectiebanden van de opname op 20 juni. De classificatie heeft dan ook uitsluitend plaats gehad op deze drie banden. Enkele percelen aardappels

waren op 23 augustus gerooid, evenals de erwten en tuinbonen. Mede daarom zijn de opnamen van die datum hier niet gebruikt.

Het gedeelte met de VI-waarde groter dan 120 bleek met het junibeeld een slecht onderscheid te geven tussen graan en gras. Alleen Deadalusband zeven (rood) bleek goed bruikbaar, evenals band twee (rood) van SPOT. Verder zijn alle reflectiebanden gebruikt van de augustusopnamen. Doordat de granen op 23 augustus niet meer op het veld stonden, is een goed onderscheid tussen granen en gras mogelijk, en tussen granen en bos. Voor de classificatie van dit gedeelte zijn dus vijf banden (SPOT 2, Deadalus juni en Deadalus augustus 5, 7 en 9) gebruikt.

Voor het vastleggen van de bebouwing zijn behalve de reflectiebanden van 20 juni het temperatuurverschil tussen gewassen enerzijds en kale grond en bebouwing anderzijds op die datum gebruikt. De gewastemperatuur was gemiddeld 7 °C lager dan de temperatuur van de bebouwing. Gemeten in Digital Counts betekent dat in juni een verschil van 50. De toepassing van het warmtebeeld bij de classificatie kan alleen bij specifieke situaties als deze plaatsvinden maar moet zoveel mogelijk worden vermeden. Omdat de bebouwing als permanent wordt beschouwd, is verwarring met kale grond door oogst uitgesloten.

Tenslotte is de kale grond geclassificeerd op het augustusbeeld. Hiervoor zijn uitsluitend de reflectiebanden van augustus gebruikt. Deze laatste classificatie is nodig omdat de verdampingskaart alleen gemaakt kan worden voor een gesloten gewas.

5.3 Afleiding verdampingsbeeld

Bij het vervaardigen van een verdampingsbeeld wordt per gewas gewerkt. Om een betrouwbaar verdampingsbeeld te verkrijgen moet de gebruikte gewasclassificatie een nauwkeurigheid hebben van minstens 80% .

Om voor atmosferische absorptie en emissie in het warmtebeeld te corrigeren en een relatie te leggen met de werkelijke oppervlaktetemperatuur zijn referentiemetingen in het veld uitgevoerd met stralingsthermometers van het type Heimann KT15 en 17.

Voor de bepaling van de relatieve dagverdamping volgens vergelijking (15) is verder noodzakelijk dat per gewas de scannertemperatuur bij potentiële verdamping bekend is. Zoals in (par. 3.1) is toegelicht, worden deze waarden uit het warmtebeeld zelf afgeleid. De calibratieconstante (B_r) wordt berekend aan de hand van gewasparameters en de windsnelheid op twee meter hoogte ($U(2)$) uitgaande van een logaritmisch windprofiel.

5.3.1 Calibratie scanneropnamen met referentiemetingen

De vliegtuigscanneropnamen van de thermische band zijn geregistreerd op magneet-

band in Digital Counts (DC). Deze waarden variëren tussen 0 en 255. De werkelijke oppervlaktetemperatuur wordt uitgedrukt in K of °C. Hier gaat ook de verdampingsvergelijking (15) vanuit. Daarom moet de relatie tussen de vliegtuigscannerwaarden en de werkelijke temperatuur bepaald worden. Daarbij komt dat de atmosferische absorptie en emissie van thermische straling van invloed zijn op de waarneming. Als de relatie tussen vliegtuigscannerwaarden en oppervlaktetemperatuur voor enkele referentiepercelen bekend is, kan worden gecorrigeerd voor atmosferische effecten.

De referentiemetingen vonden plaats op dusdanig verschillende percelen dat een zo groot mogelijke spreiding in temperatuur te verwachten was. Aangezien niet exact bekend is, wanneer het vliegtuig overkomt en om de opwarming over de dag vast te leggen moet een groot gedeelte van de dag gemeten worden. Voor homogene vlakken die groter zijn dan tien bij tien meter, is de gemiddelde stralingstemperatuur bepaald.

De waarden van de scanner en de stralingsthermometers op grond waarvan de calibratie heeft plaats gevonden staan in figuur 6 (juni) en figuur 7 (augustus).

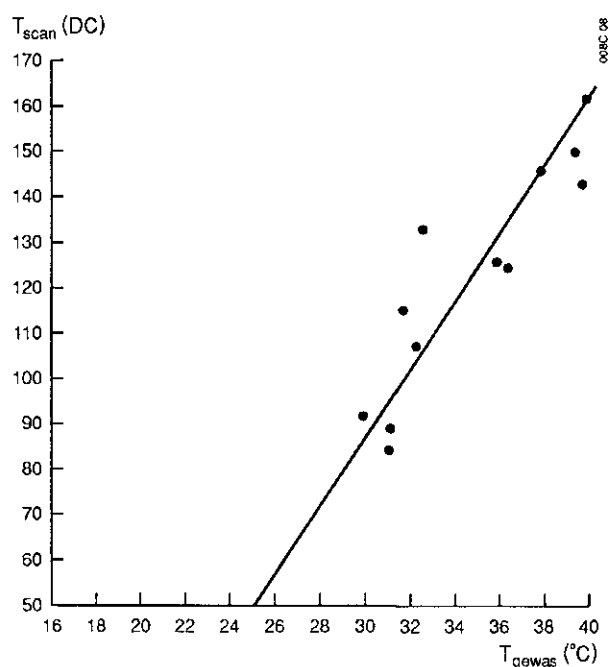


Fig. 6 De relatie tussen de stralingstemperatuur van de scanner en die van het gewas op 20 juni 1989

De relaties tussen de pixelwaarden in DC en de temperaturen van de gewassen in °C zijn:

juni	$T_{\text{scan}} = 7,337 * T_{\text{crop}} - 135,7$	corr. coëff. = 0,90
augustus	$T_{\text{scan}} = 5,252 * T_{\text{crop}} - 47,5$	corr. coëff. = 0,95

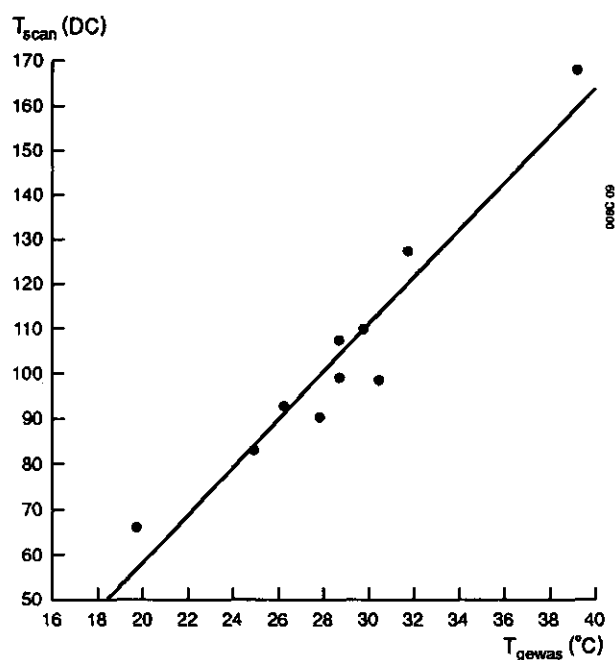


Fig. 7 De relatie tussen de stralingstemperatuur van de scanner en die van het gewas op 23 augustus 1989

5.3.2 Bepaling van T_c^* , $U(2)$ en B_r

Per gewas dient bekend te zijn wat de temperatuur bij potentiële verdamping is. Er van uitgaande dat een perceel met een potentieel verdampend gewas de laagste temperatuur binnen dat gewas zal hebben, zijn op het warmtebeeld de waarden voor T_c^* gevonden zoals in tabel 4.

Tabel 4 Temperatuur van percelen met potentieel verdampend gewas in Digital Counts (DC) en T_c in $^{\circ}\text{C}$, afgeleid uit het warmtebeeld voor de vluchtdagen 20 juni en 23 augustus 1989

Gewas	20 juni		23 augustus	
	DC	T_c	DC	T_c
gras (<15 cm)	63	27,0	63	21,0
gras (>15 cm)	35	23,2		
aardappel			60	20,4
bieten			54	19,4
maïs			45	17,6
graan	30	22,4		

Voor gewassen met een onvolledige bodembedekking (in juni aardappelen, bieten en maïs) is geen verdamping gekarteerd. In augustus kwam in het proefgebied geen lang gras voor en was het graan geoogst.

Om de waarde van B_r te kunnen berekenen is het nodig te weten wat de windsnelheid is op twee meter hoogte, indien het terrein vlak en open zou zijn. De windsnelheid wordt op de standaardhoogte van 10 meter gemeten op de meteorologische stations. Door toepassing van het logaritmisch windprofiel is de windsnelheid op elke hoogte te berekenen (Wieringa en Rijkoort, 1983).

Boven het vlakke en open terrein geldt:

$$U_r = U^*/k * \ln (z_r/z_0) \quad (\text{m.s}^{-1}) \quad (19)$$

Hierin is: U_r = windsnelheid op hoogte r (m.s^{-1})
 U^* = wrijvingssnelheid (m.s^{-1})
 k = Von Karman constante (0,4)
 z_0 = ruwheidslengte van het bovenwindse terrein (m)
 z_r = hoogte waarvoor de windsnelheid U_r geldt (m)

De verhouding tussen twee windsnelheden op twee verschillende hoogten is dan:

$$U_r/U_s = (U^*/k * \ln (z_r/z_0))/(U^*/k * \ln (z_s/z_0)) \quad (20a)$$

of:

$$U_2 = U_{10} * ((\ln(z_2/z_0)/\ln(z_{10}/z_0)) \quad (\text{m.s}^{-1}) \quad (20b)$$

Voor volledig vlak en kaal terrein geldt een ruwheidslengte van 0,03 m.

Voor U_{10} is een waarde van 2,5 meter per seconde gemeten op beide vluchtdagen). Dit betekent (volgens 20b) dat U_2 1,81 m.s^{-1} bedraagt.

De correctiefactor B hangt behalve van de windsnelheid af van het gewas. De berekening van B_r gaat namelijk volgens de formule (Thunnissen, 1984b):

$$B_r = a + b * U(2) \quad (\text{K}^{-1}) \quad (21)$$

Hierin zijn a en b gewasafhankelijke regressiecoëfficiënten.

In tabel 5 zijn voor verschillende gewassen met bijbehorende standaardhoogten (dat is de hoogte waarbij het betreffende gewas geacht wordt een bodembedekking te hebben van 100%) de waarden voor a , b en B_r gegeven. De waarden voor a en b zijn door Thunnissen (1984b) berekend voor de standaarddag met het model TERGRA. De waarden voor $U(2)$ en B_r gelden uiteraard alleen voor het tijdstip van opname.

Met deze berekende waarden van B_r , formule (15), de vergelijkingen in 5.3.1 en de waarden voor T_c^* in DC zoals die staan in tabel 4 is nu voor elk gewas de relatieve verdamping te berekenen.

Tabel 5 De waarden behorend bij verschillende gewassen met standaardhoogten H voor a , b en B , voor een windsnelheid U_2 van $1,81 \text{ m.s}^{-1}$.

Gewas	H (cm)	a (K^{-1})	b ($\text{K}^{-1}.\text{s.m}^{-1}$)	B (K^{-1})
gras	10	0,050	0,010	0,068
gras	20	0,050	0,017	0,081
aardappelen	60	0,050	0,023	0,092
suikerbieten	60	0,050	0,023	0,092
granen	100	0,090	0,030	0,144
mais	200	0,100	0,047	0,185

Voor 20 juni 1989 zijn de volgende relatieve verdampingsberekeningen uitgevoerd:

kort gras: $E_{\text{act}}/E_{\text{pot}} = 1 - (0,068/7,337) * (T_c - 63)$

lang gras: $E_{\text{act}}/E_{\text{pot}} = 1 - (0,081/7,337) * (T_c - 35)$

graan: $E_{\text{act}}/E_{\text{pot}} = 1 - (0,144/7,337) * (T_c - 30)$

Voor 23 augustus 1989 zijn berekend:

kort gras: $E_{\text{act}}/E_{\text{pot}} = 1 - (0,068/5,252) * (T_c - 63)$

aardappelen: $E_{\text{act}}/E_{\text{pot}} = 1 - (0,092/5,252) * (T_c - 60)$

bieten: $E_{\text{act}}/E_{\text{pot}} = 1 - (0,092/5,252) * (T_c - 54)$

mais: $E_{\text{act}}/E_{\text{pot}} = 1 - (0,185/5,252) * (T_c - 45)$

5.4 Resultaten

5.4.1 Classificatieresultaten

Het gecombineerde resultaat van een radiometrische en een geometrische correctie is te zien in figuur 8 en 9. Het betreft hier de reflectiebanden 5, 7 en 9 van de augustus-opnamen.

De classificaties zijn beoordeeld aan de hand van een digitaal bestand waarin voor het proefgebied per perceel het grondgebruik was vastgelegd. Hiermee is niet alleen te berekenen hoeveel pixels van een willekeurige klasse tot een bepaalde klasse worden gerekend, maar ook welke pixels dat zijn. Tevens kunnen de gedigitaliseerde perceelsgrenzen gebruikt worden voor een objectclassificatie (Janssen en Van Amsterdam, 1991). Hierbij wordt na de per pixel classificatie per object (in dit geval een gedigitaliseerd perceel) nagegaan tot welke klasse het grootste aantal pixels toegerekend wordt. Vervolgens krijgen alle pixels binnen een perceel de waarde van die klasse.

De resultaten van de classificatie waarbij alleen de reflectiebanden van Daedalus (juni) en de SPOT-opnamen (mei) zijn gebruikt staan in tabel 6. Onder classificatienauwkeurigheid wordt de gemiddelde nauwkeurigheid verstaan, gewogen naar oppervlakte.

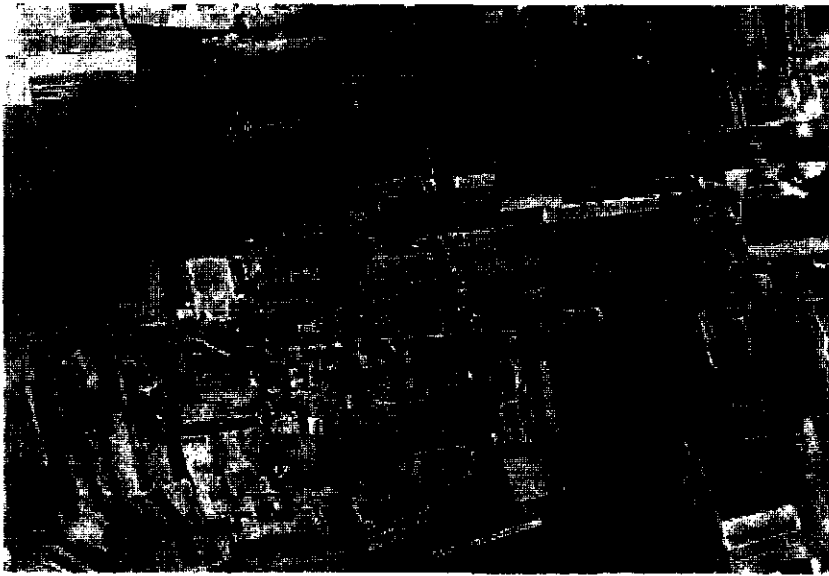


Fig. 8 Het radiometrisch en geometrisch on gecorrigeerde augustus-reflectiebeeld van het proefgebied Gasselternijveen



Fig. 9 Het radiometrisch en geometrisch gecorrigeerde augustus-reflectiebeeld van het proefgebied Gasselternijveen. Opvallend is de schaduwplek linksboven die ook na de radiometrische correctie zichtbaar is. Over het beeld zijn de gedigitaliseerde perceelsgrenzen geprojecteerd.

Tabel 6 Classificatieresultaat met gebruik van *Daedalus*banden 5, 7, 9 (juni) en SPOT-banden 1, 2, 3 (mei) in procenten

Werke- lijk grond- gebruik	Oppervlakte (ha)	Classificatieresultaat (%)								
		gras	aard- appel	biet	erwt	maïs	bos	tuin- bonen	kool- zaad	graan
gras	71	57	1	1	0	0	1	1	5	33
aardappel	431	3	58	22	0	1	2	11	0	3
biet	189	4	4	86	0	2	0	2	0	2
erwt	46	4	8	23	56	0	0	7	0	3
maïs	25	4	3	61	0	21	0	7	0	4
bos	13	21	2	2	0	1	63	2	0	9
tuinboon	44	9	14	14	3	3	1	53	0	2
koolzaad	13	9	0	2	2	0	0	0	84	3
graan	188	21	5	8	6	0	5	5	1	50

Classificatienauwkeurigheid = 61%

Bij de classificatie wordt nooit een nauwkeurigheid van 100% gehaald. Onder andere door randeffecten kan het remote-sensingresultaat op pixelbasis al snel 10% afwijken van het werkelijke grondgebruik.

Opvallend bij deze classificatie is het zeer hoge percentage maïs dat tot bieten wordt gerekend (61%). De aardappelen die als bieten worden geclassificeerd (22%) en de vermenging tussen graan en gras (21% en 33%) drukken het resultaat sterk. Uitvoerig variëren van de trainingsset (bij bovengenoemd resultaat zijn 25 trainingsgebieden gebruikt die bij classificatie van alleen de trainingsgebieden voor 100% goed geclassificeerd worden) leverde geen beter resultaat op.

In tabel 7 staan de resultaten van de classificatie waarbij een splitsing van het beeld en grondgebruiksklassen heeft plaats gehad met de VI van de SPOT-opname. De gebruikte reflectiebanden zijn gedeeltelijk zowel van SPOT als van de *Daedalus*opnamen (juni en augustus) afkomstig (zie 5.2.2).

Tabel 7 Classificatieresultaat (%) met gebruik van de VI van SPOT, en SPOT- en *Daedalus*reflectiebanden van juni en augustus in procenten

Werke- lijk grond- gebruik	Oppervlakte (ha)	Classificatieresultaat (%)								
		gras	aard- appel	biet	erwt	maïs	bos	tuin- bonen	kool- zaad	graan
gras	71	68	1	1	0	0	17	0	6	8
aardappel	431	6	80	10	0	0	1	0	1	2
biet	189	6	9	82	0	0	0	0	1	1
erwt	46	6	9	21	40	0	0	0	9	15
maïs	25	10	16	52	0	21	1	0	0	0
bos	13	16	2	1	0	0	74	0	0	7
tuinboon	44	15	46	12	2	2	1	12	1	10
koolzaad	13	4	0	0	0	0	0	0	94	1
graan	188	13	4	6	3	0	2	1	3	68

Classificatienauwkeurigheid = 71%

Bij dit resultaat valt op dat nu meer aardappelen dan gras worden geclassificeerd (6%, was 3%). Van de maïs wordt slechts 21% goed geclassificeerd en gaat een groot percentage naar de bieten. Van het graan wordt 6% geclassificeerd als bieten. De vermenging tussen graan en gras is afgenomen en betreft nu 13% en 8% (was 21% en 33%). Als op deze classificatie een majorityfilter wordt toegepast van 5 bij 5 pixels stijgt de nauwkeurigheid in alle klassen met ongeveer 4%. De classificatienauwkeurigheid over de negen klassen wordt dan 75%. Van het gebied is ook een objectgerichte classificatie uitgevoerd. De resultaten hiervan staan in tabel 8.

Tabel 8 *Classificatieresultaat met gebruik van de VI van SPOT, en SPOT- en Daedalusreflectiebanden van juni en augustus in procenten na een objectclassificatie*

Werke- lijk grond- gebruik	Oppervlakte ha	Classificatieresultaat (%)								
		gras	aard- appel	biet	erwt	maïs	bos	tuin- bonen	kool- zaad	graan
gras	71	70	0	0	0	0	17	0	5	8
aardappel	431	1	98	1	0	0	0	0	0	0
biet	189	0	1	99	0	0	0	0	0	0
erwt	46	0	7	20	56	0	0	0	0	16
maïs	25	0	0	73	0	27	0	0	0	0
bos	13	10	0	0	0	0	90	0	0	0
tuinboon	44	8	61	2	7	0	0	22	0	0
koolzaad	13	0	0	0	0	0	0	0	100	0
graan	188	2	3	8	3	0	0	0	0	84

Classificatienauwkeurigheid = 87%

Op basis van False Colour-foto-interpretatie is gevonden dat graan dat tot bieten wordt gerekend (15 ha), een perceel betreft dat tijdens veldwerk vermoedelijk verkeerd gekarteerd is. Via de automatische classificatie werd het bewuste "graanperceel" geclassificeerd als bieten wat vermoedelijk correct is. Uiteraard moet bij de interpretatie van andere classificatieresultaten ook rekening worden gehouden met dit probleem-perceel. Voor de verdampingskartering is de objectclassificatie als basis gebruikt. Voor de percelen waarvan geen digitale perceelsgrenzen beschikbaar waren, is deze classificatie vervangen door die waarbij gebruik is gemaakt van de VI van de SPOT-opnamen, gevolgd door een 5 bij 5 majority filter.

Over het algemeen blijkt de objectgerichte classificatie een verbetering van het classificatieresultaat te geven. Meestal ligt dit in de orde van 10%. Per perceel of klasse kan door de objectclassificatie het resultaat verslechteren met name bij percelen of klassen waarvan het classificatieresultaat al laag was. De in minderheid aanwezige goed geclassificeerde pixels kunnen in deze situatie vervangen worden door die van een verkeerde klasse. Dit komt met name voor bij smalle percelen waar de invloed van de randeffecten relatief groot is.

De automatische classificatie van maïs aan de hand van opnamen in het zichtbare licht en nabij infrarood blijft een probleem. In dit gebied betrof het slechts een oppervlak van 25 ha. Daarom is hier verder geen aandacht aan besteed. Om een visuele vergelijking mogelijk te maken tussen de referentiegegevens en deze uiteindelijk voor de verdampingskartering gebruikte classificatie zijn deze afgebeeld in figuur 10 en 11.

5.4.2 Verdampingsresultaten

De resultaten van de verdampingsberekening staan in figuur 12 voor 20 juni 1989 en in figuur 13 voor 23 augustus 1989. Het betreft hier uitsluitend gewassen met een volledige bodembedekking. Het zwart in beide figuren wijst op gewassen daar met een onvolledige bodembedekking. Op die plaatsen heeft geen verdampingskartering plaatsgevonden. Opmerkelijk is dat het veenkoloniale gebied oostelijk van Gasselternijveen op beide beelden een veel hogere verdamping vertoont dan in de rest van het proefgebied. In hoofdstuk 7 wordt nader ingegaan op dit resultaat.

■ gras	■ bieten	■ mais	■ tuinbonen	■ graan
■ aardappelen	■ erwten	■ bos	■ koolzaad	■ niet gekarteerd



Fig. 10 Referentiegegevens van het proefgebied Gasselternijveen

■ gras	■ bieten	■ mais	■ tuinbonen	■ graan
■ aardappelen	■ erwten	■ bos	■ koolzaad	■ bebouwing

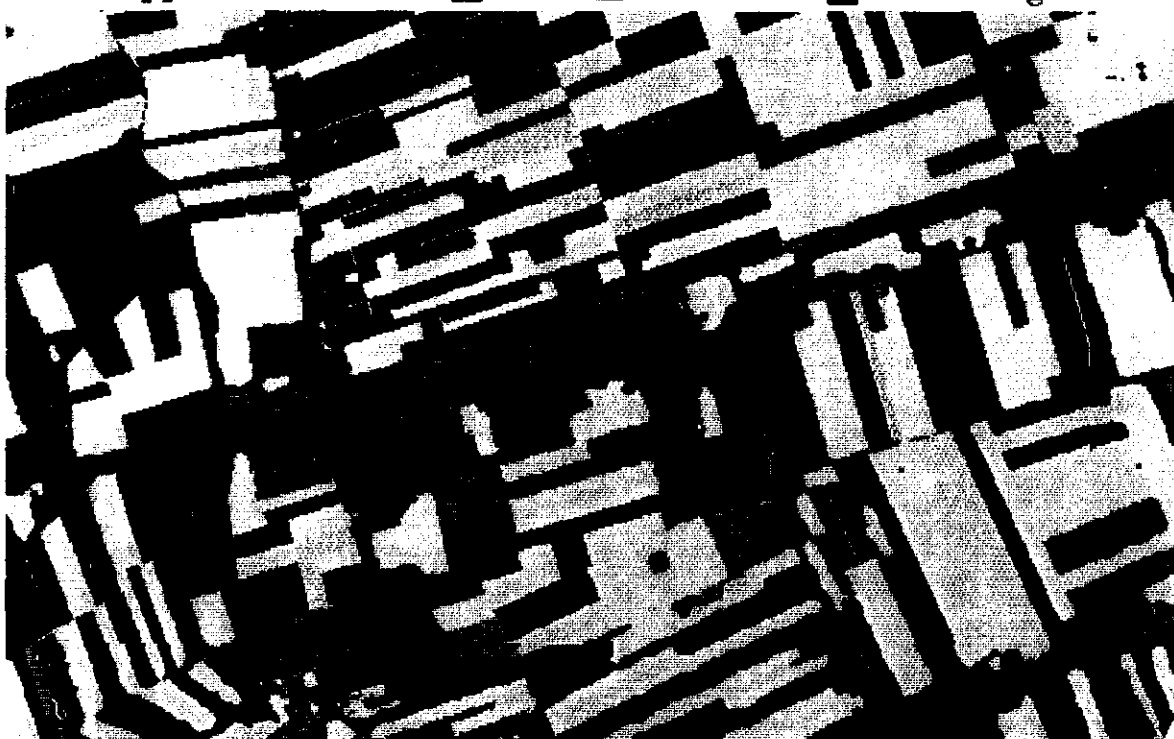


Fig. 11 Classificatie als resultaat van de objectgerichte classificatie

- 0 - 30%
- 31 - 50%
- 51 - 70%
- 71 - 90%
- 91 - 100%



Fig. 12 *Relatieve verdamping van het proefgebied Gasselternijveen op 20 juni 1989 voor gras en granen*

- 0 - 30%
- 31 - 50%
- 51 - 70%
- 71 - 90%
- 91 - 100%

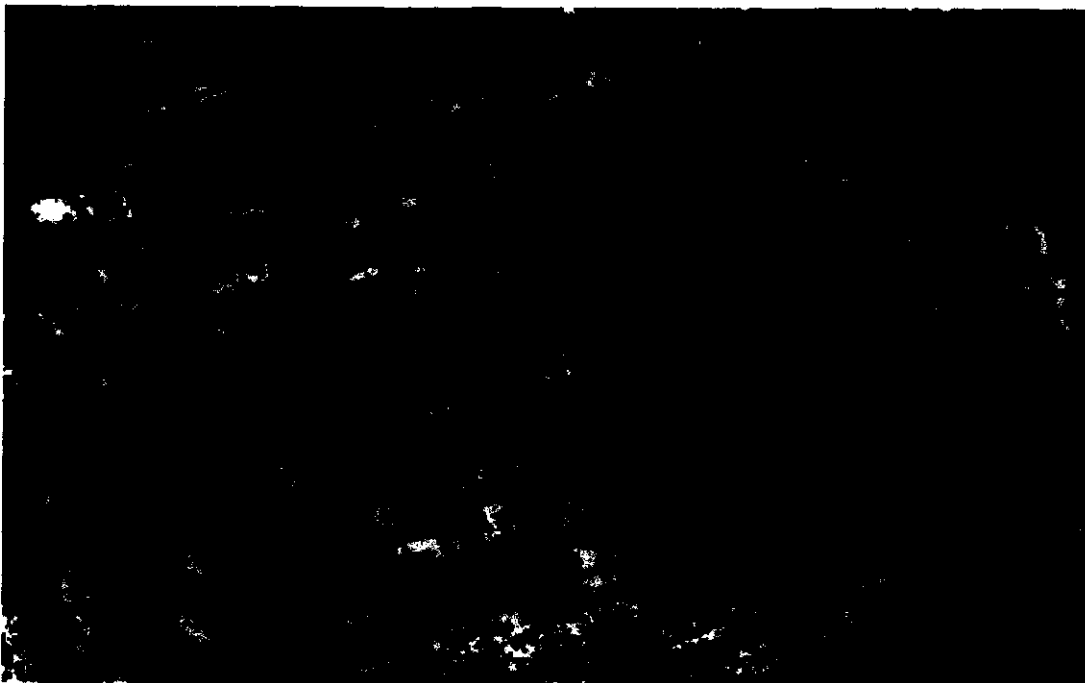


Fig. 13 *Relatieve verdamping van het proefgebied Gasselternijveen op 23 augustus 1989 voor gras, maïs, aardappelen en bieten*

6 SIMULATIE VAN WATERTRANSPORT IN DE ONVERZADIGDE ZONE

Om inzicht te krijgen in de hydrologische situatie van een gebied vormen modellen waarmee de grondwaterstroming wordt gesimuleerd, een goed hulpmiddel. In de loop der tijd zijn modellen met verschillende toepassingen ontwikkeld. In dit onderzoek is een versie van het model SWATRE (Soil, Water Actual Transpiration Rate Extended) gebruikt, namelijk de versie van maart 1989, SWACROP. Met dit model zijn de waterbeweging in de onverzadigde zone, de potentiële en de actuele transpiratie en de gewasgroei te simuleren. Van deze laatste mogelijkheid is in dit onderzoek geen gebruik gemaakt.

Met name de berekende verdamping voor 20 juni en 23 augustus is interessant, omdat die resultaten geconfronteerd kunnen worden met de verdamping zoals berekend met remote sensing. Deze koppeling tussen beide methoden is van groot belang, omdat daarmee een wederzijdse controle mogelijk is. Indien de gesimuleerde en de van de remote sensing afgeleide verdampingsbeelden met elkaar overeenkomen, dan geeft het simulatiemodel betrouwbare informatie over de waterhuishouding. Blijken beide methoden systematisch verschillende resultaten op te leveren, dan leert de ervaring dat de geschatte bodemfysische invoergegevens bij de hydrologische modellering vermoedelijk moeten worden bijgesteld (Thunnissen, 1984a).

6.1 Het simulatiemodel SWACROP

De beschrijving van het model SWACROP gebeurt aan de hand van een korte beschrijving van de grondwaterstroming in de onverzadigde zone, randvoorwaarden en invoer gegevens. Bij de invoergegevens worden eerst de gegevens behandeld die via aparte invoerfiles door het model gebruikt worden. Voor nadere informatie zie onder andere Feddes et al. (1978) en Belmans et al. (1983).

6.1.1 Grondwaterstroming in de onverzadigde zone

De basisvergelijking die stroming als gevolg van potentiaalverschillen in de bodem beschrijft is de Wet van Darcy:

$$v = -k * dH/dz \quad (\text{of } v = -k * d(h_p + z)/dz) \quad (\text{m.d}^{-1}) \quad (22)$$

Hierin is: v = stroomsnelheid (m.d^{-1})
 k = onverzadigde doorlatendheid (m.d^{-1})
 H = hydraulische potentiaal (m)
 z = verticale coördinaat (positief naar boven) (m)
 h_p = drukhoogte (m)

De term dH/dz is een gradiënt van de potentiaal en daarmee de drijvende kracht achter de waterstroming.

De continuïteitsvergelijking luidt:

$$\partial\theta/\partial t = - \partial v/\partial z + S \quad (d^{-1}) \quad (23)$$

Hierin is: θ = volumetrisch vochtgehalte (-)

t = tijd (d)

S = bronterm (positief bij toevoeging) (d^{-1})

Hierbij is er van uitgegaan dat de horizontale waterstroming verwaarloosbaar klein is. Substitutie van (22) in (23) geeft:

$$\partial\theta/\partial t = (\partial/\partial Z) * k * ((dh_p/dz) + 1) + S \quad (d^{-1}) \quad (24)$$

Als $\partial\theta/\partial t = Ch_p * (dhp/dt)$ met C = differentiële vochtcapaciteit en $k = k(h_p)$ = hydraulische doorlatendheid bekend zijn (via $k = f(\theta)$ en $\theta = g(h_p)$) kan vergelijking (24) geschreven worden als functie van de drukhoogte:

$$Ch_p * (dh_p/dt) = (\partial/\partial z) * k(h_p) * ((dh_p/dz) + 1) + S \quad (d^{-1}) \quad (25)$$

Deze vergelijking dient opgelost te worden voor de berekening (simulering) van de waterstroming in de onverzadigde zone. In het model SWACROP gebeurt dat met behulp van eindige differentie techniek. Dat betekent dat zowel naar plaats als naar tijd een (gedefinieerde) discretisatie plaatsvindt.

6.1.2 Randvoorwaarden aan de onderkant van het systeem

Voor de randvoorwaarden aan de onderkant van het systeem kan uit een aantal opties gekozen worden. De mogelijkheid bestaat om een flux op te leggen vanaf de verzadigde zone, waarbij de flux op verschillende manieren berekend kan worden. Andere uitgangsmogelijkheden zijn wegzijging, de stijghoogte van het onderste bodemcompartiment, een ondoorlatende laag juist onder het profiel of een (fluctuerende) grondwaterspiegel. In figuur 14 zijn de mogelijkheden gegeven voor de randvoorwaarden aan de onderkant van het systeem. Zie verder 6.1.6.

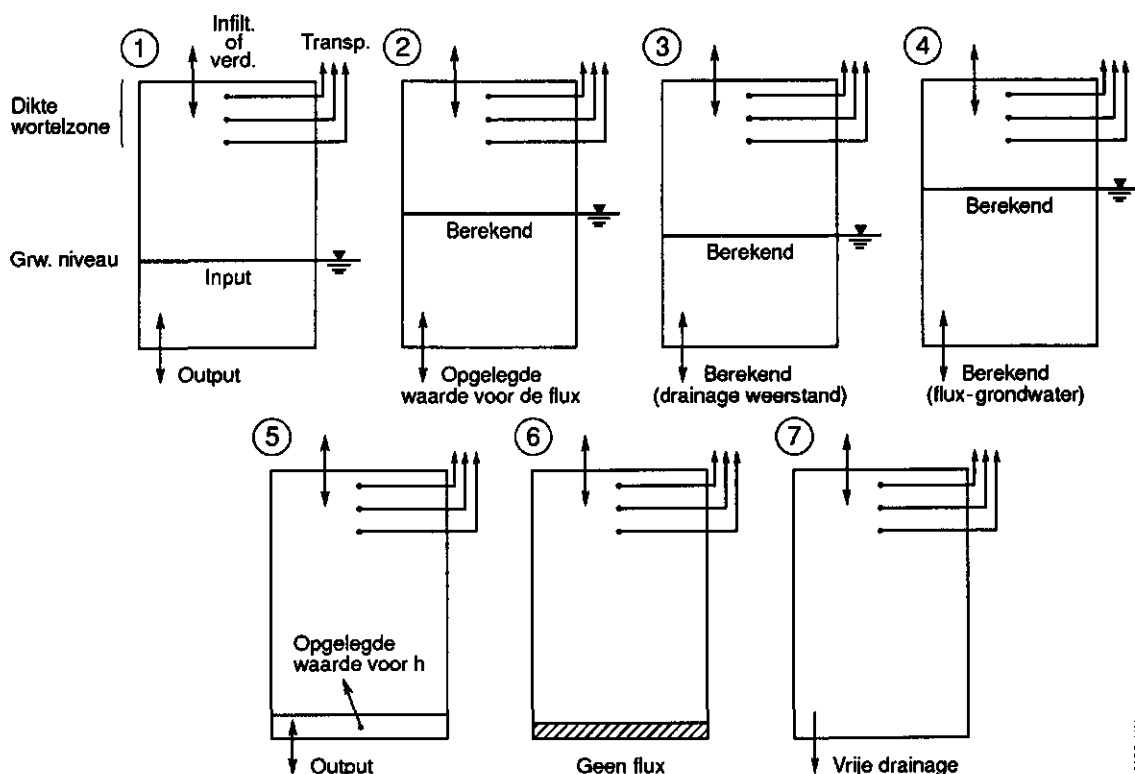


Fig. 14 Verschillende mogelijkheden voor de onderrandvoorwaarden bij de simulering met het model SWACROP

6.1.3 Randvoorwaarden aan de bovenkant van het systeem

Aan de bovenzijde van het systeem vindt wateronttrekking door plantenwortels (de term S in formule 23 en evaporatie plaats. De potentiële wateronttrekking wordt in het model geacht evenredig plaats te vinden over de gehele wortelzone.

Om de relatieve verdamping en het neerslagoverschot te berekenen dienen berekend te worden: de potentiële evapotranspiratie (ET_{pot}), potentiële en actuele evaporatie (E_{pot} en E_{act}) en de potentiële en actuele transpiratie (T_{pot} en $S(h)$).

De potentiële evapotranspiratie (ET_{pot})

Om de potentiële evapotranspiratie te berekenen is uitgegaan van de methode die sinds 1 april 1987 standaard in Nederland wordt toegepast, de berekening volgens Makkink (1957):

$$ET_{pot} = f * E_{mak} \quad (\text{cm.d}^{-1}) \quad (26)$$

Hierin is: f = gewasfactor(-)

E_{mak} = evapotranspiratie van het referentiegewas volgens Makkink (cm.d^{-1})

De gewasfactor wordt nader uitgelegd in 6.1.5. E_{mak} wordt berekend met:

$$E_{mak} = C * (s/s+\gamma) * R_{si}/L \quad (\text{cm.d}^{-1}) \quad (27)$$

Hierin is: $C = 0,65$, empirische factor
 s = helling van de verzadigingsdampspanningscurve (mbar.K^{-1})
 γ = psychrometerconstante (mbar.K^{-1})
 R_{si} = kortgolvlige inkomende straling (W.m^{-2})
 L = verdampingswarmte van water (J.kg^{-1})

De waarde voor $C = 0,65$, is door De Bruin (1981) en Keijman (1982) doorgerekend voor grasland. De gewasfactoren (zie 6.1.5) zoals Feddes (1987) die berekende, waren ook gebaseerd op $C = 0,65$. Voor een specifieke toepassing zie formules (35) en (36).

De potentiële transpiratie (T_{pot})

Voor de berekening van de potentiële transpiratie zijn twee opties mogelijk. Standaard wordt berekend:

$$T_{pot} = ET_{pot} - E_{pot} \quad (\text{cm.d}^{-1}) \quad (28)$$

Hierin is: E_{pot} = potentiële evaporatie (cm.d^{-1}) (zie formule 30 en 31)

In het remote-sensingstudieproject Oost Gelderland (Thunnissen, 1984a) is voor maïs en gras de volgende verdampingsformule gebruikt:

$$T_{pot} = Sc * ET_{pot}^* \quad (\text{cm.d}^{-1}) \quad (29)$$

Hierin is: ET_{pot}^* = ET_{pot} bij volledige bodembedekking (cm.d^{-1})
 Sc = bodembedekking (-)

Het verschil met formule (28) is dat de potentiële transpiratie geen restterm is, maar een op zichzelf te berekenen factor.

De potentiële evaporatie (E_{pot})

Om deze term te berekenen zijn binnen SWACROP twee methoden mogelijk: de methode Belmans et al. (1983) en Ritchie and Burnett (1971). De berekening volgens Belmans et al. is:

$$E_{pot} = 0,9 * e^{(-0,6 * LAI)} * ET_{pot} \quad (\text{cm.d}^{-1}) \quad (30)$$

Hierin is: E_{pot} = potentiële evaporatie (cm.d^{-1})
 LAI = Leaf Area Index ($\text{m}^2.\text{m}^{-2}$)

Indien de LAI gelijk aan nul is wordt in formule (30) E_{pot} gelijk aan $0,9 * ET_{pot}$. Dat is niet logisch. Beter zou zijn de factor 0,9 gewoon weg te laten.

De formule van Ritchie and Burnett luidt:

$$E_{pot} = 0,00352 * (s/s+\gamma) * R_n * e^{(-0,39 * LAI)} \quad (\text{cm.d}^{-1}) \quad (31)$$

Formule (31) wordt in SWACROP standaard gebruikt bij de berekening volgens Makkink. Dat kan alleen als gegevens bekend zijn voor de omrekening van globale straling naar netto-straling. Aangezien die gegevens alleen te achterhalen waren voor aardappelen, zijn alleen deze gesimuleerd met de formule van Ritchie. Een ander probleem vormt de Leaf Area Index functie. Als de gegevens daarvoor ontbreken, zijn beide berekeningen onuitvoerbaar (zie 6.1.5). Dat geldt voor gras en maïs. Voor graan is de formule van Belmans et al. (1983) gebruikt. Om deze problemen op te vangen is bij het Remote Sensing studieproject Oost Gelderland de potentiële evaporatie direct gekoppeld aan de bodembedekkingsgraad (Sc):

$$E_{pot} = f_{kaal} * (1 - Sc) * E_o \quad (\text{cm.d}^{-1}) \quad (32)$$

Hierin is: f_{kaal} = effectieve "gewasfactor" voor kale grond (-)
 E_o = open waterverdamping volgens Penman (cm.d^{-1})

De gewasfactor voor kale grond is gesteld op 0,4.

Voor de Makkink-verdampingsberekening wordt de openwaterverdamping niet berekend. Daarom is gebruik gemaakt van de betrekking tussen de berekende evapotranspiratie van het referentiegewas volgens Makkink, E_{mak} , en E_o zoals die door De Bruin (1987) is vastgesteld (variabel per decade en met zeker verloop in het groeiseizoen, hier afgerond):

$$E_o = 1,30 * E_{mak} \quad (\text{cm.d}^{-1}) \quad (33)$$

Een combinatie van (32) en (33) levert dan de volgende betrekking op tussen E_{pot} en E_{mak} :

$$E_{pot} = f_{kaal} * (1 - Sc) * 1,30 * E_{mak} \quad (\text{cm.d}^{-1}) \quad (34)$$

Voor de simulering van gras en maïs resulteert de potentiële evapotranspiratie in een combinatie van (28), (29) en (34):

$$ET_{pot} = Sc * ET_{pot}(100\%) + f_{kaal} * (1 - Sc) * 1,30 * E_{mak} \quad (\text{cm.d}^{-1}) \quad (35)$$

De actuele evaporatie (E_{act})

Deze term wordt in het model berekend met de methode van Black et al. (1969). Hierbij vindt een reductie plaats van E_{pot} als functie van het aantal achtereenvolgende droge dagen nadat het geregend heeft:

$$E_{act} = \mathfrak{Z} * [\sqrt{(t+1)} - \sqrt{(t)}] \quad (\text{cm.d}^{-1}) \quad (36)$$

Hierin is: $\mathfrak{Z}$ = 0,35, empirische constante ($\text{cm.d}^{-1.5}$)
 t = tijd (d)

Een droge dag wordt gedefinieerd als een dag waarop de neerslag minder dan 10 mm is. In het remote-sensingstudieproject Oost Gelderland is dit voor maïs teruggebracht tot 2 mm. Omdat 10 mm toch een forse hoeveelheid neerslag is, verdient het aanbeveling om deze aanpassing ook voor andere gewassen door te voeren. Voor het gebied rond

Gasselternijveen is voor aardappelen, bieten, graan en maïs nog 10 mm.d^{-1} gebruikt en voor gras 2 mm.d^{-1} .

De actuele transpiratie ($S(h)$)

De actuele transpiratie, $S(h)$, is gebaseerd op de "SINK term" (Feddes et al., 1978) en wordt gelijk gesteld aan de onttrekking door de wortels als functie van de drukhoogte:

$$S(h) = \alpha(h) * S_{\max} \quad (\text{d}^{-1}) \quad (37)$$

Hierin is: $\alpha(h)$ = dimensieloze functie van de drukhoogte (-)

$S_{\max}$ = maximale onttrekking (d^{-1})

$S_{\max}$ hangt af van de potentiële transpiratie en de worteldiepte. Bij gelijke onttrekking over de gehele worteldiepte (Feddes et al., 1978) geldt:

$$S_{\max} = T_{\text{pot}}/d_r \quad (\text{d}^{-1}) \quad (38)$$

Hierin is: d_r = dikte van de wortelzone (m)

De gelijke onttrekking van water over de gehele wortelzone is een veronderstelling die aanvechtbaar is. Zo vindt bij gras 80% van de onttrekking in de bovenste 15 cm plaats, terwijl de wortels soms 60 cm diep aangetroffen worden (op permanent grasland, en met name kunstweide). Hoogland (1980) en Prasad (1988) definieerden $S_{\max}$ zodanig dat de onttrekking afneemt bij toenemende diepte.

In dit onderzoek is uitgegaan van de benadering door Feddes. In 6.1.5 staan de gebruikte variabelen die de waarden van α voor de verschillende gewassen beschrijven.

De relatieve transpiratie (T_{rel})

De relatieve transpiratie is geen standaarduitvoer van SWACROP. Deze wordt berekend volgens:

$$T_{\text{rel}} = T_{\text{act}}/T_{\text{pot}} \quad (-) \quad (39)$$

6.1.4 Invoergegevens voor de bodemfysische en meteorologische parameters

De invoergegevens voor SWACROP staan in invoerfiles. De belangrijkste, de file SWADAT.INP, bevat behalve invoergegevens verwijzingen naar files die gegevens bevatten over de bodem en de meteorologie. Deze files zullen eerst worden besproken. In 6.1.4 tot en met 6.1.8 komen de overige invoergegevens (voor SWADAT.INP) aan de orde.

De bodemfysische invoergegevens

De bodemeenheden in het onderzoeksgebied zijn ingedeeld naar hoofdeenheden gebaseerd op de indeling van Bannink en Stoffelsen (1984) voor het Tus-10 plan. Een hoofdeenheid is een bodemeenheid die representatief is voor één of meer

legenda-eenheden van de gereviseerde bodemkaart (Bodemkaart van Nederland, 1989).

Deze hoofdeenheden zijn opgebouwd uit bouwstenen. Het bleek mogelijk om met 24 bouwstenen alle 22 hoofdeenheden te beschrijven. Van de bouwstenen zijn de $K(h)$ -relaties en de vochtkarakteristieken gemeten. Tevens zijn de stijghoogtes bij een constante flux van twee mm per dag berekend. Door de bouwstenen op elkaar te leggen en per hoofdeenheid de afzonderlijke diktes van de bouwstenen te definiëren worden de bodemfysische eigenschappen van de hoofdeenheden vastgelegd. De dikte van de bovenste bouwsteen wordt verondersteld gelijk te zijn aan de effectieve dikte van de wortelzone.

In aanhangsel 2, 3 en 4 staan de legenda-eenheden per hoofdeenheid, de opbouw van de hoofdeenheden aangegeven door bouwstenen voor de gewassen gras, aardappelen en graan, en de stijghoogtes per bouwsteen met de legenda-eenheden en horizonten waarvoor de desbetreffende bouwstenen gelden.

De meteorologische invoergegevens

De modellering vindt alleen plaats gedurende het groeiseizoen van het te modelleren gewas. De invoerfiles mogen alleen gegevens bevatten voor de dagen tussen het begin van de groei en de oogst (m.u.v. gras). Voor elk gewas zijn dus de begin- en einddatum verschillend. De maximale modellering loopt vanaf dag 60 (1 maart) tot dag 273 (1 oktober).

Voor de verdampingsberekeningen volgens Makkink (1957) zijn dagelijkse gegevens nodig van de neerslag (mm), gemiddelde temperatuur ($^{\circ}\text{C}$), globale straling (J.cm^{-2}) en de luchtvochtigheid (-).

Voor de meteorologische gegevens zijn de metingen op het meteostation Gieterveen en Eelde gebruikt. Met Thiessen-polygonen is gebleken dat voor neerslaggegevens het station Gieterveen het meest geschikt is. Aangenomen is dat de verschillen in de overige grootheden binnen de provincie verwaarloosbaar klein zijn. Een voorbeeld van de gegevens voor een invoerfile met meteogegevens is te vinden in aanhangsel 5.

6.1.5 Invoergegevens voor het gewas

De gemodelleerde gewassen zijn aardappelen, bieten, graan, gras en maïs.

Tabel 9 De gemodelleerde gewassen met de gebruikte zaai- en oogstdata voor 1989

Gewas	Zaaidatum	Oogstdatum
aardappelen (fabr.)	15/4 (start groei 1/5)	10/9
bieten	15/4 (start groei 1/5)	10/9
wintergraan	1/4	10/8
gras	nvt	nvt
maïs	5/5	1/10

De gehanteerde zaai- en oogstdata staan in tabel 9 en zijn afkomstig van proefboerderij "De Kooijenburg". De proefboerderij ligt op een leemhoudende grond en is daardoor gevoelig voor wateroverlast in het voorjaar. Hiermee is rekening gehouden voor de data in tabel 9 die gelden voor de hele provincie.

De Sink term

Om het verloop van de Sink term variabele α (6.1.3) te beschrijven zijn een aantal waarden van de drukhoogte nodig als invoer. De gebruikte waarden staan in tabel 10. In figuur 15 staat een voorbeeld van het verloop van α als functie van de drukhoogte.

Tabel 10 De drukhoogten (cm) die het verloop van de Sink term variabele α beschrijven van de gemodelleerde gewassen

Gewas	H1	H2	H3H	H3L	H4
Aardappelen	-10	-25	-320	-320	-16000
Bieten	-10	-25	-320	-320	-16000
Maïs	-10	-25	-200	-800	-8000
Granen	-10	-25	-790	-2000	-10000
Gras	-10	-25	-200	-800	-8000

H1 = verzadigingspunt, waarbij volledig anaërobe omstandigheden optreden

H2 = grenswaarde waarbij α gaat afnemen door anaërobe omstandigheden

H3H = grenswaarde waarbij α gaat afnemen bij een hoge atmosferische verdampingsvraag

H3L = grenswaarde waarbij α gaat afnemen bij een lage atmosferische verdampingsvraag

H4 = verwelkingspunt

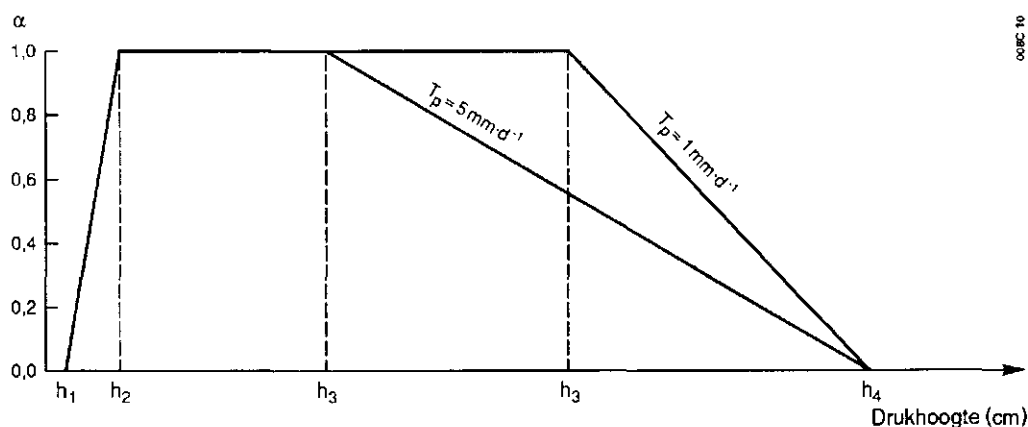


Fig. 15 Het verloop van de Sink term variabele α als functie van de drukhoogte

De Leaf Area Index (LAI)

In dit project is de LAI steeds gerelateerd aan de bodembedekkingsgraad met de

betrekking (Feddes et al., 1978):

$$LAI = a * Sc + b * Sc^2 + c * Sc^3 \quad (-) \quad (40)$$

Hierin is: Sc = bodembedekkingsgraad (-)
 a, b, c = constanten (-)

De waarden voor a, b en c staan in tabel 11.

Tabel 11 Gebruikte waarden voor regressie-coëfficiënten a, b en c in formule (40) voor de berekening van de LAI

Gewas	a	b	c
aardappelen	2,5	1,6	0,9
bieten	2,5	1,6	0,9
maïs	2,91	0,957	0,0
granen			
gras			

De waarden voor aardappelen zijn gebaseerd op onderzoek dat verricht is op de Sinderhoeve (Van der Schans et al., 1982). Voor granen en gras is geen gebruik gemaakt van de LAI-waarde maar gerekend met de bodembedekkingsgraad (zie 6.1.3, de potentiële evaporatie).

De bedekkingsgraad (Sc)

In tabel 12 staat het verloop van de bodembedekkingsgraad (-) per gewas gedurende het groeiseizoen. De Sc voor aardappelen is bepaald door Van der Schans et al. (1982), voor de gewassen graan en maïs is gebruik gemaakt van het rapport van de Ad Hoc Groep Verdamping (1984). Voor gras is aangenomen dat Sc niet verandert en gelijk is aan 100%. Voor bieten zijn dezelfde waarden als voor aardappelen gebruikt.

Tabel 12 De bodembedekkingsgraad (Sc in %) op enkele dagen gedurende het groeiseizoen. Het dagnummer is het "Julian Daynumber" (DAYN). Het model SWACROP interpoleert lineair tussen de ingevoerde waarden.

Aardappelen		Graan		Maïs	
DAYN	Sc	DAYN	Sc	DAYN	Sc
91	0,0	90	0,0	130	0,0
121	0,0	157	1,0	190	1,0
166	0,95	175	1,0	270	1,0
186	0,95	220	0,0	271	0,0
254	0,1	273	0,0	273	0,0

De gewasfactor (f)

Om de potentiële evapotranspiratie te berekenen wordt de evapotranspiratie van het

referentiegewas volgens Makkink (1957) vermenigvuldigd met de gewasfactor (6.1.3).

Deze gewasfactor verschilt per decade. In tabel 13 staan per gewas per decade de gebruikte gewasfactoren (Feddes, 1987). Het model SWACROP interpoleert de waarde van de gewasfactor tussen de opgegeven dagen. Voor bieten zijn dezelfde waarden als voor aardappelen gebruikt.

Tabel 13 *De gewasfactoren voor aardappelen, gras, graan en maïs per decade. Een - geeft aan dat voor die data geen modellering heeft plaats gevonden. Voor bieten zijn dezelfde waarden gebruikt als voor aardappelen.*

Maand	Decade	Aardappelen	Gras	Graan	Maïs
april	1	-	1,0	0,7	-
	2	-	1,0	0,8	-
	3	-	1,0	0,9	-
mei	1	-	1,0	1,0	0,5
	2	0,7	1,0	1,0	0,7
	3	0,9	1,0	1,0	0,8
juni	1	1,0	1,0	1,2	0,9
	2	1,2	1,0	1,2	1,0
	3	1,2	1,0	1,2	1,2
juli	1	1,2	1,0	1,0	1,3
	2	1,1	1,0	0,9	1,3
	3	1,1	1,0	0,8	1,2
augustus	1	1,1	1,0	0,6	1,2
	2	1,1	1,0	-	1,2
	3	1,1	0,9	-	1,2
september	1	0,7	0,9	-	1,2
	2	-	0,9	-	1,2
	3	-	0,9	-	1,2

De wortelgroei

Voor de worteldiepte zijn de maximale worteldiepte en de groeisnelheid van belang. Beide factoren zijn bodem- en grondwaterstandafhankelijk.

De bodem kan de wortelgroei beperken als in het profiel een storende laag voorkomt. Bij aardappelen kan dit voorkomen, omdat de wortels van aardappelen een lage indringingskracht hebben.

De grondwaterstand is van belang, omdat de wortels door zuurstofgebrek niet beneden dit peil kunnen groeien. Het dalen van de grondwaterstand in het voorjaar is dan ook vaak de beperkende factor bij de groeisnelheid. Hierbij komt dat een grond met een hoge grondwaterstand in het voorjaar minder snel opwarmt door de hoge warmtecapaciteit van water. Hierdoor komt de groei later op gang.

In aanhangsel 6 staat voor verschillende gewassen, grondwaterstanden en bodemsoorten het verloop van de worteldiepte gedurende het groeiseizoen.

Infiltratie en interceptie

De hoeveelheid water uit de neerslag dat ten goede kan komen aan de wortels, is de totale neerslag verminderd met de evaporatie en de interceptie door het gewas. In formulevorm:

$$I = N - E_{\text{soil}} - E_{\text{int}} \quad (\text{cm.d}^{-1}) \quad (41)$$

Hierin is: I = infiltratie (cm.d^{-1})
 N = neerslag (cm.d^{-1})
 E_{soil} = actuele evaporatie (cm.d^{-1})
 E_{int} = interceptie door gewas (cm.d^{-1})

De interceptie wordt in SWACROP afhankelijk gesteld van de bodembedekking en de neerslag. Voor een neerslag groter of gelijk aan 2 mm.d^{-1} geldt:

$$E_{\text{int}} = Sc * 0,19 \quad (\text{cm.d}^{-1}) \quad (42)$$

Is de neerslag minder dan 2 mm.d^{-1} dan geldt:

$$E_{\text{int}} = Sc * 0,169 * P^{(0,561 - 0,1787 * (P - 0,0593))} \quad (\text{cm.d}^{-1}) \quad (43)$$

6.1.6 Invoergegevens voor de hydrologie

De gebruikte grondwatertrappen en peilbuizen voor de karakterisering van de bodem-hydrologische eenheden

De gegevens die op de hydrologie betrekking hebben zijn afkomstig van gemeten waarden in peilbuizen van de IGG-TNO en provinciale meetnetten (zie aanhangsel 7). Aangezien de modellering heeft plaats gevonden per bodemkundig-hydrologische eenheid zijn ook de (gereviseerde) grondwatertrappenkaarten van belang. Als peilbuizen minder dan vijf keer over het groeiseizoen gemeten zijn, worden de waarden niet gebruikt bij de modellering. In plaats daarvan zijn de grondwaterstandsgegevens gebruikt van de dichtstbijzijnde peilbuis binnen die grondwatertrap. De bodemsoort wordt daarbij van minder belang geacht. Van hoofdeenheden waarvan geen gegevens voorhanden waren, is gerekend met gegevens van peilbuizen die op grond van bodemsoort (zand of veen) en grondwaterstandscriteria gekozen zijn.

In tabel 14 zijn de doorgerekende bodemhydrologische eenheden weergegeven met de codes van de bodemkaart, grondwatertrappen, hoofdeenheden en de gebruikte peilbuisgegevens. Per associatie zijn de twee in die associatie voorkomende eenheden doorgerekend. Sommige eenheden zijn een in het gebied voorkomende eenheid. De uitkomsten van deze associaties zijn een rekenkundig gemiddelde van beide hoofdeenheden. Hierdoor ontstaan 25 bodemhydrologische eenheden. Het uiteindelijk aantal te berekenen eenheden is 20, omdat een aantal associaties (nr. 16 t/m 25) gedeeltelijk gedekt worden door één van de bodemhydrologische eenheden 1 t/m 15.

Tabel 14 Bodem-hydrologische eenheden per bodemeenheid, grondwatertrap, hoofdeenheid volgens Tus-10-plan, eventuele associaties van hoofdeenheden en peilbuisgegevens. De associaties 107, 108 en 109 bestaan uit één hoofdeenheid, de associaties 111 tot en met 131 uit een combinatie van twee hoofdeenheden.

Nr.	Bodemeenheid	Gt	He	Associatie	Peilbuis
1	Hn21	VI	1 Hn21		12H-L10
2	Hn21	VII	1 Hn21		12G-18
3	Hn21	VII	1 Hn21		12G-17
4	Hn23	VIII	4 Hn23		12G-17
5	pZn21	VI	1 Hn21		12H-L10
6	pZn23	VI	4 Hn23		12H-L10
7	faVc	IIIb	21 hVc/hVz		12H-L505
8	aVc	IIIb	9 aVz/Vz		12H-L505
9	aVz	IIIb	9 aVz/Vz		12H-L505
10	vWz	IIIb	9 aVz/Vz		12H-L505
11	iWz	IIIb	8 iVz/iVc		12H-L7
12	iWz	IV	8 iVz/iVc		12H-L9
13	iWp	IIIb	6 iWp		12H-L7
14	iWp	IV	6 iWp		12H-L9
15	iWp	VI	6 iWp		12H-L11
16	Ass 107	IIIb	8 iVz/iVc	iVz/iWz	12H-L7
17	Ass 108	IIIb/IV	8 iVc/iVc	iVz/iWz	12H-L9
18	Ass 109	IV	8 iVz/iVc	iVz/iWz	12H-L9
19	Ass 111	VI	6/1	iWp/Hn21	12H-L11/12H-L10
20	Ass 112	VII	6/1	iWp/Hn21	12G-18/12H-L10
21	Ass 114	IV	8/4	iWz/pZn23	12H-L9/12H-L9
22	Ass 115	IV/VI	8/4	iWz/pZn23	12H-L9/12H-L10
23	Ass 121	IIIb	9/19	vWz/zWz	12H-L505/12H-L7
24	Ass 124	VI	9/19	vWz/zWz	12H-L11/12H-L9
25	Ass 131	IIIb	4/18	pZn23/zWz	12H-L7/12H-L7

6.1.7 Invoergegevens voor de discretisatie van het systeem

Om vergelijking 25 met een eindige differentietechniek op te kunnen lossen is het noodzakelijk dat zowel in de verticaal van het profiel als in de tijd een discretisatie plaatsvindt. Daartoe wordt over het profiel een grid gelegd met zowel een tijds- als een plaatsvariabele. Hierdoor ontstaan een aantal knooppunten waarvan alle knooppunten ("nodal points") in het centrum liggen van een profielcompartiment. Alleen voor de plaatsen waar deze punten liggen, wordt het profiel doorgerekend. Aangezien de nodal points representatief worden verondersteld voor de laag waarin ze liggen, is het mogelijk bodemfysische parameterwaarden aan deze punten toe te kennen. De uitkomsten van de berekeningen voor de nodal points worden vervolgens toegekend aan het compartiment waarin ze liggen.

De dikte van de compartimenten in het profiel is als volgt in het model ingevoerd:

- Van 0 tot 100 cm -mv: laagdikte 5 cm
- Van 100 tot 200 cm -mv: laagdikte 10 cm
- Van 200 tot 400 cm -mv: laagdikte 20 cm

In totaal levert dit dus 40 lagen op waarvoor berekening plaats moet vinden. De grens van een bouwsteen (zie 6.1.4) valt altijd samen met een grens tussen twee lagen. Als onderrandvoorwaarde is de grondwaterstand gebruikt. Dat betekent dat het aantal nodal points varieert met de fluctuerende grondwaterstand.

De maximale tijdsduur tussen twee tijdstippen waarvoor de iteratieberekening plaatsvindt is gesteld op 0,2 dagen.

6.1.8 Overige invoergegevens

De invoer voor SWACROP omvat meer dan nu genoemd is. Overige invoergegevens (soms variërend per bodemsoort en gewas) hebben onder andere betrekking op:

- de dikten van de verschillende bouwstenen;
- definiëring van de randvoorwaarden (bv. drainage, fluxen, percolatie, irrigatie);
- totale profieldikte;
- criteria voor het iteratieproces;
- keuze van de verdampingsformules en daarbij horende invoergegevens;
- keuze in beschrijving van de Sinkterm;
- uitgangspunten voor de start van de simulering;
- het ontstaan van een waterlaag op het profiel;
- berekening van de gewasgroei;
- variatie van de randvoorwaarden in de tijd.

6.2 Resultaten

Het is duidelijk dat voor het gebruik van SWACROP veel invoergegevens nodig zijn. Bovendien zorgt elke toevoeging van een gewas, bodemsoort en grondwatertrap voor een sterke toename in de benodigde gegevens. Verder zijn veel invoerparameters niet te meten of moet worden uitgegaan van aannames en veronderstellingen (bv. de juiste dikte van de verschillende bouwstenen bij de bodeminvoergegevens). Dit betekent dat enkele representatieve combinaties van gewassen, bodemsoorten en grondwatertrappen meer keren moeten worden doorgerekend om de gevoeligheid van de afzonderlijke parameters in iedere situatie te bepalen.

Het resultaat van de gesimuleerde verdamping voor 20 juni is te zien in figuur 16 en voor 23 augustus in figuur 17. De grenzen tussen de verschillende verdampingsklassen vallen veelal samen met die van bodemhydrologische eenheden.

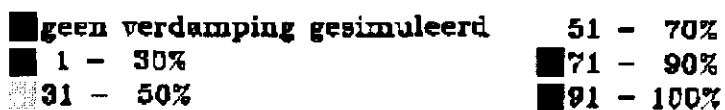


Fig. 16 *Relatieve verdamping van het proefgebied Gasselternijveen op 20 juni 1989 volgens simulaties met het model SWACROP*

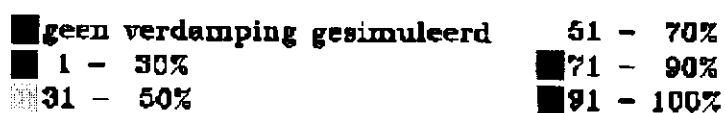


Fig. 17 *Relatieve verdamping van het proefgebied Gasselternijveen op 23 augustus 1989 volgens simulaties met het model SWACROP*

7 HYDROLOGISCHE INTERPRETATIE DEELGEBIED GASSELTERNIJVEEN

Om tot een goed inzicht te komen in de hydrologie van een gebied zijn hydrologische modellen een belangrijk hulpmiddel. Dergelijke modellen verschaffen informatie voor het gehele groeiseizoen. Remote sensing biedt potentieel de mogelijkheid om voor opnamedagen gedetailleerde informatie te verkrijgen. Dit onderzoek was gericht op de kartering van wateroverlastsituaties in het voorjaar en de kartering van vochttekorten in droge perioden van het groeiseizoen. Voor dit doel zijn in het voorjaar aan de hand van FC-foto's en MSS-opnamen natte plekken gekarteerd en zijn voor de zomersituatie verdampingskaarten gemaakt aan de hand van de digitale reflectie- en warmtebeelden. Via die gegevens van het oppervlak wordt geprobeerd conclusies te trekken over de hydrologische situatie (dynamiek van de waterhuishouding, invloed van verschillende grondwatertrappen, bodemsoorten) en de mogelijkheid van kwel/wegzijgingskartering in dit proefgebied.

7.1 Werkwijze

De dynamiek van de waterhuishouding is onderzocht door een classificatie te maken van natte plekken op het SPOTbeeld. De natte plekken of locaties met wateroverlast in het voorjaar zijn op die manier vastgelegd. Voor de interpretatie van deze classificatie zijn de FC-foto's van 2-4-1989 gebruikt. Vervolgens is met de FC-foto's van 23 augustus onderzocht of de natte plekken in het voorjaar snel genoeg verdwenen waren om geen nadelige invloed te hebben op de gewasgroei tijdens het groeiseizoen. Ook is een VI-beeld gemaakt van 23 augustus. Blijken de locaties van de natte plekken op 20 mei, een lage VI-waarde en verdrogingsverschijnselen op 23 augustus samen te vallen dan moet de oorzaak van die verdroging hoogst waarschijnlijk niet gezocht worden in een storende laag, maar in een achterstand in gewasontwikkeling door wateroverlast. Tevens is een vergelijking gemaakt met het verdampingsbeeld om te onderzoeken of de natte plekken in het voorjaar droogtegevoelige plekken zijn in het groeiseizoen. Dit zou een indicatie kunnen zijn voor een slechtdoorlatende laag.

Vervolgens is het verdampingsbeeld vergeleken met de grondwatertrappenkaart. Hierbij gaat het om de vraag of ondiepe grondwatertrappen inderdaad in een hogere verdamping resulteren of juist de ontwikkeling van het gewas belemmeren in het voorjaar. Een relatie met de natte plekken op het SPOTbeeld ligt hierbij voor de hand.

Omdat de bodemfysische eigenschappen van de bodemsoorten in het gebied sterk uiteenlopen is een vergelijking gemaakt tussen het verdampingsbeeld en de bodemkaart. Het doel hiervan is na te gaan of met het verdampingsbeeld en inachtneming van de grondwatertrapgegevens uitspraken kunnen worden gedaan over vochtleverend en/of waterbergend vermogen.

Het verdampingsbeeld is geconfronteerd met de gesimuleerde verdampingskaart, in eerste instantie visueel. Hierdoor kunnen overeenkomstige patronen het snelst worden herkend.

Een meer kwantitatieve beoordeling is gemaakt door de beide beelden over elkaar te leggen en per pixel beide beelden te vergelijken.

Het is duidelijk dat een kwel/wegzijgingspatroon gevolgen heeft voor de grondwaterstand. Deze relatie is echter niet eenduidig, aangezien kwelindicatoren voorkomen in alle grondwatertrappen. Om de mogelijkheid te onderzoeken van een kwel/wegzijgingskartering in dit gebied is daarom ook een vergelijking gemaakt tussen het verdampingsbeeld en een kaart met daarop de locaties van kwelindicatoren. Uit deze vergelijking en met inachtneming van grondwatertrapgegevens en bodemfysische eigenschappen van de verschillende bodems moet blijken of het kwel/wegzijgingspatroon waarneembaar is in het verdampingsbeeld. Hierbij moet opgemerkt worden dat beide methoden (verdampingsbeeld en locaties met kwelindicatoren) beide indirect zijn als het gaat om kwel- en wegzijgingskartering. Daardoor is "ruis" op voorhand een vrijwel zekere zaak.

7.2 Resultaten

7.2.1 Dynamiek van de waterhuishouding

Als eerste indicatie is een relatieve verdeling van de natte plekken en overige kale grond op 20 mei over alle verdampingsklassen op 23 augustus gemaakt. De vraag is in hoeverre de natte plekken in het voorjaar, droogtegevoelig blijken te zijn in de droge zomerperiode. De resultaten staan in tabel 15.

Opmerkelijk is dat de natte plekken met een hoger percentage dan het overige oppervlak worden toegedeeld aan de verdampingsklassen tot 90% van de relatieve verdamping.

Om te onderzoeken in hoeverre deze natte plekken een gevolg zijn van schijngrondwaterspiegels waardoor tegelijkertijd droogtegevoeligheid mogelijk is en daarmee verdroging, is een vergelijking gemaakt tussen de gekarteerde natte plekken en de grondwatertrappenkaart. De resultaten daarvan staan in tabel 16.

Tabel 16 toont dat natte plekken voorkomen bij Gt III en IIIb, dus met een GHG van minder dan 40 cm - mv. Bij een Gt IV, VI of VII zijn de natte plekken relatief minder aanwezig dan de overige kale grond. Dit betekent dat de natte plekken niet het gevolg zijn van schijngrondwaterspiegels, maar van een "gewone" hoge grondwaterstand.

Tabel 15 *Verdeling (%) van de natte plekken en overige kale grond op 20 mei 1989 over de verdampingsklassen op 23 augustus 1989*

Situatie 20 mei	Totaal opp.(ha)	Verdamping 23 augustus (in % van de potentiële verdamping)				
		1-30	31-50	51-70	71-90	91-100
nat	167	10	13	19	27	31
overig	748	5	10	17	26	42

Tabel 16 Verdeling (%) van de natte plekken en de overige kale grond op 20 mei 1989 over de grondwatertrappen zoals die gekarteerd zijn op de gereviseerde bodemkaart (Bodemkaart van Nederland, 1989)

Situatie 20 mei	Totaal opp.(ha)	Grondwatertrappen				
		III	IIIb	IV	VI	VII
nat	276	9	44	24	12	4
overig	930	1	22	36	28	11

7.2.2 Verdampingsbeeld en grondwatertrappenkaart

Om de invloed van de grondwatertrap op de verdamping te kunnen beoordelen is de verdeling per Gt berekend over de vijf onderscheiden verdampingsklassen. Tevens is per Gt de gemiddelde verdamping bepaald. Voor de verdamping op 20 juni (gras en graan) staan de resultaten in tabel 17, voor de verdamping op 23 augustus (aardappelen, bieten en maïs) in tabel 18. In beide tabellen valt de grote variatie in verdamping in elke grondwatertrap op.

Tabel 17 Variatie van de grondwatertrappen over de verdampingsklassen op 20 juni 1989. Verdamping in procenten van de potentiële verdamping. Gem. is de gemiddelde verdamping per Gt, gewogen naar oppervlak van de verschillende verdampingsklassen per Gt

Gt	Totaal	Verdamping 20 juni (in % van de potentiële verdamping)					
		1-30	31-50	51-70	71-90	91-100	gem.
III	11	15	31	23	21	10	55
IIIb	138	9	16	24	32	19	66
IV	138	4	10	21	33	31	73
VI	92	9	18	28	31	15	64
VII	49	23	23	28	21	5	51

Tabel 18 Variatie van de grondwatertrappen over de verdampingsklassen op 23 augustus 1989. Verdamping in procenten van de potentiële verdamping

Gt	Totaal	Verdamping 23 augustus (in % van de potentiële verdamping)					
		1-30	31-50	51-70	71-90	91-100	gem.
III	28	11	14	23	24	28	67
IIIb	295	10	14	22	27	27	68
IV	374	4	7	12	25	51	80
VI	270	7	11	20	29	34	72
VII	125	9	20	26	25	20	64

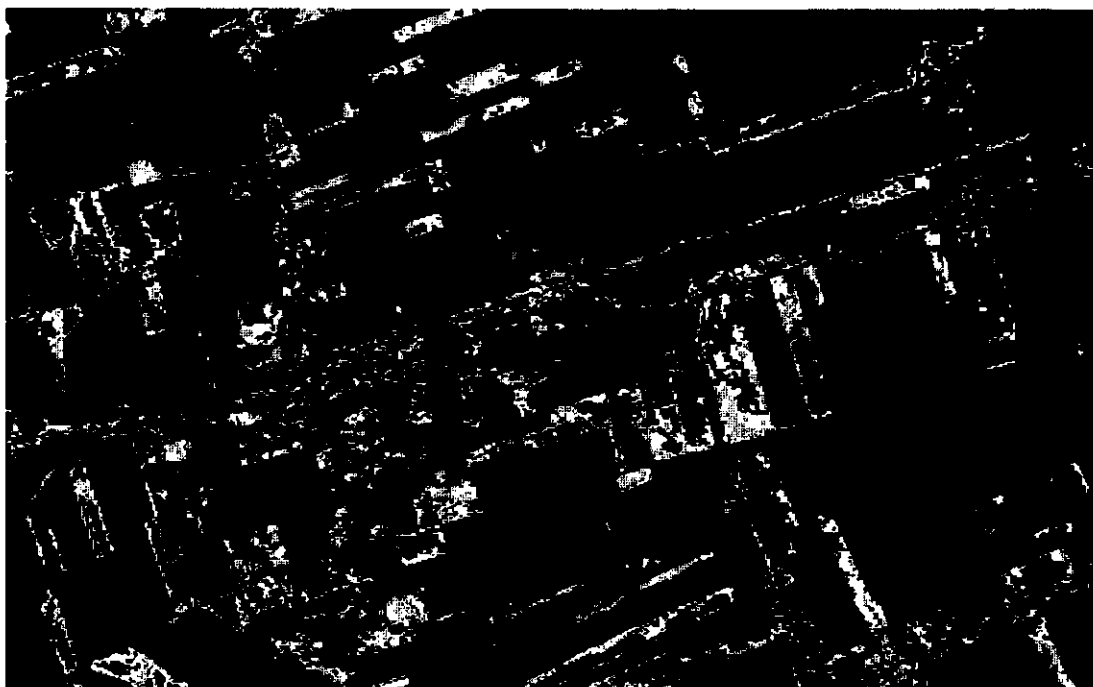


Fig. 18 Relatieve verdamping op 20 juni 1989 gecorrigeerd voor wateroverlast

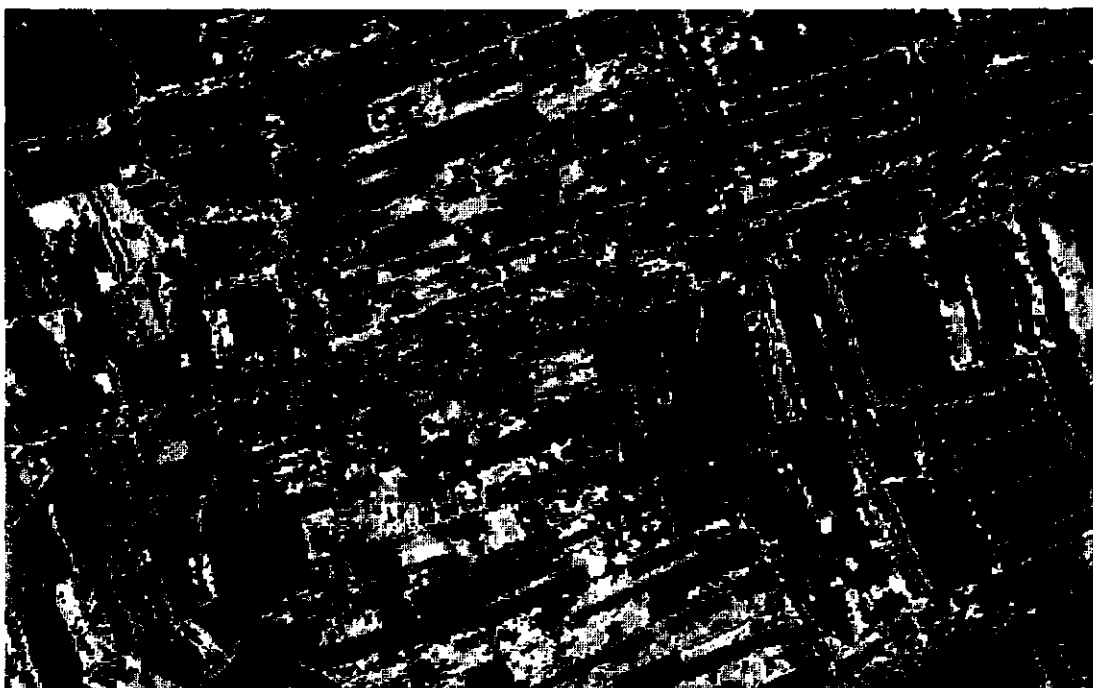


Fig. 19 Relatieve verdamping op 23 augustus 1989 gecorrigeerd voor wateroverlast

Per kolom zijn de twee hoogste percentages cursief gedrukt. Dat zijn dus de twee Gt's die relatief het sterkst met die verdampingklasse samenvallen. Voor beide verdampingsdagen komt hetzelfde patroon terug: de sterkste verdampingsreductie bij Gt III, IIIb en VII en de hoogste verdamping bij Gt IV. Het ligt voor de hand dat de waarden voor de verdamping op bodems met een Gt III en IIIb niet op verdroging wijzen, maar op een beperking van de gewasontwikkeling door een ondiepe grondwaterstand. Om een zinvolle vergelijking te kunnen maken met andere themakaarten en de simulatiekaart, is daarom eerst gecorrigeerd voor de wateroverlast.

Omdat de wateroverlast in eerste instantie gevolgen heeft voor de gewasontwikkeling is als criterium een waarde in de VI van de augustus- en junibeelden gebruikt. Deze waarde is bepaald aan de hand van FC-foto's waarop duidelijk te zien valt of een gewas staat te verdrogen of dat de gewasontwikkeling slecht is. Verder is alleen gecorrigeerd voor gebieden die binnen een Gt III of IIIb vallen, dus daar waar de GHG minder dan 40 cm - mv. is. Op de verdampingskaart ontstaat door deze bewerking een nieuwe klasse, namelijk wateroverlast (fig. 18 en 19). De hierdoor ontstane nieuwe verdampingskaart is gebruikt voor de vergelijkingen met de verschillende bodemsoorten, de simulatiekaart en de kwelindicatoren.

7.2.3 Verdampingsbeeld en bodemkaart

Om te weten of bepaalde bodemsoorten een relatief gunstige waterhuishouding hebben is een vergelijking gemaakt tussen de verdampingsbeelden en de bodemkaart. De gemiddelde verdamping per hoofdeenheid wordt sterk bepaald door de verdeling van die bodemsoort over de verschillende grondwatertrappen. Om toch een verantwoorde vergelijking te kunnen maken tussen de verschillende hoofdeenheden moet daarom de gemiddelde verdamping per hoofdeenheid vergeleken worden met de verdamping per hoofdeenheid berekend met de gemiddelde verdamping per Gt. Bij deze laatste berekening wordt de verdamping bepaald door de verdeling van de hoofdeenheden over de verschillende Gt's en de gemiddelde verdamping per Gt. De resultaten staan in tabel 19 en 20.

Het gaat om het verschil tussen de percentages in de laatste twee kolommen, en om het verschil of de verschuiving ervan tussen de twee tijdstippen. Bij drie hoofdeenheden is de verdamping zowel in juni als augustus hoger dan op grond van de verdeling over de Gt's berekend zou worden. Dit zijn de associaties 107, 111 en 114. Bij zes hoofdeenheden is dat net omgekeerd. Het gaat hier om hoofdeenheden 1, 4, 6, 9 en de associaties 115 en 131. Vier eenheden geven een verschuiving te zien naar een betere verdamping ten opzichte van de verdeling over de Gt's naarmate het groeiseizoen vordert. Het gaat hierbij om hoofdeenheid 8 en de associaties 108, 112 en 121. Bij één hoofdeenheid, associatie 109, verslechtert de situatie.

Interessant zijn hoofdeenheid 4 en de associaties 107, 111, 114, 115, 121 en 131. De overige hoofdeenheden of associaties geven nauwelijks een verschil te zien tussen de twee gemiddelde verdampingswaarden en tussen de verschillende tijdstippen.

Tabel 19 Verdeling in procenten van de bodemeenheden ingedeeld naar hoofdeenheden over de verdampingsklassen op 20 juni 1989. Verdamping in procenten van de potentiële verdamping. De hoofdeenheden in de onderste helft zijn nummers van de associaties. In tabel 14 staan de hoofdeenheden die onder een associatie vallen. In aanhangsel 3 staan de belangrijkste legenda-eenheden per hoofdeenheid. De gemiddelde verdamping zoals die op het verdampingsbeeld (met RS) te zien is, heet gem. tot. De verdamping berekend met de Gt's heet gem. Gt.

Hoofd-eenh.	Totaal opp.(ha)	Verdamping 20 juni (in % van de potentiële verdamping)					Water overl.	Gem. tot.	Gem. Gt
		1-30	31-50	51-70	71-90	91-100			
1	39	14	24	29	26	6	1	56	57
4	4	17	22	20	22	18	0	59	64
6	33	9	19	25	35	12	0	63	67
8	45	6	12	23	30	23	5	70	72
9	83	5	10	20	32	14	20	68	70
Assoc.									
107	15	2	7	15	20	36	20	78	70
108	11	8	26	19	18	9	21	57	58
109	36	5	9	22	33	30	2	73	73
111	39	6	15	29	31	18	0	67	64
112	26	25	23	29	20	4	0	50	51
114	60	2	6	17	37	37	0	78	73
115	9	18	20	25	21	17	0	58	64
121	27	8	12	15	23	16	27	66	70
131	16	8	17	20	24	18	13	65	69

Om tot een verklaring te komen van de afwijkende verdampingswaarden volgt van deze profielen een korte beschrijving, ontleend aan Bannink en Stoffelsen (1984).

Hoofdeenheid 4 geeft een gemiddelde verdamping die 4% lager ligt dan de gemiddelde gewogen verdampingsberekening per Gt. Tot deze eenheid worden de veldpodzolgronden gerekend. De oorzaak van de lage verdamping is waarschijnlijk het gevolg van een zeer gebrekkig ontwikkeld wortelstelsel als gevolg van het sterk lemige, zeer fijne zand. Het profiel zelf geeft geen aanleiding tot verdroging: de verschillende lagen hebben een voldoende vochtnaleverend vermogen (zie aanhangsel 3 en 4).

De associatie 107 geeft zowel in juni als augustus een verdamping die veel hoger (8%) is dan berekend via de verdeling over de Gt's. De associatie 107 bestaat vrijwel geheel uit hoofdeenheid 8. Dit zijn veengronden met een veenkoloniaal dek op zand of veen. De stijghoogte van de verschillende bouwstenen is niet groot, maar met name de laag van 40 tot 120 cm bevat hoogst waarschijnlijk voldoende water om het gewas gedurende het groeiseizoen optimaal van water te voorzien.

De associatie 111 geeft een gemiddeld 5% hogere verdamping dan berekend is met de Gt's. Deze eenheid bestaat voor het grootste gedeelte uit de hoofdeenheden 1 en 6. Hoofdeenheid 1 bevat veldpodzolgronden. Deze bestaan uit leemarm en zwak lemig, fijn zand. De stijghoogte van de verschillende bouwstenen is groot, en de indringingsweerstand is waarschijnlijk voldoende lager dan bij hoofdeenheid 4 voor

de ontwikkeling van een goed wortelstelsel. Hoofdeenheid 6 bevat moerige podzolgronden met een veenkoloniaal dek en een moerige tussenlaag. De verschillende horizonten vertonen een lage stijghoogte bij een constante flux van 2 mm per dag (bouwstenen 7, 17 en 13a). De bouwstenen 7 en 13a bevatten tussen $pF = 2$ en $pF = 4,2$ weinig water, de laag die gekarakteriseerd wordt door bouwsteen 17 (ongeveer 40-60 cm - mv.) bevat tussen $pF = 2$ en $pF = 4,2$ 116 mm water. Het gemiddelde van hoofdeenheid 1 en 6 geeft de 5% hogere verdamping. Gezien de verdampingswaarden in tabel 19 en 20 bij hoofdeenheden 1 en 6 komt dit gemiddelde niet tot stand als een rekenkundig gemiddelde van deze twee hoofdeenheden. Een zekere overgangszone dan wel mogelijke vermenging van profielen door grondbewerking moet hier een sterk positieve invloed hebben op de waterhuishouding voor het gewas.

Tabel 20 Verdeling in procenten van de bodemeenheden ingedeeld naar hoofdeenheden over de verdampingsklassen op 23 augustus 1989. Verdamping in procenten van de potentiële verdamping. De hoofdeenheden in de onderste helft zijn nummers van de associaties. In tabel 14 staan de hoofdeenheden die onder een associatie vallen. In aanhangsel 3 staan de belangrijkste legenda-eenheden per hoofdeenheid. De gemiddelde verdamping zoals die op het verdampingsbeeld (met behulp van RS) te zien is heet gem. tot. De verdamping berekend met de Gt's heet gem. Gt.

Hoofd- eenh.	Totaal opp.(ha)	Verdamping 23 augustus (in % van de potentiële verdamping)					Water overl.	Gem. tot.	Gem. Gt
		1-30	31-50	51-70	71-90	91-100			
1	15	11	20	25	27	17	0	62	66
4	5	13	12	17	19	40	0	69	72
6	122	6	11	23	27	32	0	72	73
8	156	3	7	15	29	43	3	79	79
9	179	4	6	13	24	18	34	73	75
Assoc.									
107	28	2	5	11	24	46	12	82	75
108	31	1	3	10	18	26	43	80	79
109	81	6	9	15	24	46	0	76	80
111	120	4	8	16	30	43	0	78	72
112	85	9	19	26	26	21	0	65	64
114	140	4	6	10	22	58	0	82	80
115	32	19	18	20	26	17	0	59	72
121	89	2	5	13	16	33	31	78	75
131	3	4	19	15	13	14	35	64	74

Associatie 114 bestaat voornamelijk uit de hoofdeenheden 4 en 8 en vertoont een relatief hoge verdamping. Hoofdeenheid 8 beslaat veengronden met een veenkoloniaal dek op zand of veen. De stijghoogten van de lagen is gering, het waterbergend vermogen van dit profiel is ruim voldoende. De laag tussen 25 cm en 120 cm - mv. bevat 66 cm voor de plant beschikbaar water. Dit profiel is met name optimaal bij een Gt IV. Bij een Gt III of IIIb zal dit profiel een wateroverlast te zien geven. Dat wordt ook duidelijk in de tabellen 19 en 20 waar hoofdeenheid 8 wateroverlast te zien geeft (op een Gt IIIb) en associatie 114 niet. De hogere verdamping van deze associatie komt dus hoogst

waarschijnlijk door de combinatie van Gt 4 en hoofdeenheid 8.

Associatie 115 bestaat eveneens uit legenda-eenheden die vallen onder hoofdeenheid 4 en 8. Het verschil met associatie 114 is dat deze associatie voor een groot deel valt onder een Gt VI. Mogelijk komt de lage verdamping door de geringe stijghoogte van hoofdeenheid 8. Een andere mogelijkheid is dat door een gebrekkig wortelstelsel op hoofdeenheid 4 de grondwaterstand te ver is weggezakt om nog voor de plant van betekenis te zijn.

Associatie 121 vertoont in juni een relatief lage en in augustus een relatief hoge verdamping. Deze associatie bestaat uit de hoofdeenheden 9 en 19. Hoofdeenheid 9 omvat made- en vlierveengronden op zand. De toplaag bestaat uit veraard veen. Daaronder zit een veenlaag waarin laagjes vermengd met klei kunnen voorkomen. Na ongeveer 75 cm komt een laag bestaande uit humusarm, zwak tot sterk lemig, matig tot zeer fijn zand. Het waterbergend vermogen van dit profiel is zeer goed. De laag van 25-80 cm heeft een zeer geringe stijghoogte, die van de toplaag is 118 mm bij een flux van 2 mm per dag. In deze hoofdeenheid is de relatieve verdamping zowel in juni als augustus lager dan berekend met de verdeling over de verschillende Gt's. Hoofdeenheid 19 bestaat uit meerveengronden op veen of zand. De hoofdeenheid komt hoofdzakelijk voor in het Hunzedal. De laag van 25 - 100 cm bevat ongeveer 480 mm voor de plant opneembaar vocht en de toplaag heeft een stijghoogte van 110 mm per dag. De lage verdamping van 20 juni komt hoogst waarschijnlijk door wateroverlast want de profielen bevatten ruim voldoende water.

Associatie 131 vertoont in juni een zekere verdroging die verder oploopt in augustus. In deze associatie komen de hoofdeenheden 4 en 18 voor. Hoofdeenheid 18 vertoont vrijwel identieke kenmerken van hoofdeenheid 19. De verdroging kan niet alleen het gevolg zijn van hoofdeenheid 4. Wat hier werkelijk aan de hand is blijkt niet uit de profielbeschrijving van hoofdeenheid 18 of 19. Nader onderzoek lijkt hier dan ook zeer gewenst.

7.2.4 Verdampingsbeeld en gesimuleerde verdamping

Het resultaat van de vergelijking tussen het verdampingsbeeld en de gesimuleerde verdamping staat in tabel 21 voor juni en 22 voor augustus. Hierbij worden de verdampingswaarden per pixel vergeleken met die per bodemhydrologische eenheid. Het is zeer de vraag of dit een goede methode is. De verdamping met remote sensing geeft een sterk ruimtelijke variabiliteit te zien als gevolg van lokale invloeden. In de simulering gaat het om veel grotere eenheden met een uniforme verdamping.

Uit tabel 21 en 22 blijkt nauwelijks overeenkomst tussen beide methoden om tot een verdamping te komen. Het enige is een duidelijke tendens in de laagste en hoogste verdampingsklasse. Bepaalde patronen in de verdamping komen in beide beelden terug maar de gesimuleerde verdamping blijft over het algemeen fors hoger dan die berekend met de remote sensing. Hoe dit komt is niet geheel duidelijk. Aangezien beide methoden op geheel verschillende schaal de verdamping berekenen betekent dit dat in beide

beelden verschillende effecten een rol spelen. Op deze schaal is validatie van de simulatieresultaten met de verkregen remote-sensingresultaten niet mogelijk. Het is beter om de vergelijking niet kwantitatief uit te voeren maar visueel. Hoewel absoluut verschillen blijven bestaan, kunnen patronen in de verdamping elkaar dan goed aanvullen.

Tabel 21 *Kwantitatieve vergelijking tussen het verdampingsbeeld en de gesimuleerde verdamping voor 20 juni 1989. Verticaal is de verdamping bepaald met behulp van remote sensing, horizontaal de gesimuleerde verdamping.*

Verdamping door RS(%)	Opp. (ha)	Verdamping gesimuleerd met SWACROP (%)				
		1-30	31-50	51-70	71-90	91-100
1- 30	16	23	0	15	1	71
31- 50	27	21	0	5	2	72
51- 70	43	12	0	9	3	75
71- 90	61	6	0	10	3	81
91-100	31	2	0	13	3	82
wateroverl.	16	0	0	0	1	99

Tabel 22 *Kwantitatieve vergelijking tussen het verdampingsbeeld en de gesimuleerde verdamping voor 23 augustus 1989. Verticaal is de verdamping bepaald met behulp van remote sensing, horizontaal de gesimuleerde verdamping*

Verdamping met RS(%)	Opp. (ha)	Verdamping gesimuleerd met behulp van SWACROP (%)				
		1-30	31-50	51-70	71-90	91-100
1- 30	18	9	2	16	3	171
31- 50	33	10	4	14	2	70
51- 70	79	6	7	14	0	72
71- 90	153	3	6	18	0	73
91- 100	223	1	5	18	0	76
wateroverl.	36	0	0	0	0	100

7.2.5 Verdampingsbeeld en kwel/wegzijgingskaart naar kwelindicatoren

Van het deelgebied is een kaart gemaakt met daarop de locaties van kwelindicatoren. De verwachting is dat door kwel de planten meer water ter beschikking hebben en dat in het verdampingsbeeld dit patroon van hoge verdamping terug moet komen. Omdat elke kwelstroom in principe extra water betekent, is in eerste instantie geen onderscheid gemaakt naar de verschillende soorten kwelindicatoren. Een aantal soorten echter komt uitsluitend voor langs de slootkant en dat kan betekenen dat, met name bij een groot verschil tussen slootpeil en maaiveld, de landbouwgewassen niet profiteren van de kwel. Daarom is niet alleen een vergelijking gemaakt tussen de locaties van alle kwelindicatoren met de diverse kaarten maar is dat ook gedaan voor één speciale soort,

namelijk holpijp (*Equisetum fluviatile*). Binnen Drenthe wordt deze soort gezien als de kwelindicator bij uitstek. De soort is gebonden aan constant hoge grondwaterstanden door sterke kweltoestroming (Vegter, 1990).

Zeer waarschijnlijk beïnvloedt een kwelstroom de grondwaterstand. In plaats van een holle grondwaterspiegel in de loop van het groeiseizoen kan bij voldoende sterke kwel een bolle grondwaterspiegel ontstaan. Om te weten of de kwel sterk genoeg is om dit effect te veroorzaken is een vergelijking gemaakt tussen de locaties met kwelindicatoren en de grondwatertrappenkaart. Het resultaat hiervan staat in tabel 23.

Tabel 23 *Verdeling (%) van de locaties met kwelindicatoren over de verschillende grondwatertrappen zoals die gekarteerd zijn op de gereviseerde bodemkaart (Bodemkaart van Nederland, 1989). "geen" betekent het gehele areaal waar geen kwelindicatoren zijn aangetroffen, "wel" alle locaties waar dat wel is gebeurd. "holpijp" zijn alle locaties waar holpijp voorkomt.*

Kwelindicatoren	Grondwatertrappen				
	III	IIIb	IV	VI	VII
geen	3	30	34	23	11
wel	2	22	48	19	5
holpijp	9	50	14	27	0

Omdat de verschillende grondwatertrappen en verdampingsklassen verschillende areaalgrootten beslaan, moet in tabel 23, 24 en 25 niet zozeer gekeken worden naar de verhoudingen van de percentages per regel maar per kolom.

Uit tabel 23 valt af te leiden dat de meeste kwelindicatoren voorkomen op een Gt IV. Op een Gt III en IIIb is het percentage zelfs lager dan het areaal waar geen kwelindicatoren voorkomen. De verdeling van holpijp sluit beter aan bij hetgeen verwacht mag worden: het percentage op een Gt III is drie keer zo hoog en op een Gt IIIb 21% hoger dan van het areaal waar de plant niet voorkomt.

De mogelijkheid van kwelkartering aan de hand van een verdampingsbeeld kan alleen uitgevoerd worden als de kwelstroom of kwelstroomverschillen sterk genoeg zijn om andere effecten te overheersen. Hieronder vallen onder andere de verschillende hydrologische eigenschappen van bodemsoorten (bijv. stijghoogten, zie aanhangsel 5), verschillende grondwatertrappen die niet het gevolg zijn van kwel en de relatie tussen grondwaterstand en open waterpeil. Bij deze laatste spelen de horizontale doorlatendheid en de perceelsvorm en -grootte een belangrijke rol.

In tabel 24 staat de verdeling van de kwelindicatoren over de verdampingsklassen op 20 juni, in tabel 25 die over de verdampingsklassen op 23 augustus.

De locaties van alle kwelindicatoren bij elkaar geven in tabel 24 slechts een klein verschil te zien ten opzichte van de gebieden zonder kwelindicatoren. Merkwaardig is het zeer hoge percentage (67%) holpijp dat voorkomt in de verdampingsklasse 51-70%. Verder is het merkwaardig dat geen enkele locatie van holpijp in de hoogste

Tabel 24 *Verdeling (%) van de locaties van kwelindicatoren over de verdampingsklassen op 20 juni 1989. Verdamping in procenten van de potentiële verdamping*

Indicatoren	Verdamping 20 juni 1989 (in % van de potentiële verdamping)					Waterover- last
	1-30	31-50	51-70	71-90	91-100	
geen	8	14	23	29	19	7
wel	7	15	22	24	28	4
holpijp	0	0	67	17	0	17

Tabel 25 *Verdeling (%) van de locaties van kwelindicatoren over de verdampingsklassen op 23 augustus 1989. Verdamping in procenten van de potentiële verdamping*

Indicatoren	Verdamping 23 augustus (in % van de potentiële verdamping)					Waterover- last
	1-30	31-50	51-70	71-90	91-100	
geen	5	9	16	25	34	10
wel	5	8	21	27	33	6
holpijp	0	7	14	29	29	21

verdampingsklasse valt. Wel komt 17% terecht in de klasse wateroverlast. In tabel 25 blijkt dat het verschil tussen de locaties van alle kwelindicatoren en die waar deze niet voorkomen, vrijwel verdwenen is. Holpijp lijkt als indicator beter geschikt, want het percentage dat voorkomt in gebieden met sterke verdroging is minimaal en het voorkomen in gebieden met wateroverlast is in augustus 21%.

In deze paragraaf over de relatie tussen het verdampingsbeeld en kwel/wegzijgingskaart aan de hand van kwelindicatoren is alleen gekeken naar de kwantiteit van de eventuele kwel. Onderzoek naar de kwaliteit van het kwelwater zou mogelijk betere resultaten geven; of dat met remote-sensingtechnieken inderdaad mogelijk zal blijken te zijn is echter nog de vraag. Immers, waterkwaliteit kan van grote invloed zijn op het al dan niet aanwezig zijn van kwelindicatoren, terwijl juist waterkwantiteit de verdamping bepaalt. Verder hebben de locaties van kwelindicatoren in het Hunzedal betrekking op voorkomen in een vegetatieopname, terwijl voor het veenkoloniale deel de aanwezigheid per hectarehok is gecoörd. Dat betekent dat dichtheid van waarnemingen in het Hunzedal per soort gecentreerd is in één punt, en dus veel lager is dan in het veenkoloniale deel. Dit verklaart mede het lage percentage kwelindicatoren in de gebieden met de hoogste grondwaterstand. Als de kartering uniform over het hele gebied had plaatsgevonden, was het percentage kwelindicatoren op een Gt III of IIIb waarschijnlijk veel hoger geweest.

8 CONCLUSIES EN OPMERKINGEN

In diverse onderzoeken is aangetoond dat remote sensing het middel bij uitstek is voor de kartering van het grondgebruik. Een voorwaarde is dan wel dat een goede dataset van gegevens beschikbaar is. De opnamen die voor dit onderzoek beschikbaar waren, bleken ruim voldoende om het grondgebruik met een hoge nauwkeurigheid vast te leggen.

Het vervaardigen van een verdampingsbeeld met behulp van remote sensing kan alleen op een betrouwbare manier worden gedaan, indien aan een aantal voorwaarden wordt voldaan. Essentieel is dat kale grond geen invloed heeft op de stralingstemperatuur van een gewasperceel. Op grond van waarnemingen tijdens het veldwerk is de conclusie getrokken, dat aardappelen en bieten in ieder geval op 23 augustus een gesloten gewas vormden. Voor plekken met wateroverlast was dit niet juist. Hiervoor heeft alsnog een correctie plaats gevonden. De FC-foto's bleken hierbij onmisbare informatie te bevatten.

Voor het simuleren van de verdamping met behulp van het model SWACROP is alleen de grondwaterstand als onderrandvoorwaarde gebruikt. De gegevens hiervoor zijn ontleend aan peilbuizen die vrijwel altijd aan de rand van een perceel staan. Bij een bolle grondwaterspiegel in het voorjaar betekent dit een te lage stand, bij een holle grondwaterspiegel later in het groeiseizoen wordt een te hoge stand in het model ingevoerd. Een betere oplossing zou een koppeling zijn tussen de gemiddelde grondwaterstand en het open waterpeil. Deze relatie was voor dit onderzoek niet bekend, en de gegevens van het waterpeil waren niet beschikbaar. Een ander punt is de zeer gedetailleerde opbouw van de profielen met bijbehorende bodemfysische parameters die voor een gehele bodemhydrologische eenheid worden gebruikt. Hierdoor wordt een nauwkeurigheid gesuggereerd die in werkelijkheid niet bestaat.

Bij het onderzoek naar de dynamiek van de waterhuishouding heeft een classificatie plaatsgevonden van natte plekken. Deze kunnen ontstaan door kleine depressies in het terrein. Vaak vindt in zo'n depressie ophoping van moerig materiaal plaats. De classificatie van natte plekken is mogelijk door afnemende reflectie bij toenemend vochtgehalte. Lagere reflectie kan ook ontstaan door toenemend organische-stofgehalte of een moerige toplaag. Bij lokale depressies versterken deze effecten elkaar. Bij grote oppervlakken is de informatie van FC-foto's een noodzaak om invloeden van waterhuishouding en bodemsoorten te scheiden.

Het effect van wateroverlast in het voorjaar heeft met name op een Gt III en IIIb voor zomergewassen een blijvende groeiachterstand tot gevolg. Bij een verdampingskartering met behulp van remote-sensingtechnieken wordt deze groeiachterstand door wateroverlast gekarteerd als verdroging, omdat de bodembedekking lager is dan 100%. Bij een combinatie van onvoldoende gegevens over de gewastoestand en deze verdrogingskartering op een Gt III of IIIb is het beter deze gebieden niet in de beoordeling mee te nemen, eventueel standaard als potentieel verdampend te karteren of in een aparte klasse onder te brengen dan om het resultaat (verdroging) als werkelijke verdroging in het verdampingsbeeld te presenteren. Bij voldoende gegevens om een genuanceerde

correctie uit te voeren dient dit ook te gebeuren.

Na correctie van de verdamping op een Gt III en IIIb is het nog steeds moeilijk een direct verband te leggen tussen de verdamping en de Gt. Een zekere afname in de verdamping bij hogere Gt is wel te constateren. Dat dit effect niet spectaculair is, komt doordat de plant, hoewel de wortels het vrije grondwater al lang niet meer kunnen bereiken, door capillaire nalevering vaak nog water ter beschikking staat. Op plaatsen waarvan bekend is dat het naleverend vermogen van de grond beperkt is, loopt de verdamping sterk terug.

Het effect van de verschillende bodemsoorten op de verdamping is alleen waarneembaar als een sterke afwijking te vinden is in wortelgroei-beperking, waterbergend vermogen, naleverend vermogen of zuurstofhuishouding. Over het algemeen is de relatie tussen de verdamping en de verschillende soorten bodems niet voldoende om uitspraken te doen over specifieke eigenschappen van de bodemsoorten.

De vergelijking tussen het verdampingsbeeld en de gesimuleerde verdamping levert alleen in de extreme verdampingsklassen een enigszins logisch verband op. De overeenkomsten tussen beide beelden zijn, in percentages uitgedrukt, laag. Patronen komen wel met elkaar overeen, zij het dat deze in absolute waarde vaak verschillen. Bij de gesimuleerde verdamping van dit gebied wordt met uitzondering van Gt VII vrijwel het hele gebied als potentieel verdampend gekarteerd. Bij de remote-sensing-benadering wordt een sterk variërende verdamping berekend waarbij allerlei lokale effecten een rol spelen. Een reëel probleem vormen de associaties. Per associatie is wel bekend welke hoofdeenheden voorkomen, maar niet de verdeling over deze hoofdeenheden.

De relatie tussen de verdamping en de locaties van kwelindicatoren geeft voor de indicator holpijp betere resultaten dan wanneer alle kwelindicatoren bij elkaar genomen worden. De overeenkomst is echter niet voldoende om een eenduidige relatie te leggen tussen de verdampingspatronen en de kwel/wegzijgingspatronen. Beide methoden zijn indirecte aanwijzingen voor kwel of wegzijging. Dat betekent dat andere factoren zoals verschillende Gt's, bodemeenheden, stijghoogten, relatie grondwaterstand en open waterpeil, horizontale doorlatendheid, perceelsvorm en -grootte een grote invloed kunnen hebben op de resultaten. Hierbij speelt ook de betrekkelijk kleine omvang van het proefgebied. Op een groter gebied zijn globale patronen veel duidelijker.

In dit onderzoek is een directe vergelijking gemaakt tussen remote-sensingresultaten en de resultaten van andere karteringen (bodem- en Gt-kaart, kaart met kwelindicatoren). Misschien moet meer vanuit de remote-sensingbeelden worden geredeneerd. De gedetailleerde informatie (per pixel) kan dan beter benut worden. Bovendien is dan een patroongerichte benadering mogelijk. De informatie die zichtbare patronen op FC foto's en verdampingsbeelden bevatten, is in dit onderzoek nauwelijks aan de orde gekomen.

Tenslotte de vraag of aan een verdampingskartering door remote-sensingtoepassingen de voorkeur moet worden gegeven boven de gesimuleerde verdamping. Aan beide methoden zitten voor- en nadelen, zowel in produktie als produkt. Bij beide methoden worden aannamen en vereenvoudigingen toegepast. Het grootste probleem bij de remote

sensing is het verkrijgen van een goede dataset. Als die beschikbaar is geeft het remote-sensingprodukt een gefundamenteerd veel gedetailleerder beeld dan de gesimuleerde waarden en is daardoor betrouwbaarder.

LITERATUUR

AD HOC GROEP VERDAMPING, 1984. *Herziening van de berekening van de gewasverdamping in het hydrologisch model GELGAM*. Arnhem, Rijkswaterstaat, Begeleidingsgroep GELGAM provincie Gelderland.

BANNINK, M.H. en G.H. STOFFELSEN, 1984. *Bodemfysisch onderzoek ten behoeve van het tussen - 10 - plan*. Wageningen. STIBOKA, rapport nr. 1805.

BELMANS, C., J.G. WESSELING and R.A. FEDDES, 1983. "Simulationmodel of the water balance of a cropped soil: SWATRE". *J. Hydrol.* 63: 271-286.

BLACK, T.A., W.R. GARDNER and G.W. THURTELL, 1969. "The prediction of evaporation, drainage and soil water storage for a bare soil". *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 33.

BODEMKAART, 1977. *Bodemkaart van Nederland, schaal 1 : 50 000; blad 12 OOST, Assen*. Wageningen, STIBOKA.

BODEMKAART, 1989. *Bodemkaart van Nederland, schaal 1 : 50 000; blad 12 OOST, Assen, gereviseerd*. Wageningen, STIBOKA.

BOWERS, S.A. and R.J. HANKS, 1967. "Reflection of radiant energy from soils". *Soil Science*, Vol. 100, No. 2.

BRUIN, H.A.R. DE, 1981. "The determination of (reference crop) evapotranspiration from routine weather data". Comm. Hydrol. Research TNO, The Hague. *Proceedings and Information* 28: 261-274.

BRUIN, H.A.R. DE, 1987. "From Penman to Makkink". Comm. Hydrol. Research TNO, The Hague. *Proceedings and Information* 39: 5-31.

BRUNT, D., 1939. *Physical and Dynamical Meteorology*. Cambridge University Press.

BRUTSAERT, W., 1975. "The roughness length for water vapour, sensible heat and other scalars". *J. Atm. Sci.* 32: 2028-2031.

FEDDES, R.A., P.J. KOWALIK and H. ZARADNY, 1978. *Simulation of field water use and crop yield*. Wageningen, PUDOC.

FEDDES, R.A., 1987. "Crop factors in relation to Makkink reference-crop evapotranspiration". Comm. Hydrol. Research TNO, The Hague. *Proceedings and Information* 39:33-45.

FEDDES, R.A., P. KABAT, P.J.T. VAN BAKEL, J.J.B. BRONSWIJK and J. HALBERTSMA, 1988. Modelling soil water dynamics in the unsaturated zone-state of the art. *Journal of Hydrology*, 100: 69-111.

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.

JANSEN, L.L.F. and J.D. VAN AMSTERDAM, 1991. "On object approach to the classification of remotely sensed images". *Proceedings IGARSS*. Volume IV: 2192-2195.

KEIJMAN, J.Q., 1982. "Evaporation in the Rottegataspolder (Netherlands)". *Proc. Symp. Hydrol. Research Basins*. Sonderheft Landeshydrologie. Bundesamt fur Umweltschutz, Bern.

KNIPLING, E.B., 1970. "Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation". *Remote Sensing of Environment* 1 :155-159.

KOOREVAAR, P., G. MENELIK and C. DIRKSEN, 1983. "Elements of Soil Physics". Amsterdam, Elsevier, 21-22.

LILLESAND, T.M. and R.W. KIEFER, 1979. *Remote Sensing and image interpretation*. NEW York. John Wiley & Sons.

MAKKINK G.F., 1957. "Testing the Penman formula by means of lysimeters". *Journ. Int. of Water Eng.*, 11: 277-288.

MILTENBURG, J.W. and W. BEEKMAN, 1989. *Evaluation of crop transpiration with remote sensing and computer simulation models*. Wageningen, The Netherlands, The Winand Staring Centre, Report 1.

MONTEITH, J.L., 1973. *Principles of Environmental Physics-contemporary biology*. Edward Arnold, London, 23-38.

NIEUWENHUIS, G.J.A., 1986. "Thermography: principles and application in the Oost-Gelderland Remote Sensing study project". *ITC J.*, Vol. 1: 51-58.

NIEUWENHUIS, G.J.A., en C.L. PALLAND, 1982. *Verdamping van een aardappelgewas en de meting daarvan via remote sensing*. Wageningen. ICW Rapport 2.

PRASAD, R., 1988. "A linear root water uptake model". *Journal of Hydrology*, 99: 297-306.

RITCHIE, J.F. and E. BURNETT, 1991. "Dryland evaporative flux in a subhumid climate. II. Plant influences". *Agron. J.* 63: 56-62.

SEGUIN, B. and B. ITIER, 1983. "Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data". *Int. J. Remote Sensing* 4: 371-383.

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.

THOM, A.S., 1972. "Momentum, mass and heat exchange of vegetation". *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 98: 124-134.

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. 1: 493-494.

VEGTER, U., 1990. *Plantesoorten als hydrologische indicatoren in Drenthe*. Assen. Rapport Provincie Drenthe, Dienst Ruimte en Groen, afdeling Natuur, Landschap en Recreatie.

WIERINGA, J., en P.J. RIJKOORT, 1983. *Windklimaat van Nederland, klimaat van Nederland 2*. Den Haag, Staatsuitgeverij. pp. 64-68.

Niet-gepubliceerde bronnen

BASTIAANSEN, W.G.M., P. KABAT and M. MENENTI, 1989. *A new simulation model of bare soil evaporation in arid regions (EVADES)*. Wageningen, The Netherlands. ICW Nota 1938.

DROESEM, W.J. en A.M. VAN LIESHOUT, 1988. *Toepassingsmogelijkheden van Remote Sensing in de voorbereidingsfase van een landinrichtingsproject*. Wageningen, ICW nota 1832.

HOOGLAND, J., 1980. *Een verbeterd simulatiemodel voor de wateropname van landbouwgewassen*. Wageningen, ICW nota 1239.

SCHANS, D.A. VAN DER, M. DE GRAAF en A.J. HELLINGS, 1982. *De relatie tussen wateraanvoer, verdamping en productie bij het gewas aardappelen*. Wageningen. ICW nota 1376.

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

THUNNISSEN, H.A.M., 1984a. *Remote Sensing studieproject Oost-Gelderland; toepassing van hydrologische modellen en remote sensing*. Wageningen, ICW nota 1542, deelrapport 4: Hydrologisch onderzoek.

THUNNISSEN, H.A.M., 1984b. *Remote Sensing studieproject Oost-Gelderland; eenvoudige methode voor de bepaling van de regionale dagverdamping van een gewas met remote sensing*. Wageningen. ICW nota 1580, deelrapport 6.

AANHANGSEL 1 KORTE TOELICHTING OP DE "MAXIMUM LIKELIHOOD"- CLASSIFICATIE (MLHD)

Een veel gebruikt classificatiecriterium voor veel klassen is de beslisregel op grond van de grootste aannemelijkheid: maximum likelihood.

Bij deze methode wordt voor alle pixels de aannemelijkheid berekend als zou dat pixel tot een bepaalde klasse behoren. Vervolgens wordt het pixel bij die klasse ingedeeld waarvoor de aannemelijkheid het grootst is. De aannemelijkheid (kans op X) wordt hierbij gedefinieerd door de volgende functie:

$$P(X|w_i) = \frac{1}{(2)^{N/2} |C_i|} e^{-1/2(X-M_i)^T C_i^{-1} (X-M_i)}$$

hierin is: w_i = klasse i

M_i = midwaardevector voor klasse i

C_i = covariantiematrix voor klasse i

$|C_i|$ = determinant van C_i

N = aantal kenmerken (spectraalbanden)

De macht van e is een vermenigvuldiging die een getal oplevert. In deze macht betekent "T" transponeren en "-1" invertieren. C_i is een $N \times N$ matrix.

Het is mogelijk een apriorikans toe te voegen. Dat kan door gebruik te maken van een globale verdeling in grondgebruik. Als bijvoorbeeld bieten sterke overeenkomst vertonen met maïs, terwijl het areaal bieten vele malen groter is dan dat van maïs kan het invoeren van een apriori kans ervoor zorgen, dat de vermenging bieten-maïs opschuift ten gunste van de bieten. Dat betekent dat minder bieten tot maïs gerekend worden en meer maïs tot bieten, maar omdat het areaal bieten veel groter is dan dat van maïs zal de nauwkeurigheid hierdoor toenemen. In de bovenstaande functie wordt dan niet meer gewerkt met

$$P(X|w_i)$$

maar met

$$P(X|w_i)P(w_i)$$

Een interessant aspect is dat de covariantiematrix inverteerbaar moet zijn. Dat is niet mogelijk als een zeer homogeen trainingsgebied is aangewezen. Daardoor kunnen in de covariantiematrix in een rij en kolom allemaal nullen voorkomen. Een dergelijk trainingsgebied is wel in de procedure te gebruiken, maar het valt niet te voorspellen wat de invloed ervan op de classificatie zal zijn. Een dergelijk trainingsgebied heet een "bad signature" en dient vermeden te worden.

AANHANGSEL 2 DE PER HOOFDEENHEID TOEGEWEZEN LEGENDA-EENHEDEN

Nr.	Hoofd-eenheid	Aan de hoofdeenheden toe te wijzen legenda-eenheden (ha)							
		>660	660-500	500-300	300-150	150-100	100-50	50-25	<25
1	Hn21	pZn21, Hd21				pZn23g, Hn21g Hn(d)21		gHn30 Zd21	Zn21, Hd23g Hn23g, Hd21g
2	Hn21/F						Hd21/F	pZn21/A	Hn21/A
3	Hn21x			Hn21x/F	Hn21t			Hd21x	pZn21x
4	Hn23	pZn23			Hn23/F			Zn23	fHn21, kHn21, kHn23
5	Hn23x		pZn23x	Hn23x/F		pZn23t	pZn23x/F	kHn21x kHn23x, Hn23xg	mHn23x, pZn23x/F,
6	iWp	iVp					iVs	iWpc	iWpg, fWp, iVpc
7	iWpx			iVpx	iWpt		iVpt	iWpy	
8	iVz/iVc	iWz	fVz	fWz	iVzt, fVc	iVz/F	iVzt		
9	aVz/Vz	aVc, vWz		vWzx, vWzt	aVzt	aVzx, Vzx		daVz	dvWz, vWz/A
10	zWp	zVp	zWp/F	Zvp/F			cHn21w, zVs	Hn21w	
11	zWpx			zWpt		cHn23xw, zVpx	zWpx/F	cHn21xw, zVpt	Hn21xw
12	KX							mKX	
13	cHn23								
14	cHn23x	cHn23x		zEZ21x	cHn21x			cHn21t	cHn23t
15	cHn21	zEZ21	chd21						
16	pZg23				fpZg23		pZg21		
17	pZg23x	pZg23t		fpZg23t		fpZn21			fpZg23xt
18(1)	zVc/zVz	zWz		zWz/F		fpZg23x		zWzt	zWzx
19(2)	zVz/zVc	zWz		fzWz, zWz/F	fzVc	fzVz	zVzt	zWzt	zVzx
20	aVs	aVp, vWp,		Vs	Vp		aVpx, Vpx	vWpt	fVWpt
	vWpx								
21	hVc/hVz	faVz, fVWz		kWz, kVc	fVz, fhVc,	dvWp	fhVz		Wg, Mv41C,
	faVzt, fVc,			pVc	(kVp), Wg	hVzx	pVz, Wof		fpVc, kWzx,
	faVc, hVc					fVzt		kVz, fVWxt	
	fVWzt, hVz								
22	cY23	cY23	cY21	zEZ23x	cY23x	Y21	chd23	bzEZ23	mY23, Hd23/F
	zEZ23					bzEZ21		Hd23x, mY23x,	
						mZb23x		mcY23x, chd21x	

(1) Binnen het veenkoloniale gebied (2) Buiten het veenkoloniale gebied

AANHANGSEL 3 DE OPBOUW VAN DE HOOFDEENHEDEN DOOR DE BOUWSTENEN

De opbouw van de hoofdeenheden door de bouwstenen bij het gewas gras en de dikte van de effectieve wortelzone

Hoofdeenheid		Eff. wortelzone		Ondergrond							
nr.	code legenda- eenheid	diepte (cm-mv.)	nr. bouw- steen (1)	1e laag		2e laag		3e laag		4e laag	
				diepte (cm-mv.)	nr. bouw- steen (1)	diepte (cm-mv.)	nr. bouw- steen(1)	diepte (cm-mv.)	nr. bouw- steen(1)	diepte (cm-mv.)	nr. bouw- steen (1)
1	Hn21	0-20	2	> 20	13a						
2	Hn21/F	0-25	2	> 25	13a						
3	Hn21x	0-20	2	20- 80	15	> 80	16				
4	Hn23	0-20	4	20- 50	15	> 50	14				
5	Hn23x	0-20	4	20- 50	15	50- 80	14	> 80	16		
6	iWp	0-25	7	25- 60	17	> 60	13a				
7	iWpx	0-25	7	25- 50	17	50-100	13a	>100	16		
8	iVc/iVz	0-20	8	20- 40	17	40-120	19	>120	22		
9	aVz/Vz	0-20	9	20- 80	20	> 80	22				
10	zWp	0-25	10	25- 50	18	> 50	13a				
11	zWpx	0-25	10	25- 50	21	50- 90	14	> 90	16		
12	KX	0-15	5	15- 35	14	> 35	16				
13	cHn23	0-30	4	30- 40	4	40- 60	15	> 60	14		
14	cHn23x	0-30	4	30- 40	4	40- 60	15	60- 80	14	>80	16
15	cHn21	0-30	3	30- 40	3	> 40	13a				
16	pZg23	0-30	1	> 30	22						
17	pZg23x	0-25	1	25- 80	22	> 80	16				
18	zVc/zVz(2)	0-20	10	20- 50	17	50-100	18	>100	22		
19	zVc/zVz(3)	0-25	10	25-100	20	>100	22				
20	aVs	0-15	11	15-120	18	>120	13a				
21	hVc/hVz	0-20	12	20-100	20	>100	22				
22	cY23	0-30	6	30- 50	6	50- 70	23	> 70	24		

(1) Voor de verklaring van het nummer van de bouwsteen zie aanhangsel 4

(2) Binnen het veenkoloniale gebied

(3) Buiten het veenkoloniale gebied

De opbouw van de hoofdeenheden voor de bouwstenen bij het gewas graan en de dikte van de effectieve wortelzone

Hoofdeenheid		Eff. wortelzone		Ondergrond				
nr. code legenda- eenheid	diepte (cm-mv.)	nr. bouw- steen (1)	1e laag		2e laag		3e laag	
			diepte (cm-mv.)	nr. bouw- steen (1)	diepte (cm-mv.)	nr. bouw- steen(1)	diepte (cm-mv.)	nr. bouw- steen(1)
1 Hn21	0-40	2	> 40	13a				
2 Hn21/F	0-35	2	> 35	13a				
3 Hn21x	0-35	2	35- 80	15	> 80	16		
4 Hn23	0-35	4	35- 50	15	> 50	14		
5 Hn23x	0-35	4	35- 50	15	50- 80	14	> 80	16
6 iWp	0-40	7	40- 60	17	> 60	13a		
7 iWpx	0-40	7	40- 65	17	50-100	13a	>100	16
8 iVc/iVz	0-40	8	40- 55	17	40-120	19	>120	22
9 aVz/Vz	0-40	9	40- 80	20	> 80	22		
10 zWp	0-35	10	35- 50	18	> 50	13a		
11 zWpx	0-35	10	25- 50	21	50- 90	14	> 90	16
12 KX	0-20	5	20- 35	14	> 35	16		
13 cHn23	0-50	4	50- 60	15	> 60	14		
14 cHn23x	0-50	4	50- 60	15	60- 80	14	> 80	16
15 cHn21	0-45	3	> 45	13a				
16 pZg23	0-40	1	> 40	22				
17 pZg23x	0-35	1	35- 80	22	> 80	16		
18 zVc/zVz(2)	0-25	10	25- 50	17	50-100	18	>100	22
19 zVc/zVz(3)	0-40	10	40-100	20	>100	22		
20 aVs	0-20	11	20-120	18	>120	13a		
21 hVc/hVz	0-20	12	20-100	20	>100	22		
22 cY23	0-50	6	50- 70	23	> 70	24		

(1) Voor de verklaring van het nummer van de bouwsteen zie aanhangsel 4

(2) Binnen het veenkoloniale gebied

(3) Buiten het veenkoloniale gebied

De opbouw van de hoofdeenheden door de bouwstenen bij het gewas aardappelen en de dikte van de effectieve wortelzone

Hoofdeenheid		Eff. wortelzone		Ondergrond			
nr. code legenda- eenheid	diepte (cm-mv.)	nr. bouw- steen (1)	1e laag		2e laag		3e laag
			diepte (cm-mv.)	nr. bouw- steen (1)	diepte (cm-mv.)	nr. bouw- steen(1)	nr. bouw- steen(1)
1 Hn21	0-30	2	> 30	13a			
2 Hn21/F	0-35	2	> 35	13a			
3 Hn21x	0-30	2	30- 80	15	> 80	16	
4 Hn23	0-30	4	30- 50	15	> 50	14	
5 Hn23x	0-30	4	30- 50	15	50- 80	14	> 80 16
6 iWp	0-40	7	40- 60	17	> 60	13a	
7 iWpx	0-40	7	40- 50	17	50-100	13a	>100 16
8 iVc/iVz	0-25	8	25- 40	17	40-120	19	>120 22
9 aVz/Vz	0-25	9	25- 80	20	> 80	22	
10 zWp	0-35	10	35- 50	18	> 50	13a	
11 zWpx	0-35	10	25- 50	21	50- 90	14	> 90 16
12 KX	0-20	5	20- 35	14	> 35	16	
13 cHn23	0-50	4	50- 60	15	> 60	14	
14 cHn23x	0-50	4	50- 60	15	60- 80	14	> 80 16
15 cHn21	0-45	3	> 45	13a			
16 pZg23	0-40	1	> 40	22			
17 pZg23x	0-35	1	35- 80	22	> 80	16	
18 zVc/zVz(2)	0-25	10	25- 50	17	50-100	18	>100 22
19 zVc/zVz(3)	0-30	10	30-100	20	>100	22	
20 aVs	0-20	11	20-120	18	>120	13a	
21 hVc/hVz	0-20	12	20-100	20	>100	22	
22 cY23	0-50	6	50- 70	23	> 70	24	

(1) Voor de verklaring van het nummer van de bouwsteen zie aanhangsel 4

(2) Binnen het veenkoloniale gebied

(3) Buiten het veenkoloniale gebied

AANHANGSEL 4 DE STIJGHOOGTEN VAN DE BOUWSTENEN

De stijghoogten van de bouwstenen bij een constante flux van 2 mm.d^{-1} , pF bovenkant is 4,2

Nr. bouwsteen	Stijghoogte (cm)	Legenda-eenheid, horizont en aanduiding	
1	64	pZg23	A1, lemig, fijn zand
2	136	Hn21	A1, leemarm en zwak lemig, fijn zand
3	162	cHn21	A1, idem
4	144	Hn23	A1, lemig, fijn zand
5	114	KX	A1, lemig, fijn zand
6	212	cY23	A1, lemig, fijn zand
7	84	iWp	A1, veenkoloniaal dek
8	68	iVc/iVz	A1, veenkoloniaal dek
9	118	aVz/Vz	A1, veraarde bovengrond
10	110	zWp	A1, humushoudend zanddek
11	91	aVs	A1, veraarde bovengrond, madeveengrond
12	115	hVc/hVz	A1, kleiige, moerige eerdlaag
13	65	Hn21	C1, leemarm en zwak lemig, fijn zand
13a	77	Hn21	C1, idem
14	146	Hn23	C1, lemig, fijn zand
15	101	Hn23	B2, kazige B2-horizont
16	75	KX	C1, keileem
17	50	iVp	C1, los veen (bolster)
18	44	zVc/zVz	C1, vast oligotroof veen
19	73	iVc/iVz	C1, moerasbosveen
20	64	aVz/Vz	C1, vast mesotroof veen
21	31	zWp	D1, gliede
22	106	pZg23	C1, lemig, fijn zand
23	129	cY23	B2, lemig, fijn zand
24	182	cY23	C1, zeer sterk lemig, fijn zand

De nummers 1 t/m 12 hebben betrekking op bouwstenen van bovengronden, de overige nummers betreffen bouwstenen van ondergronden.

AANHANGSEL 5 BIJ DE SWACROP-BEREKENINGEN TOEGEPASTE INVOERFILE MET METEOROLOGISCHE GEGEVENS (EELDE) EN NEERSLAGGEGEVENS (GIETERVEEN)

Day (nr)	P (mm)	Glob Rad (J/cm ² !)	Temp (°C)	RH (-)	Day (nr)	P (mm)	Glob Rad (J/cm ² !)	Temp (°C)	RH (-)
MAART 1989					103	3.5	329	8.3	.99
60	4.7	219	5.1	.92	104	2.8	366	8.4	.98
61	5.7	737	6.4	.86	105	0.0	801	7.8	.90
62	4.7	311	6.5	.96	106	0.0	395	7.5	.91
63	0.1	535	7.7	.91	107	0.5	2044	5.1	.78
64	0.3	416	9.7	.95	108	0.0	552	4.5	.91
65	0.0	1131	11.2	.82	109	3.6	1781	5.8	.83
66	0.0	240	8.7	.89	110	1.4	1458	5.4	.84
67	25.6	289	4.9	.91	111	0.5	939	6.5	.91
68	1.6	650	6.8	.81	112	0.0	1552	6.4	.83
69	0.1	817	9.7	.77	113	0.2	988	4.9	.82
70	0.5	741	8.5	.88	114	9.3	464	4.0	.96
71	0.0	908	6.4	.86	115	1.7	677	6.6	.93
72	1.8	232	7.4	.85	116	3.2	569	4.6	.84
73	4.0	755	6.5	.82	117	0.6	1546	4.5	.75
74	3.8	325	5.7	.90	118	0.0	1642	4.3	.79
75	0.7	520	2.6	.93	119	0.0	1515	5.6	.83
76	6.7	912	3.6	.85	120	0.2	1837	6.9	.79
77	0.1	1087	3.2	.75					
78	0.2	320	6.8	.89	MEI 1989				
79	0.5	612	6.9	.85	121	0.0	2192	11.6	.66
80	4.1	849	4.3	.88	122	0.0	1938	12.2	.87
81	0.9	377	7.4	.89	123	0.0	2422	10.5	.84
82	3.1	1066	5.2	.76	124	0.0	2489	12.6	.79
83	15.9	346	6.9	.87	125	0.0	1663	11.6	.82
84	9.3	939	5.5	.80	126	0.4	1638	8.2	.74
85	0.0	750	7.3	.85	127	0.0	1755	8.7	.78
86	0.0	1558	12.3	.68	128	0.0	2399	11.0	.78
87	0.0	1440	13.4	.73	129	0.0	2263	10.9	.80
88	0.0	1737	8.2	.69	130	0.0	2463	8.4	.77
89	0.0	1648	9.9	.80	131	0.0	1126	11.0	.83
90	0.0	942	10.0	.87	132	4.3	1197	9.2	.86
					133	7.6	1283	8.4	.85
APRIL					134	2.7	1918	10.7	.74
91	0.0	891	6.0	.85	135	0.0	1798	13.1	.70
92	0.0	1330	1.9	.65	136	0.0	1872	13.5	.74
93	0.0	1845	1.9	.62	137	0.0	1687	11.6	.85
94	0.0	699	2.8	.61	138	0.0	2362	17.1	.68
95	0.0	454	3.4	.74	139	0.0	2387	17.9	.65
96	4.5	347	4.2	.97	140	0.0	2634	17.2	.73
97	17.1	846	6.4	.86	141	0.0	2785	17.6	.56
98	2.8	1397	6.9	.80	142	0.0	2966	15.4	.41
99	0.1	1778	8.1	.74	143	0.0	2888	18.3	.45
100	0.4	621	10.9	.78	144	0.0	2817	20.3	.45
101	2.9	1353	11.2	.79	145	0.0	2781	21.0	.47
102	2.7	406	10.8	.92	146	0.0	2389	13.2	.80

VERVOLG AANHANGSEL 5

Day (nr)	P (mm)	Glob Rad (J/cm ² !)	Temp (°C)	RH (-)	Day (nr)	P (mm)	Glob Rad (J/cm ² !)	Temp (°C)	RH (-)
147	0.0	2965	11.6	.75	195	0.7	1752	13.6	.74
148	0.0	2583	12.7	.73	196	0.2	1110	14.7	.82
149	0.0	2092	11.3	.75	197	0.0	2166	13.6	.73
150	0.0	1842	10.7	.70	198	0.0	1214	14.1	.82
151	0.2	1778	8.6	.71	199	0.5	1896	14.3	.73
JUNI 1989					200	0.0	2142	14.2	.71
					201	0.0	1177	14.7	.86
					202	0.0	2591	16.3	.77
					203	0.0	1514	19.2	.71
					204	0.0	754	17.7	.83
152	0.0	1176	9.6	.81	205	0.2	973	17.4	.91
153	0.2	2178	10.4	.68	206	0.0	885	18.5	.91
154	0.0	1997	10.5	.68	207	1.4	1785	19.4	.86
155	8.2	488	9.8	.96	208	0.0	2076	16.9	.75
156	37.9	1545	10.4	.80	209	0.0	1070	16.2	.81
157	0.0	2516	11.1	.70	210	0.0	1561	19.1	.70
158	0.0	1348	10.9	.84	211	0.0	919	16.7	.89
159	6.0	2252	10.9	.79	212	18.4	1787	13.8	.83
160	3.9	1447	12.1	.82	AUGUSTUS 1989				
161	0.0	2154	16.3	.71					
162	0.0	2369	17.7	.71					
163	0.0	2776	18.6	.67					
164	0.0	2940	18.8	.53					
165	0.0	2882	19.9	.52	213	3.6	1803	12.6	.80
166	0.0	2471	18.5	.67	214	4.0	1286	13.3	.77
167	0.0	2937	17.2	.67	215	0.4	884	14.2	.87
168	0.0	3081	17.2	.70	216	0.1	1442	14.1	.79
169	0.0	2949	17.2	.80	217	0.1	1812	14.9	.81
170	0.0	2999	19.9	.70	218	0.0	2268	17.0	.82
171	0.0	2976	19.2	.67	219	0.0	608	16.9	.92
172	0.0	1910	17.7	.79	220	5.0	757	16.0	.95
173	13.1	2425	18.9	.84	221	18.3	1951	17.7	.86
174	0.0	2052	16.5	.80	222	0.0	1882	19.0	.81
175	0.0	1809	15.9	.74	223	0.0	553	15.5	.92
176	0.0	2850	17.5	.65	224	2.6	1029	17.0	.89
177	0.0	2830	19.6	.63	225	0.0	1968	17.3	.80
178	2.8	1738	16.3	.83	226	0.6	1561	18.7	.78
179	3.3	1801	14.5	.75	227	0.6	1334	19.7	.74
180	6.5	661	11.9	.94	228	0.5	1475	19.1	.79
181	10.2	2639	14.0	.66	229	2.0	1989	17.0	.81
JULI 1989					230	0.8	2053	15.6	.76
					231	0.0	1988	18.5	.68
					232	0.0	2078	20.2	.73
					233	0.0	2078	20.2	.73
					234	0.0	1725	16.5	.86
182	4.4	540	14.4	.91	235	0.0	1812	14.4	.75
183	8.5	1700	16.1	.87	236	0.0	984	16.0	.86
184	0.0	3025	17.0	.74	237	1.1	1377	14.0	.79
185	0.0	2721	18.4	.72	238	0.0	1388	13.0	.74
186	0.0	2766	19.5	.73	239	13.8	648	12.0	.91
187	0.0	2587	23.1	.70	240	9.1	1517	13.6	.74
188	0.0	2404	23.1	.71	241	0.3	1063	13.9	.76
189	0.0	1269	19.5	.92	242	0.7	300	14.9	.99
190	24.2	711	16.4	.93	243	0.4	675	15.7	.94
191	1.2	1148	14.3	.82					
192	0.0	952	14.5	.89					
193	0.0	1473	15.6	.87					
194	0.0	1546	14.7	.82					

VERVOLG AANHANGSEL 5

Day (nr)	P (mm)	Glob Rad (J/cm ² †)	Temp (°C)	RH (-)	Day (nr)	P (mm)	Glob Rad (J/cm ² †)	Temp (°C)	RH (-)
SEPTEMBER 1989					259	2.5	1016	18.4	.89
244	1.6	1581	13.9	.83	260	2.8	1179	18.6	.89
245	1.0	1009	11.8	.88	261	0.0	1391	19.4	.84
246	5.6	996	10.8	.93	262	0.0	444	16.0	.93
247	5.8	1127	12.0	.83	263	7.8	1561	14.7	.83
248	0.0	1559	13.1	.84	264	0.0	1310	17.4	.88
249	0.0	942	14.8	.88	265	0.0	1295	19.1	.87
250	0.0	1737	15.6	.81	266	0.0	671	15.0	.90
251	0.0	1586	17.1	.84	267	0.0	442	14.5	.89
252	0.0	1542	17.3	.87	268	1.4	594	14.8	.94
253	0.0	797	16.2	.87	269	0.3	1112	12.6	.83
254	0.0	1001	15.4	.82	270	0.0	1280	11.3	.80
255	0.0	1583	15.0	.73	271	0.6	635	12.1	.90
256	0.0	482	13.6	.92	272	1.6	725	12.5	.80
257	5.1	1290	13.3	.81	273	1.2	408	13.5	.96
258	0.0	1186	13.6	.89					

**AANHANGSEL 6 HET GLOBALE VERLOOP VAN DE WORTELDIEPTE BIJ
DIVERSE GEWASSEN OP VELDPDZOL- EN DAMPOD-
ZOLGRONDEN GEDURENDE MET GROEISEIZOEN**

Het globale verloop van de worteldiepte in cm - mv. bij diverse gewassen op veldpodzol- (Hn21) en dampodzolgronden (iWp) met Gt VI en op pZn21, iWz en iWp met Gt III gedurende het groeiseizoen. De datum wordt aangegeven in Julian Daynummer. De reeks stopt op het moment dat de maximale worteldiepte bereikt wordt.

Datum	Worteldiepte (cm - mv.) bij									
	granen		suikerbieten		maïs		aardappelen		gras	
	Gt III	Gt VI	Gt III	Gt VI	Gt III	Gt VI	Gt III	Gt VI	Gt III	Gt VI
80	0	10	0	0	0	0	0	0	25	25
90	0	10	0	0	0	0	0	0	25	25
100	0	20	0	0	0	0	0	0	25	25
110	10	30	0	0	0	0	0	0	25	25
120	20	35	0	5	0	0	0	0	25	25
130	25	40	5	10	0	5	0	0	25	25
140	35	40	10	20	5	15	0	0	25	25
150	35	40	20	25	10	20	0	10	25	25
160	40	40	25	30	20	30	10	15	25	25
170	40	40	30	40	30	45	20	30	25	25
180	40	40	35	40	40	45	25	30	25	25
190	40	40	40	40	40	45	30	30	25	25
200	40	40	40	40	45	45	30	30	25	25

AANHANGSEL 7 HET VERLOOP VAN DE GEMENTEN GRONDWATERSTAND IN DE PEILBUIZEN

