

Reflectiemetingen aan landbouwgewassen
- Handleiding voor het meten van gewasreflectie
- Standaardlijnen voor de bepaling van bodembedekking en LAI

D. Uenk
B.A.M. Bouman
H.W.J. van Kasteren

Verslag 156

Januari 1992

DLO-Centrum voor Agrobiologisch Onderzoek (CABO-DLO)

Postbus 14, 6700 AA Wageningen, The Netherlands

ISBN 272385

Inhoud

	Blz.
Samenvatting	5
Abstract	6
1 Inleiding	7
2 Reflectie van landbouwgewassen	9
2.1 Reflectie van bladeren	10
2.2 Gewasreflectie	11
2.3 Externe factoren	13
2.3.1 Bodemachtergrond	13
2.3.2 Belichtingsomstandigheden	14
3 De CROPSCAN reflectiemeter	15
4 Meetvoorschrift	17
4.1 Meetfrequentie	17
4.2 Meetcondities	17
4.2.1 Bodemachtergrond	17
4.2.2 Belichtingsomstandigheden	18
4.2.3 Regen, dauw en wind	18
4.3 Meettechniek	19
4.4 Aanvullende waarnemingen	19
4.5 Samenvatting meettechniek	20
5 Dataverwerking en toepassingen	21
5.1 Enkelvoudige banden	21
5.2 Vegetatie Indices	21
5.3 Toepassingen op proefvelden	23
6 Voorbeelden reflectiecurves van aardappelen	25
7 Bepaling van bodembedekking en <i>LAI</i> uit gewasreflectie (WDVI) voor aardappelen, bieten, gerst, tarwe en haver	29
7.1 Materiaal en methode	29
7.2 Resultaten	35
7.2.1 Bodembedekking	35
7.2.2 <i>LAI</i>	40
7.3 Samenvatting standaardlijnen	52
Referenties	55

Samenvatting

In dit rapport wordt een meetvoorschrift gegeven voor het meten van gewasreflectie met handzame reflectiemeters op proefvelden, gebaseerd op ervaringen van tien jaren reflectiemetingen (1980-1990) door het CABO op diverse locaties in Nederland. Het meetvoorschrift behandelt met name het aantal benodigde metingen op een proefveldje, de meetfrequentie in de tijd, en de ideale meetcondities met betrekking tot de bodemachtergrond, de belichtingsomstandigheden, en weersinvloeden als regen, dauw en wind.

Hierna worden enkele suggesties en technieken voor verdere verwerking en interpretatie van de reflectiemetingen gepresenteerd. De infrarood reflectie van gewassen geeft vooral informatie over de hoeveelheid plantmateriaal, met name de bodembedekking en de *LAI*, en de groen of rood reflectie geeft informatie over de kleur van het gewas, welke gerelateerd is aan zaken als stikstofgehalte en fotosynthesecapaciteit. De berekening van de Vegetatie Index *WDVI* (Weighted Difference Vegetation Index) uit de infrarood en groen (of rood) reflectie wordt aanbevolen om reflectiemetingen te corrigeren voor verschillen in bodemachtergrond en belichtingsomstandigheden gedurende het meetjaar (en tijdens metingen). Deze *WDVI* is bijzonder geschikt voor de bepaling van bodembedekking en *LAI*.

In het laatste hoofdstuk worden standaardlijnen gegeven waarmee de bodembedekking van suikerbieten, en de bodembedekking en *LAI* van aardappelen, gerst, tarwe en haver nauwkeurig uit de *WDVI* bepaald kunnen worden. Voor de granen is de bodembedekking alleen gerelateerd aan de *WDVI* gedurende de vegetatieve fase van het groeiseizoen vanwege het gebrek aan betrouwbare waarnemingen van bodembedekking in de generatieve groeifase. De gemiddelde absolute afwijking tussen bodembedekking berekend uit *WDVI* en bodembedekking bepaald met 'klassieke methodes' is in de grootte-orde van 5% voor aardappelen en bieten in het hele groeiseizoen, en loopt op van 4% aan het begin tot 12% aan het einde van de vegetatieve fase voor gerst, tarwe en haver. Deze afwijkingen zijn van dezelfde grootte-orde als de onnauwkeurigheden van de 'klassieke' methodes (visuele schattingen, raster tellingen). De gemiddelde absolute afwijking tussen *LAI* berekend uit *WDVI* en *LAI* bepaald in het laboratorium is in de grootte-orde van 0.5 tot *LAI*-waarden van 4 voor aardappelen, en loopt op van ≈ 0.1 bij *LAI*-waarden rond 0 tot ≈ 0.5 bij *LAI*-waarden van 4 voor gerst, tarwe en haver. Op een relatieve schaal zijn deze afwijkingen in de orde van 20% (voor aardappelen wat groter bij lage *LAI*-waarden), hetgeen vergeleken moet worden met een fout van ongeveer 10-15% in de 'lab-bepalingen' van *LAI*. Bij *LAI*-waarden groter dan 4 neemt de afwijking tussen de *LAI* berekend uit *WDVI* en die bepaald in het laboratorium snel toe voor alle gewassen.

De gegeven standaardlijnen zijn stabiel bij grote verschillen in gebruikte rassen, bodemtypes en groei-omstandigheden (van ernstig achtergebleven groei tot nagenoeg potentiële produktie). Deze standaardlijnen kunnen daarom gebruikt worden voor de bepaling van bodembedekking en *LAI* op haast elke locatie in Nederland (en buiten Nederland, bij vergelijkbare bodemtypes).

Abstract

A manual is presented for the measurement of crop reflectance with portable reflectance meters in agricultural field trials, based on the experience of ten years of reflectance measurements (1980-1990) performed by the CABO at several locations in The Netherlands. The manual describes the number of measurements per field, the measurement frequency during the growing season, and the ideal measurement conditions with respect to soil background, conditions of illumination, and weather conditions such as rain, dew and wind.

Some suggestions and techniques are given for further processing and interpretation of the reflectance measurements. The crop infrared reflectance provides information about the amount of plant material, namely soil cover and *LAI*, and the green and red reflectances provide information on the colour of the crop, which is related to parameters such as nitrogen content and photosynthetic capacity. The calculation of the Vegetation Index *WDVI* (Weighted Difference Vegetation Index) from the infrared and green (or red) reflectances is advocated as a means to correct reflectance measurements for variations in soil background and illumination conditions during the growing season (and during measurements). This *WDVI* is suitable for the determination of soil cover and *LAI*.

In the last Chapter, standard lines are presented to calculate the soil cover of sugar beet, and the soil cover and *LAI* of potato, barley, wheat and oats from *WDVI*. For the cereals, the soil cover is only related to *WDVI* for the vegetative part of the growing season since no reliable observations of soil cover were available during the generative parts of the growing seasons. The mean, absolute difference between soil cover derived from *WDVI* and soil cover determined using conventional methods is about 5% for beet and potato during the whole growing season, and increases from about 4% at the beginning to 12% at the end of the vegetative phase for barley, wheat and oats. These differences are on the same order of magnitude as the inaccuracies associated with conventional methods for soil cover determination (visual estimates, grid-countings). The mean, absolute difference between *LAI* derived from *WDVI* and *LAI* determined using conventional methods is about 0.5 for $0 < LAI < 4$ for potato, and increases from about 0.1 at low levels of *LAI* to 0.5 at *LAI* of 4 for barley, wheat and oats. On a relative scale, these differences are of the order of 20% (higher for potato at low levels of *LAI*) and should be compared to the errors of 10-15% which are minimally associated with conventional methods of *LAI* determination. For *LAI* values larger than 4, the difference between *LAI* derived from *WDVI* and *LAI* determined with conventional methods quickly increases for all crops.

The presented standard lines are stable in a wide range of crop varieties, soil types en growth-conditions (from heavily stressed to near-potential production). These standard lines can therefore be used for the derivation of soil cover and *LAI* on nearly every location in The Netherlands (and outside The Netherlands at comparable soil types).

1 Inleiding

De afgelopen jaren is er bij CABO-DLO onderzoek gedaan naar de toepasbaarheid van handzame reflectiemeters voor het doen van waarnemingen aan proefveldgewassen. Uit eerder onderzoek bleek dat uit waarnemingen in een aantal banden van het spectrum (groen, rood en infrarood) verschillende landbouwkundige parameters zoals bodembedekking, Leaf Area Index (*LAI*) en lichtonderschepping zijn af te leiden. Het voordeel van deze meetmethode is dat de genoemde parameters op een snelle, objectieve en niet-destructieve wijze bepaald kunnen worden. Met de moderne meetapparatuur van gewasreflectie worden de gegevens automatisch geregistreerd, en kunnen ze meteen op een computer verder verwerkt worden.

Om tot betrouwbare meetresultaten van gewasreflectie te komen moet aan een aantal meetvoorwaarden worden voldaan. Als eenmaal betrouwbare metingen verzameld zijn, zullen de data meestal eerst nog voorbewerkt moeten worden voor verdere interpretatie. Tenslotte kunnen de bewerkte data gebruikt worden om schattingen te maken van de gewasparameter waarin men geïnteresseerd is, meestal bodembedekking of *LAI*. Het onderhavige rapport geeft een overzicht in bovengenoemde bewerkingsstappen gebaseerd op ervaringen van tien jaar reflectiometingen (1980-1990) aan landbouwgewassen op proefvelden. Met name het ontwikkelde meetvoorschrift, en de afgeleide standaardlijnen om uit reflectiometingen de bodembedekking en de *LAI* van aardappelen, bieten (alleen bodembedekking), gerst, tarwe en haver te bepalen, zullen de lezer in staat moeten stellen zelfstandig reflecties te meten en te interpreteren (zonder diepgaande kennis over het reflectiemechanisme).

In Hoofdstuk 2 wordt eerst een korte inleiding gegeven in het reflectiemechanisme in landbouwgewassen en in de factoren die hierop van invloed zijn. Hoofdstuk 3 geeft een beschrijving van de CROPSCAN reflectiemeter, de meter die sinds 1990 op het CABO in gebruik is. Hoofdstuk 4 geeft een uitgebreid meetvoorschrift waaraan voldaan moet worden om goede en betrouwbare metingen van gewasreflectie in het veld te verkrijgen. De behandeling van de meetcondities sluit aan bij de bespreking van de voornaamste reflectie-beïnvloedende factoren in Hoofdstuk 2. In Hoofdstuk 5 worden suggesties gegeven voor de interpretatie van reflectiometingen in verschillende golflengtebanden, en voor de verwerking van deze metingen in zogenaamde Vegetatie Indices om de invloed van storende factoren op de reflectiometingen te minimaliseren. Hoofdstuk 6 geeft een voorbeeld van reflectiometingen van een aardappelproef met droogtestress en met infectie met het aardappelcyste-aaltje. Dit voorbeeld laat zien hoe gewasreflectie informatie geeft over het effect van de verschillende behandelingen op de gewasontwikkeling. Hoofdstuk 7 tenslotte, geeft standaardlijnen waarmee uit reflectiometingen de bodembedekking en de *LAI* van aardappelen, bieten (alleen bodembedekking), gerst, tarwe en haver nauwkeurig afgeleid kan worden. Het geldigheidsgebied van de gepresenteerde standaardlijnen wordt aangegeven en de nauwkeurigheid van de bepaling wordt gekwantificeerd en vergeleken met die van de gebruikelijke methodes (voor bepaling van bodembedekking en *LAI*).

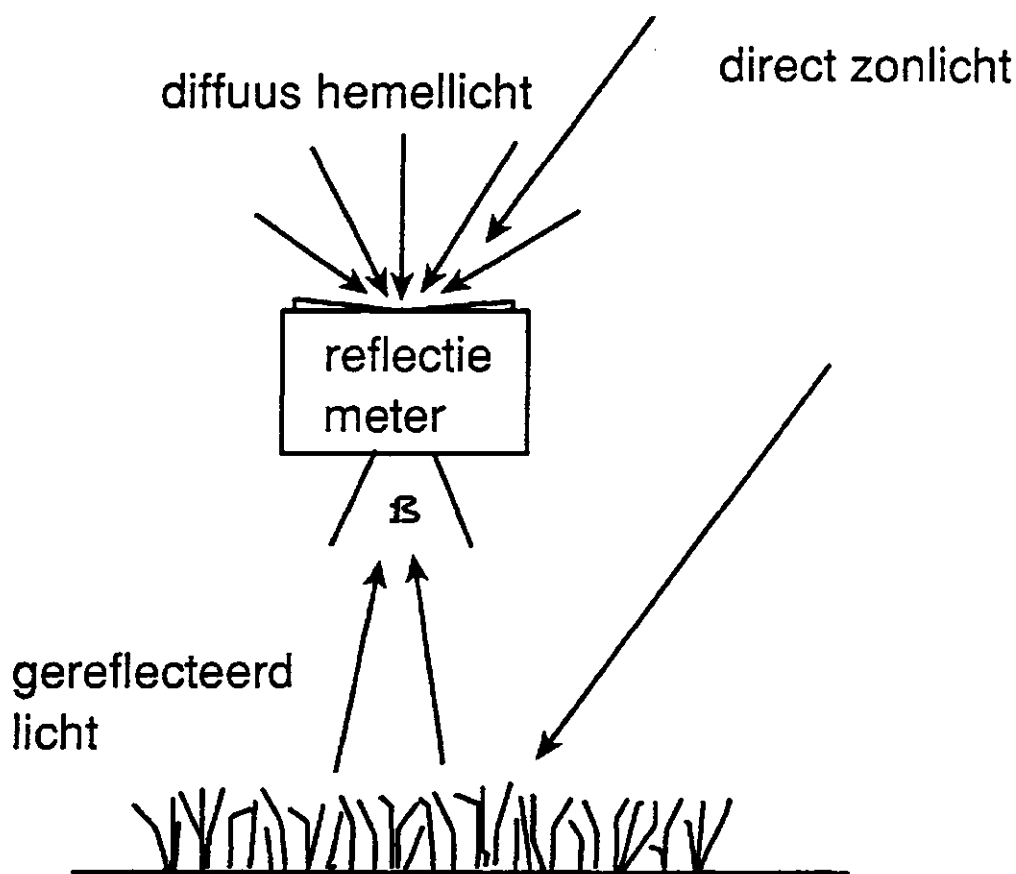
N.b: in dit rapport moet de punt in cijfernotaties als decimale punt gelezen worden.

2 Reflectie van landbouwgewassen

De gewasreflectie R wordt gedefinieerd als de ratio van de hoeveelheid zonlicht gereflecteerd door het gewas, en de totale hoeveelheid ingestraald zonlicht boven het gewas:

$R = \text{gereflecteerd licht} / \text{invalend licht}$ (R is meestal uitgedrukt in procenten).

Bij veldreflectiemeters wordt het invallende zonlicht meestal over de hele hemel-hemisfeer gemeten, en het gereflecteerde zonlicht van het gewas in een bepaalde openingshoek (Figuur 1). De grootte van de openingshoek en de hoogte van de reflectiemeter boven het gewas bepalen de grootte van het gewasoppervlak waarvan de hoeveelheid gereflecteerde straling gemeten wordt.

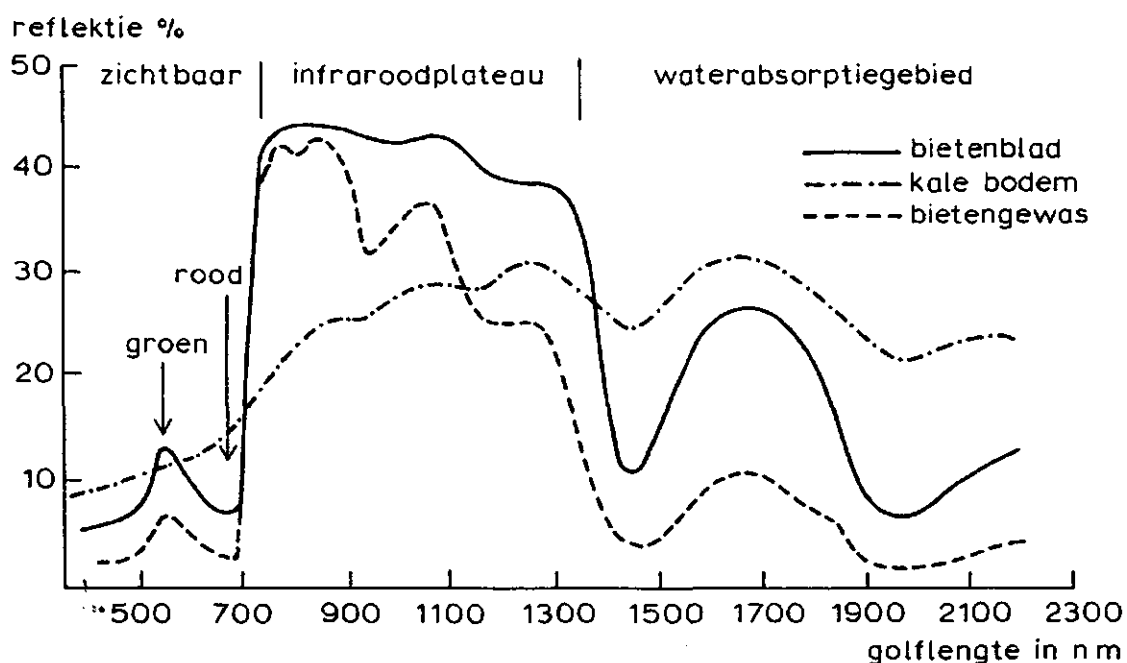


Figuur 1. Illustratie van het meten van de gewasreflectie zoals dit bij de meeste (veld-)reflectiemeters gangbaar is. De hoek β geeft de openingshoek van de meter weer

In dit hoofdstuk wordt kort ingegaan op de achtergrond van gewasreflectie, en op de factoren die daar een rol bij spelen (Paragrafen 2.1 en 2.2 zijn gedeeltelijk overgenomen uit van Kasteren et al., 1975). Een diepgaand inzicht in het mechanisme van gewasreflectie is gegeven door Bunnik (1978).

2.1 Reflectie van bladeren

De afzonderlijke bladeren van een gewas vormen, tezamen met andere componenten van de plant, de basis voor de gewasreflectie. De spectrale signatuur (d.w.z. de reflectie als functie van de golflengte van het zonne-spectrum) van een afzonderlijk blad wordt vaak opgesplitst in drie delen (Figuur 2).



Figuur 2. De spectrale signatuur van een bietenblad in vergelijking tot die van het gehele gewas en die van de kale ondergrond

1. Het zichtbare gebied (ca. 400-700 nm). De reflectie is laag (ca 10%) ten gevolge van een hoge absorptie door pigmenten. Chlorofyl heeft (als belangrijkste pigment) absorptiebanden rond 445 en 670 nm. Voor een normaal gezond blad is de reflectie in het groen (550 nm) het hoogst. Verschillen in reflectie tussen bladeren vloeien voort uit de algemene fysiologische gesteldheid (ouderdom, pigmentsamenstelling). Bij vergelijking van het blad verdwijnt de chlorofyldip in het rood en het blauw, en neemt de reflectie in het gehele zichtbare gebied toe.

2. Het infrarood plateau (ca. 700-1400 nm). De absorptie is zeer laag. Straling met deze golflengten dringt in een blad en wordt diffuus verstrooid door de celwanden. Dit resulteert in een nagenoeg gelijke reflectie en transmissie (ieder 45-50%) van de infrarood straling. Verschillen tussen bladeren worden voornamelijk veroorzaakt door verschil in celstructuur, omdat het verstrooiingsmechanisme berust op breking en reflectie van de straling aan lucht-celwand-celinhoud overgangen. Vergelijking van bladeren heeft nauwelijks/geen effect op de infrarood reflectie.

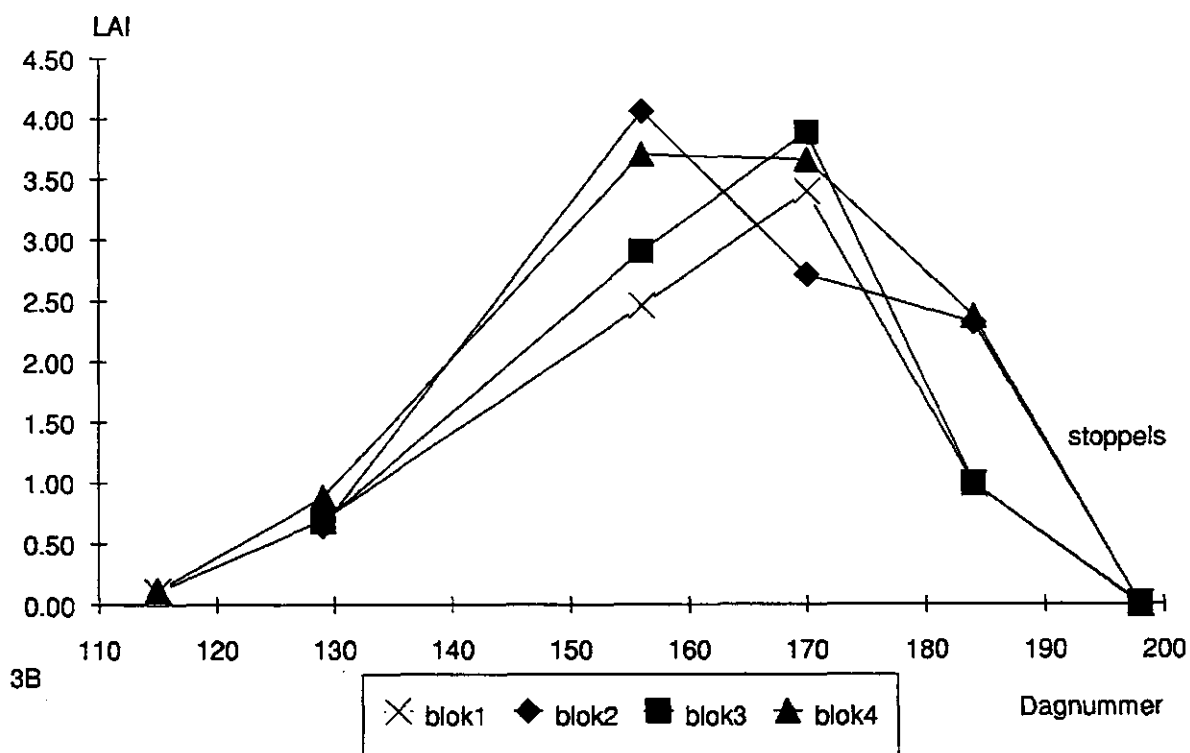
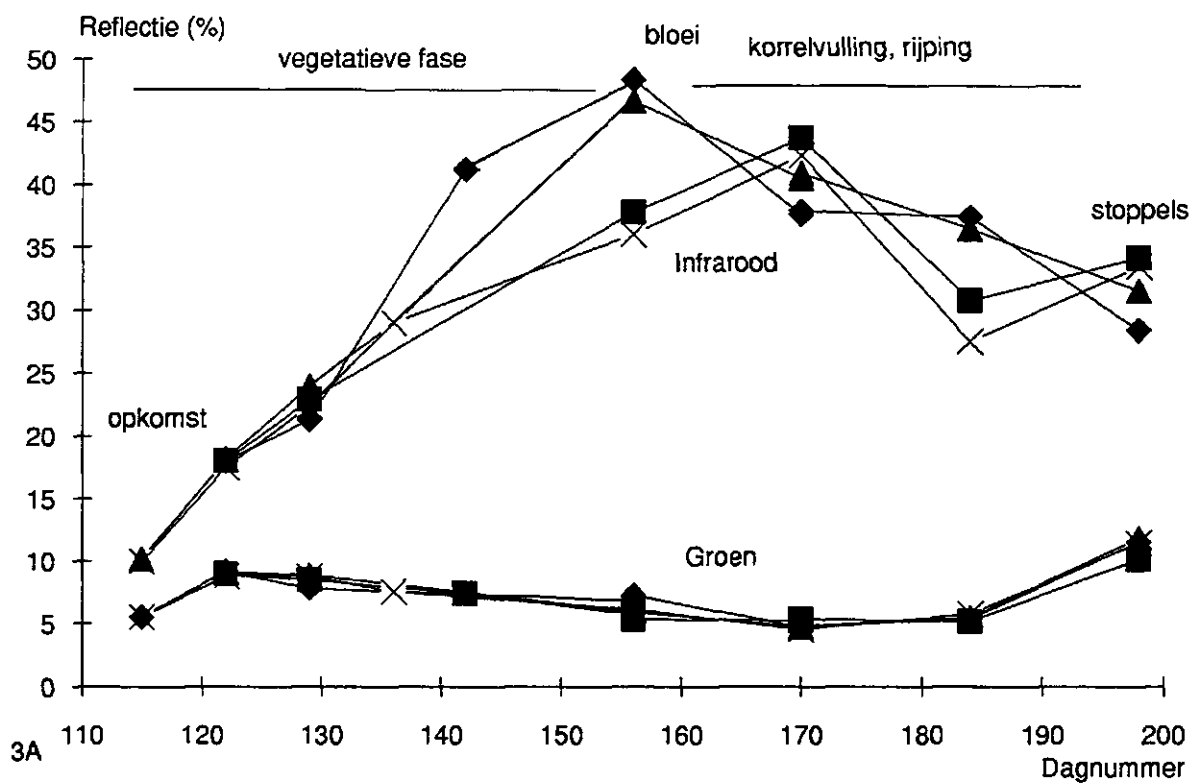
3. Het waterabsorptiegebied (ca. 1400-2300 nm). Dit gebied wordt gekenmerkt door een lage reflectie. Het beeld wordt bepaald door twee hoofdabsorptiebanden van water bij ca. 1450 en 1950 nm.

2.2 Gewasreflectie

Naast de spectrale signatuur van afzonderlijke bladeren, bepalen andere factoren, gelegen in de geometrische opbouw van een gewas, de uiteindelijke vorm van de spectrale signatuur van een gewas. De reflectie van een gewas is bijna over het hele spectrum lager dan die van het individuele blad (Figuur 2). De straling dringt het gewas in, waarbij verstrooiing en absorptie optreedt. Onder in het gewas is het stralingsniveau sterk gezakt. Voor golflengten met een hoge absorptiecoëfficiënt van de afzonderlijk bladeren gaat deze uitdoving het snelst. In het zichtbaar- en het waterabsorptie-gebied wordt de gewasreflectie dan ook voornamelijk bepaald door de hoeveelheid straling, die rechtstreeks door de toplaag van het gewas wordt teruggekaatst. De rest wordt in de diepere lagen geabsorbeerd. In het infrarode gebied kan de straling dieper in het gewas doordringen. Door reflectie aan onderliggende bladlagen en retransmissie door de toplaag kan in dit gebied de totale gewasreflectie oplopen tot boven het niveau van het individuele blad. Dit mechanisme, multi-pele reflectie genaamd, wordt sterk afgezwakt wanneer er enige absorptie plaatsvindt. Er ontstaan flinke dips in het infrarood plateau bij 950 nm en tussen 1150 en 1400 nm.

Verschillen in groeistadium binnen een gewas en verschillen in structuur tussen gewassen veroorzaken een grote verscheidenheid in spectrale signaturen. In de beginfase van de groei, als de bodem nog onvolledig bedekt is, spelen de reflectie-eigenschappen van de ondergrond een belangrijke rol. De reflectiecurve van een kale bodem (Fig. 2) loopt geleidelijk op met toenemende golflengte. Het niveau van de reflectie wordt voornamelijk bepaald door het vochtgehalte van de bodem (lager bij hoog vochtgehalte). Maar ook de textuur en het organische stofgehalte van de bodem zijn van belang. Over het algemeen ligt de reflectie van de bodem tussen 600 en 700 nm (het rood), en tussen 1400 en 2300 nm (midden infrarood) hoger dan de reflectie van plantaardig materiaal. In het infrarood (700-1400 nm) is de reflectie van de bodem juist lager.

Figuur 3 geeft een voorbeeld van de gewasreflectie van een viertal gerstgewassen in de loop van het groeiseizoen. Bij een lage bedekkingsgraad wordt de gewasreflectie voornamelijk bepaald door de bodem en in mindere mate door de 'jonge' plantjes. Bij toename van de hoeveelheid plantmateriaal (gewasgroei) treedt in het zichtbare gebied een lichte daling van het reflectieniveau op. De veranderingen in dit gebied zijn echter klein. In het infrarood daarentegen, loopt de reflectie sterk op bij toename in plantmateriaal. Door multi-pele reflectie blijft de reflectie toenemen tot een LAI van 3 tot 5 is bereikt.



Figuur 3. Verloop van gewasreflectie in het groene en het infrarode gebied van het zonnenspectrum (3a), en van LAI (3b) van vier gerstgewassen (variëteit Golf) in de loop van het groeiseizoen van 1989. De locatie was proefboerderij Droevendaal (n.b. proef g5, Tabel 2, Hoofdstuk 7)

Goed is te zien hoe in deze fase de infrarood reflectie het verschil in plantmateriaal (met name *LAI*) tussen de verschillende gerstgewassen weer geeft.

In de tweede helft van het groeiseizoen, de fase van korrelvulling en afrijping, begint het gewas te vergelen en blad te verliezen. Door dit laatste neemt de infrarood reflectie weer af, gevolgd door een kleine toename in reflectie in het zichtbare gebied bij lage *LAI* waarden. De infrarood reflectie daalt tegen de oogst echter niet terug naar hetzelfde niveau in de vegetatieve fase bij vergelijkbare (lage) *LAI*. Dit komt doordat dor en verdroogd plantmateriaal ook nog een hoge mate van infrarood reflectie heeft, terwijl er dus geen groene *LAI* meer gemeten wordt. Zelfs de stoppels die na de oogst over blijven, reflecteren nog zoveel infrarode straling dat de totale infrarood reflectie veel hoger is dan die van de kale bodem. Bij de interpretatie van reflectiemetingen moeten we dus goed rekening houden dat dood (dor) plantmateriaal nog steeds een hoge infrarood reflectie heeft. B.v. bij de afleiding van standaardlijnen tussen gewasreflectie en *LAI* zijn reflectiemetingen aan afgerijpte granen dus niet meer bruikbaar.

Een andere factor die meespeelt met betrekking tot de spectrale signatuur van gewassen is de bladstandsverdeling en de schaduwvorming in een gewas. In gewassen met een overwegend verticale bladstand kan de straling dieper doordringen, waardoor de kans op absorptie van de straling stijgt. Bij een meer horizontale bladstand (samengaand met een beter gesloten toplaag) is de reflectie in alle golflengten hoger. De straling dringt het gewas nauwelijks in maar wordt door de topbladeren gereflecteerd. Alleen in gewassen met een verticale bladstand zal in het infrarood ook nog bij hoge *LAI*'s enig onderscheid in het reflectieniveau worden gevonden.

Andere gewas-geometrische factoren die van belang kunnen zijn op de reflectie, zijn azimuthale hoekverdeling van de gewaselementen, grootte van die elementen, en hun onderlinge afstand.

2.3 Externe factoren

Naast gewasparameters zelf spelen nog een aantal 'externe' factoren een rol bij de gewasreflectie.

2.3.1 Bodemachtergrond

In het begin van het groeiseizoen speelt de bodemachtergrond een grote rol in de gewasreflectie. Zoals reeds vermeld kunnen verschillende bodem(oppervlak) types een verschillend reflectiepatroon vertonen. Voor metingen op vaste proefvelden is dit geen probleem omdat we ieder jaar weer op dezelfde bodem onze metingen doen. Bij vergelijking van resultaten tussen verschillende locaties moeten we hier echter wel rekening mee houden.

Naast bodemtype (klei, zand, veen,...) speelt de ruwheid van de bodem een rol. Een gladde bodem reflecteert meer (is ook lichter van kleur) dan een ruwe bodem in alle golflengtes van het spectrum. Verschillen in bodemruwheid kunnen op proefvelden optreden door een aantal bodembewerkingen, b.v. ploegen, eggen, rollen of schoffelen. Ook het weer kan in de loop van de tijd het bodemoppervlak veranderen, denk b.v. aan verslemping.

Ten derde kan de reflectie van bodemoppervlakken veranderen door variaties in vochtgehalte. Een droge bodem reflecteert meer dan een natte bodem, in alle golflengtes van het spectrum. Ook dit is een bron van variatie die op proefvelden van belang is.

De invloed van de bodemachtergrond op de gewasreflectie is afhankelijk van de golflengte waarin we onze meting uitvoeren. In het zichtbare gebied dringt het zonlicht niet zo diep het gewas binnen, maar wordt voor het grootste gedeelte door de topbladeren in het gewas gereflecteerd. Daarom zal de invloed van de bodemachtergrond op de totale gewasreflectie zeer snel afnemen met toenemende bodembedekking. In het infrarode gebied van het spectrum dringen de stralen echter veel dieper het gewas in. De invloed van de bodemachtergrond werkt daarom langer door op de gewasreflectie dan in het zichtbare gebied.

2.3.2 Belichtingsomstandigheden

De belichtingsomstandigheden, met name zonshoogte, zonne-richting en het vóórkomen van bewolking, beïnvloeden eveneens de reflectie van gewassen.

De *zonshoogte* heeft met name invloed op de reflectie via schaduwvorming in het gewas. Bij gewassen met een rijstructuur, met name granen, speelt de stand van de zon ten opzichte van de rijrichting (*azimuthverschil*) een rol. Kijkt de zon in de rijen, dan is er geen schaduw tussen de rijen; staat de zon dwars op de rijen, dan is er wel schaduw. Ook bij gewassen met een niet-uniforme bladrichtingsverdeling, zal de richting van de zon een invloed hebben op de gemeten reflectie.

Bij een *bewolkte hemel* wordt het gewas diffuus verlicht en is er geen invloed van bovengenoemde factoren meer. Het effect van schaduwwerking is grotendeels geëlimineerd. Ook treden er geen bladspiegelingen op zoals we die soms kunnen waarnemen bij bepaalde gewassen in de volle zon.

Hoewel er dus een effect van belichtingsomstandigheden is op de reflectie van gewassen, is dit effect relatief klein ten opzichte van dat van de bodemachtergrond en dat van het gewas zelf. In Hoofdstuk 4, Meetvoorschrift, wordt beschreven hoe je de effecten van belichtingsomstandigheden (en van bodemachtergrond) kunt minimaliseren. In Hoofdstuk 5 wordt vermeld hoe je de reflectiedata voor deze effecten achteraf kunt corrigeren.

3 De CROPSCAN reflectiemeter

Sinds 1990 is de commercieel verkrijgbare CROPSCAN reflectiemeter op het CABO in gebruik. In dit hoofdstuk wordt de werking van dit apparaat beschreven. Vóór 1990 waren op het CABO de zelf ontworpen reflectiemeters CABO-I en CABO-II in gebruik die qua werking globaal overkomen met de CROPSCAN. Deze meters zijn beschreven in publicaties van van Kasteren (1981), Uenk (1982) en de Boer et al. (1988). De belangrijkste verschillen tussen de meters liggen op het gebied van de golflengtebanden, zie Tabel 1.

Tabel 1. Bandspecificaties van de drie reflectiemeters die tussen 1980 en 1990 bij CABO-DLO gebruikt zijn

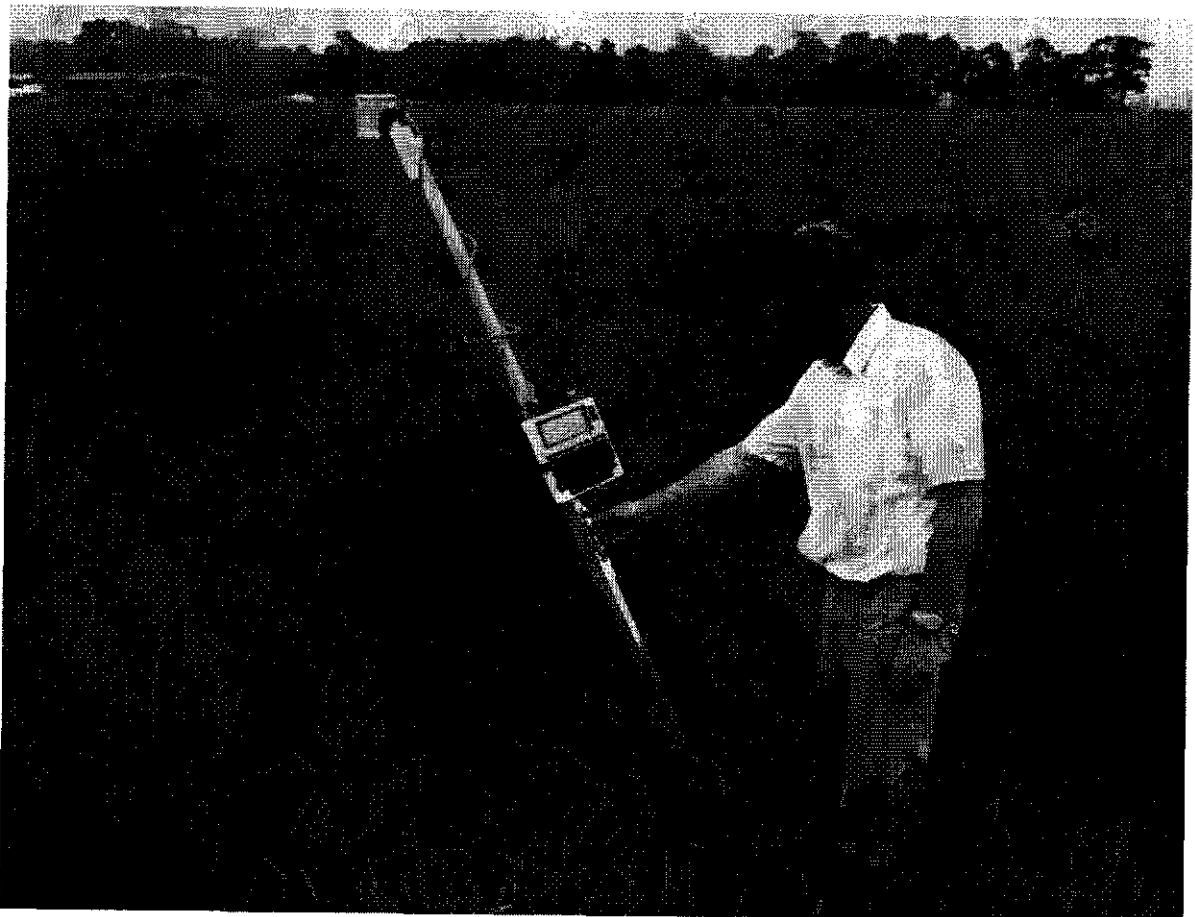
Naam	Jaren	Bandnaam	Bandcentrum (nm)	Bandbreedte (nm)
CABO-I	1980-1986	Groen	548	80
		Rood	654	31
		Infrarood	823	31
CABO-II	1987-....	Groen	548	31
		Infrarood	823	31
CROPSCAN	1990-....	Blauw	500	7.4
		Groen	550	9.2
		Geel	600	10.1
		Rood 1	650	11.4
		Rood 2	700	12.3
		Rood 3	750	13.4
		Infrarood 1	800	11.3
		Infrarood 2	850	11.9

N.b: van de CROPSCAN zijn de banden groen, rood 1 en infrarood 2 gebruikt in de voorbeelden van Hoofdstuk 6.

De CROPSCAN reflectiemeter bestaat uit een aluminium buis met daarop de meetkop en een mini-computer (merk Tandy) (Figuur 4). De meetkop meet aan de bovenkant het totale invallende licht van de gehele hemelbol, en van onder het, door het gewas gereflecteerde licht in acht verschillende golflengte banden. De invallende straling komt de meter binnen via een diffusor kapje. Dit kapje heeft door zijn constructie de eigenschap dat de invallende straling diffuus verstrooid wordt, wat betekent dat er gecorrigeerd wordt voor de zonnestand (mits deze niet lager staat dan ongeveer 20-30° van de horizon). De gereflecteerde straling wordt gemeten met een openingshoek van 28°, wat inhoudt dat bij een kophoogte van twee meter een grondoppervlak van twee vierkante meter wordt gemeten. De acht golflengte banden

kunnen bij aanschaf van de meter naar keuze besteld worden. Op het CABO is gekozen voor de golflengtebanden beginnend bij 500 nm, met 50 nm oplopend tot 850 nm bij bandbreedtes van rond de 10 nm. In de meetkop bevindt zich naast de acht spectrale filters ook een solarimeter die het totale ingestraalde licht meet (Wm^{-2}).

De mini computer heeft een geheugen van 32K. Hiervan wordt 13K gebruikt voor programmatuur en de rest is vrij voor opslag van de verzamelde gegevens. De computer is geprogrammeerd in BASIC. De meegeleverde programmatuur is zeer gebruikers-vriendelijk. Deze regelt dat van de inkomende en gereflecteerde straling per meting de reflectie R wordt bepaald en weggeschreven. Naast de reflectie wordt tevens de datum en het tijdstip van meten vermeld. Voor aanvang van een meting kunnen het aantal metingen per veldje en eventuele opmerkingen worden ingetypt, evenals het veldnummer en de keuze van het aantal golflengte Banden. Om een indruk te geven van de geheugenruimte: bij vijf metingen per veld in alle acht golflengte banden plus instraling, veldnummer, tijd en eventuele opmerkingen kunnen ongeveer 60 veldjes gemeten worden. Beperken we het aantal golflengte banden tot drie dan kunnen de gegevens van meer dan 100 veldjes opgeslagen worden. Een meting bij een instelling van alle acht golflengtes duurt ongeveer twee seconden. De opgeslagen gegevens kunnen vanuit de Tandy op eenvoudige wijze worden weggeschreven naar een PC waar verdere bewerkingen uitgevoerd kunnen worden.



Figuur 4. De CROPSCAN reflectiemeter in het veld

4 Meetvoorschrift

In dit hoofdstuk wordt beschreven op welke wijze reflectiemetingen op proefvelden het beste uitgevoerd kunnen worden om betrouwbare en nauwkeurige metingen te verkrijgen. Aspecten die belicht worden zijn de frequentie van meten, de optimale meetcondities, de meettechniek, en aanvullende waarnemingen. Ten slotte worden in de laatste paragraaf de belangrijkste meetvoorschriften puntsgewijze samengevat.

4.1 Meetfrequentie

Uitgangspunt bij het vastleggen van groei en ontwikkeling van een gewas is zorgen voor een evenwichtige verdeling tussen het *aantal waarnemingen* tijdens een groeiseizoen, en de *nauwkeurigheid* ervan. Vaak kiezen we voor een nauwkeurige bepaling per 14 dagen in de stabiele periode van het groeiseizoen wanneer het gewas niet veel verandert. In de beginfase van de groei, wanneer de bodembedekking snel toeneemt, zal minimaal wekelijks gemeten moeten worden, evenals aan het einde van het groeiseizoen wanneer afsterving optreedt. Ook als de meetnauwkeurigheid door externe omstandigheden in het geding komt, zal de meetfrequentie moeten worden opgevoerd.

Uiteraard zal de uiteindelijk gekozen frequentie van meten afhangen van het doel van de veldproef. Qua tijdsbesteding is het doen van de reflectiemetingen zelden een beperkende factor; de kracht van reflectiemenen is (o.a.) juist dat in geringe tijd een grote veelheid aan metingen verzameld kan worden.

Een hoge absolute nauwkeurigheid van de metingen is niet altijd vereist. Als de proefopzet gericht is op vergelijking van veldjes met een verschillende behandeling, dan is slechts relatieve nauwkeurigheid vereist. De relatieve nauwkeurigheid van reflectiemetingen is (altijd) goed omdat variatie in de tijd, veroorzaakt door belichtingsomstandigheden en wisselingen van bodemkleur, niet afhangt van de verschillen tussen veldjes met verschillende behandelingen. De 'restspreiding' (heterogeniteit binnen een veldje) van reflectiemetingen kan eenvoudig verkleind worden door het aantal meetpunten per veld te verhogen. Extra plekken voor gewasbemonstering daarentegen zijn kostbaar.

4.2 Meetcondities

Door de gewasreflectie het hele seizoen onder gelijkblijvende omstandigheden (bodemachtergrond, weer) te meten wordt de nauwkeurigheid van de waarnemingen uiteraard verhoogd.

4.2.1 Bodemachtergrond

Het beste kunnen de reflectiemetingen uitgevoerd worden bij een *droge toplaag van de bodemachtergrond*. Is de bodemtoplaag op een geplande meetdag nog nat van een voorgaande

regenbui, dan verdient het voorkeur om, als dit mogelijk is, de meting uit te stellen tot de bodemtoplaag is opgedroogd. Uiteraard geldt deze aanbeveling minder sterk naarmate het gewas de bodem steeds verder afdekt. In het algemeen zal het effect van bodemachtergrond verwaarloosbaar klein worden na zo'n 50% bodembedekking voor het zichtbare licht, en na zo'n 80% voor het infrarode licht.

Reflectiemetingen aan het begin van het groeiseizoen kunnen het beste pas starten als de grondbewerkingen achter de rug zijn en het gewas is ingezaaid. Dit om variatie in bodemruwheid te voorkomen. Wel verdient het aanbeveling om, in de tijd, minstens drie metingen aan de kale bodem te doen voor eventuele bewerkingen van de reflectiegegevens (zie Paragraaf 5.2 Vegetatie Indices)

4.2.2 Belichtingsomstandigheden

Zoals in Hoofdstuk 3 is beschreven, wordt de gewasreflectie beïnvloed door geometrische parameters als bladstand, rijrichting, en hoogte en richting van het invallende licht. Bij diffuse belichting is het effect van variatie in deze parameters op de gewasreflectie het geringst. Daarom kunnen we het beste uitgaan van een egaal bewolkte hemel als standaard conditie voor het doen van reflectiemetingen. Bij wisselende bewolgingsgraad kan men wachten met reflectiemenen tot er een flinke wolkenschaduw over het hele proefveld ligt. Bij zeer variërende belichtingscondities zou de meting uitgesteld kunnen worden. Een andere optie is om het aantal herhalingsmetingen op te voeren om tot een behoorlijke nauwkeurigheid te komen.

Moet er toch op een onbewolkte en heldere dag gemeten worden, dan kan men proberen om dergelijke metingen zoveel mogelijk bij een vaste belichtingsgeometrie uit te voeren: vaste zonne-hoogte en -richting. Een model dat de reflectie berekent van een gewas met random bladverdeling over de ruimte, voorspelt dat bij een zonshoogte van 32° de reflectie identiek is aan de reflectie bij diffuse belichting (bewolkte hemel). Bij rijgewassen kan men proberen altijd te meten met schaduw in de rijen (zonnerichting dwars op de rijen). Met het 'dichtgroeien' van het gewas zal de richting van de zon echter steeds minder een rol gaan spelen.

Men moet echter beslist niet denken dat een meting die niet aan de hierboven beschreven condities voldoet een onbetrouwbare meting is. Zoals reeds eerder vermeld, is het effect van belichtingsomstandigheden op de gewasreflectie relatief gering, en er kan gemakkelijk voor gecorrigeerd worden. Het wél opvolgen van bovenstaande aanbevelingen leidt echter wel tot nauwkeurige 'standaardmetingen'.

4.2.3 Regen, dauw en wind

Het spreekt voor zich dat reflectiemetingen niet uitgevoerd kunnen worden bij regen. Echter ook een nat gewas (na regen of 's morgens vroeg door dauw) kan het beste vermeden worden. Vocht op een te meten gewas kan schitteringen veroorzaken en daardoor afwijkende reflectiewaarden geven.

Door wind treedt geen duidelijke verandering op in de gemiddelde reflectiewaarden. Wel wordt de spreiding over het algemeen groter, afhankelijk van de 'bewegelijkheid' van het gewas in de wind. Om eenzelfde betrouwbaarheid te krijgen voor de gemiddelde gewasreflectie zal men daarom bij wind wat meer metingen moeten doen dan bij windstil weer.

Onder weersinvloeden kunnen gewassen legeren of neerslaan. De reflectie van het gewas kan hierdoor sterk veranderen. De veranderingen hangen af van het ontwikkelingsstadium en van de geometrische toestand van het gewas voor en na het legeren/neerslaan. Metingen hebben aangetoond dat met het plat liggen van het gewas, de reflectie in het groen, rood en infrarood over het algemeen toeneemt. De rood reflectie relatief het meest, de infrarood reflectie het minst. Metingen aan geleverde/neergeslagen gewassen zullen enerzijds de relaties tussen reflectie en interessante gewasparameters (b.v. bodembedekking en *LAI*) verstoren, maar anderzijds kunnen ze indicatief zijn voor de toestand van het gewas.

4.3 Meettechniek

Bij een kophoogte van twee meter, wordt de gewasreflectie gemeten van één oppervlak van ongeveer twee vierkante meter. Om een betrouwbare reflectiewaarde voor een geheel veld te krijgen worden een aantal metingen per (proef)veld gedaan. Meestal leveren vijf á zes meetplekken verdeeld over een veldje een goed gemiddelde op. Bij grove structuren (bredere rijen van b.v. aardappelen, grote planten) moeten meer metingen gedaan worden, ongeveer 10. Men moet goed bedacht zijn op een evenwichtige verdeling van de metingen over beplante en kale stroken van rijstructuren. Een bruikbare strategie is de veldjes zigzaggend aflopen. Een heterogeen veldje, met b.v. een onkruid of legeringsplek, kan gesplitst worden in twee of meer nieuwe meetveldjes met een apart nummer.

Vooraf met zonnig weer moet men oppassen dat er geen schaduw of reflectie van eigen lichaam en apparatuur op de meetplek valt (en zeker niet op de inkomend lichtsensor). Als regel wordt aangehouden dwars op de zon te meten of eventueel met de meter naar de zon toe. Meten dicht langs bomenrijen is uit den boze. De meter meet immers het invallende licht van de gehele hemelbol over een hoek van 180°, wat tot gevolg kan hebben dat het invallende licht gedeeltelijk wordt onderschept, of dat schaduwen worden meegemeten. De beste meettijd is tussen 10.00 en 16.00 uur (op onze breedtegraad). Buiten deze tijden meten is niet aan te raden in verband met een té scherpe zonsinval op de sensor van de meetkop.

4.4 Aanvullende waarnemingen.

Naast het meten van de reflectie van een proefveldje zijn er een aantal waarnemingen wenselijk om de reflectie goed te kunnen interpreteren.

- Eens per seizoen de plantaantallen en rijafstanden nauwkeurig vastleggen. Dit is nodig voor eventuele vergelijking van de resultaten met proeven van een ander jaar of boerderij. Deze gegevens zijn uiteraard ook bruikbaar bij de gewasbemonstering en groei-analyses.
- Noteren van de meetomstandigheden om eventuele afwijkende reflectiewaarden te kunnen interpreteren. Hierbij moet met name gedacht worden aan belichting (bewolking, zonnehoogte en -richting, tijdstip op de dag) en de toestand van de bodem (droog/vochtig/nat).
- Bij de interpretatie van gewasreflectie zijn gegevens over veranderingen van kleur en structuur (ontwikkeling) van het gewas tijdens het groeiseizoen zeer bruikbaar. Ook opmerkelijke veranderingen van bladstand en bladgrootte of steellengtes kunnen genoteerd worden. Begintijdstippen van zaken als legering en ziekte-infectie moeten vastgelegd worden.
- Voor vergelijking van metingen met verschillende apparaten, en voor controle op storingen of verloop in het gebruikte instrument, zijn regelmatig calibratie-metingen nodig aan een niet verkleurend referentie object. Karton blijkt zeer geschikt voor calibratie te zijn. Gebruikt men een nieuw calibratie object dan moet de reflectie ervan onder diverse belichtingsomstandigheden gemeten worden. Bij de aanschaf van een ander instrument moet een uitgebreide calibratie gebeuren: gelijktijdig meten met het oude en nieuwe apparaat aan diverse objecten, zowel referenties als gewassen. [De CROPSCAN heeft overigens een interne calibratie-routine die aan het begin van ieder meetjaar 'gedraaid' moet worden].

4.5 Samenvatting meetvoorschrift

- De meetfrequentie bij het volgen van de groei van een gewas ligt rond eens in de veertien dagen meten. In de beginfase van de groei en bij de afsterving moet wekelijks gemeten worden.
- Het aantal metingen per veld: bij fijne structuren zoals gras en granen 5 metingen per veld, bij grove structuren aardappels en bieten 10 metingen per veld.
- Indien mogelijk in ieder geval meten in de banden Groen, Rood en Infrarood.
- Let op dat er geen schaduw van de meter of van jezelf op het te meten object valt. Ook het meten dicht langs of onder bomenrijen is af te raden.
- Meet niet aan een nat gewas in verband met schittering van de waterdruppels. Denk ook aan dauw op het gewas.
- Bij wind zal de spreiding in de metingen toenemen, dus meer metingen per veld.
- Meet altijd kale bodem mee dit voor correcties van natte en droge ondergrond.
- Niet bij te lage zonnstanden meten. In Nederland tussen 10.00 en 16.00 uur.

5 Dataverwerking en toepassingen

5.1 Enkelvoudige banden

De reflectiewaarden in de verschillende spectrale banden hebben ieder een eigen 'informatie-inhoud'. De reflectie in het infrarode (IR) deel van het spectrum is met name gecorreleerd aan de hoeveelheid bladmateriaal (vanwege de interne multipele reflecties aan voornamelijk de celwanden). Hierdoor is de reflectie in het *IR* kanaal bij uitstek geschikt voor schattingen van de *LAI* en de bodembedekking van een gewas. Doordat de *IR* reflectie vooral op de celwanden in de bladeren reageert, geeft deze geen informatie over de groenheid van de bladeren. Gele bladeren geven vaak een zelfde (hoge) *IR* reflectiewaarde als eenzelfde hoeveelheid groene bladeren. Hierdoor moeten we, bij het gebruik van reflectiewaarden als schatter voor *LAI* of bodembedekking, voor de meeste gewassen de vegetatieve fase en de generatieve of afrijpings-fase apart beschouwen.

In de vegetatieve fase van b.v. granen, en in de fase van 0 -> 100% bodembedekking van b.v. aardappelen, kan de *IR* reflectie uitstekend gebruikt worden om de groene *LAI* en de bodembedekking te schatten. In de generatieve en de afrijpings-fase van genoemde gewassen, verkleuren de bladeren, verkrullen ze en vallen tenslotte af. Door dit verkrullen en afvallen, neemt de *LAI* en de bodembedekking af, en de *IR* reflectie reageert daar op. Hierdoor zijn er eveneens relaties tussen *IR* reflectie en *LAI* en bodembedekking te vinden, maar die worden veelal vertroebeld door de aanwezigheid van gele bladeren. Het probleem zit daarbij ook in de standaardbepalingen van *LAI* omdat het onderscheid tussen groen en geel blad een uitermate subjectieve zaak is.

De reflectie in de zichtbare banden van het spectrum, het groen (*GR*) en het rood (*RO*), is eigenlijk een objectieve meting van de kleur van het gewas zoals we die ook met onze ogen waarnemen. [Onze ogen zijn echter beslist geen objectieve meetinstrumenten: ze zijn b.v. veel gevoeliger voor groentinten dan voor roodtinten]. *GR* en *RO* reflectie draagt dus potentieel informatie over zaken als het gehalte aan bladgroen (chlorofyl, stikstof) en over vergeling van gewassen. Voor een aantal gewassen zou de *GR* en *RO* reflectie dus gebruikt kunnen worden om de vergeling en afrijping te registreren. Tevens geven ze een indicatie over de "groenheid" van bladeren en daarmee een aanwijzing over het stikstofgehalte. De *IR* reflectiemeting geeft vooral informatie over de hoeveelheid groen blad oppervlak.

Een probleem bij de interpretatie van *GR* en *RO* reflectie zit in de lage absolute reflectieniveaus van gewassen. De verschillen zijn relatief erg klein en soms moeizaam te detecteren. Op het CABO is tot nu toe weinig onderzoek naar het gebruik van *GR* en *RO* reflectie gedaan.

5.2 Vegetatie Indices

Als in de loop van het groeiseizoen de reflectie onder goede standaard condities gemeten is (zie Hoofdstuk 4 Meetvoorschrift), dan kunnen de reflecties in de enkelvoudige banden goed geïnterpreteerd worden. Bij grote variaties in meetcondities, met name in bodemachtergrond door vochtverschillen, zullen er echter fluctuaties in de reflectiecurves optreden. Voor gebruik

als vergelijking tussen behandelingen op eenzelfde proefterrein hoeft dit niet altijd een bezwaar te zijn. Het gaat daar immers om de relatieve verschillen tussen de veldjes, die alle hetzelfde type fluctuatie zullen vertonen. Als het doel van de reflectiemetingen echter het (absolute) schatten van b.v. *LAI* of bodembedekking is, dan zullen we voor dergelijke fluctuaties moeten corrigeren.

Een andere reden om de 'ruwe' reflectiegegevens te corrigeren is om vergelijking tussen verschillende proefvelden mogelijk te maken. Bij grote verschillen in bodemachtergrond, vooral bodemtype, zijn reflectiecurves van verschillende lokaties anders moeilijk te vergelijken.

Reflectiewaarden kunnen voor bovengenoemde verschillen gecorrigeerd worden door het berekenen van zogenaamde Vegetatie Indices (VI). Dit zijn meestal lineaire of ratio-combinaties van de reflectie in de *IR* en in de *GR* of *RO* band. Het principe achter deze *VI*'s is dat het effect van de 'storende invloeden', zoals bodemachtergrond en belichtingsomstandigheden, over het algemeen hetzelfde teken heeft in de afzonderlijke reflectiebanden. Hierdoor kan je door aftrekking of door deling van de banden het effect van een storende invloed voor een groot deel uitschakelen. Veel gebruikte *VI*'s in de literatuur zijn de Normalized Difference Vegetation Index *NDVI* (voor het eerst ontwikkeld als *VI* door Rouse, 1973), de Perpendicular Vegetation Index *PVI* (Richardson and Wiegand, 1977), de Weighted Difference Vegetation Index *WDVI* (Clevers, 1988; 1989), en de infrarood/rood ratio (voor het eerst gebruikt door Jordan 1969):

$$\begin{aligned} NDVI &= (IR - RO) / (IR + RO) \\ PVI &= \sqrt{[(IR - IR_s)^2 + (GR - GR_s)^2]} \\ WDVI &= IR - (IR_s / RO_s) * RO \\ \text{ratio} &= IR / RO \end{aligned}$$

waarbij *IR* en *RO* = *IR* en *RO* reflectie van het gewas, en *IR_s* en *RO_s* = de *IR* en *RO* reflectie van de kale bodemachtergrond. In deze formules kan de *RO* reflectie vervangen worden door de *GR* reflectie. Op het CABO wordt meestal de *GR* reflectie gebruikt omdat de CABO-II meter enkel een groene en een infrarode band heeft. De *IR_s*, *RO_s* en *GR_s* moet gemeten worden aan de kale bodem vóór de opkomst van het gewas (bij voorkeur op minimaal drie verschillende dagen om een betrouwbaar gemiddelde te verkrijgen).

Naast het corrigeren voor 'storende invloeden' hebben de meeste *VI*'s tevens een verhoogde gevoeligheid voor *LAI* en bodembedekking ten opzichte van de *IR* reflectie alleen. Dit komt omdat de *IR* reflectie toeneemt met genoemde gewasparameters, terwijl de *RO* en *GR* reflectie juist afneemt.

Uit de formulering van de *VI*'s moge duidelijk zijn dat we hier eigenlijk twee soorten informatie combineren, grofweg de informatie over de hoeveelheid blad met die over de kleur van het blad. Hoewel we dus corrigeren voor de storende invloeden van bodemachtergrond en belichtingsomstandigheden, introduceren we de 'storende' invloed van bladverkleuring op de schattingen van *LAI* en bodembedekking. Een rekenvoorbeeld laat zien dat deze invloed bij de *WDVI* relatief echter gering is, maar bij b.v. de *IR/RO* ratio juist bijzonder groot. Stel *IR* = 40%, *RO* = 3% en de *IR_s/RO_s* verhouding van de onderliggende bodem is 1.2. De *WDVI* is dan $40 - 1.2 * 3 = 36.4$, en de *IR/RO* ratio is $40/3 = 13.3$. Als nu de *RO* reflectie van de

bladeren door sterke vergeling 50% toeneemt naar 4.5%, dan wordt de $WDVI$ $40 - 1.2 \cdot 4.5 = 34.6$, en de IR/RO ratio wordt $40/4.5 = 8.9$. Naar verhouding reageert de $WDVI$ dus veel minder op bladverkleuring dan de IR/RO ratio, en verdient dus de voorkeur.

In een diepgaander vergelijkend onderzoek (Bouman, 1991) is aangetoond dat van de vier bovenstaande VI 's de $WDVI$ het meeste geschikt is om relaties te leggen met bijv. bodembedekking en LAI van landbouwgewassen (zie Hoofdstuk 7 voor de afleiding van standaardlijnen tussen bodembedekking en LAI en $WDVI$).

Als de IR/RO , verhouding echter niet gemeten is, zal men z'n toevlucht moeten nemen tot de IR/RO ratio of de $NDVI$ (alleen geschikt dus als bladkleur niet heel sterk verandert). Men moet hierbij bedenken dat voor de meeste gewassen de bladkleur in ieder geval in de vegetatieve fase (granen) of in de fase van begingroei (aardappelen) voldoende stabiel is om betrouwbare schattingen van LAI of bodembedekking mogelijk te maken. Bij relatief weinig verkleurende gewassen, zoals bieten, kunnen betrouwbare schattingen zelfs voor het gehele groeiseizoen verkregen worden.

Met name bij de Amerikanen is het gebruik van de $NDVI$ erg populair.

5.3 Toepassingen op proefvelden

Er zijn een aantal toepassingsmogelijkheden voor het gebruik van reflectiemetingen op proefvelden te onderkennen.

1) Reflectiemetingen zijn goed geschikt om op objectieve wijze verschillen in resultaten van behandelingen tussen proefveldjes te registreren. Met name verschillen die tot uiting komen in hoeveelheid plantmateriaal (LAI en bodembedekking) en kleur van het gewas worden nauwkeurig geregistreerd. Denk b.v. aan N-bemestingsproeven, en proeven waarbij vergeling/verkleuring van de objecten optreedt: afrijping, ziektes, verdroging (watergiftproeven). Reflectiewaarden in het GR of het RO geven een objectieve waarde van de vergelingstoestand van een gewas, hetgeen een bijzonder geschikte maat kan zijn voor kwantificatie van b.v. ziekte-aantasting of verdroging.

2) Groeiparameters van het gewas zijn, per groeisituatie, meestal zeer hoog gecorreleerd met de gewasreflectie. Naast LAI en bodembedekking kunnen we ook denken aan bovengrondse biomassa en gewashoogte. Reflectiemetingen zijn daarom goed te gebruiken om het aantal in-situ of laboratorium metingen van die gewasparameters te reduceren. Ten eerste kunnen we het aantal van die metingen in de tijd reduceren. Door een paar goed gekozen ijk-metingen in de tijd (3 á 4), kunnen we een nauwkeurig verloop van die parameters in de tijd interpoleren uit reflectiemetingen. Ten tweede kunnen we het aantal 'gewasparameter'-metingen op verschillende herhalingsveldjes reduceren, c.q. vervangen door reflectiemetingen.

Bij deze toepassing is een goede ijking nodig van de relatie tussen de gewasparameters waarin we geïnteresseerd zijn en de reflectie, om ontwikkelingen in absolute zin te kunnen volgen. Rond het tijdstip van maximum IR reflectie is een nauwkeurige bemonstering van de veldjes op gewasparameters het meest zinvol. In de periode van oplopende IR reflectie geven de reflectiecijfers een voldoende beeld van het bedekkings- en biomassa-verloop. Op het moment dat het IR maximum optreedt heeft elk gewasstype (ras en soms teeltmaatregel) zijn

karacteristieke reflectieniveau. Bedenk dat de spreiding in reflectiewaarden tussen veldjes een systematische component heeft en dat de restspreiding in biomassa monsters groot is op dit moment. Na de vegetatieve periode treden (speciaal in graangewassen) verkleuringen op, met duidelijke gevolgen voor de gemeten reflectie. Op het proefveld ontstaan de verschillen tussen de behandelingen en wordt het oogstbaar produkt gevormd. De snelheid van afrijping is uitstekend gecorreleerd met de reflectie voor zichtbaar licht of met de ratio van *IR* en *GR* (of *RO*). De cumulatieve of gemiddelde reflectie over de afrijpingsperiode is een prima maat voor de verschillen in eindopbrengst. De reflectiecurves voor de individuele velden geven inzicht in de totstandkoming van de gemeten verschillen in oogstbaar produkt. Als er calamiteiten als ernstige ziekte-aantasting of legering optreden, waar de reflectie sterk op reageert, dan zal de relatie tussen biomassa en reflectie opnieuw voor deze situatie geijkt moeten worden. Maar tegelijkertijd geven de reflectiecijfers een objectieve classificatie van de graad van aantasting.

3) Reflectiemetingen kunnen gebruikt worden als nauwkeurige schatter van bepaalde gewasparameters, dus ter vervanging van klassieke in-situ of laboratorium metingen. Het is gebleken dat voor een groot aantal gewassen de relatie tussen reflectiewaarden, verwerkt tot *WDVI*, en *LAI* en bodembedekking uitermate stabiel is onder een grote variatie in groeiomstandigheden. Voor die gewassen kunnen standaardlijnen opgesteld worden met zeer algemene geldigheid waardoor in de meeste situaties en op bijna elke locatie de *LAI* en de bodembedekking uit de reflectie geschat kan worden (zie Hoofdstuk 7).

6 Voorbeelden van reflectiecurves van aardappelen

In dit hoofdstuk wordt een voorbeeld gegeven van reflectiecurves van aardappelen, en de interpretatie hiervan op proefveldniveau. Dit hoofdstuk moet gezien worden als een illustratie van het gebruik van reflectiegegevens.

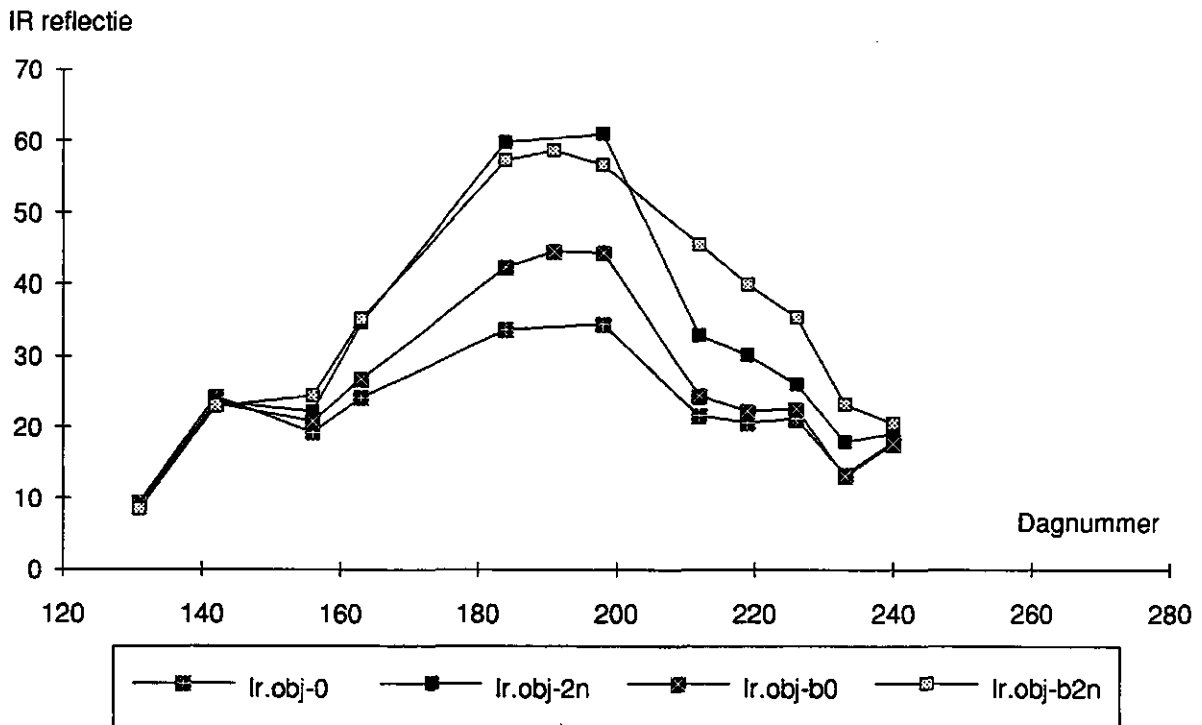
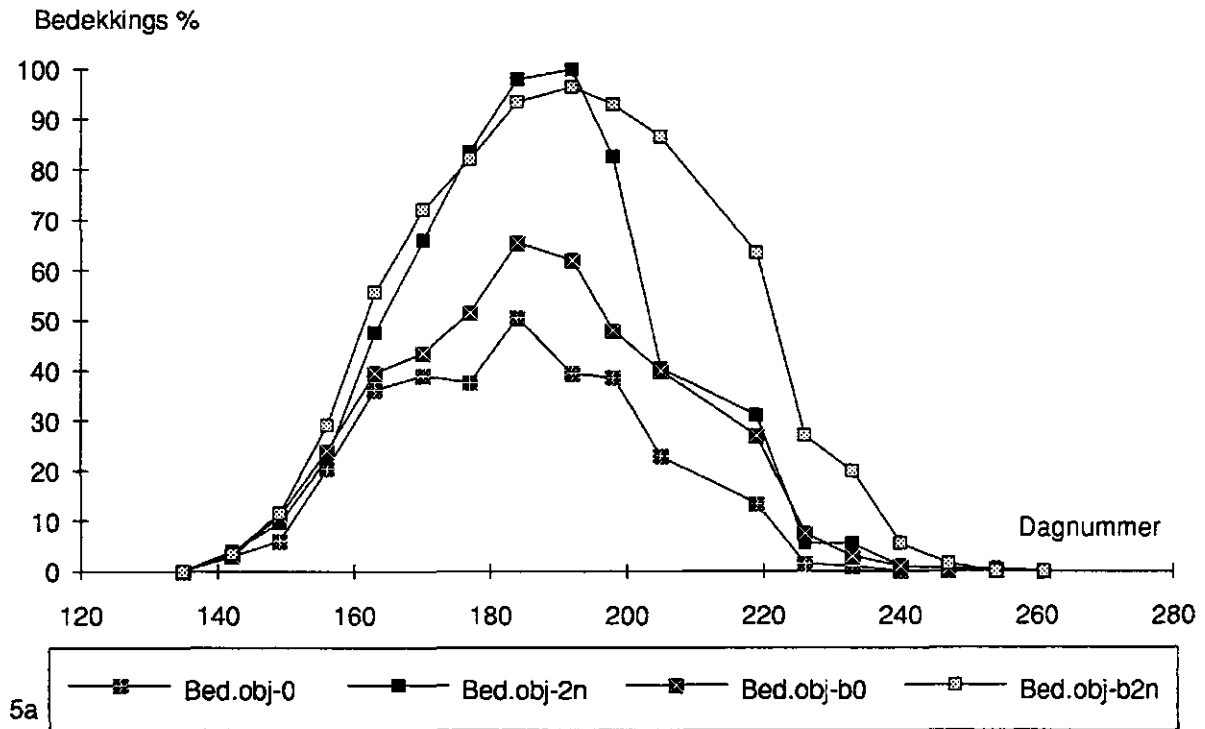
De Figuren 5 en 6 hebben betrekking op een aardappelproef gelegen in Eeserveen in de Veenkoloniën (proef a9 in Tabel 2, Hoofdstuk 7). In deze proef zijn 5 verschillende aardappelrassen (wel en niet) geïnfecteerd met het aardappelcyste-aaltje (Globodera rostochiensis) in combinatie met droogte (wel en niet beregenen). De proef bestond uit 2 parallellen. Deze proef is uitgevoerd in samenwerking met het H.L. Hilbrand Laboratorium voor bodemziekten in Assen.

In de Figuren 5 en 6 is van het aardappelras Darwina de *IR* reflectie en de bedekking van 4 objecten in de tijd uitgezet. Per object zijn de reflectiemetingen van de 2 parallellen gemiddeld (10 metingen). De 4 objecten bestaan uit: niet ontsmet, niet beregend; ontsmet, niet beregend; niet ontsmet, beregend; ontsmet, beregend. De bedekking is gemeten met behulp van een raster (2 opnames per veld) (Haverkort et al., 1991).

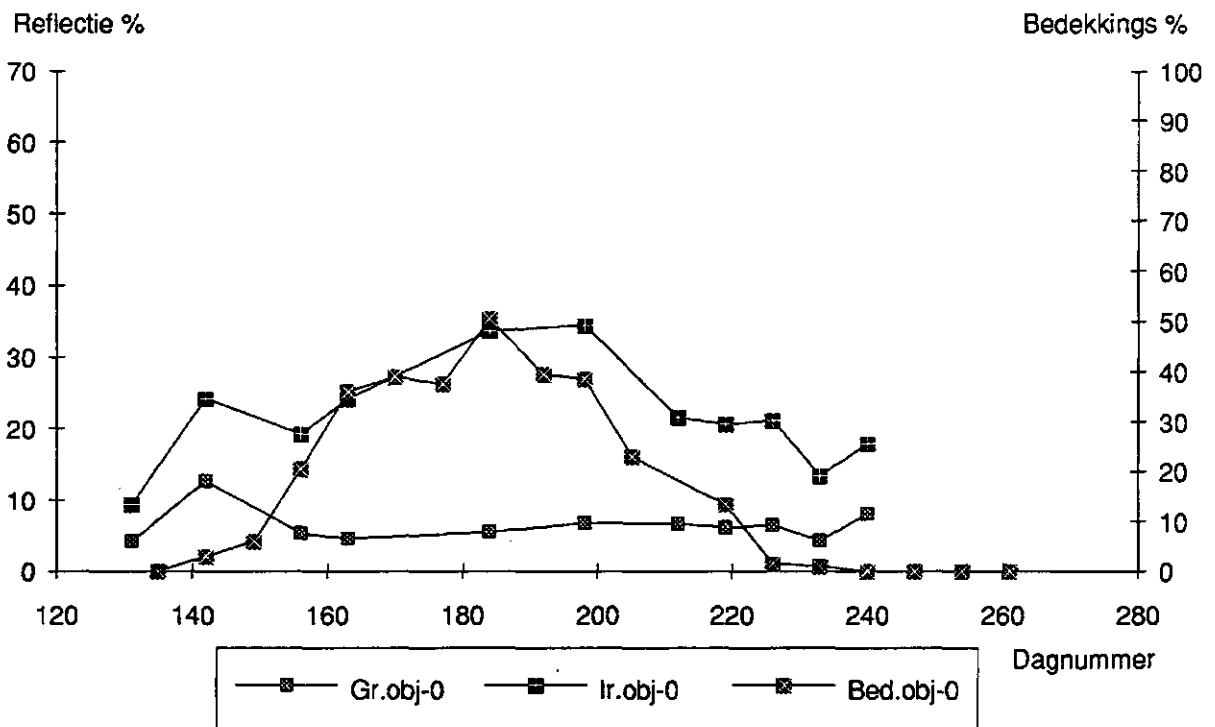
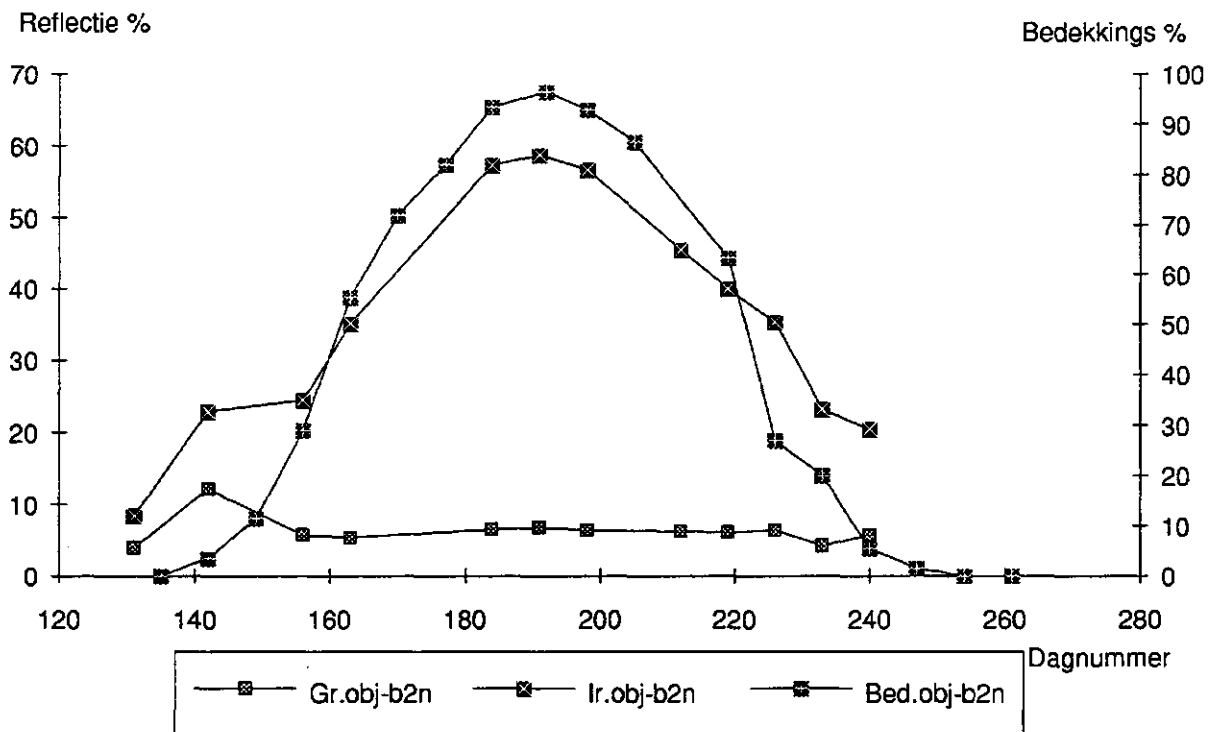
In Figuur 5a is de bedekking van de 4 verschillende objecten uitgezet in de tijd. Heel duidelijk wordt hier aangetoond dat de objecten die ontsmet en beregend zijn de hoogste bedekking geven en dit ook het langste houden t.o.v. de niet ontsmette, niet beregende objecten die maar een bedekking van 50% halen. Bij de ontsmette objecten zien we dat tot dag 190 wel of niet beregenen weinig invloed heeft terwijl er bij de niet ontsmette objecten vanaf dag 160 al verschillen gaan optreden.

Projecteren we deze gegevens nu op Figuur 5b waar de *IR* reflectie van de 4 objecten is uitgezet, dan zien we dezelfde trend terugkeren. De ontsmette, beregende objecten geven de hoogste *IR* reflectie, terwijl de niet ontsmette een veel lagere *IR* reflectie laten zien. De dip in het *IR* bij dag 156 is het gevolg van een nachtvorst waarvan het gewas aanzienlijk had geleden. Dat dit niet is waargenomen bij de bedekkingmetingen met het raster kan het gevolg zijn dat de bevroren bladeren nog wel aan de planten hebben gezeten, dus nog wel meegemeten zijn, maar dat deze bladeren in het *IR* niet of nauwelijks meer reflecteerden.

In de Figuren 6a en 6b zijn nog eens de bedekking, de *IR* en de *GR* reflectie in de tijd uitgezet voor een ontsmet, beregend object (6a), en voor een niet ontsmet, niet beregend object (6b). Beide Figuren laten zien dat de *IR* reflectie de bedekkingcurve goed volgt. De *GR* reflectie loopt naarmate de bedekking van een gewas lager wordt een paar procent op.



Figuur 5. Ontwikkeling van bodembedekking (5a) en infrarood reflectie (5b) van aardappelen, cultivar Darwina, bij vier verschillende behandelingen: 0 = niet beregend, niet ontsmet; 2n = niet beregend, wel ontsmet; b0 = wel beregend, niet ontsmet; b2n = wel beregend, wel ontsmet. Aardappelproef in Eeserveen, 1990 (n.b. proef a9 in Tabel 2, Hoofdstuk 7)



Figuur 6. Ontwikkeling van bodembedekking en van groen en infrarood reflectie van aardappelen, cultivar Darwina, bij behandeling b2n, wel berekend en wel ontsmet (6a) en bij behandeling 0, niet berekend en niet ontsmet (6b). Aardappelproef in Eeserveen, 1990 (n.b. proef a9 in Tabel 2, Hoofdstuk 7)

7 Bepaling van bodembedekking en *LAI* uit gewasreflectie (*WDVI*) voor aardappelen, bieten, gerst, tarwe en haver

De bodembedekking en Leaf Area Index (*LAI*) van gewassen zijn belangrijke parameters die vaak bij veldproeven verzameld dienen te worden. Beide parameters kunnen gebruikt worden om een schatting te maken van de fractie onderschepte zonnestraling, welke bepalend is voor gewasfotosynthese.

Bodembedekking wordt meestal in het veld bepaald door visuele schattingen door een geoefend expert, door tellingen met een raster, of door fotografische methoden. De *LAI* wordt bepaald door het meten van de oppervlakte van enkele bladmonsters. Al deze bepalingen worden gekenmerkt door een zekere mate van subjectiviteit in de keuze van de monsterplekken en het al dan niet meerekenen van vergelende gewasbestanddelen/bladeren. Bij het nemen van monsters voor *LAI* bepaling moeten telkens delen van het proefveld opgeofferd worden. Voorts zijn *LAI* metingen zeer tijdrovend.

Een alternatieve methode voor de bepaling van bodembedekking en *LAI* is het meten van de gewasreflectie. De voordelen van deze methode zijn een grote mate van objectiviteit, een niet-destructieve bepaling, reflectiemetingen kunnen zeer snel worden uitgevoerd op een groot aantal plekken in het proefveld (in principe kunnen hele velden gemeten worden), en de metingen kunnen automatisch worden verwerkt. In dit hoofdstuk worden enkele standaard (regressie-)lijnen gegeven waarmee voor bieten de bodembedekking en voor aardappelen, gerst, tarwe en haver zowel de bodembedekking als de *LAI* uit reflectiemetingen bepaald kan worden.

7.1 Materiaal en methode

De standaardlijnen voor de bepaling van bodembedekking en *LAI* zijn afgeleid uit een groot aantal reflectiemetingen op proefvelden en boerenpercelen, tussen 1980 en 1990, op verschillende locaties in Nederland. In Tabel 2 is een opsomming gegeven van de belangrijkste karakteristieken van de diverse proeven. Hieronder volgt per gewas een korte beschrijving van die proeven.

Aardappelen. De variatie in rassen, locatie en groei-omstandigheden was bij aardappelen zeer groot. In 1980 en 1983 bestond de proef uit enkel één veld zonder specifieke behandeling, d.w.z. met optimale voorziening van water en nutriënten en zonder aanwezigheid van plagen of ziektes. In 1987 en 1988 zijn de metingen verricht op telkens drie percelen van verschillende boeren in Zuid-Flevoland. In 1989 zijn er twee proeven uitgevoerd met verschillende behandelingen, een rassenproef op proefboerderij 'De Eest' en een voorkiemproef op proefboerderij 'Droevendaal'. De rassenproef bestond uit acht rassen onder optimale groei-omstandigheden. De voorkiemproef bestond uit twee rassen die beide in voorgekiemde en ongekiemde toestand gepoot waren. Beide proeven waren optimaal voorzien van water en nutriënten en waren behandeld tegen ziektes en plagen. In 1990 zijn drie proeven uitgevoerd. De eerste was een rassenproef met drie rassen op 'Droevendaal' onder optimale groei-omstandigheden.

Tabel 2. Overzicht van de proeven tussen 1980 en 1990 met aardappelen, bieten, gerst, tarwe en haver. De tabel geeft het jaar, de locatie, de geteelde rassen, het bodemtype, de gebruikte reflectiemeter, de verhouding infrarood reflectie/groen reflectie van de bodem (IR_s/GR_s), en de hoeveelheid metingen van bodembedekking (Nbed.) en van LAI (NLAI)

Gewas	Proef no	Jaar	Plaats	Ras	Bodem type	Reflectie meter	IR_s/GR_s	Nbed	NLAI
Aard.	a1	1980	"De Schreef"	Bintje	Zee klei	CABO-I	1.49	35	-
	a2	1983	"De Schreef"	Bintje	Zee klei	CABO-I	1.34	35	12
	a3	1987	Flevoland	Bintje	Zee klei	CABO-II	1.30	15	15
	a4	1988	Flevoland	Bintje	Zee klei	CABO-II	1.30	21	14
	a5	1989	"De Eest"	Bintje, Saturna, Eba Surprise, Eigenheimer, Herta, Irene Bildstar	Zavel	CABO-II	1.74	62	-
	a6	1989	"Droevendaal"	Bintje, Spunta	Humeus zand	CABO-II	1.71	181	5
	a7	1990	"Droevendaal"	Irene, Dore, Parel	Humeus zand	CROPSCAN	2.08	43	16
	a8	1990	"Droevendaal"	Alpha, Eigenheimer, Mirka, Saturna	Humeus zand	CROPSCAN	2.06	569	-
	a9	1990	Eeserveen	Darwina, Desiree, Elles, Mentor	Dalgrond ('zwart zand')	CROPSCAN CABO-II	2.11 1.74	353 491	116 116

Gewas	Proef no	Jaar	Plaats	Ras	Bodem type	Reflectie meter	NIR _s /GR _s	Nbed	NLAI
Bieten	b1	1980	"De Schreef"	Monohil	Zee klei	CABO-I	1.37	32	-
	b2	1981	"De Schreef"	Monohil	Zee klei	CABO-I	1.30	4	-
	b3	1983	"De Schreef"	Monohil	Zee klei	CABO-I	1.28	24	12
	b4	1987	Flevoland	Salohil, Accord,	Zee klei	CABO-II	1.30	16	16
	b5	1988	Flevoland	Regina Univers, Accord, Regina	Zee klei	CABO-II	1.30	21	21
Gerst	g1	1982	"Droevendaal"	Havila, Audley, Cebeco80	Humeus zand	CABO-I	2.15	-	68
	g2	1982	"De Bouwing"	Havila, Audley, Cebeco80	Rivier klei	CABO-I	1.90	-	25
	g3	1983	"De Schreef"	Femina	Zee klei	CABO-I	1.34	32	34
	g4	1987, 1988	Flevoland	Grit, Femina	Zee klei	CABO-II	1.30	7	7
	g5	1989	"De Bouwing"	Golf, Prisma	Rivier klei	CABO-II	1.30	143	96

Gewas	Proef no	Jaar	Plaats	Ras	Bodem type	Reflectie meter	NIR _s /GR _s	Nbed	NLAI
Tarwe	t1	1981, 1982	"Sinderhoeve"	Okapi	Podsol ('zwart zand')	CABO-I	1.60	-	32
	t2	1982	"Sinderhoeve"	Tundra	Podsol	CABO-I	1.60	-	15
	t3	1982	"Droevendaal"	Tundra, Durin Armina,	Humeus zand	CABO-I	2.15	34	34
	t4	1983	"De Schreef"	Sensor Okapi, Durin Armina,	Zee klei	CABO-I	1.45	84	-
	t5	1987	Flevoland	Donjon Obelisk, Armina, Granta, Kraka	Zee klei	CABO-II	1.30	26	26
	t6	1988	Flevoland	Obelisk	Zee klei	CABO-II	1.30	16	16
Haver	h1	1989	"De Bouwing"	Dula	Rivier klei	CABO-II	1.70	168	70
	h2*	1990	"Droevendaal"	Cebeco8852 Wilma	Humeus zand	CROPSCAN	2.06	34	34

*: enkel data uit de vegetatieve fase van de groei

In de tweede proef, met *Verticillium dahliae* infectie, werden op 'Droevendaal' drie rassen geteeld bij vier behandelingen: met en zonder *V. dahliae* infectie, en met en zonder irrigatie. Door een goede hoeveelheid neerslag dat jaar kwamen er echter geen grote verschillen in behandelingseffect naar voren. In de derde proef, met aardappelcyste-aaltje infectie (*Globodera pallida*), werden in Eeserveen vier rassen geteeld bij vier behandelingen: met en zonder aaltjes infectie, en met en zonder water stress. Bij deze proef waren de verschillen in groei en ontwikkeling door de behandelingen zeer groot. Sommige gewassen bereikten slechts een maximale bodembedekking van 30-40% en hadden een gelige kleur, en andere gewassen bereikten 100% bodembedekking met een groene kleur. de knolopbrengst varieerde van 10 tot 50 ton/ha.

Bieten. De variatie in rassen, locatie en groei-omstandigheden was niet erg groot. Bij geen van de proeven was een specifieke proefbehandeling aanwezig, en de gewassen hadden alle een goede groei en ontwikkeling. De locatie was telkens in de Flevopolder met vergelijkbare bodemtypes. Wel was er in de meeste groeiseizoenen variatie in bodemvocht tijdens het groeiseizoen. De proeven in 1980-1983 werden uitgevoerd op één enkel proefveld, de metingen in 1987-1988 zijn verricht op telkens drie percelen van verschillende boeren in Zuid-Flevoland.

Gerst. De verschillen waren voornamelijk aanwezig in gebruikte rassen en bodemtypes. In 1982 werd op zowel 'Droevendaal' als op 'De Bouwing' een rassenproef met dezelfde drie rassen en twee stikstoftrappen uitgevoerd. In 1983 werd er op 'De Schreef' één veld gerst geteeld. In 1987 en 1988 zijn de reflectiemetingen weer verricht op percelen van boeren in Z-Flevoland, één perceel in ieder jaar. In 1989 werd op 'De Bouwing' een proef met twee rassen en drie stikstoftrappen uitgevoerd. De behandelingen gaven echter geen verschil in groei en ontwikkeling.

Tarwe. In deze dataset waren er verschillen aanwezig in gebruikte rassen, in gewaskleur (door verschillende stikstoftrappen), en in bodemachtergrond. In 1981 en 1982 werd op de 'Sinderhoeve' een beregening en bemestingsproef uitgevoerd met het ras Okapi. Er waren drie beregeningstrappen, niet, weinig en veel, en zes stikstoftrappen. In 1982 werd aan deze proef het ras Tundra toegevoegd. De verschillen door de behandelingen kwamen redelijk tot uiting in de korrelopbrengsten die varieerden van 5 tot 8.5 ton/ha. Eveneens in 1982 werd op 'Droevendaal' een fungicide proef uitgevoerd met drie rassen en drie stikstoftrappen. De behandelingen leverden nauwelijks verschillen in groei en ontwikkeling. In 1983 werden op 'De Schreef' vier rassen verbouwd, zonder speciale behandeling, d.w.z. optimaal voorzien van water en nutriënten. In 1987 en 1988 zijn de reflectiemetingen verricht op percelen van verschillende boeren in Z-Flevoland. In 1987 waren er vijf velden met vier verschillende rassen, en in 1988 drie velden met alle drie het ras Obelisk.

Haver. Van haver waren slechts twee proeven met reflectiemetingen aanwezig. In 1989 werd op 'De Bouwing' het ras Dula geteeld bij vier stikstoftrappen, en in 1990 op 'Droevendaal' de rassen Cebeco8852 en Wilma bij drie stikstoftrappen. Van de proef in 1990 zijn enkel de metingen uit de vegetatieve periode opgenomen omdat door slechte groei-omstandigheden de heterogeniteit in de generatieve fase dermate groot was dat de data té onnauwkeurig bleken.

Tussen 1980 en 1990 zijn drie verschillende instrumenten gebruikt voor het meten van de gewasreflectie, de CABO-I en CABO-II meters (door CABO ontworpen en door TFDL gebouwd), en de CROPSCAN (Sky Instruments Ltd, Llandrindrod Wells, Powys, UK). De spectrale bandspecificaties van deze meters zijn gegeven in Tabel 1 (Hoofdstuk 3). In Tabel 2 staat vermeld welke reflectiometer bij welke veldproef is ingezet. Alle drie de meters zijn gebruikt bij de afleiding van de standaardlijnen. In principe zijn de afgeleide standaardlijnen geldig voor iedere reflectiometer, mits absoluut gecalibreerd en voorzien van vergelijkbare spectrale banden.

Per veld zijn, per meetdag, vijf tot acht reflectiometingen verspreid over het veld gemiddeld tot 1 veldgemiddelde. Typische waarden voor de standaard deviatie van een veldgemiddelde zijn: voor groen en rood reflectie 0.2-0.5% voor zowel kale bodem als gesloten gewassen, en voor infrarood reflectie 0.5% voor kale bodem en 1.0-2.5% voor gewassen tussen 20% en 100% bedekking. Genoemde getallen gelden voor redelijk homogene velden.

Over het algemeen zijn bij iedere proef reflectiometingen gespreid in het groeiseizoen uitgevoerd van zaai/opkomst (april/mei) tot de oogst (augustus/september).

De gemeten gewasreflecties zijn omgerekend naar de vegetatie index *WDVI* (zie 5.2 Vegetatie Indices):

$$WDVI = IR - (IR_s/GR_s)*GR \quad (\%)$$

waarbij *IR* en *GR* = infrarood en groen reflectie van het gewas, en *IR_s* en *GR_s* de infrarood en groen reflectie van de onderliggende, kale bodem. De *IR_s* en *GR_s* zijn voor ieder proefveld, en voor ieder jaar apart bepaald (Tabel 2). Bij de berekening van *WDVI* is gekozen voor het gebruik van groen reflectie in plaats van rood reflectie omdat de CABO-II meter enkel een groene en een infrarode band bezit.

Voor aardappelen, bieten, gerst, tarwe en haver is vervolgens de bodembedekking via lineaire regressie gerelateerd aan *WDVI*. De bodembedekking was bepaald door visuele schattingen door een expert in het veld, en/of door tellingen met een raster in het veld. De visuele schattingen zijn in de beginjaren tachtig geverifieerd met bedekkingsmetingen verkregen uit foto's en met rastermetingen in het veld. Voor aardappelen en bieten bleken de visuele schattingen betrouwbaar door het hele groeiseizoen heen, maar voor gerst, tarwe en haver slechts voor het vegetatieve deel van het groeiseizoen. Voor de granen bleek ook dat de schattingen in de vegetatieve fase een grotere onbetrouwbaarheid kregen naarmate het gewas hoger werd en moeilijker visueel te overzien. In de hier gebruikte data set (Tabel 2) zijn voor granen alleen bedekkingsmetingen in de vegetatieve fase opgenomen. In de gebruikte data set kan voor aardappelen en bieten worden uitgegaan dat zowel de visuele schattingen als de bedekkingsmetingen met het raster een absolute onnauwkeurigheid hebben van ≈5% (percentage bodembedekking). Voor de granen loopt de onbetrouwbaarheid op van ≈5% aan het begin van het groeiseizoen naar ≈10% bij het begin van de bloei.

Vervolgens is de LAI via een semi-empirisch model en via lineaire regressie gerelateerd aan de *WDVI* voor aardappelen, gerst, tarwe en haver. Voor bieten waren te weinig *LAI* metingen aanwezig om met voldoende zekerheid standaardlijnen af te leiden. De *LAI* was bepaald in zowel de vegetatieve als de generatieve fase aan groene bladeren met de automatische bladoppervlaktemeter. De nauwkeurigheid van deze bepaling verschilde sterk van proef tot

proef (afhankelijk van monster-grootte en -aantal) en was niet gekwantificeerd. *LAI* metingen met een bekend grote onnauwkeurigheid zijn echter niet meegenomen in de afleiding van de standaardlijnen. Van de betrouwbaar geachte *LAI* metingen mag worden aangenomen dat de relatieve onnauwkeurigheid minimaal zo'n 10-15% is.

7.2 Resultaten

7.2.1 Bodembedekking

De reflectiemetingen van de aardappelen gaven aanleiding tot het splitsen van het groeiseizoen in een 'vroeg' en een 'late' fase (Figuur 7). De vroege fase is gedefinieerd als de fase waarin de *WDVI* oploopt van 0 (beginwaarde bij kale bodem) tot aan de maximale waarde. De late fase is de periode vanaf maximale *WDVI* tot het einde van het groeiseizoen (oogst). De vroege fase komt globaal overeen met de periode dat de bodembedekking oploopt van 0 tot de maximale waarde ($\approx 100\%$), en de late fase met de periode dat de bodembedekking weer afneemt door vergeling, inzakking en afsterving. Door de veranderingen in kleur en structuur van het gewas in deze fase heeft de reflectie, *WDVI*, een andere relatie met bodembedekking dan in de vroege fase (zie ook 2.2. Gewasreflectie).

Voor bieten is de kleur en structuur van het gewas voldoende stabiel door het seizoen heen zodat de data niet gestratificeerd hoefden te worden.

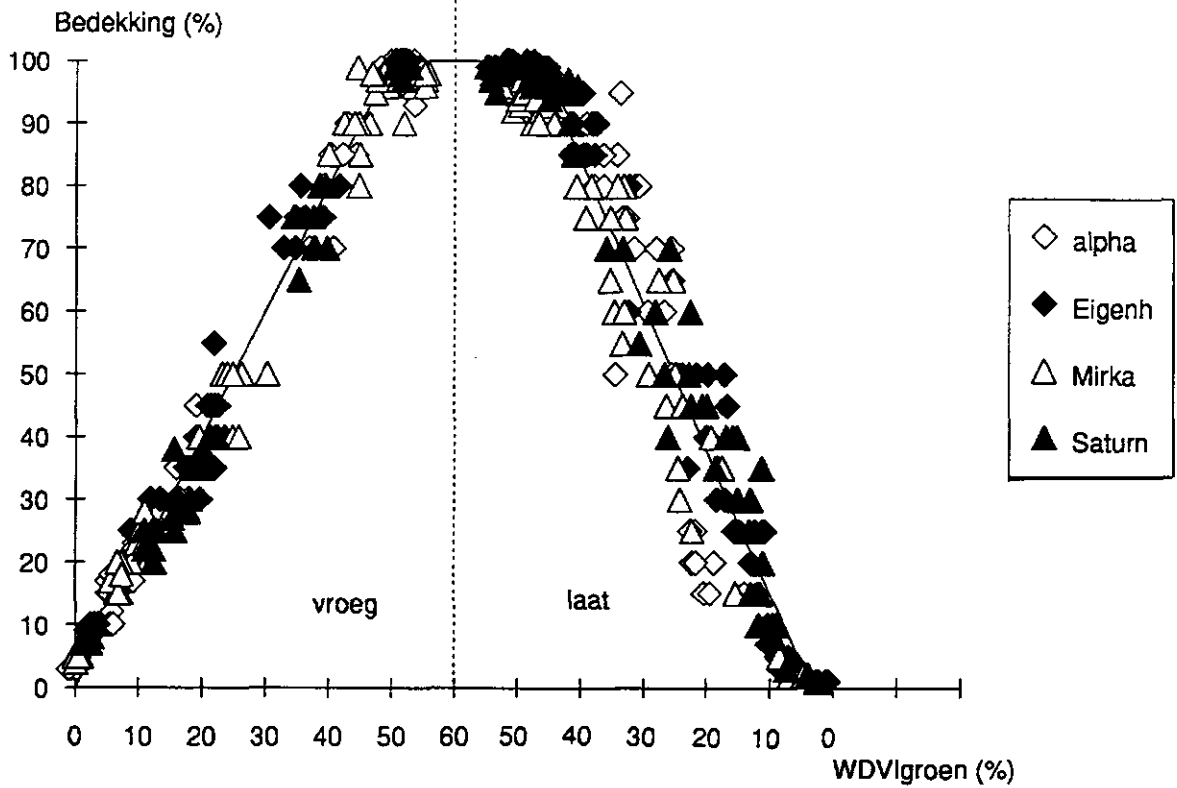
De data van gerst, tarwe en haver zijn op dezelfde wijze gestratificeerd als voor de aardappelen: de data van $WDVI=0$ tot $WDVI=\text{maximaal}$ komen globaal overeen met de vegetatieve fase, de data vanaf $WDVI=\text{maximaal}$ globaal met de generatieve en afrijpingsfase. In de regressie analyse tussen bodembedekking en *WDVI* is echter alleen gebruik gemaakt van data in de vegetatieve fase, omdat er geen betrouwbare bedekkingsbepalingen uit de generatieve- en afrijpingsfase aanwezig waren.

De bodembedekking is gerelateerd aan *WDVI* via lineaire regressie:

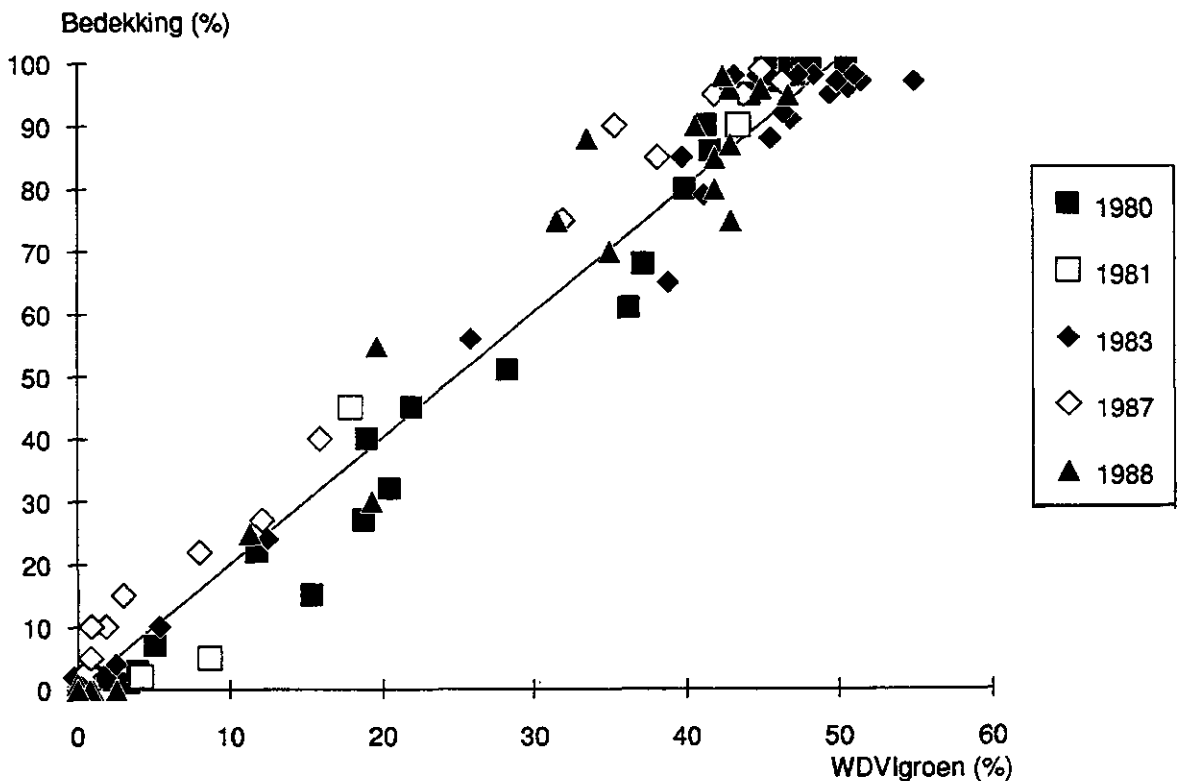
$$\text{bedekking} = \alpha + \beta * WDVI \text{ (\%)} \quad (1)$$

Voor aardappelen is de regressie toegepast op de data van de proeven a8 (Figuur 7) en a9. Deze proeven kennen een grote mate van variatie en het aantal metingen is voldoende groot voor een betrouwbare regressie analyse. De overige proeven a1 t/m a7 konden hierdoor als validatie set gebruikt worden. In de vroege fase gaat de regressie (1) door de oorsprong, en in de late fase is een verschuiving α toegestaan om veranderingen in de relatie ten gevolge van kleur- en structuurveranderingen op te vangen. In Figuur 7 valt op dat zowel in de vroege als in de late fase, de spreiding in de data redelijk gelijkmatig over het 0-100% bedekkingstraject is. In de late fase is de spreiding groter dan in de vroege fase vanwege de moeilijkheid van het bepalen van bodembedekking van inzakkende en vergelende gewassen.

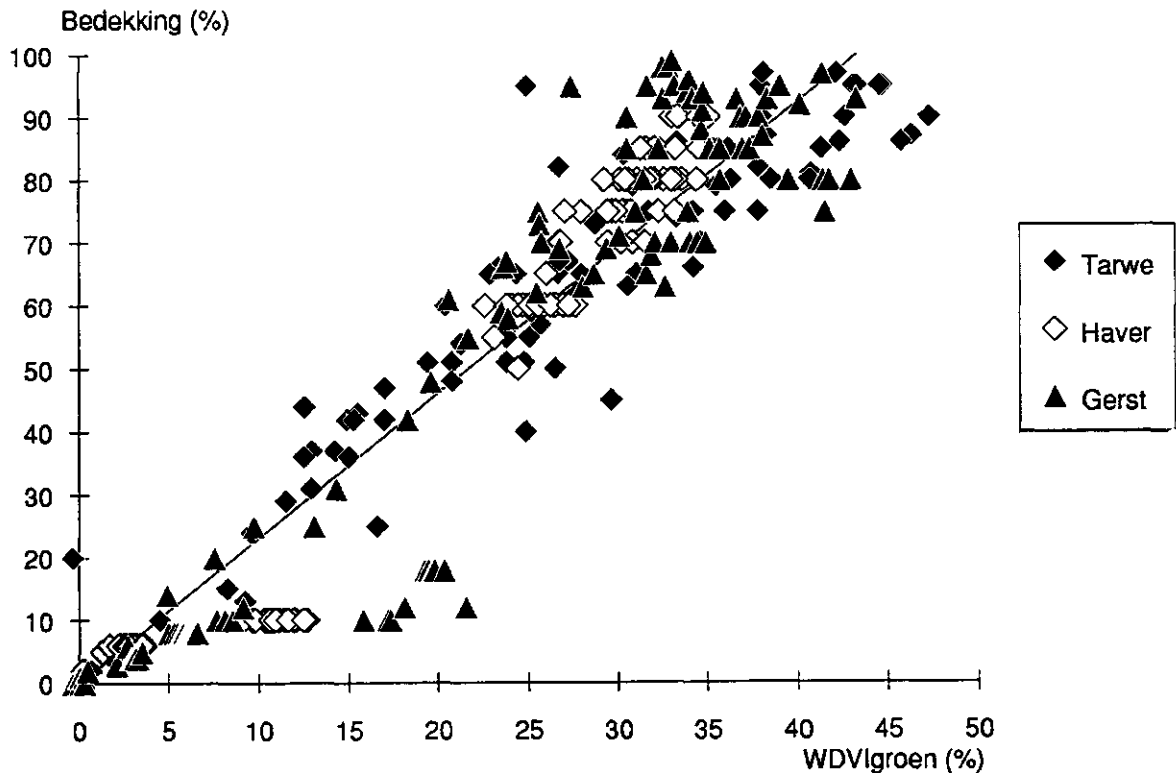
Voor bieten zijn de data van alle proeven bij de regressie gebruikt omdat de variatie en het aantal data te gering was voor een afzonderlijke calibratie en validatie set (Figuur 8). De regressie (1) gaat voor bieten door de oorsprong. Ook voor bieten is spreiding in de data redelijk gelijkmatig over het 0-100% bedekkingstraject.



Figuur 7. Bodembedekking tegen WDV(groen) voor aardappelen uit proef a8 (Tabel 2). De verschillende symbolen geven de vier gebruikte rassen weer. Alle behandelingen zijn opgenomen. De getrokken lijn is de lineaire regressie (Tabel 3)



Figuur 8. Bodembedekking tegen WDV(groen) voor bieten uit alle beschikbare proeven b1 t/m b5 (Tabel 2). De verschillende symbolen geven de diverse jaren weer. De getrokken lijn is de lineaire regressie (Tabel 3)

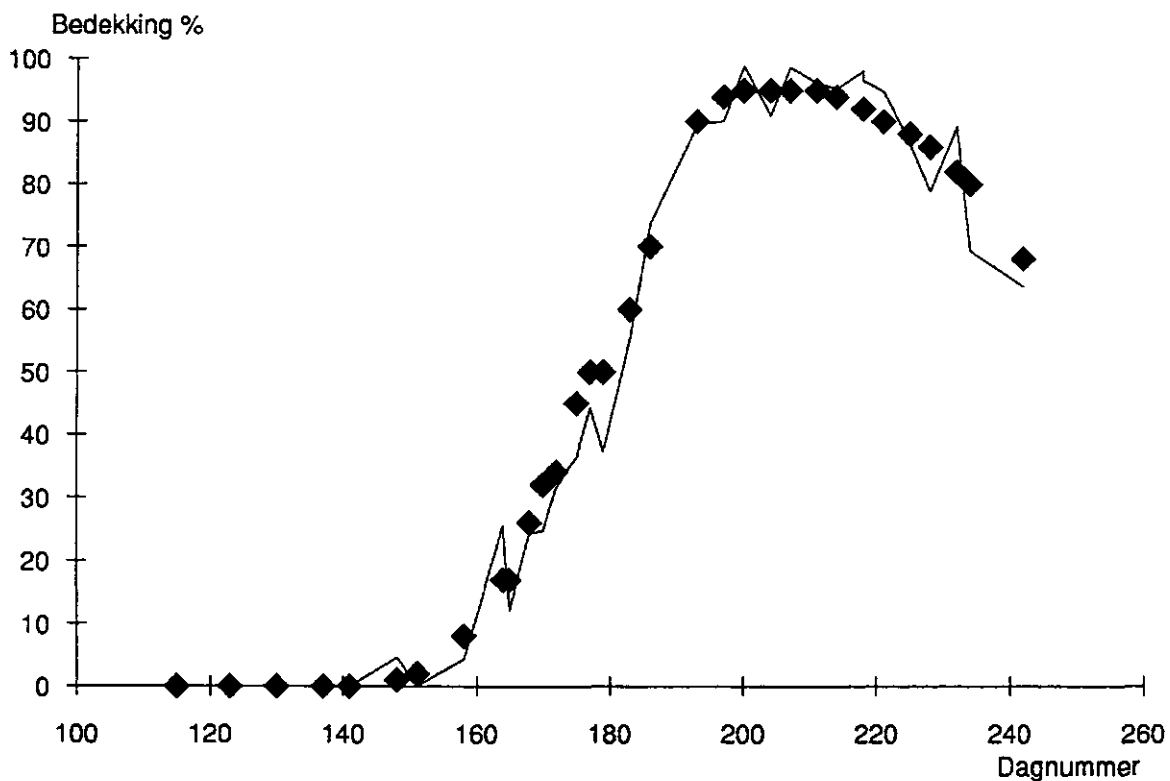


Figuur 9. Bodembedekking tegen WDV(groen) voor gerst, tarwe en haver uit alle beschikbare proeven (Tabel 2). De verschillende symbolen geven de drie gewassen weer. De getrokken lijn is de lineaire regressie (Tabel 3)

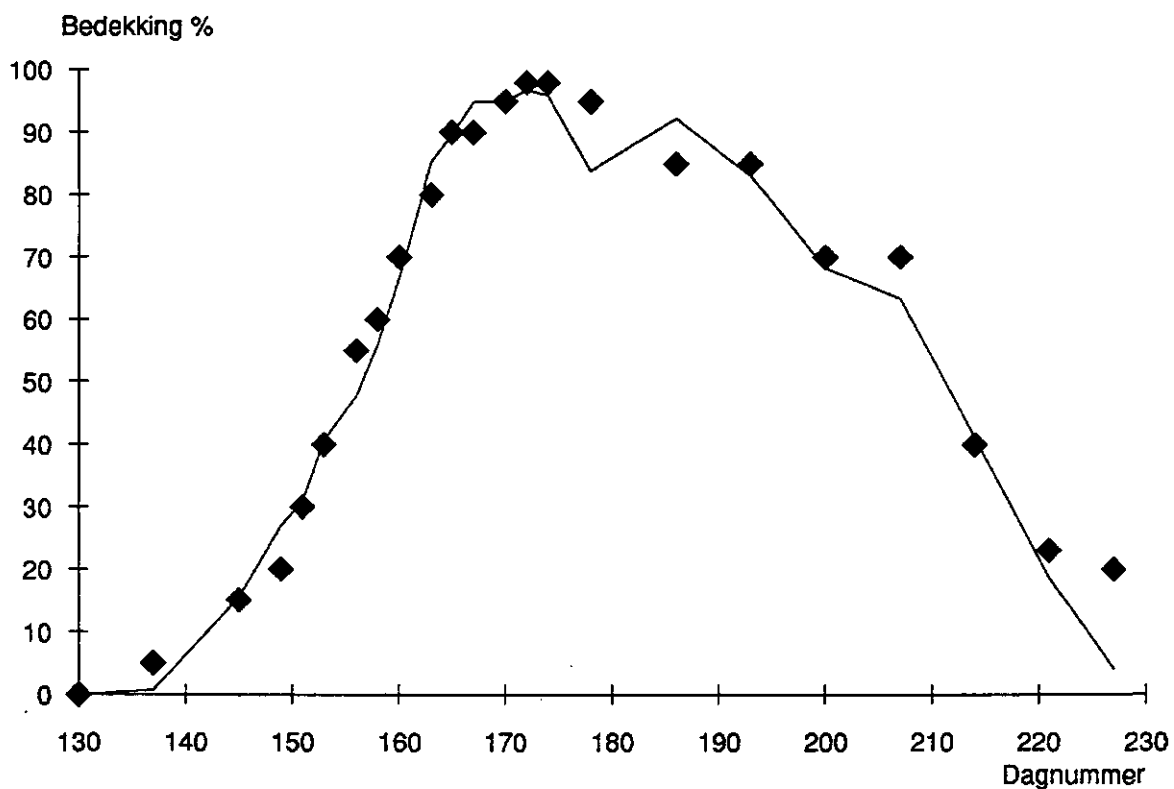
Voor gerst, tarwe en haver kon de regressie toegepast worden op de data set van alle drie de gewassen bij elkaar (Figuur 9). Ook hier is geen aparte validatie set afgesplitst. De regressie (1) gaat voor gerst, tarwe en haver eveneens door de oorsprong. In vergelijking met aardappelen en bieten valt op dat in Figuur 9 de spreiding in de data toe neemt met de bodembedekking. Dit is een gevolg van de afnemende nauwkeurigheid in de bedekkingsschattingen in het veld naarmate het gewas hoger, en moeilijker te overzien wordt.

Tabel 3 geeft de resultaten van de regressie analyse, tezamen met enkele statistische gegevens. Met behulp van de waarden uit deze tabel en regressie (1) kan de bodembedekking uit de *WDVI* geschat worden. Om irreële waarden te voorkomen wordt een ondergrens van 0% en een bovengrens van 100% aan de geschatte waarden gesteld.

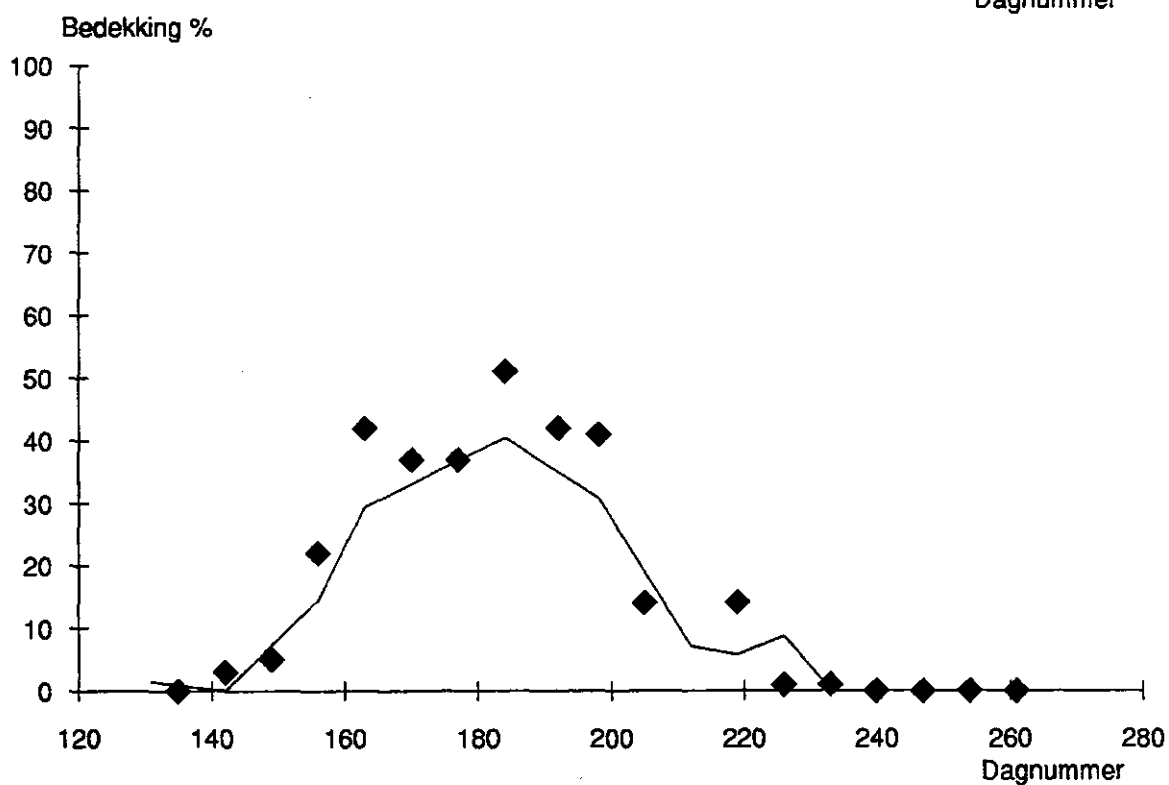
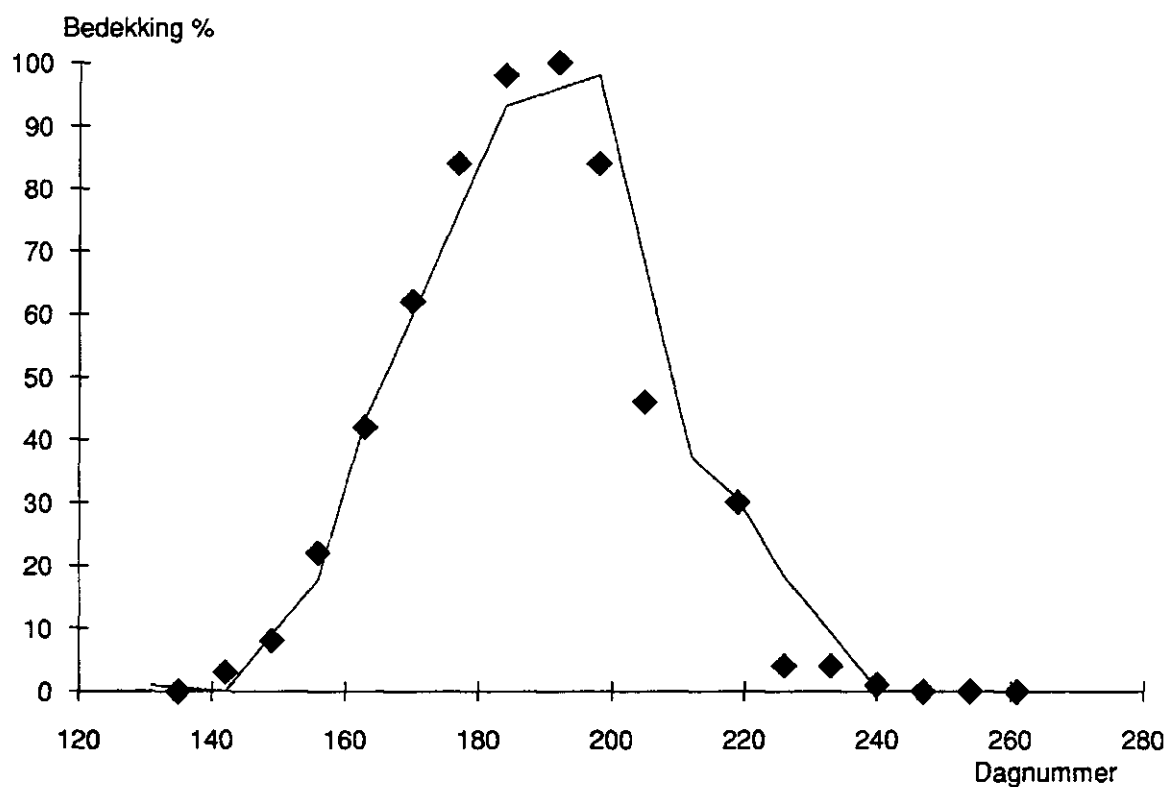
Voor aardappelen is de bodembedekking geschat uit *WDVI* voor de validatie set a1 t/m a7. De Figuren 10 en 11 geven enkele resultaten voor de proeven a1 en a6. Figuur 12 geeft nog de resultaten voor twee velden uit calibratie set a9, een veld met een zeer goede groei en ontwikkeling (Figuur 12a), en een veld met zeer slechte groei en ontwikkeling (Figuur 12b; droogte stress en aaltjes aantasting). In alle gevallen komt de bodembedekking geschat uit *WDVI* goed overeen met bodembedekking bepaald in het veld. De correlatie coëfficiënt r varieert van 0.94 tot 0.99, en de seizoensgemiddelde afwijking tussen bedekking geschat uit *WDVI* en bepaald in het veld van 3.5% tot 6.5% (absolute bodembedekking) voor de verschillende proeven.



Figuur 10. Ontwikkeling van bodembedekking berekend uit WDVI(groen) (getrokken lijn) en bodembedekking visueel geschat in het veld (symbool \blacklozen) voor aardappel cultivar Bintje, proef a1



Figuur 11. Ontwikkeling van bodembedekking berekend uit WDVI(groen) (getrokken lijn) en bodembedekking gemeten met een raster in het veld (symbool \blacklozen) voor aardappel cultivar Spunta uit proef a6



Figuur 12. Ontwikkeling van bodembedekking berekend uit WDVI(groen) (getrokken lijn) en bodembedekking gemeten met een raster in het veld (symbool \blacklozen) voor aardappel cultivar Darwina uit proef a9. Figuur 12a: niet geïrrigeerd, onbesmet; Figuur 12b: niet geïrrigeerd, besmet met aardappelcyste aaltje

Tabel 3. Regressie coëfficiënten α en β voor de relatie tussen bodembedekking en *WDVI*: $\text{bedekking} = \alpha + \beta \cdot \text{WDVI} (\%)$, en enige statistische gegevens van de regressie analyse: standaard fout van de regressie coëfficiënten, σ , % verklaarde variantie, en aantal data *N*

	α	$\sigma(\alpha)$	β	$\sigma(\beta)$	%var	N
Aardappelen,						
vroeg fase	-	-	1.966	0.009	0.97	702
late fase	-8.050	0.885	2.285	0.025	0.87	711
Bieten	-	-	2.052	0.021	0.97	97
Gerst, tarwe en haver; vegetatieve fase						
	-	-	2.308	0.022	0.90	339

N.b: de gevonden regressie coëfficiënten zijn voor meer dan 0.995 significant

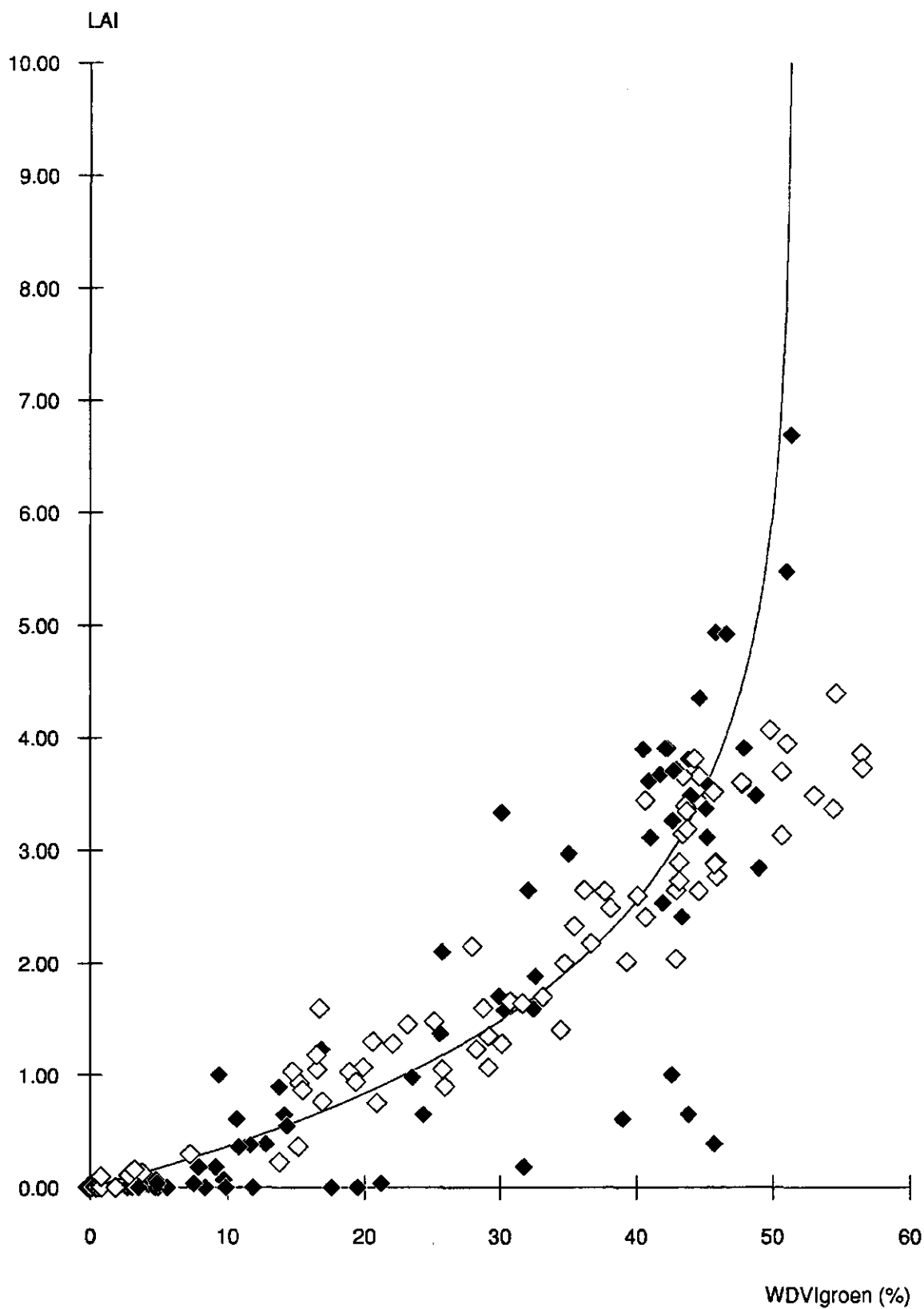
Voor bieten is de correlatie coëfficiënt r tussen bedekking geschat uit *WDVI* en bepaald in het veld in de calibratie set 0.98, en de gemiddelde afwijking 4%. Zowel voor bieten als voor aardappelen ligt deze afwijking ('schattingsfout') in dezelfde grootte-orde als de onnauwkeurigheid waarmee bodembedekking visueel geschat wordt of bepaald met rastertellingen, $\approx 5\%$.

Voor gerst, tarwe en haver is de correlatie coëfficiënt r tussen bedekking geschat uit *WDVI* en bepaald in het veld in de calibratie set 0.95. De afwijking tussen bedekking geschat uit *WDVI* en bepaald in het veld loopt op van gemiddeld 4% voor 0-10% bedekking, tot gemiddeld 12% voor 90-100% bedekking. Zoals reeds eerder vermeld, is deze grotere afwijking bij hogere bodembedekkingen voornamelijk een gevolg van onnauwkeurigheden in de visuele schattingen van bodembedekking in het veld.

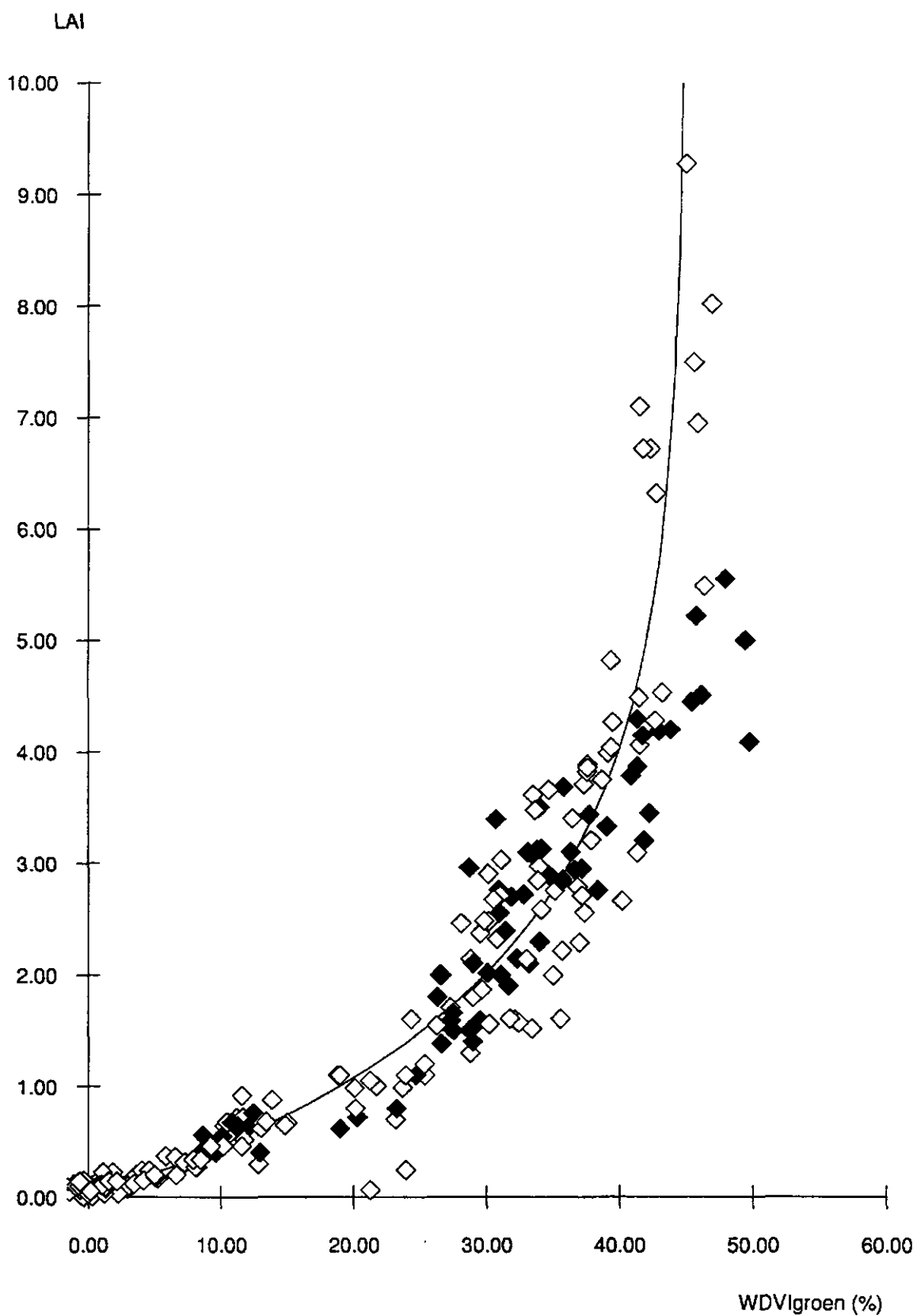
7.2.2 LAI

Ook voor de bepaling van standaardlijnen tussen gewasreflectie en *LAI* zijn de data in eerste instantie onderverdeeld naar een 'vroeg' en een 'late' fase bij aardappelen, en naar een vegetatieve en een generatieve fase bij de granen. Voor de granen zijn de data uit de generatieve fase nu wel meegenomen omdat er voldoende betrouwbare *LAI* metingen voorhanden waren. Reflectiemetingen aan volledig bruine, afgerijpte gewassen en aan stoppels zijn echter niet meegenomen (zie Hoofdstuk 2.2 Gewasreflectie)

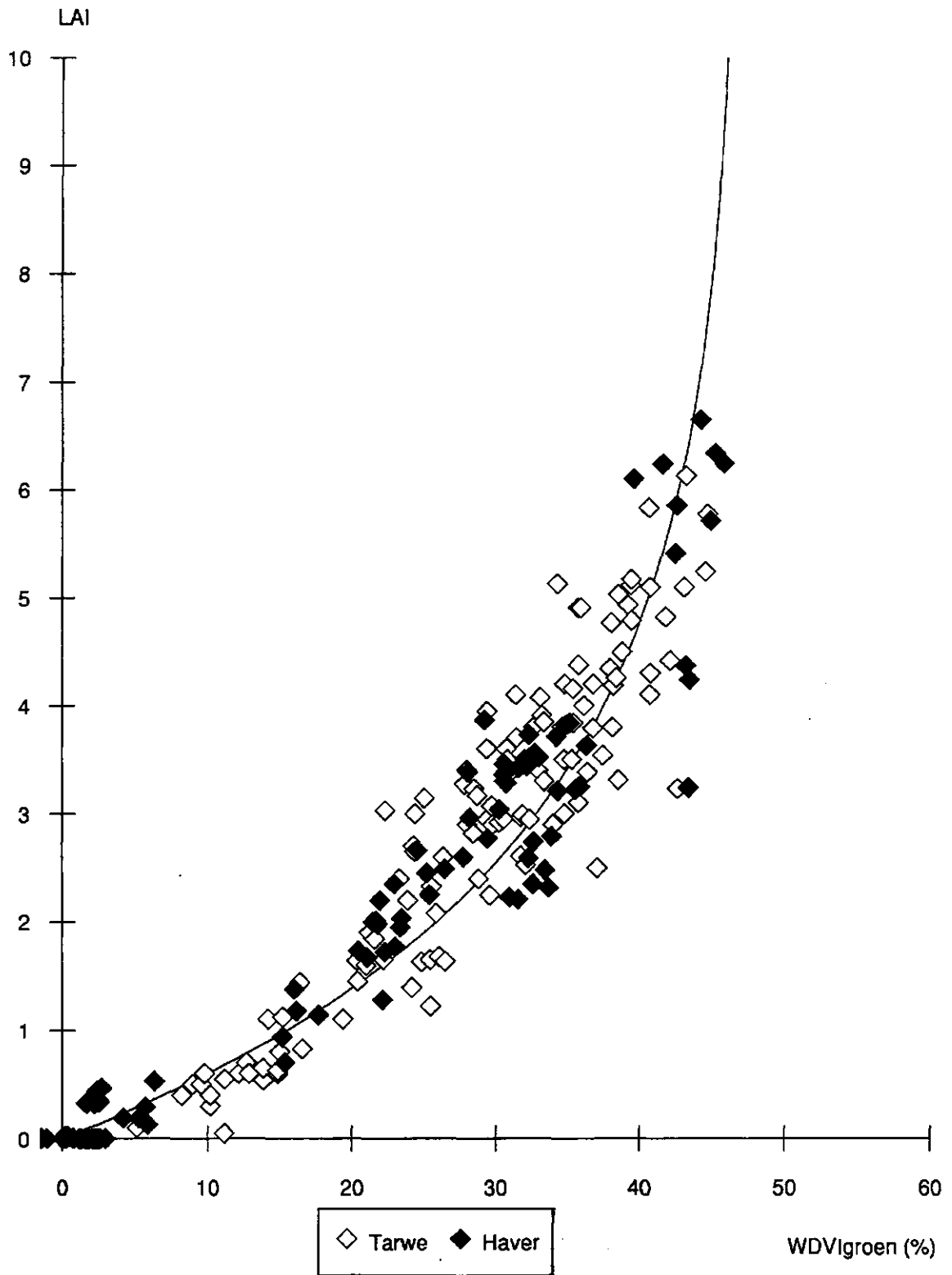
De *LAI* van aardappelen, gerst, tarwe en haver is uitgezet tegen *WDVI* voor alle beschikbare proeven (Figuren 13-15). Van de granen vormde de data van gerst een aparte set (Figuur 14), terwijl de data van tarwe en haver goed tot één homogene set konden worden samengevoegd (Figuur 15).



Figuur 13. LAI tegen WDV(groen) voor aardappelen uit alle beschikbare proeven (Tabel 2). De open symbolen (◊) geven de 'vroeg' fase, en de dichte symbolen (◆) de 'late' fase weer. De getrokken lijn geeft het verloop van het semi-empirische model (4) (Tabel 4)



Figuur 14. LAI tegen WDVl(groen) voor gerst uit alle beschikbare proeven (Tabel 2). De open symbolen (\diamond) geven de vegetatieve fase, en de dichte symbolen (\blacklozen) de generatieve fase weer. De getrokken lijn geeft het verloop van het semi-empirische model (4) (Tabel 4).



Figuur 15. LAI tegen WDV(groen) voor tarwe en haver uit alle beschikbare proeven (Tabel 2). De open symbolen (\diamond) geven tarwe, en de dichte symbolen (\blacklozen) haver weer. De getrokken lijn geeft het verloop van het semi-empirische model (4) (Tabel 4)

Voor aardappelen bleek geen differentiatie te zijn tussen de 'vroeg' en de 'late' fase (Figuur 13), en voor de granen niet tussen de vegetatieve en de generatieve fase (gerst in Figuur 14). De data uit de verschillende fases overlaptten elkaar grotendeels. Waarschijnlijk is dit gebrek aan differentiatie veroorzaakt door een té grote variabiliteit in de *LAI* bepalingen die mogelijke verschillen tussen de fases maskeren.

Gebruik van een semi-empirisch model.

Een semi-empirisch model is afgeleid om de *LAI* te relateren aan de *WDVI*. Zoals hierboven is aangetoond kan het verband tussen bodembedekking en *WDVI* meestal weergegeven worden met een rechte lijn door de oorsprong:

$$\text{bedekking} = \beta * \text{WDVI} \quad (2)$$

Een bekende relatie tussen bodembedekking en *LAI*, gebaseerd op exponentiële uitdoving van zonnestraling in een vegetatiedek, is:

$$\text{bedekking} = 1 - \exp(-k * \text{LAI}) \quad (3)$$

waarin *k* is de extinctie coëfficiënt van zonnestraling in het gewas. De combinatie van formules (2) en (3) levert het volgende verband tussen *LAI* en *WDVI*:

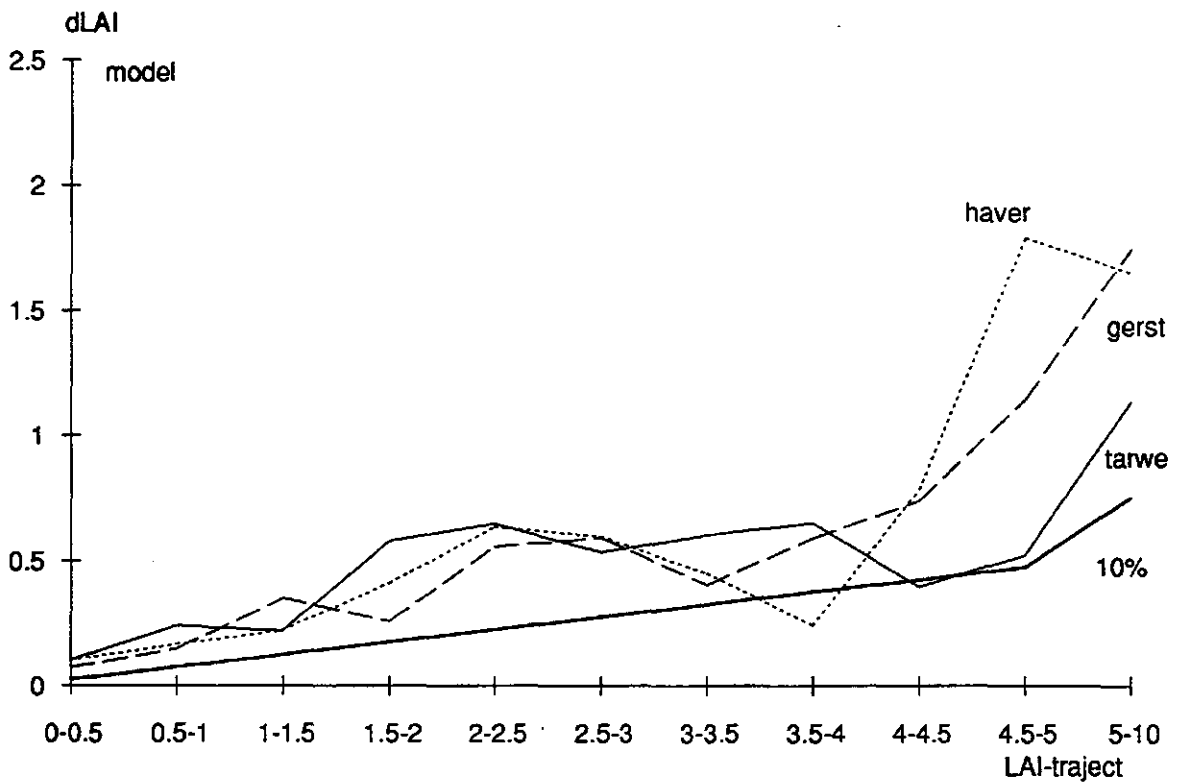
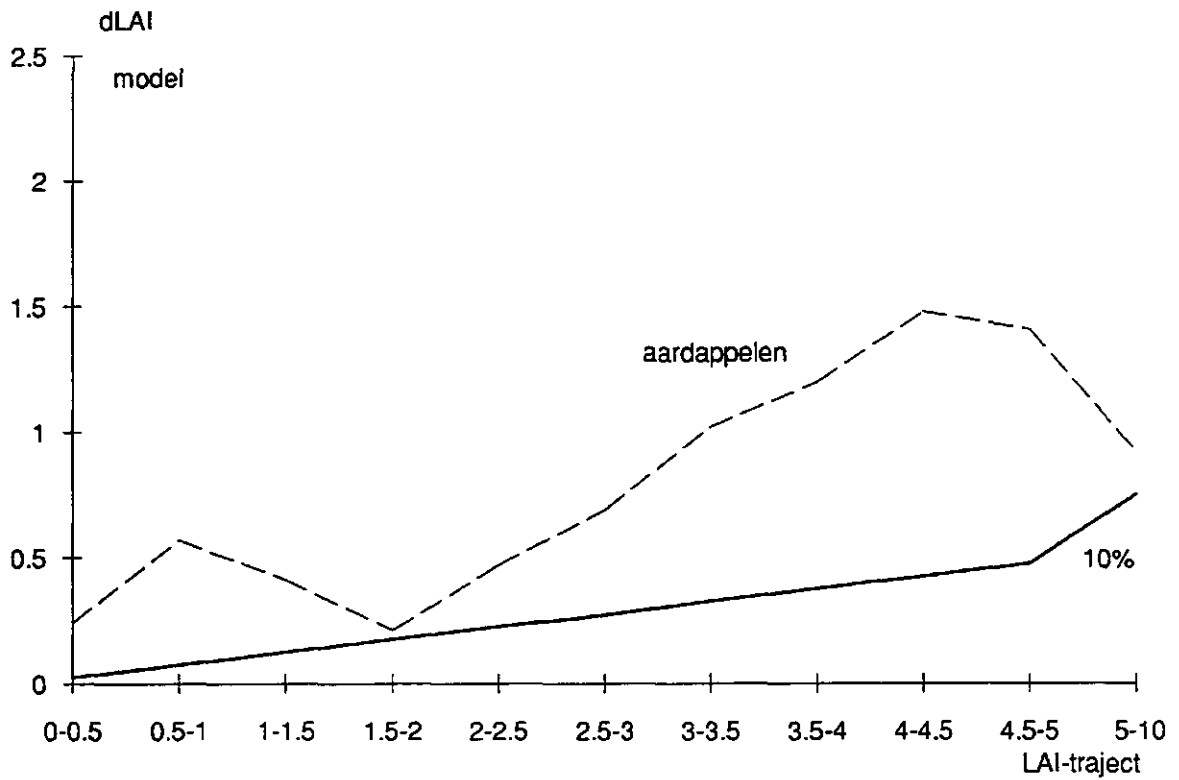
$$\text{LAI} = (-1/k) * \ln(1 - \beta * \text{WDVI}) \quad (4)$$

Vanwege het beperkte aantal data is dit model (vergelijking 4) gecalibreerd op de volledige data set van aardappelen (Figuur 13), van gerst (Figuur 14), en van tarwe en haver samen (Figuur 15). Er is geen aparte validatie set afgesplitst. Omdat de data van de vegetatieve en de generatieve fases elkaar overlaptten, is er geen onderscheid gemaakt tussen deze groeifases. Tabel 4 geeft de resultaten van de calibratie, tezamen met enkele statistische gegevens.

*Tabel 4. Coëfficiënten k en β voor de relatie tussen *LAI* en *WDVI* voor aardappelen, gerst, en tarwe en haver: $\text{LAI} = (-1/k) * \ln(1 - \beta * \text{WDVI})$, en enige statistische gegevens van de regressie analyse: standaard fout van de coëfficiënten, σ , % verklaarde variantie, en aantal data *N**

	<i>k</i>	$\sigma(k)$	β	$\sigma(\beta)$	%var	<i>N</i>
Aardappelen	0.588	0.065	1.940 10^{-2}	0.090 10^{-2}	82.8	156
Gerst	0.545	0.026	2.223 10^{-2}	0.045 10^{-2}	94.8	231
Tarwe, haver	0.400	0.025	2.128 10^{-2}	0.067 10^{-2}	92.7	223

N.b: de gevonden coëfficiënten zijn voor meer dan 0.995 significant



Figuur 16. Gemiddelde afwijking $dLAI$ tussen LAI berekend uit WDV via het semi-empirisch model (4), en LAI gemeten in het veld voor aardappels (16a) en voor gerst, tarwe en haver (16b). De vette getrokken lijn geeft de fout van 10% die minimaal met de veldbepaling van LAI geassocieerd wordt geacht

De β waarden uit Tabel 4 komen redelijk goed overeen met de β waarden ($\times 100\%$) uit Tabel 3. Dit duidt op de betrouwbaarheid van het afgeleide model (4), en op de betrouwbaarheid van, en consistentie in, de onafhankelijk verzamelde veldbepalingen van bodembedekking en *LAI*.

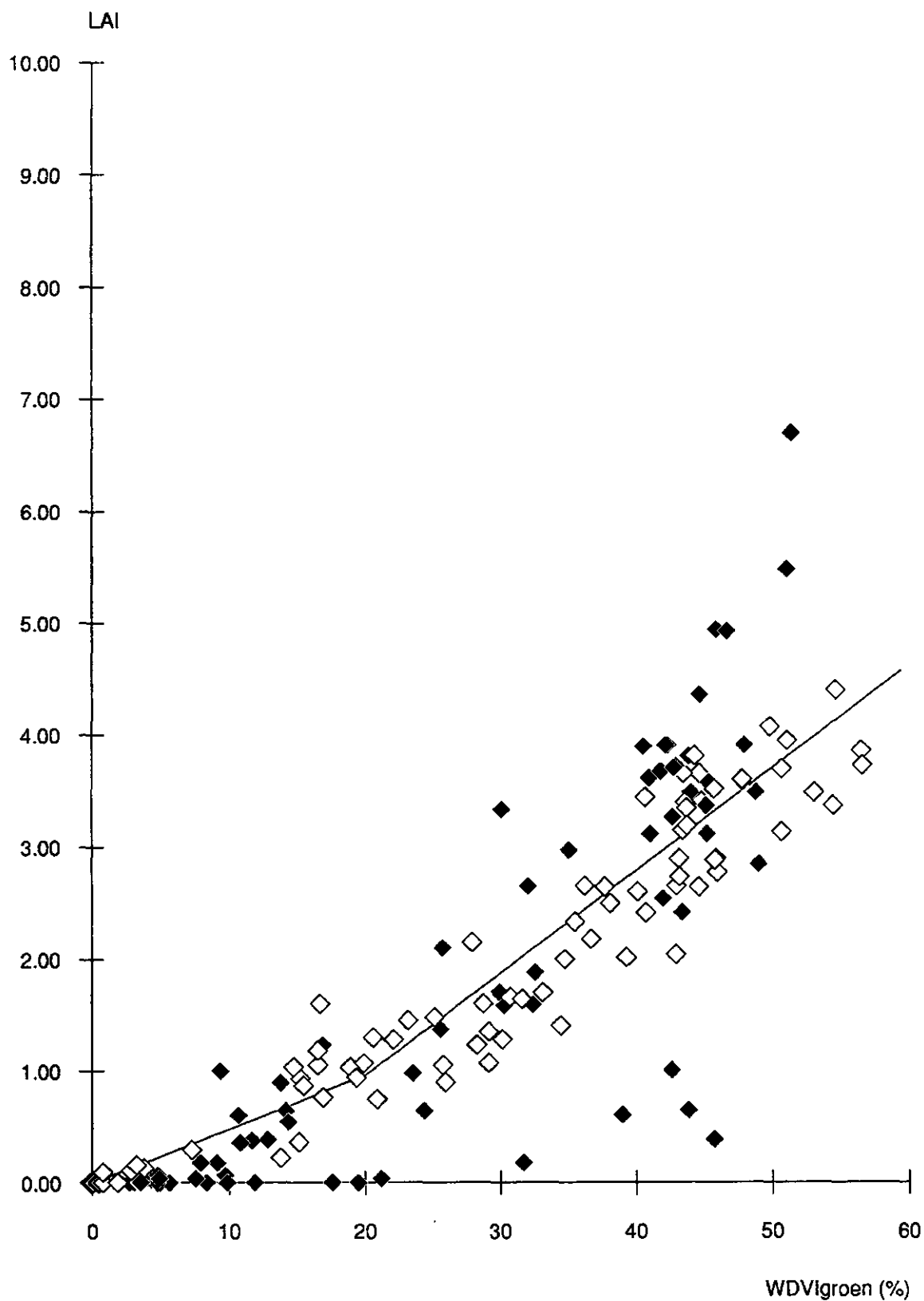
Met behulp van de coëfficiënten uit Tabel 4 en het model (4) is vervolgens voor alle *WDVI* data uit de calibratie sets de *LAI* berekend en gerelateerd aan de gemeten *LAI*. Indien de *WDVI* de waarde van $1/\beta$ overschreed (i.e. 51.22 voor aardappelen, 44.99 voor gerst, en 45.33 voor tarwe en haver) werd de geschatte *LAI* voor aardappelen op 7 gesteld, voor gerst op 10, en voor tarwe en haver op 7. Deze waarden komen overeen met de hoogst voorkomende waarden in de respectievelijke data sets. Negatief geschatte waarden van *LAI* werden op 0 gesteld.

De correlatie coëfficiënt r tussen *LAI* geschat uit *WDVI* en *LAI* werkelijk gemeten was 0.85 voor aardappelen, 0.93 voor gerst, 0.89 voor tarwe en 0.93 voor haver. De gemiddelde afwijking tussen *LAI* geschat uit *WDVI* en werkelijk gemeten is een functie van de *LAI* en is weergegeven in Figuur 16. Ter vergelijking is in deze Figuur eveneens de fout van 10% weergegeven die minimaal geassocieerd wordt geacht met de 'werkelijke' bepaling van *LAI*. Het valt op dat de afwijking voor aardappelen (Figuur 16a) veel groter is dan die voor de granen (Figuur 16b). Voor aardappelen varieert de onnauwkeurigheid van de *LAI* schatting van 0.25 tot 0.5 voor *LAI* kleiner dan 2.5, en loopt daarna snel op met toenemende *LAI*. Voor gerst, tarwe en haver blijkt dat *LAI* redelijk nauwkeurig uit *WDVI* geschat kan worden tot *LAI* waarden van 4-4.5. De onnauwkeurigheid van *LAI* schattingen varieert van 0.2 tot 0.5, met de hoogste waarden tussen *LAI* 1.5 en 3.5. Na *LAI* 4.5 loopt de onnauwkeurigheid van de *LAI* schattingen snel op.

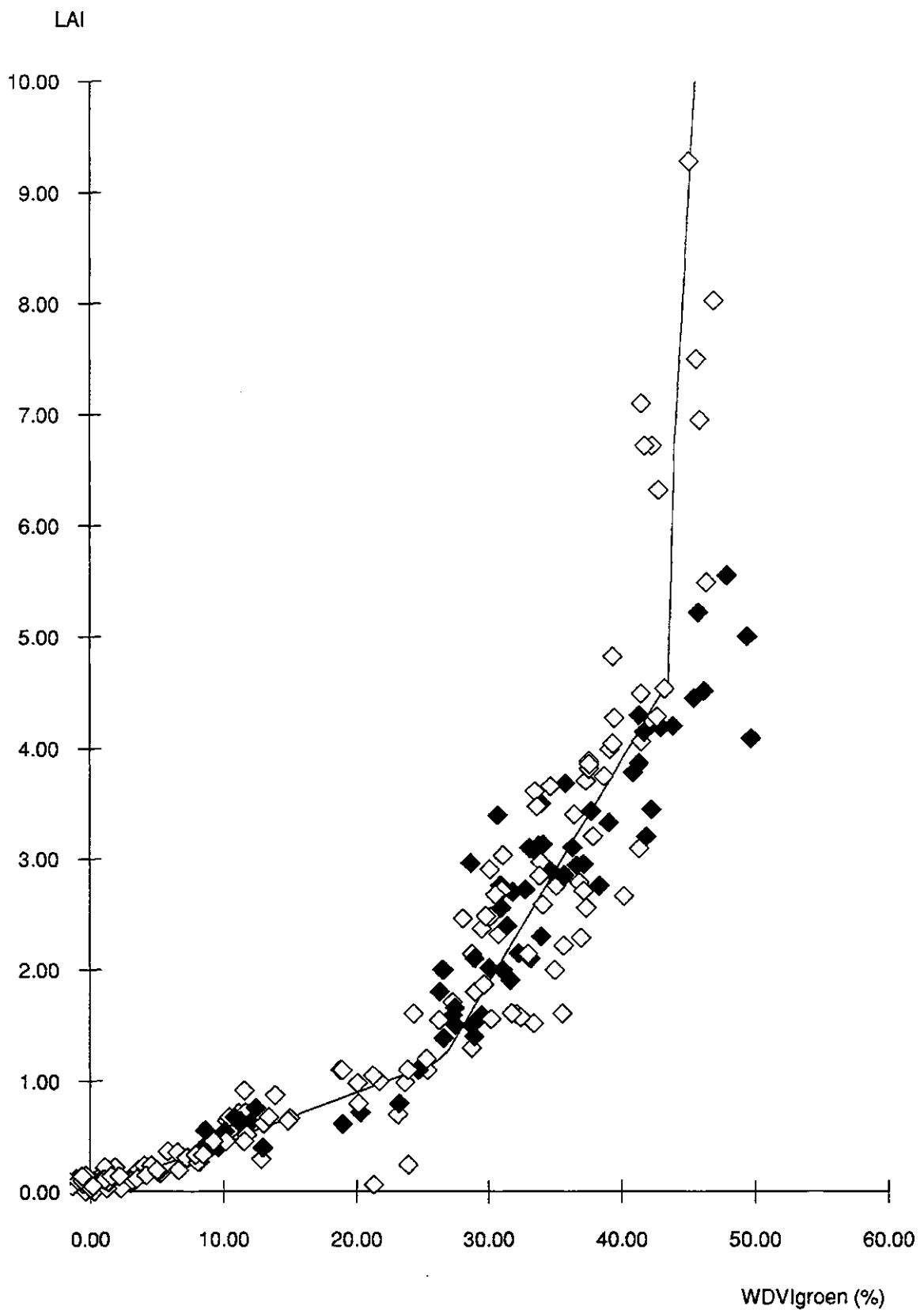
Gebruik van lineaire regressie

Een nauwkeurige visuele interpretatie van de Figuren 13-15 laat zien dat een toch nog betere relatie tussen *LAI* en *WDVI* kan worden afgeleid dan het gebruikte semi-empirische model (4). De data suggereren meer rechte verbanden dan het kromlijnige verband van het model. Redenen waarom er discrepantie kan zijn tussen de empirische data en het theoretische model (4) zijn:

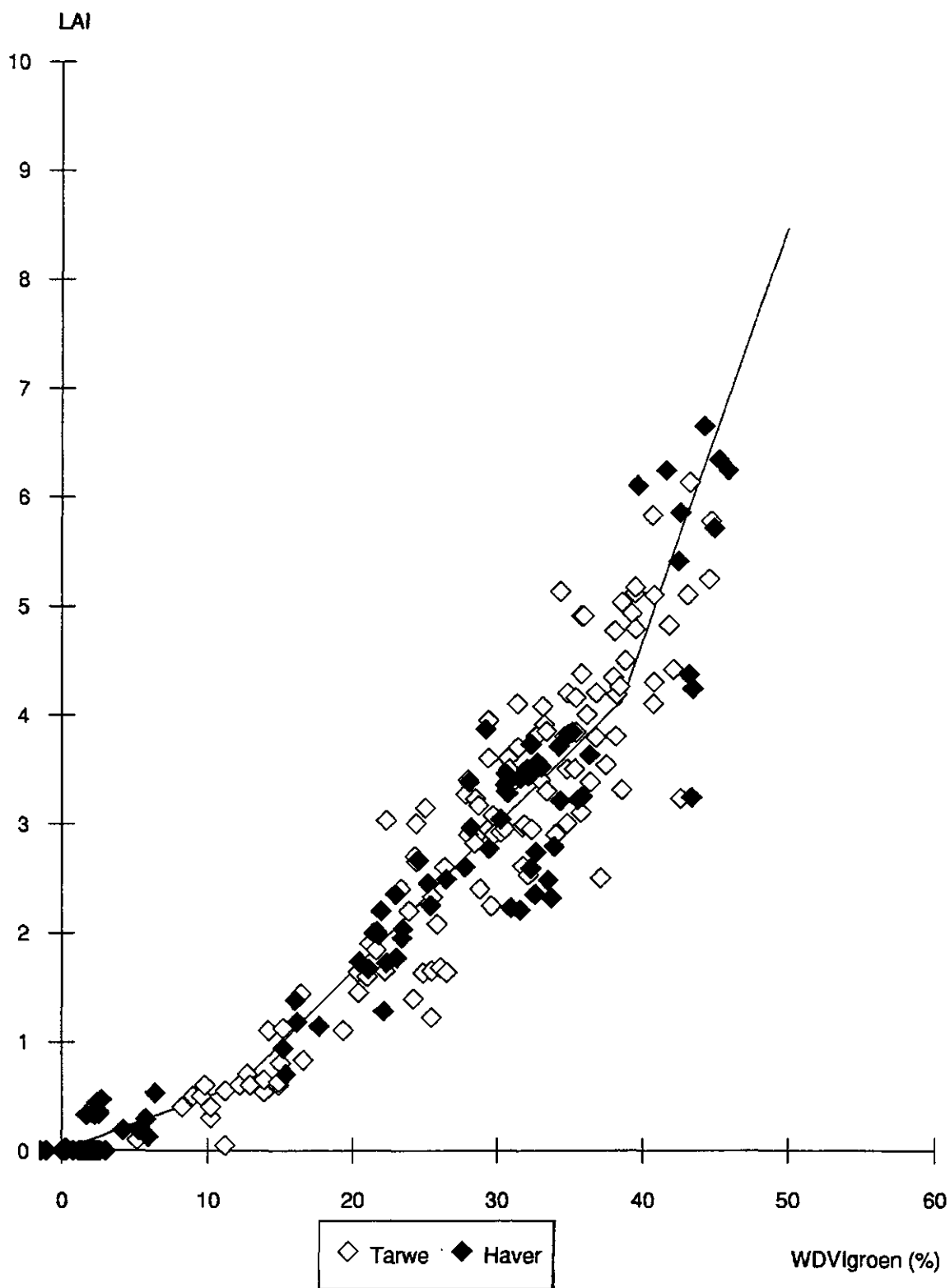
- In het model wordt alleen rekening gehouden met het bladoppervlak van de bladeren. Voor granen wordt in werkelijkheid de gewasreflectie mede bepaald door de aarlag bovenin het gewas en zou de Ear Area Index (*EAI*) bij de *LAI* opgeteld moeten worden. In de gebruikte data set zijn er echter geen metingen van *EAI* verricht zodat dit noodzakelijkerwijs verwaarloosd moet worden. Bij aardappelen zijn er in de late fase naast de bladeren ook veel stengels zichtbaar.
- Er is alleen rekening gehouden met het bladoppervlak van de groene bladeren. In werkelijkheid dragen gele en bruine bladeren onderin het gewas ook nog bij aan de totale infrarood reflectie.
- In het model wordt geen rekening gehouden met veranderingen in de structuur van het gewas die in de loop van het groeiseizoen plaats vinden. Met name de k -waarde in vergelijking (3) is structuur-afhankelijk.



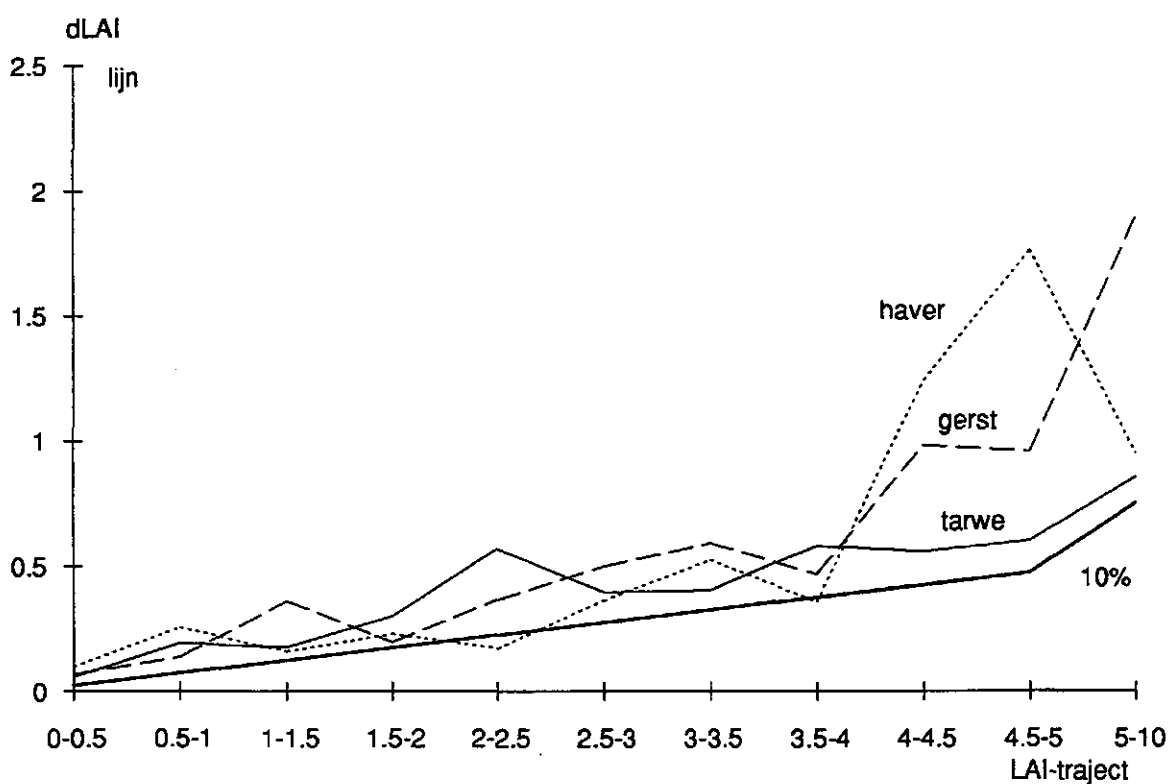
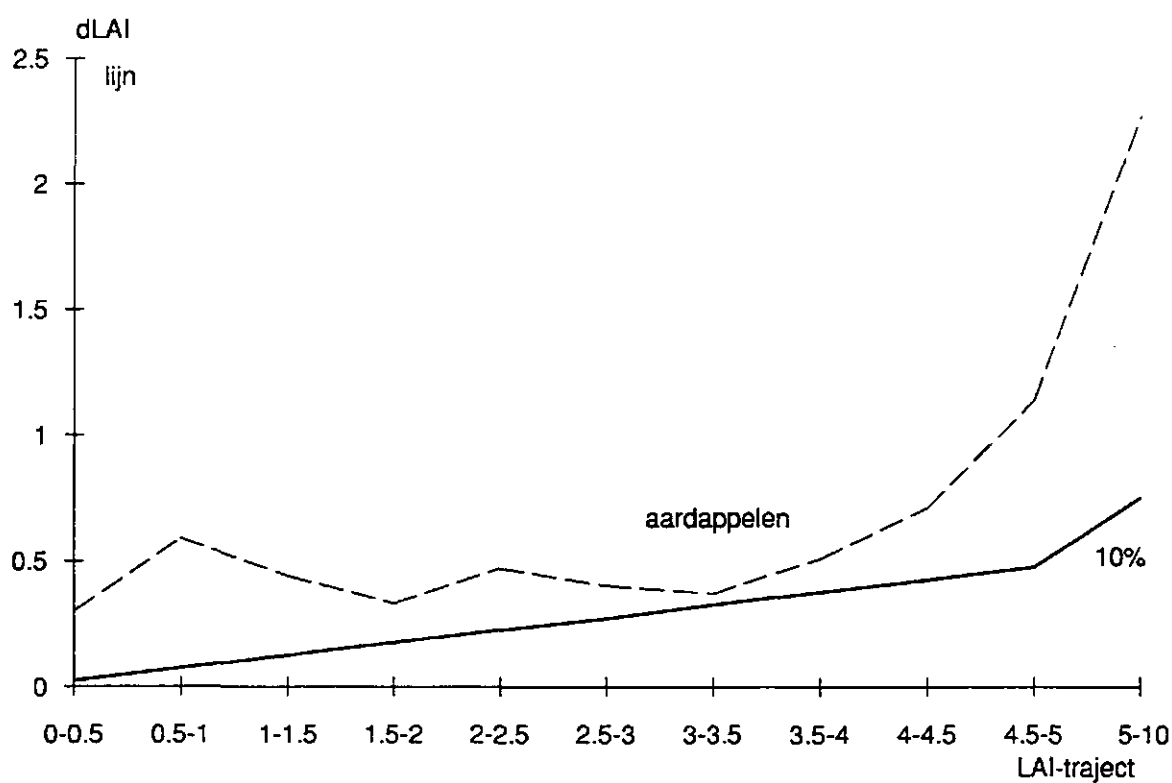
Figuur 17. LAI tegen WDV(groen) voor aardappelen uit alle beschikbare proeven (Tabel 2). De open symbolen (◊) geven de 'vroege' fase, en de dichte symbolen (◆) de 'late' fase weer. De getrokken lijn is de lineaire regressie (Tabel 5)



Figuur 18. LAI tegen WDVl(groen) voor gerst uit alle beschikbare proeven (Tabel 2). De open symbolen (◇) geven de vegetatieve fase, en de dichte symbolen (◆) de generatieve fase weer. De getrokken lijn is de lineaire regressie (Tabel 5)



Figuur 19. LAI tegen WDV(groen) voor tarwe en haver uit alle beschikbare proeven (Tabel 2). De open symbolen (\diamond) geven tarwe, en de dichte symbolen (\blacklozen) haver weer. De getrokken lijn is de lineaire regressie (Tabel 5)



Figuur 20. Gemiddelde afwijking $dLAI$ tussen LAI berekend uit $WDVI$ via lineaire regressie, en LAI gemeten in het veld voor aardappels (20a) en voor gerst, tarwe en haver (20b). De vette getrokken lijn geeft de fout van 10% die minimaal met de veldbepaling van LAI geassocieerd wordt geacht

Op grond van bovenstaande argumenten is tevens een strikt empirische relatie afgeleid tussen *LAI* en *WDVI*. Lineaire lijnsegmenten bleken de beste resultaten op te leveren (Figuren 17-19):

$$LAI = \alpha + \beta * WDVI \quad (5)$$

De resultaten van bovenstaande regressie zijn gegeven in Tabel 5, met tevens enige statistieken van de regressie-analyse.

*Tabel 5. Regressie coëfficiënten α en β voor de relatie tussen LAI en WDVI voor tarwe en haver en voor gerst: $LAI = \alpha + \beta * WDVI$, en enige statistische gegevens van de regressie analyse: standaard fout van de regressie coëfficiënten, σ , % verklaarde variantie, en aantal data N*

Aardappelen	α	$\sigma(\alpha)$	β	$\sigma(\beta)$	%var	N
0 < <i>WDVI</i> < 29	-	-	0.048	0.003	68.8	75
<i>WDVI</i> > 29	- 0.867	0.401	0.091	0.009	56.7	72
Gerst	α	$\sigma(\alpha)$	β	$\sigma(\beta)$	%var	N
0 < <i>WDVI</i> < 26	-	-	0.045	0.001	76.8	107
26 < <i>WDVI</i> < 43	- 4.150	-0.429	0.201	0.013	62.8	110
<i>WDVI</i> > 43 *	-85.68	-	2.100	-	-	14
Tarwe, haver	α	$\sigma(\alpha)$	β	$\sigma(\beta)$	%var	N
0 < <i>WDVI</i> < 12	-	-	0.050	0.003	69.9	59
12 < <i>WDVI</i> < 38	- 1.030	0.253	0.134	0.008	65.3	136
<i>WDVI</i> > 38 *	-10.44	-	0.378	-	-	28

N.b: behalve voor de lijnsegmenten gemerkt met * zijn de gevonden coëfficiënten voor meer dan 0.995 significant. Voor de segmenten met * konden geen statistisch betrouwbare relaties worden afgeleid en zijn de gegeven lijnsegmenten visueel uit de Figuren 17-19 afgeleid

Met behulp van deze regressies is wederom uit alle *WDVI* data van de calibratie sets de *LAI* geschat en vergeleken met de werkelijke *LAI*. Voor aardappelen is een bovengrens van 7 aan de geschatte *LAI* gesteld, voor gerst van 10, en voor tarwe en haver van 7. De correlatie coëfficiënt r tussen *LAI* geschat uit *WDVI* en *LAI* werkelijk gemeten was 0.90 voor aardappelen, 0.92 voor gerst, 0.92 voor tarwe en 0.95 voor haver. Deze waarden zijn hoger dan die bij gebruikmaking van het semi-empirische model (4), (zie boven). De gemiddelde afwijking tussen *LAI* geschat uit *WDVI* en *LAI* gemeten is gegeven in Figuur 20. In vergelijking met Figuur 16 zijn de gemiddelde afwijkingen lager dan die bij gebruikmaking van het model. De *LAI* van aardappelen kan uit *WDVI* geschat worden tot *LAI* waarden van 4-

4.5 met een gemiddelde afwijking van de gemeten *LAI* van ≈ 0.5 . De *LAI* van de granen kan nauwkeurig uit *WDVI* geschat kan worden tot *LAI* waarden van ongeveer 4. De afwijking tussen *LAI* geschat uit *WDVI* en gemeten *LAI* is minder dan twee maal de minimale onnauwkeurigheid van de 'werkelijke' *LAI* meting.

7.3 Samenvatting standaardlijnen

De volgende standaardlijnen kunnen gebruikt worden om de bodembedekking en de *LAI* van aardappelen, bieten, gerst, tarwe en haver te berekenen uit reflectiemetingen (*WDVI*).

Bodembedekking

Aardappelen, 'vroeg' fase
 bedekking = $1.966 * WDVI$ (%)
 aardappelen, 'late fase'
 bedekking = $-8.050 + 2.285 * WDVI$ (%)

Bieten, gehele groeiseizoen
 bedekking = $2.052 * WDVI$ (%)

Gerst, tarwe en haver, vegetatieve fase
 bedekking = $2.308 * WDVI$ (%)

LAI

Aardappelen, gehele groeiseizoen
 $0 < WDVI < 29$: $LAI = 0.048 * WDVI$
 $WDVI > 29$: $LAI = -0.867 + 0.091 * WDVI$

Gerst, gehele groeiseizoen
 $0 < WDVI < 26$: $LAI = 0.045 * WDVI$
 $26 < WDVI < 43$: $LAI = -4.150 + 0.201 * WDVI$
 $WDVI > 43$: $LAI = -85.68 + 2.100 * WDVI$

Tarwe en haver, gehele groeiseizoen
 $0 < WDVI < 12$: $LAI = 0.050 * WDVI$
 $12 < WDVI < 38$: $LAI = -1.030 + 0.134 * WDVI$
 $WDVI > 38$: $LAI = -10.44 + 0.378 * WDVI$

Voor de berekeningen van bodembedekking moet een ondergrens van 0% en een bovengrens van 100% gesteld worden. Voor de berekeningen van *LAI* moet een ondergrens van 0 gesteld worden.

Omdat de gegeven standaardlijnen empirisch bepaald zijn is het geldigheidsgebied in principe beperkt tot dat gebied waarbinnen voldoende data in de 'calibratie' set aanwezig waren voor betrouwbare afleiding van de standaardlijnen. Voor bodembedekking is het geldigheidsgebied tussen 0% en 100% voor alle gewassen. Voor *LAI* is het geldigheidsgebied tussen 0 en ≈ 5

voor aardappelen en gerst, en tussen 0 en ≈ 7 voor tarwe en haver. Bij granen kunnen metingen aan het einde van het seizoen aan bruine, afgerijpte gewassen en aan stoppels niet gebruikt worden.

De gemiddelde, absolute afwijking tussen bodembedekking berekend uit *WDVI* en bepaald in het veld is in de grootte-orde van 5% voor aardappelen en bieten in het hele groeiseizoen, en loopt op van 4% aan het begin tot 12% aan het einde van de vegetatieve fase voor gerst, tarwe en haver. Deze afwijkingen, ofwel onnauwkeurigheden, zijn van dezelfde grootte-orde als de onnauwkeurigheden van de veldbepalingen (visuele schattingen, raster tellingen).

De gemiddelde, absolute afwijking tussen *LAI* berekend uit *WDVI* en bepaald in het laboratorium is in de grootte-orde van 0.5 tot *LAI* waarden van 4 voor aardappelen, en loopt op van ≈ 0.1 bij *LAI* waarden rond 0 tot ≈ 0.5 bij *LAI* waarden van 4 voor gerst, tarwe en haver. Op een relatieve schaal zijn deze afwijkingen in de orde van 20% (voor aardappelen wat groter bij lage *LAI* waarden), hetgeen vergeleken moet worden met een fout van 10-15% die met de 'lab-bepalingen' van *LAI* geassocieerd wordt geacht. Bij *LAI* waarden groter dan 4 neemt de afwijking tussen *LAI* berekend uit *WDVI* en bepaald in het laboratorium snel toe voor alle gewassen.

De gegeven standaardlijnen bleken stabiel bij grote verschillen in gebruikte rassen, bodemtypes en groei-omstandigheden (van zwaar gestressed tot haast potentiële produktie). Deze standaardlijnen kunnen daarom gebruikt worden voor de bepaling van bodembedekking en *LAI* op haast elke locatie in Nederland (en buiten Nederland, met vergelijkbare bodemtypes). Bodemtypes die niet bij de afleiding van de standaardlijnen betrokken zijn geweest, en waar gebruikers zelf eerst nieuwe regressielijnen voor moeten bepalen zijn b.v. veen en sterk kalkhoudende (lichtgekleurde) bodems (b.v. voorkomend in Z-Limburg). In de tropen en (semi-)aride gebieden is bekend dat sterk gipshoudende bodems een afwijkend reflectiegedrag vertonen. Ook voor deze bodemtypes kan echter blijken dat dezelfde standaardlijnen gelden.

Referenties

- Boer, Th. de, B.A.M. Bouman, H.W.J. van Kasteren, B.E. Pengel, N.J.J. Bunnik & W. Verhoef, 1988. The 'Heiligenschijn' reflectance meter, Active hot-spot reflectance compared with passive reflectance from crop canopies for the determination of crop parameters. *CABO rapport 78*, CABO-DLO, Wageningen.
- Bouman, B.A.M., 1991. Linking X-band radar backscattering and optical reflectance with crop growth models. *Proefschrift Landbouw Universiteit Wageningen*, Landbouw Universiteit, Wageningen.
- Bunnik, N.J.J., 1978. The multispectral reflectance of shortwave radiation by agricultural crops in relation with their morphological and optical properties. *Proefschrift Landbouw Universiteit Wageningen*, Landbouw Universiteit, Wageningen.
- Clevers, J.G.P.W., 1988. The derivation of a simplified reflectance model for the estimation of leaf area index. *Remote Sensing of Environment 25*: 53-69.
- Clevers, J.G.P.W., 1989. The application of a weighted infra-red vegetation index for estimating leaf area index by correcting for soil moisture. *Remote Sensing of Environment 29*: 25-37.
- Ham, R.A.M. van, 1981. Metingen met een biomassameter. *Stageverslag CABO*, CABO-DLO, Wageningen.
- Haverkort, A.J.D., D. Uenk, H. Veroude & M. van der Waart, 1991. Radiation interception by potato canopy, Relationships between ground cover, intercepted solar radiation, leaf area index and infrared reflectance of potato crops. *Potato research 34*: 113-121.
- Kasteren, H.W.J. van, & D. Uenk, 1975. Spectrale reflectie van enige landbouwgewassen in relatie tot hun aard en structurele opbouw. *NIWARS publicatie no 32*, Meetkundige Dienst, Rijkswaterstaat, Delft.
- Kasteren, H.W.J. van, 1981. A spectrometer to determine soil coverage and biomass in situ. In: *Ist International Colloquium on Spectral Signatures in Remote Sensing (ISP-INRA)*, *Proceedings*: 125-132, INRA Publications Division, Versailles, Frankrijk.
- Jordan, C.F., 1969. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology 50*: 663-666.
- Richardson, A.J., & C.L. Wiegand, 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 43*: 1541-1552.
- Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell & D.W. Deering, 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: *Third ERTS Symposium*, *NASA SP-351*: 309-317, NASA, Washington D.C., Amerika.

Skye Instruments. Cropscan users manual (*Skye Instruments Ltd, Llandrindrod Wells, Powys, UK*).

Uenk, D., 1982. Bepaling van grondbedekking en biomassa met behulp van een reflectiometer. *CABO-verslag nr.41*, CABO-DLO, Wageningen.

Ven, G. van de, 1982. Het meten van gewasreflecties met de CABO gewasreflectiometer. *Stageverslag CABO*, CABO-DLO, Wageningen.