

februari 2012

rapport 1454.N.11

Ontwikkeling van beslissingsondersteunende systemen voor het bijmesten van gewassen

Toepassingsmogelijkheden van
gewassensoren in de Nederlandse
precisielandbouw: een
literatuurstudie

G.H. Ros

D.W. Bussink

nutriënten management instituut nmi bv
postbus 250
6700 ag wageningen
binnenhaven 5
6709 pd wageningen
tel. (088) 876 12 80
fax (088) 876 12 81
e-mail nmi@nmi-agro.nl
internet www.nmi-agro.nl

© 2012 Wageningen, Nutriënten Management Instituut NMI B.V.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit de inhoud mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de directie van Nutriënten Management Instituut NMI.

Rapporten van NMI dienen in eerste instantie ter informatie van de opdrachtgever. Over uitgebrachte rapporten, of delen daarvan, mag door de opdrachtgever slechts met vermelding van de naam van NMI worden gepubliceerd. Ieder ander gebruik (daaronder begrepen reclame-uitingen en integrale publicatie van uitgebrachte rapporten) is niet toegestaan zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van NMI.

Disclaimer

Nutriënten Management Instituut NMI stelt zich niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen voortvloeiend uit het gebruik van door of namens NMI verstrekte onderzoeksresultaten en/of adviezen.

Verspreiding

PPL Programmamanagement
BLGG AgroXpertus

Inhoud

	pagina
Samenvatting en conclusies	3
1 Inleiding en achtergrond	5
2 Theoretische achtergronden crop sensing	7
2.1 Gewasreflectie en golflengte	7
2.2 Crop sensing: gewasgroei en nutriëntenopname	8
2.3 Crop sensing: enkele technische aspecten	10
2.3.1 Schaalniveau en resolutie	10
2.3.2 Verzadiging van sensors	11
2.3.3 Wat zegt de gewasreflectie over chemische gewaseigenschappen?	12
2.3.4 Opschaling van blad of plant naar gewas	14
2.3.5 Versterking plant signaal: gebruik van indexen	14
3 Overzicht van <i>sensing</i> systemen in Nederland	19
3.1 Inleiding	19
3.2 CropCircle	19
3.2.1 Technische gegevens	19
3.2.2 Ontwikkeld algoritme voor N-advies	20
3.3 Yara N-sensor	21
3.3.1 Technische gegevens	21
3.3.2 Ontwikkeld algoritme voor N-advies	21
3.4 Greenseeker	22
3.4.1 Technische gegevens	22
3.4.2 Ontwikkeld algoritme voor N-advies	23
3.5 SPAD meter	24
3.5.1 Technische gegevens	24
3.5.2 Ontwikkeld algoritme voor N-advies	24
3.6 Fieldspec (ASD)	25
3.6.1 Technische gegevens	25
3.6.2 Ontwikkeld algoritme voor N-advies	26
3.7 Fritzmeier	26
3.7.1 Technische gegevens	26
3.7.2 Ontwikkeld algoritme voor N-advies	26
3.8 CropScan	27
3.8.1 Technische gegevens	27
3.8.2 Ontwikkeld algoritme voor N-advies	27
3.9 Terrasphere	28
3.10 MijnAkker	28
3.11 Vergelijking	28
4 Crop sensing: gewasgroei en nutriëntentekorten	33
4.1 Inleiding	33
4.2 Crop sensing: biomassa en gewasontwikkeling	33
4.3 Crop sensing: stikstofgehalte en -opname	34
4.3.1 Inleiding	34

4.3.2	Bruikbaarheid sensoren en gewasindexen	34
4.3.3	Enkele randvoorwaarden en aanvullende opmerkingen	35
4.3.4	Vergelijking commerciële sensoren	36
4.4	Crop sensing: fosfaatgehalte en -opname	37
4.4.1	Inleiding	37
4.4.2	Gebruikte studies	38
4.4.3	Bruikbaarheid sensoren en vegetatie indexen	39
4.5	Crop sensing: kaliumgehalte en -opname	40
4.5.1	Inleiding	40
4.5.2	Gebruikte studies	40
4.5.3	Bruikbaarheid sensoren en vegetatie indexen	41
4.6	Crop sensing: overige nutriënten	41
4.7	Hard fruit	42
5	Conclusies & Aanbevelingen	43
5.1	Inleiding	43
5.2	Schatting van gewasontwikkeling	43
5.3	Actuele gewasopname van essentiële nutriënten	43
5.4	Bruikbaarheid gewasindexen	44
5.5	Toepassing in welke gronden	44
5.6	Perspectieven	45
5.7	Praktische aanbevelingen	45
5.8	Wat betekent dit voor deel 2 van dit project?	47
6	Gebruikte literatuur	49
7	Bijlagen	59

Samenvatting en conclusies

Met de ontwikkeling van GPS en gewassensoren zijn de mogelijkheden voor precisie landbouw sterk toegenomen. Verschillen in gewasreflectie kunnen gebruikt worden om stressfactoren op te sporen en creëren mogelijkheden om het gewas plaats specifiek te behandelen. De aanwezigheid van stressfactoren zoals water- en nutriënttekorten zijn namelijk zichtbaar in een hogere reflectie in het zichtbare deel van het spectrum en een verschuiving van de zogenoemde 'Red Edge' (de overgang van het visuele naar het nabij-infrarode spectrum, rond ca. 720 nm). Analyse van het gewasspectrum kan gebeuren via diverse sensoren die variëren in de hoeveelheid spectrale banden, de gebruikte ruiscorrecties en de aanbevolen gewas-sensor afstand. De relatie tussen gewasspectra en gewasontwikkeling of nutriëntgehalten wordt vaak beschreven via statistische of modelmatige methoden.

Deze studie beschrijft de technische achtergronden en toepassingsmogelijkheden van de volgende (commerciële) sensoren: CropCircle (vanaf 2010 ook beschikbaar onder de naam OptRx), GreenSeeker, Spadmeter, Fieldspec (ASD), YARA N-sensor, Fritzmeier ISARIA, CropScan en de satellietbeelden geleverd door Terrasphere en MijnAkker. Het uitgevoerde literatuuronderzoek geeft een antwoord op de vraag of en op welke manier sensoren, satellieten en gewasindexen bruikbaar zijn voor de schatting van de actuele gewasontwikkeling en de gewasopname van essentiële nutriënten (N, P, K);

Gewasindexen worden gebruikt om gewassensoren extra gevoelig te maken voor variatie in gewaseigenschappen. Er zijn drie soorten gewasindexen: de ratio -, orthogonale -, en hybride gewasindexen. De bruikbaarheid van deze indexen hangt samen met de hoeveelheid biomassa en de variatie in bodemreflectie door bijvoorbeeld organische stof en vocht.

Evaluatie sensoren

Alle onderzochte sensoren zijn in staat om de gewasontwikkeling te volgen door het analyseren van het reflectiespectrum. Doordat bodem en gewas beide verschillend reflecteren in het VIS en NIR deel van het spectrum kan deze informatie gebruikt worden om de hoeveelheid biomassa in te schatten. Dit is vrijwel voor alle gewassen mogelijk. In deze studie is dat aangetoond voor onder andere aardappel, wintertarwe, maïs, granen, gerst, grasland, soja, bieten en koolzaad. De wereldwijde focus ligt bij granen, maïs en aardappel. Belangrijk: de gepubliceerde relaties tussen gewasspectra en biomassa zijn gewas-, sensor-, en mogelijk locatiespecifiek.

Een keuze voor één of meerdere sensoren kan gemaakt worden op basis van de technische specificaties, de economische rendabiliteit en de gebruikersvriendelijkheid. Sensoren die gebruik maken van meerdere banden en een actieve lichtbron hebben een relatief voordeel boven sensoren met weinig banden en geen actieve lichtbron.

Deze studie beperkt zich tot de opname van stikstof, fosfaat en kalium. Voor stikstof, over het algemeen het meest limiterende nutriënt in Westerse landbouwsystemen, is het goed mogelijk om een inschatting te geven van het gehalte en de opname. Vrijwel alle onderzochte studies (n=73) vonden een sterk tot zeer sterk verband tussen het geanalyseerde reflectiespectrum en het chlorofylgehalte, het N-gehalte en de N-opname. De meest onderzochte gewassen zijn granen, maïs en aardappels. Een kritische blik van de gebruiker blijft noodzakelijk omdat alle sensoren de invloed van andere stressfactoren negeren. Concreet gaat het hierbij om vochtgehalte, andere nutriëntentekorten (vooral zwavel), ziekten en plagen.

De bruikbaarheid van de verschillende sensoren is vergelijkbaar in die zin dat ze allemaal in staat zijn om een inschatting te geven van het N-gehalte en de N-opname van een gewas. Met uitzondering van Mijnakker maken alle sensoren voornamelijk gebruik van statistische relaties. Dit zorgt ervoor dat de geproduceerde gewasindexen en afgeleide N-adviezen niet algemeen geldend zijn. Kalibratie op het perceel is daarom aan te bevelen; vrijwel alle commerciële *near sensing* sensoren geven daarvoor de mogelijkheid.

Verschillen in P-status hebben een meetbare invloed op het gewasspectrum. Dit biedt mogelijkheden om via *crop sensing* te bepalen of een gewas in het begin van het groeiseizoen P-tekorten aanwezig zijn. De gepubliceerde resultaten (n=21 studies) zijn niet compleet en betrouwbaar genoeg om hierover al een conclusie te kunnen trekken. Uitgebreid veldwerk moet duidelijk maken of het detecteren van P-tekorten in het voorjaar inderdaad mogelijk is. De P-opname aan het einde van het seizoen is redelijk goed te schatten.

Verschillen in K-beschikbaarheid hebben geen tot weinig effect op het gewasspectrum en de veranderingen in reflectiespectra vertonen een grote overlap met stikstof (n=13 studies). Een betrouwbare schatting van het K-gehalte op basis van gewassensoren lijkt daarom niet mogelijk. Gebruik van de N/K-ratio leidt mogelijk tot betere resultaten.

Gebruik van PLS modellen of fysieke modellen lijkt tot betere inschattingen te leiden dan het gebruik van individuele golflengtes of een combinatie van golflengtes (zoals in een gewasindex). Sensoren die gebruik maken van hyper- of ultraspectrale banden hebben daarnaast een hogere potentie om verschillen in N en P te schatten dan breedband of multispectrale sensoren. De huidige commerciële sensoren hebben deze mogelijkheid (nog) niet.

Evaluatie gewasindexen

Er zijn honderden gewasindexen ontwikkeld in de afgelopen jaren om gewasontwikkeling (biomassa) of stikstofgehalte te schatten. Gebaseerd op de onderzochte studies is het niet mogelijk om een index te kiezen die voor elk gewas en onder alle omstandigheden het beste resultaat oplevert. Zelfs op gewasniveau is dat niet mogelijk. De meest gebruikte indexen zijn ratio indexen waarvan de NDVI de meest bekende is. Het is bekend dat deze indexen gevoelig zijn voor variatie in bodemreflectie bij lage LAI-waarden en voor verzadiging bij LAI waarden hoger dan 2.5-3.0. Simpele aanpassingen van de ratio index kunnen dit probleem verminderen, maar vaker wordt aanbevolen om gebruik te maken van orthogonale of hybride gewasindexen. In Nederland wordt daarom vaak gebruik gemaakt van de WDWI. Het nadeel van deze index is dat de gebruikte correctiefactor geen rekening houdt met variatie in vochtgehalte. De REP-index lijkt in vergelijking met NDVI en WDWI gevoeliger voor variaties in de hoeveelheid chlorofyl, en daarmee ook een betere schatter van N-opname en N-gehalte.

Toepassingsmogelijkheden

In Nederland worden gewassensoren nog niet breed toegepast. Om deze sensoren als een operationele techniek in de agrarische sector in te kunnen zetten, is het cruciaal om de betrouwbaarheid van bestaande algoritmes (die een vertaalslag maken van de gemeten gewasreflectie naar een locatiespecifiek bemestingsadvies) te testen of nieuwe algoritmes te ontwikkelen. Gebaseerd op deze literatuurstudie zijn een aantal aandachtspunten en randvoorwaarden beschreven die cruciaal zijn voor de verdere ontwikkeling, validatie en evaluatie van gewassensoren.

1 Inleiding en achtergrond

De landbouw in Nederland heeft zich de afgelopen decennia snel ontwikkeld en daarbij nemen nieuwe technieken om efficiënter en duurzamer te produceren een belangrijke plek in. Met de ontwikkeling van GPS en gewassensoren zijn de mogelijkheden voor precisie landbouw sterk toegenomen. Verschillen in gewasreflectie kunnen gebruikt worden om stressfactoren op te sporen en creëren mogelijkheden om het gewas plaatsspecifiek te behandelen.

De afgelopen 15 jaar zijn diverse commerciële producten op de markt gekomen die deze informatie toegankelijk maken voor agrariërs. Hierbij gaat het niet alleen om gewassensoren die handmatig of via de trekker aangestuurd worden, maar ook om metingen aangeleverd door satellieten. Bij verschillende producten is de gewasreflectie direct gekoppeld aan een stikstofadvies om tekorten in N-aanbod te verhelpen. In Nederland worden gewassensoren niet breed toegepast. Om deze sensoren als een operationele techniek in de huidige agrarische sector in te kunnen zetten moeten nog een aantal problemen worden opgelost:

- De beschikbaarheid van de juiste sensor informatie op het juiste moment is beperkt, vooral voor systemen die gebruik maken van satellietgegevens;
- De op dit moment beschikbare commerciële producten zijn meestal gebaseerd op een beperkt aantal sensoren, terwijl een combinatie nodig zal zijn om relevante processen in het bodem-plant systeem te identificeren. Bovendien is de communicatie tussen sensoren suboptimaal;
- De huidige algoritmes die ontwikkeld zijn om gewasgroei, gewasopbrengst en nutriëntenopname te schatten - en indien nodig te vertalen in concrete actiepunten - zijn nog matig ontwikkeld, vaak locatiespecifiek en niet toegepast op de wensen van de individuele landbouwer. De bestaande algoritmes zijn veelal in het buitenland ontwikkeld en het is onduidelijk of deze betrouwbaar genoeg zijn voor directe toepassing in Nederland. Bovendien zijn de huidige algoritmes alleen ontwikkeld voor stikstof en een beperkt aantal gewassen.

Recent onderzoek heeft laten zien dat niet alleen de N-opname van aardappelen maar ook die van prei en spruiten geschat kan worden via plantsensoren en satellieten. De verwachting is dat sensoren gebruikt kunnen worden voor meerdere gewassen. Verder zijn er indicaties in onderzoek van BLGG dat sensorresultaten ook gerelateerd kunnen worden aan andere plantnutriënten. Dit biedt mogelijkheden om het gebruik van sensoren bij andere gewassen en andere nutriënten te onderzoeken. De initiatiefnemers van dit onderzoek (PPL en de daarmee verbonden partijen) zijn dan ook van mening dat door gebruik van sensoren en/of satellieten de onderbouwing, ontwikkeling en toepassing van bijmestsystemen voor meer nutriënten en gewassen mogelijk is. Zij hebben vervolgens een ontwikkelverzoek geïnitieerd dat bestaat uit literatuuronderzoek (deel 1) en uitgebreide veldproeven (deel 2).

De doelstellingen voor dit project zijn:

- Er wordt een literatuuronderzoek uitgevoerd naar de bruikbaarheid en het gebruik van (verschillende typen van) sensoren, satellieten en vegetatie-indexen om daarmee bij meerdere gewassen de gewasontwikkeling en opname van nutriënten te schatten.
- Er wordt veldonderzoek op praktijkpercelen uitgevoerd (groei-eizoen 2012) om gegevens te verzamelen bij minimaal 10 perspectiefvolle gewassen en voor drie nutriënten (N, P en K). Daarbij wordt gebruik gemaakt van de bevindingen uit het literatuuronderzoek.

Het literatuuronderzoek moet een antwoord geven op de vraag of en op welke manier sensoren,

satellieten en gewasindexen bruikbaar zijn voor de schatting van:

- De actuele gewasontwikkeling;
- De actuele gewasopname van essentiële nutriënten (N, P, K);

Hierbij wordt speciaal gekeken naar de bruikbaarheid van de volgende gewasindexen: WDVl, NDVI, SR, GNDVI, OSAVI, NDRE en REP (voor een toelichting zie hoofdstuk 2). De sensoren/ satellieten die worden meegenomen in deze studie zijn: CropCircle (vanaf 2010 ook beschikbaar onder de naam OptRx), GreenSeeker, Spadmeter, FieldSpec (ASD), YARA N-sensor, Fritzmeier, Terrasphere en MijnAkker. Er wordt bovendien gekeken bij welke gewassen en gronden het gebruik van sensoren en/ of satellieten perspectiefvol is. De informatie uit deze literatuurstudie dient tevens als basis voor de uitvoering van de veldproef; het levert de nadere onderbouwing welke sensoren/ satellieten het meest kansrijk zijn en omschrijft de kaders waarbinnen het onderzoek relevante resultaten zal kunnen opleveren.

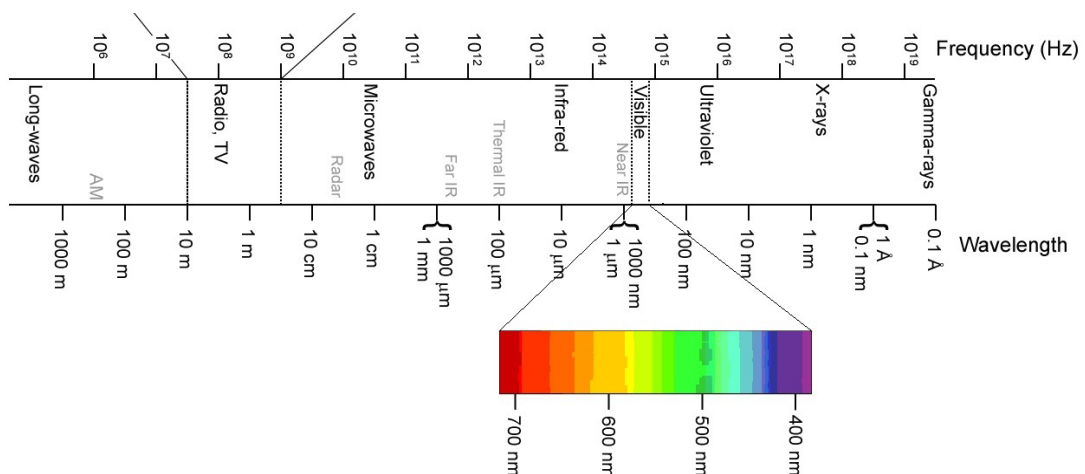
Dit rapport beschrijft de resultaten van de hierboven beschreven literatuurstudie. Na deze **inleiding** wordt in **Hoofdstuk twee** ingegaan op de theoretische achtergronden achter het gebruik van gewassensensoren. In dit hoofdstuk wordt tevens ingegaan op diverse technische aspecten die belangrijk zijn om de te bespreken sensoren goed te kunnen beoordelen; het gaat hierbij bijvoorbeeld om verzadiging, ruis, soorten gewasindexen, en het gebruik van statistische of modelmatige methoden om een link te leggen tussen gewasspectrum en gewasontwikkeling of gewasopname. In **Hoofdstuk drie** wordt een overzicht gegeven van de technische aspecten van de in Nederland aanwezige (en commercieel beschikbare) sensoren/satellieten. Hierbij wordt ook uitgebreid ingegaan op de ontwikkelde algoritmes die gebruikt worden om het reflectiesignaal te vertalen in een bemestingsadvies. In **Hoofdstuk vier** wordt een overzicht en analyse gegeven van de beschikbare wetenschappelijke informatie over de bruikbaarheid van gewassensensoren en gewasindexen om de gewasgroei en nutriëntenopname te schatten. In **Hoofdstuk vijf** worden de resultaten samengevat en worden concrete adviezen gegeven voor de opzet en uitvoering van het veldonderzoek.

2 Theoretische achtergronden crop sensing

Dit hoofdstuk beschrijft de theoretische achtergrond achter het gebruik van gewassensoren om een schatting te geven van gewasontwikkeling en nutriëntopname. Wanneer het lichtspectrum boven een beteeld perceel wordt geanalyseerd, kan dat informatie geven over de hoeveelheid biomassa en het chlorofylgehalte in het gewas. De aanwezigheid van stressfactoren zoals water- en nutriënttekorten zijn bovendien zichtbaar in een hogere reflectie in het zichtbare deel van het spectrum en een verschuiving van de zogenoemde 'Red Edge' (de overgang van het visuele naar het nabij-infrarode spectrum, rond ca 720 nm). Analyse van het gewasspectrum kan gebeuren via diverse sensoren die variëren in hoeveelheid spectrale banden, ruiscorrecties en gewas-sensor afstand. Veel sensoren kunnen last krijgen van verzadiging, een proces dat aangeeft dat bij een zekere hoeveelheid biomassa de sensoren ongevoelig zijn voor veranderingen in het chlorofylgehalte. De relatie tussen gewasspectra en gewasontwikkeling of nutriëntgehalten wordt vaak beschreven via statistische of modelmatige methoden. Beide methoden hebben hun eigen voor- en nadelen. Gewasindexen zijn ontwikkeld om de invloed van de reflectie vanuit de bodem te verminderen, waardoor de gewassensoren extra gevoelig zijn voor variatie in gewaseigenschappen. Er zijn drie soorten gewasindexen: de ratio -, orthogonale -, en hybride gewasindexen. De bruikbaarheid van deze indexen hangt samen met de hoeveelheid biomassa en de variatie in bodemreflectie door bijvoorbeeld organische stof en vocht.

2.1 Gewasreflectie en golflengte

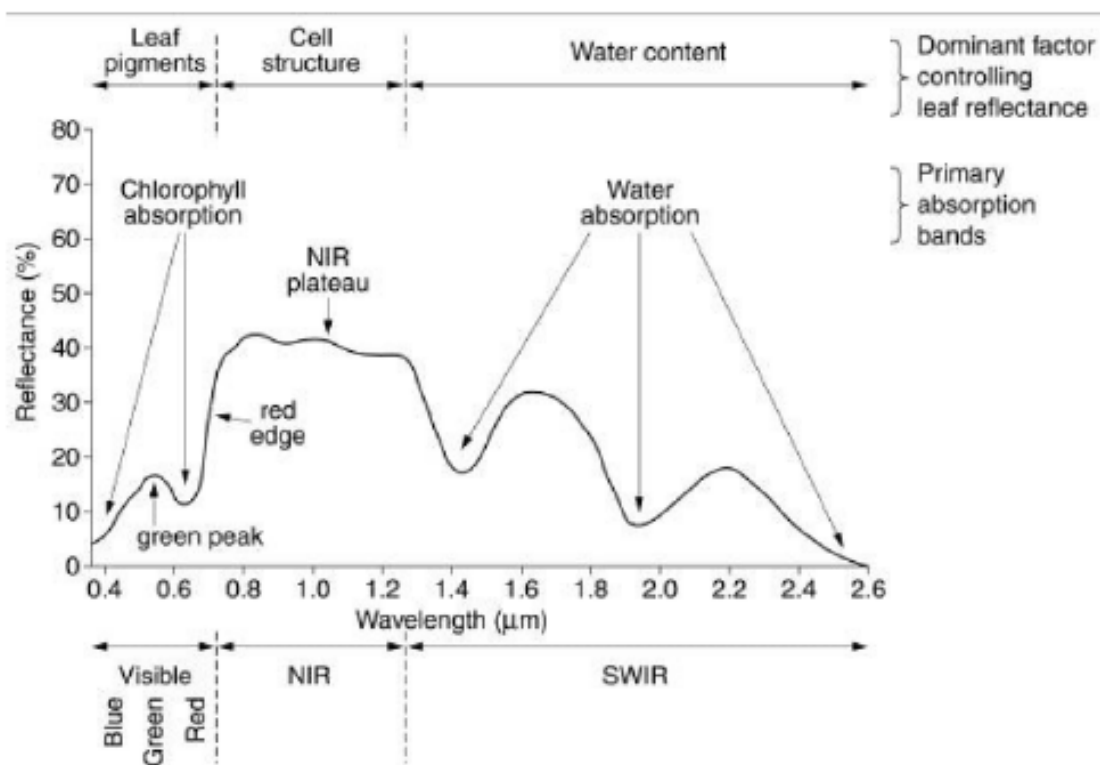
De laatste jaren zijn diverse sensoren ontwikkeld die gebruik maken van metingen van de gewasreflectie om een schatting te geven van de gezondheid en groei van een gewas. Al deze sensoren zijn gebaseerd op het principe dat de lichtreflectie door een gewas afhangt van de golflengte van het licht (Knipling, 1970). De huidige sensoren maken voornamelijk gebruik van het golflengtegebied tussen 400 en 2500 nm (Figuur 2.1). Dit gedeelte van het spectrum omvat het zichtbare deel (Visible Light ofwel VIS) en het NIR (Nabij Infrarood) deel van het spectrum.



Figuur 2.1. Het elektromagnetisch spectrum (aangepast van wikipedia.org).

Wanneer inkomend zonlicht in contact komt met een gewas kunnen er drie dingen gebeuren: het licht wordt geabsorbeerd, gereflecteerd, of getransmitteerd. In het zichtbare gedeelte van het spectrum (golflengte: 308-740 nm) is de reflectie van het licht relatief laag (Figuur 2): dit betekent dat het grootste gedeelte van het licht wordt geabsorbeerd. Deze absorptie vindt voornamelijk plaats in kleurstoffen die in het blad aanwezig zijn. Deze kleurstoffen (voornamelijk chlorofyl) zijn in staat om energie uit het lichtdeeltje te gebruiken voor de omzetting van water (fotosynthese). Omdat deze kleurstoffen voornamelijk het licht in het blauwe en rode gedeelte van het zichtbare spectrum absorberen, hebben planten de voor ons zichtbare groene kleur.

Licht uit het NIR deel van het spectrum kan worden omgezet in bewegingsenergie van de aanwezige O-H, C-H, en N-H bindingen. In het nabij infrarode deel van het spectrum (NIR) wordt maximaal 50% van het licht gereflecteerd (Figuur 2.2). Deze reflectie wordt veroorzaakt door lichtverstrooiing in het blad, ook wel scattering genoemd, door de daar aanwezige celstructuren (Knipling, 1970). Het overige deel van het invallende licht wordt getransmitteerd naar onderliggende gewaslagen; de absorptie is minder dan 10%. Bij toenemende golflengtes gaat het aanwezige water een grote rol spelen: een toenemende hoeveelheid van het invallende licht wordt geabsorbeerd en de reflectie daalt tot minder dan 5%.

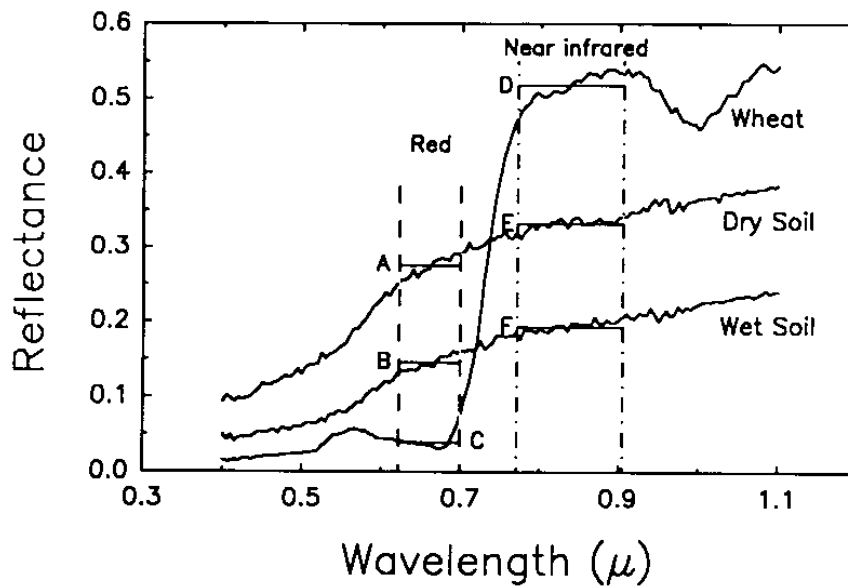


Figuur 2.2. Gewasreflectie van licht in relatie tot golflengte (in deze figuur wordt tevens onderscheid gemaakt tussen NIR en SWIR, maar beide klassen vallen onder nabij infrarood; Bron: wikipedia.org)

2.2 Crop sensing: gewasgroei en nutriëntenopname

Analyse van de gewasreflectie kan informatie geven over gewasgroei en gewasontwikkeling. Dit komt omdat het gewas een ander reflectiepatroon heeft dan de bodem. Een typisch reflectiespectrum voor een bodem en een gewas is weergegeven in Figuur 2.3. De reflectie van een bodem neemt geleidelijk toe met de golflengte, terwijl de reflectie van een gewas een kenmerkende sprong laat zien rond 700

nm. Door gebruik te maken van dit verschil tussen bodem en gewas is het mogelijk om een schatting te maken van de hoeveelheid biomassa. Voor de praktijk betekent dit dat het mogelijk is om de gewasgroei gedurende het groeiseizoen te monitoren.



Figuur 2.3. Typische gewasspectra voor vegetatie en bodem (Bron: Bullock, 2001)

Sinds de jaren '70 is crop sensing intensief gebruikt om een indicatie te geven van gewasparameters.

De belangrijkste parameters zijn:

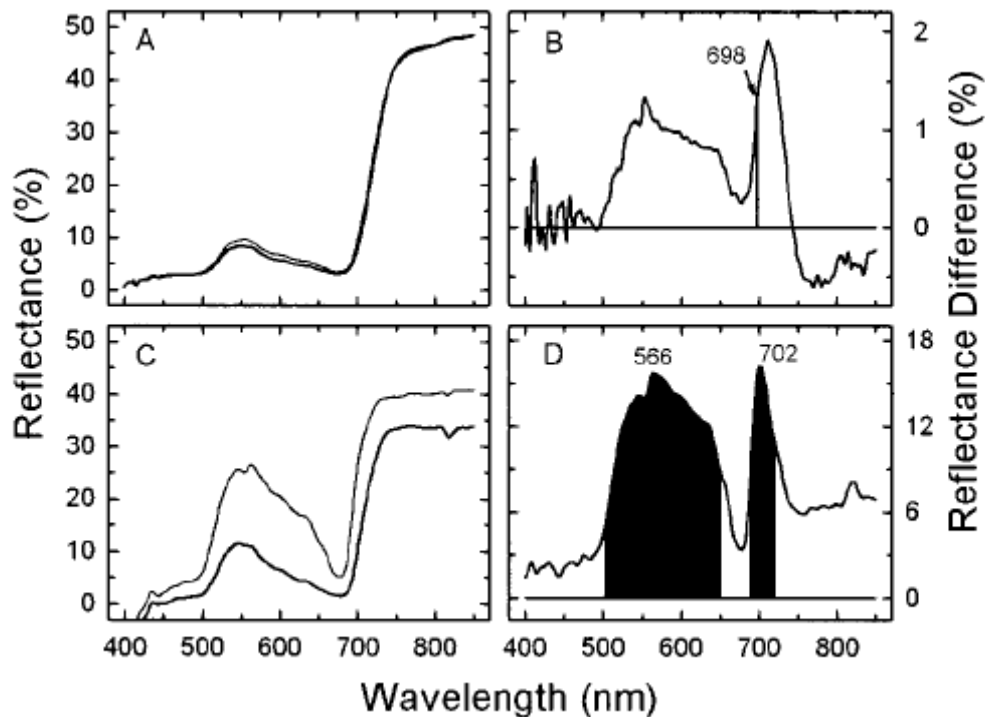
- de hoeveelheid bodembedekkend plantoppervlak (Leaf Area Index; LAI). De LAI geeft een indicatie van de hoeveelheid blad dat beschikbaar is voor fotosynthese, en is een sleutelvariabele om evaporatie, biomassa, opbrengst en opbrengstverliezen in kaart te brengen.
- de relatieve hoeveelheid bodembedekt plantoppervlak (fractional cover; fCOVER). De fCOVER wordt vaak gebruikt om bodemgerelateerde processen te onderscheiden van vegetatie gerelateerde processen zoals de hoeveelheid evapotranspiratie.
- de relatieve hoeveelheid geabsorbeerde straling (fraction photosynthetically active radiation adsorbed by the canopy; fAPAR). De variabele fAPAR is direct gerelateerd aan de hoeveelheid LAI, het chlorofylgehalte en de morfologie van het gewas.
- het chlorofylgehalte. Het chlorofylgehalte is voor dit onderzoek de meest belangrijke parameter omdat het een indicatie geeft van de fotosynthetische activiteit. Het is bovendien sterk gerelateerd aan het N-gehalte en daarom een gevoelige indicator voor N-tekorten.

Analyse van het gewasspectrum geeft ook informatie over het type gewas en de aanwezigheid van stress factoren die de groei van het gewas negatief beïnvloeden. Elk gewas heeft namelijk zijn eigen bladkenmerken en morfologie, waardoor het een karakteristiek reflectiepatroon zal laten zien. De detectie van stressfactoren is mogelijk omdat een plant onder stresscondities een ander reflectiepatroon laat zien dan een plant onder gezonde condities (Carter & Knapp, 2001).

- Kwalitatief: Als het chlorofyl wordt afgebroken (in een stress conditie) zal het minder efficiënt VIS licht absorberen en meer reflecteren. Veranderingen in het NIR spectrum zijn variabel en hangen samen met het type stressfactor.
- Kwantitatief: de aanwezigheid van stressfactoren zoals ziekte, nutriëntentekort, plagen, water

tekort en zoutschade is vaak een oorzaak van achterblijvende groei of bladverlies: er is een verschil zichtbaar in het plantbedekt oppervlak en plantdichtheid.

In Figuur 2.4 wordt ter illustratie voor twee verschillende vegetaties aangegeven hoe een stressfactor het reflectiespectrum kan veranderen. In het linkerdeel van het figuur staan de gemeten spectra over een golflengtebereik van 400 tot 850 nm, terwijl in het rechter deel het verschil tussen een gezonde plant en een plant onder stresscondities wordt weergegeven (de twee spectra zijn van elkaar afgetrokken). Duidelijk zichtbaar is een toename van gewasreflectie, voornamelijk rond 560 en 700 nm.



Figuur 2.4. Typische effecten van stressfactoren op reflectiespectrum (Bron: Carter, 2001).

Door gebruik te maken van deze optische eigenschappen van gewassen zijn de laatste decennia verschillende commerciële producten op de markt gebracht die het mogelijk maken om locatie specifiek stikstof te bemesten. De bruikbaarheid van deze sensoren wordt geëvalueerd in Hoofdstuk 3 en 4.

2.3 Crop sensing: enkele technische aspecten

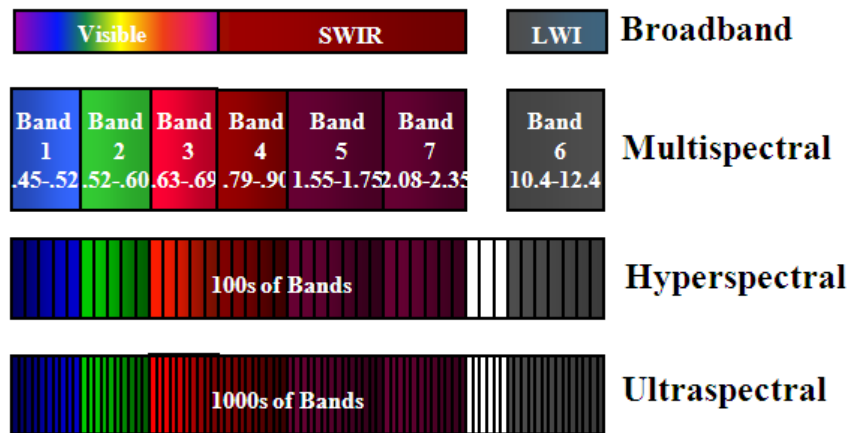
2.3.1 Schaalniveau en resolutie

Crop sensing kan op verschillende schaalniveaus plaatsvinden. Aan de ene kant zijn er sensoren ontwikkeld die de reflectie van één blad meten (bijvoorbeeld SPAD-meter). Andere sensoren meten de reflectie van een gewas vanaf bijvoorbeeld een trekker of nabijgelegen toren of stelling (*near sensing*). Aan de andere kant kan het gewassignaal worden gemeten via vliegtuigjes of satellieten (*remote sensing*).

Ten opzichte van *remote sensing* heeft *near sensing* een aantal praktische voordelen: het heeft geen last van wolken, een hogere resolutie (centimeters in plaats van meters), en de gebruiker kan de sensor op elk gewenst tijdstip gebruiken. Relatieve nadelen zijn de hoge investering die nodig is om de

apparatuur aan te schaffen, een beperkt meetoppervlak (1-2 m²), een beperkt aantal banden waarbinnen de reflectie gemeten wordt, en de dataprocessing is vaak nog niet geautomatiseerd.

Satellieten, gewassensensoren en handmatige spectraradiometers meten de lichtreflectie over een bepaald golflengtegebied gebruik makend van spectrale banden (Figuur 2.5). De nauwkeurigheid en informatiedichtheid van het gemeten signaal hangt samen met de hoeveelheid banden die gebruikt zijn. De nauwkeurigheid en informatiedichtheid nemen toe van breedband naar ultraspectrale sensoren.



Figuur 2.5. Visualisatie van banden waarmee gewasreflectie kan worden gemeten. De informatie inhoud van het gereflecteerde licht neemt toe met de resolutie (Bron: wikipedia.org).

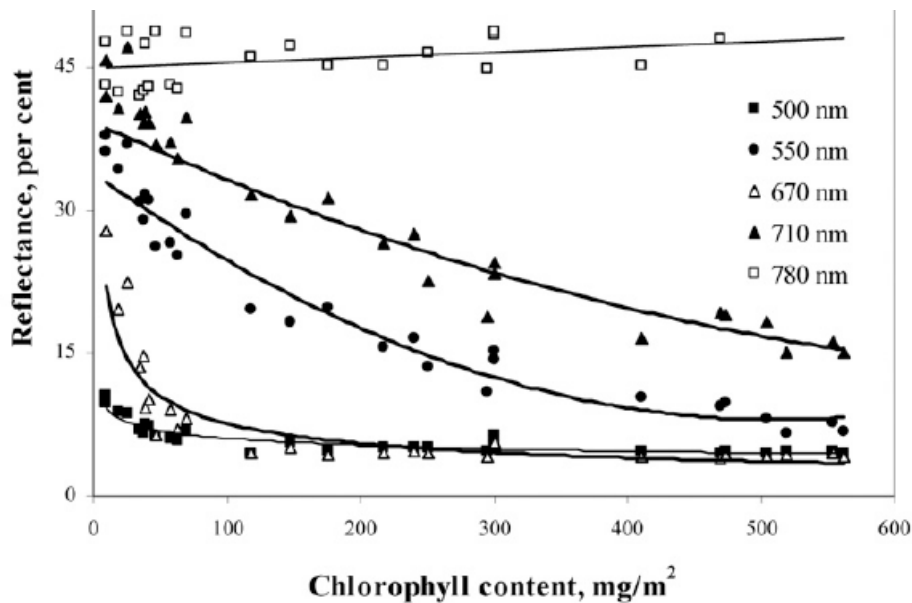
Veel van de huidige satellieten maken gebruik van breedband sensoren. Ter illustratie, de Landsat satelliet maakt beelden via 7 banden: drie in het VIS spectrum, drie in het NIR spectrum en één in het IR spectrum. De bandbreedte ligt rond 40-100 nm. Gewassensensoren maken overwegend gebruik van multispectrale banden. Zo meet de CropCircle ACS-430 de gewasreflectie via drie banden: op 670, 730 en 775 nm. De bandbreedte is voor elk van deze drie banden ongeveer 10-20 nm.

Sensorenfabrikanten kunnen één of meerdere banden (met gelijke of verschillende breedte) verwerken in hun sensoren: hoe meer banden, hoe meer indexen er mee berekend kunnen worden. Door technische verbeteringen is de resolutie van reflectiescanners afgelopen jaren sterk verbeterd en huidige spectraradiometers kunnen over het hele golflengtegebied de reflectie meten met een bandbreedte van < 2 nm. Bij commerciële sensoren is dat echter nog niet het geval. In het algemeen geldt: hoe meer banden er gebruikt worden en hoe kleiner de bandbreedte, hoe hoger de 'informatie-inhoud' in het reflectie signaal.

2.3.2 Verzadiging van sensors

Gewassensensoren kunnen in bepaalde gedeelten van het spectrum last krijgen van 'verzadiging'. Binnen het kader van dit onderzoek gaat het daarbij specifiek om het blauwrode deel van het spectrum dat gerelateerd is aan de hoeveelheid chlorofyl (of biomassa). Chlorofyl heeft namelijk een hoog absorptievermogen in het blauwrode deel van het spectrum; een kleine hoeveelheid chlorofyl is al voldoende om maximale absorptie te bereiken. Een verandering in het chlorofylgehalte heeft dan geen of weinig effect op de hoeveelheid gereflecteerd licht (Figuur 2.6, bijvoorbeeld bij de golflengtes 500 en 780 nm). Dit heeft als consequentie dat een inschatting van het N-gehalte onbetrouwbaar wordt bij een hoge plantdichtheid (als gebruik wordt gemaakt van golflengtes die snel verzadigd raken). Het is daarom

cruciaal om sensoren uit te rusten met banden die ook gevoelig zijn voor variatie bij hogere chlorofylwaarden.



Figuur 2.6. Gewasreflectie in blauw, groen, rood, grens rood, en NIR bij toenemend chlorofylgehalte

2.3.3 Wat zegt de gewasreflectie over chemische gewaseigenschappen?

Het is niet mogelijk om de reflectie van één bepaalde golflengte of band te gebruiken als maat voor de N, P, of K concentratie in het blad (Curran, 1989). Hiervoor zijn verschillende oorzaken:

- Scattering van licht zorgt ervoor dat meerdere soorten moleculen energie absorberen bij één invallende golflengte;
- Overeenkomsten in moleculaire structuren zorgen ervoor dat verschillende soorten moleculen energie absorberen bij dezelfde invallende golflengtes; er is daarom geen unieke relatie tussen één golflengte en één bepaalde nutriënt;
- Sterke interferentie met watermoleculen zorgt voor meetfouten, in het bijzonder bij golflengtes groter dan 1940 nm;
- Er kan verzadiging optreden bij relatief lage concentraties. Het gereflecteerde signaal wordt dan nauwelijks beïnvloed door het nutriëntgehalte in het blad.

Dit betekent dat er altijd een indirecte relatie zal zijn tussen het gemeten reflectiespectrum en de te schatten parameter (N, P, of K). Er worden twee verschillende benaderingen gebruikt om fysische en chemische gewaseigenschappen te relateren aan reflectiespectra: 1) statistisch – empirische en 2) modelmatige methoden.

Statistische empirische methode

Statistische – empirische methoden zoeken naar een statistisch verband tussen de gemeten fysische of chemische eigenschappen van een gewas en het gemeten reflectiespectrum. Om deze relatie te leggen, moet in het lab of in het veld beide variabelen gemeten worden onder uiteenlopende condities. De betrouwbaarheid en toepasbaarheid van de gevonden relaties is daarmee sterk afhankelijk van de gebruikte condities en de nauwkeurigheid van de analyses (Sims & Gamon, 2002). Traditioneel wordt gebruik gemaakt van (simple of multiple) regressietechnieken. Sinds kort is er echter steeds meer aandacht voor meer verfijnde statistische analyses die gebruik maken van multivariate PLS modellen. In

tegenstelling tot de meer traditionele statistiek hebben deze analyses minder last van inter-correlaties en zijn er meer mogelijkheden om niet - lineaire verbanden mee te nemen in de analyse.

Modelmatige methode

De modelmatige benadering maakt gebruik van gewasmodellen waarbij de interactie tussen straling en gewaseigenschappen (morfologie, chemische kenmerken) wordt gemodelleerd op basis van natuurkundige modellen en rekenregels. De output van deze modellen is een gewasspectrum. Door de parameters van het model aan te passen is het mogelijk om het gemeten gewasspectrum te benaderen met het gemodelleerde spectrum. Wanneer het gemeten en gemodelleerde spectrum overeenkomen, kunnen de geschatte modelparameters (bijvoorbeeld gewasontwikkeling, chlorofylgehalte, nutriëntgehalte, etc.) worden gebruikt als schatter van de werkelijke gewasparameters.

Vergelijking statistische en modelmatige methode

Beide benaderingen hebben zo hun eigen voor- en nadelen. Een overzicht hiervan is weergegeven in Tabel 2.1, gebaseerd op de literatuurstudie uitgevoerd door Dorigo et al. (2007).

Tabel 2.1. Vergelijking van de statistisch – empirische en modelmatige methode (Dorigo et al., 2007)

Statistische – empirische methode	Modelmatige methode
Uitgebreid veldwerk noodzakelijk voor kalibratie en validatie	Veldwerk alleen nodig voor validatie
Gewasspectrum wordt vaak getransformeerd	Originele gemeten spectra kan gebruikt worden
Gevonden relaties vaak gebaseerd op beperkt aantal golflengtes (bandbreedtes)	Geschatte gewaseigenschappen gebaseerd op het gehele spectrum
Verschillende relaties moeten separaat worden getest (elke gewaseigenschap vereist een eigen relatie)	Verschillende gewaseigenschappen komen als output uit het model
Interactie tussen variabelen wordt beperkt meegenomen	Mogelijk om prior informatie over verschillende gewaseigenschappen mee te nemen in het model
Eenvoudig te gebruiken	Vraagt veel rekenkracht
Relaties afhankelijk van sensor en meettechniek (hoogte, meethoek)	Afhankelijkheid van sensor en meettechniek kan worden gemodelleerd (hoogte, meethoek)
Vraagt weinig gebruikerskennis	Vereist kennis over het te gebruiken model en parameterisatie technieken

De statistisch – empirische benadering is eenvoudig, vraagt weinig rekenkracht (belangrijk voor praktische toepassingen) en kennis van de gebruiker. Echter, de resultaten zijn niet noodzakelijk gebaseerd op causale verbanden en daarom vaak beperkt toepasbaar. De gekalibreerde relaties zijn afhankelijk van

- gewaseigenschappen (gewastype, groeistadium, geometrie),
- bodemeigenschappen (textuur, organische stof, mineralogie, etc.),
- sensoreigenschappen (bandbreedte, nauwkeurigheid, meethoogte en meethoek), en
- locale omgevingsfactoren (vochtgehalte, temperatuur).

Dit betekent dat geobserveerde relaties een beperkt geldigheidsbereik hebben, tenzij zij uitgebreid zijn getest onder verschillende condities. Concreet betekent dit ook dat een advies dat ontwikkeld is voor regio A minder accuraat is wanneer het wordt toegepast in regio B.

De modelmatige benadering geeft een mechanistisch onderbouwde relatie weer tussen het gemeten spectrum en de geschatte gewaseigenschappen. De uitkomst van deze modellen zijn breed toepasbaar en uitgebreid veldwerk voor kalibratie is niet nodig. Echter, deze aanpak vereist vaak veel rekenkracht en kennisinput van de gebruiker. Een gedetailleerde analyse van de modelbenadering valt buiten het kader van deze studie.

2.3.4 Opschaling van blad of plant naar gewas

Het licht dat gereflecteerd wordt door een gewas wordt niet alleen bepaald door de fysische en chemische eigenschappen van het blad. Allereerst is er de invloed van de gewasstructuur: de gewasmorfologie (hellingshoek, aantal bladlagen, etc.) en bladdichtheid bepalen hoeveel en welk licht er wordt gereflecteerd. Andere factoren die ook het reflectiespectrum beïnvloeden zijn (Knipling, 1970; Dorigo et al., 2007):

- atmosferische verstrooiing, en daarmee samenhangend
- de positie (afstand, hellingshoek) van de sensor ten opzichte van het gewas,
- de hoeveelheid vegetatie per oppervlak, en daarmee samenhangend
- de achtergrondstraling vanuit de bodem.

De optische eigenschappen van het gewas hebben het grootste effect op het gereflecteerde spectrum (Dorigo et al., 2007), in ieder geval in het zichtbare deel van het spectrum. De reflectie vanuit de bodem hangt samen met fysische en chemische bodemeigenschappen als ruwheid, mineralogie en organische stofgehalte. Daarnaast is het vochtgehalte in de bodem erg belangrijk. De hoeveelheid ruis vanuit de bodem is golflengte afhankelijk en is het grootst in het NIR spectrum. De invloed vanuit de bodem kan worden genegeerd bij hoge biomassa dichtheid (LAI > 3; Atzberger et al., 2003).

De invloed van bovengenoemde (versturende) factoren kan worden verminderd door het gebruik van datatransformaties, bijvoorbeeld door het gebruik van gewasindexen en het toepassen van atmosferische correcties. Echter, het is cruciaal dat de gevonden relaties worden getest onder verschillende condities die recht doen aan de variatie in de hierboven genoemde factoren.

2.3.5 Versterking plant signaal: gebruik van indexen

De meest gebruikte methode om het achtergrond signaal te reduceren (en daarmee het gewassignaal te vergroten) is het gebruik van gewasindexen. Er zijn in de afgelopen jaren meer dan honderd van deze gewasindexen ontwikkeld. Deze kunnen in drie categorieën worden ingedeeld (Dorigo et al., 2007): de ratio gewasindexen, de orthogonale gewasindexen en de hybride gewasindexen die beide voorgaande categorieën combineren.

Ratio gewasindexen

De ratio gewas indexen zijn voornamelijk gebaseerd op de gemeten reflectie (vaak via breedband sensoren) in het rode en NIR golflengtegebied. De meest bekende ratio indexen zijn de *Ratio Vegetation Index* (RVI, Pearson & Miller, 1972; ook wel *Simple Ratio* (SR) genoemd) en de *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI; Rouse et al., 1973). De GNDVI is identiek aan NDVI maar de reflectie in rood is vervangen door de reflectie in groen. Deze drie indexen worden als volgt berekend:

$$RVI = SR = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{RED}} \quad (1)$$

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (2)$$

$$GNDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{GREEN}}{\rho_{NIR} + \rho_{GREEN}} \quad (3)$$

Waar ρ_{NIR} staat voor de gemeten reflectie in NIR, en ρ_{RED} en ρ_{GREEN} staan voor de gemeten reflectie in het rode en groene deel van het gewasspectrum. De exacte golflengte (en nauwkeurigheid) waarmee ρ_{NIR} , ρ_{RED} en ρ_{GREEN} worden gemeten hangt af van de sensorspecificaties.

Orthogonale gewasindexen

Sinds de jaren '70 zijn verschillende alternatieve gewasindexen ontwikkeld, veelal met het doel om het plantsignaal te versterken en de achtergrondreflectie (ofwel ruis) te verminderen. Deze alternatieve indexen worden ook wel orthogonale indexen genoemd. De meest bekende orthogonale indexen zijn de *Simple Difference Index* (SDI; Jordan, 1969), de *Perpendicular Vegetation Index* (PVI; Richardson & Wiegand, 1977), en de *Weighted Difference Vegetation Index* (WDVI, Clevers, 1989). Deze worden als volgt berekend:

$$SDI = \rho_{NIR} - \rho_{RED} \quad (4)$$

$$PVI = \frac{(\rho_{NIR} - a * \rho_{RED} - b)}{\sqrt{1 + a^2}} \quad (5)$$

$$WDVI = \rho_{NIR} - a * \rho_{RED} \quad (6)$$

waar de parameters a en b worden gebruikt om te corrigeren voor de reflectie vanuit de bodem (de waarde voor a is niet gelijk voor de berekening van PVI en WDVI).

Hybride gewasindexen

De meest bekende hybride gewasindex is de *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI, Huete, 1988). De *Optimized SAVI* is een aanpassing van SAVI (Rondeaux et al., 1996). Beide worden berekend als:

$$SAVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{RED}) * (1 + L)}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + L} \quad (7)$$

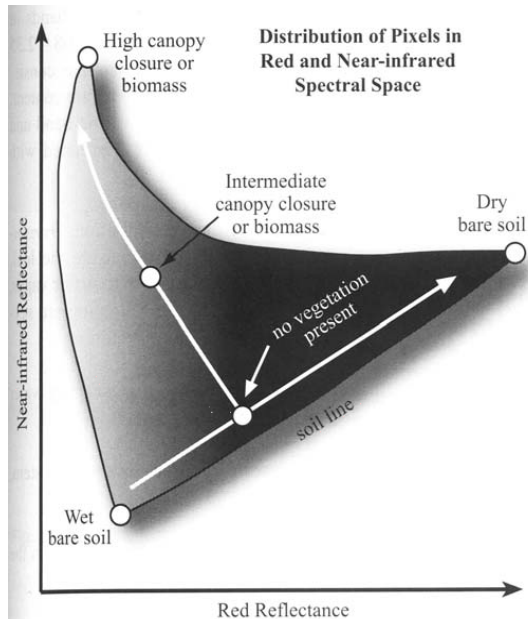
$$OSAVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + L} \quad (8)$$

De parameter L corrigeert voor bodemreflectie en is in vergelijking 7 gelijk aan 0,5 en in vergelijking 8 is deze 0,16. Een uitgebreide bespreking van deze gewasindexen is terug te vinden bij Huete (1988), Bannari et al. (1995), Rondeaux et al. (1996) en Hatfield et al. (2004).

Visualisatie van verschillende benaderingen

Schematisch kan het verschil tussen bovengenoemde benaderingen worden weergegeven via een zogenoemde LAI isoline (Figuur 2.7a), waarbij de gemeten index wordt geplot in een 2-dimensionaal

NIR-RED diagram. Dit is een figuur waarbij op de X-as de reflectie in het rode deel van het spectrum wordt weergegeven en op de Y-as de reflectie in het NIR. In deze visualisatie neemt de reflectie van een bodem lineair toe met afnemend vochtgehalte. Dit betekent concreet dat bij gelijkblijvende hoeveelheid biomassa het uitdrogen van de bodem resulteert in een toename van de reflectie in Rood én NIR. Een toenemende gewasontwikkeling zorgt echter voor een afname in het gereflecteerde licht in het rode deel van het spectrum en een toename in NIR reflectie. Wanneer geen vegetatie aanwezig is, dan is de verhouding tussen de reflectie in het NIR en rode deel van het spectrum relatief constant. In deze situatie is de hoogte van de reflectie in NIR en Rood afhankelijk van het bodemtype en vochtgehalte. Gevisualiseerd in figuur 7a komt dat neer op een rechte lijn: de bodemlijn (soil line).



Figuur 2.7a. Relatie tussen gewasontwikkeling en spectra in NIR-RED spectrum (Silleos et al., 2006)

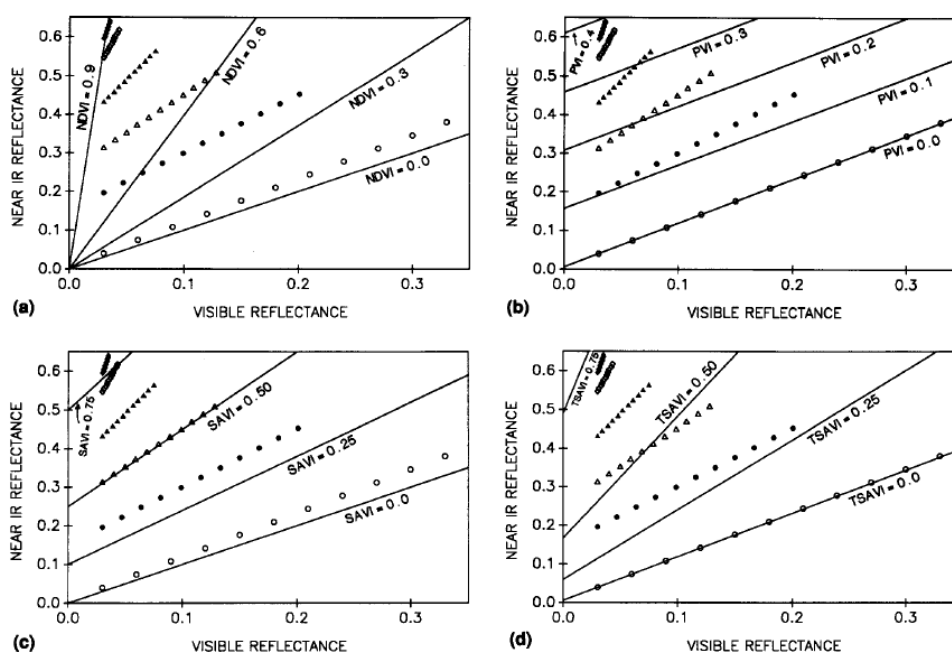
De RVI en SR gewasindexen worden berekend door de reflectie in NIR te delen door de reflectie in Rood. De verhouding tussen de reflectie in NIR en Rood wordt dus gebruikt om een inschatting te geven van de hoeveelheid biomassa. De hoeveelheid ofwel hoogte van de reflectie is daarbij niet relevant, omdat beide indexen aannemen dat de verhouding tussen NIR en Rood voornamelijk (ofwel alleen) afhangt van de hoeveelheid biomassa. Variatie in bodemtype en bodemvocht verandert in deze benadering wel de hoeveelheid reflectie in NIR en Rood, maar niet de verhouding tussen beide. Een vaste verhouding tussen NIR en Rood kan in het bovengenoemde 2D diagram (Figuur 7a) worden gevisualiseerd als een rechte lijn vanuit de oorsprong¹. Concreet betekent dit dat een toenemende SR of RVI wordt veroorzaakt door een hogere NIR of lagere RED reflectie. Uit figuur 7a wordt duidelijk dat een hogere NIR en lagere RED reflectie samenhangen met een toename in biomassa. De NDVI wordt berekend als het verschil tussen NIR en RED reflectie gedeeld door de totale reflectie in NIR en RED. Mathematisch komt ook deze benadering overeen met een rechte lijn vanuit de oorsprong².

¹ De vergelijking $SR = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{RED}}$ kan worden herschreven als $\rho_{NIR} = SR * \rho_{RED}$ (de wiskundige

notatie voor een rechte lijn door de oorsprong is: $y = a*x$. In de beschreven 2D visualisatie is de x-as de reflectie in Rood (ρ_{RED}) en de y-as de reflectie in NIR (ρ_{NIR}); de hellingshoek is de berekende SR).

² De vergelijking $NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}$ kan worden herschreven als $\rho_{NIR} = \frac{(-1 - NDVI)}{(NDVI - 1)} * \rho_{RED}$ wat in de beschreven 2D visualisatie neerkomt op een rechte lijn door de oorsprong (zie noot 1).

In Figuur 2.7b zijn de verschillen tussen de ratio, orthogonale en hybride indexen gevisualiseerd. De punten in de 4 subfiguren komen overeen met de gemeten gewasreflectie op 11 verschillende grondsoorten (deze punten liggen in één lijn³) bij 6 verschillende groeistadia van het gewas. Bij toenemende biomassa (LAI) verschuift de gemeten reflectie bij alle grondsoorten naar linksboven, overeenkomend met een hogere NIR en lagere Red reflectie. In de verschillende subfiguren wordt aangegeven hoe deze gemeten punten kunnen worden geschat door gebruik te maken van de gewasindexen NDVI (sub a), PVI (sub b), SAVI (sub c) en TSAVI (sub d).



Figuur 2.7b. Vegetatie spectra LAI isolines in NIR-RED spectrum zoals berekend via verschillende typen gewasindexen (NDVI, PVI, SAVI en TSAVI; Bron: Price, 1992) en hoeveelheden biomassa (LAI).

De ratio gewas indexen (zoals de NDVI, Figuur 2.7b, sub a) zijn rechte lijnen die vanuit de oorsprong vertrekken: een hogere NDVI komt overeen met een hogere reflectie in het NIR en/of een lagere reflectie in het rode deel van het spectrum (overeenkomend met meer biomassa). De orthogonale index PVI (Figuur 2.7b, sub b) is een rechte lijn die evenwijdig lopen aan het bodemsignaal. De hybride indexen bestaan uit een combinatie van beide benaderingen, waarbij alle lijnen vanuit één punt vertrekken maar waarbij dat punt verplaatsbaar is in het NIR-RED diagram (Figuur 2.7b, sub c en d).

Wat betekent dit concreet? De verhouding tussen de reflectie in NIR en RED wordt beïnvloed door de hoeveelheid biomassa en de reflectie vanuit de bodem. Wanneer er bij een vaste hoeveelheid biomassa de reflectie van de bodem verandert door variatie in organische stof, mineralogie of vochtgehalte, dan verschuiven de punten langs de grondlijn⁴. De beste manier om een gewasindex te berekenen is ervoor te zorgen dat de gewasindex niet verandert door deze veranderingen in de bodemreflectie. Ter illustratie: vanuit figuur 7b (sub a) kunnen we zien dat wanneer een punt naar linksonder verschuift (door

³ Deze lijn wordt overigens niet weergegeven. De weergegeven lijnen zijn de visualisatie van de 4 gewasindexen. Ter illustratie: wanneer de gewasindexen nul zijn, is er geen vegetatie. De punten die rond/ bij deze lijn liggen, geven de reflectie weer van de 11 bodems zonder gewas.

⁴ De (niet weergegeven) lijn waarop de 11 verschillende punten liggen, in figuur 7b weergegeven voor 6 verschillende hoeveelheden biomassa. Vergelijkbaar met de 'bodem-lijn' zoals weergegeven in Figuur 2.7a.

bijvoorbeeld nattere condities) dit overeenkomt met een hogere NDVI waarde (de hellingshoek van de lijn moet groter worden om de gemeten reflectie in dat punt te schatten). Wanneer voor deze variatie in bodemreflectie niet wordt gecorrigeerd, dan wordt de hoeveelheid biomassa overschat. Bij toenemende biomassa wordt dit effect echter kleiner (alle 11 punten bij de hoogste hoeveelheid biomassa in figuur 7b sub a (linksboven in deze figuur) liggen op de lijn van NDVI=0.9). Door gebruik te maken van PVI (of vergelijkbaar de WdVI) kan beter rekening worden gehouden met variatie in bodemreflectie, in het bijzonder bij LAI waarden lager dan 3. In de praktijk wordt echter een vaste correctie uitgevoerd, d.w.z. de reflectie vanuit de bodem is constant. Hoewel dit de voorspelling van de biomassa hoeveelheid verbeterd, met name bij LAI waarden die hoger zijn dan 3, is deze aanname niet terecht (Derks & Kramer, 2011). Daardoor is het mogelijk dat de biomassa enigermate wordt onderschat wanneer bij gelijkblijvende biomassa de bodem vochtiger wordt. De hybride indexen geven het beste resultaat over alle groeistadia van het gewas⁵.

Red Edge Position

Een alternatieve benadering is het gebruik van het zogenoemde *Red Edge Inflection punt* (REIP) of *Red Edge Position* (REP). Dit punt is gedefinieerd als de golflengte rond de 720 nm waar de helling in gewasreflectie de maximale waarde heeft (Figuur 2.2). In dit gedeelte van het spectrum slaat de maximale absorptie (veroorzaakt door chlorofyl) om in maximale reflectie (veroorzaakt door celstructuur). Een verschuiving van het REP naar kortere golflengtes (blauwverschuiving) wordt vaak geassocieerd met een afname in groene vegetatie (ofwel chlorofyl) terwijl een verschuiving naar langere golflengtes (roodverschuiving) wordt geassocieerd met een toename in plantdichtheid (hoeveelheid chlorofyl). De locatie en helling van dit punt kan worden geschat door gebruik te maken van eerste of tweede orde afgeleide functie (afgeleid van het gemeten spectrum). Een alternatieve simpele benadering die gebruik maakt van lineaire interpolatie berekent de REP waarde als:

$$REP = 700 + 40 * \frac{(\rho_e - \rho_{700})}{\rho_{740} - \rho_{700}} \quad (9)$$

Waar ρ_e berekend is via lineaire interpolatie: $\rho_e = (\rho_{670} + \rho_{780})/2$.

Een aantal huidige commerciële producten maakt gebruik van de *Normalized Difference Red Edge Index* (NDRE). Deze NDRE is vergelijkbaar met de ratio gewasindexen en wordt als volgt berekend:

$$NDRE = \frac{\rho_{780} - \rho_{720}}{\rho_{780} + \rho_{720}} \quad (10)$$

Recente ontwikkelingen

Door de ontwikkeling van hyper- en ultraspectrale sensors is het mogelijk om het reflectiespectrum nauwkeuriger te analyseren. Hierdoor is het mogelijk om kleine verschillen in reflectie-eigenschappen te detecteren die mogelijk veroorzaakt zijn door chemische of fysische stress. Sinds de ontwikkeling van deze verfijnde sensoren zijn verschillende bestaande vegetatie indexen aangepast en nieuwe indexen ontworpen.

De bruikbaarheid en toepasbaarheid van de hierboven besproken gewasindexen om een inschatting te maken van de actuele gewasontwikkeling en nutriëntenopname wordt besproken in Hoofdstuk 4.

⁵ Hierbij is het echter wel belangrijk om de juiste waarde te kiezen voor de gebruikte constanten in de vergelijking. Deze zijn niet noodzakelijk identiek voor alle omstandigheden.

3 Overzicht van *sensing* systemen in Nederland

3.1 Inleiding

In Nederland zijn diverse sensoren op de markt die gebruik maken van crop sensing om de gewasontwikkeling te monitoren en mogelijke stressfactoren te verhelpen. In deze studie worden de volgende sensoren beschreven: CropCircle, Greenseeker, spadmeter, FieldSpec (ASD), CropScan, YARA N-sensor en Fritzmeier. Dit hoofdstuk geeft een technische beschrijving van deze producten. In aanvulling daarop wordt ook gekeken naar online applicaties als Terrasphere en MijnAkker die gebruik maken van satellietbeelden. Voor een praktische beschrijving van bovengenoemde sensoren - inclusief fotomateriaal - wordt verwezen naar het rapport van Kikkert (2009).

3.2 CropCircle

3.2.1 Technische gegevens

De CropCircle is ontwikkeld door Holland Scientific en maakt gebruik van een actieve LED lichtbron, een infrarood reflectiesensor en een sensor die daglicht kan scannen. De sensor werd gedistribueerd door Holland Scientific, maar wordt vanaf 2010 gedistribueerd door AGleader onder de naam OptRx (Van Evert et al., 2011). Het gebruik van een actieve lichtbron maakt de sensor ongevoelig voor variatie in invallend licht: het is daardoor mogelijk om de sensor in het donker te gebruiken. Uit de verkregen reflectie data wordt door een computerprogramma vervolgens de vegetatie index NDVI of NDRE berekend. De CropCircle moet gemonteerd worden op een hoogte tussen 25 en 180 cm boven het gewas, en meet over een breedte van circa 130 cm. De sensor kan worden aangesloten op een datalogger (GeoScout) of een PDA met applicatiesoftware. Let op: data uit verschillende types van dezelfde sensor zijn niet altijd uitwisselbaar en (direct) vergelijkbaar (Verhage, 2011).

Er zijn een tweetal typen op de markt die gemonteerd kunnen worden op een tractor: de Crop Circle ACS-430 en de Crop Circle ACS-470. De belangrijkste specificaties zijn weergegeven in tabel 2.

Technische specificaties CropCircle

Specificaties	CropCircle
Sensor - gewas afstand	Van 25 tot > 183 cm
Scangebied - zichthoek	~ 30 bij ~14 graden
Lichtbron	Actief - LED
Nr. banden	3
Breedte	VIS - NIR
VIS selectiebanden	670 – 730 – 775 (ACS-430) 450, 550, 650, 670, 730 en 760 nm (drie door gebruiker gedefinieerd; ACS-470)
Resolutie	10 – 20 nm

De ACS-430 meet de gewasreflectie via 3 sensoren/ bandbreedtes: op 670 nm, 730 nm, en 780 nm, en kan tevens een correctie uitvoeren voor de meethoogte. De ACS-470 kan de gewasreflectie meten over het hele spectrum, waarbij de gebruiker binnen het visuele spectrum 6 bandbreedtes kan selecteren. Standaard output zijn de volgende indexen: NDRE, NDVI, Red-Edge, en de reflectie gemeten in NIR en

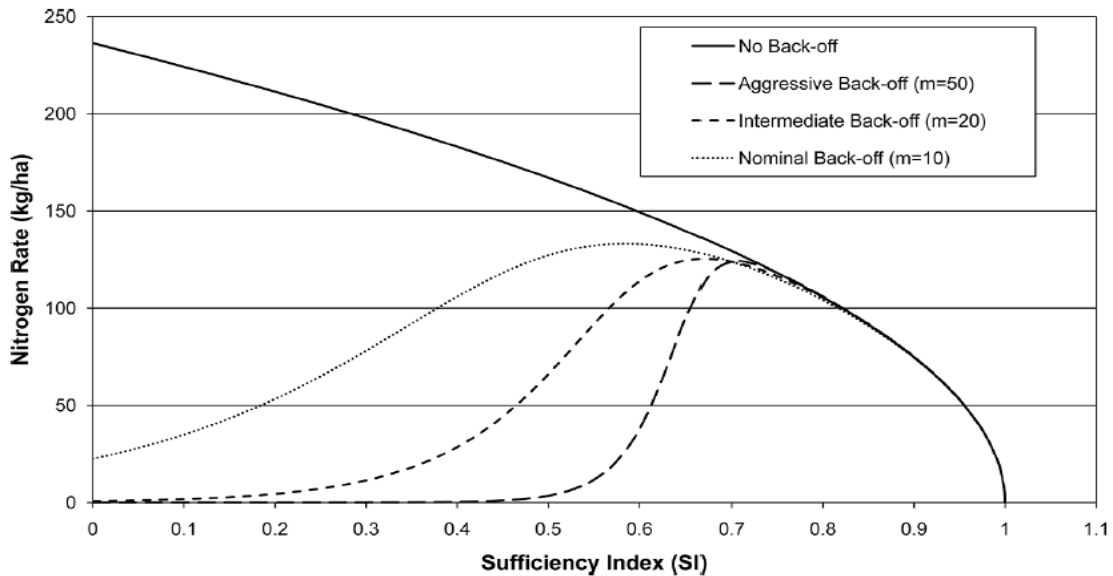
Red. Alle vegetatie indexen die gebruik maken van Red en NIR reflectie kunnen uiteraard zelf worden berekend op basis van de gegeven reflectie in beide golflengtes.

3.2.2 Ontwikkeld algoritme voor N-advies

De CropCircle maakt gebruik van een gewasindex om een variabele stikstof strooiadvies te geven met als doel om bij lokale N-tekorten aan de N-vraag van het gewas te voldoen. Traditioneel wordt op het perceel een controle strip aangebracht met diverse N-trappen (in ieder geval een nulveldje, en een veldje met optimale N-voorziening). Het verschil in reflectie tussen de controle strip en de rest van het perceel wordt uitgedrukt in een *Sufficiency Index* (SI). Deze SI ($0 < SI < 1$) is standaard gebaseerd op het NDVI maar kan ook berekend worden door gebruik te maken van alternatieve vegetatie indexen (VI). Mathematisch wordt SI als volgt berekend:

$$SI = \frac{VI_{crop}}{VI_{reference}} \quad (11)$$

De relatie tussen SI en N-gift is weergegeven in figuur 8, en kan worden berekend door gebruik te maken van een gewasspecifiek algoritme (Holland & Schepers, 2010).



Figuur 3.1. Relatie tussen SI en N-advies zoals toegepast in algoritme van CropCircle

Het algoritme dat CropCircle gebruikt om tot een N-advies te komen heeft de volgende vorm (Holland & Schepers, 2010):

$$N_{gift} = (k * N_{opt} - N_{start} - N_{SOM} + N_{MB}) * \sqrt{\frac{(1 - SI)}{\Delta SI * (1 + 0.1 * e^{m * (SI_{th} - SI)})}} \quad (12)$$

In deze vergelijking staat:

- k voor een correctie factor om de optimale N-gift aan te passen aan locatiespecifieke

eigenschappen die de groei ter plaatse positief of negatief beïnvloeden (als onbekend: $k=1$).

- N_{opt} voor de (economisch) optimale N-gift.
- N_{start} is de starter N-gift, gegeven op het moment van planten.
- N_{som} is een indicatie van de N-nalevering via mineralisatie van bodem organische stof.
- ΔSI is het verschil tussen de maximale SI waarde ($SI_{max}=1$) en de gemeten SI waarde bij een nulveldje. Deze ΔSI is afhankelijk van de sensor, meemethode en groeistadium, en varieert tussen 0.2 en 0.4 voor sensoren die de gewasreflectie meten op > 0,5 m boven het gewas.
- De parameters m ($0 < m < 100$) en SI_{th} zijn correctiefactoren, die de N-gift minimaliseren wanneer het gewas er zo slecht aan toe is dat een extra N-gift weinig effect meer zal hebben.
- De extra N-gift die nodig is om tijdelijke tekorten door immobilisatie te compenseren (N_{MB}) is afhankelijk van de N-opname, en kan worden berekend aan de hand van een N-opname curve (vergelijkingen in Holland & Schepers, 2010).

Recent heeft CropCircle de *Virtual Reference Strip* (VRS) in gebruik genomen (Norwood et al, 2009). Dit concept is gebaseerd op de aanname dat als je enkele keren door het perceel bent heengereden, er altijd wel planten aanwezig zijn waar aan de N-behoefte is voldaan. De gemeten reflectie kan dan gebruikt worden voor auto-kalibratie.

3.3 Yara N-sensor

3.3.1 Technische gegevens

De N-sensor van Yara is een gewasreflectiemeter die op basis van de gewasreflectie een N-advies berekend. De sensor is ontwikkeld door Yara International en meet binnen een golflengtegebied van 300 tot 1100 nm. Er zijn twee types op de markt: de Yara N-sensor en de Yara N-sensor ALS. De N-sensor heeft geen eigen lichtbron, maar meet via een extra spectrometer het spectrum van invallend zonlicht, waarna deze gegevens gebruikt worden om het gewasspectrum te corrigeren. Het model ALS heeft een eigen lichtbron, waardoor de sensor ook onder suboptimale lichtcondities gebruikt kan worden. De belangrijkste specificaties zijn weergegeven in tabel 3.

Technische specificaties YARA sensoren

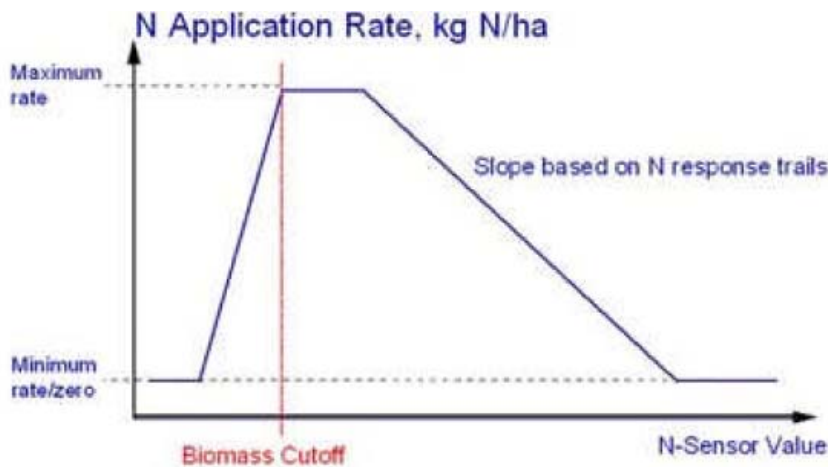
Specificaties	YARA N-sensor (ALS)
Sensor - gewas afstand	2 – 4 m
Scangebied - zichthoek	45 – 55 graden
Lichtbron	Geen (N-sensor) of Actief voor (N-sensor ALS)
Nr. banden	20 of >50 (afhankelijk van het gebruikte type en jaar van aanschaf)
Breedte	VIS – NIR
Selectiebanden	550, 670, 700, 740, 780
Resolutie	> 3 nm

3.3.2 Ontwikkeld algoritme voor N-advies

Voor een aantal gewassen, waaronder aardappelen, zijn rekenregels ontwikkeld waarmee de N-gift direct toegediend kan worden. Deze rekenregels beschrijven de relatie tussen N-gift en het gemeten reflectiesignaal en worden uitgedrukt op een relatieve schaal eenheid. De gebruiker kan de gewenste N-gift aangeven - inclusief minimum en maximum hoeveelheid – waarna de bijgeleverde software de N-bemesting zo verdeeld dat plekken met een lichtere kleur meer bemesting krijgen dan plekken met een

donkere kleur (vergelijkbaar met de Virtual Reference Strip voor CropCircle). Het is uiteraard ook mogelijk om een absolute kalibratie uit te voeren. Dit kan op twee manieren. De eerste optie is dat de teler een referentiestrook met optimale N-voorziening binnen het perceel heeft liggen. Koppeling van de gegeven N-gift met de verschillen in gewasreflectie tussen de referentiestrook en het overige perceel geeft vervolgens een bijmestadvies. De tweede optie is dat op enkele punten in het perceel de gemeten reflectie wordt gekalibreerd met handmatige chlorofylmetingen.

De Yara N-sensor maakt standaard gebruik van de NDVI of NDRE (een *Normalized Difference Red Edge Index*) vegetatie index om een N-adviesgift te berekenen. De aanpak die hiervoor gebruikt wordt is gevisualiseerd in Figuur 3.2. Dit algoritme gaat uit van een negatief en lineair verband tussen N-gift en de gewasindex, waarbij de helling is afgeleid van veldexperimenten. Op dit moment zijn onder andere algoritmes ontwikkeld voor tarwe, maïs, gerst, aardappel en koolzaad.



Figuur 3.2. Relatie tussen vegetatie index en N-advies zoals toegepast in het algoritme van YARA

In vergelijking met andere sensoren is het gebruik van de Yara N-sensor uitvoerig getest onder Europese condities (>250 veldexperimenten), iets wat uiteraard samenhangt met het feit dat Yara eerder begonnen is met de ontwikkeling van deze sensoren. Meer informatie over de door YARA ontwikkelde algoritmes is te vinden in Berntsen et al. (2006), Tremblay & Belec (2006) en Zillmann et al. (2006). Omdat de precieze calibratiefuncties niet bekend zijn, is het onduidelijk of de ontwikkelde algoritmes expliciet rekening houden met variatie in bodemeigenschappen en weersomstandigheden. Gebaseerd op de geanalyseerde publicaties lijkt het voornamelijk gewasgerelateerd te zijn.

3.4 Greenseeker

3.4.1 Technische gegevens

De GreenSeeker is een gewasreflectiemeter waarmee 'biomassakaarten' kunnen worden gemaakt, maar die eveneens kan worden gebruikt om de stikstofbehoefte van gewassen in te schatten. De GreenSeeker is ontwikkeld in samenwerking met Oklahoma State University en wordt gemaakt/geleverd door N-Tech. De Greenseeker is er in 4 verschillende uitvoeringen, waarbij de verschillen samenhangen met de hoeveelheid sensoren en de aanwezigheid van een softwarematige koppeling met spuitadviezen. De specificaties voor het type RT200 –RT220 zijn weergegeven in tabel 4.

Technische specificaties Greenseeker

Specificaties	200/220
Sensor – gewas afstand	0.7 – 1.6 m
Scangebied - zichthoek	24 x 0.6°
Lichtbron	Actief
Nr. banden	2
Breedte	VIS - NIR
Selectiebanden	774, 656
Resolutie	~ 25 nm

Greenseeker maakt gebruik van LEDS die licht uitzenden in het rode en infrarode deel van het lichtspectrum. Dit gebeurt om en om, waarna een lichtgevoelige reflectiescanner om en om de reflectie in beide bandbreedtes meet. Gebruik makend van de reflectie in Rood en NIR wordt de NDVI index afgeleid. Naast deze standaardoptie is het ook mogelijk om de volgende gewasindexen als output te genereren: IRVI, RVI, en twee vormen van NDVI.

Omdat de GreenSeeker over een breedte van circa 60 cm meet, worden meestal meerdere GreenSeekers geplaatst aan een spuitboom. De waarnemingen worden vervolgens verzonden naar een "interface module" die de getallen verwerkt waarna vervolgens de gegevens naar een PDA worden verzonden. Gebruik makend van de vegetatie index wordt dan een bijmestadvies gegeven.

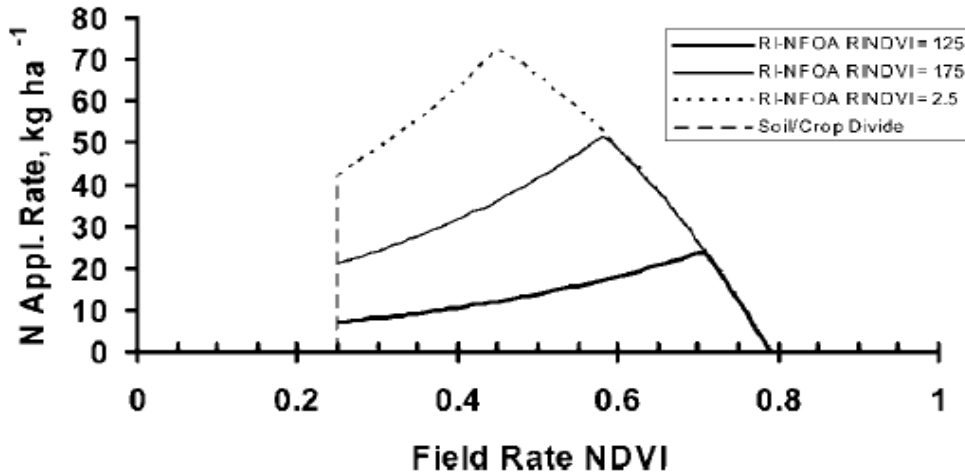
3.4.2 Ontwikkeld algoritme voor N-advies

Het N-advies kan gebaseerd worden op lokale N-trappen aanwezig binnen het perceel of op standaard algoritmes die afgeleid zijn van uitgebreide proeven in de USA (m.n. voor granen en maïs). Deze algoritmes zijn gebaseerd op een exponentiële relatie tussen NDVI (gecorrigeerd voor *growing degree days*, GDD) en opbrengst. (Raun et al., 2002; 2005). Mathematisch wordt het N-advies voor granen als volgt berekend:

$$N_{gift} = 23.9 * \frac{(RI_{NDVI} - 1) * 0.359 * e^{324.4 * INSEY}}{\eta} \quad (13)$$

waar RI staat voor de gewasresponse op een N-gift gemeten door het verschil in gewasreflectie ($RI_{NDVI} = NDVI_{N-opt} / NDVI_{control}$). De opbrengst wordt geschat aan de hand van de vergelijking $Y_P = 0.359 * e^{324.4 * INSEY}$ waar INSEY staat voor *In Season Estimated Yield*. Deze INSEY kan worden geschat met behulp van de gemeten gewasreflectie waarbij een correctie wordt uitgevoerd voor de temperatuur ($INSEY = NDVI / \text{groeidagen met } T > 0$). De formule is alleen geldig wanneer $NDVI_{control} > 0.25$.

Uiteraard mag de voorspelde meeropbrengst ten gevolge van een N-gift niet hoger zijn dan de potentiële gewasopbrengst. Hoe de N-gift samenhangt met het gemeten NDVI is voor verschillende condities geïllustreerd in Figuur 3.3 (de drie opties variëren in 'gemeten' RI_{NDVI} waarden, voor details zie Raun et al., 2005). De constante 23.9 en de variabele n ($0.5 < n < 0.7$) in vergelijking 12 hangen samen met het gewastype.



Figuur 3.3. Relatie tussen vegetatie index en N-advies zoals toegepast in het algoritme van Greenseeker (Bron: Raun et al., 2005). Het advies is berekend volgens vergelijking 12 voor drie situaties die verschillen in gewasreflectie (variatie in R_{NDVI}).

De Oklahoma State University heeft richtlijnen opgesteld om voor verschillende gewassen de relatie tussen NDVI en N-gift te kalibreren. Iedereen kan vervolgens de gekalibreerde gegevens beschikbaar stellen via de website van de universiteit (http://www.nue.okstate.edu/Index_NFOA.htm).

3.5 SPAD meter

3.5.1 Technische gegevens

De SPAD meter is een handmatige reflectiemeter die gebruikt kan worden om het chlorofylgehalte in bladeren te schatten (het betreft dus een puntmeting). Het chlorofylgehalte is een goede maat voor de stikstofstatus van het geanalyseerde gewas. Een actieve led lichtbron zendt licht uit in het rode en infrarode deel van het spectrum, waarna het de hoeveelheid licht meet dat door het blad heen is getransmitteerd. Aan de hand van de hoeveelheid geabsorbeerd licht wordt het chlorofylgehalte in het blad bepaald. Enkele specificaties van de SPAD meter staan vermeld in tabel 5.

Technische specificaties SPAD meter

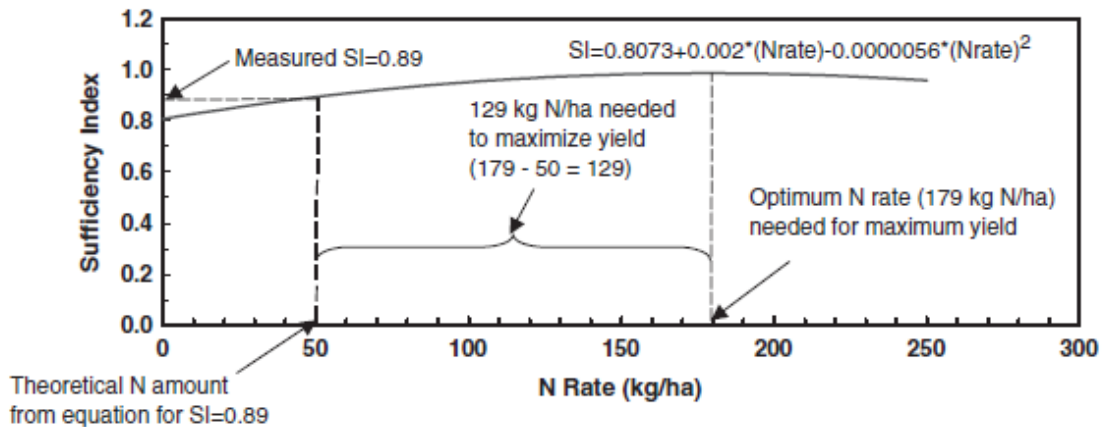
Specificaties	Handheld 502 Plus
Sensor - gewas afstand	< 5 cm
Scangebied - zichthoek	2 – 3 mm
Lichtbron	LED
Nr. banden	2
Breedte	VIS, NIR
Selectiebanden	650, 940

3.5.2 Ontwikkeld algoritme voor N-advies

Door gebruik te maken van rasspecifieke tabellen of referentie strips binnen het perceel kan vervolgens de hoogte van de bijmestgift worden vastgesteld. Voor minstens vier rassen wintertarwe is bekend hoe de uitslag vertaald moet worden naar het gewenste niveau van bemesting onder Nederlandse omstandigheden. Bij consumptieaardappelen bleek het lastig om een betrouwbare normlijn te

construeren: de uitslag wordt sterk beïnvloed door ras en experimentele omstandigheden (Lokhorst et al., 2003).

Een alternatieve benadering om een N-advisie te berekenen is het gebruik van algoritmes die een relatie leggen tussen de gemeten reflectie en de meeropbrengst. Een voorbeeld hiervan wordt uitgewerkt in Varvel et al. (2007) die voor maïs een kwadratische groeiresponse model ontwikkeld heeft. De visualisatie van deze benadering is weergegeven in Figuur 3.4.



Figuur 3.4. Relatie tussen vegetatie index en N-advisie (index gemeten met SPAD meter)

Alternatieve relaties zijn gepubliceerd door Scharf et al. (2006) en Solari et al. (2010). De gebruikte aanpak en de gepubliceerde relaties zijn echter niet identiek/ vergelijkbaar.

3.6 *Fieldspec (ASD)*

3.6.1 Technische gegevens

De ASD FieldSpec spectrometer meet het reflectiespectrum op gewasniveau en is een instrument ontwikkeld door *Analytical Spectral Devices* in de USA. Het instrument wordt voornamelijk gebruikt als handsensor. Er zijn verschillende varianten aanwezig die variëren in kostprijs, resolutie, bandbreedte en correctiemogelijkheden voor ruis. Technische specificaties zijn opgenomen in tabel 6.

Technische specificaties ASD FieldSpec meter

Specificaties	ASD FieldSpec
Sensor - gewas afstand	< 1.5 m
Scangebied - zichthoek	25 graden
Lichtbron	-
Nr. banden	2150
Breedte	VIS, NIR
Selectiebanden	Hyperspectra
Resolutie	3 – 10 nm

De ASD FieldSpec wordt in veel wetenschappelijke publicaties gebruikt om de gewasreflectie te meten. In tegenstelling tot de commerciële sensoren kan de FieldSpec over het hele spectrum de gewasreflectie meten met een resolutie van <3 tot 10 nm.

3.6.2 Ontwikkeld algoritme voor N-advies

Er zijn geen algoritmes ontwikkeld voor commerciële toepassing.

3.7 Fritzmeier

3.7.1 Technische gegevens

De sensor ontwikkeld door Fritzmeier (de MiniVeg) is geen gewasreflectiemeter zoals de hierboven besproken sensoren. Dit instrument geeft een inschatting van het chlorofylgehalte door gebruik te maken van *laser induced chlorofyl fluorescence*. Wanneer een chlorofyl molecuul de energie uit licht absorbeert wordt een klein gedeelte via langere golflengtes uitgezonden (~1%). Dit licht wordt uitgezonden omdat niet alle energie van ingevangen fotonen gebruikt wordt (of kan worden). Dit uitgezonden licht wordt geclassificeerd als fluorescentie emissie, en kan worden gedetecteerd met een optische scanner rond golflengtes 685-690 (rood) en 730-740 nm (NIR). Veel gebruikt wordt de vegetatie index Rood/NIR. Recent onderzoek suggereert en laat zien dat de analyse van het uitgezonden licht gebruikt kan worden om iets te zeggen over de gezondheidsstatus van een plant of gewas. Deze techniek wordt gebruikt in recent geïntroduceerde instrumenten als Miniveg, Dualez en Multiplex (Trenblay et al., 2002). Het gebruik van chlorofyl fluorescentie boven reflectie heeft een aantal voordelen: er is geen interferentie van het bodemsignaal (Heege et al., 2008) en de schatting van het N-gehalte is niet afhankelijk van de hoeveelheid biomassa. Studie van absolute fluorescentie waarden vereist echter dat het blad aangepast moet zijn aan het donker (*dark adaptation*) voordat het belicht wordt, iets wat moeilijk samengaat met *on-the-go sensing*. Het alternatief is om gebruik te maken van chlorofyl emissie ratio's (Trenblay et al., 2002). De afstand tussen de MiniVeg sensor en het blad moet kleiner zijn dan 3 cm. Een alternatief instrument dat gebruik maakt van fluorescentie en wel vanaf het dak van de tractor gebruikt kunnen worden is de Planto N-sensor (Schmidhalter et al., 2008). Echter, het gebied dat gescand wordt met behulp van deze sensoren is veel kleiner dan de gebruikelijke reflectiescanners.

De Miniveg wordt echter niet meer geleverd. Recent (najaar 2010) is door Fritzmeier in samenwerking met ISARIA een nieuw type reflectiemeter ontwikkeld en op de markt gebracht. Over dit nieuwe instrument is echter nog weinig bekend. De gewasreflectie wordt in 5 banden gemeten (Kooistra et al., 2011) bij een vergelijkbare ruimtelijke resolutie als de Greenseeker en CropCircle (~0,6 m).

Technische specificaties MiniVeg & Fritzmeier - ISARIA

Specificaties	MiniVeg	Fritzmeier ISARIA
Sensor - gewas afstand	< 3 cm	0,3 – 1,0
Scangebied - zichthoek	Relatief klein	-
Lichtbron	Laser	Actief
Aantal banden	2	5
Breedte	VIS, NIR	VIS, NIR
Selectiebanden	685-690; 730-740	?
Resolutie	<5 nm	?

3.7.2 Ontwikkeld algoritme voor N-advies

Omdat de MiniVeg uit productie is genomen, is niet gezocht naar beschikbare algoritmes om de gemeten reflectie om te zetten in een bijmestadvies. De Fritzmeier – ISARIA reflectiemeter kan direct gekoppeld worden aan een N-strooier. De algoritmes en de theoretische afleiding daarvan zijn niet bekend.

3.8 CropScan

3.8.1 Technische gegevens

De gewasreflectiemeters ontwikkeld door CropScan (USA, www.cropscan.com) meet de gewasreflectie in het zichtbare en NIR deel van het lightspectrum. De meest bekende types die in Nederland worden gebruikt, zijn de MSR87 en de MSR16R. De MSR87 meet in 8 nauwe banden in het bereik (460-810 nm) gecentreerd op de frequenties 460, 510, 560, 610, 660, 710, 760 en 810 nm (met een bandbreedte van 10 nm). Het model MSR16R kan tot maximaal 16 sensorbanden meten in het bereik van 450-1750 nm. De bandbreedtes van de MSR87 zijn hierbij inbegrepen (Van Evert et al., 2011). Technische specificaties zijn opgenomen in tabel 8.

De stralingsmeter is aan een uitschuifbare stok bevestigd. De meethoogte kan variëren van 1,60 tot 3,00 meter. De sensor werd verticaal boven het bladerdek van het gewas gehouden. De diameter van de gemeten oppervlakte is gelijk aan de helft van de sensorhoogte boven het gewas. Aangenomen wordt dat de straling op de bovenzijde van de sensor gelijk is aan de straling die op het onderliggende bladerdek valt. De data worden verzameld via bijgeleverde terminal met software. Deze digitaliseert de stroomsterkte en rekt deze vervolgens om naar reflectiepercentages in de gekozen bandbreedtes. Met de software kan het gemiddelde van een van te voren ingesteld aantal metingen worden berekend. Bij elke scan of serie waarnemingen worden gegevens van plotnummer, tijd, temperatuur en stralingsintensiteit opgeslagen. Betrouwbare metingen kunnen worden uitgevoerd tot stralingsintensiteiten van minimaal 300 Watt per m². Afhankelijk van de gebruiker kunnen verschillende gewasindexen worden berekend op basis van de verkregen sensor-informatie.

Technische specificaties CropScan

Specificaties	CropScan
Sensor - gewas afstand	1.6-3.0 m
Scangebied - zichthoek	-
Lichtbron	geen
Nr. banden	8-16
Breedte	VIS, NIR
Selectiebanden	460, 490, 510, 560, 610, 660, 670, 700, 710, 720, 730, 740, 760, 780, 810, 870, 900, 970, 1080
Resolutie	10 nm

3.8.2 Ontwikkeld algoritme voor N-advies

Aan de hand van de reflectiekaracteristiek wordt de mate van grondbedekking berekend en de N-inhoud van het gewas. Deze stikstofinhoud wordt vergeleken met de norm (de gewenste N-inhoud). Wanneer de gemeten waarde onder de norm ligt, wordt het verschil bijbemest. De methode is ontwikkeld door PRI te Wageningen. De omrekening van de reflectie naar de actuele stikstofinhoud van het gewas en de gehanteerde normen voor de stikstofinhoud van het gewas zijn niet openbaar.

3.9 Terrasphere

Terrasphere is een Nederlands bedrijf dat biomassa indexkaarten maakt op basis van satellietbeelden. De beelden kunnen op perceelsniveau worden opgevraagd. Op basis van de aangeleverde reflectiedata berekent Terrasphere de WdVI als een index voor het chlorofylgehalte ofwel groenheid van het gewas. De uitkomsten zijn kwalitatief; er is geen directe schatting van de hoeveelheid biomassa. De resolutie van de beelden bedraagt circa 2 m². Praktische gegevens (leverbaarheid, vorm) worden gegeven in de rapportage van Kikkert (2009). Er is geen N-advies gekoppeld aan dit product. BLGG had in het verleden een product ontwikkeld dat gebaseerd is op deze beelden onder de naam CropView. Op dit moment wordt het door BLGG ontwikkelde product niet meer geleverd.

3.10 MijnAkker

MijnAkker is een product wat geleverd wordt door het bedrijf BasFood in samenwerking met de Wageningen Universiteit (WaterWatch, eLeaf). Satellietbeelden worden met behulp van het model SEBAL vertaald naar actuele gewas - en bodemparameters. Dit zijn biomassaproductie, actuele verdamping, opgenomen stikstof, stikstofconcentratie in bovenste bladlaag, de hoeveelheid bladbedekt oppervlak, diverse vegetatie indexen en de hoeveelheid beschikbaar bodemvocht. Optioneel zijn: actuele opbrengst (voor aardappels, maïs, bieten en granen) en het droge stofgehalte (voor aardappels, snijmaïs). De resolutie van het uiteindelijke eindproduct is 10x10 m. De advisering en teeltbegeleiding wordt gedaan door aangesloten voorlichtingsinstanties en bedrijven.

Het model in combinatie met satellietbeelden is toepasbaar op alle gewassen en grondsoorten binnen Nederland. Praktische gegevens worden gegeven in de rapportage van Kikkert (2009). Voor de theorie achter SEBAL wordt verwezen naar: <http://www.waterwatch.nl/tools0/sebal/sebal-a-scientific-description.html>. Dit product is gestart in 2008 en heeft op dit moment meer dan 2500 gebruikers. De vertaalslag van satellietgegevens naar bemestingsadviezen gebeurt door aangesloten bedrijven. Informatie over de gebruikte algoritmes is niet bekend (/ beschikbaar).

3.11 Vergelijking

De sensoren die in deze literatuurstudie zijn meegenomen opereren op een verschillend schaalniveau. De FieldSpec, de SPAD meter en de CropScan zijn 'hand-held' sensoren. De FieldSpec wordt vaak gebruikt in wetenschappelijke studies omdat het de gebruiker in staat stelt om het gewasspectrum tot in detail te bestuderen, en indien gewenst, nieuwe gewasindexen te ontwikkelen. De SPAD meter wordt in wetenschappelijke studies, maar ook in de praktijk, gebruikt om een snelle inschatting te geven van het chlorofylgehalte bij individuele bladeren of planten. De CropScan wordt zowel in wetenschappelijke studies als praktijkonderzoek gebruikt. De commerciële producten GreenSeeker, YARA N-sensor, en CropCircle combineren de gemeten gewasreflectie met een N-advies. Voor de gebruiker is dit optimaal, zeker voor de YARA en CropCircle sensoren die gebruik kunnen maken van relatieve en automatische kalibratie algoritmes.

Het grote voordeel van *near sensing* boven *remote sensing* sensoren is dat het de gebruiker veel mogelijkheden biedt: hij is niet afhankelijk van het weer of van andere partijen die informatie aan moeten

leveren. In tegenstelling tot satellietbeelden is de aanschafprijs redelijk hoog; de aanschafprijzen variëren van 7 tot 31 kE. Satelliet beelden kunnen worden opgevraagd om de variatie in gewasontwikkeling weer te geven, en in het geval van MijnAkker kunnen ook additionele gewaseigenschappen worden gegeven. Een groot voordeel is dat de gebruiker geen meetsystemen hoeft aan te passen. Een ander voordeel is dat er meer ruimtelijke en bodemgerelateerde informatie aanwezig is die gebruikt kan worden in de beoordeling van satellietbeelden. De gebruiker is echter afhankelijk van de partijen die de beelden leveren, en de beschikbaarheid van deze beelden zijn gelimiteerd (afhankelijk van het weer). Een vertaalslag naar een N-advies wordt echter niet gegeven.

Een technische vergelijking van de verschillende sensoren wordt gegeven in tabel 9.

Technische vergelijking sensoren (meest recente model/ type)

Specificaties	Spectrometer		Near sensing				Remote sensing		
	FS	SPAD	GS	YARA	FM-I	CC	CS	CV/ TS	MA
Nr. bands	2150	2	2	54	5	3	8-16	8	4
FOV/	0,6	0,01	0,6	25	0,6	0,6	0,6	2	10
Pixelgrootte (m)									
Sensor - gewas afstand (m)	<1,5	<0,05	0,7-1,6	2-4	0,3-1,0	0,3-1,8	1,6-3,0	-	-
Lichtbron	-	Actief	Actief	Actief	Actief	Actief	-	-	-
Standaard*	Alle VI	NDVI	NDVI	NDRE	REP	NDRE	WDVI	NDVI	NDVI
Optioneel			WDVI	NDVI, WDVI, OSAVI , TCARI	NDVI, WDVI, OSAVI, TCARI	NDVI, WDVI	NDVI, REP, NDRE, TCARI, OSAVI	WDVI	

* de gebruikte golflengtes voor de berekening van de vegetatie indexen is niet gelijk voor de verschillende sensoren; let op: de standaard output is niet gelijk voor alle types. De optionele indexen kunnen op basis van band definities worden bepaald, maar zijn niet altijd standaard beschikbaar gesteld (Kooistra, 2011).

* de afkortingen voor de verschillende sensoren is FS voor FieldSpec; SPAD voor SPAD-meter; GS voor GreenSeeker; YARA voor YARA N-sensor; FM-I voor Fritzmeier – ISARIA; CC voor CropCircle; CS voor CropScan; CV voor CropView, TS voor Terrapshere en MA voor MijnAkker.

Alle systemen meten de gewasreflectie in NIR en Red, zodat alle vegetatie-indexen die hiervan gebruik maken in principe berekend kunnen worden, afhankelijk of het apparaat de spectrale informatie weergeeft of direct een gewasindex weergeeft (zoals de YARA sensor). De indexen die gebruikt worden om een N-advies te berekenen zijn overwegend de NDVI, de REP of de NDRE (een genormaliseerde versie van Red Edge). De laatste types maken gebruik van een actieve lichtbron, waardoor de toepassing ook mogelijk is onder suboptimale lichtomstandigheden.

Er zijn een aantal verschillen tussen de sensoren die meegenomen kunnen worden bij een keuze:

- Voor en nadelen van *remote* versus *near sensing* zijn toegelicht in hoofdstuk 2: het gaat hierbij om flexibiliteit, weersafhankelijkheid, resolutie en economische rendabiliteit.

- Sensoren die de gewasreflectie in meerdere banden meten, geven de mogelijkheid om alternatieve indexen te berekenen.
- De YARA sensor is de enige commerciële sensor die significant meer oppervlak per keer meet; dit reduceert het aantal werkgangen en kan de sensor minder gevoelig maken voor de rijbreedte (bijvoorbeeld in maïs).
- In het geval dat een actieve lichtbron om-en-om NIR en Red licht uitzendt, is het mogelijk dat er extra ruis in het signaal kan ontstaan bij hogere rijnelheden (de reflectie van Red en NIR zijn dan niet op exact dezelfde locatie gemeten). Voor een bespreking zie o.a. Schepers (2005) en Shaver et al. (2010).
- Er is discussie of de meethoek en meetafstand waarbij de sensor meet invloed heeft op de bruikbaarheid van de sensor: YARA meet via een schuine hellingshoek terwijl alle andere sensoren loodrecht boven het gewas zijn geplaatst. Voor een bespreking zie o.a. Beunk (2010) en Samborski et al. (2009).
- Er bestaan grote verschillen in ontwikkelde en gevalideerde algoritmes om een gewasindex te vertalen naar een N-advies. Daarnaast zijn de algoritmes voor de GreenSeeker en CropCircle voornamelijk getest in de USA terwijl de Yara sensor uitgebreid getest is onder Europese condities. In veel gevallen zal een locatiespecifieke kalibratie nodig zijn.
- Alle sensoren, met uitzondering van MijnAkker, zijn gebaseerd op statistische relaties. Gebruik van fysische modellen, zoals gebeurd in MijnAkker, kan meer inzicht geven in de achterliggende processen en daarom verschillen tussen vocht en N-stress beter detecteren.

Gebaseerd op bovenstaande technische gegevens (en de inzichten uit de volgende hoofdstukken) kunnen de sensoren op diverse aspecten worden beoordeeld (tabel 10). Deze tabel is gebaseerd op *expert judgement* van de schrijvers van dit rapport en dus vatbaar voor kritiek.

Voorlopige evaluatie technische aspecten en bruikbaarheid van diverse sensoren/satellieten.

Beoordelingscriteria	Spectrometer		Near sensing				Remote sensing			
	FS	SPAD	GS	YARA	FM-I	CC	CS	CV	MA	
Technische aspecten										
Scanoppervlak	-	-	+	++	+	+	+	+++	+++	
Mogelijkheden gebruik VI	+++	n.v.t.	+	++	++	+	++	+	-	
Weersafhankelijkheid	-	-	-	-	-	-	-	+++	+++	
Afhankelijkheid van derden	-	-	-	-	-	-	-	+	+	
Frequentie gebruik	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+	++	
Informatiedichtheid spectrum	+++	0	+	++	++	+	++	+	+	
Beschikbaarheid N-advies	-	+	+	+	+	+	+	-	(+)	
Kalibratie N-advies	0	A	A	A/R	0	A/R	A	0	0	
Toepassingsmogelijkheden										
Doel/ toepassing**	1	2, 3	2	2	2	2	2	4	4	
Diverse gewassen	+++	+++	+	++	++	+	++	++	+++	
Diverse bodemsoorten	+++	+++	++	++(+)	++(+)	++(+)	++(+)	++	++	
Betrouwbaarheid N-advies	0	+	++	++	0	++	0	0	0	
Directe toepassing in NL	+++	+++	+(+)	++(+)	0	+(+)	+(+)	++	+++	
Economische aspecten	-	++	+	-	0	+	+	++	++	
Multi - nutriënt schatting	++	-	-	(+)	(+)	-	(+)	-	-	

* +++ staat voor veel/ grote invloed/positief effect; - voor negatief/slecht/klein; 0 voor niet van toepassing/ geen informatie beschikbaar; A staat voor absoluut; R voor relatief; VI voor vegetatieindex.

** voornamelijk gebruikt voor de volgende doelen: doel 1 is de ontwikkeling van adviezen/ modellen; doel 2 staat voor de meting van chlorofyl; doel 3 voor de ontwikkeling van/ toepassing in N-bemestingsadviezen en doel 4 staat voor inzicht geven in ruimtelijke variatie

Voor zover wij weten is dit de eerste poging om de bruikbaarheid (en dus niet alleen de technische details) van diverse soorten sensoren te evalueren. Grootschalige experimenten in verschillende gewassen en bodemsoorten moeten uitsluitsel geven over de daadwerkelijke betrouwbaarheid en toepassingsmogelijkheden. Een evaluatie gebaseerd op literatuurgegevens wordt besproken in Hoofdstuk 4.

4 Crop sensing: gewasgroei en nutriëntentekorten

4.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft de bruikbaarheid van de in hoofdstuk 2 besproken sensoren om de gewasontwikkeling en nutriëntenopname te schatten. Voor biomassa en stikstof is het onmogelijk om binnen het kader van dit project alle gepubliceerde resultaten te onderzoeken. Het onderzoek naar deze gewaseigenschappen is daarom afgebakend op de periode na 2000, waarbij specifiek gezocht is naar (commerciële) gewassensoren in een agrarische context. In totaal zijn hiervoor 73 artikelen en rapporten bestudeerd. De resultaten van deze analyse staan in Bijlage 1, Tabel 1.

In tegenstelling tot stikstof, zijn er relatief weinig onderzoeken uitgevoerd die proberen een relatie te leggen tussen gewasreflectie en P en K gehalten in gewassen. Hiervoor zijn alle gepubliceerde – zover bekend – bestudeerd. Er zijn 21 studies gepubliceerd voor fosfaat. Een overzicht van deze studies met de belangrijkste experimentele gegevens is weergegeven in Bijlage 1, Tabel 2.

Er zijn 13 studies bekend die onderzocht hebben of er een relatie is tussen gewasspectra en K-beschikbaarheid. Een overzicht van studies die naar een relatie tussen reflectiespectrum en K gekeken hebben, met de belangrijkste experimentele gegevens, is weergegeven in Bijlage 1, Tabel 3.

4.2 Crop sensing: biomassa en gewasontwikkeling

Verschillende studies laten zien dat vegetatie-indexen gebruikt kunnen worden om een indicatie te geven van de hoeveelheid biomassa (Clevers, 1989). De gevonden relaties tussen gewasspectra en biomassa ontwikkeling hebben een empirisch karakter en zijn afhankelijk van de locatie, het gewas, de gebruikte sensor en de kalibratie omstandigheden. Diverse algoritmes voor de inschatting van de hoeveelheid biomassa in maïs, soja en tarwe worden beschreven in Gitelson et al. (2003). Gewas-indexen die corrigeren voor bodemreflectie zijn beter geschikt voor het schatten van biomassa, gewasontwikkeling en bladmorphologie dan klassieke ratio indexen (Dorigo et al., 2010). Bovendien zijn ze minder gevoelig voor ruis en verzadiging (Broge & Mortensen, 2002; Haboudane et al., 2004). Echter, ze zijn gevoeliger voor variatie in bodemreflectie (bijvoorbeeld door vocht).

Alle indexen die gebruik maken van reflectie in Rood en Blauw hebben op een gegeven moment last van verzadiging. Verzadiging kan optreden bij een LAI groter dan 2.5-3.0. Verschillende studies hebben de relatie tussen verzadiging en gewasindexen bestudeerd en komen met een aantal opties om het 'verzadigings' probleem te omzeilen of te verminderen:

- de keuze voor gewasindexen die minder gevoelig zijn voor verzadiging: Baret (1991) en anderen (Rondeaux et al., 1996; Huete et al., 2002; Haboudane et al., 2002; 2004; Gitelson et al., 2004) laten zien dat het gebruik van indexen die corrigeren voor bodemruis minder gevoelig zijn voor verzadiging dan NDVI. Daughtry et al. (2000) laat zien dat het gebruik van GDNVI minder gevoelig is voor verzadiging dan NDVI en SAVI. Erdle et al. (2011) laten zien dat de reflectie in rood sneller verzadigd dan de reflectie in NIR. Anderen vonden dat de indexen REP en SR minder gevoelig zijn voor verzadiging dan NDVI (Heege et al., 2008; Strenner & Maidl, 2010). Het is onduidelijk in welke mate de hierboven gevonden resultaten algemeen

toepasbaar zijn: er is variatie in gewastype, bodemsoort, gebruikte sensors en (statistische) analysemethoden;.

- de keuze voor hyperspectrale in plaats van breedband sensoren: Mutanga et al (2004) doet de aanbeveling om gebruik te maken van smalband sensoren bij hoge LAI-waarden. Golflengtes die vlakbij het maximale absorptievermogen van chlorofyl liggen geven vaak een betere voorspelling van het chlorofylgehalte dan de golflengte waarbij maximale absorptie kan plaatsvinden (Curran, 1989); en
- aanpassing van klassieke gewasindexen: Gitelson (2004) laat zien dat het introduceren van een extra parameter die de relatieve invloed van het rode spectrum aanpast ten opzichte van de NIR leidt tot een lagere gevoeligheid voor verzadiging. Een vergelijkbare aanpak wordt gebruikt door Vincini et al. (2008) om een chlorofyl gebaseerde index robuuster te maken bij hogere LAI-waarden.

Uit de geanalyseerde data blijkt dat geen van de commerciële sensoren systematisch een betere inschatting van biomassa en gewasontwikkeling geeft. De resultaten zijn vergelijkbaar. Dit wordt mede veroorzaakt dat de meeste studies gebruik maken van een beperkt aantal vegetatie-indexen.

4.3 *Crop sensing: stikstofgehalte en -opname*

4.3.1 Inleiding

Stikstof is het belangrijkste nutriënt voor een goede gewasproductie. De gewasopname kan variëren tussen 100 en 300 kg per hectare. Stikstof speelt een rol in vrijwel alle chemische processen in een plant; het komt voor in aminozuren, eiwitten en suikers. Het is nodig voor celdeling, groei en fotosynthese, en is erg mobiel binnen de plant. Tekorten aan stikstof verlagen de opbrengst, veroorzaken vergeling van het blad en belemmeren de groei.

Juist deze kenmerken zijn zichtbaar in het reflectiespectrum (zie hoofdstuk 2). Dit betekent dat sensoren, en de daarvan afgeleide gewasindexen, een inschatting kunnen geven van het N-gehalte en de N-opname van het gewas. Meerdere studies bevestigen dit beeld door te laten zien dat er een significante relatie bestaat tussen het gereflecteerde gewasspectrum en het N-gehalte en N-opname van het gewas (Tabel 1). Om deze reden, en het feit dat N in westerse landen veelal limiterend is, zijn alle bestaande commerciële sensoren gefocust op het schatten van het N-gehalte en N-opname.

Een kort overzicht van de geanalyseerde studies:

- De studies zijn als volgt verdeeld over de verschillende type sensoren: ASD Field Spec (19), CropCircle (12), GreenSeeker (19), Yara N-sensor (9), SPAD (12), luchtfoto's (8), satelliet (5), en overig (26). Voor de Fritzmeijer – ISARIA zijn nog geen gegevens bekend.
- De sensoren zijn getest op de volgende gewassen: wintertarwe, granen, aardappel, maïs, gras, gerst, soja, ui, suikerbiet en tomaat.
- Er worden standaard diverse N-trappen aangelegd: het aantal varieert van 2 tot 8.

4.3.2 Bruikbaarheid sensoren en gewasindexen

Gewassensoren zijn geschikt om op een vlugge en goedkope manier een inschatting te geven van het N-gehalte in een gewas. Door gebruik te maken van gewasindexen kan tevens een betrouwbare inschatting worden gegeven van de N-opname door het gewas (Bijlage 1, Tabel 1). De relatie met N-

opname is beter dan de relatie met N-gehalte door een positieve interactie met biomassa. Toepassing van gewassensensoren kan leiden tot een significante reductie in N-giften (bijvoorbeeld, Biermacher et al., 2006; Schroder et al., 2000; Olf et al., 2005; Berntsen et al., 2006; Tremblay & Belec, 2006; Zillman et al., 2006).

Uit de analyse blijkt dat gewassensensoren toepasbaar zijn in vrijwel alle gewassen (Bijlage 1, Tabel 1). In Nederland is het onderzoek voornamelijk uitgevoerd in aardappelen. Er zijn, vanuit het oogpunt van gepubliceerde resultaten, geen redenen om de ene sensor te prefereren boven de andere sensor. Over het algemeen is er een goede tot heel goede correlatie tussen gemeten reflectiespectra, gewasindexen en het N-gehalte of N-opname (Bijlage 1, Tabel 1). Proeven waarin verschillende sensoren tegelijkertijd zijn getest laten zien dat aanwezige verschillen vooral systematisch en sensor afhankelijk zijn. Deze systematische verschillen hangen samen met: verschillen in meetoppervlak, sensortechniek (lichtbron, gebruikte banden, resolutie), en timing. De bruikbaarheid van de geëvalueerde sensoren hangt af van een aantal factoren: het groeistadium, de weersomstandigheden, en de nauwkeurigheid en robuustheid van de sensor.

Alle vegetatie-indexen kunnen gebruikt worden, waarbij indexen die corrigeren voor bodemreflectie een bredere bandbreedte (een bredere toepassing) lijken te hebben. Bovendien lijken de indexen die corrigeren voor bodemreflectie minder gevoelig te zijn voor verzadiging. Deze gevoeligheid hangt echter ook af van de bandbreedte van de sensoren die gebruikt worden om de vegetatie-index te berekenen. Recent ontwikkelde vegetatie-indexen zijn vaak gebaseerd op nauwe spectrale banden of gebruiken reflectiegegevens van meer dan 2 banden. Recente wetenschappelijke publicaties suggereren dat deze informatie nauwkeuriger is dan breedband informatie. Het geeft bovendien de mogelijkheid om tot in meer detail het gewasspectrum te analyseren. Het gebruik van fysische modellen geeft in principe meer inzicht in de achterliggende processen dan het gebruik van vegetatie-indexen (Dorigo et al., 2007). In veel commerciële producten zijn de bovengenoemde gegevens niet beschikbaar.

4.3.3 Enkele randvoorwaarden en aanvullende opmerkingen

De bestaande sensoren gaan er in principe van uit dat veranderingen in chlorofylgehalte afhangen van het N-aanbod. Uiteraard spelen in de praktijk ook allerlei andere stressfactoren een rol, zoals vochttekort, ziektes en plagen, en tekorten aan zwavel of andere (micro)nutriënten (Roy, 1989; Wollring, 1998; Lee et al., 2010; Samborski et al., 2009; Knuijvers, 2010). In sommige gevallen verdwijnt zelfs de mogelijkheid om nutriëntentekorten (waaronder stikstof) te detecteren: Christensen (2004) bijvoorbeeld vond dat het niet mogelijk was om bij waterstress verschillen in N-gehalte te detecteren. De huidige algoritmes die gebruik maken van gewasindexen nemen deze variabelen niet mee in hun berekening van het optimale N-advies.

Het gebruik van sensorinformatie hangt mede af van de resolutie, meetfrequentie en gewenste toepassing. Informatie via satellieten kan wekelijks tot maandelijks (MijnAkker) of 3x per groeiseizoen (Terrasphere) worden aangeleverd. De resolutie bedraagt 2 tot 10 m. Deze informatie kan gebruikt worden voor het instellen van verschillende managementzones binnen het perceel. Sensorinformatie via *near sensing* systemen zijn per direct beschikbaar en hebben een resolutie van 0,6 m. Hierdoor zijn ze beter in staat om direct vertaald te worden naar een locatiespecifiek N-advies.

De algoritmes die ontwikkeld zijn om een N-advies te geven zijn sensor specifiek. Dit geldt niet alleen voor de hoeveelheid correcties die toegepast worden (bijvoorbeeld voor N-levering van de bodem) maar

ook voor het type relatie (lineair, exponentieel). De gekalibreerde parameters zijn vaak van toepassing voor een specifiek gewas, sensor en monstertijdstip.

Het is belangrijk om voldoende variatie in bodemeigenschappen en gewasstadia te hebben voor kalibratie van algoritmes. Deze variatie kan gecreëerd worden door verschillende percelen mee te nemen, N-trappen aan te leggen, of op verschillende tijdstippen in het groeiseizoen te meten. Het gebruik van N-trappen heeft de voorkeur.

Het reflectiesignaal van sensoren wordt beïnvloedt door de meetmethodiek (zei hoofdstuk 2) en door weersomstandigheden. Dit kan mogelijk verklaren waarom het signaal varieert over de dag (Povh et al., 2009; Shaver, 2010; Scharf, 2010). Een analyse van signaal - drift gedurende een werkgang is niet bekend. Zolang de invloed van deze factoren niet duidelijk is, moeten deze zoveel mogelijk gelijk worden gehouden (bijvoorbeeld meting onder vergelijkbare weerscondities en meetstippen).

4.3.4 Vergelijking commerciële sensoren

Er zijn circa 10 studies gepubliceerd waarin een vergelijking is gemaakt tussen de commercieel beschikbare sensoren. De vergelijking kan op twee niveaus worden gemaakt: een vergelijking op basis van de standaard output of op basis van identieke output. Beide benaderingen zijn te verdedigen (en worden gebruikt) hoewel de tweede benadering meer inzicht geeft in de sensorspecifieke bruikbaarheid. Een directe vergelijking van CropCircle en YARA N-sensor maakt bijvoorbeeld niet duidelijk wat de oorzaak is van mogelijke verschillen; het is een black-box vergelijking waarin de technische eigenschappen van de sensor (aantal banden, lichtbron, resolutie, etc.) en de methodiek (gewas-sensor afstand, meethoek, gemeten oppervlak, etc.) verweven zijn.

Hieronder volgt een korte omschrijving van de studies die een vergelijking hebben uitgevoerd tussen de commerciële sensoren⁶:

- Hanvronka (2007) vergelijkt de Yara N-sensor (3 banden, geen actieve lichtbron) met de CropCircle ACS210 (3 banden, actieve lichtbron) in veldexperimenten met wintertarwe. De NDVI index was sterk gerelateerd aan biomassa, N-gehalte en N-opname, en varieerde gedurende het seizoen. De resultaten van beide sensoren waren vergelijkbaar.
- Hong et al. (2007) evalueren de bruikbaarheid van SPAD 502, de GreenSeeker (2 banden, actieve lichtsensor) en de CropCircle (4 banden, geen actieve lichtsensor) voor droge stof in maïs bij het V6-7 en V8-9 stadium. De resultaten voor de verschillende sensoren zijn vergelijkbaar (getest voor NDVI, GNDVI, en SR).
- Tremblay et al. (2009) vergelijken de Yara N-sensor (20 banden, geen actieve lichtbron) met de GreenSeeker (2 banden, actieve lichtbron) in een veldexperiment met maïs en wintertarwe. Beide sensoren waren geschikt om veranderingen in biomassa te detecteren. De exacte NDVI waarden varieerden over de tijd en met de gebruikte meettechniek (zichthoek, hoogte, resolutie). De GreenSeeker had minder last van verzadiging dan de Yara N-sensor.
- Barker & Sawyer (2010) vergelijken de bruikbaarheid van GreenSeeker 506 met CropCircle ACS210 om de optimum N-bijgift voor maïs te voorspellen. Beide sensoren waren in staat om N-stress verschijnselen te detecteren waarbij de voorspelling van CropCircle iets beter was dan de GreenSeeker (R^2 steeg van 0,65 naar 0,75).

⁶ Let wel, de resultaten tussen studies zijn niet direct vergelijkbaar omdat de gebruikte types niet altijd identiek zijn (indien de informatie bekend is, wordt het type vermeld).

- Jukema & Lamantia (2010) vergelijken de CropCircle ACS470 met de CropScan in diverse veldexperimenten met aardappels. De N-opname werd het best geschat met de gewasindex WdVI, gevolgd door NDVI en REP. De WdVI waarden voor beide sensoren waren sterk gecorreleerd.
- Shaver et al. (2010) evalueren de bruikbaarheid van GreenSeeker 505 en de CropCircle ACS210 onder verschillende omstandigheden in een kas. De onderzochte factoren zijn: groeistadium maïs, wind, rij-afstand, snelheid sensor en N-gift. Beide sensoren waren in staat om het effect van N-beschikbaarheid en groeiontwikkeling te meten. De resultaten voor GreenSeeker werden beïnvloed door de rijnsnelheid. Wind had geen effect op de bruikbaarheid van beide sensoren.
- Tucker (2010) vergelijkt de N-bijmest adviezen van CropCircle en GreenSeeker met de bestaande bemestingspraktijk in granen. Hij vond geen opbrengstverschillen tussen percelen die volgens het advies van CropCircle en GreenSeeker waren bemest.
- Kooistra et al. (2011) vergelijken de bruikbaarheid van diverse sensoren: CropScan, FieldSpec, CropScan, GreenSeeker, Yara, Fritzmeijer Isaria, Crop Circle, WorldView2 en Mijnakker. De sensoren zijn getest in veldexperimenten met aardappels. De verschillende sensoren laten vergelijkbare maar sensorspecifieke relaties zien met biomassa. In tegenstelling tot het gebruik van NDVI en WdVI zijn het voornamelijk de hybride gewasindexen die een goede relatie laten zien met het N-gehalte. De gebruikte hybride gewasindexen vereisen echter specifieke golflengtes die niet door alle commerciële sensoren wordt ondersteund.
- Evert et al. (2011) concluderen op basis van veldproeven in aardappels dat de bruikbaarheid van sensoren om het N-gehalte te schatten afneemt van CropScan (8-16 banden, WdVI) = YARA N-sensor (51 banden, S1, WdVI) > CropCircle (3 banden, WdVI) > GreenSeeker (2 banden, NDVI). Het gebruik van WdVI lijkt beter te zijn dan NDVI om biomassa en N-gehalte te schatten.
- Erdle et al. (2011) vergelijken de Yara N-sensor ALS (selectie 4 banden, actieve lichtbron), de GreenSeeker RT100 (2 banden, actieve lichtbron) en de CropCircle ACS-470 (3 banden, actieve lichtbron). De gewasindex SR (760/730) bleek beter in staat om N-gehalte en N-opname te schatten dan NDVI. De relatie van NDVI met biomassa, N-opname of N-gehalte was vergelijkbaar voor de verschillende type sensoren.

Uit de hierboven beschreven studies blijkt dat in de meeste situaties de verschillende sensoren in staat zijn om het N-gehalte of de N-opname te bepalen. De relaties tussen de gewasindex en de planteigenschappen zijn gewas en sensorspecifiek, wat aangeeft dat ontwikkelde algoritmes niet uitwisselbaar zijn tussen de verschillende sensoren. Commerciële sensoren die meten via meerdere banden hebben een relatief voordeel omdat er meer gewasindexen kunnen worden berekend. Recent onderzoek lijkt het gebruik van smallere banden te prefereren. De vraag of deze verschillen ook uitwerken in een ander N-advies (en opbrengst) is nog onbeantwoord.

4.4 Crop sensing: fosfaatgehalte en -opname

4.4.1 Inleiding

Fosfaat is naast stikstof de belangrijkste nutriënt voor een goede gewasproductie. Het element is voor een aantal processen in de plant onmisbaar. Het speelt onder andere een essentiële rol bij de fotosynthese, de synthese en afbraak van koolhydraten en de overdracht van energie binnen de plant.

Het helpt de plant bij de opslag en het gebruik van energie, is betrokken bij de organisatie en overdracht van erfelijkheidsfactoren (DNA, RNA), en speelt een rol bij de doorlatendheid van celmembranen. Daarnaast bevordert het de wortelgroei, bloei en vruchtzetting (Wild, 1988). Fosfaat is erg mobiel binnen de plant: bij suboptimale N-voorziening of gedurende de vruchtontwikkeling kan fosfaat worden gemobiliseerd naar de delen van de plant met een grote P-behoefte (zoals vruchten en zaden). Het P-gehalte varieert van 0,1 tot 0,6% droge stof, afhankelijk van gewas en groeistadium.

Planten met een gebrek aan P lijken niet tot volledige ontwikkelingen te komen: de bladgroei en het bladoppervlak blijven beperkt. Oudere bladeren vertonen als eerste fosfaatgebrek en vertonen een purperachtige verkleuring (Marschner, 1995). Deze verkleuring wordt veroorzaakt door een ophoping van suikers die de synthese van anthocyaan bevorderen.

Er zijn enkele gebieden in het spectrum die mogelijk een indicatie kunnen geven van het P-gehalte in het gewas:

- Jacob & Lawlor (1991) onderzochten het effect van fosfaatgebrek in maïs, tarwe, en zonnebloemen tijdens de initiële groeifase. Wanneer de plant onder P-stress stond, had het een lagere celdichtheid in het blad dan een plant onder een optimale P-voorziening (zie ook Al-Abbas, 1972). Omdat de NIR-reflectie voornamelijk veroorzaakt wordt door de interne celstructuur van een blad, is het mogelijk dat dit gedeelte van het spectrum een indicatie geeft van het P-gehalte.
- Omdat een plant onder suboptimale P-voorziening een purperachtige verkleuring vertoont (Marschner, 1995), is het mogelijk dat dit zichtbaar is in het blauw - rode gedeelte van het spectrum. Salisbury & Ross (1978) hebben laten zien dat het anthocyaan molecuul (dat verantwoordelijk is voor de purperachtige verkleuring) sterk absorbeert in het groene gedeelte van het spectrum en een verhoogde reflectie heeft in het blauwe en rode gedeelte van het spectrum.
- Een plant onder P-stress kan een lager chlorofyl gehalte hebben (Ayala-Silva & Beyl, 2005), maar dit is niet altijd het geval (Marschner, 1995). Een wijziging in het chlorofylgehalte zal een effect hebben in het zichtbare en NIR deel van het reflectiespectrum.

4.4.2 Gebruikte studies

Een overzicht van studies die naar een relatie tussen reflectiespectrum en P gekeken hebben, met de belangrijkste experimentele gegevens, is weergegeven in Bijlage 1, tabel 1. In totaal zijn 21 gepubliceerde artikelen geanalyseerd. Hiervan zijn 10 studies uitgevoerd onder gecontroleerde condities, waarbij de bladreflectie van individuele bladeren (van planten onder optimale en suboptimale P-voorziening) zijn geanalyseerd. De chemische en spectrale bladanalyse is overwegend uitgevoerd op het moment dat duidelijke gebrekverschijnselen optraden. De gebruikte gewassen in deze experimenten zijn maïs, tarwe, gerst, sla, soja, tomaat en enkele grassoorten.

Er zijn 11 studies die de gewasreflectie in het veld hebben bestudeerd met als doel om een schatting te geven van het P-gehalte in, of de P-opname van het gewas. De onderzochte gewassen zijn: maïs, tarwe, gerst, soja en diverse grassoorten. De gebruikte aanpak houdt veelal in dat gedurende één of meerdere tijdstippen in een groeiseizoen een chemische P-analyse van bladmonsters wordt uitgevoerd terwijl op hetzelfde moment de gewasreflectie wordt gemeten. Dit gebeurt in veldexperimenten waar een aantal P-trappen zijn aangelegd (2 tot 8 P-niveaus) op één perceel of in experimenten met meerdere percelen en een grote range in P-gehaltes. Via (multiple of multivariabele) regressie of neurale

netwerken wordt vervolgens een verband gezocht tussen individuele spectra, combinatie van spectra (o.a. gewasindexen) en het P-gehalte in het gewas. In vrijwel alle gevallen is er geen onafhankelijke validatie van de gevonden relaties: de relaties worden gekalibreerd op een subset van de verzamelde gegevens.

4.4.3 Bruikbaarheid sensoren en vegetatie indexen

Een P-tekort heeft een significant effect op het reflectiespectrum. Geobserveerde effecten zijn: een hogere hoeveelheid reflectie over het gehele spectrum, maar vooral in het groene gedeelte (500-630 nm). Resultaten zijn gebaseerd op de analyse van bladreflectie van soja (Milton et al., 1991), maïs (Graeff et al., 2001), sla (Pacumbaba & Beyl, 2011) en tarwe (Ayala-Silva & Beyl, 2005) onder P-stress condities. Een P-tekort veroorzaakt bovendien vaak (niet altijd) een verschuiving van het REP naar kortere golflengtes (~3-6 nm), waarbij deze verschuiving wordt verklaard door een achtergebleven *normale* verschuiving naar langere golflengtes (Milton et al., 1991). De voorziening van de overige nutriënten was optimaal in bovenstaande experimenten, wat aangeeft dat de geobserveerde resultaten enkel veroorzaakt worden door een variatie in P-beschikbaarheid. Effecten op het NIR-deel van het spectrum zijn onduidelijk: soms wordt een hogere reflectie gemeten en soms een lagere reflectie. Enkele studies vinden geen P-effect op het groenrode deel van het visuele spectrum (Al-Abbas et al., 1972; Christensen & Joergsen, 2003; Christensen et al., 2005).

Correlatieve studies laten eenzelfde beeld zien. Golflengtes die gebruikt kunnen worden om het P-gehalte te voorspellen, lijken voornamelijk in het groen tot groenrode deel van het spectrum te liggen (o.a. Ponzoni, 1999; Ayala-Silva & Beyl, 2005). Dit deel van het gewasspectrum is echter sterk gecorreleerd aan de hoeveelheid biomassa, en verklaart waarom een inschatting van de P-opname nauwkeuriger is dan die van het P-gehalte (Sembiring et al., 1998; Pimstein et al., 2011). Dit verklaart tevens dat in de analyse van gewasspectra er een sterke interactie aanwezig is tussen het chlorofylgehalte en de beschikbaarheid van fosfaat en stikstof.

Effecten in het blauwe gedeelte van het spectrum zijn moeilijk meetbaar ten gevolge van verzadiging, maar enkele studies vinden toch dat deze in combinatie met andere golflengtes gebruikt kan worden als mogelijke voorspeller van het P-gehalte. Hierbij wordt overigens gebruik gemaakt van *off-centre* golflengtes: golflengtes die niet het maximum absorberen, maar er vlak in de buurt liggen (voor chlorofyl *a* vlak bij 430 nm en bij chlorofyl *b* vlak bij 460 nm). Dit is het geval voor de studies van Sembiring et al. (1998), Osborne et al. (2002), Christensen & Joergsen (2003) en Kawamura et al. (2011).

De voorspellende waarde van diverse vegetatie indexen voor het P-gehalte is beperkt: relaties zijn overwegend niet significant. Verschillen tussen de indexen zijn bovendien klein en mijns inziens verwaarloosbaar. De correlatie coëfficiënt (r) varieert van $< 0,2$ tot $0,55$ (Pimstein et al., 2011), van $0,1$ tot $0,96$ (Kawamura et al., 2011), van $< 0,1$ tot $0,64$ (Osborne et al., 2002; 2004), van $< 0,1$ tot $0,64$ (Sembiring et al., 1998a; 1998b) en van $0,31$ tot $0,43$ (Sambo et al., 2009). De voorspellende waarde is te laag voor directe toepassing van de gekalibreerde modellen.

In veel gevallen is de statistische waarde van de onderzochte studies laag. Er wordt vaak gebruik gemaakt van (te) kleine datasets met het risico van overfitting (soms duidelijk aantoonbaar) en standaard statistische aannames zijn vaak niet getoetst (o.a., aanwezigheid outliers en groepen binnen een geanalyseerde dataset; ook soms duidelijk aantoonbaar). Huidige resultaten zijn bovendien duidelijk gelimiteerd tot de gekalibreerde dataset: validatie resultaten voor P-gehaltes zijn niet bemoedigend

(Pimstein et al., 2011).

Enkele studies maken gebruik van volledige spectra door gebruik te maken van multivariate statistische technieken. De voorspellende waarde van deze PLS modellen is overwegend beter dan die van individuele golflengtes of gewasindexen (Pimstein et al., 2011).

Enkele aandachtspunten en toekomstperspectieven

- De effecten van P-tekort zijn vooral zichtbaar in een vroeg groeistadium. Dit biedt mogelijkheden om aanwezige P-tekorten via spectrale gewasanalyse vroeg in het seizoen op te sporen. Er zijn geen resultaten van uitgebreide veld- of laboratoriumexperimenten bekend waarin dit op een betrouwbare manier is bewezen of afgewezen. Het veldonderzoek in deel 2 van dit project zou hierop een antwoord kunnen/moeten geven. Interactie tussen P en N moet hierin worden meegenomen.
- Analyse van gewasspectra laat in het groeiseizoen lijkt geen informatie te geven over het P-gehalte of de P-beschikbaarheid. De P-opname aan het einde van het seizoen kan echter redelijk accuraat worden geschat op basis van gewasindexen; dit is echter een indirect verband veroorzaakt door de hoeveelheid biomassa.
- Water stress kan ervoor zorgen dat de effecten van N-, P- en K-tekorten niet meer detecteerbaar/te onderscheiden zijn in gewasspectra (Christensen, 2004). Randvoorwaarde voor veldexperiment is daarom dat er geen vochtgerelateerde stress aanwezig is of dat via fysische modellen gecorrigeerd is voor dit effect.

4.5 *Crop sensing: kaliumgehalte en -opname*

4.5.1 Inleiding

Kalium is na stikstof het nutriënt dat in de grootste hoeveelheid door gewassen wordt opgenomen. Het is geen bestanddeel van de organische moleculen waaruit de plant is samengesteld, maar komt voor in het celvocht als K-ion. Deze kaliumionen vervullen een essentiële functie bij de vochtthuishouding en de stofwisselingsprocessen in de plant (Marschner, 1995).

Het optimum K-gehalte varieert tussen 2 en 5% droge stof. Een kaliumtekort zorgt voor een afnemende groei, gedeelte afsterving van bladeren (m.n. bladranden), en een afnemend chlorofylgehalte in oude bladeren (chlorosis) door een herverdeling van K binnen de plant (Marschner, 1995). Omdat K belangrijk is voor het handhaven van de osmotische druk in de plantencellen zal bij een tekort aan K de fotosynthese, en daarmee de groei voor de plant, worden geremd. Bovendien is de plant gevoeliger voor droogtestress.

Mogelijke spectrale informatie die gerelateerd is aan K-gehalten zal dus samenhangen met de hoeveelheid pigment (voornamelijk chlorofyl) in een blad. Verschillende studies hebben inderdaad aangetoond dat chlorofylgehalten gerelateerd zijn aan de beschikbaarheid van K (Oosterhuis & Bednarz, 1997; Lamrani et al., 1996: in Fridgen & Varco, 2004).

4.5.2 Gebruikte studies

Een overzicht van studies die naar een relatie tussen reflectiespectrum en K gekeken hebben, met de belangrijkste experimentele gegevens, is weergegeven in Bijlage 1, tabel 2. In totaal zijn 13

gepubliceerde artikelen geanalyseerd. Hiervan zijn 7 studies uitgevoerd onder gecontroleerde condities, waarbij de bladreflectie van individuele bladeren (van planten onder optimale en suboptimale K-voorziening) zijn geanalyseerd. De chemische en spectrale bladanalyse is overwegend uitgevoerd op het moment dat duidelijke gebrekverschijnselen optraden. De gebruikte gewassen in deze experimenten zijn maïs, tarwe, gerst, sla, en tomaat.

Er zijn 6 studies die de gewasreflectie in het veld hebben bestudeerd met als doel om een schatting te geven van het K-gehalte in, of de K-opname van, het gewas. De onderzochte gewassen zijn: maïs, tarwe, gerst, katoen, suikerriet en diverse grassoorten. De gebruikte aanpak houdt veelal in dat gedurende één of meerdere tijdstippen in een groeiseizoen een chemische K-analyse van bladmonsters wordt uitgevoerd terwijl op hetzelfde moment de gewasreflectie van het gewas wordt gemeten. Dit gebeurt in veldexperimenten waar een aantal K-trappen zijn aangelegd (2 tot 4 K-niveaus) op één perceel of in experimenten met meerdere percelen en een grote range in bodem K-gehalten. Via (multiple of multivariabele) regressie wordt vervolgens een verband gezocht tussen individuele spectra, combinatie van spectra (o.a. gewasindexen) en het K-gehalte in het gewas.

4.5.3 Bruikbaarheid sensoren en vegetatie indexen

Analyse van het bladspectrum onder gecontroleerde K-stress condities laat geen duidelijk effect zien van K-tekorten op het spectrum. Er was geen verschil waarneembaar in VIS en NIR (Christensen & Joergsen, 2003; Fridgen & Varco, 2004; Christensen et al., 2005; Pacamumba & Beyl, 2011) of een hogere reflectie over het gehele spectrum (Ayala-Silva & Beyl, 2005; Pacamumba & Beyl, 2011) of een hogere reflectie in VIS en een lagere reflectie in NIR (Al-Abbas et al., 1972; Ayala-Silva & Beyl, 2005). Als er een effect is op het zichtbare deel van het spectrum, dan zijn deze vooral te vinden in het groenrode deel van het spectrum.

Correlatieve studies geven een vergelijkbaar resultaat. De correlatie coëfficiënten voor de gebruikte gewasindexen of geselecteerde golflengtes varieerde van <0,1 tot 0,73 (Pimstein et al., 2011), van 0,2 tot 0,92 (Kawamura et al., 2011), van 0,31 tot 0,43 (Sambo et al., 2009), van 0,36 tot 0,5 (Ponzoni et al., 1999). Ook bij deze K-gerelateerde studies is de statistische analyse overwegend zwak (tot onjuist uitgevoerd).

Het gemeten K-effect op het gewasspectrum heeft een sterke overlap met stikstof en de hoeveelheid biomassa. Gebruik van N/K-verhouding en K-opname is daarom beter te voorspellen dan het K-gehalte. Gebruik van PLS modellen geeft ook hier een beter resultaat dan individuele golflengtes of afgeleide gewasindexen (Pimstein et al., 2011). Wel moet opgemerkt worden dat ook gekalibreerde PLS modellen locatiespecifiek zijn, wat uiteraard de toepasbaarheid ervan verkleint.

4.6 *Crop sensing: overige nutriënten*

Er zijn enkele studies die het effect bestuderen van micronutriënten op gewasspectra (Al-Abbas, 1972; Masoni et al., 1996). Vrijwel alle stressfactoren veroorzaken een lagere hoeveelheid chlorofyl, en daarmee hogere reflectie, en een verschuiving van de REP (Christensen, 2004). In veel gevallen werden stresssymptomen zichtbaar in hetzelfde golflengtegebied, wat uiteraard de detectie van specifieke tekorten lastig maakt (Masoni et al., 1996). Voor veel nutriënten is er echter geen biochemische en procesmatige kennis beschikbaar die de relatie tussen spectrum en stressfactor

verklaart. Het is onduidelijk of het in de toekomst mogelijk is om deze interactie tussen nutriënten op te lossen; gebruik van fysische modellen zullen naar alle waarschijnlijkheid een beter resultaat geven dan statistische methoden. Het huidige onderzoek hierna heeft nog een erg fundamenteel karakter en praktische toepassingsmogelijkheden zullen niet op korte termijn beschikbaar komen.

4.7 *Hard fruit*

De hierboven beschreven studies zijn afgebakend binnen een agrarische context waarbij gefocust is op akkerbouwgewassen. Het is waarschijnlijk dat de hierboven beschreven bevindingen ook toepasbaar zijn voor de teelt van hard fruit als appels en peren. Binnen Nederland is het mogelijke gebruik van gewasreflectie om biomassa ontwikkeling en biochemische eigenschappen van de fruitbomen te schatten echter nog weinig onderzocht. Er zijn voor zover bekend nog geen commerciële toepassingen beschikbaar om gewasontwikkeling en fruitkwaliteit te volgen via gewassensoren. Daarentegen wordt gewasreflectie van fruit(bomen) in Nederland voornamelijk gebruikt voor de detectie/ behandeling van gewasschade door ziekten en plagen.

. Een quickscan van de literatuur laat het volgende zien:

- Schattingen van het chlorofyl gehalte (en daarmee van het N-gehalte) kunnen worden afgeleid van het geanalyseerde gewasspectrum (o.a. Yang & Lv, 2011a; 2011b; Spáčilová & Safránková, 2011; Ding et al., 2009; Blackburn, 2007; Kempeneers et al., 2006; Heisel et al., 1999). Er is vooralsnog geen overeenstemming over de te gebruiken golflengtes, bandbreedtes, gewasindex of de te gebruiken statistische verwerkingsmethoden.
- Basayigit & Senol (2009) gebruikten hyperspectrale gegevens om de nutriëntopname (o.a. N, P, en K) van fruitbomen te schatten (o.a. peer, kers, perzik). Het onderzoek is uitgevoerd in Turkije. Gebruikt makend van de multiple regressie methode waren de onderzoekers in staat om de gemeten bladreflectie om te zetten in een schatting van het N, P en K-gehalte. De kwaliteit/ betrouwbaarheid van de statistische verwerking is echter laag.
- Verschillende studies laten zien dat het gebruik van gewasreflectie mogelijkheden biedt om gewasschade in fruit te herkennen (Van de Zande et al., 2008; 2010; Delalieux et al., 2009; Kempenaar et al., 2008; Zhang et al., 2008), eventueel in combinatie met biomassa-afhankelijke dosering van gewasbeschermingsmiddelen.
- Gebruik makend van hyperspectra van individuele appels is Herold et al. (2005) in staat om een schatting te geven van gewasontwikkeling en optimale oogstdatum. Vergelijkbare resultaten worden gepresenteerd door Merzlyak et al. (1999).

Gebaseerd op de bovenstaande studies is het waarschijnlijk dat gewassensoren in staat zijn om de gewasontwikkeling en nutriëntenopname van fruitbomen te schatten. Validatie in het veld onder Nederlandse omstandigheden moet duidelijk maken of deze verwachting reëel is. Opgemerkt wordt dat een vertaalslag van een gemeten spectrum naar een bemestingsadvies op een andere manier vorm zal krijgen dan een bemestingsadvies voor akkerbouwgewassen. Op dit moment zijn hiervoor zijn echter nog geen algoritmes en meetprotocollen ontwikkeld.

5 Conclusies & Aanbevelingen

5.1 Inleiding

Het doel van deze literatuurstudie was om aan te geven op welk wijze sensoren en satellieten bruikbaar zijn voor de schatting van:

- de actuele gewasontwikkeling,
- de actuele gewasopname van essentiële nutriënten,
- de bruikbaarheid van WdVI, NDVI, en andere indexen, en
- bij welke gewassen en gronden dit perspectiefvol is

5.2 Schatting van gewasontwikkeling

Alle onderzochte sensoren zijn in staat om de gewasontwikkeling te volgen door het analyseren van het reflectiespectrum. Doordat bodem en gewas beide verschillend reflecteren in het VIS en NIR deel van het spectrum kan deze informatie gebruikt worden om de hoeveelheid biomassa in te schatten. Dit is vrijwel voor alle gewassen mogelijk. In deze studie is dat aangetoond voor onder andere aardappel, wintertarwe, maïs, granen, gerst, grasland, soja, bieten en koolzaad. De wereldwijde focus ligt bij granen, maïs en aardappel. Belangrijk: de gepubliceerde relaties tussen gewasspectra en biomassa zijn gewas-, sensor-, en mogelijk locatiespecifiek.

Een keuze voor één of meerdere sensoren kan gemaakt worden op basis van de technische specificaties, de economische rendabiliteit en de gebruikersvriendelijkheid (zie hoofdstuk 3). Sensoren die gebruik maken van meerdere banden en een actieve lichtbron hebben een relatief voordeel boven sensoren met weinig banden en geen actieve lichtbron. De voordelen en nadelen van *near sensing* in vergelijking met *remote sensing* zijn eerder toegelicht (paragrafen 2.3 en 3.10). Alle sensoren, met uitzondering van Mijnakker, zijn volledig gebaseerd op statische relaties tussen gewasreflectie en biomassa.

Of een combinatie van gewassensoren een meerwaarde oplevert boven een individuele sensor is nooit onderzocht, maar lijkt niet waarschijnlijk in verband met afhankelijkheidsrelaties.

5.3 Actuele gewasopname van essentiële nutriënten

Deze studie beperkt zich tot de opname van stikstof, fosfaat en kalium. Voor stikstof, over het algemeen het meest limiterende nutriënt in Westerse landbouwsystemen, is het goed mogelijk om een inschatting te geven van het gehalte en de opname. Vrijwel alle onderzochte studies vonden een sterk tot zeer sterk verband tussen het geanalyseerde reflectiespectrum en het chlorofylgehalte, het N-gehalte en de N-opname (Bijlage 1, Tabel 1). De meest onderzochte gewassen zijn granen, maïs en aardappels. Een kritische blik van de gebruiker blijft noodzakelijk omdat alle sensoren de invloed van andere stressfactoren negeren. Concreet gaat het hierbij om vochtgehalte, andere nutriëntentekorten (vooral zwavel), en ziekten en plagen.

De bruikbaarheid van de verschillende sensoren is vergelijkbaar in die zin dat ze allemaal in staat zijn

om een inschatting te geven van het N-gehalte en de N-opname van een gewas. Met uitzondering van Mijnakker maken alle sensoren alleen gebruik van statistische relaties. Dit zorgt ervoor dat de geproduceerde gewasindexen en afgeleide N-adviezen niet algemeen geldend zijn. Kalibratie op het perceel is daarom aan te bevelen; vrijwel alle commerciële *near sensing* sensoren geven daarvoor de mogelijkheid. Een gebruikersvriendelijk alternatief dat toegepast wordt door CropCircle en Yara is het systeem van relatieve autokalibratie, waarbij een vooraf vastgestelde gift in overeenstemming met de kleurverschillen in het gewas over het perceel wordt verdeeld.

Verschillen in P-status hebben een meetbare invloed op het gewasspectrum (paragraaf 3.3.2). Dit biedt mogelijkheden om via crop sensing te bepalen of een gewas in het begin van het groeiseizoen P-tekorten aanwezig zijn. De gepubliceerde resultaten zijn niet compleet en betrouwbaar genoeg om hierover al een conclusie te kunnen trekken. Uitgebreid veldwerk moet duidelijk maken of het detecteren van P-tekorten in het voorjaar inderdaad mogelijk is. Enkele randvoorwaarden hiervoor zullen later worden benoemd. De P-opname aan het einde van het seizoen is redelijk goed te schatten.

Verschillen in K-beschikbaarheid hebben geen tot weinig effect op het gewasspectrum (paragraaf 3.3.3), en de veranderingen in reflectiespectra vertonen een grote overlap met stikstof. Een betrouwbare schatting van het K-gehalte op basis van gewassensoren lijkt daarom niet mogelijk. Gebruik van de N/K-ratio leidt mogelijk tot betere resultaten. Ook voor K is er een sterke interactie met biomassa ontwikkeling, waardoor de K-opname wel geschat kan worden op basis van gemeten gewasspectrum.

Gebruik van PLS modellen of fysieke modellen lijkt tot betere inschattingen te leiden dan het gebruik van individuele golflengtes of een combinatie van golflengtes (zoals in een gewasindex). Sensoren die gebruik maken van hyper- of ultraspectrale banden (Figuur 2.3) hebben daarnaast een hogere potentie om verschillen in N en P te schatten dan breedband of multispectrale sensoren. De huidige commerciële sensoren hebben deze mogelijkheid (nog) niet.

5.4 *Bruikbaarheid gewasindexen*

Er zijn honderden gewasindexen ontwikkeld in de afgelopen jaren om gewasontwikkeling (biomassa) of stikstofgehalte te schatten. Gebaseerd op de onderzochte studies is het niet mogelijk om een index te kiezen die voor elk gewas en onder alle omstandigheden het beste resultaat oplevert. Zelfs op gewasniveau is dat niet mogelijk. De meest gebruikte indexen zijn ratio indexen (paragraaf 2.3.5) waarvan de NDVI de meest bekende is. Het is bekend dat deze indexen gevoelig zijn voor variatie in bodemreflectie bij lage LAI-waarden en voor verzadiging bij LAI waarden hoger dan 2.5-3.0. Simpele aanpassingen van de ratio index kunnen dit probleem verminderen (paragraaf 3.2), maar vaker wordt aanbevolen om gebruik te maken van orthogonale of hybride gewasindexen. In Nederland wordt daarom vaak gebruik gemaakt van de WDWI. Het nadeel van deze index is dat de gebruikte correctiefactor geen rekening houdt met variatie in vochtgehalte. De REP index lijkt in vergelijking met NDVI en WDWI gevoeliger voor variaties in de hoeveelheid chlorofyl, en daarmee ook een betere schatter van N-opname en N-gehalte.

5.5 *Toepassing in welke gronden*

De fysische en chemische eigenschappen van een bodem beïnvloeden niet alleen het gewasspectrum

maar ook de gewasontwikkeling en nutriëntenopname. De invloed van de bodem op het gewasspectrum neemt af gedurende de groei en wordt vaak verdisconteerd door het gebruik van orthogonale/ hybride gewasindexen. Het effect van bodemeigenschappen op de bruikbaarheid van gewassensoren en indexen is echter nog niet systematisch onderzocht. Gezien de variatie in de onderzochte studies is het goed mogelijk dat de invloed van bodemtype verdwijnt bij perceelsgebonden calibratie. Ook het meettijdstip speelt hier een rol: bij hogere LAI is de invloed van bodemgerelateerde variatie niet zichtbaar in het reflectiespectrum.

Het combineren van bodemgerelateerde informatie met gewasspectra lijkt de voorspellende waarde van gewasindexen te verhogen (Leon et al., 2003; Teal et al., 2006). Dat is logisch omdat een analyse van een gewasspectrum een puntmeting is in de tijd en weinig zegt over de beschikbare hoeveelheid nutriënten in de bodem.

Het vochtgehalte in de bodem (een textuurafhankelijk eigenschap) kan de bruikbaarheid van sensoren om nutriëntgehalten te schatten sterk beïnvloeden, in het bijzonder bij watertekorten (Joergensen, 2004).

5.6 *Perspectieven*

Uit de onderzochte literatuur blijkt dat er enkele ontwikkelingen in gang zijn gezet die de potentie van sensoren (kunnen) verhogen om een accuraat en gebruikersvriendelijk bemestingsadvies te maken:

- Er is een trend om meer en meer gebruik te maken van gedetailleerde spectrale informatie (Thenkabail 2002; Cho 2007; Muller 2008). De commerciële near sensing systemen kunnen op dit moment alleen op een beperkt aantal banden de reflectie meten, maar als deze trend zich doorzet zullen ook deze sensoren gebruik gaan maken van hyperspectrale banden. Hetzelfde geldt voor het gebruik van PLS of alternatieve statistische modellen die gebruik maken van alle informatie die er in het spectrum zit. Het is waarschijnlijk dat deze informatie de schatting van gewaskenmerken verbetert ten opzichte van de huidige gewasindexen.
- Combinatie van bodem, omgevingsfactoren en gewasgegevens (Kikkert, 2009; Raun et al., 2005; Teal et al., 2006, de Goense, 2010) kunnen de relaties met gewasontwikkeling, nutriëntopname en bemestingsadviezen verbeteren. Het algoritme dat gebruikt wordt door GreenSeeker bijvoorbeeld corrigeert de gewasindex voor growing degree days, een temperatuur variabele.
- Het combineren van spectra die op meerdere momenten gedurende het seizoen zijn genomen verhoogd de voorspellende waarde en praktische toepasbaarheid van afgeleide bemestingsadviezen (Joergensen, 2002; Shanahan, 2008).
- Er komt meer aandacht voor het schatten van foutenmarges en foutpropagatie: is het mogelijk om de onzekerheid op de gemeten spectra te vertalen in een bandbreedte voor N-adviezen?
- Er komt meer en meer aandacht voor gebruikersvriendelijke apparatuur en handleidingen.

5.7 *Praktische aanbevelingen*

Voor toepassing in Nederland is veldonderzoek cruciaal om de betrouwbaarheid van bestaande algoritmes te testen of nieuwe algoritmes te ontwikkelen. Gebaseerd op deze literatuurstudie zijn een aantal aandachtspunten en randvoorwaarden beschreven die cruciaal zijn voor de ontwikkeling en

validatie van sensoren via veldonderzoek. Dit zijn:

- De praktische bruikbaarheid van commerciële sensoren hangt samen met de technische specificaties van de sensor, de mogelijke koppelingen met een kunstmeststrooier, de economische rendabiliteit, en de gewenste toepassing. Voor een keuze tussen één van de sensoren kan gebruik gemaakt worden van de uitgevoerde evaluatie (Tabel 9b). Er lijkt echter geen verband te zijn tussen gewastype, bodemtype en bruikbaarheid van sensoren. Plaatsspecifieke calibratie maakt de invloed van mogelijke verschillen tussen sensoren minder belangrijk.
- De praktische toepassingsmogelijkheden van sensoren hangt sterk samen met de schaal waarop de sensor-informatie beschikbaar is/ komt.
 - Voor het afbakenen van managementzones binnen het perceel zijn satellietbeelden ideaal (indien op tijd geleverd).
 - Voor onderzoeksdoeleinden wordt vaak een hand-held spectroradiometer gebruikt waarbij het gehele spectrum in smalle banden kan worden gemeten (bijvoorbeeld ASD FieldSpec).
 - Voor een snelle en directe analyse van het chlorofylgehalte is een SPAD-502 meter ideaal.
- Er kan gebruik gemaakt worden van bestaande algoritmes die in de software van commerciële sensoren is verwerkt, maar de betrouwbaarheid ervan voor Nederlandse toepassing is onbekend.
- Het is belangrijk dat commerciële sensoren op een vergelijkbare manier worden toegepast wanneer een experiment als doel heeft om de resultaten van de sensoren te vergelijken. Dat betekent concreet een vergelijkbare afstelling op de trekker (hoogte gewas – sensor), ongeveer dezelfde rijnsnelheid (voor GreenSeeker), en toepassing onder vergelijkbare weercondities (bijvoorbeeld geen dauw).
- Het is belangrijk dat de experimentele design, de statistische verwerking en de analyse op een goede manier gebeurt. Er zijn veel studies, in het bijzonder voor P en K, waarvan de conclusies niet valide zijn onderbouwd. Belangrijke aspecten zijn:
 - gebruik van herhalingen;
 - etcgebruik van een voldoende bandbreedte in N of andere nutriënten;
 - evaluatie van statistische uitgangspunten (normale verdeling, overfitting, etc.);
 - gebruik van goede referentiemetingen (aantal, tijdstip, locatie, plantdeel, etc.); en
 - sommige indexen zijn schaalafhankelijk: wanneer gemeten wordt bij verschillende resoluties dan zijn de waarden niet vergelijkbaar (Jiang et al., 2006).
- Wanneer de bruikbaarheid van sensoren wordt vergeleken is het belangrijk om vergelijkbare sensortypen en -output te gebruiken. Bijvoorbeeld, een vergelijking van een YARA N-sensor (zonder actieve lichtbron met output NDVI) en een CropCircle (met actieve lichtbron en met output WdVI) geeft weinig informatie over de oorzaak van mogelijke verschillen.
- Voor een vertaalslag naar de praktijk is het aan te bevelen om in de beoordeling van sensorresultaten niet alleen naar de geproduceerde 'biomassa kaarten' of 'index waarden' te kijken, maar ook naar de uiteindelijke meeropbrengst (per kg toegediende meststof).
- Het is mogelijk om de bestaande data voor stikstof te analyseren via een meta-analyse benadering; deze benadering kan meer inzicht geven in de experimentele condities die bepalend zijn voor de bruikbaarheid van de onderzochte sensoren en mogelijk een afbakening geven waarbinnen ontwikkelde algoritmes kunnen worden toegepast.

5.8 *Wat betekent dit voor deel 2 van dit project?*

Deel twee van dit project is opgezet om in de praktijk na te gaan voor welke gewassen en gronden de sensoren en satellietbeelden gebruikt kunnen worden om een schatting te maken van de gewasontwikkeling (bijvoorbeeld grondbedekking, droge stof, bladontwikkeling) en de actuele opname van nutriënten (N, P, en K). De verkregen resultaten zullen vervolgens gebruikt worden om nieuwe concepten van bemesting en bijmestsystemen te ontwikkelen.

Vanuit deze literatuurstudie wordt duidelijk dat het gebruik van sensoren voornamelijk perspectief biedt in het schatten van gewasontwikkeling en actuele N-opname. De gegevens voor P suggereren dat vroege detectie van P-tekorten en een inschatting van P-opname aan het eind van het seizoen mogelijk kan zijn. De geplande veldexperimenten zullen dat moeten bewijzen; het gebruik van P-trappen is daarbij aan te bevelen om voldoende bandbreedte te creëren. Voor het schatten van P-opname en P-gehalte is het bovendien aan te bevelen gebruik te maken van hyperspectrale sensoren. De commerciële sensoren lijken daarvoor op dit moment niet/ minder geschikt. Het is niet waarschijnlijk dat gewassensensoren in staat zullen zijn om tekorten aan K op te sporen. Het gebruik van kunstmesttrappen is cruciaal, voornamelijk om de verkregen gegevens te vertalen naar mogelijke bijmestsystemen.

Het veldonderzoek heeft niet als doel om de betrouwbaarheid van gewassensensoren te vergelijken en hun toepassingsmogelijkheden te evalueren. Dit uitgangspunt wordt ondersteund door deze literatuurstudie: er lijkt geen systematisch verschil te zijn in de bruikbaarheid van de verschillende sensoren. Zeker bij gebruik van perceelsafhankelijke kalibratie is elke sensor in potentie geschikt om schattingen te geven van de gewasontwikkeling en N-opname. Vanuit praktisch en economisch oogpunt is het voor dit ontwikkelonderzoek raadzaam om gebruik te maken van een hyperspectrale sensor zoals de ASD Field Spec. Een hyperspectraal spectrum biedt namelijk meer informatie en mogelijkheden dan de commerciële sensoren, in het bijzonder voor andere nutriënten dan stikstof. Alle vegetatie-indexen die berekend worden met de commerciële sensoren kunnen bovendien ook met de hyperspectrale sensor worden berekend. Uiteraard heeft de keuze voor het type sensor ook gevolgen voor de hoeveelheid metingen die uitgevoerd moeten worden (en de locatie waar deze monsters genomen moeten worden).

Het huidige veldonderzoek is gefocust op het leggen van relaties tussen sensoroutput en gewasvariabelen voor een groot aantal gewassen. Hoewel het merendeel van het gepubliceerde onderzoek is getest op granen, bieten, aardappels en maïs, is er zeker potentie om sensoren te gebruiken in andere gewassen. De huidige unieke opzet met minimaal 10 gewassen kan duidelijk maken of deze verwachting terecht is. Omdat het optimale meettijdstip gewasafhankelijk is, is het raadzaam om na de start frequent te meten. Met betrekking tot de huidige opzet waarbij meerdere gewassen op een perceel/bedrijf tegelijkertijd worden gemeten, is het raadzaam om hiermee rekening te houden. Variatie in bodemeigenschappen lijkt niet erg belangrijk te zijn omdat hiervoor gecorrigeerd kan worden via hybride gewasindexen. Wel is het daarvoor belangrijk om voldoende variatie in bodemeigenschappen mee te nemen in het experimentele ontwerp.

Uit dit literatuuronderzoek blijkt dat de sensor output beïnvloedt wordt door allerlei praktische condities zoals meettijdstip, meethoogte, en rijsnelheid. Als commerciële sensoren worden meegenomen in dit veldonderzoek, dan is het aan te bevelen om de hierboven genoemde condities bij de gangbare praktijk te laten aansluiten. Indien meerdere commerciële sensoren worden gebruikt dan is het raadzaam om deze condities bovendien gelijk te trekken tussen de sensoren.

De huidige opzet van het veldonderzoek laat niet toe om kwantitatieve conclusies te trekken over de mogelijke meerwaarde van het gebruik van sensoren. Om deze conclusie te onderbouwen is het nodig om te testen of het gebruik van sensoren – inclusief gekoppelde algoritmes – resulteert in een meeropbrengst bij gelijkwaardige kunstmestgift. De resultaten uit deel 2 van dit onderzoek zijn echter cruciaal om de algoritmes voor Nederlandse condities te ontwikkelen. De praktische meerwaarde van gewassensensoren zal daarna in vervolgonderzoek gekwantificeerd moeten worden.

6 Gebruikte literatuur

- Abdel-Rahman EM & Ahmed FB (2008) The application of remote sensing techniques to sugarcane (*Saccharum spp. Hybrid*) production: a review of the literature. *International Journal of Remote Sensing* 29, 3753-3767.
- Al-Abbas AH, Barr R, Hall JD, Crane FL & Baumgardner MF (1972) Spectra of normal and nutrient deficient maize leaves. Laboratory for Applications of Remote Sensing, Indiana, USA. LARS Technical Reports. Paper 128.
- Albayrak S (2008) Use of reflectance measurements for the detection of N, P, K, ADF and NDF contents in sainfoin pasture. *Sensors* 8, 7275-7286.
- Aparicio N, Villegas D, Araus JL, Casadesus J & Royo C (2002) Relationship between growth traits and spectral vegetation indices in durum wheat. *Crop Science* 42, 1547-1555.
- Atzberger C, Jarmer T, Schlerf M, Koetz B & Werner W (2003) Retrieval of wheat bio-physical attributes from hyperspectral data and SAILH + PROSPECT radiative transfer model. In: Proceedings of the 3th EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, Herrsching, Germany. pp. 473-482.
- Ayala-Silva T & Beyl CA (2005) Changes in spectral reflectance of wheat leaves in response to specific macronutrient deficiency. *Advances in Space Research* 35, 305-317.
- Baret F & Guyot G (1991) Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment* 35, 161-173.
- Barker DW & Sawyer JE (2010) Using active canopy sensors to quantify corn nitrogen stress and nitrogen application rate. *Agronomy Journal* 102, 964-971.
- Basayigit L & Huseyin S (2009) Prediction of plant nutrient contents in deciduous orchards fruits using spectroradiometer. *International Journal of ChemTech Research CODEN (USA)* 1, 212-224.
- Beunk H (2010) Stikstofsensoren: gat tussen theorie en praktijk. Artikel in *Landbouwmechanisatie mei 2010*, 34-37.
- Biewer S, Erasmi S, Fricke T & Wachendorf (2009) Prediction of yield and the contribution of legumes in legume-grass mixtures using field spectrometry. *Precision Agriculture* 10, 128-144.
- Blackburn GA (2007) Hyperspectral remote sensing of plant pigments. *Journal of Experimental Botany* 58, 855-867.
- Bogrecki I, Lee WS, Jordan JD & Craig JC (2005) Multispectral image analysis for phosphorus measurement in Bahia grass. In: 2005 ASAE Annual International Meeting, Tampa, Florida, USA. July 17-20. Paper no. 051067.
- Bogrecki I & Lee WS (2005) Spectral phosphorus mapping using diffuse reflectance of soils and grass. *Biosystems Engineering* 91, 305-312.
- Bowen TR, Hopkins BG, Ellsworth JW, Cook AG & Funk SA (2005) In-season variable rate N in potato and barley production using optical sensing instrumentation. *Western Nutrient Management Conference* 6, Salt Lake City, UT, 141-148.
- Boyer CN, Brorsen BW, Solie JB & Raun WR (2011) Profitability of variable rate nitrogen application in wheat production. *Precision Agriculture* 12, 473-487.
- Cabrera-Bosquet L, Molero G, Stellacci AM, Bort J, Nogues S & Araus JL (2011) NDVI as a potential tool for predicting biomass, plant nitrogen content and growth in wheat genotypes subjected to different water and nitrogen conditions. *Cereal Research Communications* 39, 147-159.
- Carter GA & Knapp AK (2001) Leaf optical properties in higher plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. *American Journal of Botany* 88, 677-684.
- Chen P, Haboudane D, Tremblay N, Wang J, Vigneault P & Li B (2010) New spectral indicator assessing the efficiency of crop nitrogen treatment in corn and wheat. *Remote Sensing of*

- Environment 114, 1987-1997.
- Cho MA (2007) Hyperspectral remote sensing of biochemical and biophysical parameters. The derivative red-edge 'double-peak feature', a nuisance or an opportunity? PhD thesis Wageningen University, Wageningen, 224 pp.
- Christensen LK (2004) NPK deficiencies discrimination by use of spectral and spatial response. PhD thesis, Department of Agricultural Sciences, The Royal Veterinary and Agricultural University, Denmark.
- Christensen LK, Bennedsen BS, Jorgensen RN & Nielsen H (2004) Modelling nitrogen and phosphorus content at early growth stages in spring barley using spectral line scanning. *Biosystem Engineering* 88, 19-24.
- Christensen LK, Upadhyaya SK, Jahn B, Slaughter DC, Tan E & Hills D (2005) Determining the influence of water deficiency on NPK stress discrimination in maize using spectral and spatial information. *Precision Agriculture* 6, 539-550.
- Christensen LK. & Jorgensen RN (2003) Spatial Reflectance at Sub-Leaf Scale Discriminating NPK Stress Characteristics in Barley Using Multiway Regression (N-PLS). In: 2003 ASAE Annual International Meeting, Las Vegas, Nevada, USA. July 27-30. Paper no. 031138.
- Clevers JGPW (1989) The application of a weighted infrared-red vegetation index for estimating leaf-area index by correcting for soil moisture. *Remote Sensing of Environment* 29, 25-37.
- Cohen Y, Alchanatis V, Zusman Y, Dar Z, Bonfil DJ, Karnieli A, Zilberman A, Moulin A, Ostrovsky V, Levi A, Brikman R & Shenker M (2010) Leaf nitrogen estimation in potato base don spectral data and on simulated bands of the VENUS satellite. *Precision Agriculture* 11, 520-537.
- Curran PJ (1989) Remote sensing of foliar chemistry. *Remote Sensing of the Environment* 30, 271-278.
- Davenport JR, Perry EM, Lang NS & Stevens RG (2005) Leaf spectral reflectance for non-destructive measurement of plant nutrient status. *Horttechnology* 15, 31-35.
- Daughtry CST, Walthall CL, Kim MS, Brown de Colstoun E & McMurtrey III JE (2000) Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment* 74, 229-239.
- De Goense D & Van Vliet P (2011) Het effect van precisiebemesting met stikstof op opbrengst en efficiency. Een opdracht van het productschap Akkerbouw seizoen 2009-2010. HLB Rapport 800, 83 pp.
- Delalieux S, Auwerkerken A, Verstraeten WW, Somers B, Valcke R, Lhermitte S, Keulemans J & Coppin P (2009) Hyperspectral reflectance and fluorescence imaging to detect scab induced stress in apple leaves. *Remote Sensing* 1, 858-874. doi: 10.3390/rs1040858.
- Derks R & Kramer LA (2011) Plaatsspecifiek groei- en opbrengstmodel suikerbieten. Onderzoeksrapport. HAS KennisTransfer, 's-Hertogenbosch, Nederland, 35 pp.
- Ding P, Fuchigami LH & Scagel CF (2009) Simple linear regression and reflectance sensitivity analysis used to determine the optimum wavelengths for the non-destructive assessment of chlorophyll in fresh leaves using spectral reflectance. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 134, 48-57.
- Dorigo WA, Zurita-Milla R, De Wit AJW, Brazile J, Singh R & Schaepman ME (2007) A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modelling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 9, 165-193.
- Ehlert D (2010) Techniken für eine sensor gestützte mineralische Düngung, In Wendl (Ed) Technik im Ackerbau – schlagkräftig und effizient. Landtechnische Jahrestagung am 10 November 2010 in Eggendorf. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft. Tagungsband, pp 13-23.
- Engström L, Söderström M, Linden B, Börjesson T & Loren N (2009) Determination of canopy properties

- of winter oilseed rape using remote sensing: techniques in field experiments. In: Lokhorst C, Huijsmans JFM & de Louw RPM (2009) Joint International Agricultural Conference 2009, Book of Abstracts. Wageningen Academic Publishers. pp. 16.
- Erdle K, Mistele B & Schmidhalter (2011) Comparison of active and passive spectral sensors in discriminating biomass parameters and nitrogen status in wheat cultivars. *Field Crops Research* 124, 74-84.
- Fridgen JL & Varco JJ (2004) Dependency of cotton leaf nitrogen, chlorophyll, and reflectance on nitrogen and potassium availability. *Agronomy Journal* 96, 63-69.
- Gehl RJ & Boring TJ (2011) In-season prediction of sugarbeet yield, quality, and nitrogen status using an active sensor. *Agronomy Journal* 103, 1012-1018.
- Gianquinto G, Orsini F, Fecondini M, Mezzetti M, Sambo P & Bona S (2011) A methodological approach for defining spectral indices for assessing tomato nitrogen status and yield. *European Journal of Agronomy* 35, 135-143.
- Gitelson AA (2004) Wide Dynamic Range Vegetation Index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. *Journal of Plant Physiology* 161, 165-173.
- Gitelson AA, Vina A, Arkebauer TJ, Rundquist DC, Keydan G & Leavitt B (2003) Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies. *Geophysical Research Letters* 30, 1248.
- Graeff S, Steffens D & Schubert S (2001) Use of reflectance measurements for the early detection of N, P, Mg, and Fe deficiencies in *Zea Mays* L. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 461, 445-450.
- Haboudane D, Miller JR, Tremblay N, Zarco-Tejada PJ & Dextraze L (2002) Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing of Environment* 81, 416-426.
- Haboudane D, Miller JR, Pattey E, Zarco-Tejada PJ & Strachan IB (2004) Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: modelling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment* 90, 337-352.
- Hansen PM & Schjoerring JK (2003) Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. *Remote Sensing of Environment* 86, 542-553.
- Hatfield JL, Prueger JH & Kustas WP (2004) Remote sensing of dryland crops. In: Ustin SL (Ed) *Remote sensing for natural resource management and environmental monitoring: manual of remote sensing*. 3rd ed. John Wiley, Hoboken, NJ, pp. 531-568.
- Hatfield JL, Gitelson AA, Schepers JS & Walthall (2008) Application of spectral remote sensing for agronomic decisions. *Agronomy Journal* 100, 117-131.
- Hatfield JL & Prueger JH (2010) Value of using different vegetative indices to quantify agricultural crop characteristics at different growth stages under varying management practices. *Remote Sensing* 2, 562-578.
- Heege HJ, Reusch S & Thiessen E (2008) Prospects and results for optical systems for site-specific on-the-go control of nitrogen-top-dressing in Germany. *Precision Agriculture* 9, 115-131.
- Heisel F, Sowinska M, Eckert C & Miehe J (1999) Detection of vegetation stress and nutrient deficiencies by leaf laser-induced fluorescence imaging. *Acta Horticulture* 496, 245-252.
- Herold B, Truppel I, Zude M & Geyer M (2005) Spectral measurements on 'Elstar' apples during fruit development on the tree. *Biosystems Engineering* 91, 173-182.
- Herrmann I, Karnieli A, Bonfil DJ, Cohen Y & Alchanatis V (2010) SWIR-based spectral indices for assessing nitrogen content in potato fields. *International Journal of Remote Sensing* 31, 5127-5143.
- Holland KH & Schepers JS (2010) Derivation of a variable rate nitrogen application model for in-season fertilization of corn. *Agronomy Journal* 102, 1415-1424.

- Holzappel B, Lafond GP, Brandt SA, Bullock PR, Irvine RB, Morrison MJ, May WE & James DC (2009) Estimating canola (*Brassica napus* L) yield potential using an active optical sensor. *Canadian Journal of Plant Science* 89, 1149-1160.
- Hong SD, Schepers JS, Francis DD & Schlemmer MR (2007) Comparison of ground based remote sensors for evaluation of corn biomass affected by nitrogen stress. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 38, 2209-2226.
- Huete AR (1988) A soil adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of the Environment* 25, 295-309.
- Huete A, Justice C & Liu H (1994) Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. *Remote Sensing of Environment* 49, 224-234.
- Huete AR, Didan K, Miura T, Rodriguez EP, Gao X & Ferreira LG (2002) Overview of radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing Environment* 83, 195-213.
- Hunt ER, Cavigelli M, Daughtry CST, McMurtrey III J & Walthall CL (2005) Evaluation of digital photography from model aircraft for remote sensing of crop biomass and nitrogen status. *Precision Agriculture* 6, 359-378.
- Inman D, Khosla R, Reich RM & Westfall DG (2007) Active remote sensing and grain yield in irrigated maize. *Precision Agriculture* 8, 241-252.
- Jackson RD, Jones CA, Uehara G & Santo LT (1980) Remote detection of nutrient and water deficiencies in sugarcane under variable cloudiness. *Remote Sensing of the Environment* 11, 327-331.
- Jacob J & Lawlor DW (1991) Stomatal and mesophyll limitations of photosynthesis in phosphate deficient sunflower, maize and wheat plants. *Journal of Experimental Botany* 44, 1003-1011.
- Jain N, Ray SS, Singh JP & Panigraphy S (2007) Use of hyperspectral data to assess the effects of different nitrogen applications on a potato crop. *Precision Agriculture* 8, 225-239.
- Jarmer T, Lilienthal H & Udelhoven T (2003) Spectral determination of nitrogen content of wheat canopies. Presented at the 3rd EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, Herrsching, 13-16 May 2003, 513-517.
- Jiang Z, Huete AR, Chen J, Chen Y, Li J, Yan G & Zhang X (2006) Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment* 101, 366-378.
- Jordan CF (1969) Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology* 50, 663-666.
- Jorgensen RN (2002) Study on line imaging spectroscopy as a tool for nitrogen diagnostics in precision farming. PhD thesis submitted to Department of Agricultural Sciences, Plant Nutrition and Soil Fertility Laboratory, The Royal Veterinary and Agricultural University, Copenhagen, Denmark.
- Jukema J & Lamantia A (2010) Adviesregel pootaardappelen 24. Een toets in de praktijk van de werking van stikstof bijbemesten op basis van gewasreflectie metingen in pootaardappelen. Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, Lelystad, PPO rapport nr. 3250189710.
- Kawamura K, Mackay AD, Tuohy MP, Betteridge K, Sanches ID & Inoue Y (2011) Potential for spectral indices to remotely sense phosphorus and potassium content of legume-based pasture as a means of assessing soil phosphorus and potassium fertility status. *International Journal of Remote Sensing* 32, 103-124.
- Kempenaar C, Van der Weide RY, Been TH, Van de Zande JC & Lotz LAP (2009) Precisielandbouw en gewasbescherming: kansen, witte vlekken en kennisvragen. *Plant Research International*, Wageningen, Nota 588, 42 pp.

- Kempenaar C, Achten V, Van Evert F, Van der Lans A, Olijve AJ, Van der Schans D, Schepers H, Van der Weide R & Van de Zande J (2008) Biomassa-afhankelijk doseren van gewasbeschermingsmiddelen. *Gewasbescherming* 39, 177-182.
- Kempeneers P, De Backer S, Zarco-Tejada JZ, Delalieux S, Sepulcre-Canto G, Morales F, Sagardoy R, Van Aardt JAN, Coppin P & Scheunders P (2006) Chlorophyll retrieval from canopy reflectance over orchards using hyperspectral techniques. *Proceedings conference, Second recent advances in quantitative remote sensing* (Ed. Sobrino JA), Auditori de Torrent, Spain, pp. 289-294.
- Kikkert A (2009) Sensingsystemen voor bodem en gewas ten behoeve van precisielandbouw. Overzicht van beschikbare producten. Rapport 655 HLB Research and Consultancy in Agriculture, Nederland, 35 pp.
- Knipling EB (1970) Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of the Environment* 1. 155-159.
- Knuivers M (2010) N-sensing niet praktijkrijp? Verband biomassa en N-gift nog vraagteken. *Boerderij* 95, 54-56. Artikel gebaseerd op studie uitgevoerd door Kikkert (2009).
- Kooistra L (2011) Verificatie remote versus near sensing voor toepassingen in precisie landbouw. Wageningen Universiteit. Eindrapport PPL project 023.
- Krenn J, Lukas V, Svobodova I, Drysova T, Misa P & Neudert L (2009) Possibilities of cereal canopy assessment by using the NDVI. In: Lokhorst C, Huijsmans JFM & de Louw RPM (2009) *Joint International Agricultural Conference 2009, Book of Abstracts*. Wageningen Academic Publishers. pp. 34.
- Kyveryga PM, Blackmer TM & Pearson R (2011) Normalisation of uncalibrated late-season digital aerial imagery for evaluating corn nitrogen status. *Precision Agriculture*. In press. DOI 10.1007/s11119-011-9231-8.
- Lamb DW, Trotter MG & Schneider DA (2009) Ultra low-level airborne (ULLA) sensing of crop canopy reflectance: a case study using a CropCircle™ sensor. *Computers and Electronics in Agriculture* 69, 86-91.
- Lamb DW, Schneider DA, Trotter MG, Schaefer MT & Yule IJ (2011) Extended-altitude, aerial mapping of crop NDVI using an active optical sensor: a case study using a Raptor™ sensor over wheat. *Computers and Electronics in Agriculture* 77, 69-73.
- Lee WS, Alchanatis V, Yang C, Hirafuji M, Moshou D & Li C (2010) Sensing Technologies for precision specialty crop production. *Computers & Electronics in Agriculture* 74, 2-33.
- Leon CT, Shaw DR, Cox MS, Abshire MJ, Ward B, Wardlaw III MC & Watson C (2003) Utility of remote sensing in predicting crop and soil characteristics. *Precision Agriculture* 4, 359-384.
- Li F, Miao Y, Hennig SD, Gnyp ML, Chen X, Jia L & Bareth G (2010) Evaluating hyperspectral vegetation indices for estimating nitrogen concentration of winter wheat at different growth stages. *Precision Agriculture* 11, 335-357.
- Lokhorst K, Dekker P, Grashoff K, Guiking T & Van 't Riet S (2003) *Perspectieven geleide bemesting in de open teelten: van deskstudie naar onderzoek*. Instituut voor Milieu en Agritechniek (IMAG), Wageningen. Nota 2003-51.
- Marschner H (1995) *Mineral nutrition of higher plants*. 2nd ed. Academic Press, New York.
- Masoni A, Ercoli L & Mariotti M (1996) Spectral properties of leaves deficient in iron, sulphur, magnesium and manganese. *Agronomy Journal* 88, 937-943.
- Merzlyak MN, Gitelson AA, Chivkunova OB & Rakitin VY (1999) Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. *Physiologia Plantarum* 106, 135-141.
- Milton NM, Eiswerth BA & Ager CM (1991) Effect of phosphorus deficiency on spectral reflectance and morphology of soybean plants. *Remote Sensing of the Environment* 36, 121-127.

- Moran MS, Inoue Y & Barnes EM (1997) Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. *Remote Sensing of Environment* 61, 319-346.
- Murdock L, Call D & James J (2006) Comparison and use of chlorophyll meters on wheat (reflectance vs transmittance/absorbance). University of Kentucky. 4 pp.
- Mutanga O & Skidmore AK (2004) Narrow band vegetation indices overcome the saturation problem in biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing* 25, 3999-4014.
- Müller K, Böttcher U, Meyer-Schatz F & Kage H (2008) Analysis of vegetation indices derived from hyperspectral reflection measurements for estimating crop canopy parameters of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Biosystems Engineering* 101, 172-182.
- Norwood SH, Ortiz B, Winstead A & Fulton J (2009) On the go crop sensing. Precision Agriculture series. Timely information. Agriculture, Natural Resources & Forestry. Alabama University, Alabama, USA, 3 pp.
- Olfs HW, Blankenau K, Brentrup F, Jasper J, Link A & Lammel J (2005) Soil- and plant-based nitrogen-fertilizer recommendations in arable farming. *Journal of Plant Nutrition & Soil Science* 168, 414-431.
- Oppelt N & Mauser W (2004) Hyperspectral monitoring of physiological parameters of wheat during a vegetation period using AVIS data. *International Journal of Remote Sensing* 25, 145-159.
- Osborne SL, Schepers JS, Francis DD & Schlemmer MR (2002) Detection of phosphorus and nitrogen deficiencies in corn using spectral radiance measurements. *Agronomy Journal* 94, 1215-1221.
- Osborne SL, Schepers JS & Schlemmer MR (2004) Detecting nitrogen and phosphorus stress in corn using Multi-spectral imagery. *Communications in Soil Science & Plant Analysis* 35, 505-516.
- Pacumbaba RO & Beyl CA (2011) Changes in hyperspectral reflectance signatures of lettuce leaves in response to macronutrient deficiencies. *Advances in Space Research* 48, 32-42.
- Patil VD, Adsuland PB & Deshmukh LS (2007) Studies on spectral reflectance under normal and nitrogen, phosphorus and pest and disease stress condition in soybean (*glycine max.* L.). *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 35, 351-359.
- Pearson RL & Miller LD (1972) Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short-grass prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado. In: Asrar G (Ed) *Proceedings of the 8th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, pp 1357-1381.
- Peltonen J, Virtanen A & Haggren E (1995) Using a chlorophyll meter to optimize nitrogen fertilizer application for intensively managed small grain cereals. *Journal of Agronomy & Crop Science* 174, 309-318.
- Petersen CT, Jensen CR & Mogensen VO (2002) Analysis of variation of spectral vegetation index measured in differently fertilized barley. *Communications in Soil Science & Plant Analysis* 9 & 10, 1485-1506.
- Pettersson C-G, Söderström M & Eckersten H (2006) Canopy reflectance, thermal stress, and apparent soil electrical conductivity as predictors of within field variability in grain yield and grain protein of malting barley. *Precision Agriculture* 7, 343-359.
- Pimstein A, Karnieli A & Bonfil DJ (2007) Wheat and maize monitoring based on ground spectral measurements and multivariate data analysis. *Journal of Applied Remote Sensing* 1, 013530, doi:10.1117/1.2784799.
- Pimstein A, Karnieli A, Bansal SK & Bonfil DJ (2011) Exploring remotely sensed technologies for monitoring wheat potassium and phosphorus using field spectroscopy. *Field Crops Research* 121, 125-135.
- Ponzoni FJ & Goncalves JLM (1999) Spectral features associated with nitrogen, phosphorus, and potassium deficiencies in *Eucalyptus saligna* seedling leaves. *International Journal of Remote*

- Sensing 20, 2249-2264.
- Portz G, Molin JP & Jasper J (2011). Active crop sensor to detect variability of nitrogen supply and biomass on sugarcane fields. Precision Agriculture. In press. DOI 10.1007/s11119-011-9243-4.
- Povh FP, Gimenez LM & Molin JP (2009) The effect of dew on reflectance obtained from ground active optical sensors. In: Lokhorst C, Huijsmans JFM & de Louw RPM (2009) Joint International Agricultural Conference 2009, Book of Abstracts. Wageningen Academic Publishers. pp. 280.
- Price JC (1992) Estimating vegetation amount from visible and near infrared reflectances. Remote Sensing of Environment 41, 29-34.
- Radersma S, Van Geel WCA, Grashoff C, Molema GJ & Van Wees NS (2004) Geleide bemesting in de open teelten: ontwikkeling van systemen. Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, Lelystad. Rapport 334.
- Raun WR, Solie JB, Johnson GV, Stone ML, Mullen RW, Freeman KW, Thomason WE & Lukina EV (2002) Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. Agronomy Journal 94, 815-820.
- Raun WR, Solie JB, Stone ML, Martin KL, Freeman KW, Mullen RW, Zhang H, Schepers JS & Johnson GV (2005) Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. Communications in Soil Science & Plant Analysis 36, 2759-2781.
- Richardson AJ & Wiegand CL (1977) Distinguishing vegetation from soil background information (by gray mapping of Landsat MSS data). Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 43, 1541-1552.
- Rogovska N & Blackmer AM (2009) Remote sensing of soybean canopy as a tool to map high pH, calcareous soils at field scale. Precision Agriculture 10, 175-187.
- Rondeaux G, Steven M & Baret F (1996) Optimization of Soil Adjusted Vegetation Indices. Remote Sensing of Environment 55, 95-107.
- Rouse JW, Haas RH, Schell JA & Deering JA (1973) Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Proceedings of the 3th symposium on significant results obtained with ERTS-1, NASA. Goddard Space Flight Center, pp 309-317.
- Roy PS (1989) Spectral reflectance characteristics of vegetation and their use in estimating productive potential. Proceedings of Indian Academic Sciences (Plant Science) 99, 59-81.
- Salisbury FB & Ross CW (1978) Plant physiology. 2nd ed. Wadsworth Publ. Co., Belmont, CA, USA.
- Sambo P, Zanin G & Forte V (2009) CropsScan as a tool to drive phosphorus and potassium fertilization in tomato. In: Tüzel Y et al. (Eds) Proceedings of the international symposium on Prot. Cult. Mild Winter Climate. Acta Hort 807, 371-376.
- Samborski SM, Tremblay N & Fallon E (2009) Strategies to make use of plant sensors based diagnostic information for nitrogen recommendations. Agronomy Journal 101, 800-816.
- Scharf PC, Brouder SM & Hoefl RG (2006) Chlorophyll meter readings can predict nitrogen need and yield response of corn in the North-Central USA. Agronomy Journal 98, 655-665.
- Scharf PC, Kitchen NR, Sudduth KA, Lory JA, Stevens WG, Oliveira LF, Shannon DK, Palm H, Davis JG, Vories ED, Dunn DJ & Jones AP (2010) Precision nitrogen fertilizer management of maize and cotton using crop sensors. Abstract for 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, 1-6 August 2010, Brisbane, Australia.
- Schepers JS (2005) Active Sensor Tidbits. Additional information related to a presentation given at InfoAg 2005 Conference (www.infoag.org).
- Schepers JS & Holland KH (2010) Active crop sensor calibration using the virtual reference concept. Achtergronden bij CropCircle.
- Schmidt J, Sripada R, Beegle D & Dellinger A (2009) Using an active sensor to make in-season nitrogen recommendations for corn. In: Lokhorst C, Huijsmans JFM & de Louw RPM (2009) Joint

- International Agricultural Conference 2009, Book of Abstracts. Wageningen Academic Publishers. pp. 11.
- Schmidhalter U, Maidl F-X, Heuwinkel H, Demmel M, Auernhammer H, Noack P & Rothmund M (2008) Precision farming – adaptation of land use management to small scale heterogeneity. In: Schröder P, Pfadenhauer J & Munch JC (Eds) *Perspectives for Agroecosystem Management*. pp. 121-199.
- Schotford IM & Miller PCH (2005) Applications of spectral reflectance techniques in Northern European cereal production: a review. *Biostystems Engineering* 90, 235-250.
- Schroder JJ, Neeteson JJ, Oenema O & Struik PC (2000) Does the crop or the soil indicate how to save nitrogen in maize production? Reviewing the state of the art. *Field Crops Res* 66, 151-164.
- Schut AGT (2005) *Imaging spectroscopy for characterisation of grass swards*. PhD thesis Wageningen Universiteit, Wageningen, The Netherlands, 302 pp.
- Sembiring H, Raun WR, Johnson GV, Stone ML, Solie JB & Phillips SB (1998a) Detection of nitrogen and phosphorus nutrient status in bermudagrass using spectral radiance. *Journal of Plant Nutrition* 21, 1189-1206.
- Sembiring H, Raun WR, Johnson GV, Stone ML, Solie JB & Phillips SB (1998b) Detection of nitrogen and phosphorus nutrient status in winter wheat using spectral radiance. *Journal of Plant Nutrition* 21, 1207-1233.
- Shanahan JF, Kitchen NR, Raun WR & Schepers JS (2008) Responsive in-season nitrogen management for cereals. *Computers and Electronics in Agriculture* 61, 51-62.
- Shaver TM, Westfall DG & Khosla R (2007) Remote sensing of corn N status with active sensors. *Western Nutrient Management Conference* 7, Salt Lake City, UT, USA, 78-84.
- Shaver TM, Khosla R & Westfall DG (2007) Evaluation of two crop canopy sensors for nitrogen variability determination in irrigated maize. *Precision Agriculture*. DOI 10.1007/s11119-011-9229-2.
- Shaver TM, Khosla R & Westfall DG (2010) Evaluation of two ground based active crop canopy sensors in maize: growth stage, row spacing, and sensor movement speed. *Soil Science Society of America Journal* 74, 2101-2108.
- Shaver TM, Khosla R & Westfall DG (2011) Evaluation of two crop canopy sensors for nitrogen variability determination in irrigated maize. *Precision Agriculture*, in press. DOI 10.1007/s11119-011-9229-2.
- Silleos NG, Alexandridis TK, Gitas IZ & Perkais K (2006) Vegetation indices: advances made in biomass estimation and vegetation monitoring in the last 30 years. *Geocarto International* 21, 21-28.
- Sims DA & Gamon JA (2002) Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and development stages. *Remote Sensing of Environment* 81, 337-354.
- Söderström M, Pettersson CG, Börjesson T & Hagner O (2009) Within field and regional prediction of malting barley protein content using canopy reflectance. In: Lokhorst C, Huijsmans JFM & de Louw RPM (2009) *Joint International Agricultural Conference 2009, Book of Abstracts*. Wageningen Academic Publishers. pp. 17.
- Solari F, Shanahan JF, Ferguson RB & Adamchuk VI (2010) An active sensor algorithm for corn nitrogen recommendations based on a chlorophyll meter algorithm. *Agronomy Journal* 102, 1090-1098.
- Spáčilová V & Safránková (2011) Potential of chlorophyll fluorescence and VIS/NIR spectroscopy measurement use for the detection of nitrogen content and disease infection of apple leaves. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis* 39, 6, 317-328.
- Starks PJ, Zhao D, Phillips A & Coleman SW (2006) Development of canopy reflectance algorithms for real-time prediction of Bermudagrass pasture biomass and nutritive values. *Crop Science* 46, 927-

- 934.
- Teal RK, Tubana B, Girma K, Freeman KW, Arnall DB, Walsh O & Raun WR (2006) In-season prediction of corn grain yield potential using normalized difference vegetation index. *Agronomy Journal* 98, 1488-1494.
- Thenkabail PS, Smith RB & De Pauw E (2002) Evaluation of narrowband and broadband vegetation indices for determining optimal hyperspectral wavebands for agricultural crop characterization. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 68, 607-621.
- Thessler S, Kooistra L, Teye F, Huitu H & Bregt AK (2011) Geosensors to support crop production: current applications and user requirements. *Sensors* 11, 6656-6684.
- Thomason WE, Phillips SB & Raymond FD (2007) Defining useful limits for spectral reflectance measures in corn. *Journal of Plant Nutrition* 30, 1263-1277.
- Tremblay N & Belec C (2006) Adapting nitrogen fertilization to unpredictable seasonal conditions with the least impact on the environment. *Hortechology* 16, 408-412.
- Tremblay N, Wang Z & Cerovic ZG (2007) Sensing crop nitrogen status with fluorescence indicators. A review. *Agronomy & Sustainable Development*. DOI 10.007/s13593-011-0041-1.
- Tremblay N, Wang Z, Ma BL, Belec C & Vigneault P (2009) A comparison of crop data measured by two commercial sensors for variable rate nitrogen application. *Precision Agriculture* 10, 145-161.
- Trotter TF, Frazier PS, Trotter MG & Lamb DW (2007) Objective biomass assessment using an active plant sensor (Crop Cricle TM); preliminary experiences on a variety of agricultural landscapes. Beschikbaar op het internet.
- Tucker AN (2010) Nitrogen management of corn with sensor technology. PhD thesis, Department of Agronomy, College of Agriculture, Kansas State University, Manhattan, Kansas, 164 pp.
- Van der Pol H (2010) Precisielandbouw nog geen plus door ontbreken kennis. *Agrarisch dagblad*, 06-01-2010. Achtergrondartikel naar aanleiding van studie van Kikkert (2009).
- Van de Zande J, Meuleman J & Wenneker M (2010) Ontwikkelingen schurfttherkenning fruit. *Gewasbescherming* 41, 15.
- Van de Zande JC, Achten VTJM, Michielsen JMGP, Wenneker M & Koster AThJ (2008) Towards more target oriented crop protection. *International Advances in Pesticide Application, Aspects of Applied Biology* 84, 245-252.
- Van Evert FK, Van der Schans DA, Malda JT, Van den Berg W, Van Geel WCA en Jukema JN (2011) Geleide N bemesting voor aardappelen op basis van gewasreflectie metingen. Integratie van sensormetingen in een N bijmeststelsel. *Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, Lelystad, rapport nr. 3250183711*.
- Van Geel WCA, Wijnholds KH & Grashoff C (2004) Ontwikkeling van geleide bemestingssystemen bij de teelt van zetmeelaardappelen 2002-2003. *Praktijkonderzoek Plant & Omgeving. PPO rapport nr. 510168*.
- Varvel GE, Wilhelm WW, Shanahan JF & Schepers JS (2007) An algorithm for corn nitrogen recommendations using a chlorophyll meter based sufficiency index. *Agronomy Journal* 99, 701-706.
- Verhage T (2011) Inventarisatie integratieaspecten sensordata – BMSdata. *Ordina Nederland BV*. 22 pp.
- Verhulst N & Govaerts B (2010) The normalized difference vegetation index (NDVI) GreenSeekerTM handheld sensor: toward the integrated evaluation of crop management. Part A: Concepts and case studies. Mexico, DF, CIMMYT. 16 pp.
- Vincini M, Frazzi E & D'Alessio P (2008) A broad-band leaf chlorophyll vegetation index at the canopy scale. *Precision Agriculture* 9, 303-319.

- Vona V & Malda JT (2011) 027 PPL: Bemesting van praktijkpercelen tafelaardappelen en implementatie van een ijklijn voor de Yara N-sensor. AILTIC BV, Dronten. 17 pp.
- Wang TC, Ma BL, Xiong YC, Saleem MF & Li FM (2011) Optical sensing estimation of leaf nitrogen concentration in maize across a range of water stress levels. *Crop & Pasture Science* 62, 474-480.
- Wiegand CL, Richardson AJ, Escobar DE & Gerbermann AH (1991) Vegetation indices in crop assessments. *Remote Sensing of Environment* 35, 105-119.
- Wollring J, Reusch S & Karlsson C (1998) Variable nitrogen application based on crop sensing. The International Fertiliser Society, Proceedings number 423, York.
- Wright DL, Rasmussen VP, Ramsey RD & Baker DJ (2004) Canopy reflectance estimation of wheat nitrogen content for grain protein management. *GIScience and Remote Sensing* 41, 287-300.
- Xiaoping W, Ni G, Kai Z & Hong Z (2008) Hyperspectral reflectance and their relationships with spring wheat growth status characteristics in rained agriculture areas of loess plateau. *The international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 37, 403-408.
- Yang C & Everitt JH (2002) Relationships between yield monitor data and airborne multiband multispectral digital imagery for grain sorghum. *Precision Agriculture* 3, 373-388.
- Yang C, Everitt JH & Bradford JM (2009) Evaluating high resolution SPOT5 satellite imagery to estimate crop yield. *Precision Agriculture* 10, 292-303.
- Yang H & Lv G (2011a) Determination of pear leaf nitrogen content based on multi-spectral imaging technology and multivariate calibration. *Key Engineering Materials* 467-469, 718-724.
- Yang H & Li G (2011b) Application of multi-spectral imaging technique in the determination of leaves nitrogen level of fruit tree. *Advanced Materials Research* 181-182, 272-275.
- Yi ZX, Huang JF, Wang FM & Wang XZ (2008) Quantifying biochemical variables of corn by hyperspectral reflectance at leaf scale. *Journal of Zhejiang University Science B* 9, 378-384.
- Zebarth BJ, Rees H, Fournier P, Tremblay N, Leblon B (2003) Mapping spatial variation in potato nitrogen status using the N sensor. In: Tremblay N (2003) Proceedings 26 IHC – Fertilization Strategies for Field Vegetable Production. *Acta Hort.* 627, 267-273.
- Zhang M, Hale A & Luedeling E (2008) Feasibility of using remote sensing techniques to detect spider mite damage in stone fruit orchards. *Proceedings of IGARSS* 1, 323-326.
- Zillmann E, Graeff S, Link J, Batchelor WD & Claupein W (2006) Assessment of cereal nitrogen requirements derived by optical on-the-go sensors on heterogeneous soils. *Agronomy Journal* 98, 682-690.

7 Bijlagen

Bijlage 1. Tabel 1. Overzicht studies biomassa (gewasontwikkeling) en stikstofgehalte/ stikstofopname. De relatie tussen gewasspectra, PLS model of gewasindex wordt als volgt beoordeeld: correlatie coëfficiënt (r) > 0,7 krijgt beoordeling +++, r > 0,6 beoordeling ++, r < 0,6 beoordeling + en wanneer de relatie niet significant is, krijgt het de beoordeling 0.

Nr	Referentie	Instrument	Analyse	Spectra	X variable	Land	Gewas	Y variabele	Beoordeling	Statistiek	experiment details
1	Pimstein et al. (2011)	ASD Field Spec	gewas	350-2500	VI	India, Israel	Triticum aestivum L.	biomassa	+ / ++ / +++	LR, C+V	Veldexp., 0 N trap
1	Pimstein et al. (2011)	ASD Field Spec	gewas	350-2500	spectra	India, Israel	Triticum aestivum L.	biomassa	+++	PLS, C+V	Veldexp., 0 N trap
1	Pimstein et al. (2011)	ASD Field Spec	gewas	350-2500	VI	India, Israel	Triticum aestivum L.	Nup	+ / ++ / +++	LR, C+V	Veldexp., 0 N trap
1	Pimstein et al. (2011)	ASD Field Spec	gewas	350-2500	spectra	India, Israel	Triticum aestivum L.	Nup	+++	PLS, C+V	Veldexp., 0 N trap
1	Pimstein et al. (2011)	ASD Field Spec	gewas	350-2500	VI	India, Israel	Triticum aestivum L.	Nc	+ / ++ / +++	LR, C+V	Veldexp., 0 N trap
1	Pimstein et al. (2011)	ASD Field Spec	gewas	350-2500	spectra	India, Israel	Triticum aestivum L. Triticum aestivum L.;	Nc	+++	PLS, C+V	Veldexp., 0 N trap
2	Tremblay et al. (2009)	GreenSeeker	gewas	VIS, NIR	VI	Canada	Zea Mays L. L. Triticum aestivum L.;	N gift	0 / ++	LR	Veldexp., 2-6 N trap
2	Tremblay et al. (2009)	Yara N sensor	gewas	VIS, NIR	VI	Canada	Zea Mays L. L.	N gift	0 / ++	LR	Veldexp., 2-6 N trap
3	Hong et al. (2007)	SPAD 502	blad	-	chlorofyl	USA	Zea Mays L.	biomassa	+ / +++ / +++	LR, C	Potexp., 8 N trap
3	Hong et al. (2007)	Fieldscout	gewas	700/840	chlorofyl	USA	Zea Mays L.	biomassa	0 / ++	LR, C	Potexp., 8 N trap
3	Hong et al. (2007)	GreenSeeker	gewas	VIS, NIR	NDVI	USA	Zea Mays L.	biomassa	++ / +++	LR, C	Potexp., 8 N trap
3	Hong et al. (2007)	CropCircle	gewas	440/550/680/800	VI	USA	Zea Mays L.	biomassa	+++	LR, C	Potexp., 8 N trap
3	Hong et al. (2007)	ASD Field Spec	gewas	VIS, NIR	VI	USA	Zea Mays L.	biomassa	0 / + / ++	LR, C	Potexp., 8 N trap
4	Bowen et al (2005)	GreenSeeker	gewas	671/780	NDVI	USA	Hordeum vulgare L.	biomassa	+ / +++	NLR, C	Veldexp., 6 N trap
4	Bowen et al (2005)	GreenSeeker	gewas	671/780	NDVI	USA	Solanum tuberosum L	biomassa	+ / +++	NLR, C	Veldexp., 6 N trap
5	Raun et al. (2002)	GreenSeeker	gewas	671/780	NDVI	USA	Triticum aestivum L.	yield	++	LR, C	Veldexp., 2 N trap
6	Thomasson (2007)	GreenSeeker	gewas	660/767	NDVI	USA	Zea Mays L.	LAI	++ / +++	NLR, C	Veldexp., 0 N trap
6	Thomasson (2007)	GreenSeeker	gewas	660/767	NDVI	USA	Zea Mays L.	yield	0 / ++ / +++	NLR, C	Veldexp., 0 N trap
7	Zebarth et al. (2002)	Yara N sensor	gewas	VIS, NIR	VI	Canada	Solanum tuberosum L	yield	++ / +++	LR, C	Veldexp., 4 N trap
7	Zebarth et al. (2002)	SPAD 502	blad	-	chlorofyl	Canada	Solanum tuberosum L	yield	+ / ++ / +++	LR, C	Veldexp., 4 N trap
7	Zebarth et al. (2002)	Fieldscout	gewas	700/840	chlorofyl	Canada	Solanum tuberosum L	yield	+ / ++ / +++	LR, C	Veldexp., 4 N trap

Toelichting: **Analyse** is uitgevoerd op gewasniveau of via individuele bladeren. Als **X variabele** wordt weergegeven welke gewasindex wordt gebruikt als schatter van de Y variabele (VI is vegetatie index, en wordt gebruikt als meerdere indexen worden getest./gebruikt). de **Y variabele** is de gewaseigenschap of het daarvan afgeleide N advies die via gewasreflectie geschat worden. Onder **statistiek** staan de volgende afkortingen: LR voor lineaire regressie, PLS voor partiële lineaire regressie, NLR voor niet lineaire regressie (de gebruikte statistische methoden) en C voor calibratie en V voor validatie (onder welke condities zijn de resultaten getest). Onder **experimentele details** is alleen opgenomen of het experiment in het veld of in een kas is uitgevoerd en hoeveel N trappen er gebruikt zijn.
wordt vervolgd op volgende pagina

Nr	Referentie	Instrument	Analyse	Spectra	X variable	Land	Gewas	Y variabele	Beoordeling	Statistiek	experiment details
8	Wright et al. (2004)	GreenSeeker	gewas	VIS, NIR	NDVI	USA	Triticum aestivum L.	Nc	+++	LR, C	Veldexp., 4 N trap
8	Wright et al. (2004)	ASD Field Spec	gewas	350-2500	VI	USA	Triticum aestivum L.	Nc	+++	LR, C	Veldexp., 4 N trap
8	Wright et al. (2004)	luchtfoto	gewas	550/670/800	VI	USA	Triticum aestivum L.	Nc	++/ +++	LR, C	Veldexp., 4 N trap
8	Wright et al. (2004)	satelliet	gewas	450-900	VI	USA	Triticum aestivum L.	Nc	+++	LR, C	Veldexp., 4 N trap
8	Wright et al. (2004)	GreenSeeker	gewas	VIS, NIR	NDVI	USA	Triticum aestivum L.	yield	+++	LR, C	Veldexp., 4 N trap
8	Wright et al. (2004)	ASD Field Spec	gewas	350-2500	VI	USA	Triticum aestivum L.	yield	+++	LR, C	Veldexp., 4 N trap
8	Wright et al. (2004)	luchtfoto	gewas	550/670/800	VI	USA	Triticum aestivum L.	yield	++/ +++	LR, C	Veldexp., 4 N trap
8	Wright et al. (2004)	satelliet	gewas	450-900	VI	USA	Triticum aestivum L.	yield	+++	LR, C	Veldexp., 4 N trap
9	Shaver et al. (2011)	GreenSeeker	gewas	660/770	NDVI	USA	Zea Mays L.	yield	+ /++/+++	LR, C	Veldexp., 4 N trap
9	Shaver et al. (2011)	CropCircle	gewas	590/880	NDVI	USA	Zea Mays L.	yield	++/ +++	LR, C	Veldexp., 4 N trap
9	Shaver et al. (2011)	SPAD 502	blad	-	chlorofyl	USA	Zea Mays L.	yield	++/ +++	LR, C	Veldexp., 4 N trap
10	Portz et al. (2011)	Yara N sensor	gewas	730/760	VI	Brazil	Saccharum officinarum L.	biomassa	+++	NLR, C	Veldexp., 0 N trap
10	Portz et al. (2011)	Yara N sensor	gewas	730/760	VI	Brazil	Saccharum officinarum L.	Nup	+++	NLR, C	Veldexp., 0 N trap
11	Shaver et al. (2010)	GreenSeeker	gewas	660/770	NDVI	USA	Zea Mays L.	N rate	+ /++/+++	NLR, C	Veldexp., 4 N trap
11	Shaver et al. (2010)	CropCircle	gewas	590/880	NDVI	USA	Zea Mays L.	N rate	++/+++	NLR, C	Veldexp., 4 N trap
12	Yang et al. (2009)	satelliet	gewas	GR/R/NIR/MIR	VI	USA	Sorghum L.	yield	+ /++/+++	LR, C	Veldexp., 0 N trap
12	Yang et al. (2009)	satelliet	gewas	GR/R/NIR/MIR	VI	USA	Sorghum L.	yield	+++	PLS, C	Veldexp., 0 N trap
13	Yang et al. (2002)	luchtfoto	gewas	GR/R/NIR	VI	USA	Sorghum L.	yield	+ /++/+++	LR, C	Veldexp., 0 N trap
14	Trotter & Lamb (2007)	CropCircle	gewas	VIS/NIR	NDVI, SR, SAVI	Australia	sorghum	biomassa	0/+/++/+++	LR, C	Veldexp., 0 N trap
14	Trotter & Lamb (2007)	CropCircle	gewas	VIS/NIR	NDVI, SR, SAVI	Australia	grassland	biomassa	0/ +	NLR, C	Veldexp., 0 N trap
14	Trotter & Lamb (2007)	CropCircle	gewas	VIS/NIR	NDVI, SR, SAVI	Australia	lucerne	biomassa	0	LR, C	Veldexp., 0 N trap
14	Trotter & Lamb (2007)	CropCircle	gewas	VIS/NIR	NDVI, SR, SAVI	Australia	triticale	biomassa	+++	LR, C	Veldexp., 0 N trap
15	Lamb (2007)	CropCircle	gewas	VIS/NIR	NDVI	Australia	grassland	biomassa	+++	NLR, C	Veldexp., 0 N trap
16	Petersen et al. (2002)	Sensor overig	gewas	VIS/NIR	RVI	Denmark	Hordeum vulgare L.	LAI	+++	NLR, C	Veldexp., 3 N trap
16	Petersen et al. (2002)	Sensor overig	gewas	VIS/NIR	RVI	Denmark	Hordeum vulgare L.	N rate	+++	NLR, C	Veldexp., 3 N trap
16	Petersen et al. (2002)	Sensor overig	gewas	VIS/NIR	RVI	Denmark	Hordeum vulgare L.	Nc	+	NLR, C	Veldexp., 3 N trap
17	Rogavska & Blackmer (2009)	luchtfoto	gewas	BL/GR/R/NIR	GNDVI	USA	Glycine max L.	yield	+++	LR, C	Veldexp., 0 N trap

wordt vervolgd op volgende pagina

Nr	Referentie	Instrument	Analyse	Spectra	X variable	Land	Gewas	Y variabele	Beoordeling	Statistiek	experiment details
18	Pettersson et al. (2006)	Sensor overig	gewas	VIS/NIR	VI	Sweden	Barley	yield	0/ +/++ / +++	LR, C + V	Veldexp., 2 N trap
19	Oppelt & Mauser (2004)	luchtfoto	gewas	550-1050	VI	Germany	Triticum aestivum L.	chlorofyl	++/ +++	LR, C	Veldexp., 0 N trap
19	Oppelt & Mauser (2004)	luchtfoto	gewas	550-1050	VI	Germany	Triticum aestivum L.	Nc	++/ +++	LR, C	Veldexp., 0 N trap
20	Li et al. (2010)	ASD Field Spec	gewas	325-1075	VI	China	Triticum aestivum L.	Nc	0/ +/ ++/ +++	LR, C + V	Veldexp., 4-5 N trap
20	Li et al. (2010)	ASD Field Spec	gewas	325-1075	VI	China	Triticum aestivum L.	Nc	+/ ++/ +++	PLS, C + V	Veldexp., 4-5 N trap
21	Leon et al. (2003)	luchtfoto	gewas	550/675/840/700	VI	USA	Gossypium hirsutum L.	yield	0/ +/ ++/ +++	LR, C	Veldexp., 0 N trap
21	Leon et al. (2003)	luchtfoto	gewas	550/675/840/700	VI	USA	Glycine max L.	yield	0/ +/ ++/ +++	LR, C	Veldexp., 0 N trap
22	Mutanga & Skidmore (2004)	Sensor overig	gewas	350-2500	VI	Netherlands	Cenchrus ciliaris	biomassa	0/ +/ ++/ +++	LR, C	Potexp., 3 N trap
23	Kyverya et al. (2011)	luchtfoto	gewas	BL/GR/R/NIR	VI	USA	Zea Mays L.	Nc	++	LR, C	Veldexp., 0 N trap
24	Hunt et al. (2005)	luchtfoto	gewas	400-700	NGRDI	USA	Alfalfa	biomassa	++	LR, C	Veldexp., 0 N trap
24	Hunt et al. (2005)	luchtfoto	gewas	400-700	NGRDI	USA	Zea Mays L.	biomassa	+++	NLR, C	Veldexp., 0 N trap
24	Hunt et al. (2005)	luchtfoto	gewas	400-700	NGRDI	USA	Glycine max L.	biomassa	++	NLR, C	Veldexp., 0 N trap
25	Herrmann et al. (2010)	ASD Field Spec	gewas	350-2500	VI	Israel	Solanum tuberosum L	Nc	0/ +/ ++/ +++	LR, C	Veldexp., 5 N trap
26	Hansen & Schjoerring (2003)	Sensor overig	gewas	400-900	VI	Denmark	Triticum aestivum L.	LAI	0/ +/ ++/ +++	LR, NLR, C	Veldexp., 4 N trap
26	Hansen & Schjoerring (2003)	Sensor overig	gewas	400-900	VI	Denmark	Triticum aestivum L.	chlorofyl	0/ +/ ++/ +++	LR, NLR, C	Veldexp., 4 N trap
26	Hansen & Schjoerring (2003)	Sensor overig	gewas	400-900	VI	Denmark	Triticum aestivum L.	Nc	0/ +/ ++/ +++	LR, NLR, C	Veldexp., 4 N trap
26	Hansen & Schjoerring (2003)	Sensor overig	gewas	400-900	VI	Denmark	Triticum aestivum L.	Nup	0/ +/ ++/ +++	LR, NLR, C	Veldexp., 4 N trap
26	Hansen & Schjoerring (2003)	Sensor overig	gewas	400-900	VI	Denmark	Triticum aestivum L.	biomassa	+++	LR, NLR, C	Veldexp., 4 N trap
26	Hansen & Schjoerring (2003)	Sensor overig	gewas	400-900	VI	Denmark	Triticum aestivum L.	LAI	+++	PLS, C	Veldexp., 4 N trap
26	Hansen & Schjoerring (2003)	Sensor overig	gewas	400-900	VI	Denmark	Triticum aestivum L.	chlorofyl	+	PLS, C	Veldexp., 4 N trap
26	Hansen & Schjoerring (2003)	Sensor overig	gewas	400-900	VI	Denmark	Triticum aestivum L.	Nc	+++	PLS, C	Veldexp., 4 N trap
26	Hansen & Schjoerring (2003)	Sensor overig	gewas	400-900	VI	Denmark	Triticum aestivum L.	Nup	+++	PLS, C	Veldexp., 4 N trap
26	Hansen & Schjoerring (2003)	Sensor overig	gewas	400-900	VI	Denmark	Triticum aestivum L.	biomassa	+++	PLS, C	Veldexp., 4 N trap
27	Inman et al. (2007)	GreenSeeker	gewas	660/770	NDVI	USA	Zea Mays L.	yield	+	LR, C	Veldexp., 2 N trap
27	Inman et al. (2007)	GreenSeeker	gewas	660/770	NDVI	USA	Zea Mays L.	yield	++/ +++	NLR, C	Veldexp., 2 N trap

wordt vervolgd op volgende pagina

Nr	Referentie	Instrument	Analyse	Spectra	X variable	Land	Gewas	Y variabele	Beoordeling	Statistiek	experiment details
28	Jain et al. (2007)	ASD Field Spec	gewas	395-1075	VI	India	Solanum tuberosum L	N rate	0/ +/ +/+ +++	LR, C	Veldexp., 7 N trap
28	Jain et al. (2007)	ASD Field Spec	gewas	395-1075	VI	India	Solanum tuberosum L	Nc	0/ +/ +/+ +++	LR, C	Veldexp., 7 N trap
29	Cohen et al. (2010)	Sensor overig	gewas	400-900	VI	Israel	Solanum tuberosum L	Nc	+++	LR, C	Veldexp., 5 N trap
29	Cohen et al. (2010)	Sensor overig	gewas	400-900	VI	Israel	Solanum tuberosum L	Nc	+++	NLR, C	Veldexp., 5 N trap
30	Davenport et al. (2005)	SPAD 502	blad	-	chlorofyl	USA	Solanum tuberosum L	Nc	+/+++	LR, C	Veldexp., 4 N trap
30	Davenport et al. (2005)	Sensor overig	blad	-	chlorofyl	USA	Solanum tuberosum L	Nc	+/+++	LR, C	Veldexp., 4 N trap
30	Davenport et al. (2005)	Fieldscout	gewas	700/840	chlorofyl	USA	Solanum tuberosum L	Nc	+/+++	LR, C	Veldexp., 4 N trap
31	Gehl & Boring (2011)	GreenSeeker	gewas	660/770	NDVI	USA	Solanum tuberosum L	yield	+++	NLR, C	Veldexp., 6 N trap
31	Gehl & Boring (2011)	GreenSeeker	gewas	660/770	NDVI	USA	Solanum tuberosum L	Nc	+++	NLR, C	Veldexp., 6 N trap
32	Erdle et al. (2011)	Sensor overig	gewas	400-700	VI	Germany	Triticum aestivum L.	biomassa	+/ +/+ +++	LR, NLR, C	Veldexp., 4 N trap
32	Erdle et al. (2011)	Yara N sensor	gewas	730/760/900/970	VI	Germany	Triticum aestivum L.	biomassa	+/ +/+ +++	LR, NLR, C	Veldexp., 4 N trap
32	Erdle et al. (2011)	GreenSeeker	gewas	656/774	VI	Germany	Triticum aestivum L.	biomassa	+/ +/+ +++	LR, NLR, C	Veldexp., 4 N trap
32	Erdle et al. (2011)	CropCircle	gewas	670/730/760	VI	Germany	Triticum aestivum L.	biomassa	+/ +/+ +++	LR, NLR, C	Veldexp., 4 N trap
32	Erdle et al. (2011)	Sensor overig	gewas	400-700	VI	Germany	Triticum aestivum L.	Nc	+/+++	LR, NLR, C	Veldexp., 4 N trap
32	Erdle et al. (2011)	Yara N sensor	gewas	730/760/900/970	VI	Germany	Triticum aestivum L.	Nc	+/+++	LR, NLR, C	Veldexp., 4 N trap
32	Erdle et al. (2011)	GreenSeeker	gewas	656/774	VI	Germany	Triticum aestivum L.	Nc	+/+++	LR, NLR, C	Veldexp., 4 N trap
32	Erdle et al. (2011)	CropCircle	gewas	670/730/760	VI	Germany	Triticum aestivum L.	Nc	+/+++	LR, NLR, C	Veldexp., 4 N trap
32	Erdle et al. (2011)	Sensor overig	gewas	400-700	VI	Germany	Triticum aestivum L.	Nup	+++	LR, NLR, C	Veldexp., 4 N trap
32	Erdle et al. (2011)	Yara N sensor	gewas	730/760/900/970	VI	Germany	Triticum aestivum L.	Nup	+++	LR, NLR, C	Veldexp., 4 N trap
32	Erdle et al. (2011)	GreenSeeker	gewas	656/774	VI	Germany	Triticum aestivum L.	Nup	+++	LR, NLR, C	Veldexp., 4 N trap
32	Erdle et al. (2011)	CropCircle	gewas	670/730/760	VI	Germany	Triticum aestivum L.	Nup	+++	LR, NLR, C	Veldexp., 4 N trap
33	Gianquinto et al. (2011)	CropScan	gewas	VIS/NIR	VI	Italy	Tomato	chlorofyl	+/+++	LR, NLR, C	Veldexp., 2-6 N trap
33	Gianquinto et al. (2011)	CropScan	gewas	VIS/NIR	VI	Italy	Tomato	Nc	0/ +/ +/+ +++	LR, NLR, C	Veldexp., 2-6 N trap
33	Gianquinto et al. (2011)	CropScan	gewas	VIS/NIR	VI	Italy	Tomato	yield	0/ +/ +/+ +++	LR, NLR, C	Veldexp., 2-6 N trap
34	Chen et al. (2010)	ASD Field Spec	gewas	325-1075	VI	Canada	Zea Mays L.	Nc	0/ +/ +/+ +++	LR, NLR, C	Veldexp., 5-6 N trap
34	Chen et al. (2010)	SPAD 502	blad	-	chlorofyl	Canada	Zea Mays L.	Nc	+/+++	LR, NLR, C	Veldexp., 5-6 N trap
34	Chen et al. (2010)	satelliet	gewas	408-947	VI	Canada	Zea Mays L.	Nc	+/+++	LR, NLR, C	Veldexp., 5-6 N trap
34	Chen et al. (2010)	ASD Field Spec	gewas	325-1075	VI	Canada	Zea Mays L.	LAI	0/ +/ +/+ +++	LR, NLR, C	Veldexp., 5-6 N trap
34	Chen et al. (2010)	SPAD 502	blad	-	chlorofyl	Canada	Zea Mays L.	LAI	+/+++	LR, NLR, C	Veldexp., 5-6 N trap
34	Chen et al. (2010)	satelliet	gewas	408-947	VI	Canada	Zea Mays L.	LAI	+/+++	LR, NLR, C	Veldexp., 5-6 N trap

wordt vervolgd op volgende pagina

Nr	Referentie	Instrument	Analyse	Spectra	X variable	Land	Gewas	Y variabele	Beoordeling	Statistiek	experiment details
34	Chen et al. (2010)	ASD Field Spec	gewas	325-1075	VI	Canada	Triticum aestivum L.	Nc	0/ +/ +/+ +++	LR, NLR, C	Veldexp., 5-6 N trap
34	Chen et al. (2010)	SPAD 502	blad	-	chlorofyl	Canada	Triticum aestivum L.	Nc	+/+ +++	LR, NLR, C	Veldexp., 5-6 N trap
34	Chen et al. (2010)	satelliet	gewas	408-947	VI	Canada	Triticum aestivum L.	Nc	+/+ +++	LR, NLR, C	Veldexp., 5-6 N trap
34	Chen et al. (2010)	ASD Field Spec	gewas	325-1075	VI	Canada	Triticum aestivum L.	LAI	0/ +/ +/+ +++	LR, NLR, C	Veldexp., 5-6 N trap
34	Chen et al. (2010)	SPAD 502	blad	-	chlorofyl	Canada	Triticum aestivum L.	LAI	+/+ +++	LR, NLR, C	Veldexp., 5-6 N trap
34	Chen et al. (2010)	satelliet	gewas	408-947	VI	Canada	Triticum aestivum L.	LAI	+/+ +++	LR, NLR, C	Veldexp., 5-6 N trap
35	Cabrera et al. (2011)	GreenSeeker	gewas	660/770	NDVI	Spanje	Triticum turgidem L.	biomassa	+++	LR, C	Potexp., 2 N levels
35	Cabrera et al. (2011)	GreenSeeker	gewas	660/770	NDVI	Spanje	Triticum turgidem L.	Nc	+++	LR, C	Potexp., 2 N levels
35	Cabrera et al. (2011)	GreenSeeker	gewas	660/770	NDVI	Spanje	Triticum turgidem L.	LAI	+++	LR, C	Potexp., 2 N levels
36	Biewer et al. (2009)	ASD Field Spec	gewas	350-2500	VI	Germany	legume - grass	biomassa	0/ +++	LR, NR	Potexp., 0 N levels
37	Barker & Sawyer (2010)	GreenSeeker	gewas	VIS/NIR	VI	USA	Zea Mays L.	N rate	+/ +/+ +++	NLR, C	Veldexp., 5-7 N trap
37	Barker & Sawyer (2010)	CropCircle	gewas	VIS/NIR	VI	USA	Zea Mays L.	N rate	0/ +/ +/+ +++	NLR, C	Veldexp., 5-7 N trap
37	Barker & Sawyer (2010)	SPAD 502	blad	650/940	chlorofyl	USA	Zea Mays L.	N rate	+++	NLR, C	Veldexp., 5-7 N trap
38	Evert et al. (2011)	CropScan	gewas	VIS/NIR	WDVI	Netherlands	Solanum tuberosum L	biomassa	+/ +/+ +++	LR, NLR, C	Veldexp., 2-4 N trap
38	Evert et al. (2011)	CropCircle	gewas	670/730/760	NDVI	Netherlands	Solanum tuberosum L	biomassa	+/ ++	LR, NLR, C	Veldexp., 2-4 N trap
38	Evert et al. (2011)	GreenSeeker	gewas	660/770	NDVI	Netherlands	Solanum tuberosum L	biomassa	0/ +	LR, NLR, C	Veldexp., 2-4 N trap
38	Evert et al. (2011)	Yara N sensor	gewas	VIS/NIR	WDVI	Netherlands	Solanum tuberosum L	biomassa	+/ +/+ +++	LR, NLR, C	Veldexp., 2-4 N trap
38	Evert et al. (2011)	CropScan	gewas	VIS/NIR	WDVI	Netherlands	Solanum tuberosum L	Nup	+/ +/+ +++	LR, NLR, C	Veldexp., 2-4 N trap
38	Evert et al. (2011)	CropCircle	gewas	670/730/760	NDVI	Netherlands	Solanum tuberosum L	Nup	+/ ++	LR, NLR, C	Veldexp., 2-4 N trap
38	Evert et al. (2011)	GreenSeeker	gewas	660/770	NDVI	Netherlands	Solanum tuberosum L	Nup	0/ +	LR, NLR, C	Veldexp., 2-4 N trap
38	Evert et al. (2011)	Yara N sensor	gewas	VIS/NIR	WDVI	Netherlands	Solanum tuberosum L	Nup	+/ +/+ +++	LR, NLR, C	Veldexp., 2-4 N trap
39	Scharf et al. (2006)	SPAD 502	blad	650/940	chlorofyl	USA	Zea Mays L.	N rate	+/ +/+ +++	LR, NLR, C	Veldexp., 4-6 N trap
39	Scharf et al. (2006)	SPAD 502	blad	650/940	chlorofyl	USA	Zea Mays L.	yield	+/ +/+ +++	LR, NLR, C	Veldexp., 4-6 N trap
40	Shaver et al. (2007)	GreenSeeker	gewas	VIS/NIR	NDVI	USA	Zea Mays L.	N rate	+/ ++	LR, C	Veldexp., 4 N trap
40	Shaver et al. (2007)	CropCircle	gewas	VIS/NIR	NDVI	USA	Zea Mays L.	N rate	+/ ++	LR, C	Veldexp., 4 N trap
41	Vona & Malda (2011)	Yara N sensor	gewas	VIS/NIR	NDVI	Netherlands	Solanum tuberosum L	Nup	+++	LR, C	Veldexp., 3 N trap
42	Havrankova (2007)	Yara N sensor	gewas	VIS/NIR	NDVI	UK	Triticum aestivum L.	Nup	0/+/+	LR, C	Veldexp., 2 N trap
42	Havrankova (2007)	CropCircle	gewas	VIS/NIR	NDVI	UK	Triticum aestivum L.	Nup	0/+/+/+	LR, C	Veldexp., 2 N trap
42	Havrankova (2007)	Yara N sensor	gewas	VIS/NIR	NDVI	UK	Triticum aestivum L.	biomassa	0/+	LR, C	Veldexp., 2 N trap
42	Havrankova (2007)	CropCircle	gewas	VIS/NIR	NDVI	UK	Triticum aestivum L.	biomassa	0/+/+	LR, C	Veldexp., 2 N trap

wordt vervolgd op volgende pagina

Nr	Referentie	Instrument	Analyse Spectra	X variable	Land	Gewas	Y variabele	Beoordeling	Statistiek	experiment details	
42	Havrankova (2007)	Yara N sensor	gewas	VIS/NIR	UK	Triticum aestivum L.	Nc	0/+	LR, C	Veldexp., 2 N trap	
42	Havrankova (2007)	CropCircle	gewas	VIS/NIR	UK	Triticum aestivum L.	Nc	0/+	LR, C	Veldexp., 2 N trap	
43	Osborne et al. (2002)	ASD Field Spec	gewas	350-1000	USA	Zea Mays L.	biomassa	++/+++	LR, C	Veldexp., 4 N trap	
43	Osborne et al. (2002)	ASD Field Spec	gewas	350-1000	USA	Zea Mays L.	Nc	++/+++	LR, C	Veldexp., 4 N trap	
44	albayrak (2008)	ASD Field Spec	gewas	325-1150	Turkey	grassland	Nc	++/+++	LR, C	Veldexp., 0 N trap	
45	Osborne et al. (2004)	luchtfoto	gewas	485/550/660/830	USA	Zea Mays L.	biomassa	0/ +/+/+/+	LR, C	Veldexp., 4 N trap	
45	Osborne et al. (2004)	luchtfoto	gewas	485/550/660/830	USA	Zea Mays L.	Nc	0/ +/+/+/+	LR, C	Veldexp., 4 N trap	
46	Sembiring et al. (1998a)	Sensor overig	gewas	276-1100	USA	grassland	Nc	+ / + +	LR, C	Veldexp., 4 N trap	
46	Sembiring et al. (1998a)	Sensor overig	gewas	276-1100	USA	grassland	Nup	+++	LR, C	Veldexp., 4 N trap	
46	Sembiring et al. (1998a)	Sensor overig	gewas	276-1100	USA	grassland	biomassa	+++	LR, C	Veldexp., 4 N trap	
47	Sembiring et al. (1998b)	Sensor overig	gewas	276-1100	USA	Triticum aestivum L.	yield	0/+	LR, C	Veldexp., 4 N trap	
47	Sembiring et al. (1998b)	Sensor overig	gewas	276-1100	USA	Triticum aestivum L.	Nc	0/+/+	LR, C	Veldexp., 4 N trap	
47	Sembiring et al. (1998b)	Sensor overig	gewas	276-1100	USA	Triticum aestivum L.	Nup	0/+	LR, C	Veldexp., 4 N trap	
48	Ponzoni (1999)	Sensor overig	blad	450-900	Brazil New	Eucalpytus	Nc	+	LR, C	Potexp., 4 N trap	
49	Kawamura et al. (2011)	ASD Field Spec	gewas	350-2500	Zealand	grassland	biomassa	0/+/+/+/+	LR, C	Veldexp., 0 N trap	
50	Erasmi (2002)	ASD Field Spec	gewas	350-2500	Germany	Triticum aestivum L.	Nc	0/+	LR, C	Veldexp., 0 N trap	
50	Erasmi (2002)	ASD Field Spec	gewas	350-2500	Germany	Triticum aestivum L.	Nc	++	PLS, C	Veldexp., 0 N trap	
51	Kooistra (2011)	CropScan	gewas	VIS/NIR	Nederland	Solanum tuberosum L	LAI, biomass	0/+/+/+/+	LR, C	Veldexp., 5 N trap	
51	Kooistra (2011)	GreenSeeker	gewas	VIS/NIR	Nederland	Solanum tuberosum L	LAI, biomass	0/+/+	LR, C	Veldexp., 5 N trap	
51	Kooistra (2011)	Fritzmeijer	gewas	VIS/NIR	Nederland	Solanum tuberosum L	LAI, biomass	0/+/+	LR, C	Veldexp., 5 N trap	
51	Kooistra (2011)	satelliet	gewas	VIS/NIR	Nederland	Solanum tuberosum L	LAI, biomass	0/+/+	LR, C	Veldexp., 5 N trap	
51	Kooistra (2011)	SPAD 502	gewas	VIS/NIR	chlorofyl	Nederland	Solanum tuberosum L	LAI, biomass	0/+/+/+	LR, C	Veldexp., 5 N trap
51	Kooistra (2011)	CropScan	gewas	VIS/NIR	VI	Nederland	Solanum tuberosum L	Nc	0/+/+/+/+	LR, C	Veldexp., 5 N trap
51	Kooistra (2011)	GreenSeeker	gewas	VIS/NIR	VI	Nederland	Solanum tuberosum L	Nc	0/+/+	LR, C	Veldexp., 5 N trap
51	Kooistra (2011)	Fritzmeijer	gewas	VIS/NIR	VI	Nederland	Solanum tuberosum L	Nc	0/+/+	LR, C	Veldexp., 5 N trap
51	Kooistra (2011)	satelliet	gewas	VIS/NIR	VI	Nederland	Solanum tuberosum L	Nc	0/+/+	LR, C	Veldexp., 5 N trap
51	Kooistra (2011)	SPAD 502	gewas	VIS/NIR	chlorofyl	Nederland	Solanum tuberosum L	Nc	0/+/+/+	LR, C	Veldexp., 5 N trap
52	Jukema (2010)	CropScan	gewas	VIS/NIR	VI	Nederland	Solanum tuberosum L	Nup	+++	LR, C	Veldexp., 6 N-trap
52	Jukema (2010)	CropCircle	gewas	VIS/NIR	VI	Nederland	Solanum tuberosum L	Nup	+++	LR, C	Veldexp., 6 N-trap

wordt vervolgd op volgende pagina

Nr	Referentie	Instrument	Analyse	Spectra	X variable	Land	Gewas	Y variabele	Beoordeling	Statistiek	experiment details
53	Pimstein et al. (2007)	ASD Field Spec	gewas	350-2500	spectra	Israel	Zea Mays L.	biomassa	+++	PLS, C+V	Veldexp., 6 N trap
53	Pimstein et al. (2007)	ASD Field Spec	gewas	350-2500	spectra	Israel	Zea Mays L.	Nc	+++	PLS, C+V	Veldexp., 6 N trap
53	Pimstein et al. (2007)	ASD Field Spec	gewas	350-2500	spectra	Israel	Triticum aestivum L.	biomassa	+++	PLS, C+V	Veldexp., 2 N trap
53	Pimstein et al. (2007)	ASD Field Spec	gewas	350-2500	spectra	Israel	Triticum aestivum L.	Nc	++/+++	PLS, C+V	Veldexp., 2 N trap
53	Pimstein et al. (2007)	ASD Field Spec	gewas	350-2500	spectra	Israel	Triticum aestivum L.	biomassa	0/+++	PLS, C+V	Veldexp., 2 N trap
53	Pimstein et al. (2007)	ASD Field Spec	gewas	350-2500	spectra	Israel	Triticum aestivum L.	Nc	+++	PLS, C+V	Veldexp., 2 N trap
53	Pimstein et al. (2007)	ASD Field Spec	gewas	350-2500	VI	Israel	Triticum aestivum L.	biomassa	0/+/+++	LR, NLR, C	Veldexp., 2 N trap
53	Pimstein et al. (2007)	ASD Field Spec	gewas	350-2500	VI	Israel	Triticum aestivum L.	Nc	0/+	LR, NLR, C	Veldexp., 2 N trap Veldexp., N trap
54	Holzappel et al. (2009)	Sensor overig	gewas	-	NDVI	Canada	Brassica napus L	biomassa	++/+++	LR, NLR, C	onbekend
55	Aparicio et al. (2002)	ASD Field Spec	gewas	350-1050	NDVI, SR	Spanje	Triticum turgidum	biomassa	+++	NLR, C	Veldexp., 0 N trap
56	Patil et al. (2007)	Sensor overig	gewas	VIS/NIR	RVI, NDVI	India	Glycine max L.	biomassa	+++	LR, C	Veldexp., 4 N trap
56	Patil et al. (2007)	Sensor overig	gewas	VIS/NIR	RVI, NDVI	India	Glycine max L.	Nc	+++	LR, C	Veldexp., 4 N trap
57	Yi et al. (2008)	ASD Field Spec	blad	350-2500	spectra	China	Zea Mays L.	Nc	+++	LR, NLR, C	Veldexp., 3 N trap
58	Wang et al. (2011)	ASD Field Spec	gewas	350-2500	NDVI, NCI	Canada	Zea Mays L.	Nc	0/+++	LR, C	Kas, 3 N trap
58	Wang et al. (2011)	SPAD 502	blad	-	chlorofyl	Canada	Zea Mays L.	Nc	0/+++	LR, C	Kas, 3 N trap
59	Van Vliet (2011)	GreenSeeker	gewas	-	NDVI	Nederland	ui	biomassa	++	NLR, C	Veldexp., geen N trap
59	Van Vliet (2011)	GreenSeeker	gewas	-	NDVI	Nederland	ui	Nup	++	NLR, C	Veldexp., geen N trap
60	Joergensen (2002)	Sensor overig	gewas	438-756	spectra	Denmark	Triticum aestivum L.	Nup	+++	PLS, C	Veldexp., 16 N trap
61	Teal et al (2006)	GreenSeeker	gewas	-	NDVI	USA	Zea Mays L.	yield	0/+/+/+++	LR,NLR, C	Veldexp., geen N trap
62	Schmidt et al (2009)	Sensor onbekend	gewas	590/880	RGNDVI	USA	Zea Mays L.	N rate	+++	C	Veldexp., 7 N trap Veldexp., N trap
63	Engstrom et al (2009)	Yara N sensor	gewas	-	VI	Sweden	winter oilseed rape	biomassa	+++	LR, C	onbekend Veldexp., N trap
63	Engstrom et al (2009)	Yara N sensor	gewas	-	VI	Sweden	winter oilseed rape	Nup	+++	LR, C	onbekend Veldexp., N trap
64	Soderstrom et al (2009)	Yara N sensor	gewas	-	TCARI	Sweden	Hordeum vulgare L.	protein content	++	Onbekend, C+V	Veldexp., N trap onbekend
64	Soderstrom et al (2009)	satelliet	gewas	-	VI	Sweden	Hordeum vulgare L.	protein content	++	Onbekend, C+V	Veldexp., N trap onbekend
65	Kren et al. (2009)	Sensor overig	gewas	VIS/NIR	NDVI	Tjechie	winter wheat/spring barley	biomassa	++	Onbekend, C	Veldexp., N trap onbekend
65	Kren et al. (2009)	Sensor overig	gewas	VIS/NIR	NDVI	Tjechie	winter wheat/spring barley	Nup	++	Onbekend, C	Veldexp., N trap onbekend

wordt vervolgd op volgende pagina

Nr	Referentie	Instrument	Analyse	Spectra	X variable	Land	Gewas	Y variabele	Beoordeling	Statistiek	experiment details
66	Muller et al. (2008)	Sensor overig	gewas	400-1000	VI	Germany	Brassica napus L	biomassa	+ / + + +	LR, C	Veldexp., 4 N trap
66	Muller et al. (2008)	Sensor overig	gewas	400-1000	VI	Germany	Brassica napus L	Nup	+ / + + +	LR, C	Veldexp., 4 N trap
67	Starks et al. (2006)	ASD Field Spec	gewas	350-2500	spectra	USA	grassland	biomassa	+ / + + / + + +	MLR, C	Veldexp., 0 N trap
68	Varvel et al. (2007)	SPAD 502	blad	-	SI	USA	Zea Mays L.	N rate	+++	NLR, C	Veldexp., 6 N trap Veldexp., N trap onbekend
69	Xiaopeng et al. (2008)	ASD Field Spec	gewas	350-2500	VI	China	Triticum aestivum L.	biomassa	0 / +	LR, C	Veldexp., N trap onbekend
70	Jarmer et al. (2003) Goense & Van Vliet	ASD Field Spec	gewas	350-2500	spectra	Germany	Triticum L.	Nc	+++	PLS, C	Veldexp., N trap onbekend
71	(2010) Goense & Van Vliet	GreenSeeker	gewas	660/770	NDVI	Nederland	graan, aardappel	yield	0 / +	LR, C	Veldexp., 4 N trap
71	(2010)	CropCircle	gewas	670/730/780	NDVI	Nederland	graan, aardappel	yield	0 / +	LR, C	Veldexp., 4 N trap
72	Murdock (2006)	SPAD 502	blad	-	chlorofyl	USA	Triticum L.	yield	+++	LR, C	Veldexp., 6 N trap
72	Murdock (2006)	Fieldscout	gewas	VIS/NIR	-	USA	Triticum L.	yield	+++	LR, C	Veldexp., 6 N trap
73	Peltonen (1995)	SPAD 502	blad	-	chlorofyl	Finland	Triticum L.	Nc	+++	LR, C	Veldexp., 2 N trap
73	Peltonen (1995)	SPAD 502	blad	-	chlorofyl	Finland	Triticum L.	Nup	+++	LR, C	Veldexp., 2 N trap
73	Peltonen (1995)	SPAD 502	blad	-	chlorofyl	Finland	Triticum L.	Nc	+++	LR, C	Veldexp., 2 N trap
73	Peltonen (1995)	SPAD 502	blad	-	chlorofyl	Finland	Triticum L.	Nup	+++	LR, C	Veldexp., 2 N trap
73	Peltonen (1995)	SPAD 502	blad	-	chlorofyl	Finland	Hordeum vulgare L.	Nc	++ / + + +	LR, C	Veldexp., 2 N trap
73	Peltonen (1995)	SPAD 502	blad	-	chlorofyl	Finland	Hordeum vulgare L.	Nup	++ / + + +	LR, C	Veldexp., 2 N trap
73	Peltonen (1995)	SPAD 502	blad	-	chlorofyl	Finland	Avena sativa L.	Nc	+++	LR, C	Veldexp., 2 N trap
73	Peltonen (1995)	SPAD 502	blad	-	chlorofyl	Finland	Avena sativa L.	Nup	+++	LR, C	Veldexp., 2 N trap
73	Peltonen (1995)	SPAD 502	blad	-	chlorofyl	Finland	Secale cereale L.	Nc	0 / + / + + / + + +	LR, C	Veldexp., 2 N trap
73	Peltonen (1995)	SPAD 502	blad	-	chlorofyl	Finland	Secale cereale L.	Nup	0 / + / + + / + + +	LR, C	Veldexp., 2 N trap

Toelichting: **Analyse** is uitgevoerd op gewasniveau of via individuele bladeren. Als **X variabele** wordt weergegeven welke gewasindex wordt gebruikt als schatter van de Y variabele (VI is vegetatie index, en wordt gebruikt als meerdere indexen worden getest./gebruikt). de **Y variabele** is de gewaseigenschap of het daarvan afgeleide N advies die via gewasreflectie geschat worden. Onder **statistiek** staan de volgende afkortingen: LR voor lineaire regressie, PLS voor partiële lineaire regressie, NLR voor niet lineaire regressie (de gebruikte statistische methoden) en C voor calibratie en V voor validatie (onder welke condities zijn de resultaten getest). Onder **experimentele details** is alleen opgenomen of het experiment in het veld of in een kas is uitgevoerd en hoeveel N trappen er gebruikt zijn.

Bijlage 1, Tabel 2. Fosfaat studies

Band (nm)	gewas	Toepassing	Experimentele details	Bron
Gecontroleerde experimentele condities: kas, klimaatkamer of laboratorium				
280 - 1100	Triticum aestivum L.	Studie effecten op spectra	Spectrale bladanalyse na zichtbaar symptomen van nutriënttekort, 2 P niveaus	Ayala-Silva & Beyl (2005)
380 – 740	Zea mays L.	Studie effecten op spectra	Spectrale bladanalyse 1 x per week gedurende 6 weken, 10 P niveaus	Graeff et al. (2001)
400 – 800	Glycine max L.	Studie effecten op spectra	Spectrale bladanalyse 1 x per week gedurende x weken, 3 P niveaus	Milton et al. (1991)
290-1100	Lactuca sativa L.	Studie effecten op spectra	Spectrale bladanalyse na 90 dagen, 2 P niveaus	Pacumbaba & Beyl (2011)
400-2500	Zea mays L.	Studie effecten op spectra	Spectrale bladanalyse 1x tijdens V4-V5 groeistadium, 2 P niveaus	Christensen et al. (2005)
500-2600	Zea mays L.	Studie effecten op spectra	Spectrale bladanalyse na 8 weken, 2 P niveaus	Al-Abbas et al. (1974)
450–1000	Hordeum vulgare L.	P stress symptomen	Spectrale bladanalyse 3 x gedurende 33 dagen, 2 P niveaus	Christensen & Jorgensen (2003)
450-900	Eucalyptus saligna	Schatting P gehalte	Spectrale bladanalyse 5x (na dag 110) over 175 dagen, 4 P niveaus	Ponzoni & Goncalves (1999)
404-1650	Lolium perenne L.	Schatting P gehalte, biomassa	Spectrale gewasanalyse 1 x, geen P trappen; evaluatie indexen: NDVI, WdVI	Schut et al. (2005)
460-810	Lycopersicon esculentum M.	Schatting P gehalte	Spectrale gewasanalyse 2 x per week over 97 weken, 3 P niveaus; evaluatie index: NDVI, 1/R560	Sambo et al. (2009)
Variabele experimentele condities: veldexperimenten				
350-2500	Grasland (div. soorten)	Schatting P gehalte, groeisnelheid	Meejarig, spectrale gewasanalyse 2 x, P-olsen: 6-72 mg kg ⁻¹ ; evaluatie indexen: SR, NDVI, RDVI, MSR, SAVI, MSAVI, PRI, NPQI, GRI, WI, SIPI, SWWI	Kawamura et al. (2011)
350 -1000	Zea mays L.	Studie effecten op spectra; schatting P gehalte, biomassa, opbrengst	Meerjarig, spectrale gewasanalyse 2-4 x per groeiseizoen, 4 P niveaus	Osborne et al. (2002)
350-2500	Triticum aestivum L.	Studie effecten op spectra, schatting P gehalte, P opname, biomassa	Meerjarig, spectrale gewasanalyse ca 3 x per jaar, geen P trappen, evaluatie van indexen: NDVI, GNDVI, SR, SAVI, OSAVI, REP, PLS models	Pimstein et al. (2011)

300-2500	Hordeum vulgare L.; Zea mays L.	Studie effecten op spectra, P stress symptomen, P gehalte	Eenjarig, gerst, spectrale gewasanalyse 3x gedurende groeiseizoen, 8 P niveaus Kas, spectrale bladanalyse 3 x gedurende 33 dagen, 2 P niveaus	Christensen, 2004
300-1100	Triticum aestivum L.	Schatting P gehalte, P opname, biomassa	Spectrale gewasanalyse 3-4 x gedurende groeiseizoen, 3 P niveaus; evaluatie van indexen: NDVI, LNDVI, Red, LNIR, SNIR, SNDVI, LNR, SNR	Sembiring (1998a)
276-1100	Cynodon dactylon L.	Schatting P gehalte, P opname, biomassa	Spectrale gewasanalyse 4 x gedurende 6 maanden, 3 P niveaus; evaluatie van indexen: NDVI, div. andere combinaties	Sembiring (1998b)
325-1150	Onobrychis sativa L.	Schatting P gehalte	Meerjarig; spectrale gewasanalyse 5-8 x per groeiseizoen, geen P trap, evaluatie indexen: SR, NDVI	Albayrak (2008)
350 - 1000	Zea mays L.	Studie effecten op spectra; schatting P gehalte, biomassa, opbrengst	Meerjarig, spectrale gewasanalyse 2 x per groeiseizoen, 4 P niveaus, evaluatie indexen: (G)NDVI	osborne et al., 2004
175-2550	Gras	Schatting P gehalte	Spectrale gewasanalyse 1x, geen P trappen, Total P tussen 5 en 3700 mg kg ⁻¹	Bogrekci & Lee (2005)
175-885	Paspalum notatum	Schatting P gehalte	Spectrale gewasanalyse 1x, 6 P niveaus, evaluatie indexen: NDVI, NIR	bogrekci et al. (2005)
400-800	Glycine max L.	Studie effecten gewasindex	Spectrale gewasanalyse, 3 P niveaus, evaluatie indexen: RVI, NDVI	Patil et al., 2007

Bijlage 1, Tabel 3. Kalium studies

Band (nm)	gewas	Toepassing	Experimentele details	Bron
Gecontroleerde experimentele condities: kas, klimaatkamer of laboratorium				
400-2500	Zea mays L.	Studie effecten op spectra	Spectrale bladanalyse 1x tijdens V5-V6 groeistadium, 2 K niveaus	Christensen et al. (2005)
280 - 1100	Triticum aestivum L.	Studie effecten op spectra	Spectrale bladanalyse na zichtbaar symptomen van nutriënttekort, 2 P niveaus	Ayala-Silva & Beyl (2005)
450-1000	Hordeum vulgare L.	Studie effecten op spectra	Spectrale bladanalyse 3 x gedurende 33 dagen, 2 K niveaus	Christensen & Jorgensen (2003)
290-1100	Lactuca sativa L.	Studie effecten op spectra	Spectrale bladanalyse na 90 dagen, 2 K niveaus	Pacumbaba & Beyl (2011)
450-900	Eucalyptus saligna	Schatting K gehalte	Spectrale bladanalyse 5x (na dag 110) over 175 dagen, 4 K niveaus	Ponzoni & Goncalves (1999)
500-2600	Zea mays L.	Studie effecten op spectra	Spectrale bladanalyse na 8 weken, 2 K niveaus	Al-Abbas et al. (1974)
460-810	Lycopersicon esculentum M.	Schatting K gehalte	Spectrale gewasanalyse 2 x per week over 97 weken, 3 K niveaus; evaluatie index: NDVI, 1/R560	Sambo et al. (2009)
Variabele experimentele condities: veldexperimenten				
300-800 nm	Gossypium hirsutum L.	Studie effecten op spectra	Meerjarig, spectrale bladanalyse 2x per groeiseizoen, 4 K niveaus	Fridgen & Varco (2004)
350-2500	Triticum aestivum L.	Studie effecten op spectra, schatting K gehalte, K opname, biomassa	Meerjarig, spectrale gewasanalyse ca 3 x per jaar, geen K trappen, evaluatie van indexen: NDVI, GNDVI, SR, SAVI, OSAVI, REP, PLS models	Pimstein et al. (2011)
350-2500	Grasland (div. soorten)	Schatting K gehalte, groeisnelheid	Meejarig, spectrale gewasanalyse 2 x, K-exch: 0.2-1.32 cmol kg ⁻¹ ; evaluatie indexen: SR, NDVI, RDVI, MSR, SAVI, MSAVI, PRI, NPQI, GRI, WI, SIPI, SWWI	Kawamura et al. (2011)
325-1150	Onobrychis sativa L.	Schatting K gehalte	Meerjarig; spectrale gewasanalyse 5-8 x per groeiseizoen, geen K trap, evaluatie indexen: SR, NDVI	Albayrak (2008)
400-820 nm	Hordeum vulgare L.	Studie effecten op vegetatie-index	Meerjarig; spectrale gewasanalyse 15 -18 x per groeiseizoen, 2 K niveaus, evaluatie index: RVI	Peterson et al. (2002)
630-900 nm	Saccharum L.	Studie effecten op vegetatie-index	Eenjarig; spectrale gewasanalyse, 2 K niveaus, evaluatie index: NIR/Red	Jackson et al. (1980)

