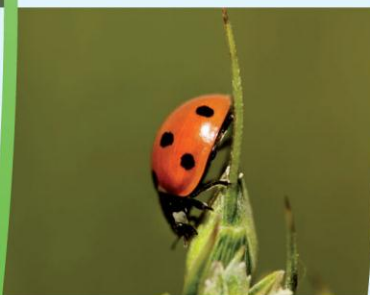


Soil for life

Rapport 1499.N.12

Factoren en protocol voor
inzetbaarheid sensoren



Auteur(s) : **G.H. Ros**
G.J. Ouwehand
D.W. Bussink

© 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 Research

Inhoud

	pagina
Samenvatting en conclusies	3
1 Inleiding en achtergrond	6
2 Werkwijze	7
2.1 Inleiding	7
2.2 Statistische analyse proefgegevens PPL-project 075	7
2.3 Aanvullende kleine experimenten	8
2.4 Quicksan literatuur	8
2.5 Compilatie en ontwikkeling beoordelingsschema	8
3 Statistische analyse bestaande gegevens	9
3.1 Samenvatting resultaten	9
3.2 Beschrijving dataset	9
3.3 Statistische analyse	10
3.4 Invloed van diverse factoren	11
4 Aanvullende experimenten: resultaten CropScan	18
4.1 Inleiding	18
4.2 Statistische analyse	18
5 Aanvullende experimenten: resultaten GreenSeeker	24
5.1 Inleiding	24
5.2 Statische analyse	24
5.3 Inschatting effect van onderzochte factoren	24
6 Quicksan literatuur	28
6.1 Inleiding	28
6.2 Praktische factoren die sensor output beïnvloeden	28
6.3 Overzicht literatuurgegevens	29
6.4 Factoren die sensor-output beïnvloeden	30
6.5 Samenvatting	33
7 Ontwikkeling meet- en beoordelingsprotocol	34
7.1 Inleiding	34
7.2 Samenvatting resultaten literatuurstudie en experimenten	34
7.3 Ontwikkeling adviezen voor praktische toepassing	35
7.4 Aanbevelingen leveranciers/ ontwikkelaars	37
7.5 Meet- en beoordelingsprotocol	38
Gebruikte literatuur	40
8 Bijlage 1. Gebruikte gewasindexen	43
9 Bijlage 2. Aanvullende experimenten: weersgegevens	44
9.1 Inleiding	44
9.2 Weersomstandigheden in Biddinghuizen	44
9.3 Weersomstandigheden in Nuenen	44
9.4 Weersomstandigheden in Jubbega	45
9.5 Weersomstandigheden in Elst	45

9.6	Weersomstandigheden in Wageningen	46
10	Bijlage 3. Aanvullende experimenten: resultaten CropScan	47
10.1	Inleiding	47
10.2	Effect van meettijdstip	47
10.3	Effect van meethoogte	51
10.4	Effect van regen	55
10.5	Effect van schaduw	59
10.6	Samenvatting	63
11	Bijlage 4. Aanvullende experimenten: resultaten GreenSeeker	65
11.1	Inleiding	65
11.2	Effect van meettijdstip, meethoogte, schaduw en regenval.	65
11.3	Samenvatting	71
12	Bijlage 5. Achtergrondinformatie literatuurstudie	73

Samenvatting en conclusies

Binnen het PPL project 075 'ontwikkeling van beslissingsondersteunende systemen voor het bijmesten van gewassen' is onderzocht of het mogelijk is om via het gebruik van gewassensoren de biomassa-ontwikkeling en nutriëntenopname te meten. Voor een succesvolle toepassing van gewassensoren in de praktijk is het belangrijk:

- om met zo min mogelijk ruis te meten,
- dat goed bekend is onder welke omstandigheden er gemeten kan worden; en
- dat sensoren over een groot deel van de dag inzetbaar zijn.

Een meet- en beoordelingsprotocol voor de inzetbaarheid van sensoren ontbreekt echter. Diverse initiatiefnemers binnen PPL hebben daarom een ontwikkelverzoek ingediend met als doel inzicht te geven in de praktische toepasbaarheid van gewassensoren.

Gebaseerd op de al verzamelde sensormetingen in het bovengenoemde PPL-project, plus aanvullende metingen en literatuurgegevens, is door NMI een protocol ontwikkeld dat duidelijk maakt onder welke omstandigheden sensoren inzetbaar zijn. Bij deze beoordeling is rekening gehouden met meetbereik, meettechniek, weersomstandigheden en bodembedekking.

Het uitgevoerde onderzoek laat zien dat de invloed van het gewastype - en daarmee ook de teeltwijze en bodembedekking - sterk varieert en van grote invloed is op het gewasspectrum (Tabel 1). Circa 50 tot 70% van de variatie in sensor-output is hieraan gerelateerd. Het tijdstip waarop gemeten wordt kan aanvullend grote veranderingen veroorzaken: het effect varieert tussen <1% tot maximaal 65%. De meethoogte veroorzaakt een verandering in sensor-output van <1 tot 40%. Variatie in weer (invallende straling, neerslag, temperatuur) heeft ook invloed op het spectrum, maar dit effect is klein in vergelijking met de hierboven besproken factoren. De invloed van de onderzochte factoren is sensorspecifiek en hangt samen met de gebruikte gewasindex. De CropScan laat bijvoorbeeld grote effecten zien voor de aanwezigheid van schaduw, terwijl de GreenSeeker gevoelig is voor de aanwezigheid van vocht. De aanwezigheid van onkruiden leidt tot weinig veranderingen in het spectrum.

Tabel 1. Samenvattend overzicht van de invloed van externe factoren die sensor-output beïnvloeden

Factor Sensor	PPL-075	Aanvulling		Quickscan	Overall
	CS*	CS	GS	divers	
Verklaarde variantie in sensor output					
Gewas & bodem	20 - 70%	20-82%	62-81%	-	1
Weer	<1 – 15%	<1 – 5%	-	-	3
Meettijdstip	15 - 20%	9 - 56%	3-10%	-	2
Effect op sensor-output (relatief t.o.v. standaardmeting)					
Gewastype	1 – 72%	1 – 315%	22 - 600%	-	1
Meettijdstip	<1 – 56%	<1 – 90%	4 - 70%	<3 – 35%	2
Meethoogte	<1 – 40%	<1 – 23%	2 – 64%	<10 - >100%	3
Neerslag & dauw	<5%	<1 - 6%	<1 – 32%	<1 - 60%	5
Schaduw	-	<1 – 200%	<2%	<1 – 15%	4
Onkruiden	<10%	-	-	<25%	6
Temperatuur	<5%	-	-	<5%	7

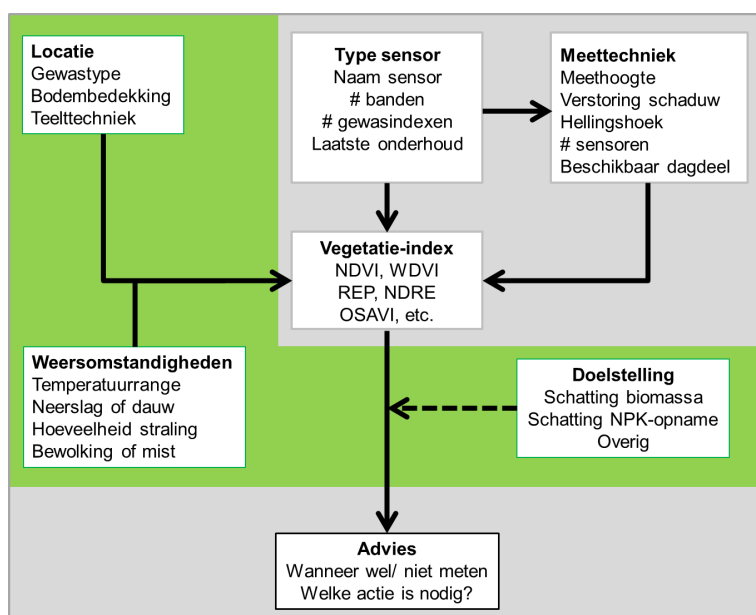
* CS is de afkorting voor CropScan en GS voor GreenSeeker

Hoe is nu concreet om te gaan met deze factoren die extra 'ruis' creëren op het gemeten spectrum en de afgeleide gewasindexen? Hiervoor zijn verschillende opties beschikbaar, voor zowel de agrarische gebruiker als adviezen voor ontwikkelaars van sensoren en bemestingsadviezen. Voor de agrarische gebruiker zijn er de volgende **praktische gebruiksadviezen**:

- kalibreer het systeem voor toepassing op het perceel (d.w.z., zorg voor de juiste connectie tussen sensor-output en nutriënten-opname);
- verander de meethoogte zodra het gewas meer dan 30 cm gegroeid is;
- vermijd weersomstandigheden met veel bewolking, mist en regen, en bij gebruik van een actieve sensor moet minstens een halve dag gewacht worden na een regenbui;
- vermijd de eerste twee uren na zonsopgang en voor zonsondergang;
- zorg ervoor dat passieve sensors niet belemmerd worden door schaduw vanaf de trekker;
- gebruik de meest robuuste gewasindex: de REP (CropScan) of de NDVI (GreenSeeker).
- houdt de kwaliteit van de sensor optimaal door het systeem regelmatig te laten kalibreren.

Uit dit onderzoek is duidelijk geworden dat er aanzienlijke variatie op kan treden in sensor-output op basis van meettechnieken en weersomstandigheden. Het is aan te bevelen dat leveranciers van sensoren informatie leveren over de invloed van praktische meetomstandigheden (meethoogte, meettijd, bewolking) op de meetwaarden en de daaruit berekende vegetatie-indexen. Voor een deel is deze informatie bekend, maar tot op heden is weinig onderzoek gedaan naar de gecombineerde invloed van deze factoren. De resultaten van bestaande onderzoeken zijn vaak beperkt tot één of enkele factoren en alleen geldig voor het desbetreffende gewas, sensortype, jaar en dag van meten. Gezien de variatie die op kan treden in gewasindexen, betekent dit dat deze 'ruis' ook gevolgen heeft voor de interpretatie van NDVI-kaartjes, vergelijkende studies, en de ontwikkeling van bemestingsadviezen.

De hierboven beschreven adviezen kunnen worden samengevat in één figuur waarbij de onderliggende relatie tussen locatie, sensortype, weer, en meettechnische gegevens samenkomen. Via deze aanpak is het mogelijk om voor elke combinatie een gepast advies te geven. Indien gewenst is het zelfs mogelijk om deze opzet als beslissingsondersteunende module of web-applicatie te koppelen aan bijvoorbeeld een sensing-gestuurd bemestingsadvies.



In dit rapport is bovenstaande protocol kwalitatief ingevuld voor het gebruik van de CropScan en GreenSeeker bij vijf verschillende gewassen. Hierbij lag de focus op de identificatie van de belangrijkste factoren en hun invloed op het spectrum en gewasindexen. De ontwikkelde statistische modellen kunnen echter ook gebruikt worden als input van het protocol. Hiermee is het mogelijk om een automatische correctie uit te voeren zodra afgeweken wordt van de 'standaard' meetmethode.

Gezien het belang van deze praktische aspecten voor een goed meetresultaat, en daarmee ook voor een succesvolle toepassing van sensoren in de praktijk, is het aan te bevelen om de onderliggende database verder aan te vullen. Hiervoor kan gebruik worden gemaakt van gegevens uit andere praktijkproeven om zo de in dit rapport gepresenteerde resultaten verder uit te bouwen. Het belang hiervan wordt bevestigd door het toenemend aantal publicaties dat sinds 2010 aandacht vraagt voor deze problematiek.

Conclusies:

- praktische meetomstandigheden hebben een grote invloed op de sensor-output. Deze invloed is gewas en sensorspecifiek;
- de hoeveelheid 'ruis' valt te verminderen wanneer de hier gepresenteerde adviezen worden gevolgd; en
- het is aan te bevelen om automatische correctiefactoren te ontwikkelen voor afwijkende meetomstandigheden.

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. Binnen het Programma Precisie Landbouw wordt daarom actief gewerkt aan de ontwikkeling en toepassing van precisie-landbouwtechnieken die inspelen op specifieke lokale omstandigheden binnen bedrijven en percelen. Het gebruik van gewassensoren om gewasontwikkeling en nutriëntenopname te volgen via sensoren op de trekker is daarvan een actuele toepassing.

In het groeiseizoen van 2012 is het praktische veldwerk van het PPL project 'ontwikkeling van beslissingsondersteunende systemen voor het bijmesten van gewassen (075)' uitgevoerd. Binnen dit project is voor 10 gewassen en drie nutriënten (N, P, K) onderzocht of het mogelijk is via het gebruik van gewassensoren de biomassa-ontwikkeling en nutriënten-opname te meten. De voorlopige resultaten laten zien dat de gebruikte sensoren daadwerkelijk verschillen meten in nutriëntengehaltes en biomassa ontwikkeling. Dit opent perspectieven voor de ontwikkeling van bijmestsystemen.

Voor succesvolle toepassing in de praktijk is het belangrijk om met zo min mogelijk ruis te meten, dat goed bekend is onder welke omstandigheden gemeten kan worden, en dat sensoren over een groot deel van de dag inzetbaar zijn. Een meet- en beoordelingsprotocol voor de inzetbaarheid van sensoren ontbreekt tot dusver en dient te worden ontwikkeld. Diverse PPL-partijen hebben daarom een ontwikkelverzoek ingediend met als doel inzicht te geven in de bruikbaarheid en praktische toepasbaarheid van gewassensoren.

Gebaseerd op de al verzamelde sensormetingen in het PPL-project 075, plus aanvullende metingen en literatuurgegevens, is door NMI een meet- en beoordelingsprotocol ontwikkeld waardoor duidelijk wordt onder welke omstandigheden sensoren inzetbaar zijn. Bij deze beoordeling is rekening gehouden met meetbereik, meettechniek, weersomstandigheden, bodembedekking en ruimtelijke schaal.

In dit rapport wordt

- inzicht gegeven in praktische factoren die van invloed zijn op het sensorsignaal; en
- een meet- en beoordelingsprotocol ontwikkeld voor de inzetbaarheid van sensoren.

2 Werkwijze

2.1 Inleiding

Om een meet- en beoordelingsprotocol voor de inzetbaarheid van sensoren te ontwikkelen, is inzicht nodig in praktische factoren die het meetsignaal beïnvloeden. In deze studie gaat het daarbij concreet om de volgende vragen:

- Is het optimale meettijdstip afhankelijk van hoeveelheid invallend zonlicht, met andere woorden: kan op elk moment van de dag gemeten worden?
- Is de nauwkeurigheid van de gewassensor afhankelijk van de afstand tussen het gewas en de sensor?
- Is het mogelijk om goede metingen uit te voeren met de gewassensor na een regenbui, en indien de vochtigheid van het gewas de uitslag beïnvloed, hoe lang moet gewacht worden voordat opnieuw gemeten kan worden?
- Wordt de toepasbaarheid van de gewassensor beïnvloed door de aanwezigheid van schaduw?
- Heeft de aanwezigheid van onkruiden op het perceel een versturende invloed op het spectrum?

2.2 Statistische analyse proefgegevens PPL-project 075

Op basis van de vele gegevens die in PPL-project 075 zijn verzameld ($n \sim 14.000$ scans), is onderzocht hoe groot het effect is van meethoogte, meettijdstip, bewolking, en temperatuur. Voor de statistische analyse van de data is in eerste instantie gebruik gemaakt van de REML procedure (REsidual Maximum Likelihood) in het statistische software pakket GenStat 14.1.

Deze REML procedure is een analyse techniek waarmee de behandelingseffecten en de variantiecomponenten in een lineair gemengd model geschat kunnen worden. Hiertoe wordt een model opgesteld met zowel vaste (fixed) factoren als willekeurige (random) factoren. Vaste factoren zijn factoren die direct en sterk van invloed zijn en die in verschillende niveaus aangelegd (bemestingsniveaus) of gemeten zijn (bijvoorbeeld kleigehalte). Willekeurige factoren zijn factoren die wél van invloed zijn, maar die níet van te voren beïnvloedbaar zijn óf die binnen het onderzoek onvoldoende gekwantificeerd (kunnen) worden. Voorbeelden van random factoren zijn proefjaar (vanwege weersinvloeden onvoorspelbaar), percelen op verschillende locaties die onderling verschillen in meerdere bodemeigenschappen, vochtvoorziening, bodemstructuur, ras-eigenschappen, zaaidatum of oogsttijdstip, etc. Binnen de REML-procedure worden deze factoren als een of enkele verzamelterm(en) meegewogen als random factor. Hiermee wordt een deel van de ruis (variatie) in de data verklaard zonder dat het model aan kracht inboet, wat wel het geval zou zijn als de random factoren allemaal afzonderlijk meegenomen zouden moeten worden (verlies aan vrijheidsgraden).

Via deze methodiek kunnen de meetresultaten op een statistisch verantwoorde manier worden verwerkt en is het mogelijk om te analyseren of bovengenoemde factoren een invloed hebben op het spectrum (of op afgeleide gewas-indexen) en ook hoe groot dat effect is. Tevens wordt hierdoor duidelijk wat het meetbereik is van de gebruikte sensor. De beschikbare gegevens omvatten metingen voor 10 gewassen op diverse locaties in Nederland, gemeten op verschillende dagen gedurende het groeiseizoen (3-4 meettijdstippen per gewas) voor 3 verschillende bemestingsniveaus.

Omdat er tijdens het veldonderzoek ook enkele kleine testen zijn uitgevoerd in relatie tot meethoogte en de aanwezigheid van onkruid, zullen deze gegevens statistisch worden geanalyseerd. De resultaten van de statistische analyse van dit onderdeel worden beschreven in hoofdstuk 3.

2.3 *Aanvullende kleine experimenten*

Voor een aantal gewassen die variëren in bodembedekking en gewasstructuur zijn een aantal tests uitgevoerd om de invloed van meettijdsp, meethoogte, schaduw, en vochtigheid vast te stellen.

Concreet zijn hierbij de volgende factoren meegenomen:

- gewastype: prei, rode kool, gras, wortel en lelie;
- meettijdsp: meting van 1 uur na zonsopgang tot 1 uur voor zonsondergang;
- vocht (neerslag): meting voor en na gesimuleerde regenbui; en
- schaduw: meting zonder/ met schaduw.

De experimenten zijn uitgevoerd op de volgende dagen:

- op 27 september voor het gewas wortel op een kleigrond in Biddinghuizen (Flevoland);
- op 3 oktober voor het gewas prei op een zandgrond in Nuenen (Brabant);
- op 9 oktober voor het gewas lelie op een zandgrond in Jubbega (Friesland);
- op 10 oktober voor het gewas kool op een kleigrond in Elst (Rivierengebied); en
- op 23 oktober voor het gewas gras op een zandgrond in Wageningen (Gelderland).

De gebruikte sensoren die geselecteerd zijn voor dit onderzoek variëren in eigenschappen: de CropScan meet op 16 banden zonder actieve lichtbron terwijl de GreenSeeker meet via 2 banden met een actieve lichtbron. De metingen zijn uitgevoerd in de maanden september en oktober. Voor de praktische uitvoering van de 'standaard' meting wordt gebruik gemaakt van het meetprotocol dat ontwikkeld is in het PPL-project 075. De resultaten van de statistische analyse van dit onderdeel worden beschreven in hoofdstukken 4 en 5. Achtergrondinformatie wordt beschreven in bijlages 2, 3 en 4.

2.4 *Quickscan literatuur*

Omdat de resultaten van bovenstaande onderdelen gebaseerd zijn op de gewassensoren CropScan en GreenSeeker wordt in de literatuur gezocht naar het meetbereik van andere sensoren en hun gevoeligheid voor externe factoren, in het bijzonder voor variatie in meettijdsp, meethoogte, en weersomstandigheden. Deze studie maakt alleen gebruik van publicaties in wetenschappelijk of semiwetenschappelijke bladen. De resultaten van dit onderdeel worden beschreven in hoofdstuk 6.

2.5 *Compilatie en ontwikkeling beoordelingsschema*

Op basis van voorgaande onderdelen zijn praktische regels voor de praktijk ontwikkeld: waar, wanneer en hoe kan/ moet gemeten worden voor een goed resultaat. De resultaten hiervan zijn vervolgens samengevat in een overzichtelijk beoordelings- en gebruiksschema. Zie hiervoor hoofdstuk 7.

3 Statistische analyse bestaande gegevens

3.1 *Samenvatting resultaten*

De analyse van de dataset die in najaar 2012 verzameld is, heeft de volgende resultaten opgeleverd:

- Het **gewastype en daarmee ook teeltwijze en bodembedekking** variëren sterk en hebben een belangrijke invloed op het spectrum. Circa 50 tot 70% van de variatie in gewasreflectie is gerelateerd aan gewastype. Toch zijn deze effecten niet bij alle gewasindexen even sterk aanwezig, wat aangeeft dat bij de ontwikkeling van bemestingsadviezen rekening gehouden moet worden met grote variatie tussen indexen. Praktisch kan dit opgelost worden door op elk perceel een (absolute of relatieve) kalibratie uit te voeren.
- Het **tijdstip waarop gemeten wordt**, heeft een relevant effect op vrijwel alle gewasindexen. De enige uitzondering is de REP-index. De grootste veranderingen treden op vroeg in morgen of laat in de middag. Het effect kan variëren tussen <1 en 65%. Wanneer meerdere metingen gedurende de dag worden uitgevoerd of sensor-output over meerdere dagen vergeleken wordt, is het nodig om met deze variatie rekening te houden. Een alternatief is de keuze voor een meer robuuste gewasindex.
- De **meethoogte boven het gewas** heeft invloed op het gemeten spectrum, en daarmee ook op de daarvan afgeleide gewasindexen. Het effect varieert van <1% voor de REP-index tot 40% voor de TCARI-index. Wanneer er gedurende het seizoen bij een vaste spuitboomhoogte wordt gemeten (en het gewas doorgroeit), is het belangrijk om hiermee rekening te houden door ofwel de meethoogte aan te passen, dan wel de sensor voor gebruik te kalibreren. Ook is het aan te bevelen om voor de ontwikkeling van vertaalfuncties richting een bemestingsadvies hiermee rekening te houden.
- Variatie in **weersomstandigheden** (invalende straling, neerslag, temperatuur) heeft ook invloed op het spectrum, maar dit effect is klein in vergelijking met de hierboven besproken factoren. Grotendeels hangen deze factoren ook samen met het meettijdstip zelf. Het effect van meettijdstippen integreert deze – en mogelijk andere aspecten – zodat in de vertaalslag richting een advies niet voor elk type weer aparte rekenregels moeten worden opgesteld.
- De **aanwezigheid van onkruiden** leidt tot weinig veranderingen in het spectrum. De uitgevoerde testen lijken daarmee te suggereren dat voor praktische toepassing mogelijke onkruiden geen belemmering vormen om te gaan meten.

3.2 *Beschrijving dataset*

In het groeiseizoen van 2012 is voor het PPL project 075 ‘Ontwikkeling van beslissingsondersteunende systemen voor het bijmesten van gewassen’ uitgebreid veldonderzoek uitgevoerd bij diverse gewassen in Nederland. Het doel van dit project was om voor tien potentiële gewassen na te gaan of gewassensoren in staat zijn om de actuele gewasontwikkeling en NPK-opname te schatten.

De proefopzet ziet er als volgt uit: er zijn 10 boerenbedrijven geselecteerd met een lage K- en P-status van de bodem. Op elk bedrijf zijn vervolgens twee percelen geselecteerd waarop drie kunstmesttrappen zijn aangelegd om zo extra variatie te creëren in nutriëntenopname. De volgende gewassen zijn in dit

onderzoek meegenomen: aardappel, zomergerst, mais, prei, wortel, ui, gras, rode kool, lelie en aardbei. Gedurende het groeiseizoen zijn de percelen drie tot vier keer bezocht vanaf het moment dat >50% van de bodem bedekt was (bij een gewas als prei, wortel, en ui is hiervan afgeweken). De metingen zijn uitgevoerd op regenrijke dagen in de periode mei tot september.

De metingen zijn uitgevoerd met de CropScan sensor volgens een standaard meetprotocol, zoals ontwikkeld binnen PPL-project 075. Aanvullend zijn diverse kleine testen uitgevoerd om effecten van meethoogte, onkruid en variatie in bodemvocht inzichtelijk te maken. In totaal zijn er ~14000 scans verzameld.

Binnen deze dataset zijn de volgende gegevens aanwezig:

- gemeten reflectie in 16 golflengtes (banden);
- informatie over het experimentele design: locatie, gewastype, kunstmesttrap;
- weergegevens: temperatuur, invallende straling, hoeveelheid neerslag tijdens dag voor de meting, hoek waaronder het zonlicht de sensor bereikt;
- meetgegevens: meethoogte, dag-nummer; en
- diverse indexen berekend op basis van de gemeten reflectie. Dit zijn: twee NDVI-indexen, drie WdVI-indexen, en de indexen REP, NDRE, TCARI, OSAVI, TOSAVI, DCNI, CI, MCARI, RVI1, RVI2, en MTCI. Een beschrijving van deze indexen wordt gegeven in bijlage1.

3.3 Statistische analyse

De gegevens in de dataset zijn geanalyseerd via integrale statistische analyse methoden als *REML mixed modelling* (zie toelichting in 2.2.). De uitgevoerde analyse bestaat uit de volgende onderdelen:

- **Het opschonen van de dataset:** voor de analyse moeten de verzamelde gegevens voldoen aan de standaard vereisten voor een statistische analyse. De gegevens zijn daarvoor nagekeken waarna verkeerde waarnemingen (reflectie groter dan 100 of kleiner dan 0) en uitbijters zijn verwijderd.
- Een **eerste analyse** van welke factoren van invloed zijn op het spectrum en de afgeleide gewasindexen is uitgevoerd via *Generalized Linear Modelling* (all-subsets regression). Hierbij zijn de top-5 factoren die een effect hebben op de sensor-output geselecteerd per gewasindex. Van deze top-5 factoren is vervolgens via *REML modelling* bepaald hoeveel zij bijdragen aan de variatie in het spectrum en de afgeleide gewasindexen.
- De **invloed van gewastype en locatie** zijn onderzocht via *REML modelling*. Bij deze analyse wordt tegelijkertijd rekening gehouden met het tijdstip waarop de meting is uitgevoerd (random component, met interacties indien significant). Alleen de gegevens die via het standaard protocol zijn verzameld, zijn in deze analyse meegenomen.
- Het **effect van het meettijdstip** is onderzocht via een verklarend model dat inzichtelijk maakt wat de invloed is van het meettijdstip (het gemeten uur of dagdeel) op de variatie in gewasreflectie en afgeleide gewasindexen. De variatie die samenhangt met gewastype en de locatie waar het experiment is uitgevoerd, worden expliciet meegenomen en wel door deze factoren mee te nemen in de analyse als random component. Er is aanvullend getest of de factoren 'invallend licht', 'temperatuur', 'neerslag tijdens de dag voor de meting', 'meet-dag', 'hoeveelheid straling' en 'hellingshoek (positie van de zon)' van invloed zijn op de sensor output. Indien deze variabelen een significante bijdrage leveren aan het verklarend karakter van het model, dan zijn ze toegevoegd aan de random component. De aldus verkregen

modellen verklaarden 34 tot 66% van de variatie in de meetgegevens.

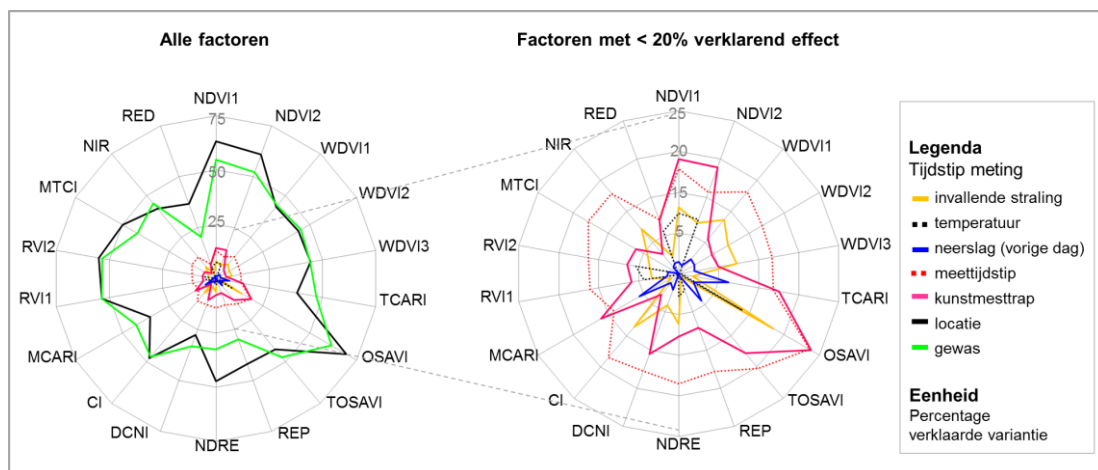
- Het **effect van meethoogte** is onderzocht via een verklarend model waar 'gewastype' en 'proefnummer' als random variabele is meegenomen. Hiervoor is gebruik gemaakt van alle uitgevoerde proefjes waarbij de hoogte is gevarieerd. Er is aanvullend getest of weersgegevens van invloed zijn op de sensor output. Indien deze variabelen een significante bijdrage leverden aan het verklarend karakter van het model, dan zijn ze toegevoegd. De gebruikte modellen verklaarden 47 tot 96% van de variatie in sensor-output.

Omdat in de Nederlandse praktijk vooral gewerkt wordt met een beperkt aantal gewasindexen, zal in dit rapport geen uitvoerige analyse worden gegeven van het effect van meettijdstip, meethoogte en andere factoren op het spectrum zelf. Dit sluit tevens aan bij het gegeven dat een vertaalslag richting een bemestingsadvies vrijwel altijd gebruik maakt van een gewasindex. Uitzondering zijn de effecten op de reflectie in Rood (670 nm) en NIR (780 nm), omdat dit de belangrijkste banden zijn die gebruikt worden.

3.4 Invloed van diverse factoren

De belangrijkste factoren die de variatie in afgeleide gewasindexen bepalen, zijn het gewastype en de locatie. Wanneer alle andere factoren als random worden beschouwd, dan verklaren zij circa 20 tot 70% van de variatie in gewasindex ($P < 0,001$). De aangelegde kunstmesttrappen en het tijdstip waarop gemeten wordt verklaren circa 3 tot 20% van de variatie. Factoren die minder dan 15% verklaren, zijn de hoeveelheid invallende straling (<1 tot 14%), de hoeveelheid neerslag die de vorige dag gevallen is (<1 tot 6%) en de gemiddelde dagtemperatuur (<1 tot 10%).

De invloed van al deze factoren op de reflectie in Rood en NIR, en de afgeleide gewasindexen is gevisualiseerd in figuur 3.1. Het effect van locatie hangt grotendeels samen met het daar aanwezige bodemtype en externe omstandigheden die lichtinval en reflectie beïnvloeden (bijvoorbeeld: bomenrij, nabijliggende huizen, etc.). Het effect van locatie en gewas zijn vergelijkbaar voor de meeste indexen.



Figuur 3.1. Invloed van diverse factoren op afgeleide gewasindexen (R^2 verklaarde variantie): de waarde geeft aan hoeveel procent van de variatie in sensor-output verklaard kan worden door de aangegeven factor (meettijdstip, locatie, gewastype, etc.).

Een vergelijkbaar resultaat is aanwezig voor het meettijdstip. De invloed van de overige factoren (invallende straling & bewolking, neerslag, temperatuur en kunstmesttrap) varieert sterk. Ter illustratie:

de REP-index wordt vrijwel niet beïnvloed door de hoeveelheid invallende straling, neerslag of temperatuur, maar wel door het meetmoment en de aangelegde kunstmestbehandeling. Wel wordt opgemerkt dat deze effecten relatief klein zijn (de verklaarde variantie is kleiner dan 10%).

Wanneer via multiple regressie de invloed van de verschillende factoren integraal wordt geanalyseerd, dan blijken locatie en gewastype opnieuw het grootste effect te hebben. Opvallend hierbij is dat de top-3 van elke sensor-output vrijwel altijd bestaat uit:

- 1) een variabele die gerelateerd is aan de locatie,
- 2) een variabele die gerelateerd is aan het daar aanwezige gewas, en
- 3) een variabele die samenhangt met het moment waarop de meting is uitgevoerd.

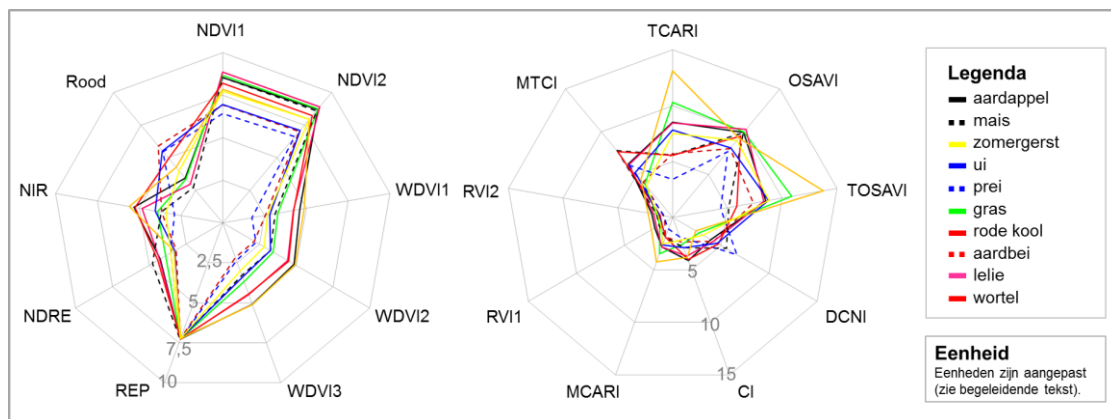
Wanneer deze factoren worden meegenomen in de analyse, dan wordt ~40 tot 60% van de variatie in gewasindexen verklaard. Dit betekent ook dat ~ 50% van de variatie in de gewasindex samenhangt met 'ruis', ofwel natuurlijke (onbekende) factoren die niet zijn meegenomen in de analyse.

3.4.1 Invloed van locatie & gewastype

De locatie en het gewastype zijn van grote invloed op het gereflecteerde spectrum en de daarvan afgeleide gewasindexen ($P < 0,001$). Ter illustratie is hieronder weergegeven hoe de reflectie in Rood en NIR veranderen afhankelijk van het gewastype. In dezelfde figuur wordt ook het effect van gewastype & locatie op de gewasindexen weergegeven. De sensor-output is in absolute eenheden uitgedrukt. Daarbij is de schaal per index gestandaardiseerd op een schaal van 1 tot 10 via:

- vermenigvuldiging met een factor 10 voor NDVI1, NDVI2, NDRE, OSAVI en DCNI;
- deling door een factor 10 voor WDV11, WDV12, WDV13, NIR, CI, RV11 en RV12, en;
- deling door een factor 100 voor REP, en;
- geen wijziging voor Rood, TCARI, TOSAVI, MCARI en MTCI.

Zo kunnen alle resultaten in één overzicht weergegeven worden.



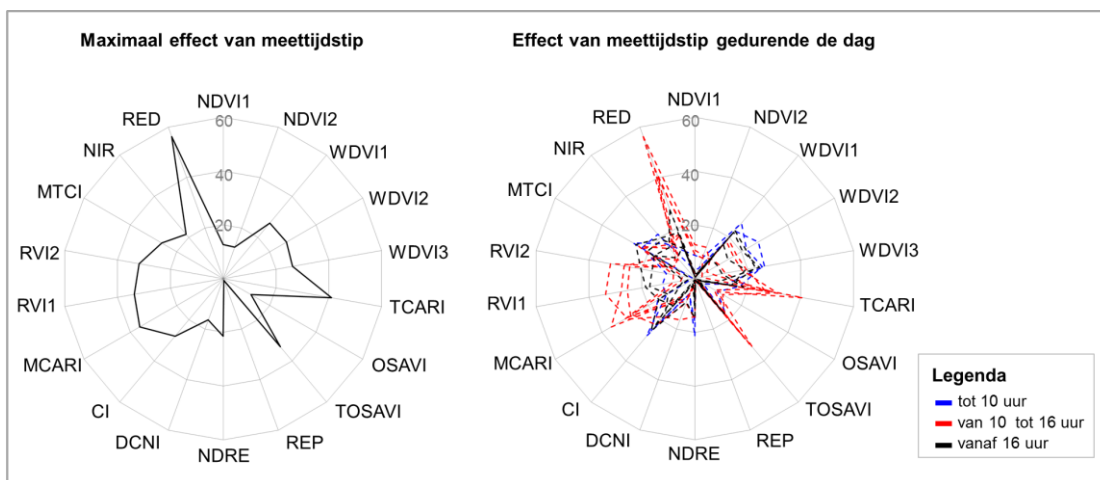
Figuur 3.2. Effect van gewastype op de reflectie in NIR en Rood en op diverse gewasindexen na standaardisatie op een schaal van 1 tot 10.

De hoeveelheid reflectie in Rood varieert tussen 2,7 en 5,9%. De variatie in NIR-reflectie is vergelijkbaar en varieert tussen 29 en 56%. Uitgedrukt op een relatieve schaal kan de reflectie met 45 tot 75% verschillen afhankelijk van het gewastype. Voor de indexen varieert de gewasafhankelijke invloed tussen <1% voor de REP-index tot 24% voor beide NDVI-indexen en tot maximaal 68% voor de DCNI-index. Het is duidelijk zichtbaar dat verschillen tussen gewassen niet voor alle indexen hetzelfde zijn, in

het bijzonder voor indexen die wel of geen correctie aanbrengen voor de bodemreflectie. Indexen die expliciet rekening houden met bodembedekking (zoals OSAVI en TCARI, TOSAVI, WdVI) laten bovendien een grotere variatie zien dan indexen die niet corrigeren voor bodemafhankelijke reflectie (zoals NDVI, REP, RVI).

3.4.2 Invloed van meettijd

Het meettijd heeft een significant effect op vrijwel alle onderzochte gewasindexen ($P < 0,001$). In figuur 3.3. wordt aangegeven hoe groot het maximale effect is van meettijd op de gemeten reflectie in het VIS- en NIR-deel van het spectrum en de diverse gewasindexen. Hierbij is het effect berekend als het percentage verandering in de sensor-output ten opzichte van de meting die om 8 uur is uitgevoerd. Opvallend is dat er vooral een grote verandering optreedt in de reflectie in het rode deel van het spectrum (hoewel de absolute reflectie maar met maximaal 2,5% veranderd).



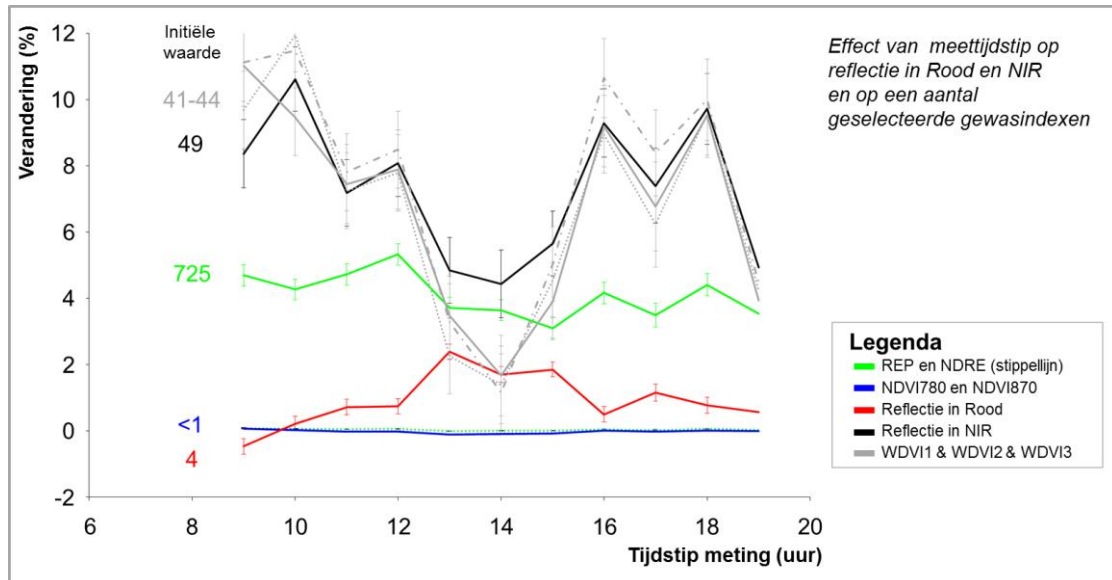
Figuur 3.3. Maximaal effect van meettijd op de reflectie in Rood en NIR en de afgeleide gewasindexen, uitgedrukt in percentage verandering ten opzichte van de meting om 8.00 uur.

Het effect van meettijd varieert tussen <1% voor de REP-index tot 40% voor de TCARI-index. Ook de beide NDVI-indexen worden relatief weinig beïnvloed. De TCARI, TOSAVI, MCARI en beide RVI-indexen worden relatief sterk beïnvloed. Omdat de diverse tijdstappen worden vergeleken met de meting die in de vroege ochtend (8 uur) is uitgevoerd, is het niet vreemd dat juist het verschil met metingen in de late namiddag (na 4 uur) en de vroege ochtend niet zo sterk afwijken, omdat de zonnestand en hoeveelheid invallende straling ongeveer vergelijkbaar is. Het grootste verschil treedt op bij metingen die tussen 12 en 4 uur zijn uitgevoerd (dat wil zeggen: ze verschillen het sterkst van de meting vroeg in de ochtend).

Opgemerkt wordt dat de 'ruis' op de diverse meetmomenten niet veranderd over de dag. De meetfout op de reflectie in Rood en NIR bedraagt respectievelijk ~7 en ~12%. Dit geeft aan dat er altijd enige natuurlijke variatie bestaat die 'ruis' creëert op het gemeten spectrum. Daarom moeten zeker meerdere metingen moeten worden uitgevoerd om een goede analyse van een perceel te geven. De hoeveelheid ruis op de verschillende gewasindexen varieert tussen <1% voor REP tot ~15% voor beide RVI-indexen.

Ter illustratie wordt hieronder in meer detail aangegeven hoe de verschillende indexen variëren over de een dag. Hierbij is de verandering weergegeven als een *absolute* verandering ten opzichte van de waarde op 8 uur in de ochtend. Met toenemende hoeveelheid straling stijgt in de ochtend de reflectie in NIR en

Rood, met als gevolg dat verschillende gewasindexen gaan veranderen. Gedurende de dag zijn de veranderingen overigens klein (maar wel significant), uitgezonderd een stijging in Rood gedurende 12 tot 15 uur en een daling in de NIR. De WdVI reageert sterker op deze veranderingen dan REP en NDVI.



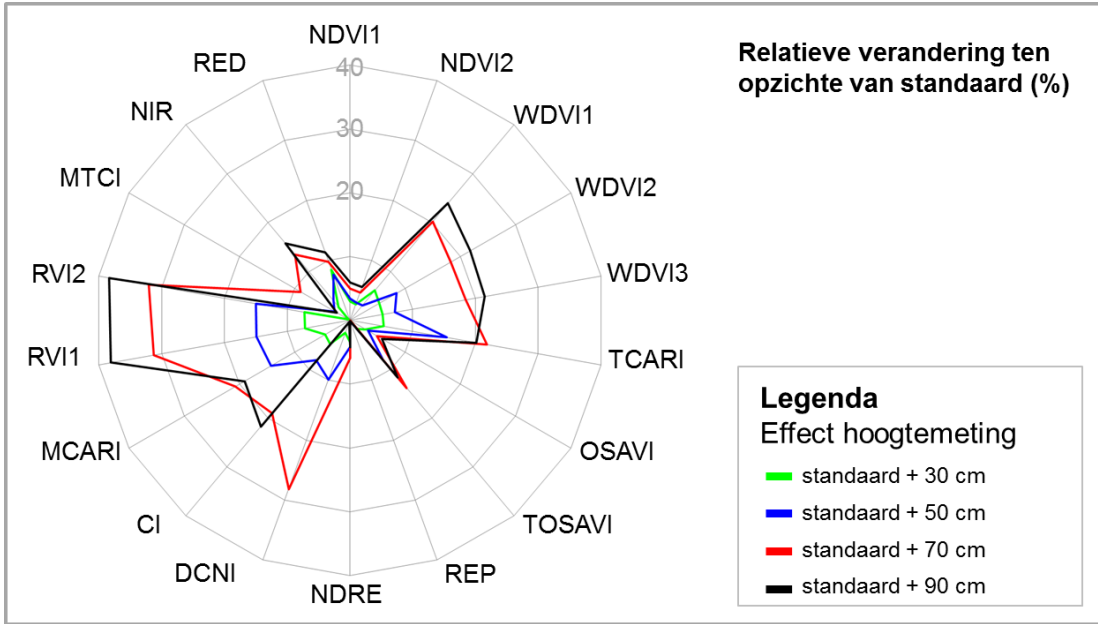
Figuur 3.4. Effect van tijd op de reflectie in Rood en in NIR en op de bekendste gewasindexen, uitgedrukt in absolute verandering ten opzichte van de meting om 8.00 uur.

De relatieve veranderingen vertonen uiteraard een vergelijkbaar patroon als hierboven weergegeven. In dat geval varieert het effect van meettijd van <1% voor REP tot 56% voor de reflectie in Rood. De veranderingen in de NDRE is maximaal 22%, in beide NDVI-indexen 13%, in NIR 22% en in de drie WdVI-index is de verandering maximaal 27%. Over de dag zijn vrijwel alle veranderingen significant (of een verandering significant is, kan worden geschat met behulp van de vuistregel dat het verschil tussen twee datapunten groter moet zijn dan $\sim 2 \times$ de standaardfout). Of, en in welke mate, deze veranderingen relevant zijn, hangt af van de vertaalslag richting een schatter van biomassa-ontwikkeling en nutriëntenopname. In de eindrapportage van het PPL-project 075 zal dit expliciet worden meegenomen in de evaluatie van het gebruik van sensoren voor precisiebemestingsdoeleinden.

3.4.3 Invloed van meethoogte

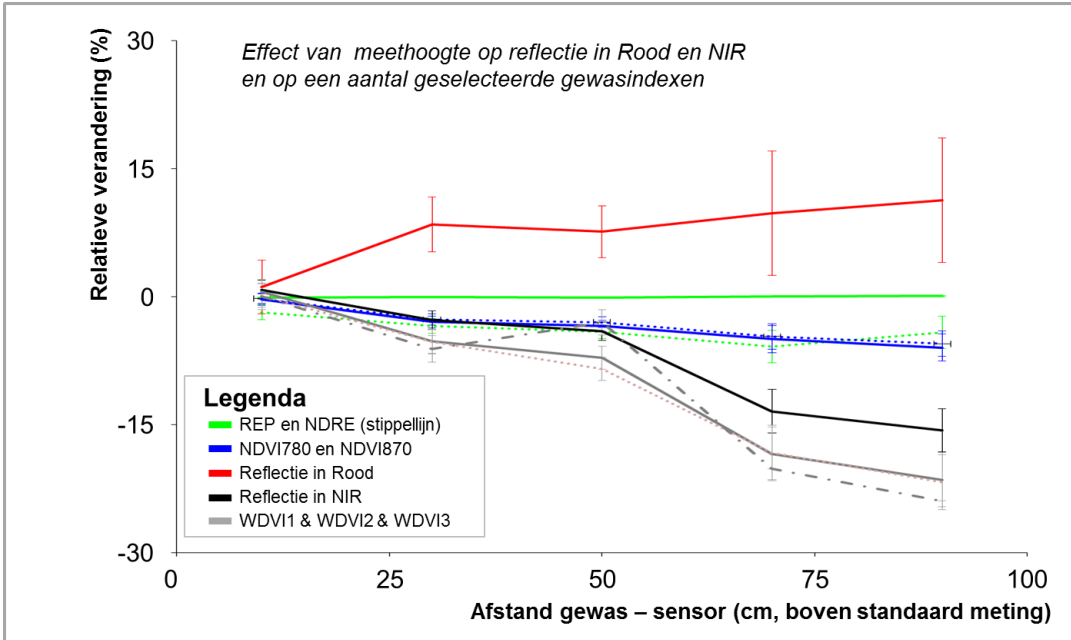
Gedurende het veldwerk in 2012 in het kader van PPL-project 075 zijn 21 testen uitgevoerd waarbij de meethoogte is gevarieerd. Dit is gebeurd in de gewassen aardappel, gerst, rode kool, mais, ui, prei, mais en lelie. Het effect van hoogte is integraal geanalyseerd op deze dataset, waarbij het gewastype en het meetmoment zijn meegenomen als random variabele. Hierdoor worden mogelijke verschillen in achtergrondstraling, bodemtype en gewas meegenomen in de analyse.

De resultaten van deze analyse zijn in figuur 3.5. weergegeven. In deze figuur staat de relatieve verandering ten opzichte van de standaard meting. Hier zijn alleen de resultaten zichtbaar gemaakt voor de metingen waarbij de sensor 30, 50, 70 of 90 cm hoger staat als de standaardmeting. De verandering is hier weergegeven als een absolute waarde, dat wil zeggen dat er geen onderscheid is gemaakt tussen een verlaging of een verhoging van de sensor-output. Het is duidelijk zichtbaar dat meethoogte een groot effect heeft op de sensor-output. Het effect kan variëren van <1% voor de REP-index tot circa 40% voor de RVI-indexen.



Figuur 3.5. Het effect van meethoogte op de reflectie in Rood en NIR en op de afgeleide gewasindexen, uitgedrukt in percentage verandering ten opzichte van de standaard meting.

Ter illustratie is in figuur 3.6. aangegeven hoe de sensor-output verandert als de sensorhoogte gewijzigd wordt voor de belangrijkste in Nederland toegepaste indexen. De veranderingen zijn weergegeven als een relatieve verandering ten opzichte van de standaardmeting.



Figuur 3.6. Het effect van meethoogte op de reflectie in Rood en in NIR en op de afgeleide gewasindexen, uitgedrukt in percentage verandering ten opzichte van de standaard meting.

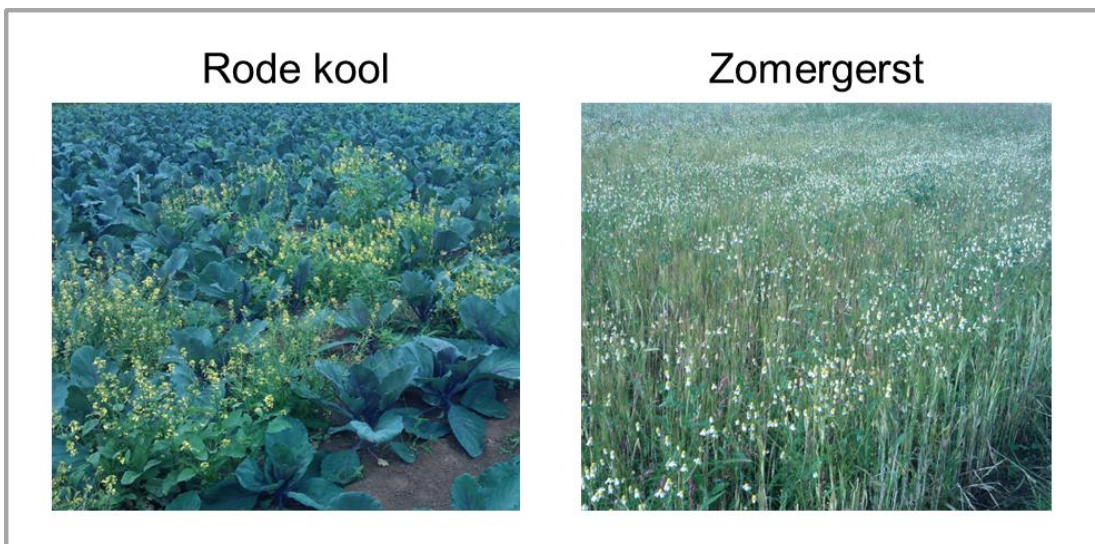
Wanneer de meethoogte wordt verhoogd, gaat de reflectie in Rood licht omhoog, terwijl de reflectie in NIR wordt verlaagd. In absolute zin zijn de veranderingen niet heel groot: er is +0,5% meer reflectie in het rode deel van het spectrum terwijl de reflectie in NIR wordt verlaagd met 8%. Het grootste effect bij de NIR-reflectie treedt op als de afstand gewassensor verandert met meer dan 50 cm. Bij de reflectie in

Rood is de verandering al significant na een verandering van 50 cm al wordt de verandering bij nog hogere meetafstanden niet meer significant. De variatie in de metingen neem echter wel toe. Dit betekent dat er meer metingen uitgevoerd moeten worden om een representatief beeld te krijgen van de gewasreflectie. Het is daarom aan te bevelen om de afstand tussen gewas en sensor niet meer dan 50 cm te variëren wanneer tijdseries gemaakt worden. Voor de praktijk betekent dit dat sensor kalibratie nodig is zodra de afstand tussen gewas en sensor veranderd met meer dan 50 cm.

Voor een inschatting van de 'ruis' heeft dit effect van meethoogte grote gevolgen: wanneer gebruik wordt gemaakt van een lineaire vertaalfunctie naar een N-advies moet met een vergelijkbare onzekerheid rekening worden gehouden. Concreet werkt dit door in een verlaging van de drie WdVI-indexen en de twee NDVI-indexen. De REP-index lijkt ongevoelig te zijn voor variatie in meethoogte: het effect is $< 0,1\%$. Alleen bij een verandering > 90 cm worden de wijzigingen in REP-index significant.

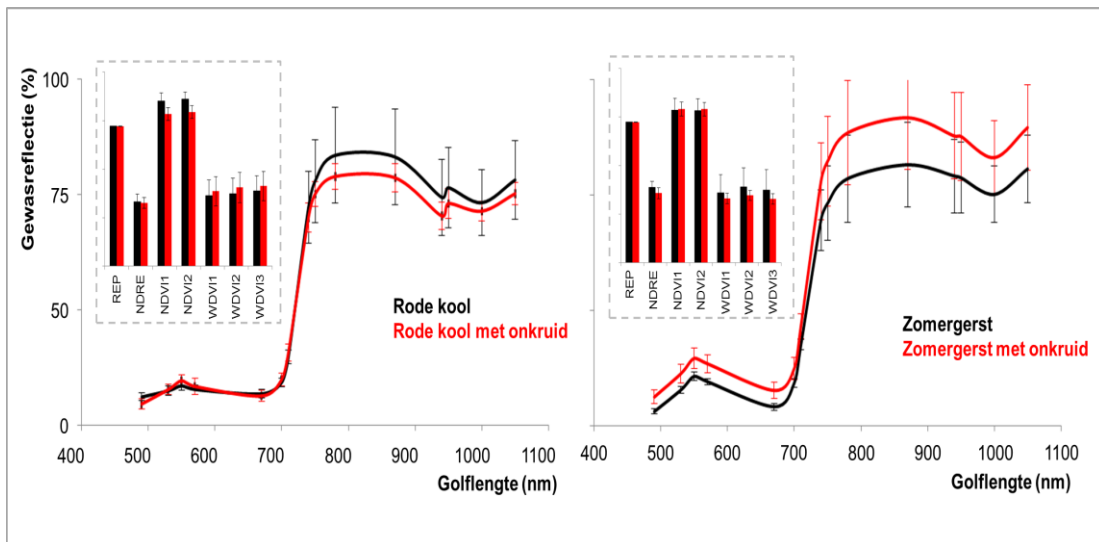
3.4.4 Invloed van onkruid

De metingen die volgens het standaard protocol zijn uitgevoerd, worden gemeten op een perceel waarbij aanwezige onkruiden tevoren zijn verwijderd. Tijdens de meetcampagne is twee keer een scan gemaakt van een perceel met en zonder onkruid. Het gaat hierbij om een rode kool perceel in Elst en een perceel met zomergerst in Wageningen (zie bijgevoegde illustratie).



Figuur 3.7. Perceel met onkruiden in rode kool en zomergerst.

De spectra bij het perceel met en zonder onkruid zijn in figuur 3.8. weergegeven. Uit deze resultaten blijkt dat er veranderingen zichtbaar zijn in het NIR spectrum voor rode kool en over het gehele spectrum in zomergerst. De veranderingen zijn echter niet consequent, en ook zijn de verschillen niet significant ($P > 0,05$).



Figuur 3.8. Het effect van veronkruiding op het spectrum van zomergerst en rode kool.

In de inzet van de figuren is bovendien inzichtelijk gemaakt dat het ook geen effect heeft op de zeven meest gebruikte gewasindexen. Dit betekent dat de aanwezigheid van onkruid geen grote verstoring oplevert van het spectrum. Uiteraard zijn dit twee kleine testen dus enige voorzichtigheid in het opschalen van deze resultaten is nodig.

4 Aanvullende experimenten: resultaten CropScan

4.1 Inleiding

In een vijftal aanvullende experimenten is onderzocht wat het effect van meettijdstip en meethoogte is op het spectrum en afgeleide gewasindexen. Tevens is gekeken naar de invloed van een regenbui en de aanwezigheid van schaduw. De weersgegevens gedurende de meetdagen en de resultaten van de verschillende proeven worden in detail besproken in bijlages 2 en 3. In dit hoofdstuk zijn de resultaten samengevat weergegeven, inclusief de statistische onderbouwing.

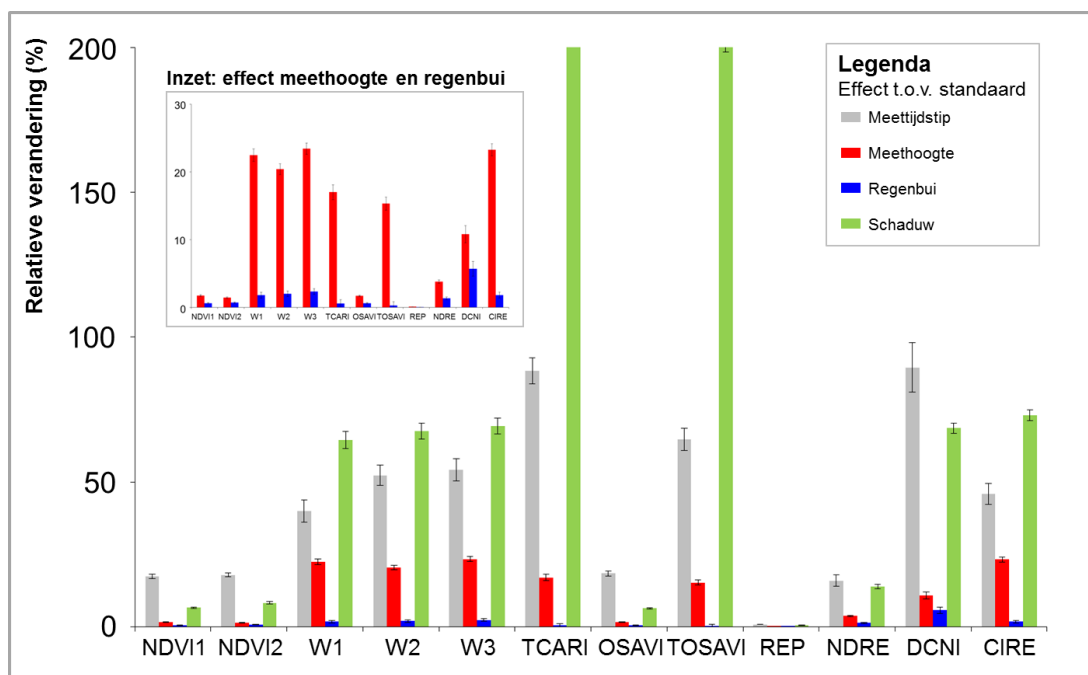
4.2 Statistische analyse

Het effect van meettijdstip, meethoogte, neerslag en schaduw is geanalyseerd via REML modeling. Hierbij zijn de effecten van deze variabelen apart geanalyseerd, dat wil zeggen:

- Het effect van meettijdstip is alleen geanalyseerd voor de metingen die op de standaard hoogte zijn uitgevoerd, en de metingen van de andere experimenten (neerslag, meethoogte, schaduw) zijn hierin niet meegenomen. In totaal zijn 1000 scans beschikbaar die op 5 locaties gedurende de dag (van 8 tot 19 uur) zijn genomen.
- Het effect van meethoogte is geanalyseerd voor de metingen waarbij de hoogte is gevarieerd. De behandelingen zijn: standaard hoogte, en de hoogte +20, +40, +60, +80 en +100 cm. In totaal zijn er gegevens beschikbaar van 523 scans.
- Het effect van extra schaduw is geanalyseerd voor 5 locaties. De behandelingen zijn: de standaardmeting en metingen waarbij invallend zonlicht wordt geblokkeerd (schaduw-meting). In totaal zijn er gegevens beschikbaar van 369 scans.
- Het effect van een gesimuleerde regenbui is geanalyseerd voor 4 locaties. De behandelingen zijn: de standaard meting en metingen na een gesimuleerde regenbui. In totaal zijn er gegevens beschikbaar van 1940 scans.

Het gebruikte model varieert voor de verschillende onderdelen. Naast de aangelegde behandelingen is expliciet rekening gehouden met het locatie-effect en andere factoren die de gewasreflectie beïnvloeden. De reden hiervoor is dat het gewas type dan wel locatie-effect (hier is geen onderscheid tussen te maken omdat er 5 locaties zijn gemeten met elk 1 gewas) 20-83% van de variatie in sensor-output verklaard. In vergelijking hiermee is het effect van meettijdstip en de hoeveelheid invallende straling kleiner: deze verklaren 9 tot 56% dan wel <1 tot 14% van de variatie in sensor-output. De invloed van het locatie-effect wordt daarom als random variabele meegenomen in het kwantificeren van de effecten van meettijdstip, meethoogte, schaduw of regenbui. Bij de laatste drie factoren is ook meettijdstip meegenomen als random variabele om rekening te houden met het tijdseffect binnen de verschillende testen die op één dag zijn uitgevoerd.

In figuur 4.1. zijn de resultaten samengevat voor de berekende gewasindexen. Er is weergegeven hoeveel de gewasindex verandert door een verandering in meettijdstip, meethoogte of de aanwezigheid van regen of schaduw (verandering ten opzichte van gemiddelde waarde). Hierbij is gekozen voor het maximale effect dat door tijd, meethoogte, schaduw of regen wordt veroorzaakt. Let wel, het gaat hier alleen om het maximale effect; er is niet aangegeven of het effect positief (een stijging) of negatief (een daling) is.



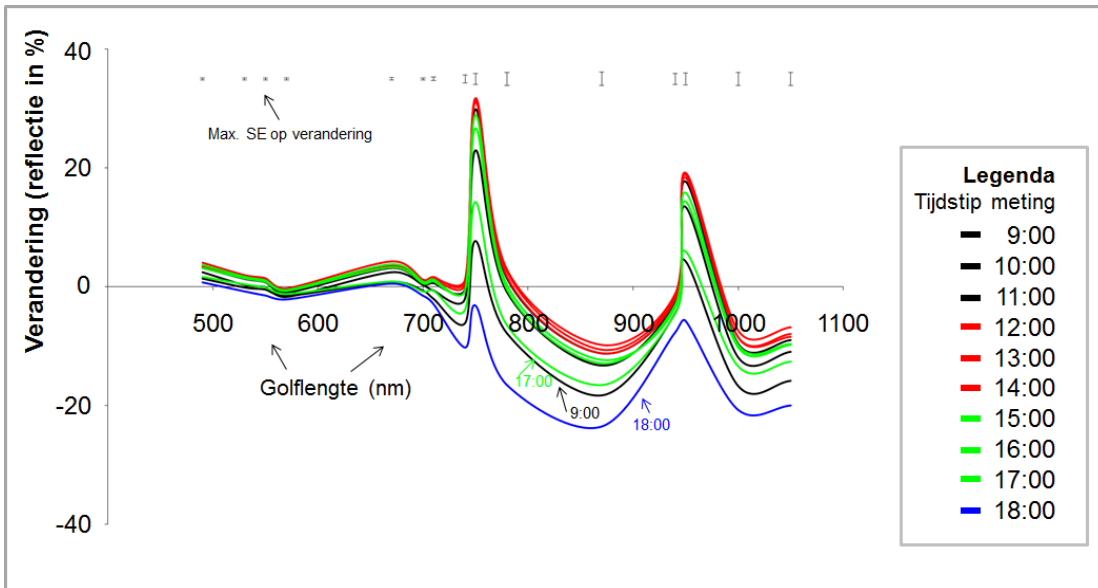
Figuur 4.1. Het maximale effect van meettijdstip, meethoogte, regenbui en schaduw op sensor-output, uitgedrukt in percentage verandering ten opzichte van de standaardmeting (meettijdstip wordt vergeleken met meting om 8.00 uur, en overige factoren worden vergeleken met de output bij standaard meethoogte, zonder regenbui en zonder schaduw).

Variatie in meettijdstip en de aanwezigheid van schaduw heeft het grootste effect op de berekende gewasindexen. Voor de meeste indexen kan de waarde met meer dan 50% veranderen als de meting op een andere hoogte dan wel in de schaduw wordt uitgevoerd. De grootste effecten zijn hierbij zichtbaar voor de indexen TCARI, OSAVI, DCNI en CIRE. Ook de drie WDWI-indexen worden sterk beïnvloed door meethoogte en de aanwezigheid van schaduw. De index die vrijwel ongevoelig is voor veranderingen in de onderzochte factoren is de REP-index: het effect is altijd kleiner dan 0,5%.

4.2.1 Effect van meettijdstip

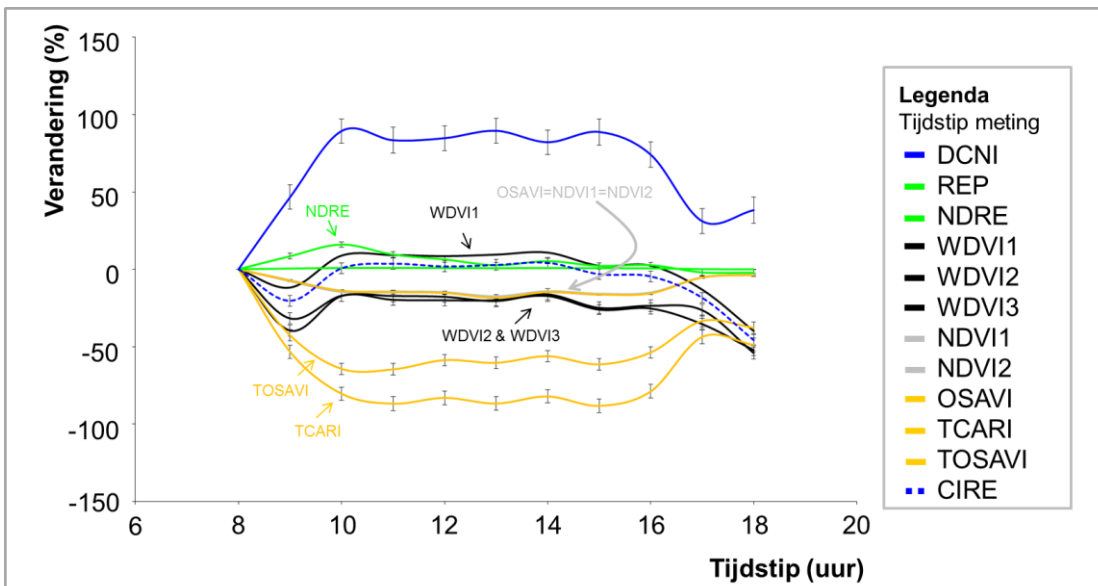
In de hiernavolgende figuur is aangegeven welk effect het meettijdstip heeft op het gemeten spectrum. De figuur laat zien hoe het spectrum is veranderd ten opzichte van de meting om 8 uur.

Duidelijk zichtbaar is dat de veranderingen in het NIR-spectrum groter zijn dan in het VIS-spectrum. De grootste verschillen treden op voor 9.00 uur en na 17.00 uur. De veranderingen die optreden tussen deze tijdstippen zijn ofwel klein ofwel niet significant. Metingen die binnen één uur na zonsopgang en voor zonsondergang zijn genomen, zijn op grond van een eerste analyse verwijderd uit de dataset. Dit omdat de gemeten reflectie niet meer gecorrigeerd wordt door de software in de CropScan en daardoor structureel hoger ligt dan de normale metingen. Door het gebruik van statistische testen die rekening houden met niet-homogene data, is het mogelijk om aan te tonen dat de verschillen significant zijn, maar dezelfde conclusie is ook te trekken op basis van de gemeten reflectie (zie bijlage) en het feit dat de oorzaak bekend is.



Figuur 4.2. Het effect van meettijd op het spectrum.

De effecten van de veranderingen in gereflecteerd licht op de afgeleide gewasindexen ten opzichte van de meting om 8 uur in de ochtend is zichtbaar gemaakt in figuur 4.3.

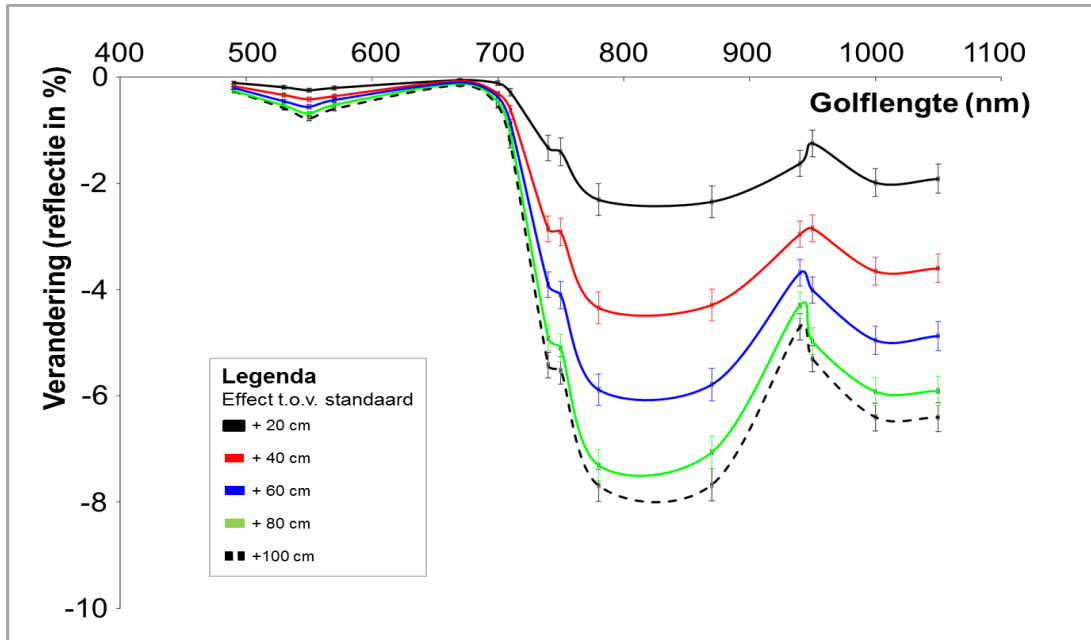


Figuur 4.3. Het effect van meettijd op afgeleide gewasindexen; relatief ten opzichte van de meting om 8 uur.

Figuur 4.3. laat duidelijk dat er gedurende de dag weinig veranderingen optreden in de gewasindexen, in het bijzonder tussen 10 en 17 uur. In vergelijking met de meting om 8 uur is er echter duidelijk sprake van een grote – en relevante – invloed op de berekende gewasindexen. De grootste veranderingen treden op bij de DCNI, de TCARI en de TOSAVI index: de verandering in deze index ten opzichte van de meting om 8 uur is groter dan 50%. Vergelijkbare verschillen zijn zichtbaar bij de andere indexen, uitgezonderd de REP-index. De veranderingen in de REP-index zijn kleiner dan 0,8% over de hele meetperiode (van 8 tot 18 uur). De veranderingen in de NDVI en WDV1-indexen varieert tussen 5 en 50% over de hele meetperiode.

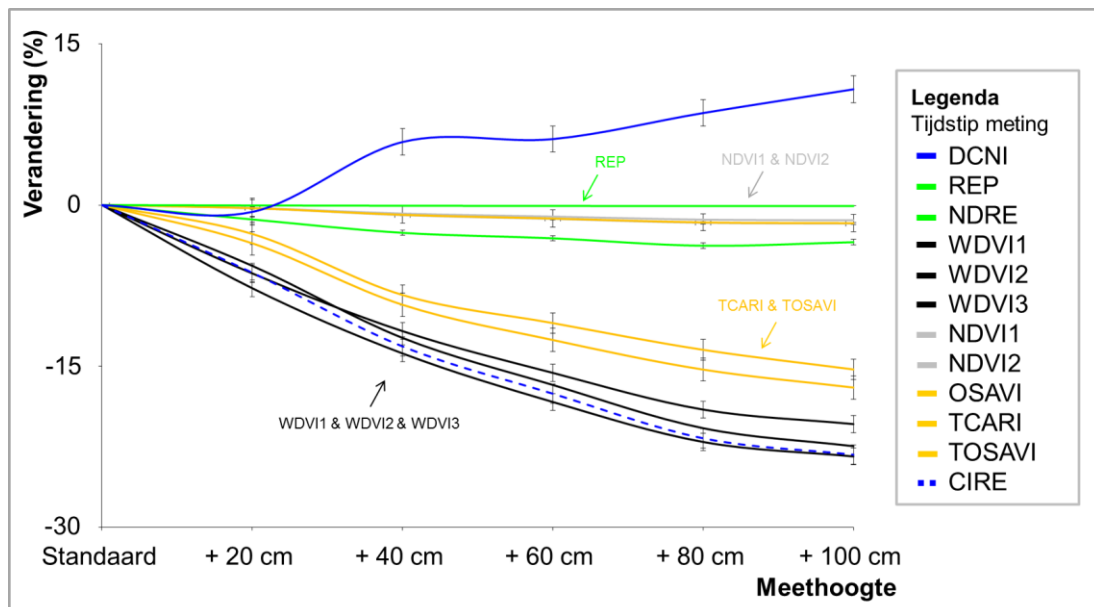
4.2.2 Effect van meethoogte

Een verandering van meethoogte heeft een invloed op het spectrum (Figuur 4.4.), in het bijzonder voor de gewasreflectie in het NIR. De hoeveelheid reflectie verandert met <1% in het VIS-deel van het spectrum, terwijl deze met 2-8% verandert in het NIR. Het effect wordt groter bij toenemende meethoogte.



Figuur 4.4. Het effect van meethoogte op het gemeten reflectie-spectrum.

Uiteraard hebben deze veranderingen in het gereflecteerde spectrum een invloed op de afgeleide gewasindexen, en varieert deze sterk tussen de geteste gewasindexen. In de figuur 4.5. is de relatieve verandering weergegeven ten opzichte van de standaardmeting.

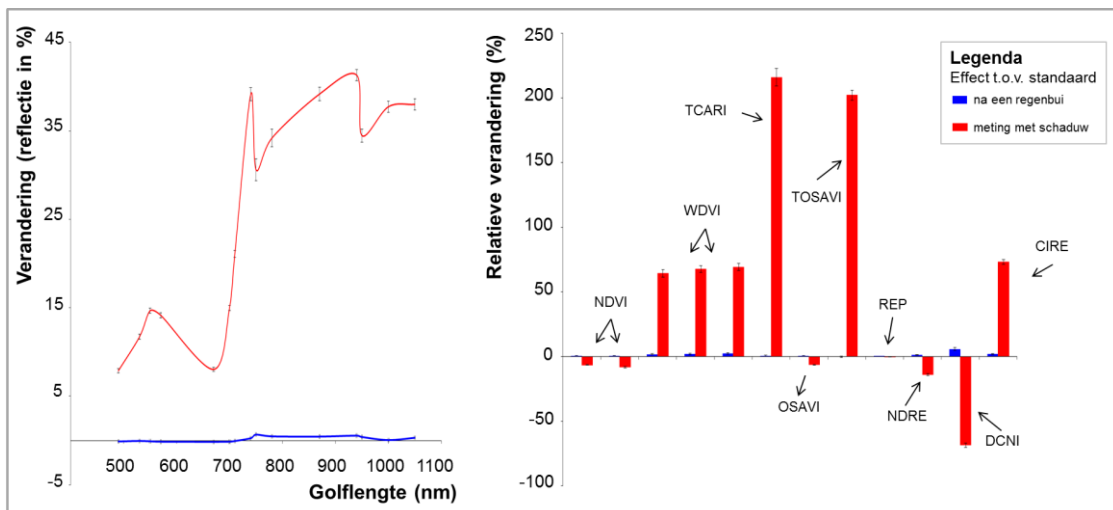


Figuur 4.5. Het effect van meethoogte op een aantal bekende gewasindexen, uitgedrukt als relatieve verandering ten opzichte van de standaardmeting.

De REP-index en de beide NDVI-indexen worden nauwelijks beïnvloed door de meethoogte: de invloed van hoogte is hier kleiner dan 2%. De grootste veranderingen treden op bij de CIRE-index, de drie WdVI-indexen, de TCARI-index, de TOSAVI-index en de DCNI index. Verandering van meethoogte verandert het spectrum met 5 tot 23%. Het effect van meethoogte op WdVI2 en WdVI3 hangt samen met het feit dat voor deze metingen gecorrigeerd is met de kale grond meting die uitgevoerd is op de standaardhoogte. De ingeschatte effecten zullen daardoor lager uitvallen als de kale grond meting wordt uitgevoerd bij verschillende hoogten.

4.2.3 Effect van regen en schaduw

Het effect van een gesimuleerde regenbui en schaduw is gevisualiseerd in figuur 4.6. en is zichtbaar dat neerslag weinig tot geen effect heeft op het gereflecteerde spectrum. Over alle golflengtes is het effect hiervan kleiner dan 0,2%. Wanneer er gemeten wordt onder schaduw, dan is er echter een groot effect over het gehele spectrum. Er wordt 5 tot 40% meer licht gereflecteerd. Dit hangt samen met de interne correctie die de CropScan uitvoert door het gereflecteerde licht (meting onderzijde CropScan) te corrigeren voor de hoeveelheid invallende straling (bovenzijde CropScan). Wat niet zichtbaar is dat de schaduwmeting veel minder goede metingen oplevert: een groot deel van het spectrum is daardoor corrupt. Daarom zijn bij de analyse deze verkeerde data verwijderd.



Figuur 4.6. Het effect van neerslag en schaduw op het gereflecteerde spectrum. Het effect van deze effecten worden uitgedrukt als absolute verandering in het spectrum (linker figuur) en als relatieve verandering ten opzichte van de standaard meting voor de afgeleide gewasindexen (rechter figuur).

Het absolute effect van regenval en schaduw op de diverse gewasindexen is al eerder zichtbaar gemaakt in figuur 4.1. De effecten van neerslag blijven kleiner dan 2,5% en zijn vrijwel altijd positief, dat wil zeggen dat de indexen maximaal met 2,5% stijgen door de invloed van regen. Dit is geval voor de indexen DCNI, CIRE en de drie WdVI-indexen. De aanwezigheid van schaduw heeft echter een groot effect op de berekende gewasindexen. Dit effect kan variëren van een daling van 70% voor DCNI tot een stijging van 215% voor de TCARI-index. Beide factoren hebben vrijwel geen of een klein effect op de indexen REP, NDVI, OSAVI en NDRE.

Wanneer een meting onder schaduwrijke omstandigheden (via boom, spuitboom, etc.) wordt uitgevoerd, zal de hoeveelheid reflectie licht afnemen. Door verstrooiing van het licht komt er echter nog steeds (voldoende) licht op het gewas om te reflecteren richting de sensor. De hoeveelheid invallende straling

gemeten aan de bovenzijde wordt echter effectief gereduceerd, waardoor er netto een hogere gewasreflectie gemeten wordt.

5 Aanvullende experimenten: resultaten GreenSeeker

5.1 Inleiding

In een vijftal aanvullende experimenten is onderzocht wat het effect van meettijdstip en meethoogte is op het spectrum en afgeleide gewasindexen. Tevens is gekeken naar de invloed van een regenbui en de aanwezigheid van schaduw. De weersgegevens gedurende de meetdagen en de resultaten van de verschillende proeven worden in detail besproken in bijlages 2 en 4. In dit hoofdstuk worden de resultaten samengevat weergegeven, inclusief de statistische onderbouwing.

5.2 Statische analyse

Het effect van meettijdstip, meethoogte, neerslag en schaduw is geanalyseerd via REML modeling. Hierbij zijn de effecten van deze variabelen apart geanalyseerd, dat wil zeggen:

- Het effect van meettijdstip is alleen geanalyseerd voor de metingen die op de standaard hoogte zijn uitgevoerd, en de metingen van de andere experimenten (neerslag, meethoogte, schaduw) zijn hierin niet meegenomen. In totaal zijn 67.441 scans beschikbaar die op 5 locaties gedurende de dag (van 8 tot 19 uur) zijn genomen.
- Het effect van meethoogte is geanalyseerd voor de metingen waarbij de hoogte is gevarieerd. De behandelingen zijn: standaard hoogte, standaard hoogte + 30 cm en standaard hoogte + 60 cm. In totaal zijn er gegevens beschikbaar van 25.639 scans.
- Het effect van extra schaduw is geanalyseerd voor 5 locaties. De behandelingen zijn: standaard meting en metingen waarbij invallend zonlicht wordt geblokkeerd (schaduw-meting). In totaal zijn er gegevens beschikbaar van 7.921 scans.
- Het effect van een gesimuleerde regenbui is geanalyseerd voor 4 locaties. De behandelingen zijn: standaard meting en metingen na een gesimuleerde regenbui. In totaal zijn er gegevens beschikbaar van 54.217 scans.

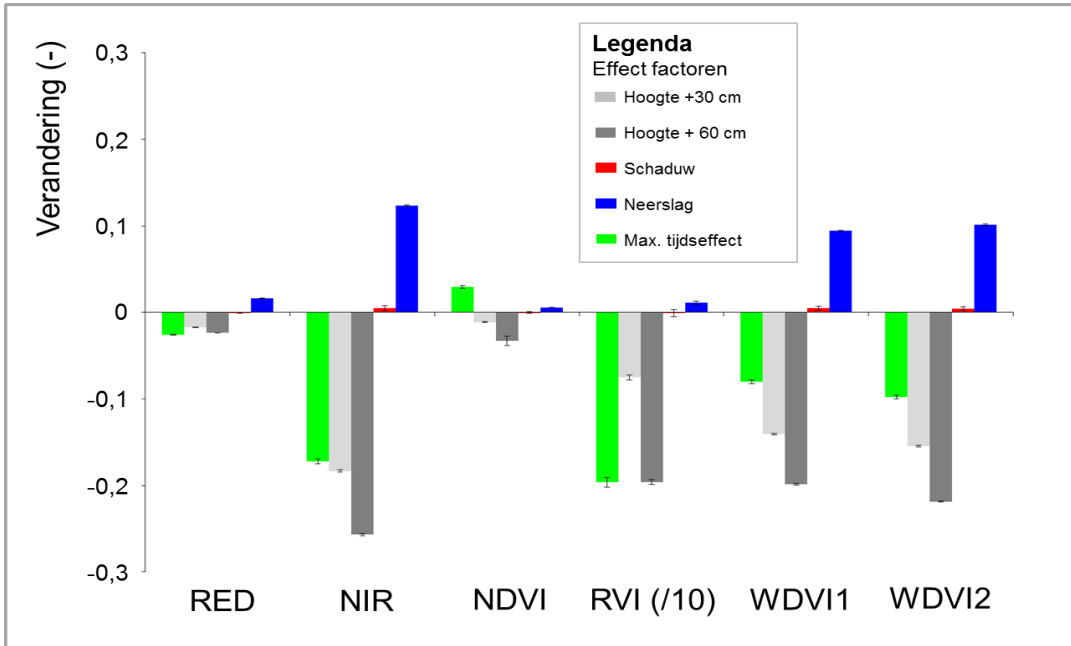
Het gebruikte model varieert voor de verschillende proeven. Naast de aangelegde behandelingen is rekening gehouden met het locatie-effect en andere factoren die de gewasreflectie beïnvloeden. Deze factoren zijn meegenomen als random variabele in het model. Voor de verschillende proeven zijn dit achtereenvolgens:

- meettijdstip: hierbij wordt locatie meegenomen als random variabele; en
- meethoogte, schaduw en regenbui: hierbij wordt locatie en meettijdstip op de dag meegenomen als random variabele (plus interacties indien significant).

5.3 Inschatting effect van onderzochte factoren

Over het algemeen genomen is de belangrijkste factor de locatie waar het experiment is uitgevoerd; minstens 35% van de variatie in de totale dataset wordt hierdoor verklaard. Wanneer de verschillende experimenten apart worden geanalyseerd, dan verklaard het locatie-effect circa 20 tot 60% van de variatie in gewasreflectie (NIR en RED). Het locatie-effect wordt voornamelijk veroorzaakt door gewastype (en bijbehorende bodembedekking, gewashoogte, gewaskleur, etc.), bodemtype en mogelijk ook door het weertype van de desbetreffende meetdag. Omdat locatie als random variabele wordt meegenomen, is met deze variatie rekening gehouden in de analyse.

De resultaten van de statistische analyse zijn gevisualiseerd in figuur 5.1. In deze figuur zijn de veranderingen weergegeven ten opzichte van de 'standaard'-behandeling in absolute eenheden. Alle onderzochte factoren hebben een significant effect op de gemeten reflectie in RED en NIR ($P < 0,001$) behalve de aanwezigheid van schaduw. Ook de afgeleide gewasindexen NDVI, RVI en de beide WDV1-indexen worden daardoor beïnvloed. Kijkend naar de veranderingen die optreden in de sensor-output, lijkt het effect van meethoogte, meettijdstip, neerslag en schaduw mee te vallen: de veranderingen zijn altijd kleiner dan 0,3% (in procenten reflectie).

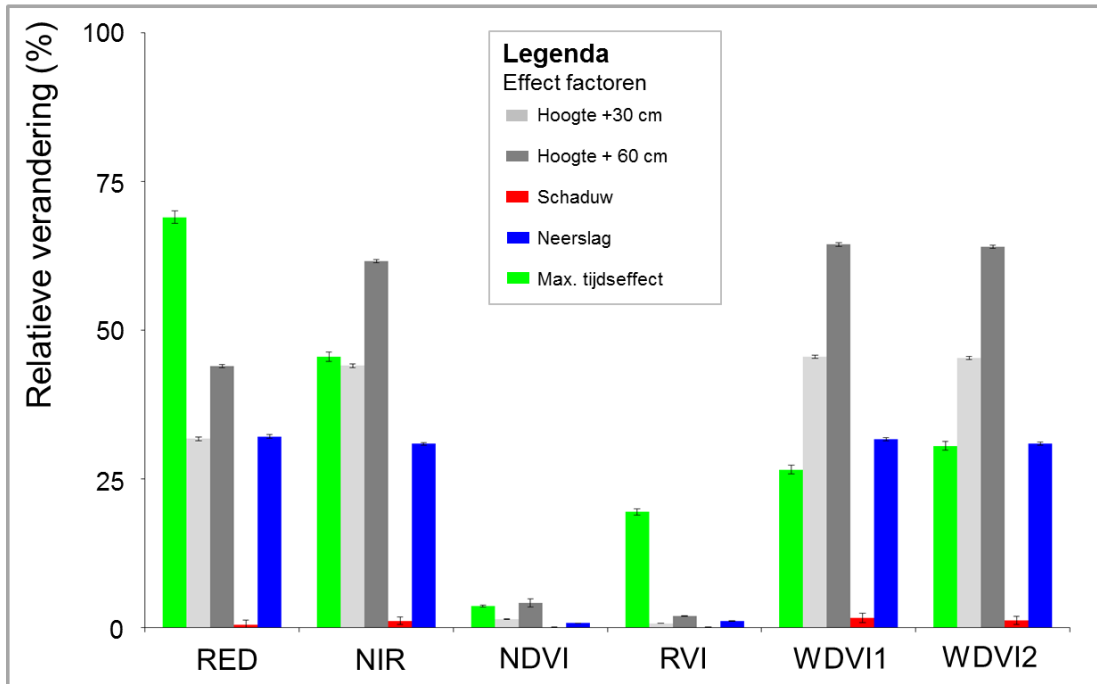


Figuur 5.1. Het effect van meethoogte, schaduw en tijd op de sensor-output van de GreenSeeker, uitgedrukt in absolute eenheden.

Samengevat zijn de belangrijkste resultaten:

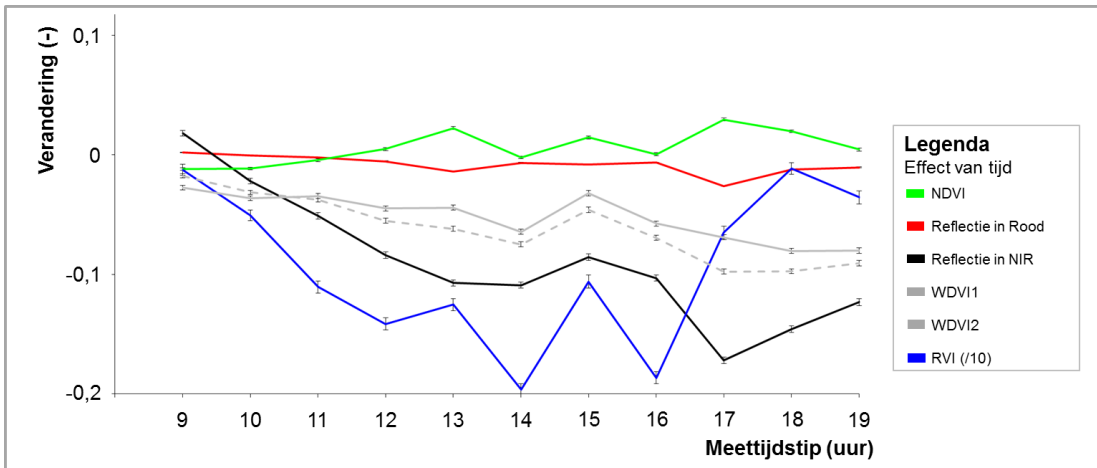
- Bij toenemende hoogte is er een afname in de reflectie in Rood en NIR. De gemeten reflectie kan worden verlaagd met 0,26% (% absolute reflectie). Dit resulteert tevens in een verandering van de berekende gewasindex NDVI, RVI en beide WDV1's ($P < 0,001$). De afname in deze indexen was maximaal 0,03% voor NDVI, 0,2% voor RVI en rond 0,2% voor beide WDV1's. Hoewel dit effect klein lijkt te zijn, is dit effect echter wel relevant. De relevantie hiervan wordt in de volgende paragraaf toegelicht.
- De aanwezigheid van schaduw leidde tot een kleine toename van de reflectie in Rood ($P = 0,6$) en NIR ($P = 0,08$). De veranderingen zijn echter niet significant. Hetzelfde geldt voor de berekende veranderingen in de gewasindexen NDVI ($P = 0,8$), RVI ($P = 0,8$), WDV11 ($P = 0,03$) en WDV12 ($P = 0,08$).
- Bij een vochtig gewas door een gesimuleerde regenbui, was er een significante toename in gemeten reflectie, zowel in Rood als NIR. Het effect was maximaal 0,12% ($P < 0,001$). Dit leidde tot vergelijkbare veranderingen in beide WDV1-indexen, terwijl de waarde voor de RVI en NDVI weinig veranderde.
- De gemeten reflectie in Rood en NIR varieert over de dag: het meettijdstip heeft een sterke invloed op de hoeveelheid reflectie ($P < 0,001$). Ook hier is het effect altijd kleiner dan 0,2%.

Hoe relevant zijn deze veranderingen? Om dat zichtbaar te maken zijn in figuur 5.2. de relatieve veranderingen weergegeven. Daarbij is aangegeven wat de verandering is in gewasreflectie en de afgeleide indexen als de meethoogte of meettijdstip veranderd of als de meting wordt uitgevoerd in schaduwrijke omstandigheden of na een regenbui. In deze figuur is alleen de grootte van de verandering weergegeven en niet de richting waarin de sensor-output verandert (stijging of daling). Hieruit blijkt dat de onderzochte factoren een aanzienlijk effect hebben op de sensor-output. De grootste effecten zijn zichtbaar voor de factoren meethoogte en meettijdstip: de output verandert met 1,5 tot ~60%. Het effect van neerslag is ~30% voor de gemeten gewasreflectie, maar vermindert tot <2% voor de indexen NDVI en RVI. Voor de gewasindexen WDV11 en WDV12 blijft het effect echter aanwezig.



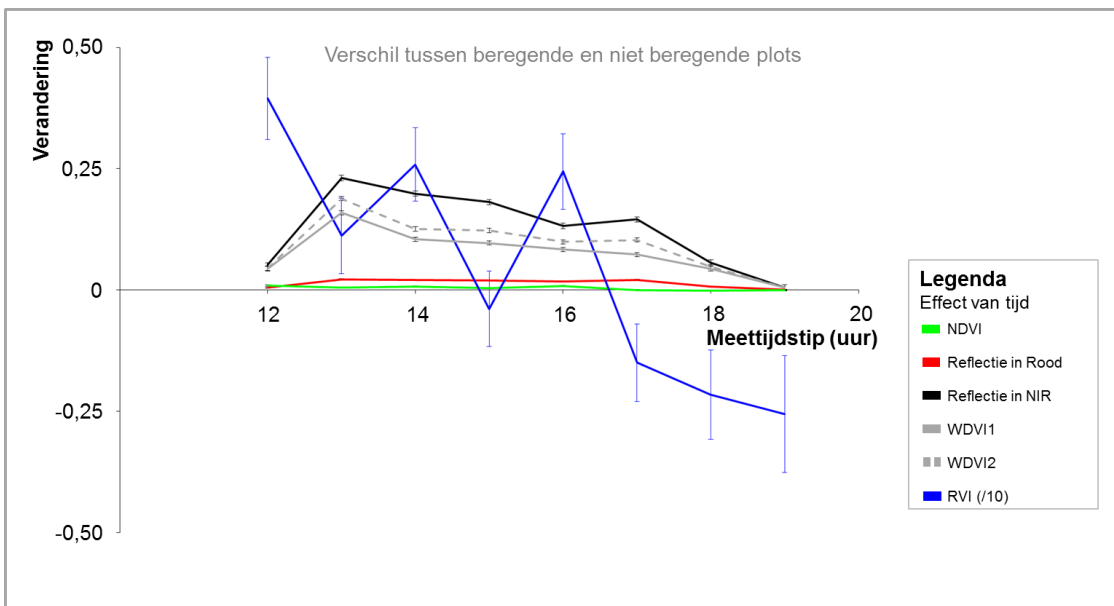
Figuur 5.2. Het effect van meethoogte, schaduw en tijd op de sensor-output van de GreenSeeker, uitgedrukt als relatieve verandering ten opzichte van de standaard meting (voor tijd is dit de meting die om 8.00 uur is uitgevoerd, voor de overige factoren de meting bij standaard hoogte en zonder neerslag en schaduw).

In figuur 5.2 is het maximale effect van meettijdstip weergegeven, dat wil zeggen dat er gekeken is naar de maximale verandering die over een dag kan plaatsvinden. In figuur 5.3. is zichtbaar gemaakt dat er ook gedurende de dag aanzienlijke variatie kan plaatsvinden. Het grootste (absolute) effect is zichtbaar voor de reflectie in de NIR- en RVI-index. De startwaarde voor de sensor-output om 8 uur is 0,04 voor de reflectie in Rood, 0,38 voor de reflectie in NIR, 0,80 voor NDVI, 10,1 voor RVI, 0,3 voor WDV11 en 0,32 voor WDV12.



Figuur 5.3. Het effect van meettijdstip op de sensor-output van de GreenSeeker, uitgedrukt in absolute eenheden (waarbij de eenheid van RVI is gedeeld door 10 om alles in één schaal te visualiseren).

Het effect van neerslag ontstaat onmiddellijk na de simulatie van de regenbui, maar neemt af in de uren daarna (Figuur 5.4.). Het effect is voornamelijk zichtbaar in de NIR-reflectie, en heeft daardoor ook gevolgen voor de afgeleide gewasindexen. Het duurt minimaal 6 uur voordat de effecten van een regenbui niet meer zichtbaar zijn in het gewasspectrum of afgeleide gewasindexen.



Figuur 5.4. De verandering in het verschil tussen beregende en standaard plots over de tijd voor diverse gewasindexen. Let op: de eenheid van RVI is gedeeld door 10 om alle indexen in één schaal te visualiseren.

Samenvattend, gedurende de dag is er een daling in de gewasreflectie, waarbij het effect groter is in NIR dan in Rood. Als gevolg hiervan is er een stijging van de NDVI en een daling RVI en beide WDV1's. Veranderingen in meethoogte en de aanwezigheid van een regenbui hebben een grote invloed op de sensor-output. Concreet betekent dit dat deze ruis kan leiden tot onjuiste schattingen van biomassa ontwikkeling of nutriënten opname als hiervoor niet wordt gecorrigeerd.

6 Quickscan literatuur

6.1 Inleiding

In de wetenschappelijke literatuur zijn tientallen studies gepubliceerd waarin experimenten worden besproken die gewasreflectie gebruiken om informatie te geven over gewasontwikkeling en nutriënten-opname. Binnen het PPL-project 075 is recent alle beschikbare informatie op een rij gezet in een uitgebreide literatuurstudie. Deze studie (Ros & Bussink, 2012) geeft concreet 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). Praktische aspecten rond het gebruik van sensoren variëren sterk, maar een analyse hiervan was geen onderdeel van genoemde literatuurstudie.

De huidige studie beschrijft resultaten die zijn gebaseerd op metingen met de CropScan en de GreenSeeker. Vanuit praktische overwegingen zijn andere sensoren namelijk niet meegenomen in de uitvoering van het veldonderzoek. Om duidelijkheid te krijgen of de hier verkregen resultaten ook toepasbaar zijn voor andere gewassensoren is een quickscan uitgevoerd van de wetenschappelijke literatuur met betrekking tot praktische factoren die de sensor-output beïnvloeden.

Ondanks de overvloed aan wetenschappelijke publicaties – en de daarin aanwezige variatie in onder andere weersomstandigheden, meethoogte en meettijdstip – zijn er vrijwel geen studies waarbij expliciet is gekeken naar praktische toepassingsmogelijkheden van gewasreflectiesensoren. In zekere zin is dit vreemd, omdat diverse (klassieke) studies en modellen (die de relatie tussen gewasindexen, gewasreflectie en biomassa-ontwikkeling beschrijven) aangeven dat er diverse externe factoren van invloed zijn op de nauwkeurigheid van de sensor-output. Tegelijkertijd is er een grote variatie in gebruikte sensoren, gewassen, en aangelegde behandelingen. In de navolgende paragrafen worden de resultaten van bestaande publicaties rondom dit onderwerp samengevat en besproken. Een uitvoerige bespreking van de onderzochte studies is opgenomen als bijlage.

6.2 Praktische factoren die sensor output beïnvloeden

Gebruik makend van de geanalyseerde studies is duidelijk dat het spectrum – en de afgeleide gewasindexen – beïnvloed worden door allerlei factoren. Samengevat zijn dit:

- **Externe condities die samenhangen met de specifieke locatie** waar gemeten wordt. Dit zijn onder andere gewasdichtheid, teeltwijze (homogeen of in rijen, oriëntatie rijen, etc.) en de mineralogie en vochtigheid van de bodem, en de aanwezigheid van onkruiden.
- **Externe factoren** die samenhangen met de weersomstandigheden. Dit zijn bijvoorbeeld de aanwezigheid van dauw of regen op het blad, de positie van de zon aan de hemel, de bewolingsgraad, de temperatuur en de aanwezigheid van wind.
- **Fysiologische factoren** zoals gewastype, veranderingen in pigment (hoeveelheid en locatie) gedurende groeistadia, de gewasstructuur (bladvorm, bladhoek, etc.).
- **Sensoreigenschappen:** hierbij gaat het om interne kalibratie, hoeveelheid diodes en ontvangers, de gebruikte bandbreedtes waarop gemeten wordt en de omgevingstemperatuur.
- **Meetomstandigheden:** hierbij gaat het onder andere om de hellingshoek waaronder gemeten wordt, de meethoogte, en rijsnelheid van de tractor waarop de sensor is geplaatst.

6.3 Overzicht literatuurgegevens

Een overzicht van de geanalyseerde literatuur en de daarin onderzochte factoren wordt weergegeven in tabel 6.1. Duidelijk is dat de meeste van deze studies recent zijn uitgevoerd.

Tabel 6.1. Overzicht van studies die onderzoek gedaan hebben naar factoren die sensor-ruis bepalen.

Referentie	Onderzochte/ besproken factor	Sensor*
Shaver et al. (2010)	Wind, rij-afstand, bewegingssnelheid, N-bemesting	GS, CC
Kim et al. (2010)	Bodembedekking, meetafstand, temperatuur, invallende straling	GS
Oliveira (2008)	Oriëntatie teeltrij, positie zon, meettijdstip, dauw, bewolking, wind, vochtgehalte bodem, temperatuur	CC, CS, GS
Schepers (2005)	Meethoogte, meetoppervlak, gewasstructuur, waterstress, dauw en meettijdstip	CC
Guan & Nutter (2001)	Invallende straling, vocht, meethoogte, meetoppervlak, meettijdstip	S
Munsterman (2009)	Neerslag, stof, water stress, positie zon	CS
Souza et al. (2010)	Positie van de zon, meettijdstip, bewolking	CC
Sudduth et al. (2011)	Meettijdstip, meethoogte, hellingshoek	GS, CC, CS
Kipp et al. (2012)	Meethoogte, sensor-temperatuur, lichtintensiteit	GS, CC, Yara
Scharf et al. (2010)	Meettijdstip, dauw	CS, GS, CC
Scharf et al. (2007)	Meettijdstip, dauw & regen	GS, CC, CS
Daughtry et al. (1982)	Meethoogte, gewastype, bedekking	S
Pinter (1986)	Dauw	S
Lord & Desjardins (1985)	Wind	S
Windhalter et al. (2012)	Plant fysiologie	S
Vrindts et al. (2002)	Onkruiden	S
Chang et al. (2007)	Bewolkingsgraad	CS, S
Green et al. (1998)	Bewolkingsgraad	S
Adcock et al. (1990)	Bewolkingsgraad	S
Fitzgerald et al. (2005)	Schaduw	S
Tubana et al. (2012)	Hellingshoek	GS
Hodgen et al. (2004)	Hellingshoek	S
Middleton et al. (2000)	Hellingshoek	S
Guan & Nutter (1998)	Hellingshoek	S
Gross et al. (1988)	Hellingshoek	S
Ranson et al. (1986)	Hellingshoek	S
Lord et al. (1988)	Hellingshoek	S
Wardley, 1984	Hellingshoek	S
Fitzgerald (2010)	Meethoogte, oppervlak, bewolking, invallende straling	CC
V.d. Schans et al. (2012)	Meethoogte, kalibratie, positie zon, bewolking, schaduw	CS, GS, CC
Samborski et al. (2009)	Meethoogte, water stress, rijnsnelheid	S, divers
Polder et al. (2003)	Spectrum lichtbron, temperatuur, dataverwerking	S
Roberts et al. (2009)	Sensorafstand op spuitboom	CC
Lamain (2011)	Rijrichting, meethoogte, sensorafstand	CC

* CS staat voor CropScan, CC voor CropCircle, GS voor GreenSeeker, en S voor overige spectrometers

6.4 Factoren die sensor-output beïnvloeden

De hierboven beschreven studies gebruiken verschillende typen sensoren waaronder actieve en passieve sensors (met of zonder eigen lichtbron). Tussen de geanalyseerde studies zijn grote verschillen qua type experiment, weersomstandigheden, gewassen, en onderzochte parameters (spectrum, gewasindex). Het is daarom niet mogelijk om algemeen geldende regels af te leiden uit de resultaten van deze studies. Desondanks wordt in de volgende paragrafen inzichtelijk gemaakt – in zoverre als dat mogelijk is – hoe groot het effect van de onderzochte factoren kan zijn.

Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de volgende factoren:

- meetomstandigheden zoals gemeten oppervlak, meethoogte, rijnsnelheid en hellingshoek;
- weeromstandigheden zoals dauw en neerslag, wind, temperatuur, en bewolking;
- het meettijdstip gedurende de dag; en
- teeltomstandigheden van het gewas.

6.4.1 Meetomstandigheden

De afstand tussen het gewas en de sensor bepaalt in sterke mate:

- de intensiteit van het gereflecteerde licht: deze neemt kwadratisch af met de afstand. Dit is dus een niet lineair effect dat zichtbaar wordt in de reflectie van alle golf lengtes.
- het meetoppervlak waarvan het gereflecteerde licht opgevangen wordt.

Hoewel de grootte en vorm van het **gemeten oppervlak** (waarvan het gereflecteerde licht wordt opgevangen door de sensor) uniek zijn voor elke sensor, wordt bij de meeste sensoren het meetoppervlak groter zodra de afstand toeneemt. Hierdoor wordt de sensor-output minder gevoelig voor ruimtelijke variatie op kleine schaal en integreert het de reflectie van een groter oppervlak. Concreet betekent dit dat de gevoeligheid om verschillen in gewasstatus te detecteren kleiner worden bij een grotere meetafstand. Dit is speciaal het geval voor situaties waarbij veel grondinformatie aanwezig is in het signaal (bijvoorbeeld prei of mais): de exacte positie van de sensor ten opzichte van het gewas bepaalt hoeveel gewas-gerelateerde reflectie opgevangen wordt. Enkele sensoren zoals de GreenSeeker corrigeren voor dit hoogte-effect.

Het effect van **meethoogte** wordt direct zichtbaar in de hoeveelheid gereflecteerd licht, zowel in VIS als NIR. Het slim gebruiken van gewasindexen kan de invloed hiervan kleiner maken omdat er grote variatie bestaat in de gevoeligheid van indexen en sensortype voor gewashoogte (Schepers, 2005; Kipp et al., 2012). In het bijzonder bij kleine afstanden (< 30-50 cm) is er sprake van veel ruis. Van der Schans et al. (2012) stelt dat de invloed van meethoogte een belangrijke foutenbron is als er gemeten wordt bij een afstand kleiner dan 70 cm. De optimum hoogte zal echter samenhangen met de gebruikte sensor en gewasbedekking (Kipp et al., 2012). Desondanks zijn er diverse studies waarbij er geen eenduidig effect waarneembaar is. Dit is mogelijk een gevolg van de ruimtelijke variatie binnen gewastypes (Guan & Nutter, 2001; Daughtry et al., 1982).

Bij sensoren die gebruik maken van een eigen lichtbron, maakt het uit of het VIS en NIR signaal tegelijkertijd of om-en-om wordt uitgezonden. Bij de GreenSeeker gebeurt dit om-en-om waardoor het gereflecteerde licht van het VIS en NIR spectrum bij hogere **rijnsnelheden** niet van exact dezelfde locatie afkomstig zijn (Shaver et al., 2010; Schepers, 2005).

De **hellingshoek** waaronder de sensor op de tractor is geplaatst, bepaalt de mate waarin het signaal 'vervuild' raakt met bodem-gerelateerde ruis en de hoeveelheid gewas dat licht reflecteert. Bovendien meten ze over een grotere oppervlakte. De studie van Sudduth et al (2011) suggereert dat de nadir positie (loodrecht boven het gewas) de beste resultaten oplevert. De studie van Tubana et al. (2012) suggereert echter dat dit effect samenhangt met het groeistadium en gebruikte gewasindex. Duidelijk is dat meetbare effecten niet gelijk zijn voor elke golflengte. Ook is het effect verschillend voor ratio en niet-ratio gewas-indexen (Wardley, 1984; Guan & Nutter, 1998). De effecten van veranderingen in hellingshoek zijn kleiner dan de variatie die optreedt over verschillende jaren (Tubana et al., 2012), daarmee aangevend dat andere factoren van groter belang zijn.

6.4.2 Weersomstandigheden

De weersomstandigheden gedurende het meten kunnen de sensor-output veranderen. Hierbij gaat het om de volgende factoren:

- **Dauw en neerslag:** de hoeveelheid water op het blad beïnvloedt het reflectiespectrum. Het netto effect van vocht is vrijwel gelijk voor elke golflengte (Schepers, 2005), maar omdat de hoeveelheid reflectie verschilt per golflengte kan het effect van dauw en regen sterk verschillen tussen verschillende golflengtes. Het effect op vegetatie-indexen kan variëren van erg klein tot groot afhankelijk van de gebruikte bandbreedtes. Schepers (2005) schat deze effecten in op -12 tot +3%, terwijl Pinter (1986) laat zien dat dauw de reflectie in VIS kan verhogen met 40 tot 60%. In het NIR-deel van het spectrum had dauw weinig effect (Pinter, 1986). Daarentegen vonden Guan & Nutter (2001) een sterk effect in het NIR-spectrum, wat mogelijk samenhangt met de gebruikte bandbreedtes van de sensor en gewasstype. Madeira et al. (2000) vonden veranderingen van 2-9% voor de reflectie in het NIR-spectrum en 4-50% voor de reflectie in het VIS spectrum.
- **Wind:** de aanwezigheid van wind zorgt ervoor dat het gewas beweegt tijdens de meting. Uit resultaten van Lord & Desjardins (1985) blijkt dat dit een groot effect kan hebben op de gemeten gewasreflectie in tarwe, gerst en luzerne. Bij Shaver et al. (2010) had wind echter geen significant effect op de gewasreflectie van maïs.
- **Temperatuur:** de temperatuur heeft mogelijk een invloed omdat de sensor-output afhankelijk is van de temperatuur. De studie van Kipp et al. (2012) laat zien dat diverse indexen met 0,002 tot 0,003 eenheden per graad Celcius veranderen. Dit kan resulteren in een ruis op een N-advies van maximaal 2 kg N / ha per graad Celsius. In de studie van Kim et al. (2010) werd echter geen effect van temperatuur op de NDVI-index gevonden.
- **Neerslag:** in de studie van Guan & (2001) wordt inzichtelijk gemaakt dat de hoeveelheid reflectie toeneemt bij grotere hoeveelheid water/ neerslag. Het effect is echter klein: de hoeveelheid reflectie verandert met 0,004% per mm neerslag.
- **Bewolking:** er zijn diverse studies uitgevoerd naar het effect van bewolking op gewasreflectie. Tumbo et al. (2002) onderzocht bijvoorbeeld het effect van bewolking op de reflectie van maïs en vond dat de reflectie in alle golflengtes op een vergelijkbare manier werd beïnvloed. Gao & Li (2000) laten daarentegen zien dat de aanwezigheid van dunne cirrus bewolking extra ruis creëert in de NDVI-waarde die op kan lopen tot 15%. Dat de hoeveelheid bewolking een effect heeft op gemeten spectra en afgeleide indexen wordt gestaafd door de studies van Jackson et al. (1980), Green et al. (1998), Adcock et al. (1990), en Chang et al. (2007). Anderen vinden weinig tot geen samenhang met de hoeveelheid licht (Kipp et al., 2012; Solari et al., 2004; Jasper et al., 2009; Kim et al., 2010). Dit hangt mogelijk samen met het verschil tussen actieve en passieve sensors. Ook de keuze voor een bepaalde gewasindex is hierbij relevant

(Fitzgerald, 2010)

- **Positie van de zon:** diverse studies laten zien dat de positie van de zon van invloed is op de hoeveelheid en de kwaliteit van gereflecteerd licht (Oliveira, 2008; Souza et al., 2004). Dit hangt samen met de weglengte die het licht moet afleggen door de atmosfeer (kansen op verstrooiing). Dit effect is zichtbaar onder verschillende omstandigheden (Ranson et al. (1985; 1986), Gross et al. (1988), Middleton (1991), Lord et al. (1988) en is niet identiek voor VIS en NIR. Dit betekent concreet dat afgeleide gewasindexen, die vaak gebruik maken van zowel VIS als NIR, beïnvloed worden door de positie van de zon. Tegelijkertijd zijn er ook studies die geen effect waarnemen (Kim et al., 2010). De huidige CropScan sensor corrigeert automatisch voor de positie van de zon zodra de locatie van waarneming bekend is.

De ontwikkeling van actieve sensoren die gebruik maken van een eigen lichtbron zouden in theorie minder gevoelig zijn voor variatie in weersomstandigheden. Kwantitatief bewijs hiervoor is echter schaars en enkele studies suggereren dat er binnen een dag aanzienlijke variatie aanwezig kan zijn die niet alleen samenhangt met de hoeveelheid invallende straling (Scharf et al., 2007).

6.4.3 Meettijdstip

Diverse studies laten zien het er aanzienlijke variatie aanwezig is in het gemeten spectrum gedurende een dag. Deze variatie kan samenhangen met weersomstandigheden die de gewasstructuur en het vochtgehalte van het gewas beïnvloeden of kan rechtstreeks worden veroorzaakt worden door de aanwezigheid van wind, dauw, en factoren die bepalen hoe snel het licht wordt geabsorbeerd door het aanwezige pigment (Carlson et al., 1971; Lord et al., 1985; Pinter, 1986; Hoel & Solhaug, 1998; Brugnoli & Bjorkman, 1992). Het lijkt er op dat deze factoren van een groter belang zijn dan de exacte positie van de zon of de hoeveelheid bewolking (De Souza et al., 2010; Sudduth et al., 2011). De verschillende studies die tegen deze variatie binnen een dag aanlopen, blijven aarzelend in hun interpretatie van de aanwezige verschillen (Scharf et al., 2007; 2010; Oliveira, 2008). We kunnen daarom vooralsnog alleen concluderen dat er voor een groot deel van de binnen de dag variatie nog geen duidelijke verklaring aanwezig is.

In veel situaties is de reflectie vroeg en laat op de dag hoger dan rond de middag, en de grootste effecten zijn kleiner dan 3% (Guan & Nutter, 2001). De Souza et al. (2010) ziet echter effecten tussen 5 en 33%. Concrete adviezen over de meest effectieve meettijd variëren, afhankelijk van de gebruikte sensor. Ter illustratie: Oliveira (2008) geeft het advies dat passieve sensoren gebruikt moeten worden tussen 8 en 18 uur terwijl actieve sensoren twee uur eerder kunnen beginnen dan wel eindigen. De studie van Guan & Nutter (2001) reduceert het gebruik zelfs tot de periode tussen 11 en 15 uur.

6.4.4 Teeltomstandigheden

De volgende factoren zijn van invloed op het gemeten spectrum:

- **Groeiwijze gewas:** in rijen, bedden of homogeen. Jackson et al. (1979) laat bijvoorbeeld zien dat de reflectie samenhangt met de positie van de rij (noord-zuid of oost-west). Dit effect hangt mogelijk samen met de aanwezigheid van schaduw in relatie tot de positie van de zon. Zoals te verwachten varieert deze invloed van rijpositie met het groeistadium waarin het gewas is (Shaver et al., 2010). Dit effect lijkt bovendien groter te zijn voor passieve dan voor actieve sensors (Oliveira, 2008).
- **Gewasstructuur:** verschillende studies laten zien dat het verwijderen van oudere bladeren weinig invloed heeft op een gewasindex (Schepers, 2008). Dit suggereert dat variatie ten

gevolge van gewasstructuur niet zo belangrijk zijn. Toch is er nog geen eenduidigheid: Winterhalter et al. (2012) laten bijvoorbeeld zien dat verwijdering van één van de bladstadia aan mais een significante invloed had op de berekende gewasindex.

- **Water stress:** planten reageren sterk op water tekorten door aanpassing van hun blad die direct gevolgen hebben voor de hoeveelheid reflectie in NIR. Dit heeft ook gevolgen voor de berekende gewasindexen, en diverse praktische studies bevestigen dat door aan te geven dat na een gemeten verandering in NDVI altijd gecontroleerd moet worden of dit niet samenhangt met symptomen van waterstress.
- **Onkruiden:** de aanwezigheid van onkruiden is zichtbaar in het gereflecteerde spectrum, en kan zodoende mogelijk de vertaalslag richting een N-advies beïnvloeden. Er zijn diverse studies die aantonen dat het gereflecteerde spectrum informatie geeft over onkruidtype en onkruiddruk (Vrindts et al., 2002; Chang et al., 2004), maar de vertaalslag naar een gewasindex en N-adviezen is nog nooit gemaakt.

6.5 Samenvatting

Uit deze literatuuranalyse blijkt dat er diverse factoren zijn die bijdragen aan de hoeveelheid ruis op de meting van gewassensoren. In zekere zin hangen ze allemaal samen met 1) de sensor specificaties, 2) de meetmethodiek, 3) de weersomstandigheden en 4) het gewasstype. Voor elke sensor is een optimum te vinden voor de meest nauwkeurige meetresultaten. Ook is duidelijk geworden dat er een hoeveelheid 'ruis' aanwezig is die niet is te verklaren met de bekende factoren. Dit hangt samen met het feit dat er vrijwel geen studies zijn die een integrale evaluatie uitvoeren voor diverse gewassen.

Door de grote variatie in experimentele technieken en sensors is het daarom onmogelijk om generieke uitspraken te doen over welke factoren nu het meest belangrijk zijn. Wel bevestigt onze analyse dat meethoogte en meettijdstip een grote invloed hebben op de sensor-output en de daarvan afgeleide gewasindexen. De effecten zijn sensor- en output-specifiek. Het grootste probleem voor de variatie die binnen een dag kan optreden, is het feit dat de achterliggende oorzaken nog niet vastgesteld zijn. Voor het effect van meethoogte zijn er voldoende gegevens beschikbaar.

Omdat de effecten veelal sensor- en output-specifiek zijn, zijn de resultaten van de experimenten met de GreenSeeker en de CropScan gelimiteerd tot deze sensors en kunnen dus alleen als een voorzichtige schatting worden gebruikt voor vergelijkbare sensoren. Hierbij kan de CropScan worden beschouwd als een voorbeeld voor een passieve sensor, terwijl de GreenSeeker kan worden beschouwd als een voorbeeld voor een actieve sensor.

De aanwezigheid water op het blad na een regenbui kan de sensoroutput beïnvloeden, maar deze factor lijkt minder belangrijk te zijn in vergelijking met meethoogte en meettijdstip. Duidelijk is ook dat het effect van dauw niet één-op-één vergelijkbaar is met dat van een regenbui.

De aanwezigheid van schaduw is nauwelijks bestudeerd, maar kan worden benaderd met studies die kijken naar de effecten van bewolking. Helaas zijn hiervoor geen eenduidige conclusies te trekken.

7 Ontwikkeling meet- en beoordelingsprotocol

7.1 Inleiding

Het doel van de uitgevoerde experimenten, literatuurstudie en statistische analyses is om een meet-en beoordelingsprotocol te ontwikkelen om zo de ontwikkeling van bijmestsysteem op basis van gewas-sensors dichterbij te brengen. Bepalend voor een succesvolle toepassing van gewassensoren in de praktijk is namelijk dat het mogelijk moet zijn om:

- met zo min mogelijk ruis te meten;
- dat goed bekend is onder welke omstandigheden gemeten kan worden; en
- dat sensoren over een groot deel van de dag inzetbaar zijn.

In dit hoofdstuk worden de resultaten van deze studie samengevat, en wordt concreet antwoord gegeven op de volgende vragen:

- Op welke momenten van de dag is het mogelijk om te gaan meten?
- Werkt dauw en regen belemmerend op een goed meetresultaat?
- Welk effect heeft extra schaduw (via bomenrij, tractor, etc.) op het meetresultaat?
- Hoe belangrijk is meethoogte voor een goed meetresultaat?
- Heeft de temperatuur invloed op de toepassingsmogelijkheden van een gewassensor?
- Speelt bodembedekking een rol in het verminderen van de hoeveelheid 'ruis' op een meting?
- Kan er ook gemeten worden op een perceel als er (veel) onkruid aanwezig zijn?

Binnen dit project zijn een aantal onderdelen uitgevoerd die gezamenlijk gebruikt kunnen worden om op deze vragen een antwoord te geven. Samenvattend zijn dat:

- Een statistische analyse van de gegevens van PPL-project 075 waarbij bij 10 gewassen op 20 locaties gedurende het groeiseizoen van 2012 meerdere keren is gemeten met een gewassensor. Binnen deze proef zijn ook meerdere (>20) kleine testen uitgevoerd waarbij gevarieerd is in meethoogte.
- Een vijftal aanvullende experimenten waarbij gekeken is naar de invloed van meethoogte, schaduw en regen op het spectrum en de afgeleide gewasindexen.
- Een quickscan van de wetenschappelijke literatuur naar belangrijke factoren die het reflectiespectrum van gewassen beïnvloeden en waarbij gefocust is op praktische aspecten.

7.2 Samenvatting resultaten literatuurstudie en experimenten

De resultaten in deze studie bevestigen dat de sensor-output sterk beïnvloed wordt door allerlei praktische factoren als meethoogte, meettijdstip, en weersomstandigheden. De effecten van de sensoren zijn sensor-specifiek en hangt tevens samen met de gebruikte gewasindex.

Hieronder zijn de verschillende effecten samengevat.

Tabel 7.1. Samenvattend overzicht van de invloed van externe factoren die sensor-output beïnvloeden.

Factor Sensor	PPL-075	Aanvulling		Quickscan	Overall
	CS*	CS	GS	divers	
Verklaarde variantie in sensor output					
Gewas & bodem	20 - 70%	20-82%	62-81%	-	1
Weer	<1 – 15%	<1 – 5%	-	-	3
Meettijdstip	15 - 20%	9 - 56%	3-10%	-	2
Effect op sensor-output (relatief t.o.v. standaardmeting)					
Gewastype	1 – 72%	1 – 315%	22 - 600%	-	1
Meettijdstip	<1 – 56%	<1 – 90%	4 - 70%	<3 – 35%	2
Meethoogte	<1 – 40%	<1 – 23%	2 – 64%	<10 - >100%	3
Neerslag & dauw	<5%	<1 - 6%	<1 – 32%	<1 - 60%	5
Schaduw	-	<1 – 200%	<2%	<1 – 15%	4
Onkruiden	<10%	-	-	<25%	6
Temperatuur	<5%	-	-	<5%	7

* CS is de afkorting voor CropScan en GS voor GreenSeeker

Gebaseerd op de bestudeerde gegevens, experimenten en *expert-judgement* is een overall inschatting gemaakt van de invloed van diverse factoren op de hoeveelheid ruis in de sensor-output van de CropScan en de GreenSeeker. Hierbij neemt de bijdrage van de factor af naarmate het zakt op de prioriteringslijst.

De meest nauwkeurige gegevens (d.w.z., toegespitst op de vragen van deze studie en toepasbaar in Nederland) zijn gebaseerd op de aanvullende experimenten die in het najaar van 2012 zijn uitgevoerd. De analyse van de gegevens uit het PPL-075 project geven een nuttige en waardevolle verbreding omdat er op meer locaties en op meerdere tijdstippen analyses zijn uitgevoerd. Tegelijkertijd is er ook meer natuurlijke of random 'ruis' in deze gegevens aanwezig en zijn de metingen niet specifiek ontworpen voor de vragen in dit onderzoek. De resultaten van de quickscan kunnen alleen als een globale schatting worden gehanteerd, omdat de uit dit onderzoek blijkt dat de resultaten sensor- en locatie-specifiek zijn. Desondanks is het wel waarschijnlijk is dat de relatieve verschillen tussen de onderzochte factoren redelijk vergelijkbaar zullen zijn.

7.3 Ontwikkeling adviezen voor praktische toepassing

Hoe is nu concreet om te gaan met deze factoren die extra 'ruis' creëren op het gemeten spectrum en de afgeleide gewasindexen? Hiervoor zijn verschillende opties, variërend van praktische adviezen voor een agrarische gebruiker tot adviezen voor ontwikkelaars van sensoren en bemestingsadviezen.

7.3.1 De agrarische gebruiker

De agrarische gebruiker dient het effect van meettijdstip, meethoogte en weersomstandigheden zo klein mogelijk te houden om een robuuste en nauwkeurige meting te doen van het gewasspectrum. Hiervoor zijn de volgende activiteiten belangrijk:

Kalibratie op het perceel: bij gebruik van sensoren om bemestingsadviezen te genereren, is het belangrijk om voor de meting het systeem te ijken aan de hand van een goed bemeste of onbemeste plot op het perceel. Kalibratie kan via automatische relatieve kalibratietechnieken of via klassieke SPAD-metingen van een aantal gewasmonsters (zie Ros & Bussink, 2012).

- Wanneer gewasindexen gebruikt worden die corrigeren voor bodemruis, dan is ook een 'kalegrond-scan' nodig en wel onder dezelfde omstandigheden als de overige metingen.
- Wanneer een perceelsafhankelijke kalibratie wordt uitgevoerd, 'verdwijnen' de ruis-invloeden van meettijdstip, meethoogte en weersomstandigheden. Wel is de spectrale informatie van verschillende meetdagen dan niet direct vergelijkbaar.

Standaardisatie meethoogte: De afstand tussen gewas en sensor dient relatief constant te blijven als tijdens het seizoen meerdere scans worden uitgevoerd en met elkaar worden gecombineerd.

- Zodra het verschil met de vorige meting groter wordt dan 30-50 cm, is opnieuw kalibratie van de sensor nodig.
- De gevoeligheid voor meethoogte lijkt groter te zijn bij de actieve dan de passieve sensor.
- Indien mogelijk moet de hoogte van de sensor aangepast worden zodra de afstand gewas-sensor meer dan 50 cm verandert. Beter zou zijn als na of tijdens het gebruik een (automatische) correctie wordt uitgevoerd die rekening houdt met het groeiende gewas. Relaties zoals weergegeven in figuur 4.5. zijn hiervoor te gebruiken. Zolang die nog niet aanwezig zijn/ gebruikt worden, is het aan te bevelen om aan te sluiten bij de gewas sensor afstand zoals die gebruikt is in de ontwikkeling van (bestaande) bijmestsystemen.

Weersomstandigheden: Omstandigheden met veel bewolking, mist en regen zijn ongewenst.

- Er is geen duidelijke link tussen de kwaliteit van de meting en de hoeveelheid invallende straling, uitgezonderd die momenten dat het systeem stopt met interne kalibratie als er rond zonsopgang of –ondergang gemeten wordt (CropScan). Dit betekent dat goede metingen zijn uit te voeren vanaf het moment dat er minstens 100 W m^{-2} binnenkomt. Bij de GreenSeeker ligt het minimale stralingsniveau nog later, omdat deze gebruik maakt van een eigen lichtbron en omdat schaduw vrijwel geen invloed heeft op de sensor-output.
- Een opvallend maar onopgelost verschil is aanwezig tussen de actieve en passieve sensor in relatie tot schaduw en regenval. De GreenSeeker kan zonder problemen onder schaduwrijke omstandigheden worden toegepast. Echter, na een regenbui duurt het minimaal 4 tot 6 uur voordat de sensor-output weer gestabiliseerd is. Dat wil zeggen dat het effect van neerslag niet meer merkbaar is in de output. Wel is het effect sterk gerelateerd aan de gebruikte index. Het spectrum gemeten met de CropScan en de daarvan afgeleide indexen worden nauwelijks beïnvloed door de aanwezigheid van water. De aanwezigheid van schaduw of objecten die invallend licht aan de bovenzijde blokkeren, zorgen voor grote afwijkingen in de sensor-output.
- De hoeveelheid neerslag die de vorige dag gevallen is - en die daarmee ook gedeeltelijk de hoeveelheid bodemvocht bepaalt - en de temperatuur tijdens het meten hebben geen relevante invloed op de sensor-output. Uiteraard zijn deze bevindingen alleen geldig binnen Nederlandse veldomstandigheden.

Meettijdstip: zowel de actieve als passieve sensor laten aanzienlijke variatie zien over de dag. Het is aan te bevelen om het gewas te scannen in de periode tussen twee uur na zonsopgang tot 2 uur voor zonsondergang.

Keuze gewasindex: Er is een aanzienlijke variatie in de ‘robuustheid’ van verschillende indexen. Dit maakt de keuze voor een bepaalde index cruciaal. De REP-index lijkt in vrijwel alle omstandigheden het minst gevoelig te zijn voor zowel meethoogte, meettijdspit als weersomstandigheden. Aan de andere kant vertoont deze index ook de minste variatie tussen gewassen en locaties. Nader onderzoek (PPL-075) moet uitwijzen of er een relatie bestaat tussen gevoeligheid voor ‘ruis’ en de voorspellende waarde om biomassa-ontwikkeling of nutriëntenopname te schatten. De keuze van de index is gekoppeld aan het sensortype, zodat niet alle opties open zijn voor de gebruiker.

Perceelsomstandigheden: Er lijkt vooralsnog geen reden te zijn dat sensoren in bepaalde teelten niet zijn te gebruiken in verband met de hoeveelheid bodembedekking. Een analyse van de beschikbare gegevens in relatie tot de biomassa ontwikkeling en nutriëntenopname kan aanvullende informatie leveren. Omdat dit een onderdeel is van het huidige PPL-075 project, is dit binnen het kader van deze studie niet gedaan. De sensor-output lijkt niet veel ruis te ondervinden van aanwezig onkruid. Vanwege de beperkte gegevens, is deze conclusie echter nog niet hard te maken. Literatuurgegevens die verwijzen naar *crop sensing* systemen die in staat zijn om onderscheid te maken tussen onkruiden en agrarische gewassen suggereren namelijk het tegendeel. Aanvullende praktijkgegevens kunnen een antwoord geven op deze vraag.

Zorg voor goed onderhoud: Naast de verschillen in meetresultaat tussen sensoren is ook de betrouwbaarheid van de sensor zelf een aandachtspunt (zie Van der Schans et al., 2012). Sensoren kunnen in de loop van de tijd “verlopen” of defect raken. Het is daarom nodig om sensoren regelmatig te controleren en kalibreren. Tevens is het van groot belang dat de gebruiker op de hoogte is van de randvoorwaarden waarbinnen de meetresultaten betrouwbaar zijn.

Samenvattend zijn de aanbevelingen voor de agrarische gebruiker:

- kalibreer het systeem voor toepassing op het perceel (d.w.z., zorg voor de juiste connectie tussen sensor-output en nutriënten-opname);
- verander de meethoogte zodra het gewas meer dan 30 cm gegroeid is;
- vermijd weersomstandigheden met veel bewolking, mist en regen, en bij gebruik van een actieve sensor moet minstens een halve dag gewacht worden na een regenbui;
- vermijd de eerste twee uur na zonsopgang en voor zonsondergang;
- zorg ervoor dat passieve sensors niet belemmerd worden door schaduw vanaf de trekker;
- gebruik de meest robuuste gewasindex: de REP (CropScan) of de NDVI (GreenSeeker); en
- houdt de kwaliteit van de sensor optimaal door het systeem regelmatig te laten kalibreren.

7.4 Aanbevelingen leveranciers/ ontwikkelaars

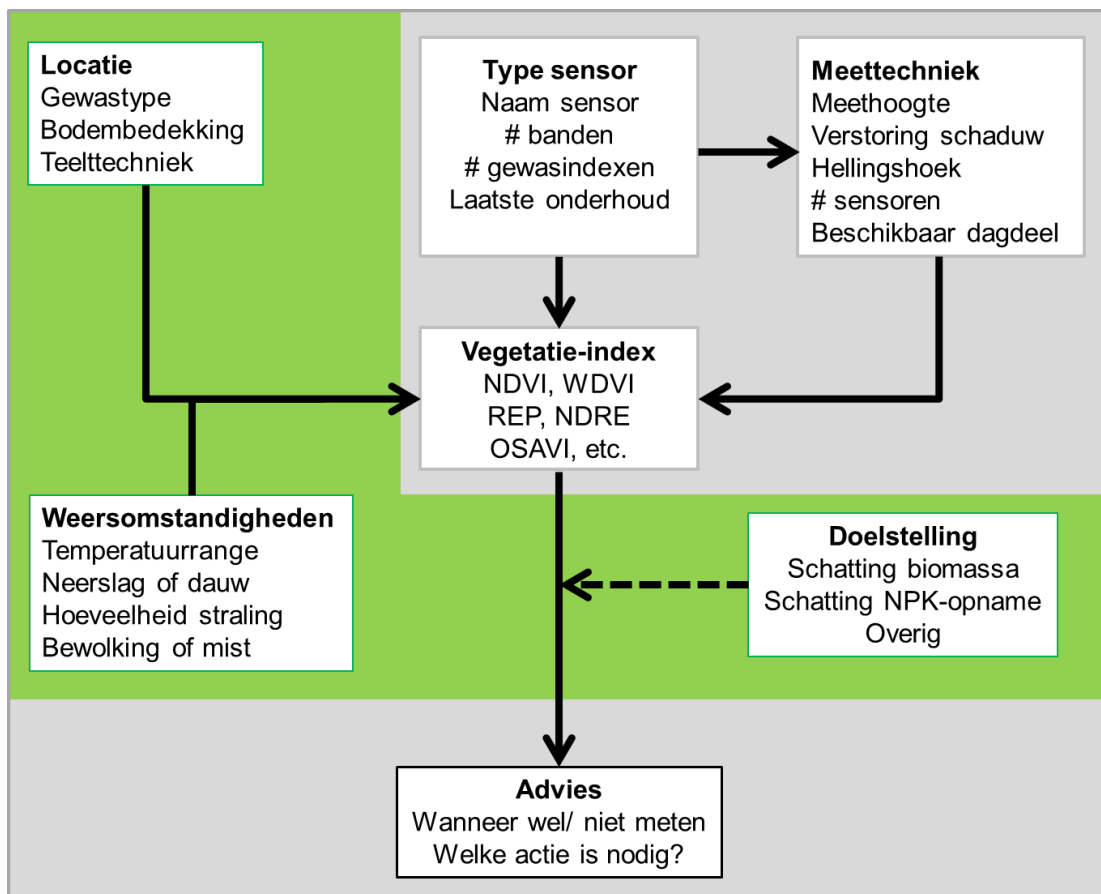
Uit dit onderzoek is duidelijk geworden dat er aanzienlijke variatie op kan treden in sensor-output op basis van meettechnieken en weersomstandigheden. Voor een deel is deze informatie bekend, maar tot op heden is weinig onderzoek gedaan naar de invloed van deze factoren. De resultaten van bestaande onderzoeken zijn vaak beperkt tot één of enkele factoren en alleen geldig voor het desbetreffende gewas, sensortype, jaar en dag van meten. Gezien de variatie die op kan treden in gewasindexen, betekent dit dat deze ‘ruis’ ook gevolgen heeft voor de interpretatie van NDVI-kaartjes, vergelijkende studies, en de ontwikkeling van bemestingsadviezen op basis van sensor-output.

Een aantal praktische aanbevelingen voor leveranciers zijn:

- Het is belangrijk dat de leveranciers van sensoren informatie leveren over de invloed van hoogte van de montage van de sensor op de meetwaarden en de daaruit berekende vegetatie-indexen.
- Bij de ontwikkeling van bemestings-ondersteunende systemen die gebruik maken van gewassensoren moet expliciet rekening worden gehouden met 'natuurlijke' en 'meet-technische' variatie in sensor-output. Meet-technische variatie is in kaart te brengen en de gegevens zijn vervolgens te gebruiken om gewasindexen te corrigeren. Dit kan voor bijvoorbeeld meethoogte, maar mogelijk ook voor meer natuurlijke factoren als dauw en neerslag. Een vergelijkbaar algoritme is bijvoorbeeld toegepast in de CropScan waar op basis van de locatie automatisch gecorrigeerd wordt voor de hoek waarmee het zonlicht binnenkomt.
- Bij de evaluatie van gewasindexen is voorsnog alleen gekeken naar de relatie tussen index en een gewasafhankelijke parameter. Het is aan te bevelen om tevens te kijken naar de robuustheid van deze indexen: hoe gevoelig zijn ze voor variatie in invallende straling, bodemvocht, meethoogte, etc.

7.5 Meet- en beoordelingsprotocol

De hierboven beschreven adviezen kunnen worden samengevat in één figuur waarbij de onderliggende relatie tussen locatie, sensortype, weer, en meet-technische gegevens samenkomen. Via deze aanpak is het mogelijk om voor elke combinatie een gepast advies te geven.



Figuur 7.1. Conceptuele opzet voor een meet- en beoordelingsprotocol (# is aantal).

Indien gewenst en haalbaar is het zelfs mogelijk om deze opzet als beslissingsondersteunende module of web-applicatie te koppelen aan bijvoorbeeld een sensing-gestuurd bemestingsadvies. De relaties tussen de verschillende typen gegevens (sensortype, meettechniek, weersomstandigheden, etc.) zijn voor een gedeelte generiek toepasbaar en voor een gedeelte sensor-index-specifiek.

In dit rapport is bovenstaande protocol ingevuld voor het gebruik van de CropScan en GreenSeeker bij vijf verschillende gewassen. Hierbij lag de focus op de identificatie van de belangrijkste factoren en hun invloed op het spectrum en gewasindexen. De ontwikkelde statistische modellen kunnen echter ook gebruikt worden als input van het protocol. Gezien het belang van deze praktische aspecten voor een goed meetresultaat, en daarmee ook voor een succesvolle toepassing van sensoren in de praktijk, is het aan te bevelen om de onderliggende database verder aan te vullen. Hiervoor kan gebruik worden gemaakt van gegevens uit andere praktijkproeven om zo de in dit rapport gepresenteerde resultaten verder uit te bouwen. Het belang hiervan wordt bevestigd door het toenemend aantal publicaties dat sinds 2010 aandacht vraagt voor deze problematiek.

Wanneer voldoende gegevens beschikbaar zijn of komen, is het aan te bevelen om deze gegevens te vertalen in algoritmes. Het gebruik van deze algoritmes maakt het vervolgens mogelijk om automatisch een correctie uit te voeren wanneer afgeweken wordt van 'standaard' meetmethodes.

De basis adviesregels voor een agrarische gebruiker zijn eerder toegelicht (sectie 7.3.), maar blijven *basic* omdat het exacte advies af zal hangen van de doelstelling *waarom* een gewassensor gebruikt gaat worden, de eigenschappen van de gebruikte sensor en de keuze voor een bepaalde gewasindex. In dit rapport is deze laatste stap niet uitgewerkt omdat de link tussen het gereflecteerde spectrum, de gewasindexen en de biomassa-ontwikkeling of nutriëntenopname in PPL-project 075 verder uitgewerkt wordt. Bij deze uitwerking zal specifiek rekening gehouden worden met de in dit rapport verkregen resultaten.

Gebruikte literatuur

- Adcock TE, Nutter FW & Banks PA (1990). Measuring herbicide injury to soybean (*Glycine max*) using a radiometer. *Weed Sci.* 38, 625-627.
- Brugnoli E & Bjorkman O (1992). Chloroplast movement in leaves: Influence on chlorophyll fluorescence and measurements of light-induced absorbency changes related to delta-pH and zeaxanthin formation. *Photosynth. Res.* 32, 23–35.
- Carlson RE, Yarger DN & Shaw RH (1971). Factors affecting the spectral properties of leaves with special emphasis on leaf water status. *Agronomy Journal* 63,486–489.
- Chang J, Clay SA, Clay DE & Dalsted K (2004). Detecting weed-free and weed-infested areas of a soybean field using near-infrared spectral data. *Weed Science* 52, 642-648.
- Chang J, Clay SA, Clay DE, Aaron D, Helder D & Dalsted K (2005). Clouds influence precision and accuracy of ground-based spectroradiometers. *Communications in Soil Science & Plant Analysis* 36, 1799-1807.
- Daughtry CST, Vanderbilt VC & Pollara VJ (1982). Variability of reflectance measurements with sensor altitude and canopy type. *Agronomy Journal* 74, 744-751.
- De Souza EG, Orlando GA, Uribe-Opazo MA, Da Silva EA & Scharf P (2004). Influence of the row direction of corn on the reflectance and green normalized difference vegetation index. *Rev. Bras. Eng. Agric. Ambient.* 8,79-84.
- De Souza EG, Scharf PC & Sudduth KA (2010). Sun position and cloud effects on reflectance and vegetation indices of corn. *Agronomy Journal* 102, 734-744.
- Fitzgerald GJ, Pinter PJ, Hunsaker DJ & Clarke TR (2005). Multiple shadow fractions in spectral mixture analysis of a cotton canopy. *Remote Sensing of Environment* 97, 526-539.
- Fitzgerald GJ (2010). Characterizing vegetation indices derived from active and passive sensors. *International Journal of Remote Sensing* 31, 4335-4348.
- Genstat Committee (1993) *Genstat 5 Release 3 Reference Manual*. Oxford Science Publications, Clarendon Press, Oxford, 796 pp.
- Green DE, Burpee LL & Stevenson KL (1998). Canopy reflectance as a measure of disease in tall fescue. *Crop Sci.* 38, 1603-1613.
- Gross MF, Hardisky M A & Klemas V (1988). Effects of solar angle on reflectance from wetland vegetation. *Remote Sen. Environ.* 26, 195-212.
- Guan J & Nutter FW (1998). Effect of incident radiation, sun angle, and sensor height on the percentage of sunlight reflected from alfalfa canopies affected by foliar diseases. Iowa State University, Publication no. P-1998-0010-NCA, USA.
- Hodgen PJ, Solari F, Schepers JS, Shanahan JF & Francis DD (2004). Effects of active sensor position on maize biomass and nitrogen status estimates. *Agronomy Abstracts* #6108.
- Hoel BO & Solhaug KA (1998). Effect of irradiance on chlorophyll estimation with the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter. *Ann. Bot. (Lond.)* 82, 389–392.
- Holland Scientific, Inc. (2005). *Crop Circle ACS-210 plant canopy reflectance sensor instruction manual (Revision 1.0)*. Holland Scientific, Inc., Lincoln, NE.
- Jackson RD, Pinter PJ, Idso SB & Reginato RJ (1979). Wheat spectral reflectance: interactions between crop configuration, sun elevation, and azimuth angle. *Applied Optics* 18, 3730-3733.
- Jackson RD, Jones CA, Uehara G & Santo LT (1980). Remote detection of nutrient and water deficiencies in sugarcane under variable cloudiness. *Remote Sens. Environ.* 11, 327-331.
- Jasper J, Reusch S & Link A (2009). Active sensing of the N status of wheat using optimized wavelength

- combination: impact of seed rate, variety and growth stage. *In*: Van Henten EJ, Goense D & Lokhorst C (Eds.), Precision Agriculture 09: Papers from the 7th European Conference on Precision Agriculture, Wageningen, pp. 23-30.
- Kim Y, Glenn, DG, Park J, Ngugi HK & Lehman BL (2010). Active spectral sensor evaluation under varying conditions. ASABE paper no. 1009111. *In* Proc. Annu. Int. ASABE Meeting, Pittsburg. 20-23 June 2010. Am. Soc. Agric. Biol. Eng., St. Joseph.
- Kipp S, Mistele B & Schmidhalter (2012). Active sensor performance – dependence on measuring height, device temperature and light intensity. Presentation given at 11th International Conference on Precision Agriculture, Indianapolis, Indiana USA
- Lamain M (2011). Verslag Near Sensing met CropCircle-sensoren. Uitgevoerd in 2011 bij AM Elema, 'Buitenbosch', Usquert. Weister Klap Advies, 22 pp.
- Lord D, Desjardins RL & Dube PA (1985). Influence of wind on crop canopy reflectance measurements. *Remote Sensing of the Environment* 18, 113–123.
- Lord D, DesJardins RL & Dube PA (1988). Sun-angle effects on the red and near infrared reflectances of five different crop canopies. *Can. J. Remote Sens.* 14, 46-55.
- Madeira AC, Gillespie TJ & Duke CL (2000). Effect of wetness on turfgrass canopy reflectance. *Agricultural and Forest Meteorology.* 107, 117-130.
- Middleton EM (1991). Solar zenith angle effects on vegetation indices in tallgrass prairie. *Remote Sens. Environ.* 38:45-62.
- Moran MS, Pinter PJ, Clothier BE & Allen SG (1989). Effect of water stress on the canopy architecture and spectral indices of irrigated alfalfa. *Remote Sens. Environ.* 29, 251-261.
- 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.
- Munsterman P (2009). Factoren die invloed hebben op lichtreflectie van suikerbieten. PPO publicatie nr 3250052400, PPO Wageningen, 53 pp.
- NTech Industries, Inc (2005). Model 505 GreenSeeker hand held optical sensor unit operating manual. NTech Industries, Inc., Ukiah, CA.
- Oliveira de LF (2008). Reflectance sensors to predict mid-season nitrogen need of cotton. MSc thesis, University of Missouri, USA, 95 pp.
- Pinter PJ (1986). Effect of dew on canopy reflectance and temperature. *Remote Sensing of the Environment* 19, 187–205.
- Polder G, Van der Heijden GWAM, Keizer LCP & Young IT (2003). Calibration and characterisation of imaging spectrographs. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 11, 193-210.
- Ranson KJ, Daughtry CST, Biehl LL & Bauer ME (1985). Sun-view angle effects on reflectance factors of corn canopies. *Remote Sensing of the Environment* 18, 147–161.
- Ranson KJ, Daughtry CST & Biehl LL (1986). Sun angle, view angle, and background effects on spectral response of simulated balsam fir canopies. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 52, 649-658.
- Roberts DF, Adamchuk VI, Shanahan JF, Ferguson RB & Schepers JS (2009). Optimization of crop canopy sensor placement for measuring nitrogen status in corn. *Agronomy Journal* 101, 140-149.
- Ros GH & Bussink DW (2012). Ontwikkeling van beslissingsondersteunende systemen voor het bijmesten van gewassen. Toepassingsmogelijkheden in de Nederlandse precisielandbouw: een literatuurstudie. NMI-rapport 1454.N.11, NMI, Wageningen, 76 pp.
- Rowlandson TL (2011). Leaf wetness: implications for agriculture and remote sensing, Graduate Theses and Dissertations, Paper 12054, Iowa State University, 102 pp.
- Samborski SM, Tremblay N & Fallon E (2009). Strategies to make use of plan sensors – based diagnostic information for nitrogen recommendations. *Agronomy Journal* 101, 800-816.

- Scharf, PC, Sudduth KA, Hong N & Oliveira L (2007). Reflectance sensors: How stable are the values they measure? *Agronomy Abstracts*, ASA, Madison, WI.
- 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. Presentation given at 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, 1-6 August 2010, Brisbane, Australia.
- Schepers (2005). Active Sensor Tidbits. Presentation given at InfoAg 2005 Conference.
- 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.
- Solari F, Hodgen P, Shanahan JF & Schepers JS (2004). Time of day and maize leaf wetness effects on active sensor readings. *Agronomy Abstracts* #4253.
- Stickse E, Schachtl J, Huber G, Liebler J & Maidl FX (2004). Diurnal variation in hyperspectral vegetation indices related to winter wheat biomass formation. *Precision Agriculture* 5,509-520.
- Sudduth KA, Kitchen NR & Drummond ST (2011). Nadir and oblique canopy reflectance sensing for N application in corn. Paper presented at ASABA Meeting, paper number 1111261, USA, 12 pp.
- Tumbo DS, Wagner DG & Heinemann PA (2002). Hyperspectral characteristics of corn plants under different chlorophyll levels. *Trans. ASAE* 45(3):815-823.
- Van der Schans D, Blok P & Kramer R (2011). Implementatie van Sensorgestuurde stikstof-bijbemesting in pootaardappel. Een onderzoek onder praktijkomstandigheden bij A. Claassen te Vierhuizen. PPO publicatienr. 435, PPO, Wageningen, 39 pp.
- Van der Schans DA, Van Evert FK, Malda JT & Dorka-Vona V (2012). Sensorgestuurde advisering van stikstof bijbemesting in aardappel. Implementatie en integratie. PPO publicatie 3250219800, Wageningen, 82 pp.
- Vrindts E, De Baerdemaeker J & Ramon H (2002). Weed detection using canopy reflection. *Precision Agriculture* 3, 63-80.
- Wardley NW (1984). Vegetation index variability as a function of viewing geometry. *International Journal of Remote Sensing* 5, 861-870.
- Wineterhalter L, Mistele B & Schmidhalter U (2012). Assessing the vertical footprint of reflectance measurements to characterize nitrogen uptake and biomass distribution in maize canopies. *Field Crops Research* 129, 14-20.

8 Bijlage 1. Gebruikte gewasindexen

In dit rapport wordt gebruik gemaakt van een heel aantal gewasindexen. Als achtergrondinformatie worden hier de mathematische beschrijvingen gegeven van deze indexen. Een inhoudelijke bespreking van deze gewasindexen wordt gegeven in Ros & Bussink (2012).

Index	Naam	Formule	Ontwikkeld door
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	$(R_{NIR}-R_{red})/(R_{NIR}+R_{red})$	Rouse et al. (1974)
RVI	Ratio Vegetation Index	R_{NIR}/R_{red}	Jordan (1969)
WDVI	Weighted Difference Vegetation Index	$R_{NIR}-C \cdot R_{red}$ C = 2 (soil factor)	Clevers (1989)
REP-LI	Red edge position: linear interpolation method	$700+40(R_{re}-R_{700})/(R_{740}-R_{700})$ Rre: $(R_{670}+R_{780})/2$	Guyot et al. (1988)
MTCI	MERIS Terrestrial Chlorophyll Index	$(R_{754}-R_{708})/(R_{708}-R_{680})$	Dash and Curran (2008)
TCARI	Transformed chlorophyll absorption in reflectance index	$3((R_{700}-R_{670})-0.2(R_{700}-R_{550}))(R_{700}/R_{670})$	Haboudane et al. (2002)
TCARI/OSAVI	Combined Index: TCARI with Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index	TCARI/OSAVI OSAVI: $1.16 \times (R_{800}-R_{670})/(R_{800}+R_{670}+0.16)$	Haboudane et al. (2002)
MCARI	Modified Chlorophyll Absorption index	$[(R_{700}-R_{670})-0.2 \times (R_{700}-R_{550}) \times (R_{700}/R_{670})]$	Daughtry et al. (2000)
DCNI	Double-peak canopy nitrogen index	$(R_{720}-R_{700})/(R_{700}-R_{670})/(R_{720}-R_{670}+0.03)$	Chen et al. (2010)
NDRE	Normalized Difference Red Edge Index	$(R_{780}-R_{720})/(R_{780}+R_{720})$	Eitel et al. (2010)

De gewasindexen zoals hierboven weergegeven worden deels operationeel toegepast in commerciële close range sensoren (NDVI, REP, NDRE). Andere indexen zijn het resultaat van wetenschappelijk onderzoek naar de optimale combinatie van spectrale banden om een gewaseigenschap nauwkeurig te schatten. Vaak worden hier nauwe spectrale banden of meer dan twee banden voor gebruikt. Deze combinaties zijn in de meeste commerciële close range systems niet beschikbaar.

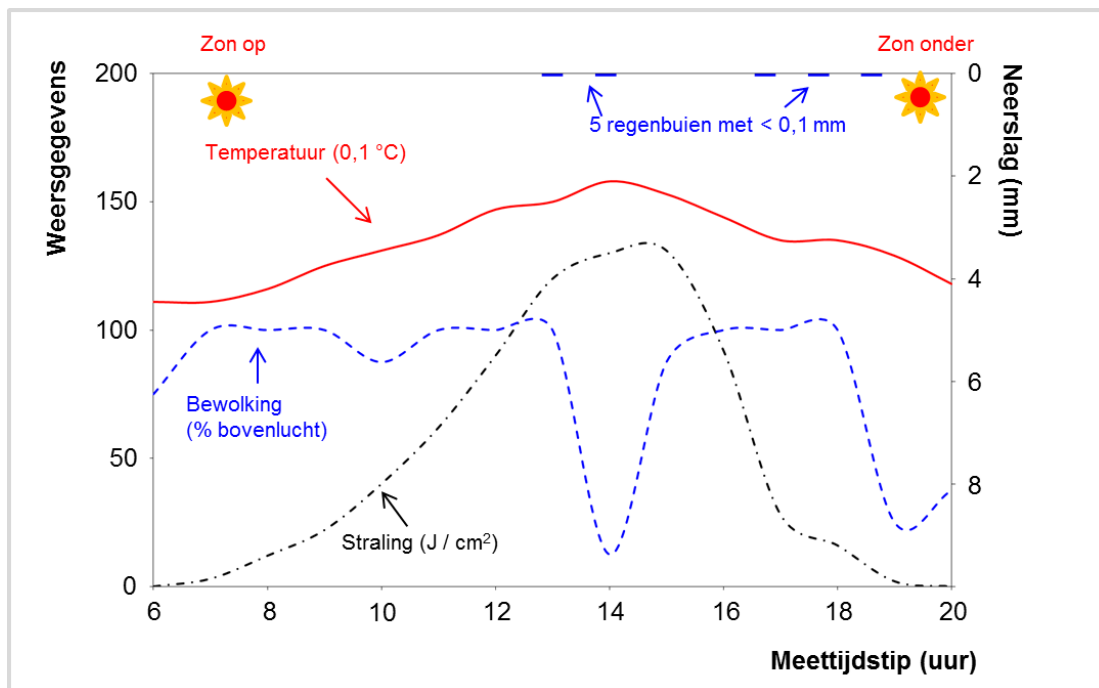
9 Bijlage 2. Aanvullende experimenten: weersgegevens

9.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft de weersomstandigheden gedurende de meetdagen, omdat de hoeveelheid zonlicht, bewolking en neerslag van invloed zijn op de meetresultaten. De experimenten zijn uitgevoerd in de periode september tot oktober 2012. In tegenstelling tot de zomerperiode was er op de meetdagen veel bewolking en ook gedurende de meetdagen viel bij enkele gewassen een enkele regenbui. Relevante weersgegevens van de vijf locaties worden hieronder per locatie gevisualiseerd: temperatuur (eenheid in 0.1 graden Celsius), neerslag (eenheid in mm), hoeveelheid zonlicht (eenheid in J cm^{-2}) en de bedekkingsgraad van de bovenlucht (bedekking in %). De gegevens zijn afkomstig van het dichtstbijzijnde KNMI weerstation. De gegevens worden weergegeven van zonsopgang tot zonsondergang.

9.2 Weersomstandigheden in Biddinghuizen

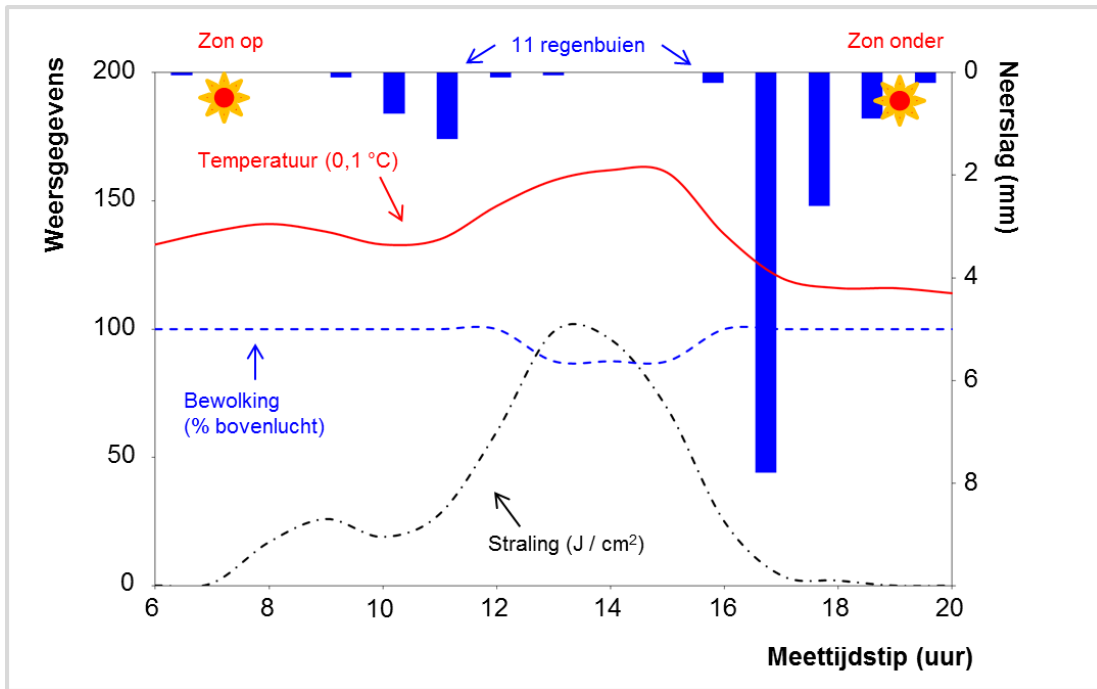
De temperatuur varieert van 11 tot 16 graden, de dag is grotendeels (zwaar) bewolkt en de hoeveelheid invallend zonlicht is maximaal 130 J cm^{-2} . In de namiddag vallen er drie lichte buien met een hoeveelheid neerslag minder dan 0,05 mm. De zon kwam op en ging onder rond half acht.



Figuur 9.1. Weersomstandigheden tijdens veldmeting in Biddinghuizen.

9.3 Weersomstandigheden in Nuenen

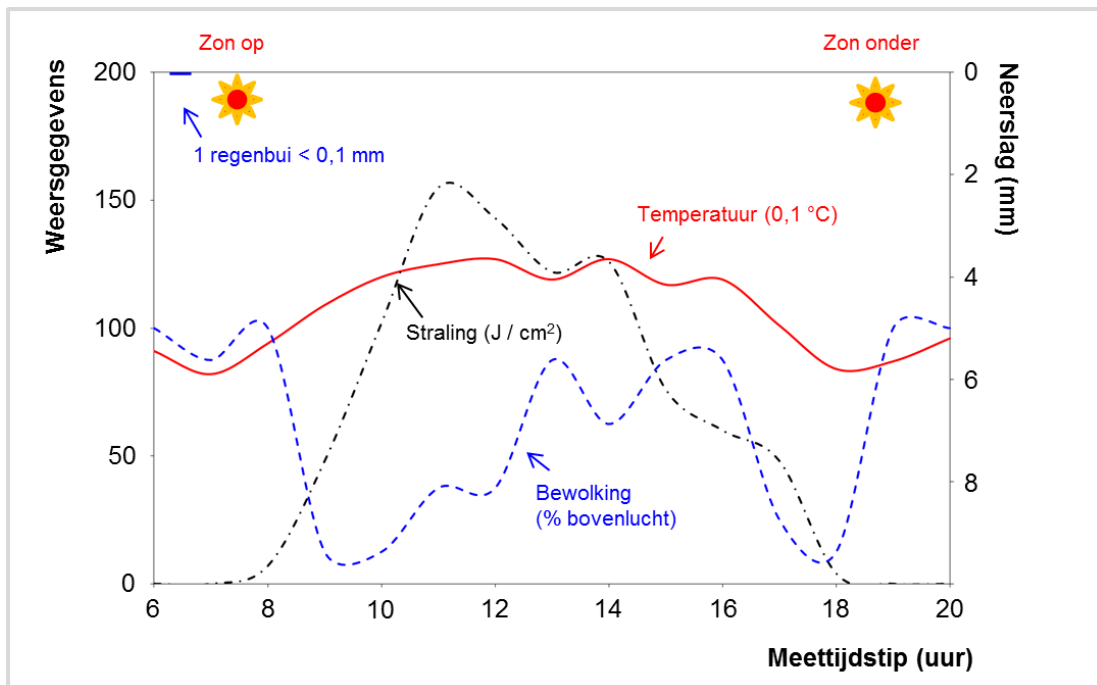
De temperatuur varieert van 11 tot 16 graden, de dag is grotendeels (zwaar) bewolkt en de hoeveelheid invallend zonlicht is maximaal 100 J cm^{-2} . Over de dag vallen er 5 regenbuien met een hoeveelheid neerslag groter dan 1 mm en 4 regenbuien met minder dan 0,1 mm. De zon kwam op om 7:42 uur en ging onder rond 19:11 uur.



Figuur 9.2. Weersomstandigheden tijdens veldmeting in Nueneen.

9.4 Weersomstandigheden in Jubbega

De temperatuur varieert van 7 tot 13 graden, de dag is afwisselend bewolkt en zonnig en de hoeveelheid invallend zonlicht is maximaal 155 J cm^{-2} . Er valt geen regen, uitgezonderd een kleine bui ($< 0,05 \text{ mm}$) vlak voor zonsopgang. De zon kwam op om 7:53 uur en ging onder rond 18:54 uur.

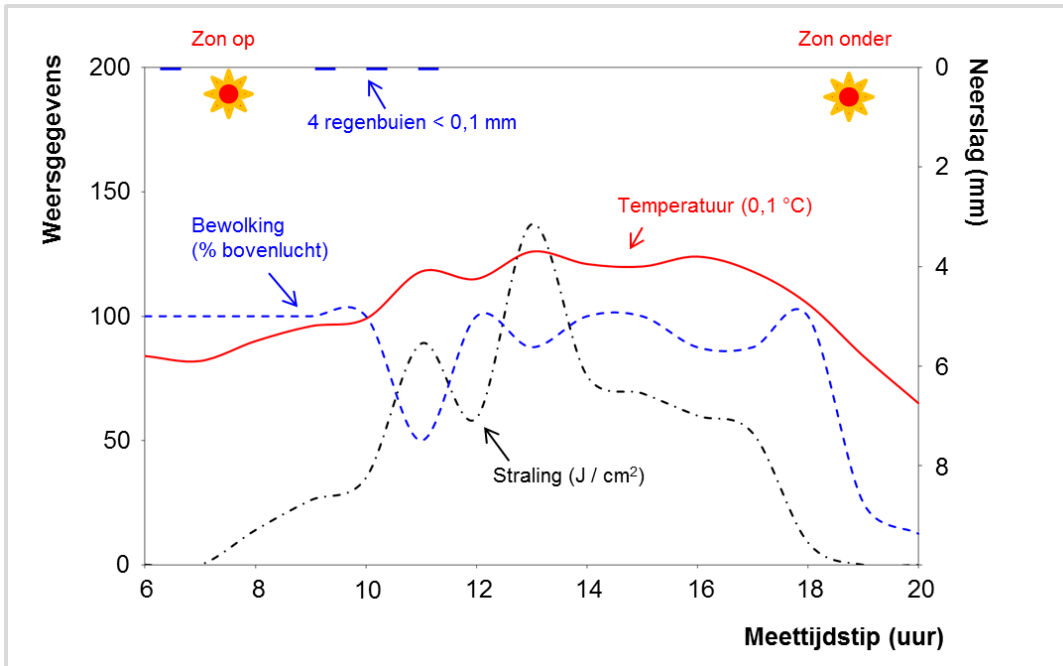


Figuur 9.3. Weersomstandigheden tijdens veldmeting in Jubbega.

9.5 Weersomstandigheden in Elst

De temperatuur varieert van 7 tot 13 graden, de dag is grotendeels bewolkt en de hoeveelheid invallend

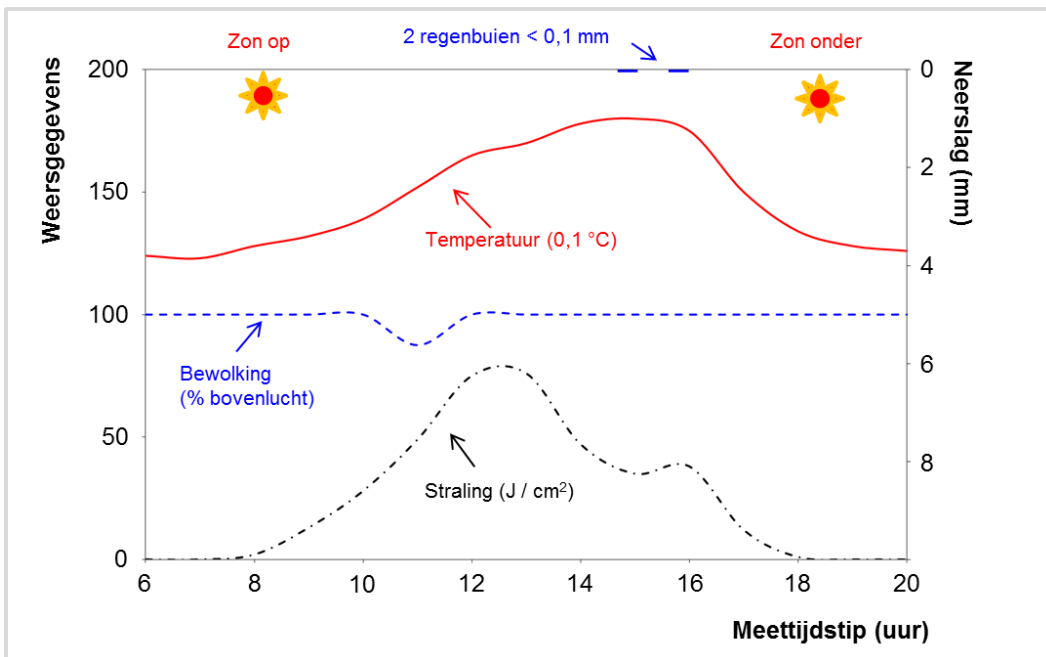
zonlicht is maximaal 137 J cm^{-2} . Er valt vrijwel geen regen deze dag, uitgezonderd een paar kleine miezerbuien ($< 0,05 \text{ mm}$) in de ochtend. De zon kwam op om 7:53 uur en ging onder rond 18:53 uur.



Figuur 9.4. Weersomstandigheden tijdens veldmeting in Elst.

9.6 Weersomstandigheden in Wageningen

De temperatuur varieert van 12 tot 18 graden, de dag start met mist en wordt opgevolgd door hoge sluierbewolking. De hoeveelheid invallend zonlicht is maximaal 76 J cm^{-2} . Er valt geen regen, uitgezonderd twee kleine buien in de middag. De zon kwam op om 8:17 uur en ging onder rond 18:26 uur.



Figuur 9.5. Weersomstandigheden tijdens veldmeting in Wageningen.

10 Bijlage 3. Aanvullende experimenten: resultaten CropScan

10.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft de resultaten van de verschillende proeven die zijn uitgevoerd met de CropScan. Het gaat hierbij achtereenvolgens om de effecten van meettijdstip, meethoogte, schaduw en regenval. In de hieronder beschreven paragrafen wordt op elk aspect ingegaan, waarna in de afsluitende paragraaf de resultaten van de statistische analyse worden besproken.

Per meting zijn 18 tot 36 scans uitgevoerd. Per gewas worden de volgende zaken gevisualiseerd:

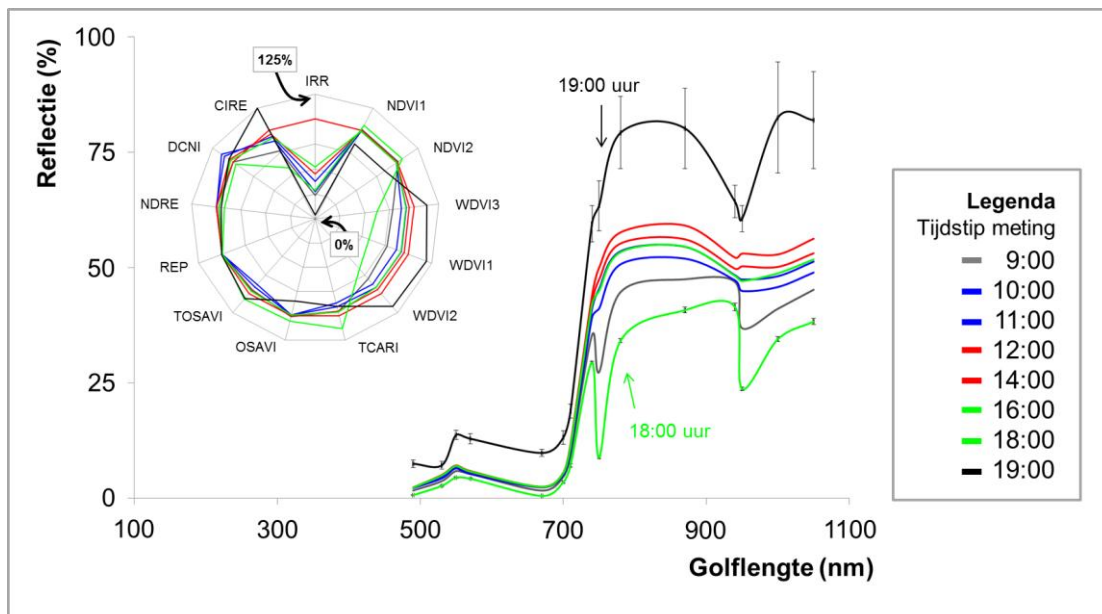
- het effect op het gemeten spectrum; en
- het effect op de daarvan afgeleide gewasindexen.

10.2 Effect van meettijdstip

Om het effect van meettijdstip te kwantificeren is voor welk gewas een serie metingen uitgevoerd gedurende de dag. Hierbij wordt met de metingen gestart vlak na zonsopgang en wordt de meetserie afgesloten rond zonsondergang.

10.2.1 Wortel

Voor het gewas wortel is in Biddinghuizen gemeten vanaf 9 tot 19 uur. Uit figuur 10.1. wordt duidelijk dat het meettijdstip een groot effect heeft op het gewasspectrum, waarbij het grootste effect zichtbaar wordt in het golflengtegebied groter dan 700 nm.



Figuur 10.1. Effect van tijdstip op het gemeten spectrum en de daarvan afgeleide gewasindexen (inzet).

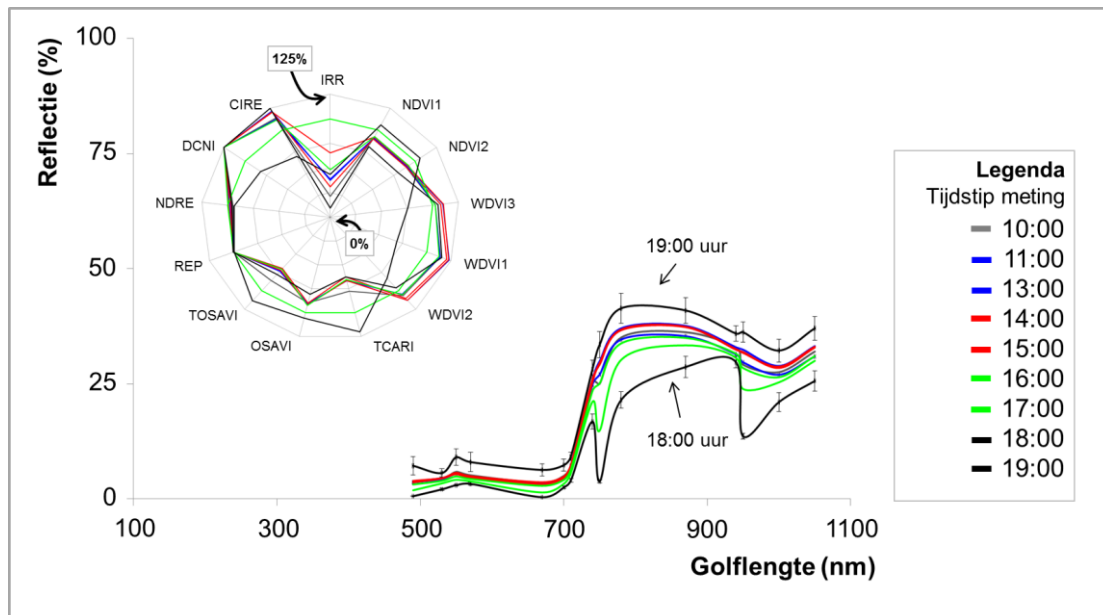
Opvallend is de hogere reflectie om 19 uur wat samenhangt met het feit dat de interne kalibratie niet wordt uitgevoerd wanneer de metingen rond zonsondergang zijn genomen. De grootste veranderingen treden op na 18 uur, circa 1,5 uur voor zonsondergang. Gedurende de dag zijn de verschillen in absolute reflectie zijn kleiner dan 10%.

De variatie over de dag heeft direct gevolgen voor de afgeleide gewasindexen, gevisualiseerd in de inzet in figuur 10.1. Hierbij wordt aangegeven hoeveel de gewasindex verandert ten opzichte van de meting waarbij de invallende straling maximaal was. Op het moment dat de straling maximaal is, is de meting van de gewasreflectie het meest nauwkeurig. Om het overzichtelijk te houden wordt de verandering gemaximaliseerd op 125% (d.w.z. veranderingen groter dan 125% worden weergegeven als 125%). Over de dag varieert de invallende hoeveelheid straling tussen 16 en 415 W m⁻² waarbij het maximum is gemeten rond 14 uur.

Uit deze inzet blijkt dat vrijwel alle gewasindexen beïnvloed worden door het meettijdstip. De gewasindexen die ongevoelig zijn voor het meettijdstip zijn REP, NDRE, OSAVI, en NDVI. Indexen met een grote variatie over de dag zijn de drie WdVI indexen, TCARI, TOSAVI, DCNI en CIRE.

10.2.2 Prei

Voor het gewas prei is in Nuenen de reflectie gemeten vanaf half 10 tot 19 uur. Omdat er bij het gewas prei meer grond zichtbaar is, is de gemiddelde reflectie in NIR lager dan bij wortel. De maximale reflectie bedraagt circa 41%. Tegelijkertijd lijkt het tijdseffect kleiner te zijn. In figuur 10.2. wordt echter wel zichtbaar dat het meettijdstip een effect heeft op het gewasspectrum, waarbij het grootste effect zichtbaar wordt in het golflengtegebied groter dan 700 nm. De grootste veranderingen treden op na 18 uur, circa 1,5 uur voor zonsondergang. Gedurende de dag zijn de verschillen in absolute reflectie kleiner dan 5%. Ook hier is de hogere reflectie in VIS tijdens de meting om 19 uur veroorzaakt door het feit dat er geen interne kalibratie plaats vindt rond zonsondergang.



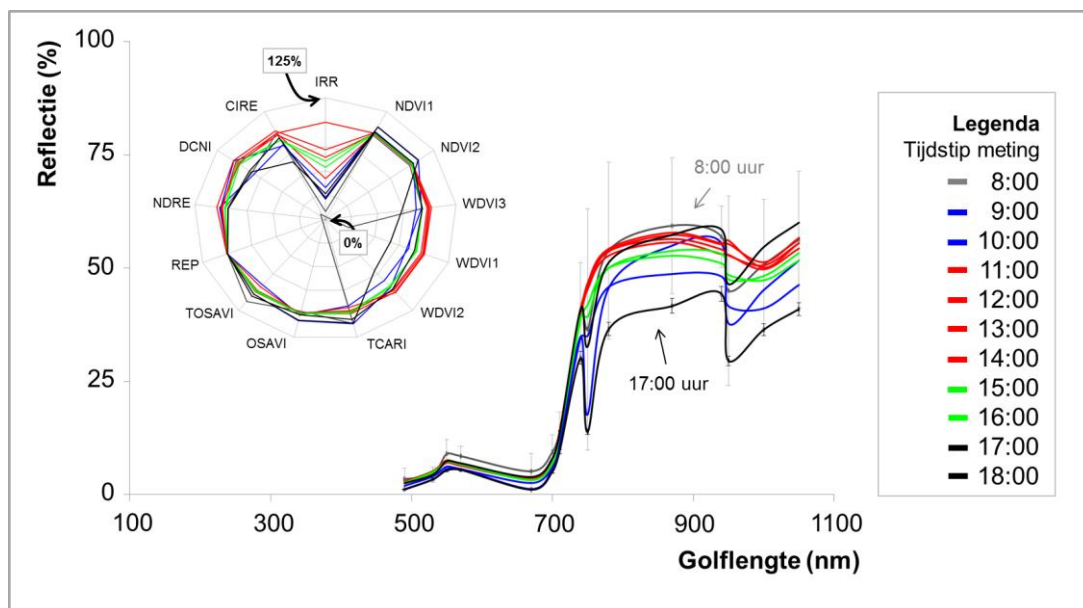
Figuur 10.2. Effect van tijdstip op het gemeten spectrum en de daarvan afgeleide gewasindexen (inzet).

De variatie over de dag heeft direct gevolgen voor de afgeleide gewasindexen, gevisualiseerd in de inzet in figuur 10.2. Hierbij wordt aangegeven hoeveel de gewasindex verandert ten opzichte van de meting waarbij de invallende straling maximaal was. Op het moment dat de straling maximaal is, is de meting van de gewasreflectie namelijk het meest nauwkeurig. Over de dag varieert de invallende hoeveelheid straling tussen 35 en 385 W m⁻² waarbij het maximum is gemeten rond 16:30 uur (gedurende 25 min.).

Uit deze inzet blijkt dat vrijwel alle gewasindexen beïnvloed worden door het meettijdstip. De gewasindexen die ongevoelig zijn voor het meettijdstip zijn ook hier REP en NDRE. Indexen met een grote variatie over de dag zijn de drie WDWI indexen, TCARI, TOSAVI, DCNI en CIRE. Opvallend hierbij is dat alle WDWI indexen hogere waarden krijgen terwijl bij wortel deze juist lager worden bij lagere hoeveelheden invallend licht. Dit hangt samen met de lagere bodembedekking bij het gewas prei, omdat het meettijdstip vooral invloed heeft op de reflectie in NIR. Gesorteerd op de gevoeligheid voor tijd neemt het maximale effect af van +80% voor DCNI tot -1% voor REP. Wanneer de laatste twee metingen (na 18 uur) buiten beschouwing worden gelaten neemt het effect van het meettijdstip voor de meeste gewasindexen af met 0 tot 15%.

10.2.3 Lelie

Voor het gewas lelie is in Jubbega de reflectie gemeten vanaf 8 tot 19 uur. De gemiddelde hoeveelheid reflectie varieert tussen <10 tot 60%. In figuur 10.3. wordt zichtbaar dat het meettijdstip een belangrijk effect heeft op het gewasspectrum vooral in het golflengtegebied groter dan 700 nm. De grootste veranderingen treden op na 17 uur, circa 1 uur voor zonsondergang. Gedurende de dag zijn de verschillen in absolute reflectie kleiner dan 15%. De grote variatie in het NIR spectrum om 8 uur heeft opnieuw te maken met de instellingen van de CropScan sensor: rond zonsopgang en -ondergang wordt er geen interne kalibratie meer uitgevoerd. Omdat dit tijdens de 8-uur-meting gebeurde, veroorzaakt dit extra ruis in deze meting.



Figuur 10.3. Effect van tijdstip op het gemeten spectrum en de daarvan afgeleide gewasindexen (inzet).

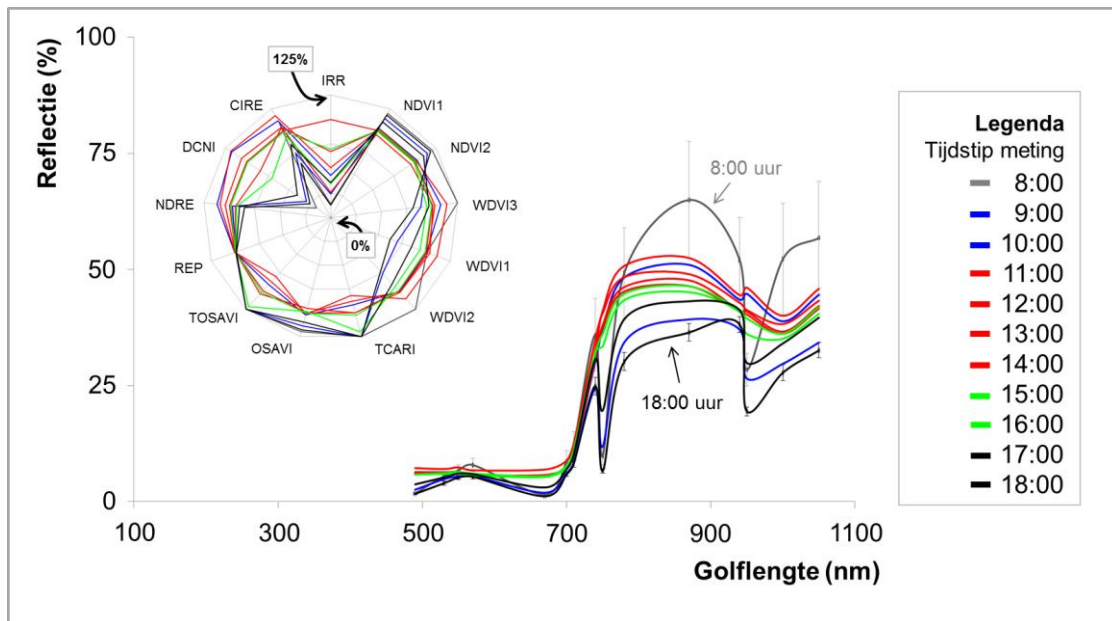
De variatie over de dag heeft direct gevolgen voor de afgeleide gewasindexen, gevisualiseerd in de inzet in figuur 10.3. Hierbij wordt aangegeven hoeveel de gewasindex verandert ten opzichte van de meting waarbij de invallende straling maximaal was. Op het moment dat de straling maximaal is, is de meting van de gewasreflectie namelijk het meest nauwkeurig. Over de dag varieert de invallende hoeveelheid straling tussen 42 en 531 $W m^{-2}$ waarbij het maximum is gemeten rond 13:00 uur.

Uit deze inzet blijkt dat vrijwel alle gewasindexen beïnvloed worden door het meettijdstip. De gewasindexen die ongevoelig zijn voor het meettijdstip zijn ook hier REP en NDRE. Het meettijdstip heeft een maximaal effect van 1% op de waarde van de REP-index en 7% op die van de NDRE-index.

Gewasindexen met een grote variatie over de dag zijn de drie WdVI indexen, de DCNI en CIRE. In deze situaties is het effect tussen 18 en 45%, terwijl het effect van het meettijdstip varieert tussen 7 en 10% voor de OSAVI-index en de beide NDVI's.

10.2.4 Rode kool

Voor het gewas rode kool is in Elst de reflectie gemeten vanaf 8 tot 18 uur. De gemiddelde hoeveelheid reflectie varieert tussen <10 tot 65%. In figuur 10.4. wordt zichtbaar dat het meettijdstip een belangrijk effect heeft op het gewasspectrum, voornamelijk in het golflengtegebied groter dan 700 nm. De grootste veranderingen treden op voor 8 uur en na 17 uur, circa 1,5 uur voor zonsondergang en na zonsopgang. Gedurende de dag zijn de verschillen in absolute reflectie kleiner dan 20%.



Figuur 10.4. Effect van tijdstip op het gemeten spectrum en de daarvan afgeleide gewasindexen (inzet)

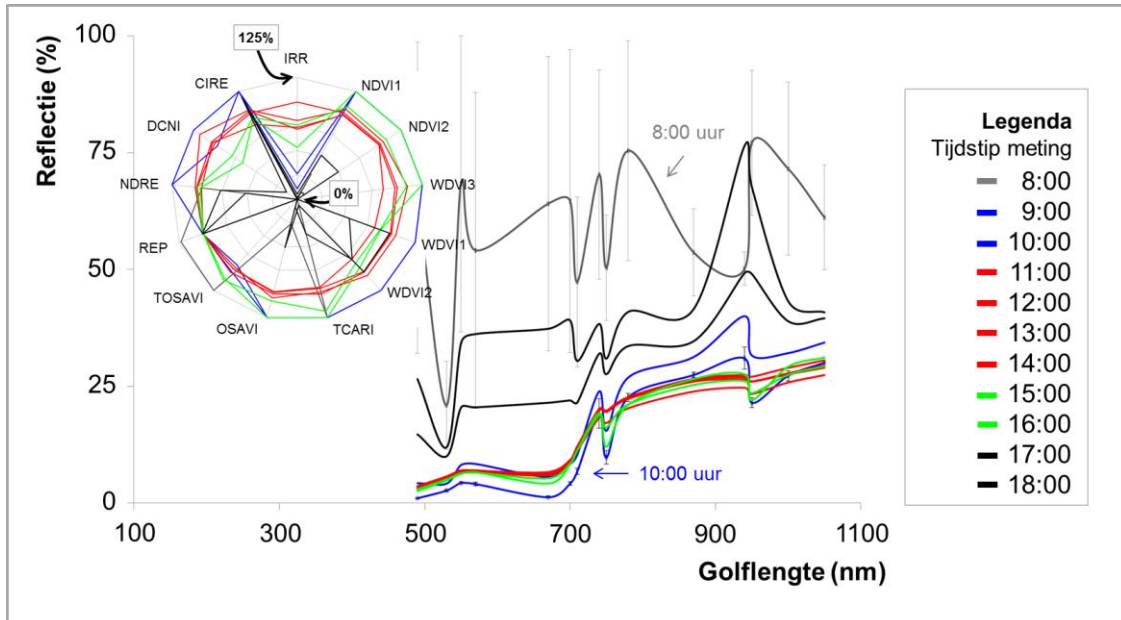
De variatie over de dag heeft direct gevolgen voor de afgeleide gewasindexen, gevisualiseerd in de inzet in figuur 10.4. Hierbij wordt aangegeven hoeveel de gewasindex verandert ten opzichte van de meting waarbij de invallende straling maximaal was. Op het moment dat de straling maximaal is, is de meting van de gewasreflectie namelijk het meest nauwkeurig. De hoeveelheid invallende straling varieert van 80 tot 620 $W\ m^{-2}$ waarbij op de meeste tijdstippen meer dan 200 $W\ m^{-2}$ binnenkomt. Het maximum is gemeten rond 14:00 uur.

Uit deze inzet blijkt dat vrijwel alle gewasindexen beïnvloed worden door het meettijdstip. De REP-index is de enige gewasindex die ongevoelig is voor het effect van meettijdstip. Het maximale effect van meettijdstip op de waarde van REP is 1%. De indexen NDVI, WdVI, OSAVI, NDRE en CIRE kunnen met 15 tot 70% veranderen gedurende de dag. Het meest gevoelig zijn de indexen TCARI, DCNI en OSAVI: de invloed van het meettijdstip kan zelfs groter zijn dan 100%.

10.2.5 Gras

Voor het gewas gras is in Wageningen de reflectie gemeten vanaf 8 tot 19 uur. De gemiddelde hoeveelheid reflectie varieert tussen <10 tot 75%. In figuur 10.5. wordt zichtbaar dat het meettijdstip een belangrijk effect heeft op het gewasspectrum, voornamelijk in het golflengtegebied groter dan 700 nm.

De grootste veranderingen treden op voor 8 uur en na 17 uur, circa 1,5 uur voor zonsondergang en na zonsopgang. De reflectie ligt in deze situaties over het gehele golflengtegebied hoger, wat samenhangt met het feit dat de CropScan geen interne kalibratie meer uitvoert rond zonsopkomst en -ondergang. Gedurende de dag zijn de verschillen in absolute reflectie kleiner dan 10%.



Figuur 10.5. Effect van tijdstip op het gemeten spectrum en de daarvan afgeleide gewasindexen (inzet).

De variatie over de dag heeft direct gevolgen voor de afgeleide gewasindexen, gevisualiseerd in de inzet in figuur 10.5. Hierbij wordt aangegeven hoeveel de gewasindex verandert ten opzichte van de meting waarbij de invallende straling maximaal was. Op het moment dat de straling maximaal is, is de meting van de gewasreflectie namelijk het meest nauwkeurig. De hoeveelheid invallende straling varieert van 5 tot 410 W m^{-2} . Het maximum is gemeten rond 13:00 uur.

Uit de inzet blijkt dat vrijwel alle gewasindexen beïnvloed worden door het meettijdstip. Wanneer de drie metingen rond zonsopgang en -ondergang buiten beschouwing worden gelaten, dan is opnieuw de REP-index ongevoelig voor het effect van meettijdstip. Daarentegen is het effect het grootst bij de DCNI-index en de drie WDWI-indexen: het effect van meettijdstip is groter dan 100%. Voor de overige indexen varieert het effect tussen 11 (TOSAVI) en 69% (NDRE).

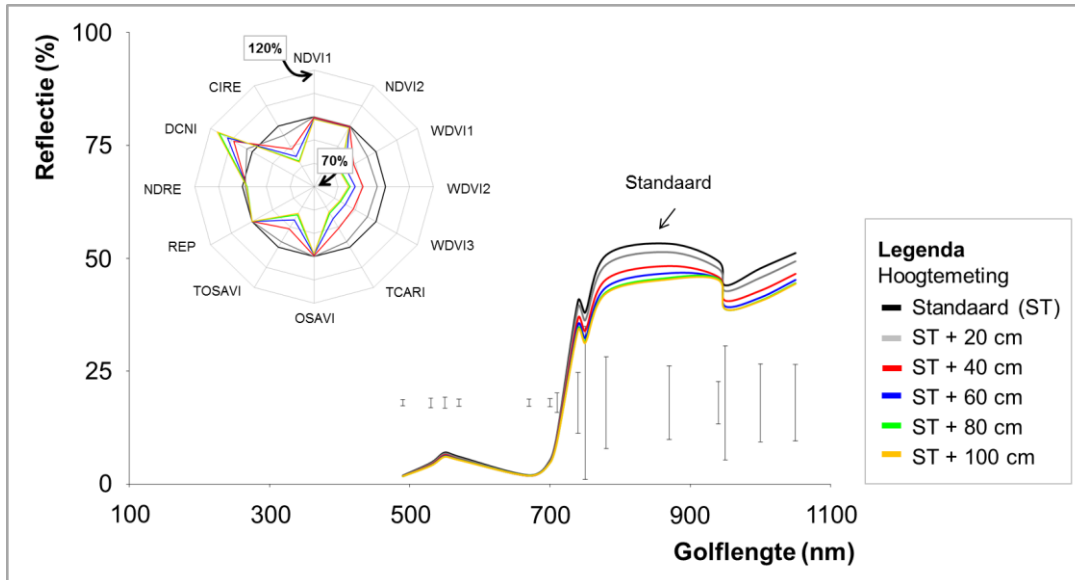
10.3 Effect van meethoogte

Om het effect van meethoogte te kwantificeren is voor welk gewas een serie metingen uitgevoerd gedurende de dag. Hierbij is de meethoogte verhoogd met +20, +40, +60, +80 en +100 cm. Per meethoogte zijn vervolgens 6 metingen uitgevoerd. In de hiernavolgende paragrafen wordt het effect van meethoogte op het gemeten spectrum en de daarvan afgeleide gewasindexen zichtbaar gemaakt. Omdat het effect van hoogte vergelijkbaar is in elke hoogtemeting, zijn de resultaten van de verschillende hoogtemetingen gemiddeld.

10.3.1 Wortel

Voor het gewas wortel is op vijf tijdstippen gedurende de dag een hoogtetest uitgevoerd. De resultaten

hiervan worden gevisualiseerd in figuur 10.6. In deze figuur wordt duidelijk zichtbaar dat de reflectie afneemt bij een grotere afstand tot het gewas, en dan vooral voor de reflectie in NIR. Tegelijkertijd is er in dit golflengtegebied ook een grotere variatie in de metingen zelf, zoals zichtbaar in de weergegeven foutenbalken. De verschillen zijn daardoor niet statistisch significant.



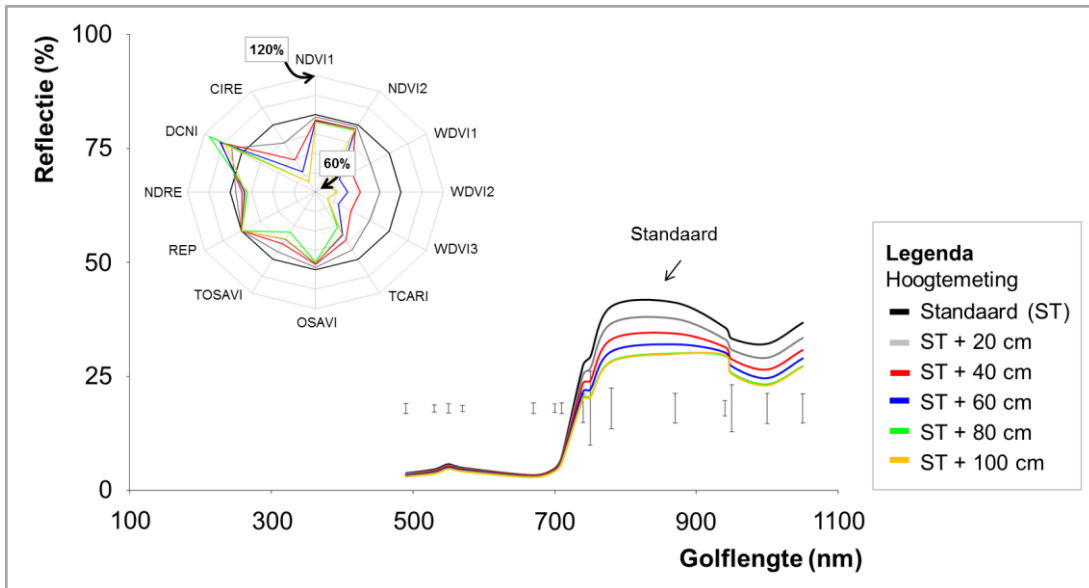
Figuur 10.6. Effect van meethoogte op het spectrum en de daarvan afgeleide gewasindexen (inzet).

In de inzet van figuur 10.6. wordt aangegeven of en hoe groot het effect van meethoogte is op de verschillende gewasindexen. Hierbij wordt aangegeven hoe de index verandert ten opzichte van de standaard meting. Duidelijk zichtbaar is dat een toename in gewashoogte voor vrijwel alle indexen leidt tot een verlaging van de gewasindex met 10 tot 20%. Uitzondering is de DCNI-index.

Hierbij wordt wel opgemerkt dat het effect van hoogte voor de WDWI-indexen mogelijk vertekend is door het feit dat de correctie voor de kale grond gebeurt via de standaard meting. Er zijn namelijk geen hoogtemetingen uitgevoerd voor de kale grond. Aannemend dat de reflectie in het visuele spectrum weinig verandert bij de kale grond en dat de reflectie in NIR een vergelijkbare afname laat zien als de gewasreflectie, betekent dit dat de berekende WDWI-indexen hoger zijn wanneer ook voor elke hoogte een andere bodemreflectie meegenomen zou zijn.

10.3.2 Prei

Voor het gewas prei is op vijf tijdstippen gedurende de dag een hoogtetest uitgevoerd. De resultaten hiervan worden gevisualiseerd in figuur 10.7. In deze figuur wordt duidelijk zichtbaar dat de reflectie afneemt bij een grotere afstand tot het gewas, en dan vooral voor de reflectie in NIR. Tegelijkertijd is er in dit golflengtegebied ook een grotere variatie in de metingen zelf, zoals zichtbaar in de weergegeven foutenbalken. De verschillen zijn daardoor niet statistisch significant.

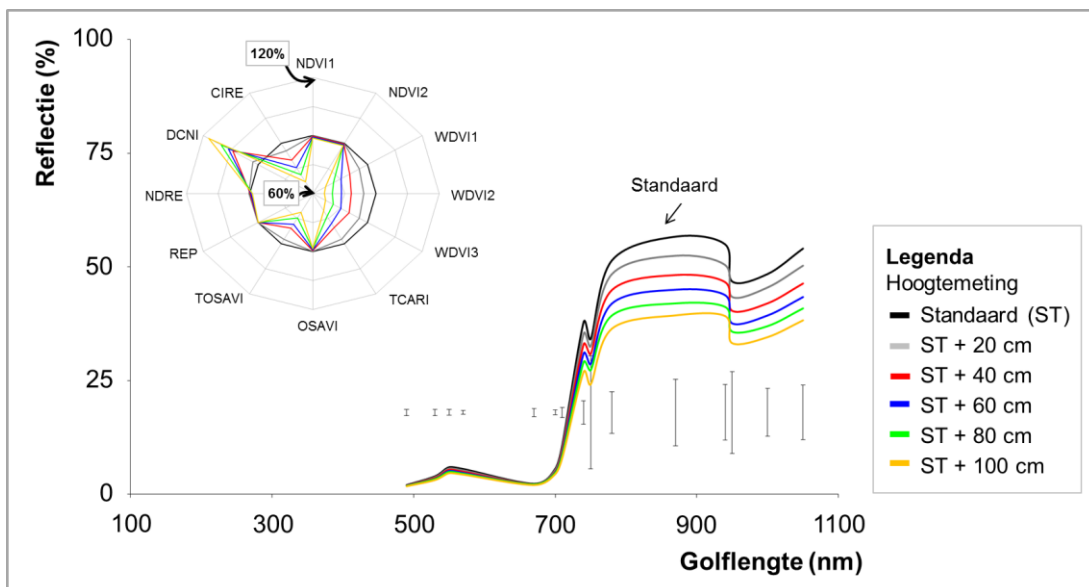


Figuur 10.7. Effect van meethoogte op het spectrum en de daarvan afgeleide gewasindexen (inzet).

In de inzet van figuur 10.7. wordt aangegeven of en hoe groot het effect van meethoogte is op de verschillende gewasindexen. Hierbij wordt aangegeven hoe de index verandert ten opzichte van de standaard meting. Duidelijk zichtbaar is dat een toename in gewashoogte leidt tot een verlaging van de gewasindex met 10 tot 20%. De grootste effecten treden op bij de WDV1-indexen en de indexen TCARI, DCNI en CIRE. Indexen die weinig gevoelig zijn voor hoogte: REP, NDRE, OSAVI en de beide NDVI's.

10.3.3 Lelie

Voor het gewas lelie is op vijf tijdstippen gedurende de dag een hoogtetest uitgevoerd. De resultaten hiervan worden gevisualiseerd in figuur 10.8. In deze figuur wordt duidelijk zichtbaar dat de reflectie afneemt bij een grotere afstand tot het gewas, en dan vooral voor de reflectie in NIR. Tegelijkertijd is er in dit golflengtegebied ook een grotere variatie in de metingen zelf, zoals zichtbaar in de weergegeven foutenbalken. De verschillen zijn daardoor niet statistisch significant.

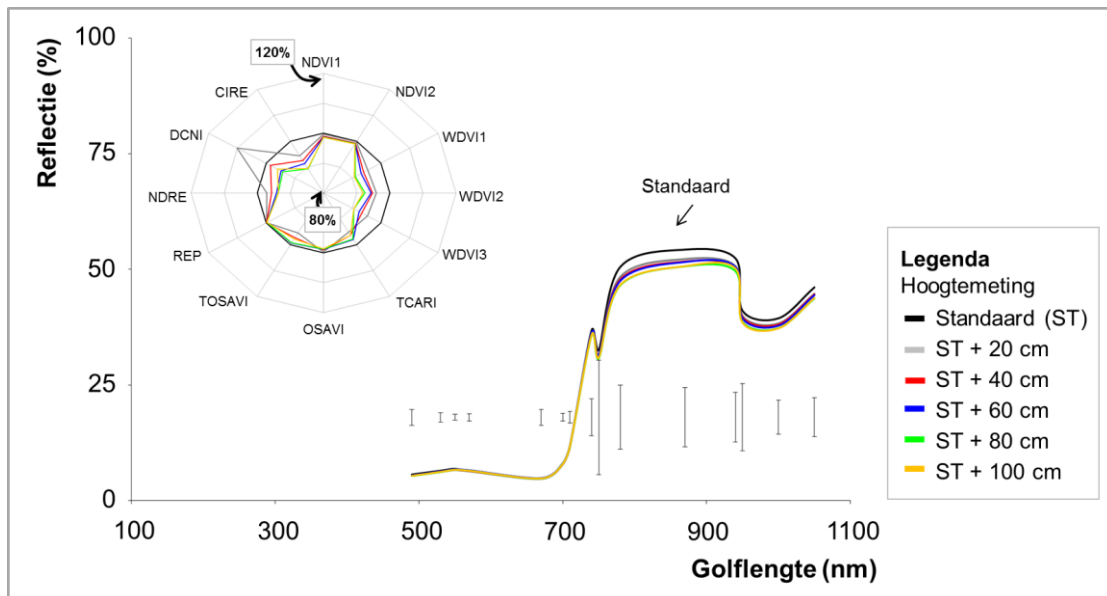


Figuur 10.8. Effect van meethoogte op het spectrum en de daarvan afgeleide gewasindexen (inzet).

In de inzet van figuur 10.8. wordt aangegeven of en hoe groot het effect van meethoogte is op de verschillende gewasindexen. Hierbij wordt aangegeven hoe de index verandert ten opzichte van de standaard meting. Duidelijk zichtbaar is dat een toename in gewashoogte leidt tot een verlaging van de gewasindex met 10 tot 40%. De grootste effecten treden op bij de WdVI-indexen en de indexen TCARI, DCNI en CIRE. De effecten voor de WdVI-index zijn hierbij overschat (zie vorige sectie) wat aangeeft dat bij een veranderende hoogte ook de reflectie van de kale bodem gemeten moet worden. Indexen die weinig gevoelig zijn voor hoogte zijn: REP, NDRE, OSAVI en de beide NDVI-indexen.

10.3.4 Rode kool

Voor het gewas rode kool is op vijf tijdstippen gedurende de dag een hoogtetest uitgevoerd. De resultaten hiervan worden gevisualiseerd in figuur 10.9. In deze figuur wordt duidelijk zichtbaar dat de reflectie licht afneemt bij een grotere afstand tot het gewas, en dan vooral voor de reflectie in NIR. Tegelijkertijd is er in dit golflengtegebied ook een grotere variatie in de metingen zelf, zoals zichtbaar in de weergegeven foutenbalken. De verschillen zijn daardoor niet statistisch significant.

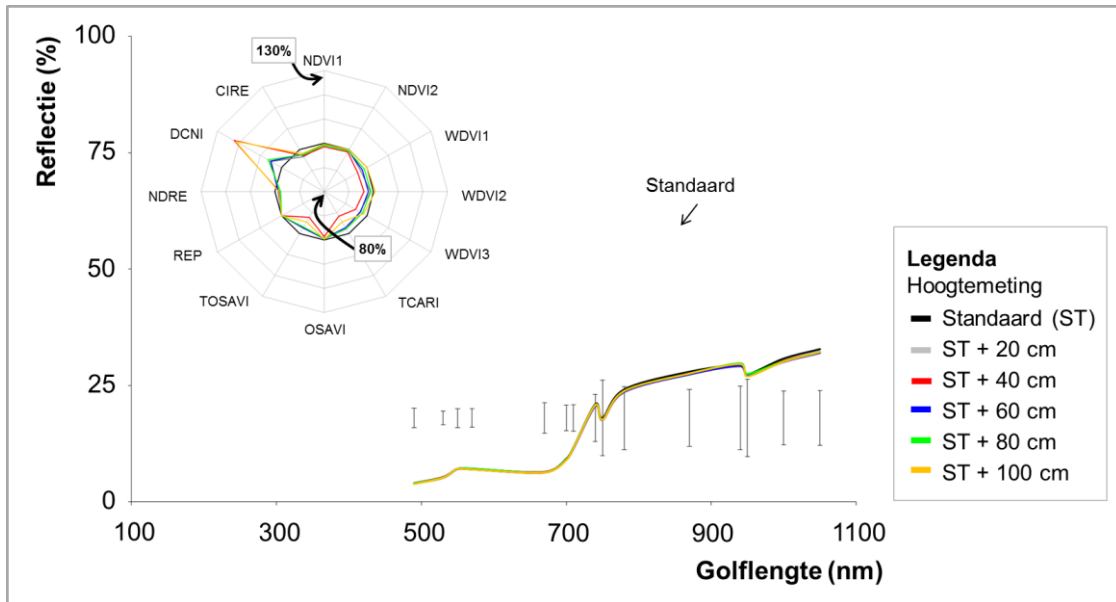


Figuur 10.9. Effect van meethoogte op het spectrum en de daarvan afgeleide gewasindexen (inzet).

In de inzet van figuur 10.9. wordt aangegeven of en hoe groot het effect van meethoogte is op de verschillende gewasindexen. Hierbij wordt aangegeven hoe de index verandert ten opzichte van de standaard meting. Duidelijk zichtbaar is dat een toename in hoogte de index verlaagd met maximaal 10%. Uitzondering hierbij is de DCNI-index. De grootste effecten treden op bij de WdVI's, TCARI, DCNI en CIRE. De indexen REP, NDRE, OSAVI en de beide NDVI's zijn ongevoelig voor hoogte.

10.3.5 Gras

Voor het gewas gras is op vijf tijdstippen gedurende de dag een hoogtetest uitgevoerd. De resultaten hiervan worden gevisualiseerd in figuur 10.10. In deze figuur wordt zichtbaar dat een verandering van meethoogte weinig tot geen invloed heeft op de gewasreflectie, zowel in VIS als NIR.



Figuur 10.10. Effect van meethoogte op het spectrum en de daarvan afgeleide gewasindexen (inzet).

In de inzet van figuur 10.10. wordt aangegeven of en hoe groot het effect van meethoogte is op de verschillende gewasindexen. Hierbij wordt aangegeven hoe de index verandert ten opzichte van de standaard meting. Het effect van meethoogte is voor vrijwel alle gewasindexen kleiner dan 5%. Enige uitzondering is de DCNI-index: deze kan toenemen met 20%.

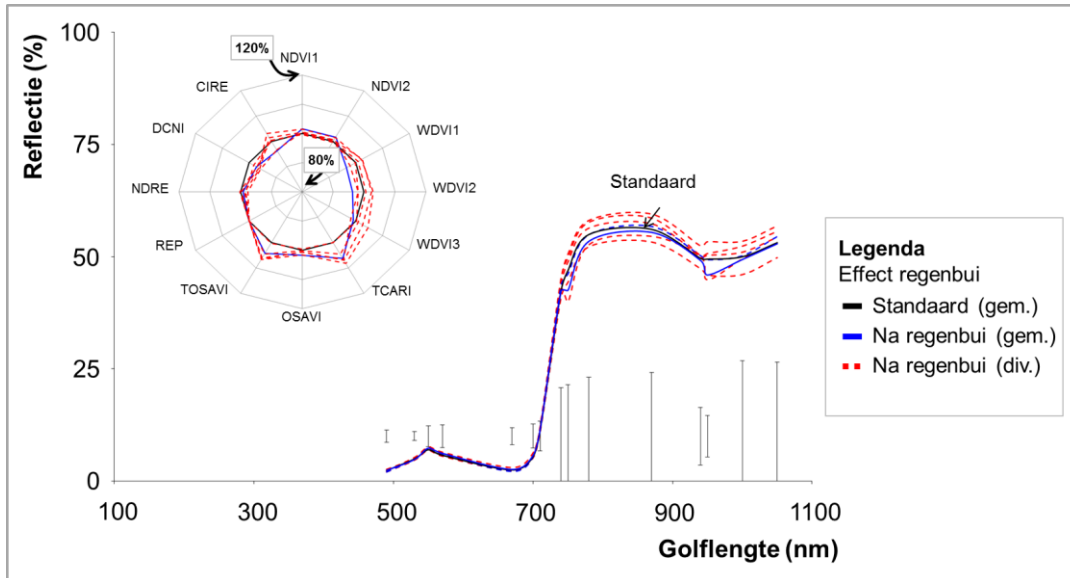
10.4 Effect van regen

Om het effect van natte weersomstandigheden te kwantificeren is voor welk gewas een serie metingen uitgevoerd gedurende de dag. Hierbij is in de ochtend een regenbui gesimuleerd door water te besproeien. Na deze besproeiing wordt de gewasreflectie over de tijd gemonitord. Als het gewas zichtbaar opgedroogd is, is een nieuwe regenbui simulatie uitgevoerd. Voor de visuele weergave is gekozen om niet elke individuele meting weer te geven. Daarentegen is er voor gekozen om de gemiddelde gewasreflectie in een 'natte' en een 'standaard' veld weer te geven, waarbij de 'standaard' situatie geen besproeiing heeft gehad. Meetgegevens waarbij de hoeveelheid invallende straling lager is dan 100 W m^{-2} worden niet meegenomen in de visualisatie (rond zonsopkomst en -ondergang).

10.4.1 Wortel

Voor het gewas wortel is er om half elf een regenbui gesimuleerd, waarna er tot 14 uur 7 metingen zijn uitgevoerd. Hierna is een nieuwe regenbui gesimuleerd, waarna er vervolgens tot 19 uur nogmaals 7 metingen zijn uitgevoerd. Ook de standaard meting (zonder simulatie neerslag) werd enigszins vochtig omdat er in de namiddag 5 lichte regenbuien plaatsvonden (met een hoeveelheid neerslag $< 0,1 \text{ mm}$).

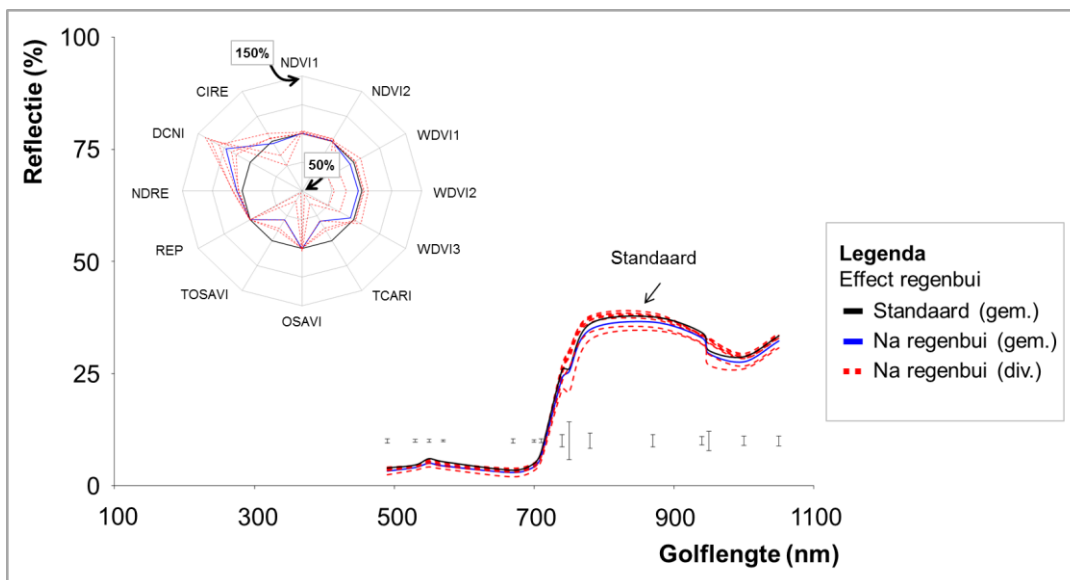
De resultaten van de gemeten gewasspectra worden gevisualiseerd in figuur 10.11. In deze figuur wordt duidelijk zichtbaar dat de reflectie van een vochtig gewas relatief vergelijkbaar is met die van een droog gewas. De invloed van tijd (rode stippellijnen) laten een grotere variatie zijn dan het verschil tussen het daggemiddelde van een vochtig en niet bevochtigd gewas. Wanneer alleen de metingen in de ochtend worden geanalyseerd (de standaard is niet nat door regen) dan is er eveneens geen eenduidig effect. Gezien de natuurlijke variatie over de dag is het effect van regen dan ook klein.



Figuur 10.11. Effect van regen op het spectrum en de daarvan afgeleide gewasindexen (inzet).

10.4.2 Prei

Voor het gewas prei is er om half elf een regenbui gesimuleerd, waarna er tot 14 uur zes metingen zijn uitgevoerd. Hierna is een nieuwe regenbui gesimuleerd, waarna er vervolgens tot 19 uur nog 7 metingen zijn uitgevoerd. Ook de standaard meting (zonder simulatie neerslag) werd vochtig omdat er gedurende de dag 11 regenbuien zijn gevallen. Wel wordt opgemerkt dat er in Nuenen (persoonlijke schatting) minder regen is gevallen dan weergegeven in de KNMI gegevens voor het weerstation Eindhoven.



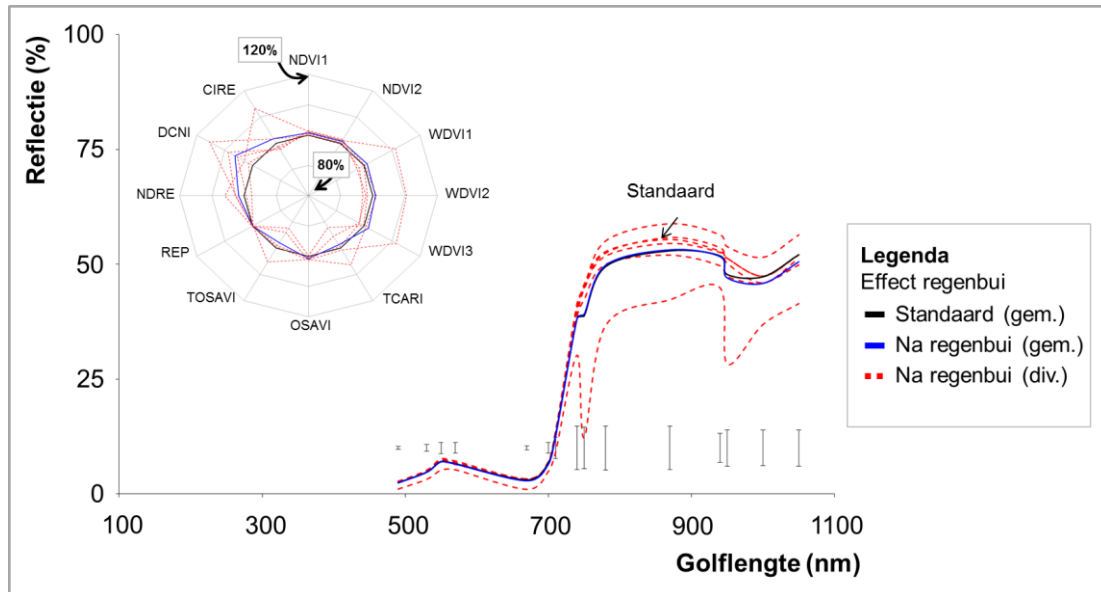
Figuur 10.12. Effect van regen op het spectrum en de daarvan afgeleide gewasindexen (inzet).

De resultaten van de gemeten gewasspectra worden gevisualiseerd in figuur 10.12. In deze figuur wordt duidelijk zichtbaar dat de reflectie van een vochtig gewas relatief vergelijkbaar is met die van een droog gewas. Hoewel niet significant, ligt de reflectie in NIR met 2 tot 4% lager na simulatie van een regenbui. De invloed van tijd (rode stippellijnen) laten een grotere variatie zijn dan het verschil tussen het daggemiddelde van een vochtig en niet bevochtigd gewas. Gezien de natuurlijke variatie over de dag is

het effect van regen dan ook klein. Wel kan dit kleine verschil resulteren in een grote afwijking in gewasindexen (zie inzet). De indexen NDVI, WdVI, OSAVI, REP, NDRE en CIRE worden nauwelijks beïnvloed: het effect van regen is maximaal 5%. De grootste verschillen zijn waarneembaar voor de indexen DCNI (+23%) en TCARI en TOSAVI (-20%).

10.4.3 Lelie

Voor het gewas lelie is er om half één een regenbui gesimuleerd, waarna er tot 18 uur acht metingen zijn uitgevoerd. Het gewas was bij de start van de dag licht vochtig, maar droogde snel op. Gedurende de dag is er geen regen gevallen.



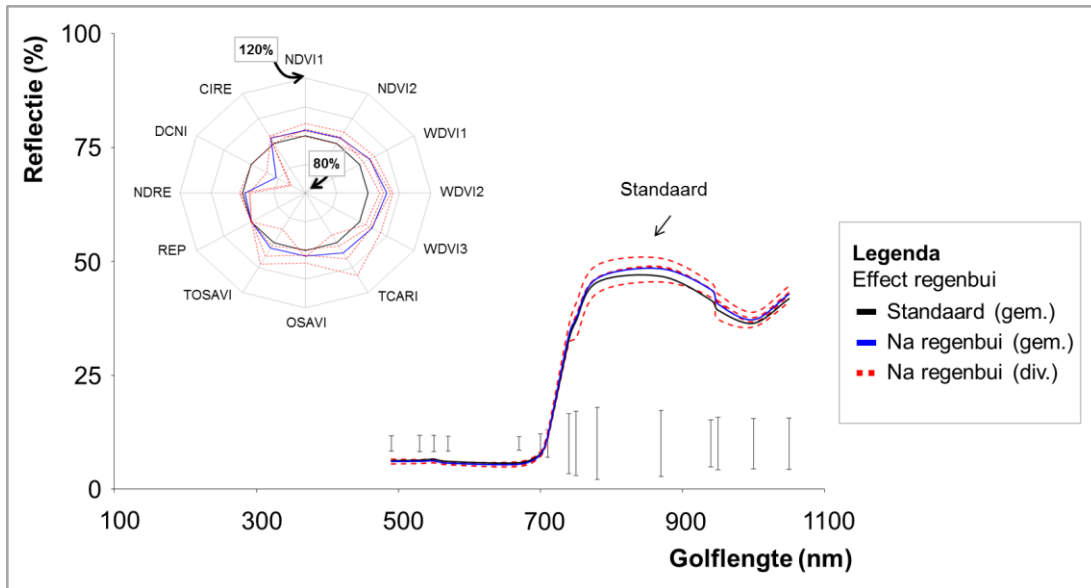
Figuur 10.13. Effect van regen op het spectrum en de daarvan afgeleide gewasindexen (inzet).

De resultaten van de gemeten gewasspectra worden gevisualiseerd in figuur 10.13. In deze figuur wordt duidelijk zichtbaar dat de reflectie van een vochtig gewas relatief vergelijkbaar is met die van een droog gewas. Het verschil tussen de gemiddelde reflectie tussen het droge en besproeide gewas is maximaal 5% (relatief verschil) en kleiner dan 1,5% (absoluut verschil).

De invloed van tijd (rode stippellijnen) laten een grotere variatie zijn dan het verschil tussen het daggemiddelde van een vochtig en niet bevochtigd gewas. Gezien de natuurlijke variatie over de dag is het effect van regen dan ook klein. In dit geval is het effect van neerslag op de meeste gewasindexen minimaal: het effect van regen is maximaal 2% (relatieve verandering). Het grootste verschil is waarneembaar voor de index DCNI (+6%).

10.4.4 Rode kool

Voor het gewas rode kool is er om half één een regenbui gesimuleerd, waarna er tot 18 uur acht metingen zijn uitgevoerd. Het gewas was bij de start van de dag licht vochtig door dauw, maar droogde snel op. Gedurende de dag is er geen regen gevallen, hoewel het KNMI-station Delen aangeeft dat er vier kleine buien waren gevallen (< 0,1 mm). In Elst bleef het echter droog.



Figuur 10.14. Effect van regen op het spectrum en de daarvan afgeleide gewasindexen (inzet).

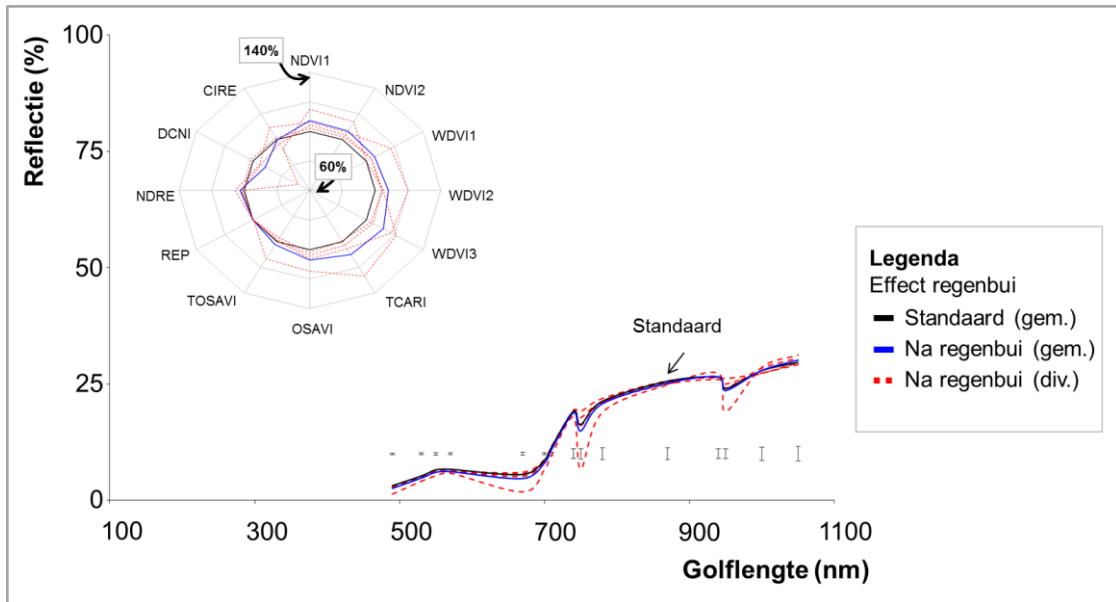
De resultaten van de gemeten gewasspectra worden gevisualiseerd in figuur 10.14. In deze figuur wordt duidelijk zichtbaar dat de reflectie van een vochtig gewas relatief vergelijkbaar is met die van een droog gewas. Het verschil tussen de gemiddelde reflectie tussen het droge en besproeide gewas is maximaal 6% (relatief verschil) en kleiner dan 2,3% (absoluut verschil).

De invloed van tijd (rode stippellijnen) laten een grotere variatie zijn dan het verschil tussen het daggemiddelde van een vochtig en niet bevochtigd gewas, zeker gezien het feit dat de metingen die hier zijn gevisualiseerd allemaal zijn uitgevoerd tussen 12 en 16 uur (metingen met invallende straling $< 100 \text{ W m}^{-2}$ zijn niet zichtbaar gemaakt). Gezien de natuurlijke variatie over de dag is het effect van regen dan ook klein. In dit geval is het effect van neerslag op de meeste gewasindexen minimaal: het effect van regen is in al deze gevallen kleiner dan 2% (relatieve verandering). Uitzondering is de index DCNI: deze wordt 10% lager door bevochtiging van het gewas.

10.4.5 Gras

Voor het gewas gras is er om half twee een regenbui gesimuleerd, waarna er tot 19 uur negen metingen zijn uitgevoerd. Het gewas was bij de start van de dag licht vochtig door dauw, maar droogde snel op. Gedurende de dag is er geen regen gevallen, hoewel het KNMI-station Delen aangeeft dat er twee kleine buien waren gevallen ($< 0,1 \text{ mm}$). In Wageningen bleef het echter droog.

De resultaten van de gemeten gewasspectra worden gevisualiseerd in figuur 10.15. In deze figuur wordt duidelijk zichtbaar dat de reflectie van een vochtig gewas relatief vergelijkbaar is met die van een droog gewas. Het verschil tussen de gemiddelde reflectie tussen het droge en besproeide gewas is maximaal 20% (relatief verschil) en kleiner dan 1,4% (absoluut verschil).



Figuur 10.15. Effect van regen op het spectrum en de daarvan afgeleide gewasindexen (inzet).

De invloed van tijd (rode stippellijnen) laten een grotere variatie zijn dan het verschil tussen het daggemiddelde van een vochtig en niet bevochtigd gewas, zeker gezien het feit dat de metingen die hier zijn gevisualiseerd allemaal zijn uitgevoerd tussen 12 en 17 uur (metingen met invallende straling $< 100 \text{ W m}^{-2}$ zijn niet zichtbaar gemaakt). Gezien de natuurlijke variatie over de dag is het effect van regen dan ook klein. In dit geval heeft neerslag een klein positief effect op de meeste gewasindexen (hoewel niet significant). De meeste gewasindexen nemen met 2 tot 11% toe. Uitzondering hierbij zijn de DCNI en CIRE omdat zij beide lager worden als de vochtigheid toeneemt. De index REP is vrijwel ongevoelig voor neerslag gerelateerde effecten.

10.5 Effect van schaduw

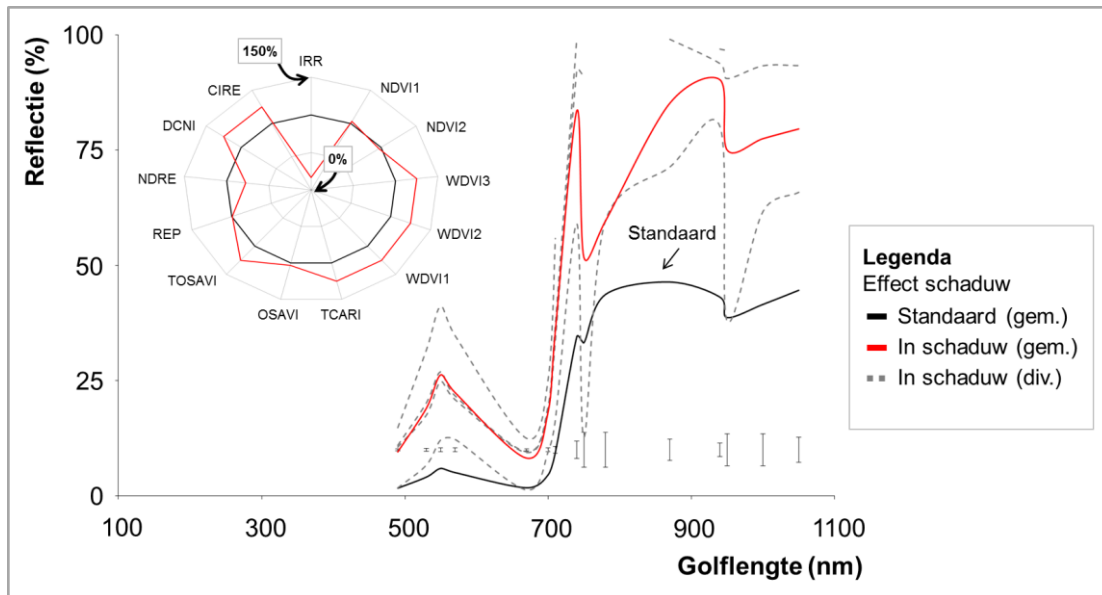
Om het effect van schaduw te kwantificeren is voor welk gewas een serie metingen uitgevoerd gedurende de dag. Hierbij zijn metingen uitgevoerd onder een parasol om zodoende de hoeveelheid invallend licht te reduceren. Ter controle zijn op dezelfde locatie ook metingen uitgevoerd zonder schaduw. In de visualisatie van de resultaten wordt ook hier gefocust op het gemiddelde verschil tussen de behandelingen met en zonder schaduw. Omdat in de behandeling met schaduw de hoeveelheid licht sterk kan verminderen is het in een heel aantal situaties onmogelijk om een juiste meting uit te voeren.

10.5.1 Wortel

Voor het gewas wortel zijn er vier metingen uitgevoerd met en zonder schaduw. De hoeveelheid invallend licht varieerde van 120 tot 470 Watt m^{-2} in de behandeling zonder schaduw en van 33 tot 67 Watt m^{-2} in de behandeling met schaduw. De resultaten van de gemeten gewasspectra worden gevisualiseerd in figuur 10.16. Uit deze figuur wordt direct duidelijk dat bij sterke afname van invallend licht de meting onnauwkeurig wordt. Maar 18 van de 72 uitgevoerde scans leverde een 'goed' resultaat. De aanwezigheid van schaduw had een effect op het gehele spectrum, dus zowel de NIR als de VIS regio.

In de inzet van figuur 10.16. wordt aangegeven wat het effect hiervan is op de afgeleide gewasindexen. Deze inzet geeft aan hoe de waarde van een bepaalde gewasindex veranderd ten opzichte van de

standaard situatie met vol zonlicht. Opgemerkt wordt dat het verschil hier gemaximaliseerd is op 135% om zodoende een overzichtelijk resultaat te presenteren.

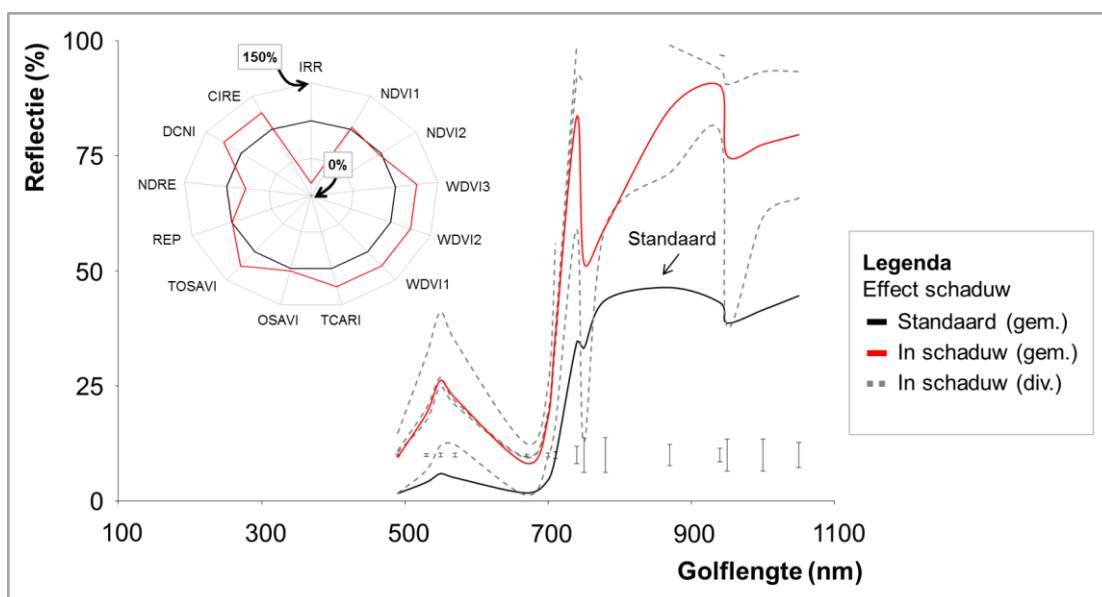


Figuur 10.16. Effect van schaduw op het spectrum en de daarvan afgeleide gewasindexen (inzet).

Zoals verwacht worden alle indexen sterk beïnvloed. De REP-index en beide NDVI's zijn relatief stabiel en de aanwezigheid van schaduw verandert hun waarde vrijwel niet: het effect is kleiner dan 5%. De grootste verandering treedt op bij de indexen TCARI, TOSATI en DCNI waarbij het effect van schaduw varieert van +84 tot >200%.

10.5.2 Prei

Voor het gewas prei zijn er vier metingen uitgevoerd met en zonder schaduw. De hoeveelheid invallend licht varieerde van 94 tot 350 Watt m⁻² in de behandeling zonder schaduw en van 12 tot 74 Watt m⁻² in de behandeling met schaduw. De gemeten gewasspectra worden gevisualiseerd in figuur 10.17.



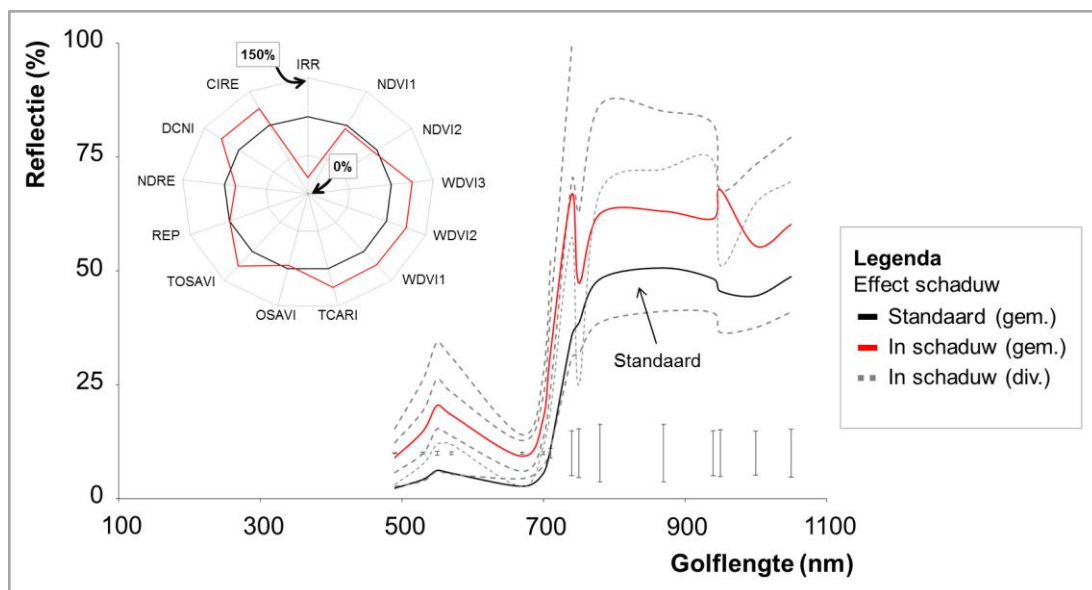
Figuur 10.17. Effect van schaduw op het spectrum en de daarvan afgeleide gewasindexen (inzet).

Uit deze figuur wordt direct duidelijk dat een afname van de hoeveelheid invallend licht resulteert in een hogere reflectie in zowel NIR als VIS. Ook wordt de meting onnauwkeurig omdat een gedeelte van de gegevens onjuiste resultaten opleveren. Maar 18 van de 36 uitgevoerde scans leverde in deze situatie namelijk een 'goed' resultaat.

In de inzet van figuur 10.17. wordt aangegeven wat het effect hiervan is op de afgeleide gewasindexen. Deze inzet geeft aan hoe de waarde van een bepaalde gewasindex veranderd ten opzichte van de standaard situatie met vol zonlicht. Opgemerkt wordt dat het verschil hier gemaximaliseerd is op 135% om zodoende een overzichtelijk resultaat te presenteren. Zoals verwacht worden alle indexen sterk beïnvloed. De REP-index, de OSAVI-index en beide NDVI's zijn relatief stabiel en de aanwezigheid van schaduw verandert hun waarde vrijwel niet: het effect is kleiner dan 7,5% (relatief verschil t.o.v. de standaard meting). Grote veranderingen treden op bij de indexen WDWI, TCARI, TOSAVI, NDRE, DCNI en CIRE waarbij het effect van schaduw varieert van -18 tot >200%.

10.5.3 Lelie

Voor het gewas lelie zijn er vijf metingen uitgevoerd met en zonder schaduw. De hoeveelheid invallend licht varieerde van 130 tot 490 Watt m⁻² in de behandeling zonder schaduw en van 40 tot 84 Watt m⁻² in de behandeling met schaduw. De gemeten gewasspectra worden gevisualiseerd in figuur 10.18.



Figuur 10.18. Effect van schaduw op het spectrum en de daarvan afgeleide gewasindexen (inzet).

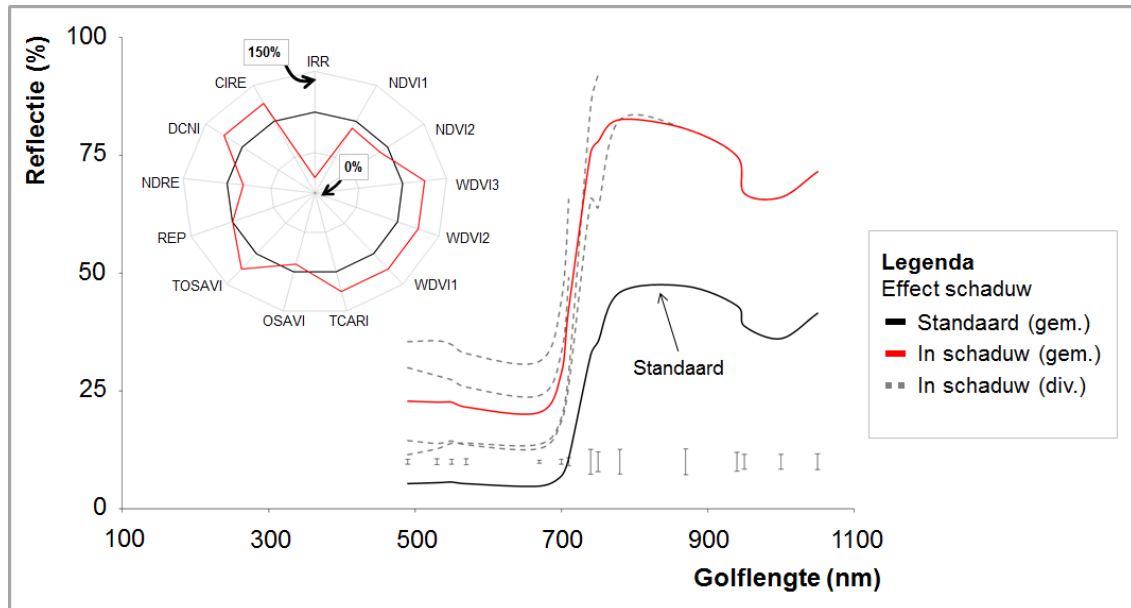
Uit deze figuur wordt direct duidelijk dat een afname van de hoeveelheid invallend licht resulteert in een hogere reflectie in zowel NIR als VIS. Ook wordt de meting onnauwkeurig omdat een gedeelte van de gegevens onjuiste resultaten opleveren. Maar 27 van de 45 uitgevoerde scans leverde in deze situatie namelijk een 'goed' resultaat.

In de inzet van figuur 10.18 wordt aangegeven wat het effect hiervan is op de afgeleide gewasindexen. Deze inzet geeft aan hoe de waarde van een bepaalde gewasindex veranderd ten opzichte van de standaard situatie met vol zonlicht. Opgemerkt wordt dat het verschil hier gemaximaliseerd is op 135% om zodoende een overzichtelijk resultaat te presenteren. Zoals verwacht worden alle indexen sterk

beïnvloed. De REP-index, de OSAVI-index en beide NDVI's zijn relatief stabiel en de aanwezigheid van schaduw verandert hun waarde vrijwel niet: het effect is kleiner dan 5% (relatief verschil t.o.v. de standaard meting). Grote veranderingen treden op bij de indexen WdVI, TCARI, TOSAVI, NDRE, DCNI en CIRE waarbij het effect van schaduw varieert van -13 voor NDRE tot >180% voor TCARI.

10.5.4 Rode kool

Voor het gewas rode kool zijn er vier metingen uitgevoerd met en zonder schaduw. De hoeveelheid invallend licht varieerde van 168 tot 470 Watt m⁻² in de behandeling zonder schaduw en van 48 tot 71 Watt m⁻² in de behandeling met schaduw. De gewasspectra worden gevisualiseerd in figuur 10.19.



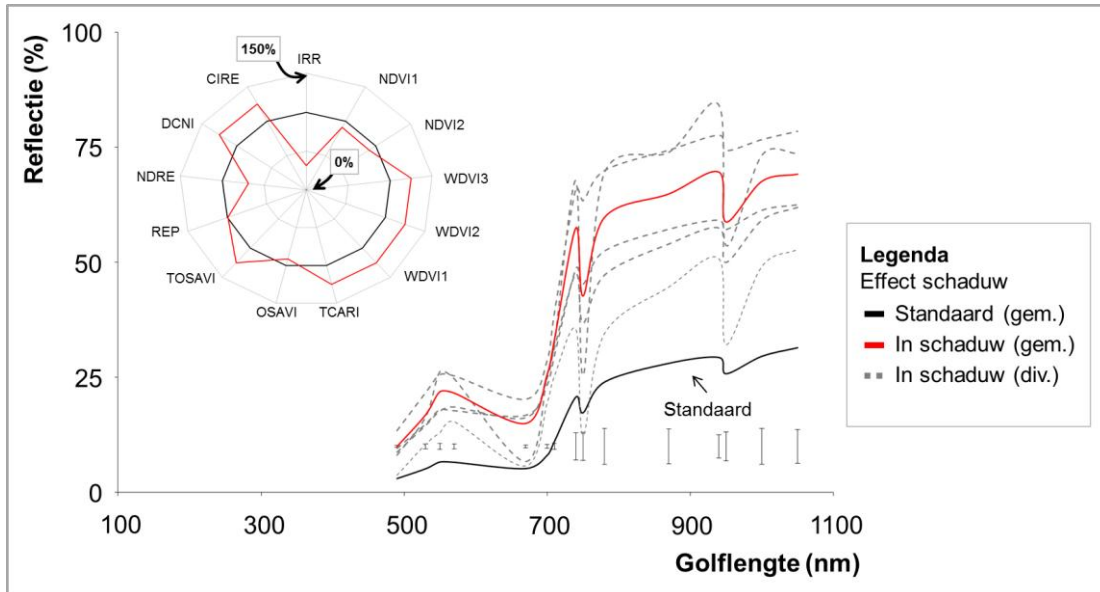
Figuur 10.19. Effect van schaduw op het spectrum en de daarvan afgeleide gewasindexen (inzet).

Uit deze figuur wordt direct duidelijk dat een afname van de hoeveelheid invallend licht resulteert in een hogere reflectie in zowel NIR als VIS. Ook wordt de meting onnauwkeurig omdat een gedeelte van de gegevens onjuiste resultaten opleveren. Maar 9 van de 36 uitgevoerde scans leverde in deze situatie namelijk een 'goed' resultaat.

In de inzet van figuur 10.19. wordt aangegeven wat het effect hiervan is op de afgeleide gewasindexen. Deze inzet geeft aan hoe de waarde van een bepaalde gewasindex veranderd ten opzichte van de standaard situatie met vol zonlicht. Opgemerkt wordt dat het verschil hier gemaximaliseerd is op 135% om zodoende een overzichtelijk resultaat te presenteren. Zoals verwacht worden alle indexen sterk beïnvloed. De REP-index, de OSAVI-index en beide NDVI's zijn relatief stabiel en de aanwezigheid van schaduw verandert hun waarde vrijwel niet: het effect is kleiner dan 10% (relatief verschil t.o.v. de standaard meting). Grote veranderingen treden op bij de overige waarbij het effect van schaduw varieert van -18 voor NDRE tot >200% voor TCARI.

10.5.5 Gras

Voor het gewas gras zijn er vier metingen uitgevoerd met en zonder schaduw. De hoeveelheid invallend licht varieerde van 96 tot 490 Watt m⁻² in de behandeling zonder schaduw en van 15 tot 135 Watt m⁻² in de behandeling met schaduw. De gemeten gewasspectra worden gevisualiseerd in figuur 10.20.



Figuur 10.20. Effect van schaduw op het spectrum en de daarvan afgeleide gewasindexen (inzet).

Uit deze figuur wordt direct duidelijk dat een afname van de hoeveelheid invallend licht resulteert in een hogere reflectie in zowel NIR als VIS. Er is daarbij een grote variatie tussen de verschillende metingen (grijze stippellijnen).

In de inzet van figuur 10.20. wordt aangegeven wat het effect hiervan is op de afgeleide gewasindexen. Deze inzet geeft aan hoe de waarde van een bepaalde gewasindex veranderd ten opzichte van de standaard situatie met vol zonlicht. Opgemerkt wordt dat het verschil hier gemaximaliseerd is op 135% om zodoende een overzichtelijk resultaat te presenteren. Zoals verwacht worden alle indexen sterk beïnvloed. De REP-index, de OSAVI-index en beide NDVI's zijn relatief stabiel en de aanwezigheid van schaduw verandert hun waarde vrijwel niet: het effect is kleiner dan 10% (relatief verschil t.o.v. de standaard meting). Grote veranderingen treden op bij de overige waarbij het effect van schaduw varieert van -30 voor NDRE tot >200% voor TCARI.

10.6 Samenvatting

In deze paragraaf worden de resultaten van de aanvullende experimenten worden samengevat. Hierbij wordt geen rekening gehouden met de statistische onzekerheid op de berekende data. Hiervoor wordt verwezen naar de statistische analyse van deze gegevens in het hoofdrapport.

Uit het samenvattende overzicht in tabel 10.1. blijkt dat het meettijdstip en de aanwezigheid van schaduw het grootste effect hebben op het gereflecteerde spectrum. Beide factoren zijn dan ook aan elkaar gerelateerd, omdat het effect van tijd samenhangt met de hoeveelheid invallende straling. Dit betekent concreet: hoe minder invallende straling, hoe sterker het gereflecteerde lichtspectrum verandert. Wat hierbij opvalt, is dat het effect van tijd en schaduw groter is in het NIR dan in het VIS.

Het effect van hoogte is kleiner dan 2% voor het visuele spectrum en varieert tussen <1 en +16% voor het NIR spectrum. Een vergelijkbaar maar minder krachtig effect heeft regenval: het spectrum kan veranderen met <1 tot maximaal 2,5%. Kleine veranderingen kunnen echter grote gevolgen hebben voor de berekende gewasindexen. Van de geteste indexen blijkt de REP-index het meest robuust te zijn: de

invloed van tijd, hoogte, neerslag en schaduw is overwegend kleiner dan 1%. Dat betekent concreet dat veranderingen in deze omstandigheden vrijwel geen effect hebben op de gewasindex. Een goede tweede is de NDRE-index. De overige gewasindexen reageren wisselend op veranderingen in externe omstandigheden. Over het algemeen genomen zijn de indexen CIRE, TCARI, TOSAVI, DCNI gevoelig voor veranderingen: de berekende waarde kan variëren van 6 tot >100% (en dan is variatie binnen een meetreeks nog niet meegenomen).

Tabel 10.1. Samenvatting van gemeten effecten van tijd, hoogte, regen en schaduw

Gewas	Factor	Effect op	Effect op	Inschatting effect van de factor op de index			
		VIS	NIR	Range	Ongevoelig	< === >	Gevoelig
Wortel	Tijd	4-12%	23-55%	< 1 – 42	R << NE < TO < T < D < O < N < W < C		
	Hoogte	<1,6%	4-8%	< 1 – 18	R << N < O < NE < W < TO < D < T < C		
	Regen	<0,5%	<4,4%	< 1 – 6	R << NE < W < N=O < D < C < TO < T		
	Schaduw	6-26%	16-50%	< 1 – 275	R << N < O < NE < C < W < D < TO < T		
Prei	Tijd	3-7%	6-30%	< 1 – 80	R << NE < W < N < O < TO < C < T < D		
	Hoogte	<1,4%	7-12%	< 1 – 35	R << N < O < NE < TO < D < T < W < C		
	Regen	<1,0%	<1,8%	< 1 – 24	R << N < O < C < W < NE < T < TO < D		
	Schaduw	11-19%	47-57%	< 1 – 307	R << O < N < NE < W < C < D < T < TO		
Lelie	Tijd	2-4%	11-33%	< 1 – 100	R << NE < O < N < T < TO < D < W < C		
	Hoogte	<2,9%	10-16%	< 1 – 36	R << NE < N < O < TO < T < C < W < D		
	Regen	<0,4%	<1,6%	< 1 – 6	R < N < O < W < T < NE < C < TO < D		
	Schaduw	7-21%	8-31%	< 1 – 185	R << O < N < NE < W < C < D < TO < T		
Rode kool	Tijd	2-6%	11-35%	< 2 – 218	R << NE < N < O < W < C < D < TO < T		
	Hoogte	<0,3%	1-4%	< 1 – 23	R << N < O < TO < T < NE < W < D < C		
	Regen	<0,4%	<2,3%	< 1 – 9	R < NE < N < O < C < TO < W < T < D		
	Schaduw	15-32%	28-43%	< 1 – 273	R << N < O < NE < W < C < D < TO < T		
Gras	Tijd	3-6%	6-10%	< 1 – 1300	R << NE < O < N < T < C < W < D < TO		
	Hoogte	<0,3%	0,4-0,8%	< 1 – 22	R < N < O < NE < C < W < TO < T < D		
	Regen	<0,9%	<1,4%	< 1 – 12	R < C < TO < NE < W < N < O < D < T		
	Schaduw	7-22%	25-40	< 1 - 265	R << O < N < NE < W < D < C < T < TO		

* R staat voor REP; NE voor DNRE; N voor NDVI; W voor WdVI; O voor OSAVI; D voor DCNI; C voor CIRE; T voor TCARI; TO voor TOSAVI;

11 Bijlage 4. Aanvullende experimenten: resultaten GreenSeeker

11.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft de resultaten van de verschillende proeven die zijn uitgevoerd met de GreenSeeker. Het gaat hierbij achtereenvolgens om de effecten van meettijdstip, meethoogte, schaduw en regenval. In de hieronder beschreven paragrafen wordt op elk aspect ingegaan. De statistische verwerking wordt in een apart hoofdstuk besproken.

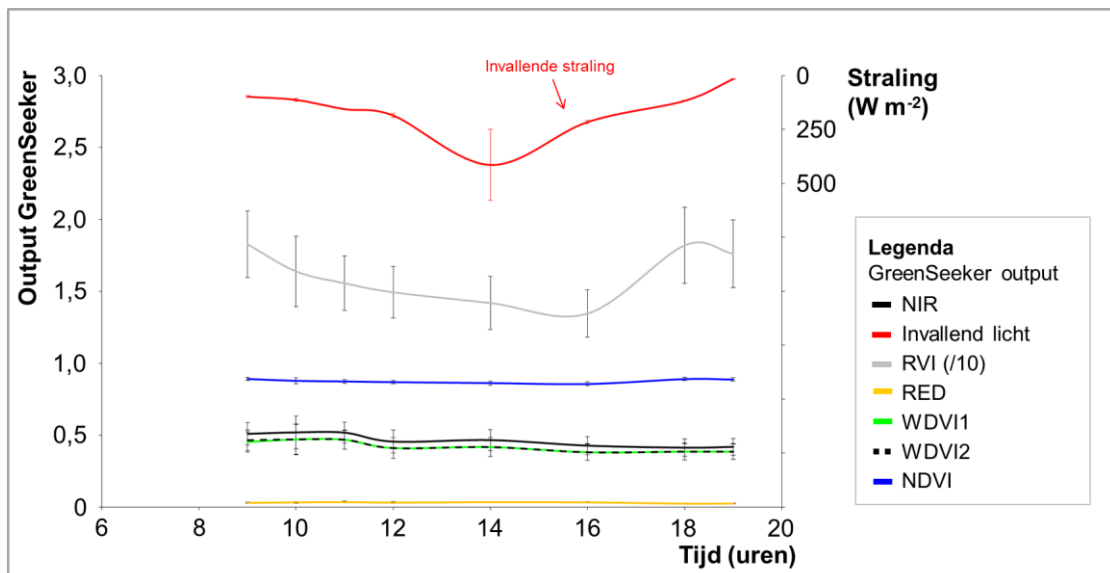
Per gewas zijn circa 26.000 scans uitgevoerd. In de hieronder gepresenteerde figuren worden de volgende resultaten zichtbaar gemaakt:

- het effect van tijd op het gemeten spectrum, en de daarvan afgeleide gewasindexen; en
- het effect van meethoogte, schaduw en een gesimuleerde regenbui.

11.2 Effect van meettijdstip, meethoogte, schaduw en regenval.

11.2.1 Wortel

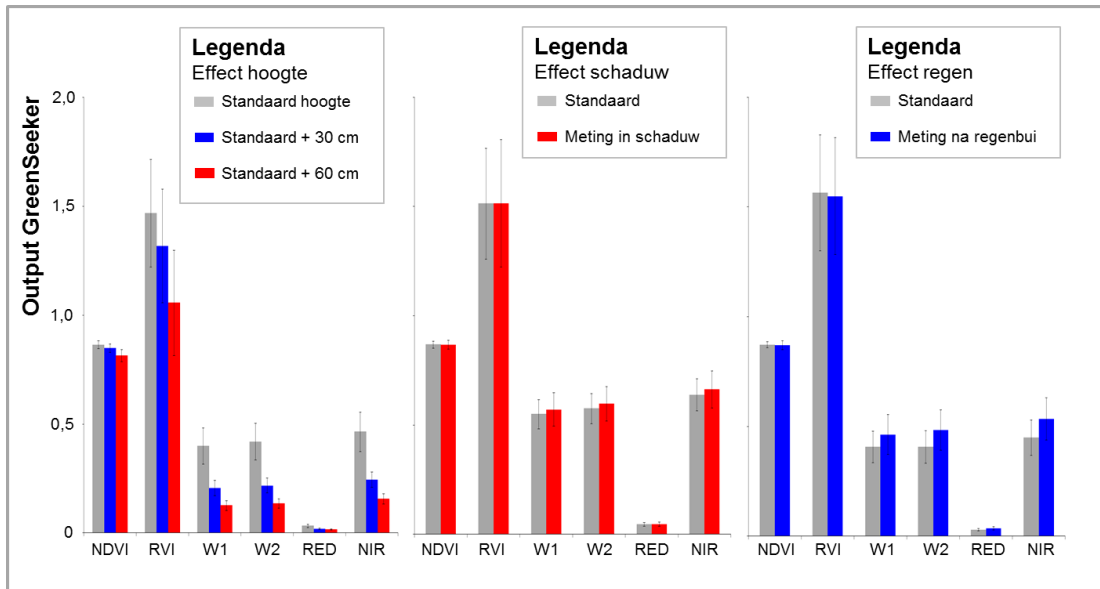
Om het effect van meettijdstip te kwantificeren zijn voor het gewas wortel negen metingen uitgevoerd verdeeld over de dag. De eerste meting startte rond 9 uur en de laatste meting eindigde om 19 uur. De hoeveelheid invallende straling varieerde over de dag van 17 tot 415 $W m^{-2}$. In tegenstelling tot de CropScan is er weinig tot geen verandering zichtbaar in de hoeveelheid reflectie in Rood en NIR. De verandering in de gewasreflectie is maximaal 0,01% voor Rood en maximaal 0,11% voor NIR. Voor de reflectie in het NIR neemt de hoeveelheid reflectie af van 0,52 naar 0,42%. Deze veranderingen zijn echter niet significant.



Figuur 11.1. Effect van tijd op de gewasreflectie en daarvan afgeleide indexen (GreenSeeker).

Variatie in meethoogte heeft relatief een grote invloed op de gemeten gewasreflectie en de daarvan afgeleide gewasindexen. Dit wordt geïllustreerd in de hieronder weergegeven figuur. Uit deze figuur blijkt dat de gewasreflectie afneemt met 52 tot 66%. Een vergroting van de meetafstand resulteert in een gemiddelde afname van 6% voor NDVI, van 28% voor RVI en van 68% voor beide WDV1-indexen.

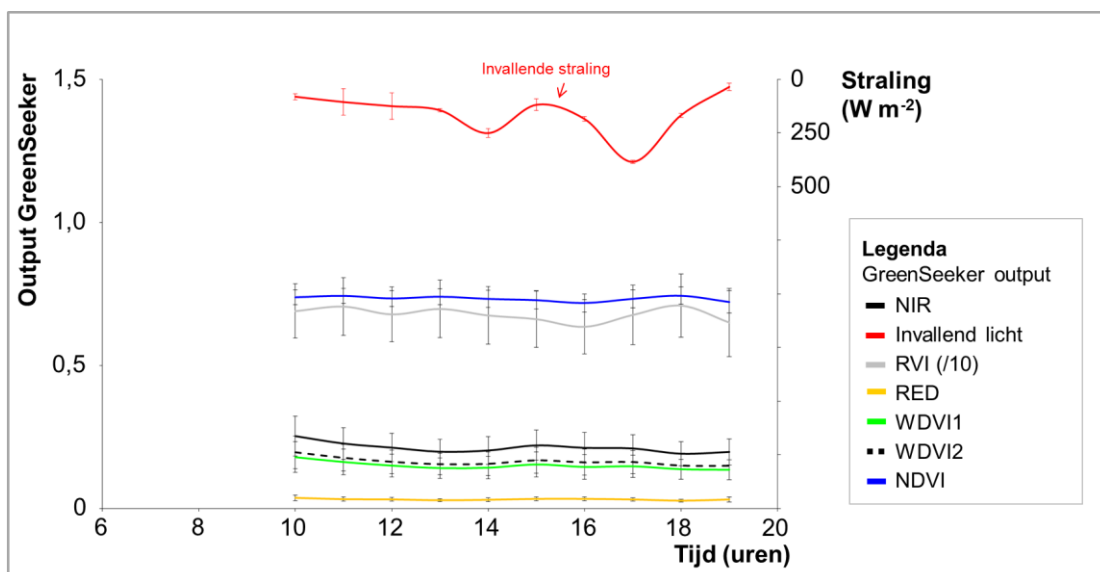
Of de meting met of zonder versturende schaduw of regen wordt uitgevoerd, heeft vrijwel geen effect op het gereflecteerde spectrum en de daarvan afgeleide gewasindexen. Er is een lichte trend naar hogere reflectie in NIR, maar deze verhoging valt binnen de standaard ruis.



Figuur 11.2. Effect van meethoogte, schaduw en regen op gewasreflectie en -indexen (GreenSeeker).

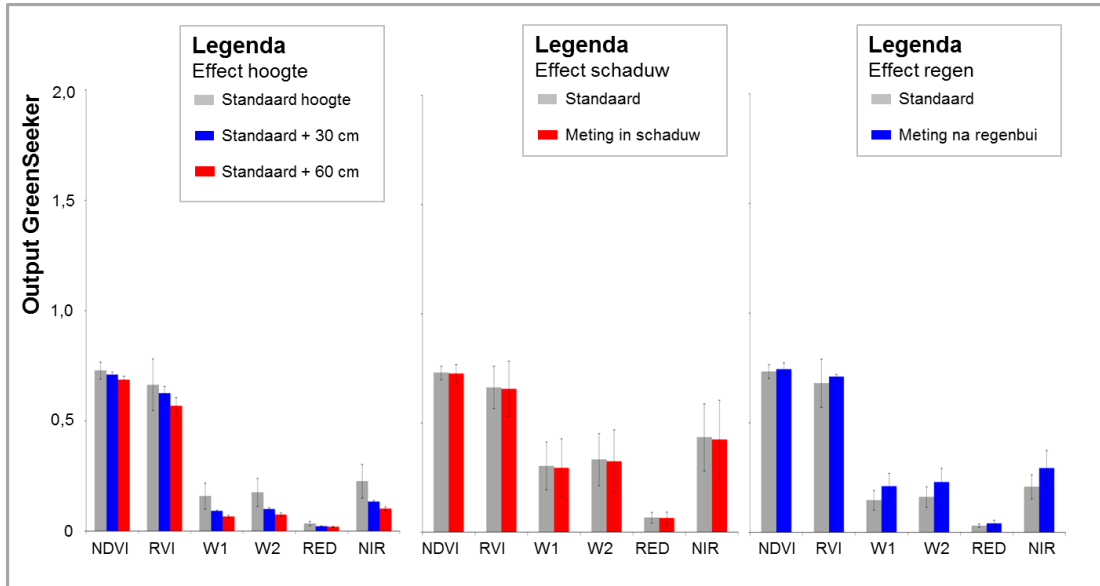
11.2.2 Prei

Om het effect van meettijd op te kwantificeren zijn voor het gewas prei dertien metingen uitgevoerd verdeeld over de dag. De eerste meting startte rond 10 uur en de laatste meting eindigde om 19 uur. De hoeveelheid invallende straling varieerde over de dag van 35 tot 385 $W m^{-2}$. In tegenstelling tot de CropScan is er weinig tot geen verandering zichtbaar in de hoeveelheid reflectie in Rood en NIR. De verandering in de gewasreflectie is maximaal 0,01% voor Rood en maximaal 0,06% voor NIR (absolute reflectie). Voor de reflectie in het NIR neemt de hoeveelheid reflectie af van 0,25 naar 0,20%. Deze veranderingen zijn echter niet significant.



Figuur 11.3. Effect van tijd op de gewasreflectie en daarvan afgeleide indexen (GreenSeeker).

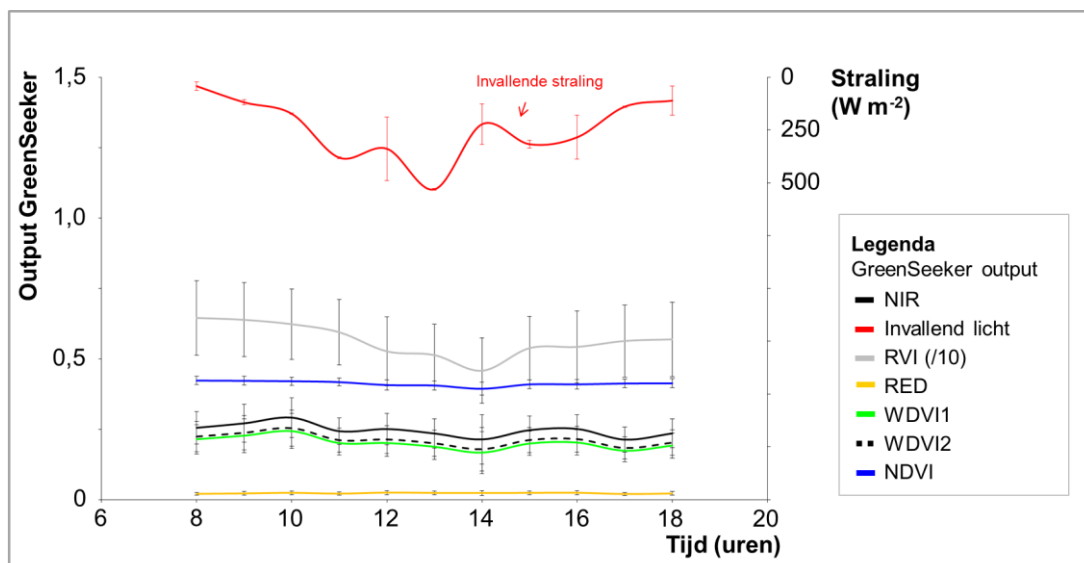
Variatie in meethoogte heeft relatief een grote invloed op de gemeten gewasreflectie en de daarvan afgeleide gewasindexen. Dit wordt geïllustreerd in de hieronder weergegeven figuur. Uit deze figuur blijkt dat de gewasreflectie afneemt met 47 tot 55%. Een vergroting van de meetafstand resulteert in een gemiddelde afname van 6% voor NDVI, van 14% voor RVI en van 58% voor beide WDV-indexen. Of de meting met of zonder verstorende schaduw of regen wordt uitgevoerd, heeft vrijwel geen effect op het gereflecteerde spectrum en de daarvan afgeleide gewasindexen. Er is een lichte trend naar hogere reflectie in NIR ná een regenbui, maar deze verhoging valt binnen de standaard ruis.



Figuur 11.4. Effect van meethoogte, schaduw en regen op gewasreflectie en -indexen (GreenSeeker).

11.2.3 Lelie

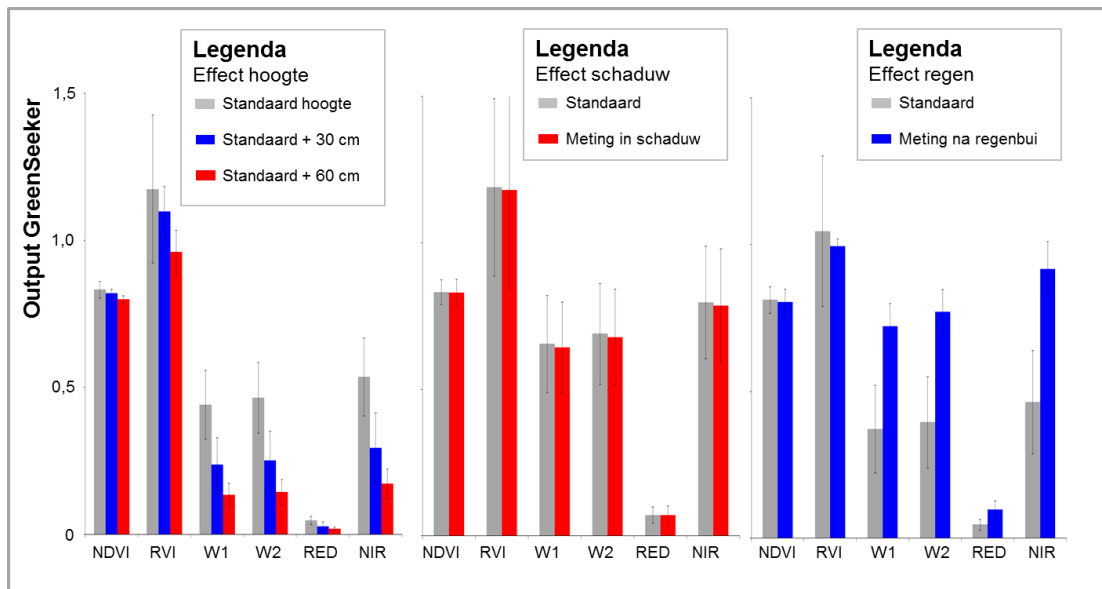
Om het effect van meettijd op te kwantificeren zijn voor het gewas lelie dertien metingen uitgevoerd verdeeld over de dag. De eerste meting startte rond 10 uur en de laatste meting eindigde om 19 uur. De hoeveelheid invallende straling varieerde over de dag van 42 tot 531 $W m^{-2}$.



Figuur 11.5. Effect van tijd op de gewasreflectie en daarvan afgeleide indexen (GreenSeeker).

In tegenstelling tot de CropScan is er weinig tot geen verandering zichtbaar in de hoeveelheid reflectie in Rood en NIR. De verandering in de gewasreflectie is maximaal 0,01% voor Rood en maximaal 0,66% voor NIR (absolute reflectie). Voor de reflectie in het NIR neemt de hoeveelheid reflectie af van 0,51 naar 0,47%. Deze veranderingen zijn echter niet significant.

Variatie in meethoogte heeft relatief een grote invloed op de gemeten gewasreflectie en de daarvan afgeleide gewasindexen. Dit wordt geïllustreerd in de hieronder weergegeven figuur. Uit deze figuur blijkt dat de gewasreflectie afneemt met 61 tot 68% (relatieve verandering ten opzichte van standaard meting). Een vergroting van de meetafstand resulteert in een gemiddelde afname van 4% voor NDVI, van 18% voor RVI en van 69% voor beide WdVI-indexen. De aanwezigheid van schaduw heeft nauwelijks effect op het gemeten spectrum: alle veranderingen liggen ruim binnen de standaard ruis. Opvallend is wel dat in deze situatie een aanzienlijk effect is van een regenbui. Door de simulatie van regen wordt het gewas vochtig en dat is zichtbaar in een hogere reflectie in zowel RED als NIR. Dit vertaalt zich direct door in een hogere gewasindex voor WdVI.

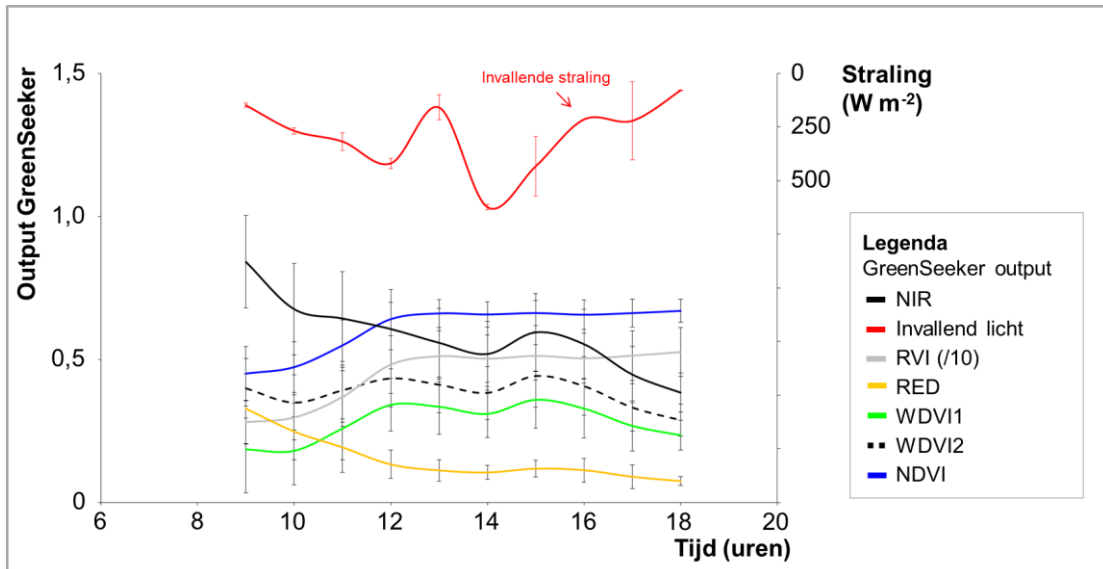


Figuur 11.6. Effect van meethoogte, schaduw en regen op gewasreflectie en -indexen (GreenSeeker).

11.2.4 Rode kool

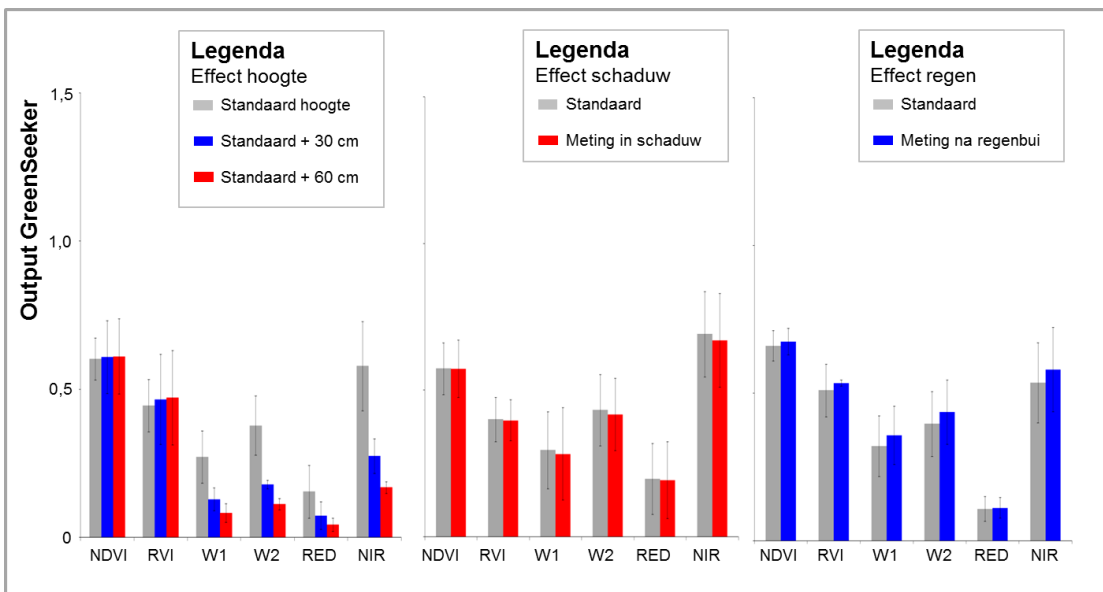
Om het effect van meettijdspit te kwantificeren zijn voor het gewas rode kool veertien metingen uitgevoerd verdeeld over de dag. De eerste meting startte rond 8 uur en de laatste meting eindigde om 18 uur. De hoeveelheid invallende straling varieerde over de dag van 80 tot 624 W m⁻².

In tegenstelling tot de hiervoor beschreven metingen is er gedurende de dag een afname in hoeveelheid reflectie, zowel in Rood als in NIR. De verandering in de gewasreflectie is maximaal 0,25% voor Rood en maximaal 0,46% voor NIR (absolute reflectie). Voor de reflectie in het NIR neemt de hoeveelheid reflectie af van 0,84 naar 0,38%. Deze veranderingen zijn significant, in het bijzonder voor de reflectie in rood.



Figuur 11.7. Effect van tijd op de gewasreflectie en daarvan afgeleide indexen (GreenSeeker).

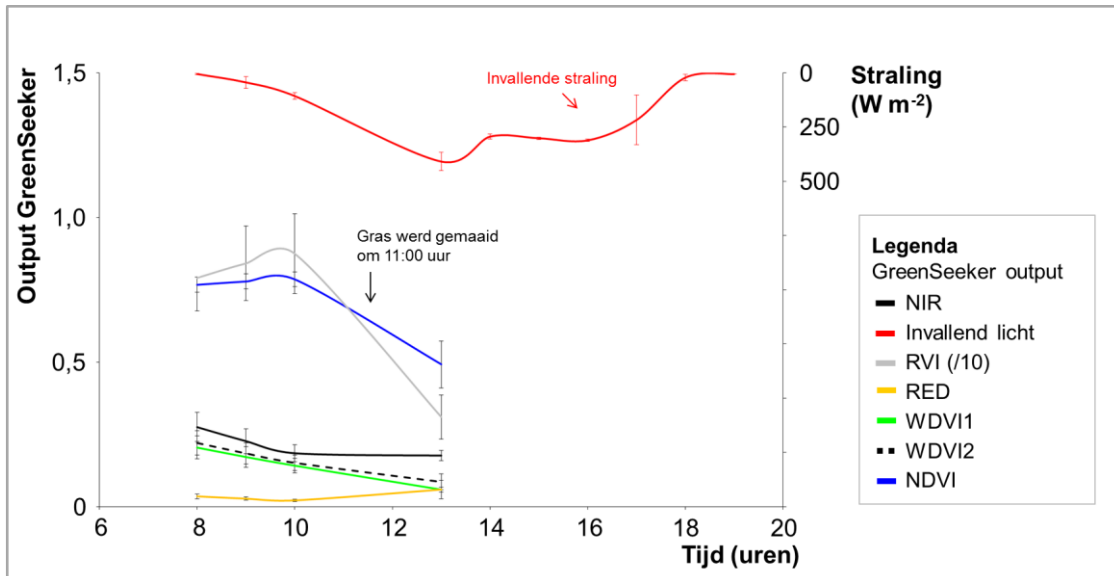
Variatie in meethoogte heeft relatief een grote invloed op de gemeten gewasreflectie en de daarvan afgeleide gewasindexen. Dit wordt geïllustreerd in de hieronder weergegeven figuur. Uit deze figuur blijkt dat de gewasreflectie afneemt met ~70% (relatieve verandering ten opzichte van standaard meting). Een vergroting van de meetafstand resulteert in een gemiddelde toename van 1% voor NDVI, een toename van 4% voor RVI en een afname van ~70% voor beide WDV-indexen. De aanwezigheid van schaduw heeft nauwelijks effect op het gemeten spectrum: alle veranderingen liggen ruim binnen de standaard ruis. De gesimuleerde regenbui heeft in deze situatie weinig effect. Er lijkt een lichte verhoging op te treden van de reflectie in zowel RED (+4%; relatief t.o.v. standaard) als NIR (+8%; relatief t.o.v. standaard). In absolute reflectie gaat het hierbij om een verandering van <0,01% voor RED en van < 0,05% voor NIR. Gezien de aanwezige ruis om beide metingen, is het effect van neerslag te verwaarlozen.



Figuur 11.8. Effect van meethoogte, schaduw en regen op gewasreflectie en -indexen (GreenSeeker).

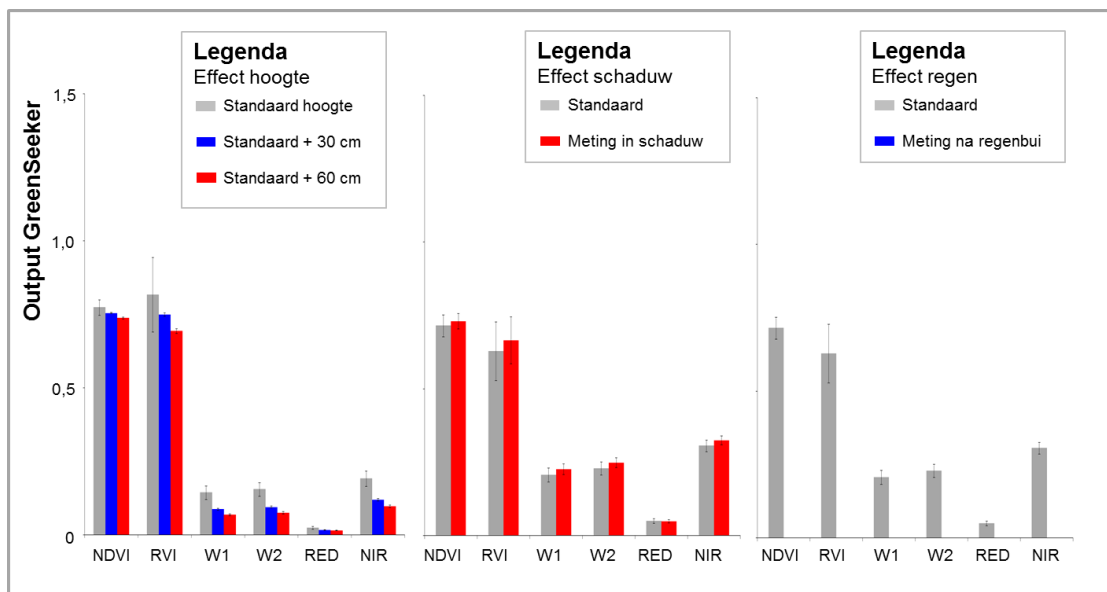
11.2.5 Gras

Om het effect van meettijdspit te kwantificeren zijn voor het gewas gras vijf metingen uitgevoerd. Omdat er een storing aanwezig was in de software van de GreenSeeker is het aantal metingen op grasland beperkt tot vier. De eerste meting startte rond 8 uur en de laatste meting eindigde om 13 uur. De hoeveelheid invallende straling varieerde tijdens de meetperiode van 5 tot 410 $W m^{-2}$. Gebaseerd op deze gegevens is het echter niet mogelijk harde uitspraken te doen of de sensor output varieert over de dag. Naast het aantal beperkte metingen wordt de interpretatie bemoeilijkt door het feit dat het gras tussen 10 en 12 uur werd gemaaid door de agrariër. Desondanks lijken de gegevens aan te geven dat de hoeveelheid reflectie afneemt, in zowel het VIS als NIR spectrum.



Figuur 11.9. Effect van tijd op de gewasreflectie en daarvan afgeleide indexen (GreenSeeker).

Variatie in meethoogte heeft invloed op de gemeten gewasreflectie en de daarvan afgeleide gewasindexen. Dit wordt geïllustreerd in de hieronder weergegeven figuur. Uit deze figuur blijkt dat de gewasreflectie afneemt met 40 tot 50% (relatieve verandering ten opzichte van standaard meting).



Figuur 11.10. Effect van meethoogte, schaduw en regen op gewasreflectie en -indexen (GreenSeeker).

Een vergroting van de meetafstand resulteert in een gemiddelde afname van 5% voor NDVI, van 15% voor RVI en een afname van ~50% voor beide WdVI-indexen. De aanwezigheid van schaduw heeft nauwelijks effect op het gemeten spectrum: alle veranderingen liggen ruim binnen de standaard ruis. Er zijn helaas geen metingen uitgevoerd na een gesimuleerde regenbui.

11.3 Samenvatting

In deze paragraaf zullen de hierboven beschreven resultaten kort worden samengevat. Hierbij wordt geen rekening gehouden met de statistische onzekerheid op de berekende data. Hiervoor wordt verwezen naar de statistische analyse van deze gegevens in het hoofdrapport.

Uit het samenvattende overzicht in tabel 11.1. blijkt dat het meettijdstip en de gebruikte meethoogte de grootste effecten hebben op de gemeten gewasreflectie. Het effect van deze factoren kan de reflectie in Rood en NIR veranderen met maximaal 0,5%. De grootste verandering treedt hierbij op in de reflectie in NIR. Door de aanwezigheid van een eigen lichtbron, zijn deze veranderingen echter klein vergeleken met de effecten die aanwezig waren bij de CropScan. De invloed van schaduw en regen is gering en vrijwel altijd kleiner dan 0,1%. Uitzondering hierbij is de situatie bij het leliegewas waar regen een grote verandering in NIR reflectie veroorzaakt.

Tabel 11.1. Samenvatting van gemeten effecten van tijd, hoogte, regen en schaduw

Gewas	Factor	Effect op VIS **	Effect op NIR **	Inschatting effect van de factor op de index	
				Range *	Ongevoelig < = > Gevoelig
Wortel	Tijd	<0,1%	<0,1%	3-30%	NDVI < WdVI < RVI
	Hoogte	<0,1%	<0,4%	6-69%	NDVI < RVI < WdVI
	Regen	<0,1%	<0,1%	<1-20%	NDVI < RVI < WdVI
	Schaduw	<0,1%	<0,1%	<1-4%	NDVI < RVI < WdVI
Prei	Tijd	<0,1%	<0,1%	2-22%	NDVI < RVI < WdVI
	Hoogte	<0,1%	<0,2%	6-58%	NDVI < RVI < WdVI
	Regen	<0,1%	<0,1%	2-44%	NDVI < RVI < WdVI
	Schaduw	<0,1%	<0,1%	1-2%	NDVI < RVI < WdVI
Lelie	Tijd	<0,1%	<0,2%	4-30%	NDVI < RVI < WdVI
	Hoogte	<0,1%	<0,4%	4-69%	NDVI < RVI < WdVI
	Regen	<0,1%	<0,5%	1-95%	NDVI < RVI < WdVI
	Schaduw	<0,1%	<0,1%	1-2%	NDVI < WdVI < RVI
Rode kool	Tijd	<0,3%	<0,5%	32-50%	NDVI < RVI = WdVI
	Hoogte	<0,2%	<0,4%	1-70%	NDVI < RVI < WdVI
	Regen	<0,1%	<0,1%	2-12%	NDVI < RVI < WdVI
	Schaduw	<0,1%	<0,1%	<1-4%	NDVI < RVI < WdVI
Gras	Tijd	<0,1%	<0,2%	2-45%	NDVI < RVI < WdVI
	Hoogte	<0,1%	<0,1%	5-52%	NDVI < RVI < WdVI
	Regen	-	-	-	-
	Schaduw	<0,1%	<0,1%	2-9%	NDVI < RVI < WdVI

* *Relatieve verandering ten opzichte van standaard meting (hoogte, regen, schaduw) en de reflectie bij de hoogste hoeveelheid invallende straling (tijd).*

** *effect op absolute reflectie*

Kleine veranderingen kunnen echter grote gevolgen hebben voor de berekende gewasindexen. Van de geteste indexen blijkt de NDVI-index het meest robuust te zijn: de invloed van tijd, hoogte, neerslag en schaduw is overwegend kleiner dan 5%. Uitzondering hier is rode kool omdat de NDVI sterk beïnvloed wordt door het meettijdstip. Over het algemeen hebben de onderzochte factoren een grote invloed op de WdVI index, overeenkomend met de relatieve verandering die ook zichtbaar is in de RED en NIR reflectie. Hierbij kan het effect oplopen tot 70%.

12 Bijlage 5. Achtergrondinformatie literatuurstudie

In deze sectie wordt een korte beschrijving gegeven van de geanalyseerde studies waarbij de invloed van externe factoren wordt geëvalueerd. Hierbij zijn de onderzochte studies alfabetisch gerangschikt.

Chang et al. (2007) onderzochten het effect van bewolking op de sensor-output van CropScan en FieldSpec. De ruis op de sensor-output nam toe met het percentage bewolking. De oorzaak wordt toegeschreven aan een meer variatie in invallend licht en een hogere verstrooiing. De auteurs geven aan dat veldmetingen onder vergelijkbare omstandigheden moet worden uitgevoerd, en dat sensors gekalibreerd moeten worden voor gebruik.

Daughtry et al. (1982) onderzochten hoe meethoogte en gewastype van invloed waren op de sensor-output van een gewasreflectiemeter. De gewassen zijn mais en soja met 70% en 100% bedekking. Metingen zijn uitgevoerd van 0,2 tot 10 meter boven het gewas. Variatie bij lage meethoogte kan grotendeels worden verklaard door rij-effecten en verdwijnt wanneer hoger wordt gemeten (integratie in spectrum). De spectrometer meet in 4 banden, verdeeld over 500 tot 1100 nm.

De Souza et al. (2010) onderzochten wat de invloed is van de positie van de zon, meettijdspit en bewolking op de reflectie van mais. Gewassensoren zonder actieve lichtbron werden 25 cm boven het gewas geplaatst, waarna gedurende verschillende dagen de gewasreflectie werd gemeten. Hiervoor werd gebruik gemaakt van passieve CropCircle sensoren (niet meer beschikbaar). Uit de gepresenteerde gegevens is onduidelijk of de sensoren zelf corrigeren voor variatie in invallende straling. De positie van de zon, het moment van meten en de hoeveelheid bewolking hadden allemaal een invloed hebben op het gereflecteerde spectrum. Hierbij was het effect van meetmoment groter dan de positie van de zon en de hoeveelheid bewolking. De hoeveelheid ruis over de dag was ~21% voor de reflectie in groen, ~22% voor de reflectie in rood en varieerde van 5 tot 11% voor de ratio NIR/Groen en GNDVI-index (relatieve ruis rondom het gemiddelde). Een vergelijkbaar effect was zichtbaar voor de indexen NDVI, SAVI en OSAVI: het effect van meettijdspit varieert tussen 5 en 33%. De geobserveerde variatie was zo groot dat een afgeleide N-bemestingsadvies onnauwkeurig zou worden (variatie van bijv. 60-155 kg N). Vergelijkbare resultaten waren zichtbaar in een eerdere studie van Scharf et al. (2007), medeauteur van deze studie. Omdat er aanzienlijke verschillen aanwezig zijn tussen verschillende meetdagen (die niet samenhangen met de hoeveelheid invallende straling en bewolking) wordt door de auteurs gesuggereerd dat de aanwezige ruis verklaard moet worden aan de hand van andere weersafhankelijke factoren. Hierbij kan gedacht worden aan plant architectuur, hoeveelheid water (Carlson et al., 1971), wind (Lord et al., 1985), dauw (Pinter, 1986) en veranderingen in pigment (Hoel & Solhaug, 1998; Brugnoli & Björkman, 1992). Deze conclusie suggereert dat het gebruik van een actieve lichtbron niet per definitie de variatie binnen een dag oplost. Wanneer de gemeten reflectie wordt gecorrigeerd voor de factoren meettijdspit, positie van de zon en bewolking, dan verminderd de ruis op de meting met 50%. De hierboven genoemde inschattingen kunnen daarmee dus gehalveerd worden.

Fitzgerald et al. (2005) onderzoekt de rol van schaduw binnen het gewas op het spectrum. Gerelateerd aan NDVI.

Fitzgerald (2010) onderzocht het effect van meethoogte en -oppervlak met een actieve CropCircle sensor in het gewas tarwe. Schaal-effecten waren verwaarloosbaar (analyse via een puntmeting, een transect- en een plotmeting). De SAVI-index werd beïnvloed door meethoogte. Niet gevoelig voor

lichtcondities. Metingen zijn uitgevoerd van Juli tot November. Bewolking beïnvloedde zowel NDVI als SAVI met minimaal 2 tot 10%. Metingen die dicht bij het gewas waren genomen, hadden hogere index-waarden. De afwezigheid van schaal-effecten wordt verklaard door homogene bodembedekking. De reflectie in NIR en Rood nam af met meetafstand, waarbij het effect groter was voor SAVI dan voor NDVI. De hoeveelheid invallende straling had weinig invloed op de sensoroutput van deze actieve sensor.

Green et al. (1998) en Adcock et al. (1990) laten zien dat bewolkingsgraad de hoeveelheid ruis vergroten. Ook de hellingshoek van de zon heeft invloed op het gereflecteerde spectrum: zie resultaten **Ranson et al. (1985; 1986), Gross et al. (1988), Middleton, en Lord et al. (1988)**.

De studie van **Guan & Nutter (2001)** onderzocht de invloed van verschillende factoren op het gewasspectrum van het gewas alfalfa. Invallende straling had weinig invloed op VIS-reflectie gedurende driejarige experimenten, maar het had een negatief effect op de reflectie in het NIR-spectrum. De reflectie bij 810 nm nam af met 0,2-0,3% bij iedere extra 100 W m^{-2} straling. Over alle golflengtes werd zichtbaar dat de reflectie hoger is wanneer er gemeten wordt voor 11 en na 15 uur in vergelijking met metingen binnen deze periode. De aanwezigheid van vocht op de bladeren verhoogt de reflectie voor zowel VIS als NIR. Vergelijkbare effecten waren zichtbaar voor meethoogte. De verklaring hiervoor was dat er bij verhoging meethoogte meer ruis in het meetoppervlak aanwezig is: er werd namelijk geen effect van meethoogte gevonden in haver en gras. Advies: meting tussen 11 en 15 uur bij droog gewas, constante sensor hoogte (vaste meetoppervlak).

De studie van **Hodgen et al. (2004)** onderzoekt de invloed van hoek waaronder gemeten wordt op mais.

Kim et al. (2010) onderzocht de invloed van bodembedekking, meetafstand, temperatuur en invallende straling op de output van actieve sensoren. Gebruikt GreenSeeker. De NDVI index bleek afhankelijk te zijn van de hoeveelheid bladbedekking en de meetafstand waarop acceptabele ruis aanwezig was varieerde tussen 100-180 cm. Gewenste hellingshoek waarbinnen nauwkeurige metingen van NDVI konden worden uitgevoerd lag binnen 0-50 graden. Er was geen significant effect van invalshoek van zonlicht op NDVI binnen 0-60 graden. Temperatuur (10-40 graden) en kunstmatige belichting had weinig effect op de NDVI waarden. De NDVI hing samen met invallende straling en invloed van bewolking: hoe meer straling, hoe lager de NDVI.

Kipp et al. (2012) presenteren resultaten van een studie waarbij de GreenSeeker, CropCircle en YARA N-sensor ALS zijn vergeleken. Zij hebben de volgende factoren onderzocht: afstand tot gewas, sensortemperatuur, en variërende lichtomstandigheden. Hoewel fabrikanten aanbevelingen doen voor optimale meethoogte, zijn geen kwantitatieve gegevens hoe de sensor output verandert als de meethoogte wijzigt, zelfs binnen optimale meetrange. Metingen zijn uitgevoerd in een klimaatkamer op een kunstmatige ondergrond. Afstand varieert tussen 10 cm tot 200 cm (per 10 cm), tussen 5 en 35 graden (temperatuur) en een licht hoeveelheid tussen 0 en $580 \text{ umol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Bij een afstand kleiner dan 50-70 is er grote variatie in sensor-output al is de hoogte waarbij de output relatief stabiel wordt verschillend voor de drie sensoren (70-110 cm voor GreenSeeker NDVI, 50-200 cm voor R760/R730 voor AFS, en 100-140 cm voor CropCircle SR). De Optimale hoogte zal samenhangen met bedekking. Voor alle sensoren was de berekende gewasindex negatief gerelateerd aan temperatuur: hoe hoger de temperatuur, hoe lager de sensor-output. Waarschijnlijk hangt dit samen met ruis vanuit de lichtbron. De berekende indexen veranderen met 0,002 tot 0,003 per graad temperatuursverandering. In een

illustratieve berekening gebaseerd op veldgegevens schatten de auteurs dat elke graad stijging in temperatuur leidt tot extra ruis in geschatte N-gehaltes van 0,6 tot 1,8 kg N per hectare. De sensor output werd niet beïnvloed door de hoeveelheid licht. Vergelijkbare resultaten zijn gepresenteerd door Solari et al. (2004), Jasper et al. (2009) en Kim et al. (2010). Hangt samen met het gebruik van actieve lichtbron.

In een beschrijving van een praktijk validatie wordt door **Lamain (2011)** opgemerkt dat de meetresultaten op hetzelfde perceel varieerden afhankelijk van de rijrichting. Dit was vooral goed zichtbaar in de reflectie in het rode deel van het spectrum. De oorzaken hiervoor worden gezocht in variaties in lichtinval, wind en gewasstand. De gebruikte sensor is een CropCircle. De auteur geeft aan dat het niet bekend is in welke mate deze factoren in staat zijn om een verkeerde gewasindex op te leveren. Een ander praktisch punt dat uit deze studie naar voren kwam is dat het gescande oppervlak afneemt met afnemende meethoogte. Hierdoor neemt de steekproefgrootte af als een gewas groeit terwijl de sensor op een vaste hoogte op een spuitboom zit gemonteerd. Daarmee samenhangend wordt opgemerkt dat er behoefte is aan een onderbouwde richtlijn voor het aantal te gebruiken sensoren bij een gegeven werkbreedte.

Oliveira (2008) beschrijft haar onderzoek naar het gebruik van gewassensoren om N-gehalte in katoen te voorspellen. Ze beschrijft enkele factoren die gewasreflectie kunnen beïnvloeden. Dit zijn:

- de positie van de rij (noord-zuid of oost-west) en de positie van de zon (Jackson et al., 1979; Souza et al., 2004). Dit hangt samen met de hoeveelheid schaduw die aanwezig is op het gemeten spectrum. Gebruik van passieve sensors;
- reflectiemetingen in de middag blijken lager te zijn dan reflectie in namiddag of de ochtend. In het begin van de middag is er namelijk meer VIS-reflectie van de kale grond (Sticksel et al., 2004; Souza et al., 2004);
- dauw beïnvloedt tot 60% van de variatie in VIS, maar heeft geen effecten op de reflectie in het NIR-spectrum (Pinter, 1986) in tarwe. Een andere studie ziet een toename van 4-50% voor reflectie in VIS voor twee soorten grassen (Madeira et al., 2000). In het NIR-spectrum was er echter een afname van 2-9%; en
- toename in bewolking zorgt voor afname van gewasreflectie in mais en gras (Tumbo et al., 2002; Madeira et al., 2000). Wind beïnvloedt de geometrie van een gewas en daardoor de hoeveelheid reflectie (Lord et al., 1985). Het vochtgehalte in bodem heeft daarnaast een significante invloed op VIS (afname) en NIR (toename).

In de opvolgende veldstudie onderzochten ze de invloed van meethoogte en meettijdstip op de betrouwbaarheid van sensor signaal. Hiervoor gebruikten ze de passieve CropScan sensor, een actieve CropCircle en een actieve GreenSeeker sensor. Er zijn metingen uitgevoerd op twee dagen op drie verschillende gewasstadia van het gewas katoen. Er blijkt een grote variatie aanwezig te zijn gedurende de dag. Voor de VIS en NIR reflectie van de GreenSeeker bleek dit voor 50% veroorzaakt te zijn door temperatuur, invallende straling en meettijdstip. Voor CropScan en Cropcircle bleek dit effect echter kleiner dan 10% te zijn. De passieve sensor bleek daarnaast beïnvloed te worden door richting van de gewas-rij: de variatie in metingen bij noord-zuid rij was altijd groter dan die in oost-west. De berekende ruis op NDVI was kleiner voor CropCircle dan voor GreenSeeker. Midden op de dag was het beste meettijdstip. Berekening resulteerde in lagere schatting van N-advies voor actieve sensoren en in hogere schattingen voor de passieve sensor. Het advies voor Cropscan is meten tussen 8-18 uur. Actieve sensoren kunnen minstens 2 uur eerder beginnen en eindigen. De conclusie is voornamelijk gebaseerd op de hoeveelheid variatie tijdens een meting.

Pinter (1986) onderzoekt het effect van dauw op de gewasreflectie in 6 verschillende tarwerassen. De aanwezigheid van dauw had een significante invloed op golflengtes kleiner dan 700 nm en golflengtes hoger dan 1150 nm. De reflectie in VIS ging omhoog met 40-60% terwijl deze met 25-60% verlaagde in 1150-2350 nm regio. Geen effect zichtbaar in NIR.

In een studie van **Polder et al. (2003)** worden diverse aspecten van de sensor zelf aangestipt die van invloed zijn op spectrale metingen. Dit zijn het spectrum van de lichtbron zelf, de *quantum efficiency* van de sensor, de snelheid van aflezen en de temperatuur van de sensor.

Roberts et al. (2009) onderzoeken de optimale sensors-afstand op een spuitboom. Er is gebruik gemaakt van actieve CropCircle ACS-210 sensor. Een minimum van twee tot drie sensoren was gewenst op een afstand van 22 m.

In een studie in 1985 presenteren **Lord & Desjardins** experimentele resultaten om de invloed van wind op reflectiemetingen inzichtelijk te maken. De auteurs hebben metingen uitgevoerd boven tarwe, gerst en alfalfa bij verschillende windomstandigheden en bij een gelijke hoeveelheid invallend licht. Uit hun resultaten bleek wind invloed te hebben bij de wat hogere gewassen. Het effect van wind varieerde tussen 12 tot 60% voor de reflectie in Rood en tussen 8 en 40% voor de reflectie in NIR. Voor het kleinere gewas alfalfa waren deze effecten maximaal 10%. Metingen zijn uitgevoerd met een spectrometer, circa 3 meter boven het oppervlak, nadir positie.

In een Nederlandse studie beschrijft **Munsterman (2009)** de resultaten van een veldproef in suikerbieten waarbij de invloed van allerlei factoren op gewasindexen is onderzocht. De aangelegde behandelingen zijn het gebruik van een herbicide of fungicide, de aanwezigheid van stof en water op het gewas, extra verwelking en de stand van de zon. Metingen zijn uitgevoerd met de CropScan. Hij vond een significante verlaging van de NDVI-index door een andere zonnestand, watertekort en de aanwezigheid van stof. Ook voor de WDVI-index was dit het geval. De REP-index werd echter alleen beïnvloed door de stand van de zon en een watertekort in het gewas. Een regenbui had geen invloed op de gemeten reflectie van het gewas.

De studie van **Samborski et al. (2009)** beschrijft en evalueert bestaande mogelijkheden om sensoren te gebruiken voor N-bemestingsadviezen, in het bijzonder voor de GreenSeeker, Yara N-sensor en de CropCircle. Voor praktische aspecten voor gebruik gaan de auteurs in op het gemeten oppervlak ('footprint shape') en meethoogte. De positie van de sensor moet boven het gewas zijn (bij rijen). Verschillen in IRR kunnen worden 'verholpen' met een actieve sensor, maar effect van water stress beïnvloedt ook blad-stevigheid. Omdat de GreenSeeker met twee diodes werkt die afwisselend licht uitzenden, kan de gemeten reflectie in Rood en NIR uit de pas gaan lopen bij hogere rijnsnelheden. Ook wordt opgemerkt dat de afstand tussen sensor en gewas van grote invloed is de nauwkeurigheid van de sensor-metingen. Wanneer een sensor dicht bij het gewas wordt geplaatst, is de intensiteit van het gereflecteerde licht groter dan bij grotere afstand. Dit betekent concreet dat de gevoeligheid om verschillen te detecteren in gewasstatus kleiner worden bij grotere meetafstand. Sommige sensoren corrigeren hier zelf al voor, bijvoorbeeld de GreenSeeker. Een ander mechanisme dat de gevoeligheid van de sensor beïnvloedt is de variatie binnen het gemeten oppervlak. Deze variatie is afhankelijk van gewas (hoe uniform is het gewas verdeeld over het perceel, in rijen of uniform) en de natuurlijke variatie binnen het gewas.

Een studie van **Scharf et al. (2007)** laat zien dat de variatie binnen een dag van de sensoroutput van de GreenSeeker, CropCircle and CropScan sensoren een relevante fout kunnen veroorzaken in de voorspelling van N-adviezen. Gedeeltelijk hing de aanwezige ruis in hun experimenten samen met dauw of regen, maar voor een groot deel van de gegevens kon geen duidelijke verklaring worden gegeven.

Scharf et al. (2010) presenteert resultaten van drie gewassensoren: de CropScan (passief), de GreenSeeker en de CropCircle (actief). Voor zowel mais als katoen is er significante drift gedurende de dag. Mogelijk veroorzaakt door vochtigheid blad. Groot deel is echter veroorzaakt door onbekende oorzaak.

In het achterliggende document dat gebruikt is voor een presentatie op de InfoAg 2005 conferentie wordt door **Schepers (2005)** een inhoudelijke beschrijving gegeven van de mogelijke effecten van meethoogte, meetoppervlak, gewasstructuur, waterstress, meettijdstip gedurende de dag en het effect van dauw. Kwantitatieve meetresultaten ontbreken, met uitzondering voor het effect van water op gewasreflectie. Gebruik makend van het gewas mais is met drie CropCircle sensoren voor én na bevochtiging een meting uitgevoerd. Uit deze studie bleek dat bevochtiging leidde tot een verhoging van de reflectie in de NIR van +3% terwijl de reflectie in het visuele spectrum (groen, geel en rood) afnam met 2 tot 12%. Veranderingen over de dag in NIR reflectie blijken volgens hem vaak te wijten aan het effect van waterstress.

De studie van **Shaver et al. (2010)** beschrijft de resultaten van een kasexperiment met mais waarin is onderzocht hoe de NDVI-index afhankelijk is van biomassa-ontwikkeling, de aanwezigheid van wind, rij-afstand, bewegingssnelheid en N-bemesting. Er worden twee sensoren gebruikt die beide gebruik maken van een actieve lichtbron. De gebruikte sensoren zijn de GreenSeeker 505 en de Crop Circle ACS-210. Metingen zijn uitgevoerd op 100 cm boven het gewas voor de GreenSeeker en op 70 cm voor de Crop Circle. De gekozen meethoogte komt overeen met de gemiddelde gewenste meethoogte zoals aangegeven in de producthandleiding. De NDVI-index was voor beide sensoren significant gerelateerd aan N-bemesting en groeistadium. De invloed van rij-afstand was niet consequent, maar varieerde met het groeistadium, waarbij de CropCircle meer robuust lijkt te zijn dan de GreenSeeker. Als mogelijke verklaring wordt gewezen op het kleinere meetoppervlak waardoor er meer variatie optreedt. In latere groeistadia wordt dit effect minder zichtbaar, omdat de hele bodem dan bedekt is. De meet-ruis is kleiner voor de CropCircle waardoor deze in de praktijk eerder ingezet kan worden. Beweging van het blad (door wind) had geen effect op de NDVI-index voor beide sensoren. De bewegingssnelheid van de CropCircle-sensor had geen effect op de berekende NDVI-waarde, maar wel voor de GreenSeeker-sensor. De NDVI werd namelijk verlaagd met ~8% als sneller dan 3,6 km h⁻¹ werd gereden.

Sudduth et al. (2011) presenteert resultaten van een vergelijkende studie waar drie commerciële sensors worden vergeleken: de GreenSeeker, de CropCircle en de CropSpec. Alle sensoren hebben en eigen lichtbron. Metingen zijn uitgevoerd in veldexperiment met mais gedurende 2 dagen (waarbij op één dag gemeten is om 9, 10, 12 en 15 uur). De CropCircle meet in nadir positie en het gemeten oppervlak varieert met de hoogte. Bij de GreenSeeker wordt er rekening gehouden met meethoogte en is het gemeten oppervlak relatief constant. De CropSpec meet onder een hellingshoek van 45 tot 55 graden en meet daardoor relatief meer oppervlak dan de andere sensoren. In deze studie is specifiek gekeken naar het effect van gewaseigenschappen en variatie over de tijd. De resultaten van sensoren met kleiner oppervlak (nadir) lijken beter gecorreleerd te zijn aan gewashoogte, terwijl off-nadir sensors

beter relateren met N gehalte. Beide nadir sensoren reageren zowel op gewashoogte als N-opname (biomassa effect). Een schuine positie van de sensor vermindert mogelijk de ruis vanuit de bodem, en geeft mogelijk meer informatie van bladeren aan de onderzijde van het gewas (eerder respons op N-tekorten). Gedurende de dag zijn de verschillende metingen sterk aan elkaar gecorreleerd; effecten aan rand van de dag zijn het meest verschillend. Binnen een meet-dag is er variatie mogelijk door variatie in de exacte meetpositie ten opzichte van het gewas, verstoring door wind of andere onbekende factoren. De verschillen in deze studie zijn kleiner dan in een eerdere studie van dezelfde auteurs (Sudduth et al., 2010). Dat variatie gedurende de dag bestaat is bekend (Souza et al., 2010; Olivera, 2008), maar onbekend is of deze variatie veroorzaakt wordt door invallend licht, vochtgehalte op het blad, beweging, of fysiologische veranderingen in het gewas.

De hellingshoek van de sensor bepaalt hoeveel 'ruis' er via bodemreflectie in het gewasreflectiesignaal terecht komt. In hun studie in rijstvelden hebben **Tubana et al. (2012)** onderzocht wat de invloed is van de hellingshoek (nadir, 45 graden op- en zijwaarts). Meerdere veldproeven in USA, 2009-2010. Ze maken hierbij gebruik van een actieve Greenseeker sensor. NDVI waarden worden nauwelijks beïnvloed bij een vroeg groeistadium. In een later stadium is er ook meer variatie in metingen. Metingen in een niet-nadir-positie zijn minder gevoelig. Dit heeft duidelijke effecten voor de berekende gewasindex: deze wordt hoger bij off-nadir posities. In vergelijking met de variatie tussen jaren is het effect van meet-hoek echter gering.

Vrindts et al. (2002) laten zien dat het via gewasreflectie mogelijk is om onkruiden te onderscheiden van suikerbiet en mais. Hierbij maken ze gebruik van een passieve sensor, voornamelijk in een vroeg gewasstadium. Vergelijkbare resultaten worden gepresenteerd door **Chang et al. (2004)**

Van der Schans et al. (2012) stelt dat de invloed van meethoogte een belangrijke foutenbron is als er gemeten wordt bij een afstand kleiner dan 70 cm. Daarom is het belangrijk dat leveranciers van sensoren aangeven wat de invloed van montagehoogte is op zowel de gemeten reflectie als de daaruit berekende vegetatie-indexen. Een ander praktisch punt wat door hen naar voren wordt gebracht is dat de filters in de sensoren na verloop van tijd gaan 'verlopen' waardoor het meetbereik van de sensor verandert. Dit kan in zekere mate worden opgevangen door de sensoren opnieuw te kalibreren of te vervangen. De auteurs adviseren om de sensoren jaarlijks of eenmaal per twee jaar te laten kalibreren. Een andere factor die van invloed is op de meetwaarde van een passieve sensor is de hoek waaronder zonnestraling binnenvalt en de aanwezigheid van bewolking. Ook kan de aanwezigheid van schaduw op het oppervlak dat gemeten wordt de sensor-output beïnvloeden. Kwantitatieve gegevens over deze 'ruis'-factoren worden door hen echter niet gegeven.

Diverse studies onderzoeken het effect van meet-hoek op het gereflecteerde spectrum en afgeleide gewasindexen (**Wardley, 1984; Guan & Nutter, 1998**). Duidelijk is dat meetbare effecten verschillen voor elke golflengte. Ook is het effect verschillend voor ratio en niet-ratio gewas-indexen.

In een recente studie hebben **Winterhalter et al. (2012)** onderzoek gedaan naar de N-opname in mais, hoe deze N is verdeeld over het gewas en in welke mate deze verschillen zichtbaar zijn in sensor metingen. De hoeveelheid N nam af van de top van het gewas naar beneden. De passieve sensor meet onder een hoek, van een hoogte van 3 m met een oppervlak van 15 m². De index R780/R740 was positief en niet-lineair gerelateerd aan biomassa en N-opname van het gewas. Verwijdering van één van de bladstadia (jong of oud) had invloed op de berekende gewas-index.



www.nmi-agro.nl

nutriënten management
instituut nmi bv
postbus 250
6700 ag wageningen
binnenhaven 5
6709 pd wageningen
tel. (088) 876 1280
internet www.nmi-agro.nl