

Institut für Pflanzenbau
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
Lehrstuhl für Allgemeinen Pflanzenbau
Direktor: Prof. Dr. W. Kühbauch

**Teilflächige Diagnose von Pilzbefall und Stickstoffmangel an
Weizen mit Hilfe der optischen Fernerkundung**

I n a u g u r a l - D i s s e r t a t i o n

zur

Erlangung des Grades

Doktor der Agrarwissenschaften

(Dr. agr.)

der

Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität

zu Bonn

vorgelegt am 20. Juli 2005

von

Dipl.-Ing. agr. Jan Jacobi

aus Bonn

Referent: Prof. Dr. W. Kühbauch

Korreferent: Prof. Dr. G. Menz

Tag der mündlichen Prüfung: 19.08.2005

D98

Teilflächige Diagnose von Pilzbefall und Stickstoffmangel an Weizen mit Hilfe der optischen Fernerkundung

Ein weithin anerkanntes und eingesetztes Hilfsmittel zur Beobachtung landwirtschaftlicher Kulturen ist die Fernerkundung. Satelliten der neuen Generation, wie z. B. *QuickBird*, mit räumlich hoch auflösenden Sensoren und schnellen Wiederholraten, eröffnen neue Anwendungen für Precision Farming. Beispielsweise können die Vitalitäts- und Ertragsunterschiede innerhalb eines Ackerschlags über die Entwicklungsstadien der Kulturpflanzen beobachtet werden.

Ziel der vorliegenden Arbeit war die fernerkundliche Beobachtung und Analyse der spektralen Eigenschaften von Winterweizen unter Feldbedingungen, vor allem die in Versuchspartzen gezielt durch Stickstoffmangel und Pilzinfektionen hervorgerufenen Defizite der Pflanzenvitalität.

Die Ergebnisse zeigen, dass es mit optischen sehr hoch auflösenden Satellitenbildern möglich ist, räumlich präzise zwischen den Stressfaktoren Stickstoff und Pilzkrankheiten zu unterscheiden. In einem *QuickBird*-Satellitenbild aus dem Jahr 2002 führen die vier im Weizenversuchsfeld etablierten Kombinationen der Faktoren Stickstoff und Fungizid zu einer signifikanten Veränderung der Bestandesreflexion in einzelnen spektralen Kanälen, und auch in den berechneten Vegetationsindizes NDVI, NDVI_(grün), SAVI und WdVI. Das Bestimmtheitsmaß (R^2) zwischen NDVI und % befallener Blattfläche betrug 0,62; zwischen NDVI und Kornertrag 0,88.

In dem durch hohen Infektionsdruck gekennzeichneten Versuchsjahr 2002 traten vor allem die durch Pilzkrankheiten ausgelösten Pflanzenschäden parzellenscharf hervor. Weniger deutlich, jedoch in der Tendenz ähnlich, waren Veränderungen der spektralen Reflexion in einer Serie von Luftbildern im Jahr 2003.

Deutlich traten in den Untersuchungen Defizite der Satellitensysteme für operationelle Anwendungen im Precision Farming hervor; vor allem die eingeschränkte Verfügbarkeit der Satellitenbilder, aufgrund der Wetterabhängigkeit, in den für die pflanzenbauliche Bestandesführung relevanten Zeitfenstern. Im Hinblick auf die Anwendung der optischen Fernerkundung im Precision Farming ist deshalb von operationellen Satellitensystemen eine weitaus größere räumliche Abdeckung zu fordern, als es z. Z. mit *QuickBird* möglich ist und möglichst täglichen Wiederholraten bei gleicher räumlicher und spektraler Auflösung.

Site-specific identification of fungal pathogens and nitrogen deficiency on wheat with optical remote sensing

Remote sensing is a widely accepted tool to observe agricultural crops and land cover. The new generation of satellites, as for instance *QuickBird*, provides optical sensors with improved repetition rates and high spatial resolution. Due to its technical improvements, *QuickBird* may have an enormous potential in Precision Farming applications, for example, to monitor vitality and yield variations across individual field plots and development stages of the crops.

The objective of this study was to monitor and analyse the spectral properties of winter wheat under field conditions with remote sensing, particularly deficits in plant vitality as caused by nitrogen deficiency and by fungal disease infestation.

The results indicate that a precise detection of stress symptoms induced by nitrogen deficiency and fungal diseases is possible based on an optical very high resolution satellite sensor. The four factorial combinations established in wheat plots with nitrogen and fungicide treatments showed significant differences in the reflectance of individually spectral channels of the *QuickBird*-image in 2002 and also in the calculated Vegetation indices NDVI, $NDVI_{(green)}$, SAVI and WDI ($\alpha = 0,05$). The coefficient of determination (R^2) between NDVI and percentage infested leaf area as well as between NDVI and kernel yield was 0.62 and 0.88, respectively.

In the year 2002 – with high pathogen infection pressure – the plant stress was predominantly caused by fungal disease and plot-precisely visible. The changes in spectral reflectance of a timeline of aerial images in 2003 were less obvious, but in tendency similar to the year before.

During the study, the deficits of today's satellite systems for operational applications in Precision Farming become visible; especially the limited availability of satellite images, due to weather dependency during the growing season. In terms of applications of remote sensing in Precision Farming operational satellite systems have to meet demands, mainly far better spatial coverage than today's *QuickBird*. Furthermore, daily repetition rates with similar spatial and spectral resolution should be realised.

Inhaltsverzeichnis

A	VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN.....	IV
B	VERZEICHNIS DER TABELLEN.....	IX
C	VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN.....	X
1	EINLEITUNG.....	1
	1.1 DIE ZIELE DER ARBEIT.....	2
2	GRUNDLAGEN UND LITERATURÜBERSICHT.....	4
	2.1 RADIOMETRIE.....	4
	2.1.1 RADIOMETRISCHE GRUNDLAGEN.....	4
	2.1.2 RADIOMETRISCHE EIGENSCHAFTEN VON PFLANZEN UND PFLANZENBESTÄNDEN.....	8
	2.1.3 AUSWIRKUNG VON SENESZENZ UND STRESSFAKTOREN AUF DIE REFLEXION VON PFLANZEN.....	12
	2.2 OPERATIONELLE FERNERKUNDUNG.....	15
	2.2.1 PRINZIPIEN DER FERNERKUNDUNG.....	15
	2.2.2 VEGETATIONSINDIZES.....	19
	2.2.3 OPERATIONELLE FERNERKUNDUNG IN DER LANDWIRTSCHAFT.....	22
	2.2.3.1 FLUGZEUGGETRAGENE FERNERKUNDUNG IN DER LANDWIRTSCHAFT.....	23
	2.2.3.2 SATELLITENGESTÜTZTE FERNERKUNDUNG IN DER LANDWIRTSCHAFT.....	25
	2.2.4 SATELLITENGESTÜTZTE FERNERKUNDUNG IM PRÄZISIONSPFLANZENBAU.....	27
	2.3 PILZKRANKHEITEN IN WEIZEN UND IHRE AUSBREITUNG.....	29
3	MATERIAL UND METHODEN.....	32
	3.1 VERSUCHSSTANDORTE.....	32
	3.1.1 DIKOPSHOF.....	32
	3.1.2 KLEIN ALTENDORF.....	34
	3.2 VERSUCHSANLAGE.....	35
	3.2.1 VERSUCHSANLAGE DIKOPSHOF 2001/2002.....	35
	3.2.2 VERSUCHSANLAGE DIKOPSHOF 2002/2003.....	36
	3.2.3 VERSUCHSANLAGE KLEIN ALTENDORF 2002/2003.....	37
	3.3 DATENERHEBUNG.....	39
	3.3.1 DATENERHEBUNG – GROUND TRUTH.....	40
	3.3.1.1 FELDAUFGANG.....	40

3.3.1.2	BODENPROBEN	41
3.3.1.3	SPAD-METER	41
3.3.1.4	BIOMASSE	41
3.3.1.5	BESTANDSHÖHE	42
3.3.1.6	KRANKHEITSBONITUR	42
3.3.1.7	KORNERTRAGSMESSUNG	42
3.3.2	DATENERHEBUNG – FERNERKUNDLICH	43
3.3.2.1	SATELLITENBILDER	43
3.3.2.2	HUBSCHRAUBERBILDER	44
3.3.2.3	BODENBILDER	45
3.4	DATENAUSWERTUNG	45
3.4.1	FERNERKUNDUNGSDATEN	45
3.4.2	GROUND TRUTH DATEN	48
3.4.3	VERGLEICH VERSCHIEDENER BONITURRASTER	48
4	ERGEBNISSE	50
4.1	VERSUCHSERGEBNISSE 2002 UND 2003	50
4.1.1	DIKOPSHOF 2002	50
4.1.2	DIKOPSHOF 2003	65
4.1.3	KLEIN ALTENDORF 2003	70
4.2	ABLEITEN VON MANAGEMENTKARTEN	80
4.3	RÄUMLICHE AUFLÖSUNG VON GROUND TRUTH DATEN ZUR VALIDIERUNG	83
5	DISKUSSION	88
5.1	RÄUMLICHE TRENNBARKEIT VON VITALITÄTSUNTERSCHIEDEN IN WEIZEN	88
5.2	UNTERSCHIEDUNG VON BIOTISCHEM UND ABIOTISCHEM STRESS	91
5.3	EINFLUSS VERSCHIEDENER BESTANDESDICHTEN, BODENVERHÄLTNISSE, ETC.	95
5.4	MÖGLICHKEIT DER KARTENGENERIERUNG	97
5.5	RÄUMLICHE AUFLÖSUNG VON GROUND TRUTH DATEN	98
5.6	DERZEITIGE OPERATIONALITÄT EINES AUF SATELLITENAUFNAHMEN GESTÜTZTEN PRÄZISIONSPFLANZENBAUS	99
6	ZUSAMMENFASSUNG	103
7	LITERATURVERZEICHNIS	106
8	ANHANG	118

8.1 VERZEICHNIS DER ANHANGSABBILDUNGEN	118
8.2 VERZEICHNIS DER ANHANGSTABELLEN	119

A Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 2.1	Das elektromagnetische Spektrum und die Bereiche verschiedener Fernerkundungssensoren. Zusätzlich sind die Strahlungsfenster der irdischen Atmosphäre sowie die Strahlungsenergie eines perfekten Schwarzsstrahlers gegenüber der realen Sonne ausgewiesen (Kappas, 1994).....	5
Abb. 2.2	Spektrum des sichtbaren Lichts von 400-700 nm.....	6
Abb. 2.3	Die Eigenschaften spiegelnder und diffuser Reflexion (Quelle: verändert nach Jensen, 2000).....	7
Abb. 2.4	Strahlungs- und Streuverhältnisse über einem Gelände. Die am Fernerkundungssensor einfallende Reflexion wird durch mehrere Faktoren beeinflusst: Absorption, Streuung, diffuse Himmelsstrahlung, u.a. (Quelle: verändert nach Albertz, 2001).....	7
Abb. 2.5	Reflexion, Absorption und Transmission an grünen Blättern (schematisch). Von den Chloroplasten wird blaues und rotes Licht weitgehend absorbiert, grünes jedoch reflektiert, so dass zusammen mit der Reflexion an der Cuticula das Blatt grün erscheint. Je die Hälfte der NIR Strahlung wird reflektiert und transmittiert (Quelle: verändert nach Guyot, 1989).....	9
Abb. 2.6	Typischer „Berg und Tal“ Verlauf der spektralen Reflexion gesunder Vegetation. Der Bereich von 400-700 nm wird durch die Blattpigmente beeinflusst, im Bereich von 700-1300 nm hat die Zellstruktur den größten Einfluß. Ab 1300 nm beginnt die Wasserabsorption (Quelle: unbekannt).....	10
Abb. 2.7	Reflexionsspektrum von 800-1400 nm eines vitalen (—) und eines seneszenten (----) Pflanzenblattes (Quelle: verändert nach Guyot, 1989).....	11
Abb. 2.8	Veränderung der spektralen Reflexion eines Winterweizenbestandes vom Schossbeginn (1) bis zur Vollreife (5) (Quelle: Schellberg und Kühbauch, 1990).....	11
Abb. 2.9	Phänologie der Pilzerkrankungen am Weizenblatt: Erysiphe graminis (Echter Mehltau), Puccinia recondita (Braunrost) und Septoria tritici (Septoriablattdürre).....	29
Abb. 3.1	Temperaturverlauf und Niederschlagsverteilung am Standort Dikopshof im Jahr 2002 vom 1. März bis 31. Juli	33
Abb. 3.2	Temperaturverlauf und Niederschlagsverteilung am Standort Dikopshof im Jahr 2003 vom 1. März bis 31. Juli	33
Abb. 3.3	Temperaturverlauf und Niederschlagsmengen am Standort Klein Altendorf im Jahr 2003 (Quelle: OVA Klein-Altendorf).....	34
Abb. 3.4	Zweifaktorieller Feldversuch auf Schlag VI der Lehr- und Forschungsstation Dikopshof im Jahr 2001/2002. N+ = normale Stickstoffversorgung, N- = reduzierte Stickstoffversorgung, F+ = mit Fungiziden, F- = ohne Fungizide; 1.WDH, 2.WDH und 3.WDH repräsentieren die Wiederholungen.....	36

- Abb. 3.5 Zweifaktorieller Feldversuch auf Schlag VIII der Lehr- und Forschungsstation Dikopshof im Jahr 2002/2003. N+ = normale Stickstoffversorgung, N- = reduzierte Stickstoffversorgung, F+ = mit Fungiziden, F- = ohne Fungizide; W1, W2, W3 repräsentieren die Wiederholungen. 37
- Abb. 3.6 Dreifaktorieller Feldversuch auf Schlag „Kammer“ Lehr- und Forschungsstation Klein Altendorf im Jahr 2002/2003. Faktoren: N+ = normale Stickstoffversorgung, N- = reduzierte Stickstoffversorgung, F+ = mit Fungiziden, F- = ohne Fungizide; Winterweizen-sorte: No = *Novalis*, W = *Wasmo*; Saatstärke in Körner/m²: a = 150, b = 300, c = 450; Wiederholungen: W1, W2, W3. 39
- Abb. 3.7 Ableiten eines Korrekturbetrages a aus dem Vergleich von Histogrammen zur Reduktion von Atmosphäreneinflüssen auf Satellitenbilddaten (Quelle: Albertz, 2001)..... 46
- Abb. 3.8 Oberfläche der Software MiniGis[®] zur Auswertung von Rasterdaten. (1) zeigt das gesamte Programm mit geladener Rasterkarte (hier *QuickBird*-NDVI-Bild) und überblendeter Region of interest (Roi) (rote, gelbe und grüne Kreise und Rechtecke). Im rechten Teil (2) ist das Ergebnis der Auswertung der grünen Roi abzulesen. „SNO“ bezeichnet die sample number, „RGB“ die zugehörigen Grauwerte, „Numb.Pixel“ die Anzahl an Pixeln mit entsprechenden RGB-Werten und „Yield“ den Gesamtertrag (Kornertrag, NDVI-Wert usw.) aus allen Pixeln. Mit dem Yield Assistant (3) können die Werte gespeichert und benutzerdefiniert benannt werden. In den Karten (4) und (5) ist beispielhaft die Parzellen- (Rechtecke) sowie Bonitурpunkttauswertung (Kreise) dargestellt. 49
- Abb. 4.1 Verteilung von Feldaufgang und SPAD-Messungen vom 08. 05. und 31. 05. 2002 in der Versuchsfläche „Schlag VI“. Zwischen den Bonitурpunkten wurde mittels Invers-Distance-Weighting interpoliert. 51
- Abb. 4.2 Verteilung des Befalls mit *Puccinia recondita* in % der Blattfläche auf den unteren, mittleren und oberen Blattetagen zu den Terminen 16. und 31. 05. 2002 in der Versuchsfläche „Schlag VI“. Zwischen den Bonitурpunkten wurde mittels Invers-Distance-Weighting interpoliert. 52
- Abb. 4.3 Verteilung des Befalls mit *Septoria tritici* in % der Blattfläche auf den unteren, mittleren und oberen Blattetagen zu den Terminen 16. und 31. 05. 2002 in der Versuchsfläche „Schlag VI“. Zwischen den Bonitурpunkten wurde mittels Invers-Distance-Weighting interpoliert. 53
- Abb. 4.4 Verteilung des Befalls mit *Erysiphe graminis* in % der Blattfläche auf den unteren, mittleren und oberen Blattetagen zu den Terminen 16. und 31.05.2002 in der Versuchsfläche „Schlag VI“. Zwischen den Bonitурpunkten wurde mittels Invers-Distance-Weighting interpoliert. 54
- Abb. 4.5 Ertragskarte von „Schlag VI“. Die Daten wurden mit einem, an ein GPS gekoppeltem, Ertragssensor erfasst und danach von dem Programm RDS Precision Farming[®] der Firma RDS Technology Ltd. in einer Konturkarte dargestellt. Eingebledet ist nachträglich der Versuchsplan mit den zwölf Versuchsparzellen..... 56

- Abb. 4.6 a: *QuickBird*-Satellitenbild vom 25. 06. 2002 in der Kanalkombination 4-2-1 (RGB), räumliche Auflösung 2,8 m. Abgebildet ist „Schlag VI“ der Lehr- und Forschungsstation Dikopshof der Universität Bonn mit der Winterweizensorte *Kanzler*. b: Versuchsaufbau mit den vier Faktorkombinationen (N+, N-, F+, F-) und drei Wiederholungen (Wdh.)..... 57
- Abb. 4.7 Grauwerte des *QuickBird*-Satellitenbildes von „Schlag VI“ am 25.06.2002 in den Kanälen Blau, Grün, Rot und NIR unter dem Einfluß der Stickstoffdüngung und Fungizidbehandlung des Weizens..... 58
- Abb. 4.8 *QuickBird*-Satellitenbild vom 25. 06. 2002: berechnete Vegetationsindizes der vier Faktorkombinationen; N+/F+ wurde als 100 % gesetzt. Eingezeichnet ist die Standardabweichung. Unterschiedliche Buchstaben in einer Grafik symbolisieren signifikante Differenzen..... 59
- Abb. 4.9 a: *QuickBird*-Satellitenbild vom 25. 06. 2002: grauwertkodierte Darstellung des berechneten NDVI; räumliche Auflösung 2,8 m. Abgebildet ist „Schlag VI“ der Lehr- und Forschungsstation Dikopshof der Universität Bonn mit der Winterweizensorte *Kanzler*. b: Versuchsaufbau mit den vier Faktorkombinationen (N+, N-, F+, F-) und drei Wiederholungen (Wdh.) 60
- Abb. 4.10 *QuickBird*-Satellitenbild vom 25. 06. 2002. Grauwerteverteilung im berechneten NDVI-Bild in den vier Faktorkombinationen des Weizenversuchs auf „Schlag VI“ zum Zeitpunkt der Satellitenbildaufnahme am 25.06.2002..... 61
- Abb. 4.11 a: *QuickBird*-Satellitenbild vom 25. 06. 2002, panchromatischer Mode, räumliche Auflösung 0,7 m. Abgebildet ist „Schlag VI“ der Lehr- und Forschungsstation Dikopshof der Universität Bonn mit der Winterweizensorte *Kanzler*. b: Versuchsaufbau mit den vier Faktorkombinationen (N+, N-, F+, F-) und drei Wiederholungen (Wdh.)..... 62
- Abb. 4.12 *QuickBird*, panchromatisches Bild. Grauwerteverteilung in den vier Faktorkombinationen des Weizenversuchs auf „Schlag VI“ zum Zeitpunkt der Satellitenbildaufnahme am 25.06.2002..... 62
- Abb. 4.13 Korrelation des NDVI mit Ertrag, SPAD-Werten und befallener Blattfläche. Verglichen wurde ein der Position des jeweiligen Boniturpunktes entsprechender kreisrunder Ausschnitt aus dem NDVI-Bild vom 25. 06. 2002 von etwa 30 m² Größe mit den ground truth Daten..... 64
- Abb. 4.14 Konturkarte von „Schlag VIII“ mit den Kornertragswerten der GPS gesteuerten Kornertragsmessung im Mähdrescher am 14.07.2003..... 66
- Abb. 4.15 Multispektrales Luftbild vom 2.06.2003 in der Kanalkombination NIR-G-R (R-G-B) von „Schlag VIII“ der Lehr- und Forschungsstation Dikopshof mit einer Auflösung von ca. 25 cm. Eingebledet ist die Versuchsanordnung mit den vier Faktorkombinationen und drei Wiederholungen. 68
- Abb. 4.16 Verlauf des NDVI von Winterweizen, Sorte *Kanzler*, Lehr- und Forschungsstation Dikopshof vom 16.05. bis 13.06.2003. Der NDVI wurde berechnet aus dem roten und NIR Kanal der multispektralen Luftbilder von „Schlag VIII“. Links ist der Verlauf für die

stickstoffreduzierten, und rechts der für die normal gedüngten Varianten abgetragen.....	68
Abb. 4.17 Nahaufnahmen der vier Faktorkombinationen von „Schlag VIII“; von links nach rechts: N+/F+, N+/F-, N-/F+, N-/F-; Aufnahmetermine von oben nach unten: 13. 05., 27. 05., 06. 06. und 20. 06. 2003. Eingebildet ist der Verlauf des NDVI über die vier Faktorkombinationen.....	70
Abb. 4.18 Verteilungskarte der Gesamt-N _{min} Werte bis in 90 cm Tiefe auf dem Versuchsfeld in Klein Altendorf im Frühjahr 2003. Der Versuchsaufbau ist eingebildet; Details siehe A-Abb. 8.8.	72
Abb. 4.19 Ertragskarte aus dem Jahr 2003 von Klein Altendorf. Die Daten wurden mit einem an ein GPS gekoppeltem Ertragssensor erfasst und danach von dem Programm RDS Precision Farming© der Firma RDS Technology Ltd. als Konturkarte dargestellt. Eingebildet ist nachträglich der Versuchsplan.....	74
Abb. 4.20 <i>QuickBird</i> -Bild vom 28.05.2003. Ausschnittsvergrößerung der Versuchsfläche in Klein Altendorf in der Kanalkombination 4-2-1. Passgenau hinterlegt ist der Versuchsaufbau. Sorte: No=Novalis, W=Wasmo; Saatstärke in Körner/m ² : a=150, b=300, c=450; Erläuterung zu den Behandlungen N+,N-,F+ und F- siehe Tab. 3.1.	75
Abb. 4.21 <i>QuickBird</i> -Bild vom 28. 05. 2003. Ausschnittsvergrößerung der Versuchsfläche in Klein Altendorf des panchromatischen Bildes. Der genaue Versuchsaufbau kann Abb. 4.20 entnommen werden.....	76
Abb. 4.22 <i>QuickBird</i> -Bild vom 28. 05. 2003. Grauwerteverteilung im panchromatischen Bild in den vier Faktorkombinationen des Winterweizenversuchs in Klein Altendorf (vgl. Abb. 4.21).	77
Abb. 4.23 <i>QuickBird</i> -Bild vom 28.05.2003: berechneter dimensionsloser Vegetationsindex WDVI. Signifikanz wurde getrennt für Sorte und Saatstärke berechnet. Werte mit gleichen Buchstaben (a, b) sind nicht signifikant verschieden.	79
Abb. 4.24 Verteilungskarten von Pilzbefall, NDVI und Ertrag aus Erhebungen an 120 Boniturstellen in zwölf Versuchspartzen von „Schlag VI“ am Dikopshof 2002. Die Einteilung der vier verschiedenen behandelten Versuchspartzen kann dem Versuchsaufbau (links) entnommen werden.....	81
Abb. 4.25 Ertragsrisikozonenkarte 2003 vom Dikopshof. In der Mitte die aus dem <i>QuickBird</i> -NDVI-Bild vom 25.06.2002 abgeleitete Ertragsrisikokarte mit den voraussichtlichen Ertragszonen; rechts die mit dem GPS-gesteuerten Mähdrescher mit Ertragssensor aufgezeichnete Ertragskarte vom 28.07.2002, links zum Vergleich der Versuchsaufbau.	83
Abb. 4.26 Korrelation des aus dem Satellitenbild vom 25. 06. 2002 berechneten NDVI's mit dem Kornertrag zum Erntezeitpunkt und der befallenen Blattfläche am 31. 05. In den oberen beiden Grafiken ist das Bestimmtheitsmaß (R ²) für die zwölf Partzen aus dem Mittelwert von zehn Boniturstellen einer Partze berechnet; in den unteren	

	Grafiken ist das Bestimmtheitsmaß über die 120 einzelnen Boniturstellen berechnet.	84
Abb. 4.27	Korrelation von NDVI und befallener Blattfläche am 31.05.: Veränderung von Bestimmtheitsmaß und Standardabweichung bei unterschiedlicher Anzahl von Boniturstellen je Parzelle.	85
Abb. 4.28	Korrelation von NDVI und Kornertrag zur Ernte: Veränderung von Bestimmtheitsmaß und Standardabweichung bei unterschiedlicher Anzahl von Boniturstellen je Parzelle.	86
Abb. 4.29	Korrelation von NDVI und Kornertrag unter Verwendung des Mittelwertes von zwei entfernt voneinander liegenden Messpunkten je Parzelle (rot umrandete Messpunkte im linken Teil der Grafik).	86
Abb. 4.30	Korrelation von NDVI und Kornertrag unter Verwendung des Mittelwertes von zwei nah beieinander liegenden Messpunkten je Parzelle (rot umrandete Messpunkte im linken Teil der Grafik).	87
Abb. 4.31	Korrelation von NDVI und Kornertrag unter Verwendung des Mittelwertes von zwei nah beieinander liegenden Messpunkten je Parzelle für den Kornertrag (rot umrandete Messpunkte im linken Teil der Grafik) und des für die gesamte Parzelle gemittelten NDVI-Wertes (blau umrandeter Bereich).	87
Abb. 5.1	Verlauf des NDVI in vier Faktorkombinationen über die Vegetationszeit, eingeblendet sind die Behandlungskombinationen und die Trockenmasse (Schellberg und Kühbauch, 1990).	94

B Verzeichnis der Tabellen

Tab. 3.1	Stickstoff- und Fungizidbehandlung der mit der Sorte <i>Kanzler</i> bestellten Weizenparzellen; Einzelfaktoren und Faktorkombinationen. ...	35
Tab. 3.2	Zeitlicher Ablauf aller aufgenommenen Parameter und der fernerkundlichen Aufnahmen im Jahr 2002 auf der Versuchsfläche der Lehr- und Forschungsstation Dikopshof	40
Tab. 3.3	Zeitlicher Ablauf aller aufgenommenen Parameter und der fernerkundlichen Aufnahmen im Jahr 2003 auf der Versuchsfläche der Lehr- und Forschungsstation Dikopshof	40
Tab. 3.4	Zeitlicher Ablauf aller aufgenommenen Parameter und der fernerkundlichen Aufnahmen im Jahr 2003 auf der Versuchsfläche der Lehr- und Forschungsstation Klein Altendorf.....	40
Tab. 3.5	Daten und Parameter des <i>QuickBird</i> Satelliten, sowie technische Eigenschaften des Sensors (verändert nach: DigitalGlobe®)	44

C Verzeichnis der Abkürzungen

A-Abb.	Anhangsabbildung
A-Tab.	Anhangstabelle
Abb.	Abbildung
al.	alii
ASTER	Advanced Spaceborn Thermal Emission and Reflection Radiometer
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
BBCH	Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Bundessortenamt und Chemische Industrie (Entwicklungsstadien mono- und dicotyler Pflanzen)
BFI	Blattflächenindex
bzw.	beziehungsweise
C	Kohlenstoff
©	Copyright
ca.	circa
CCD	Halbleitersensor (Charge Coupled Device)
cm	Zentimeter
d. h.	das heißt
DN	digital numbers
dt	Dezitonne
€	Euro
g	Gramm
GIS	Geo-Informationssystem
GLAI	Green Leaf Area Index
GPS	globales Positionierungssystem
h	Stunde
ha	Hektar
ha ⁻¹	je Hektar
i. d. R.	in der Regel
i. e. S.	im engeren Sinne
IDW	Invers Distance Weighting
IR	Infrarot

IRS	I ndian R emote S ensing S atellite
K	K elvin
Kap.	K apitel
kg	K ilogramm
km	K ilometer
km/s	K ilometer pro S ekunde
l	L iter
LACIE	L arge A rea C rop I nventory E xperiment
LAI	L eaf A rea I ndex
LED	Leuchtdiode (L ight E mitting D iode)
m	M eter
m ²	Quadratmeter
m ⁻²	je Quadratmeter
MARS	M onitoring A griculture with R emote S ensing
mm	M illimeter
MODIS	M oderate Resolution I maging S pectrometer
MSAVI	M odified S oil A djusted V egetation I ndex
MSS	M ultispectral S canner
µm	Mikrometer
N	Stickstoff
NASA	N ational A eronautics and S pace A dministration
NDVI	N ormalised D ifference V egetation I ndex
NIR	N ah-infrarot
Nm	N anometer
N _{min}	Stickstoff (mineralisiert)
No	N ovalis (Winterweizensorte)
NOAA	N ational O ceanic and A tmospheric A dministration
o. g.	oben g enannt
PP	P räzisions p flanzenbau
ProSmart:	P roduct development for S ystematic M arket and Development A pproach for R emote S ensing T echniques
PVI	P erpendicular V egetation I ndex
R ²	Bestimmtheitsmaß
®	eingetragene Marke

RGB	Rot, Grün und Blau
Roi	Region of interest
RVI	Ratio Vegetation Index
SABRES:	Services to Agri-Business by Remote Sensing
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre
ssp.	Subspecies
St. Abw.	Standardabweichung
Tab.	Tabelle
TKG	Tausendkorngewicht
TM	Thematic Mapper
TSAVI	Transformed Soil Adjusted Vegetation Index
TVI	Transformed Vegetation Index
u. a.	unter anderem
ü. N. N.	über normal Null
u. U.	unter Umständen
UTM	Universal Transverse Mercator
vgl.	vergleiche
VI	Vegetationsindex
VI's	Vegetationsindizes
VIS	visible (Licht)
Wa	Wasmo (Winterweizensorte)
WDH.	Wiederholung
WDVI	Weighted Difference Vegetation Index
WGS84	World Geodetic System 1984
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil
z. Z.	zur Zeit

1 Einleitung

Die Intensivierung des landwirtschaftlichen Pflanzenbaus hat in den vergangenen 50 Jahren u. a. zu einer Vergrößerung der Ackerschläge geführt. Die Bodenordnung in den 60er Jahren strebte Schlaggrößen von ein bis zwei Hektar an, während heute mit der Flurbereinigung Schlaggrößen von fünf bis zehn Hektar angestrebt werden. Mit Zunahme der Parzellengröße ändern sich die Amplituden von Nährstoff- und Wasserversorgung, die Heterogenität der Bodeneigenschaften und der Pflanzenbestände nimmt zu und wird augenfällig. Diese räumliche Variabilität wird bei Feldbestellung und Bestandesführung i. d. R. nicht berücksichtigt, sondern durch ganzflächig intensive Bewirtschaftung scheinbar egalisiert (Pinter et al., 2003). Das räumlich variable Ertragspotential wird folglich nicht oder nur unzureichend genutzt. Ziel des Präzisionspflanzenbaus (PP) – auch Teilflächenwirtschaft (Bill et al., 2002) oder Precision Farming genannt – ist es, die Heterogenitäten innerhalb eines Schlages zu berücksichtigen. Secher et al. (2000) beschreiben Precision Farming als Rückkehr zu den Praktiken früherer Zeiten, als die einheitlich bewirtschafteten Felder wesentlich kleiner waren und zugleich eine Bewirtschaftung stattfand, die den kleinräumig unterschiedlichen Feldzuständen Rechnung trug. Der PP zielt mit teilschlagspezifischen Maßnahmen auf eine ähnlich präzise Bewirtschaftung von großen Flächen. Die Applikation z. B. von Pflanzenschutzmitteln oder Düngern kann innerhalb eines Schlages differenziert – nicht flächeneinheitlich – durchgeführt werden und bietet so die Möglichkeit zur Verringerung des Mitteleinsatzes. Dadurch wird dem im Jahre 2005 von der Bundesregierung vorgegebenem „Reduktionsprogramm chemischer Pflanzenschutz“ und der Forderung nach einer nachhaltigen Landwirtschaft Rechnung getragen. Voraussetzung für den Präzisionspflanzenbau ist die kleinräumige, zeitlich fortlaufende Zustandserfassung der Feldschläge. Es ist absehbar, dass dabei die Fernerkundung mit optischen und Mikrowellensensoren eine zentrale Rolle spielen wird. Im Präzisionspflanzenbau schreibt Blakeman (2002) der Satellitenfernerkundung mit optischen Sensoren die Rolle eines „taktischen Feldinspektors“ zu. Denn mit Hilfe der Fernerkundung ist es möglich, komplette Betriebsflächen mit geringem Aufwand in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung aufzunehmen. Aus den gewonnenen Satellitenbildern können exakte Karten erstellt werden, die die dynamischen Veränderungen in Feldschlägen zeigen. Sind Fruchtart, Sorte sowie Witterungsbedingungen bekannt, können gegebenenfalls teilschlag-

spezifische Operationen durchgeführt und der Erfolg einer pflanzenbaulichen Maßnahme beobachtet werden (Kühbauch, 2002).

Bereits heute wird die Fernerkundung zur punktuellen Flächenkontrolle der Europäischen Agrarbeihilfen eingesetzt (BMVEL, 2004). Weitere Anwendungsmöglichkeiten der Fernerkundung reichen von globalen und regionalen Ertragsprognosen über die Erkennung von Unkrautnestern bis zur Beobachtung der Beeinträchtigung des Pflanzenwachstums durch Nährstoff- und Wassermangel (Metternicht, 2002; Blakeman, 2002; De Koeijer et al., 2000). Nicht zuletzt im Bereich des Pflanzenschutzes scheint die Anwendung von teilschlagspezifischen Maßnahmen sinnvoll, da Schaderreger in den Ackerflächen häufig aggregiert auftreten. Dadurch wird eine ausreichende Bekämpfung der Schadorganismen bei gleichzeitiger Schonung der Umwelt gewährleistet (Secher et al., 2000).

1.1 Die Ziele der Arbeit

Ziel dieser Studie ist es, die Möglichkeiten der optischen und räumlich hochauflösenden Fernerkundung als Instrument zur objektiven Zustandsbeschreibung von Pflanzenbeständen in Ackerschlägen zu nutzen. Hierbei ist der Fokus auf pilzliche Schaderreger sowie die Stickstoffversorgung gerichtet. In Parzellenversuchen wurden durch unterschiedliche Stickstoffdüngung und Fungizidbehandlung unterscheidbare Vitalitätsunterschiede hergestellt. Dabei wurde eine vor allem gegen Pilzkrankheiten empfindliche Weizensorte eingesetzt. Von diesen Pflanzenbeständen wurden, über die Wachstumsperiode verteilt, Aufnahmen mit dem optisch hochauflösenden Sensor des *QuickBird*-Satelliten erstellt.

Daraus ergaben sich anfangs folgende Fragestellungen:

- Ist anhand der Satellitenbilder eine eindeutige, teilflächige Identifikation gestresster Pflanzenbestände möglich?
- Können der abiotische und der biotische Stress räumlich, zeitlich oder spektral voneinander abgegrenzt werden?
- Lassen sich aus den gewonnenen Fernerkundungsdaten Karten mit Managementzonen (Applikationskarten) ableiten?

Im Verlauf des ersten Versuchsjahres ergab sich zusätzlich eine weitere Fragestellung, die einen weiteren Einflussfaktor berücksichtigt, der auf die Bestandesreflexion Einfluss hat:

- Wird die durch unterschiedliche Stickstoffdüngung und Fungizideinsatz ausgelöste Reflexionsveränderung des Bestandes zusätzlich durch die Bestandesdichte beeinflusst?

Die Frage der räumlichen Auflösung der parallel zu den Fernerkundungsdaten durchgeführten Bodenerhebungen (ground truth) war nicht nur aufgrund der zu erwartenden Raummuster in den Feldversuchen zu behandeln, sondern auch im Hinblick auf die hohe räumliche Auflösung von Sensoren der jüngsten Satellitengeneration wie *IKONOS* oder *QuickBird*:

- Welche räumliche Auflösung von ground truth Daten in einem Schlag ist sinnvoll, um Daten hochauflösender optischer Sensoren teilschlagspezifisch zu validieren?

2 Grundlagen und Literaturübersicht

Der folgende Abschnitt berichtet den Stand des Wissens zum Thema der Arbeit. Zuerst wird eine kurze Einführung in die Radiometrie gegeben, wobei der Schwerpunkt auf den Eigenschaften von Pflanzenbeständen liegt. Daran anschließend folgt eine Abhandlung zum Einsatz der Fernerkundung in der Landwirtschaft.

Der Forschungsbereich des Präzisionspflanzenbaus ist eine neue, seit circa zehn Jahren im Aufbau befindliche Technologie innerhalb der Landwirtschaft (Pinter et al., 2003). Noch fehlen aber wichtige Methoden für die Bereitstellung von Daten über die räumliche Verteilung von Boden- und Pflanzeigenschaften und für die Unterstützung der komplexeren pflanzenbaulichen Entscheidungen. Zudem weist die Wissenschaft auf noch offene Verständnisprobleme und fehlende Methoden hin (Bill et al., 2002). Trotzdem gibt es erste Anwendungen der Präzisionslandwirtschaft in der Praxis. Ertragssensoren sind seit Jahren erfolgreich im Einsatz (DLG, 2001; Isensee und Krippahl, 2001); auch einfache Konstruktionsprinzipien wurden verwirklicht und sind bereits im praktischen Einsatz, wie z. B. der Pendelsensor, der zur teilflächigen Ausbringung von Halmstabilisatoren und Fungiziden eingesetzt wird (Ehlert und Dammer, 2002). Der N-Sensor von *Agri Con*[®] wird in der teilflächigen Ausbringung von Stickstoff eingesetzt. Ein kameratechnisches Prinzip, mit dem einzelne Pflanzenarten aus Binärbildern rechnergestützt in Echtzeit identifiziert und mit GPS verarbeitet werden, wird zur teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle eingesetzt (Gerhards und Christensen, 2003; Dicke et al., 2004).

2.1 Radiometrie

2.1.1 Radiometrische Grundlagen

Radiometrie ist die Wissenschaft von der Messung elektromagnetischer Strahlung in allen Wellenlängenbereichen. Diese elektromagnetische Strahlung ist eine wellenförmige Energieabgabe von Materiekörpern, die sich mit Lichtgeschwindigkeit im Raum ausbreitet. Nach der Wellentheorie transportiert sie elektrische und magnetische Energie in unterschiedlicher Wellenform. Die Wellenform ist je nach Entstehung und Quelle von unterschiedlicher, jedoch gleich bleibender Länge und

Frequenz. Dieses so genannte „elektromagnetische Spektrum“ reicht von der hochfrequenten kosmischen Strahlung über die niederfrequenten Radiowellen bis hin zum Wechselstrom (Hildebrandt, 1996) (Abb. 2.1). Die eingestrahlte Energie kann nach dem Energieerhaltungssatz $r_{\lambda} + a_{\lambda} + t_{\lambda} = 1$ nicht verloren gehen, sondern wird von dem Körper auf den sie auftrifft ganz oder teilweise reflektiert r , absorbiert a oder transmittiert t .

Zum besseren Verständnis wird eine Definition der Begriffe Reflexion, Absorption und Transmission gegeben (Jensen, 2000):

Reflexion ist der Vorgang des Zurückwerfens von elektromagnetischer Strahlung an einem Körper ohne Änderung der elektromagnetischen Eigenschaft.

Absorption ist der Prozess, bei dem die einfallende Strahlung von den Körper aufgenommen und in andere Energieformen umgewandelt wird, z.B. Wärme.

Transmission ist der Durchgang von Strahlung durch einen Körper ohne Änderung der elektromagnetischen Eigenschaft.

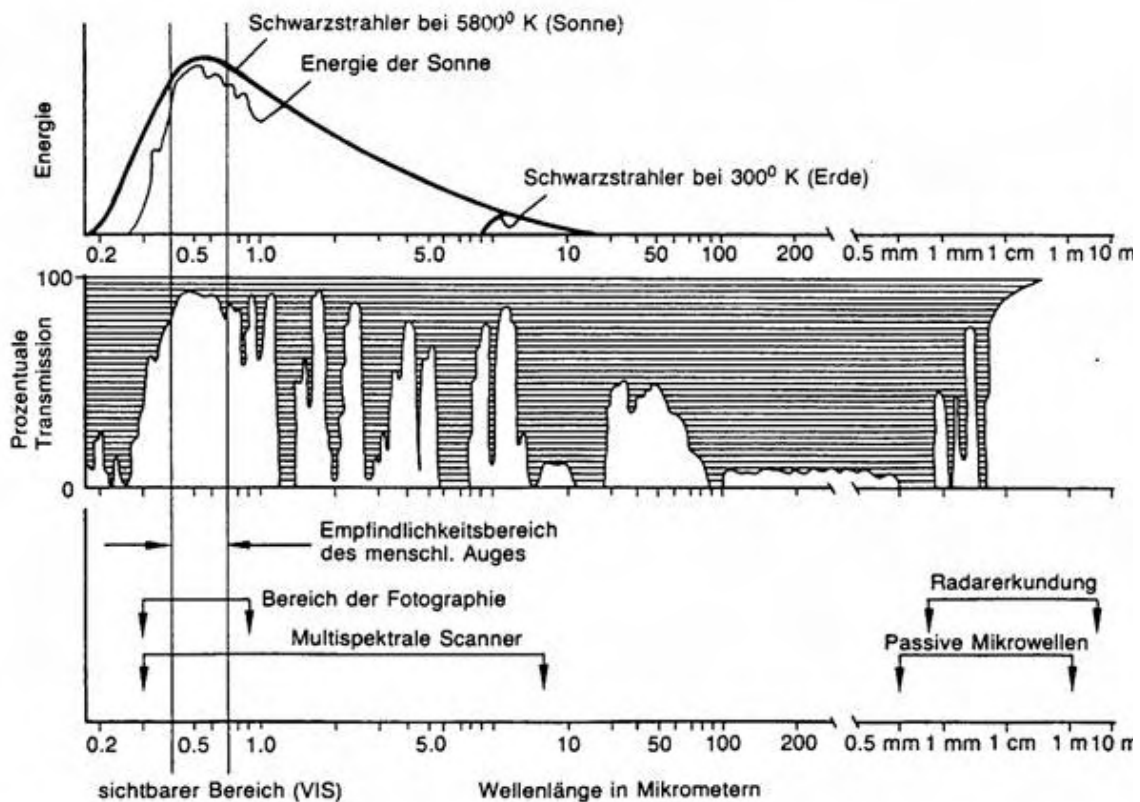


Abb. 2.1 Das elektromagnetische Spektrum und die Bereiche verschiedener Fernerkundungssensoren. Zusätzlich sind die Strahlungsfenster der irdischen Atmosphäre sowie die Strahlungsenergie eines perfekten Schwarzstrahlers gegenüber der realen Sonne ausgewiesen (Kappas, 1994).

Die Fernerkundung profitiert davon, dass die auf die beobachteten Objekte eintreffende Strahlung nicht vollständig absorbiert, sondern unterschiedlich stark in den verschiedenen spektralen Bereichen in Teilen reflektiert wird. Aus den Reflexionssignalen können im Vergleich mit der Wirklichkeit der betrachteten Objekte („ground truth“) die objektspezifischen Reflexionseigenschaften identifiziert werden. Das „sichtbare Licht“ umfasst nur einen sehr schmalen Wellenlängenbereich, da das menschliche Auge nur in dem Bereich von 400-700 nm empfindlich ist. Die Farbe „blau“ wird im Spektralbereich von 400-500 nm wahrgenommen, die Farbe „grün“ zwischen 500-600 nm und die Farbe „rot“ zwischen 600-700 nm. Zwischen den Wellenlängenbereichen gibt es keine exakte Trennlinie, die Grundfarben blau, grün und rot gehen fließend ineinander über (Abb. 2.2).

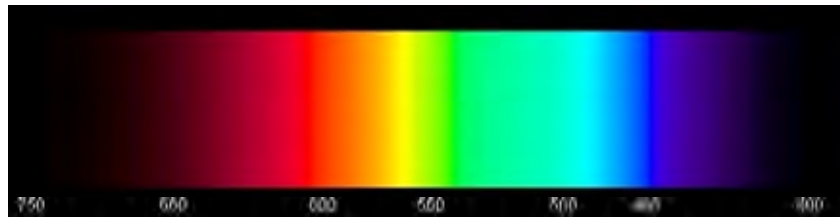


Abb. 2.2 Spektrum des sichtbaren Lichts von 400-700 nm.

Bei der optischen, berührungslosen Messung werden nur die vom Körper reflektierten elektromagnetischen Strahlen gemessen. Die absorbierten und transmittierten Anteile des Spektrums gelangen nicht zum Sensor. Die Strahlstärke und Richtung der reflektierten Strahlung hängt von der Streuungsstärke des einfallenden Lichtes am Körper ab. Besitzt der Körper eine glatte Oberfläche (spiegelnd), ist im Idealfall der Einfallwinkel des eingestrahnten Lichts gleich dem gegenüberliegenden Ausfallwinkel. Dem gegenüber wird mit zunehmender Rauigkeit der betrachteten Oberfläche die Streuung des reflektierten Lichts immer größer (Abb. 2.3). Daher entsteht der Messwert am Sensor nicht nur aus der direkten Reflexion, sondern zusätzlich aus der einfallenden Streureflexion von der Umgebung. Aus Abb. 2.4 geht hervor, dass zusätzlich noch die Streuung und Reflexion der Strahlung in der Atmosphäre an kleinsten Partikeln die Messung am Sensor beeinflussen.

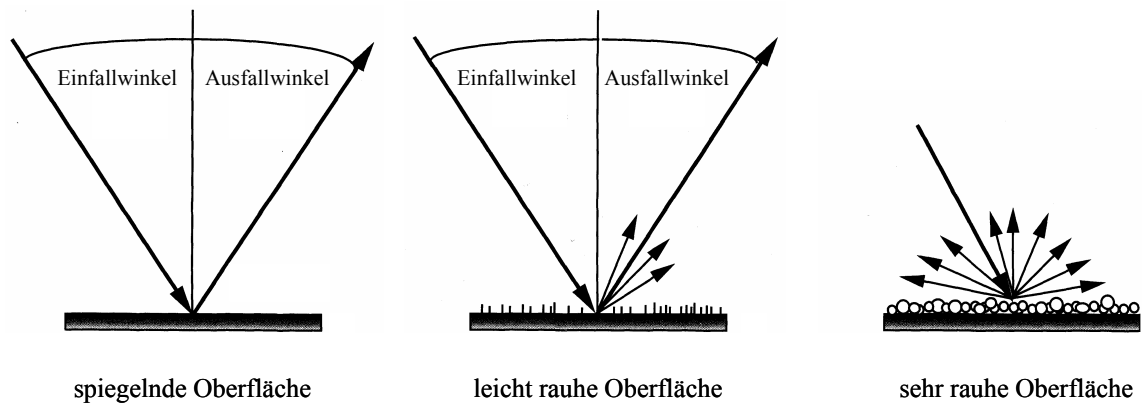


Abb. 2.3 Die Eigenschaften spiegelnder und diffuser Reflexion (Quelle: verändert nach Jensen, 2000)

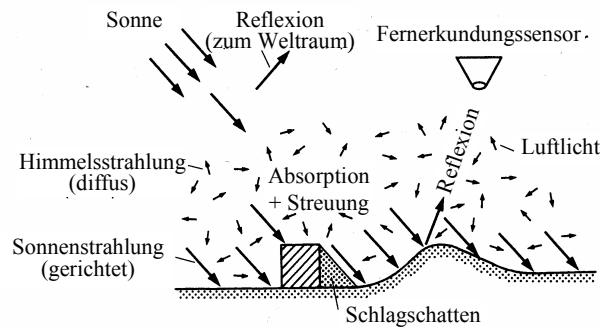


Abb. 2.4 Strahlungs- und Streuungsverhältnisse über einem Gelände. Die am Fernerkundungssensor einfallende Reflexion wird durch mehrere Faktoren beeinflusst: Absorption, Streuung, diffuse Himmelsstrahlung, u.a. (Quelle: verändert nach Albertz, 2001)

Aus den in Abb. 2.3 geschilderten Verhältnissen ergibt sich zugleich, dass die Blickrichtung eines Sensors in Relation zur Strahlungsquelle die Intensität der optischen Wahrnehmung beeinflusst. Je nach Azimut- und Zenitwinkel des Sensors oder der Sonne kommt es bei gleichen Einstrahlungsstärken zu Unterschieden in der Messung (Ranson et al., 1985). Bei Fernerkundungsmessungen zu unterschiedlichen Tageszeiten ist darauf Rücksicht zu nehmen (Schneider und Manakos, 2000). Untersuchungen an mehreren Kulturarten zeigten einen generell gültigen Zusammenhang zwischen den aktuellen Einstrahlungsbedingungen und der gemessenen Reflexion von den Pflanzen (Richardson und Wiegand, 1977; Wiegand et al., 1991). Dies macht deutlich, dass die am Sensor gemessene Reflexion sich nicht nur aus den Eigenschaften des Bestandes zusammensetzt.

Während zur Kartierung der zonalen Inhomogenität bzw. der Teilschläge in landwirtschaftlich genutzten Flächen die relativen Unterschiede in wenigen

Abstufungen genügen, und damit die bidirektionale Reflexion des Lichts weniger stört, muß bei quantitativen Messungen darauf Rücksicht genommen werden. Im o. g. N-Sensor wird das Phänomen der Bidirektionalität z. B. dadurch kompensiert, dass die Reflexionssignale der Pflanzenbestände aus vier Blickrichtungen in ein Mischsignal integriert werden (Reusch, 2001).

2.1.2 Radiometrische Eigenschaften von Pflanzen und Pflanzenbeständen

In Abb. 2.5 ist der Strahlungsgang in einem Blatt im Querschnitt dargestellt; als Lichtquelle kann man sich Sonnenlicht oder eine künstliche Lichtquelle vorstellen. Das Blatt ist aufgebaut aus Cuticula, oberer Epidermis, Palisadenparenchym, Schwammparenchym, Interzellularen und der unteren Epidermis, die jeweils andere Lichtbrechungseigenschaften haben. Dadurch ergeben sich innerhalb des Blattes verschiedene Wege der elektromagnetischen Strahlung. An der Cuticula werden Teile des elektromagnetischen Spektrums direkt reflektiert, während andere innerhalb des Blattes mehrfach abgelenkt werden und abschließend als diffuse Reflexion aus dem Blatt heraustreten. Diese interne Reflexion wird durch den Brechungsindexwechsel von Luft zu Wasser begünstigt, also insbesondere an den interzellulären Zwischenräumen. Die Absorption des sichtbaren Lichts findet hauptsächlich im Schwammparenchym statt, da sich hier die Chloroplasten befinden, welche bestimmte Wellenlängenbereiche zu fotochemischen Reaktionen nutzen. Andere Wellenlängenbereiche können von Pflanzen nicht absorbiert oder reflektiert werden, sondern transmittieren diese unverändert beziehungsweise werden an Grenzflächen der Zellstrukturen, Zellwänden und Membranen nur leicht gebrochen oder gestreut. Zusätzlich hängt die Reflexion an der Blattoberfläche von der Art und Dicke der Wachsschicht sowie des Vorhandenseins und der Dichte der feinen Blatthaare ab, welche die Reflexion des gesamten Wellenlängenbereichs beeinflussen können.

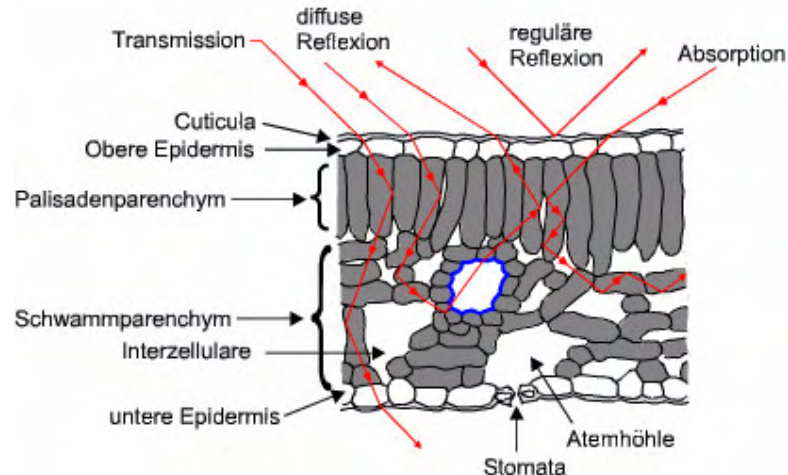


Abb. 2.5 Reflexion, Absorption und Transmission an grünen Blättern (schematisch). Von den Chloroplasten wird blaues und rotes Licht weitgehend absorbiert, grünes jedoch reflektiert, so dass zusammen mit der Reflexion an der Cuticula das Blatt grün erscheint. Je die Hälfte der NIR Strahlung wird reflektiert und transmittiert (Quelle: verändert nach Guyot, 1989).

Die grüne Farbe eines Blattes kommt dadurch zustande, dass grünes Licht hauptsächlich an Cuticula und Chloroplasten und in größeren Anteilen als rot oder blau reflektiert wird. Licht im blauen und roten Wellenlängenbereich ist fotochemisch aktiv und wird somit in der Pflanze zum größten Teil (70-90%) von den Chloroplasten absorbiert. In den Chloroplasten sind die enthaltenen Blattpigmente Carotin, Chlorophyll und Xanthophyll für die Absorption des eingestrahnten Lichts verantwortlich. Da das Chlorophyll einen Anteil von 70-80% an den Blattpigmenten hat, beeinflusst es die Reflexion des einfallenden Sonnenlichts maßgeblich.

Im Bereich von 700-1300 nm ist die nah-infrarote (NIR) Reflexion vitaler Blätter besonderes hoch, da es in diesem Spektralbereich nur eine sehr geringe Absorption durch subzelluläre Partikel oder Pigmente gibt, der größte Teil der einfallenden Strahlung aber an den Verbindungsstellen der Zellwände zerstreut wird (Slaton et al., 2001).

Tucker und Garratt (1977) nehmen aufgrund der oben genannten Ursachen eine Einteilung der Wellenlängenbereiche von 400-2200 nm in drei Abschnitte vor. Im Bereich des sichtbaren Lichts von 400-700 nm ist die Reflexion hauptsächlich durch die foto-synthetisch aktiven Pigmente bedingt. Der Wellenlängenbereich von 700-1300 nm unterliegt fast keiner Absorption und wird jeweils zur Hälfte reflektiert und transmittiert. Durch das in der Pflanze enthaltene Wasser werden bestimmte Wellenlängenbereiche zwischen 1300 und 2200 nm stark absorbiert. Dadurch ergibt

sich für gesunde Vegetation der typische „Berg und Tal“ Verlauf der spektralen Reflexionskurve (Abb. 2.6).

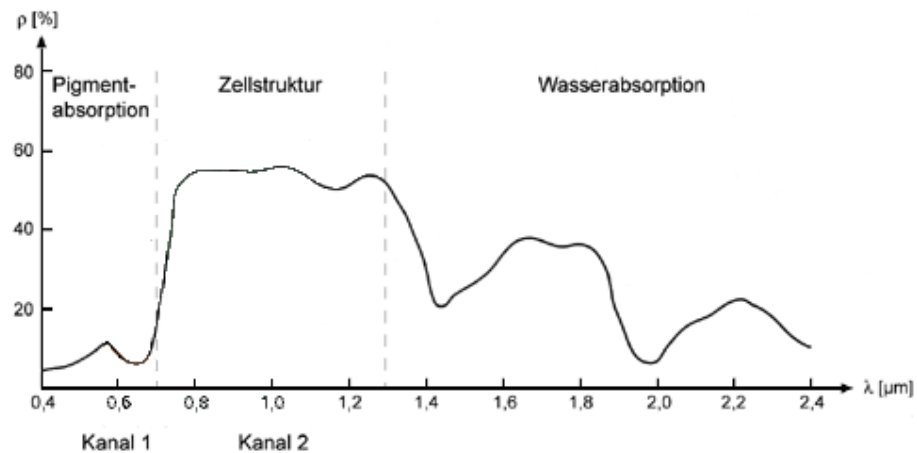


Abb. 2.6 Typischer „Berg und Tal“ Verlauf der spektralen Reflexion gesunder Vegetation. Der Bereich von 400-700 nm wird durch die Blattpigmente beeinflusst, im Bereich von 700-1300 nm hat die Zellstruktur den größten Einfluß. Ab 1300 nm beginnt die Wasserabsorption (Quelle: unbekannt).

Für die angewandte Fernerkundung ist zu beachten, dass das spektrale Verhalten von Blättern bzw. die im Labormaßstab gemessenen Reflektanzen nicht im gleichen Maß auf Feldbedingungen übertragen werden können. Im Gegensatz zur Reflexion eines einzelnen Blattes machen sich im Pflanzenbestand Einflüsse des Bodens bemerkbar, dessen Reflexionseigenschaft sich deutlich von der Reflexion pflanzlicher Biomasse unterscheidet (Guyot, 1989).

Vor allem mit fortschreitender Seneszenz und Reife des Pflanzenbestandes wirkt sich der Einfluss des Bodens aus. Mit Seneszenz und Reife werden die Pflanzenbestände i. d. R. dürr und die ausgedörrten, z. T. abgefallenen Blätter geben den Strahlungsweg frei zum Boden. Damit ändert sich mit fortschreitender Seneszenz und der Art und Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Flächen das Reflexionsverhalten grundlegend. Während z.B. ein seneszenten Einzelblatt auch im NIR stark reflektiert (Abb. 2.7), weist ein seneszenten Pflanzenbestand im selben Spektralbereich eine starke Absorption auf (Abb. 2.8).

Weiterhin wird die Reflexion von Blättern durch verschiedene andere Faktoren beeinflusst, wie z.B. die Anzahl an Blattpigmenten, die Blattstellung, die Blattoberflächentextur, das Entwicklungsstadium der Pflanze, den Wachstumsbedingungen,

die Lichteinstrahlungsverhältnisse und durch Stressfaktoren wie z.B. Pilzkrankheiten (Nilsson, 1995).

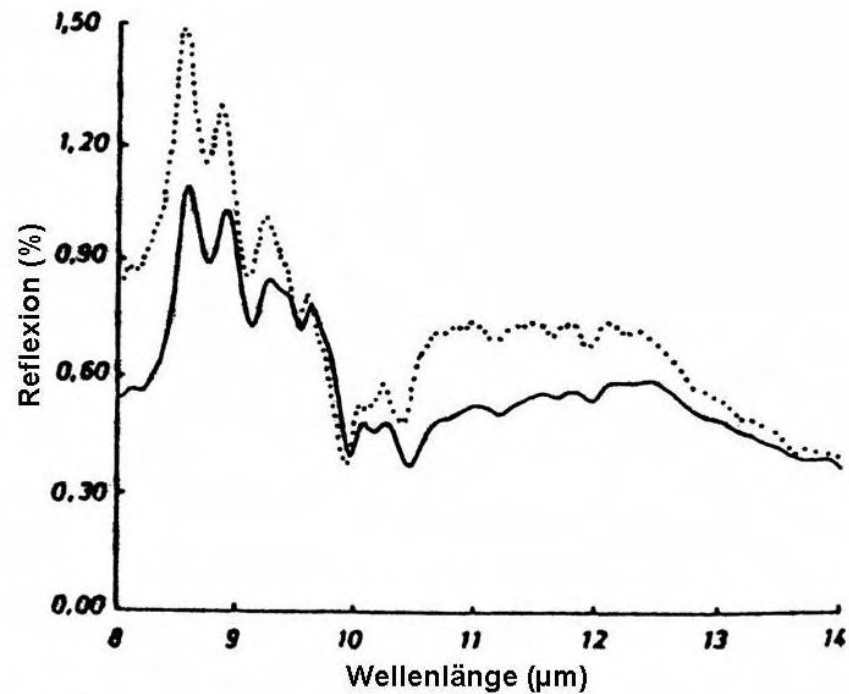


Abb. 2.7 Reflexionsspektrum von 800-1400 nm eines vitalen (—) und eines seneszenten (····) Pflanzenblattes (Quelle: verändert nach Guyot, 1989).

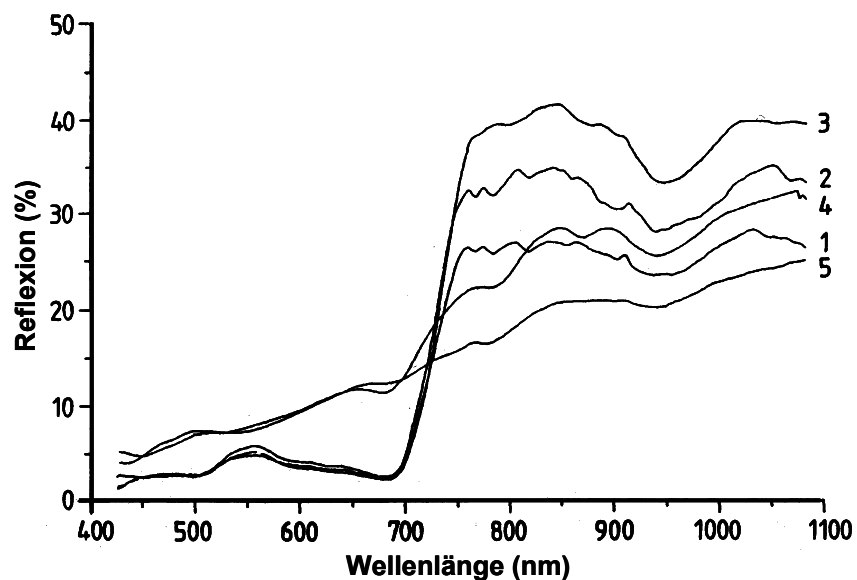


Abb. 2.8 Veränderung der spektralen Reflexion eines Winterweizenbestandes vom Schossbeginn (1) bis zur Vollreife (5) (Quelle: Schellberg und Kühbauch, 1990).

Ahrlachs und Bauer (1983) untersuchten die Beziehung zwischen Parametern von Sommerweizenbeständen, wie z.B. des Blattflächenindex¹ (BFI) auf die spektralen Reflexionseigenschaften für den Einsatz in Wachstums- und Ertragsmodellen. Bei der Korrelations- und Regressionsanalyse der Spektrometerwerte fanden sie hohe Korrelationen im NIR Wellenlängenbereich (760-900 nm) mit dem Blattflächenindex und dem Grad der Bodenbedeckung, wohingegen im mittleren IR Wellenlängenbereich (2080-2350 nm) Variationen in der Frisch- und Trockenmasse sowie dem Pflanzenwassergehalt nachgewiesen werden konnten. Die Beziehung dieser Pflanzenparameter zur Reflexion ist allerdings abhängig vom Entwicklungsstadium des Bestandes. Die besten Korrelationen in den o. g. Wellenlängenbereichen ergaben sich, zwischen Reflexion und Pflanzenparametern, in der Zeitspanne zwischen Bestockung und Blüte des Getreides. Ahrlachs und Bauer kamen zu dem Schluss, dass zu einem früheren Zeitpunkt der Einfluss des Bodens zu hoch und mit Beginn der Reife die Blattseneszenz die anderen Parameter überlagert.

2.1.3 Auswirkung von Seneszenz und Stressfaktoren auf die Reflexion von Pflanzen

Eine der wesentlichen Aufgaben des Präzisionspflanzenbaus besteht darin, auf die räumlich und zeitlich variablen Vitalitätsunterschiede von Pflanzenbeständen rechtzeitig und ortsgenau zu reagieren. Vitalitätsverluste sind stets an den Reifeprozess und der artspezifischen Alterung der Pflanze gebunden, können ihre Ursache aber auch in Mangelerscheinungen und Stress haben.

Nach Jackson (1986) werden alle biotischen und abiotischen Faktoren, die das Wachstum einer Pflanze beeinflussen, als Stressfaktoren bezeichnet. Nur wenn dieser Stress auf ein Minimum reduziert wird, können maximale Ernteerträge erzielt werden. Um den Effekt auf den Ertrag zu minimieren, muss der Stressfaktor so früh wie möglich erkannt werden, damit über die Bestandesführung rechtzeitig spezifische Maßnahmen ergriffen werden können. Auch das Erscheinungsbild kann unterschiedlich sein, da Stress an Pflanzen vorübergehend oder chronisch auftreten kann.

¹ Der Blattflächenindex, engl. Leaf area index = LAI, gibt die Fläche aller Blätter pro horizontaler Flächeneinheit an. Er wird von 0 = ohne Laub, 1 = Blattfläche entspricht der horizontalen Bodenfläche, 2 = Blattfläche ist doppelt so groß wie die Bodenfläche usw. gezählt (Hildebrandt, 1996).

Da durch Stress verursachte Veränderungen der Pflanzen signifikante Auswirkung auf die Intensität und spektrale Zusammensetzung der von Pflanzen reflektierten und emittierten Strahlung haben, findet sich gerade hier ein viel versprechendes Einsatzgebiet der Fernerkundung. Seit Mitte der 80iger Jahre wird z. B. mit NOAA²-Daten die globale Ausbreitung vitaler Vegetation beobachtet, um damit gerade in den von Trockenheit bedrohten Regionen rechtzeitig Ernte- und Bedarfsprognosen für Nahrungs- und Futterpflanzen zu erstellen (Puyou-Lascassies et al., 1994; Atzberger, 1998). Einschränkungen in der Anwendung der Fernerkundung ergeben sich insofern, dass der Vitalitätsverlust der Vegetationsdecke zwar quantifiziert, die Ursache des Vitalitätsverlustes aber mit der z. Z. verfügbaren spektralen Auflösung nicht beschrieben werden kann. So kann mit Hilfe der Fernerkundung weder der prozentuale Befall mit Pilzkrankheiten noch die Versorgung mit Stickstoff direkt bestimmt werden. Über den Umweg anderer optisch messbarer Hilfsgrößen, wie etwa dem Chlorophyllgehalt oder der Pigmentkonzentration, welche im direkten Zusammenhang mit der Zielgröße stehen, kann dies jedoch geschehen.

Stress durch Pathogene, Wasser- und Nährstoffmangel usw. sowie normale Seneszenz während der Abreife von Pflanzen verursachen in der Regel einen niedrigeren Chlorophyllgehalt im Blatt. Hierdurch steigt der prozentuale Anteil der Reflexion an den Blattpigmenten Carotin und Xanthophyll. Daher verschiebt sich die grüne Reflektionsspitze im Wellenlängenspektrum von normalerweise etwa 550 nm in Richtung längere Wellenlängen (Adams et al., 1999). Zusätzlich verringert sich normalerweise bei Stress der Wassergehalt in der Pflanze, was einen Einfluss auf die Reflexion des gesamten Spektrums von 400-2500 nm hat (Gausman, 1974). Dies führt zu einer geringeren Reflexion im NIR Wellenlängenbereich und einem Anstieg der Reflexion im roten Wellenlängenbereich.

In den eigenen Untersuchungen wurden experimentell in Großparzellen Vitalitätsunterschiede am Weizen erzeugt, durch relativen Stickstoffmangel und durch Krankheitsbefall an einer krankheitsanfälligen Weizensorte. In der Literatur werden über Untersuchungen zum Einfluss von Nährstoffmangel auf das Reflexionsverhalten von Pflanzenbeständen unter Labor- wie auch Feldbedingungen berichtet. Hierbei zeigte sich im Allgemeinen ein Anstieg der Reflexion im sichtbaren Wellenlängenbereich und ein Rückgang der Reflexion im nah- und mittel-infraroten

² NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration, USA.

Bereich (Al-Abbas et al., 1974; Jackson et al., 1981; Walburg et al., 1982; Nilsson, 1984).

Versuche von Kurschner et al. (1984) ergaben an Blättern von vier verschiedenen mit Mehltau befallenen Pflanzenarten erst bei einem Befall von >20 % Veränderungen in der Reflexion. Die zwei Wellenlängen 540 und 650 nm zeigten bei den Radiometermessungen die höchste Sensitivität gegenüber Veränderungen des Krankheitsbefalls. Hierbei ergab sich bei den Blättern der Eiche und des Rotklee ein linearer Zusammenhang zwischen Reflexion und Befallstärke sowie bei den Blättern des Kopfsalates und der Gurke ein nicht-linearer Zusammenhang.

Spektrometeruntersuchungen mit einer spektralen Auflösung von 2 nm im Wellenlängenbereich von 400-1100 nm von Lorenzen und Jensen (1989) an mit Mehltau infizierten Gerstenpflanzen zeigten erste signifikante Veränderungen in der Reflexion sechs Tage nach der Inokulation der Blätter. Zu diesem Zeitpunkt bedeckten die Mehltaupusteln 30-50% der Blattfläche. Die größten Unterschiede im Verhältnis zu gesunden Pflanzen zeigten sich in den Chlorophyllabsorptionsbanden bei 498 nm und 664 nm. Da keine Veränderung des Wassergehaltes in den inokulierten Blättern in den frühen Entwicklungsphasen der Pilzinfektion beobachtet wurde und eine enge Korrelation des blauen wie auch des roten Wellenlängenbereichs mit dem Blattchlorophyllgehalt bestand, konnte die Zunahme in der Reflexion diese Wellenlängen der fortschreitenden Degeneration des Chlorophylls zugeschrieben werden.

Polischuk et al. (1997) zeigten den Einfluss des Tabakmosaikvirus an Tomaten auf die Reflexion von Tabakpflanzen (*Nicotiana debneyi*). Dazu ermittelten sie in unterschiedlichen Entwicklungsstadien des Virus die spektrale Reflexion der Pflanzen. Zehn Tage nach Inokulation der Pflanzen konnten sie anhand der spektralen Reflexion eine Veränderung im Chlorophyllgehalt der Pflanzen feststellen, während die visuelle Unterscheidung zwischen gesunden und infizierten Pflanzen erst nach drei Wochen möglich war. Solche Befunde interessieren vor allem deshalb im PP, weil die Früherkennung von Ursachen eines Vitalitätsverlustes der Pflanzen für die praktische Bestandesführung von eminenter Bedeutung ist.

Mit einem Spektrographen, der ein spektrales Bild mit einer räumlichen und einer spektralen Achse abbildet, konnten Bravo et al. (2003) Gelbrost an Winterweizen aus etwa 1,5 m Höhe nachweisen. Mit den vier Wellenlängenbändern 543 ± 10 nm, 630 ± 10 nm, 750 ± 10 nm und 861 ± 10 nm konnten sie mit einer Genauigkeit von

96% die Pilzerkrankung im Pflanzenbestand, innerhalb von zehn Tagen nach Inokulierung, nachweisen.

Auch die Nährstoffversorgung von Pflanzen kann sich in der spektralen Reflexion bemerkbar machen. Masoni et al. (1996) untersuchte den Einfluss von Eisen, Schwefel, Magnesium und Mangan auf das spektrale Verhalten von Gerste, Weizen, Mais und Sonnenblumen. Auch an *Pinus elliotii* ssp. beobachteten Cibula und Carter (1992) einen Anstieg der Reflexion im sichtbaren Bereich, wenn diese durch Ectomyorrhizae-Pilze in der Nährstoffaufnahme beeinflusst wurden.

Fernerkundung bietet die Möglichkeit, flächenhafte Daten berührungslos zu verschiedenen Zeitpunkten zu erheben und umfasst nach einer Definition von Jürgens (2000) alle berührungslosen Verfahren. Tatsächlich reicht die Technik des PP vom Nahbereich, mit Abständen des Sensors zum Objekt von wenigen Dezimetern mit bodengestützten Geräten bis zu mehreren 100 km mit Satellitensensoren.

Hatfield (1993) schließt seinen Review über die Erkennung von Pflanzenstress anhand der nah- und fernerkundlichen Messung der Reflexion mit dem Hinweis, dass unterschiedliche Befunde nicht zuletzt auf dem Einfluss der verwendeten Messtechniken und unterschiedlicher Auswerteverfahren beruhen. Eine Standardisierung letzterer würde zu einer besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse und effektiveren Weiterentwicklung führen.

2.2 Operationelle Fernerkundung

2.2.1 Prinzipien der Fernerkundung

„Fernerkundung im umfassenden Sinne ist die Aufnahme oder Messung von Objekten, ohne mit diesen in körperlichen Kontakt zu treten, und die Auswertung dabei gewonnener Daten oder Bilder zur Gewinnung quantitativer oder qualitativer Informationen über deren Vorkommen, Zustand oder Zustandsänderung ...“ (Hildebrandt, 1996)

Zum besseren Verständnis einige Definitionen aus dem Bereich der Fernerkundung:

Räumliche Auflösung bezeichnet die Fläche am Boden, die von einem Pixel des Sensors repräsentiert wird, d. h. mit einer höheren Anzahl an Pixel pro Flächen-

einheit am Boden, können kleinere Objekte am Boden von ihrer Umgebung abgegrenzt werden (Lamb, 2000).

Radiometrische Auflösung ist die Anzahl an numerischen Schritten, die den Pixeln zur Verfügung stehen, um Helligkeitswerte entsprechend der Intensität der einfallenden Strahlung abzuspeichern; z.B. 8 bit = 256 Werte: 0 = Schwarz, 255 = Weiß (Lamb, 2000).

Spektrale Auflösung ist die Anzahl an definierten Wellenlängenbändern, in denen ein Fernerkundungsinstrument sensitiv ist, und die gleichzeitig aufgenommen werden können (Jensen, 2000).

Zeitliche Auflösung gibt an, wie oft ein Fernerkundungssystem Bilder einer bestimmten Region wiederholt aufnehmen kann (Jensen, 2000).

Schwadbreite bezeichnet den Aufnahmestreifen eines Sensors in der Fernerkundung, gemessen auf der Erdoberfläche in Kilometern senkrecht zur Flugbahn.

In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff Fernerkundung mit optischen, digitalen Sensoren verbunden, die im sichtbaren wie NIR Wellenlängenbereich aufnehmen. Auf weitere Verfahren der Fernerkundung, wie z. B. mit Radarstrahlen oder Thermografie wird nicht eingegangen.

Mit dem Aufkommen von digitalen Fernerkundungssystemen war es möglich, eine Steigerung des Informationsumfangs gegenüber den klassischen dreikanaligen Farb- oder Falschfarbaufnahmen zu erreichen. Zum einen konnte die Anzahl und Bandbreite der spektralen Kanäle erweitert bzw. den Bedürfnissen des jeweiligen Aufgabengebietes besser angepasst werden, zum anderen bieten die digitalen Systeme eine höhere radiometrische Auflösung und einen schnellen Zugriff auf die Daten (Schiewe und Ehlers, 2004; ProSmart, 1999). Da sich die digitalen Daten per Funk übertragen lassen, ist es möglich, Satelliten lange Zeit im Orbit zu stationieren und permanent Bilddaten aufzunehmen und zu Bodenstationen zu senden.

1972 begann mit *Landsat-1* die zivile Erdbeobachtung. Zusammen mit den nachfolgenden Satelliten *Landsat-2* und *-3* entstand ein System für regelmäßige Beobachtungen der Landoberfläche. Die Satelliten hatten zu dieser Zeit eine räumliche Auflösung von 60 x 80 m bei 185 km Schwadbreite sowie eine spektrale Auflösung von vier Kanälen im sichtbaren und NIR Bereich. Mit dem Start von

Landsat-4 und *-5* wurde die räumliche Auflösung auf 30 m verbessert und zusätzlich noch zwei weitere infrarote Kanäle sowie ein Thermalkanal in das Sensorsystem eingebunden. Einige Kanäle wurden speziell für die Vegetationsbestimmung ausgelegt. So wurde z. B. der rote Kanal besonders engbandig ausgelegt (630-690 nm), um Chlorophyllreflexionen besser erfassen zu können. Hierdurch konnte der Einsatz der satellitengestützten Multispektralanalyse für Anwendungen in der Klassifikation von Vegetation und Landschaftsräumen ermöglicht werden.

Erweitert wurde die Palette operationell verfügbarer spektraler Kanäle mit dem französischen *SPOT*³-, der im Jahr 1986 gestartet wurde und zusätzlich zu drei Spektralkanälen mit einem panchromatischen Kanal in einer räumlichen Auflösung von 5 m ausgerüstet war. Darüber hinaus konnte der Sensor des Satelliten erstmalig seitlich geschwenkt werden, wodurch die Wiederholrate verkürzt und stereoskopisches Aufnehmen ermöglicht wurden.

Andere Satellitensysteme sind zum Teil seit zwanzig Jahren im Einsatz. Hierzu gehören seit Mitte der 80iger Jahre die *NOAA/AVHRR*⁴ Satelliten der National Oceanographic and Atmospheric Administration (USA) mit 1 km Pixelgröße. Russische *Resurs*-Satelliten sind seit 1994 im Orbit, mit höherer räumlicher Auflösung, dafür aber geringerer globaler Deckung wie die *NOAA/AVHRR*-Satelliten. Der indische *IRS*⁵-*1C* wurde 1995 gestartet und 1997 mit *IRS-1D* ergänzt. Die räumliche Auflösung des Sensors ist im panchromatischen Kanal mit 5 m Pixelgröße ähnlich *SPOT*.

Zur Vegetationsbeobachtung eignet sich auch der *ASTER*⁶-Sensor, der im *Terra*-Satelliten der NASA⁷ eingebaut ist, und der *MODIS*⁸-Sensor der in *Terra*- und *Aqua*-Satelliten der NASA enthalten ist. *ASTER* bietet eine räumliche Auflösung von 15-30 m im sichtbaren, nah-, mittel- und thermal-infraroten Wellenlängenbereich, *MODIS* löst hingegen räumlich zwischen 250 und 1000 m auf, scannt dafür in 36 Kanälen ein Spektrum von 400 nm bis 14,24 µm (Lillesand und Kiefer, 1994).

Sämtliche der oben genannten Satellitensysteme spielen für den Präzisionspflanzenbau i. e. S. keine Rolle. Ihr Vorteil liegt vor allem in der großräumigen bis globalen Abdeckung der Erdoberfläche. Satellitensysteme wie *Landsat* und *SPOT*

³ SPOT: **S**atellite **P**our l'**O**bservation de la **T**erre

⁴ AVHRR: **A**dvanced **V**ery **H**igh **R**esolution **R**adiometer

⁵ IRS: **I**ndian **R**emote **S**ensing Satellite

⁶ ASTER: **A**dvanced **S**paceborn **T**hermal **E**mission and **R**eflection Radiometer

⁷ NASA: **N**ational **A**eronautics and **S**pace **A**dministration

⁸ MODIS: **M**oderate Resolution Imaging **S**pectrometer

sind und waren darüber hinaus geeignet und werden bis heute umfangreich zur Landnutzungs-klassifikation eingesetzt (Jensen, 2000).

Mit dem Start des *IKONOS*-Satelliten wurde in der kommerziellen optischen Satellitenfernerkundung die Tür in eine neue Dimension der räumlichen Auflösung aufgestoßen. *IKONOS*, der am 24. September 1999 gestartet wurde, bietet global, präzise, räumlich sehr hoch aufgelöste Bilder für Einzelpersonen, Organisationen und Behörden für Anwendungen im Bereich Kartierung, Beobachtung und Entwicklung. Mit einer räumlichen Auflösung von 82 cm des panchromatischen Sensors und 3,28 m des multispektralen Sensors können auch kleine Objekte auf der Erdoberfläche identifiziert werden (Dial et al., 2003).

QuickBird ist das zweite Satellitensystem, das zivile Nutzer mit sehr hoch aufgelösten optischen Daten versorgen kann. Nach dem gescheiterten ersten Start im Jahr 2000, wurde ein Jahr später der zweite Satellit erfolgreich in die Umlaufbahn von 450 km befördert und liefert seit Anfang 2002 Bilder. Mit einer panchromatischen Auflösung von 61 cm und einer multispektralen Auflösung von 2,44 m in nadir⁹ Richtung des Sensors bietet *QuickBird* eine nochmals verbesserte räumliche Auflösung als *IKONOS*. Der Nachteil dieser hochauflösenden kommerziellen Satellitensysteme ist der sowohl bei *IKONOS*, als auch bei *QuickBird* relativ schmale Aufnahmestreifen. Die daraus resultierende unvollständige Abbildung der Erdoberfläche führt letztlich dazu, dass trotz vergleichsweise hoher Wiederholraten zuverlässige Zeitreihen-beobachtungen nicht garantiert oder extrem teuer sind.

Eine vertiefende Übersicht über die meisten der z. Z. operationellen Satellitensysteme und deren technischer Spezifikationen gibt Albertz (2001).

Die wichtigsten Anwendungsgebiete der Fernerkundung sind heutzutage nach Schowengerdt (1997):

- Umweltbewertung und -beobachtung (Städtewachstum, Sondermüll)
- Globale Erkennung und Beobachtung von Veränderungen (atmosphärischer Ozonabbau, Entwaldung, globale Erwärmung)
- Landwirtschaft (Pflanzenzustand, Ertragsvorhersage, Bodenerosion)
- Nachwachsende Rohstoffe (Böden, Wälder, Ozeane)

⁹ Synthetischer Fußpunkt; ein Punkt auf dem Boden vertikal unter dem Beobachter, den Linsen einer Kamera oder eines Sensorsystems; das Gegenteil von Zenit. Entsprechend ist die Nadirrichtung die Richtung zum Erdmittelpunkt.

- Nicht nachwachsende Rohstoffe (Mineralien, Öl, Gas)
- Meteorologie (Atmosphärenveränderung, Wettervorhersage)
- Kartierung (Topographie, Landnutzung, Bauwesen)
- Militärische Beobachtung und Aufklärung (strategische Verträge, taktische Abschätzungen)
- Neue Medien (Illustrationen, Analyse)

Im Speziellen wird das Potential der Fernerkundung auch zur Erkennung von Bränden mit Hilfe satellitengestützter Spektroradiometerscanner (Giglio et al., 2000) oder zur Messung der räumlichen und zeitlichen Ausbreitung von Entwaldungsgebieten in den Tropen (Tucker und Townshend, 2000) eingesetzt.

Die sehr hoch auflösenden Satellitenbilder der neuesten Sensorgeneration werden im z. B. Hochwasserschutz und bei der Überflutungsschädenkartierung (van der Sande et al., 2003), bei der Messung von Baumkronendurchmessern und der Kartierung von kleinflächigen Agrarsystemen in Brasilien (Hurt et al., 2003), der Klassifikation von tropischen Korallenriffen (Andréfouët et al., 2003), der Malariakontrolle¹⁰ in Korea (Masuoka et al., 2003) sowie zum Monitoring der Land und Wasser-Ressourcen (Sawaya et al, 2003) eingesetzt.

2.2.2 Vegetationsindizes

Häufig werden in der Fernerkundung von Pflanzenbeständen Vegetationsindizes (VI's) verwendet. Diese aus verschiedenen Kanälen eines multispektralen Bildes berechneten Indizes erlauben einen relativ guten Vergleich von Pflanzenbeständen in Zeitreihenuntersuchungen. Möglich wird dies, da normierte Verhältnisse berechnet werden, bei denen der Einfluss der unterschiedlichen Einstrahlungsbedingungen zu verschiedenen Zeitpunkten minimiert wird (Price, 1994). Zeitreihenuntersuchungen an Pflanzenbeständen sind auch im Hinblick auf die Dynamik der von Krankheiten und Schädlingen oder Wasser- und Nährstoffmangel ausgelösten Vitalitätsverluste von besonderem Interesse im PP.

Mittlerweile sind viele unterschiedliche VI's entwickelt worden, die verschiedenen Zuständen der Vegetationsdecken bzw. den Vegetationstypen und der Überdeckung des Bodens durch Vegetation angepasst sind. VI's werden berechnet als

¹⁰ Beobachtet wird hier die jährliche Ausdehnung von Feuchtbiotopen als potenzielle Brutstätten der Stechmücken in gefährdeten Regionen.

Differenzen, Verhältnisse und lineare Kombinationen spektraler Reflektanzen im sichtbaren sowie NIR Wellenlängenbereich (Tucker, 1979; Jackson, 1983; Wiegand et al. 1991). Die Vitalität der Vegetation macht sich vor allem im roten und NIR Spektralbereich bemerkbar, mit dem Chlorophyllgehalt und der Photosyntheseaktivität der Pflanzen im Rot bzw. der Blattturgescenz und dem BFI im NIR. Stressfaktoren, die auf die Pflanzen einwirken, führen häufig zu Veränderungen in diesem Spektralbereich und können somit fernerkundlich indirekt bestimmt werden. Im Folgenden werden aus der Vielzahl der in der Literatur beschriebener VI's die vier VI's vorgestellt, die in der vorliegenden Studie zur Beobachtung von Stickstoffmangel und Krankheitsbefall an Weizenpflanzen verwendet wurden.

Einer der gebräuchlichsten Vegetationsindizes ist der $NDVI_{(rot)}$ (**N**ormalised **D**ifference **V**egetation **I**ndex) [1]. Der Index beschreibt die normalisierte Differenz des reflektierten Licht im roten und NIR Kanal und wird nach folgender Formel berechnet (Rouse et al., 1973):

$$NDVI_{(rot)} = \frac{(IR - R)}{(IR + R)} \quad [1]$$

Die Spannweite des dimensionslosen NDVI-Wertes reicht theoretisch von -1 bis 1. In der Realität erreicht eine absterbende Vegetation Werte zwischen 0 und 0,4, eine dichte vitale Vegetation dagegen Werte von >0,8. Aus Gründen der Übersichtlichkeit, und da es die „normale“ Schreibweise ist, wird der $NDVI_{(rot)}$ im weiteren Verlauf der Arbeit nur noch als NDVI bezeichnet.

Der SAVI (**S**oil **A**djus**V**egetation **I**ndex) [2] berücksichtigt die Bodenreflexion in einem noch nicht geschlossenen Bestand und verringert dadurch den Einfluss der Bodenreflexion auf den Vegetationsindex (Huete, 1988). Der Wertebereich des dimensionslosen VI liegt normalerweise zwischen -0,9 und 1,6 (Eiden et al., 1991).

$$SAVI = \left[\frac{(IR - R)}{(IR + R + L)} \right] \times (1 + L) \quad [2]$$

L ist dabei eine dimensionslose Konstante, die in Beziehung zum unterschiedlichen Absorptionsmaß zwischen dem roten und NIR Kanal von Boden und Vegetation steht. Der Wertebereich von L ist 0 (starke Vegetation) bis 1 (geringe Vegetation).

Von diesem Vegetationsindex gibt es verschiedene Abwandlungen wie z. B. den MSAVI (**M**odified **S**oil **A**djus**V**egetation **I**ndex) von Qi (1994) sowie den TSAVI

(**Transformed Soil Adjusted Vegetation Index**) von Baret et al. (1989), welche eine verbesserte oder dem Bodentyp angepasste Verringerung der störenden Bodeneinflüsse bewirken.

Der **WDVI (Weighted Difference Vegetation Index)** [3] wurde von Clevers (1988) entwickelt. Es wird hier die Reflexion des Pflanzenbestandes sowie des unbewachsenen Bodens im grünen und NIR Kanal herangezogen. Damit soll die störende Reflexion des Bodens unterdrückt werden. Durch die Einbeziehung des grünen Kanals erreicht der **WDVI**, anders als der **NDVI**, erst bei einem höheren **BFI** die Sättigung.

$$WDVI = IR_{veg} - \left(\frac{G_{soil}}{IR_{soil}} \right) \times G_{veg} \quad [3]$$

Der **NDVI_(grün)** [4] wurde von Gitelson und Merzlyak (1997) angewandt, da der Index statt der roten die Reflexion im grünen Wellenlängenbereich mit einbezieht und im Vergleich zum **NDVI_(rot)** erst in späteren Entwicklungsstadien der Vegetation in den Sättigungsbereich kommt. Somit ist eine Differenzierung der Vegetation auch bei höheren **BFI** Werten möglich.

$$NDVI_{(grün)} = \frac{(IR - G)}{(IR + G)} \quad [4]$$

NDVI's wurden in zahlreichen Studien eingesetzt, um fernerkundlich z. B. die Biomasse (Tucker, 1979; Elvidge und Lyon, 1985), Blattflächenindizes (Holben et al., 1986; Clevers, 1988; Baret und Guyot, 1991) oder die Aufnahme photosynthetisch aktiver Strahlung durch die Pflanzen (Asrar et al., 1984; Choudhury, 1987) zu ermitteln. Geeignet ist die Verwendung des **NDVI** insbesondere, um Veränderungen in der Biomasse und dem **BFI** in Zeitreihenaufnahmen zu beobachten oder um relative Wachstumsunterschiede innerhalb eines Schlages zu ermitteln (Holben, 1986; Gutman, 1989; Jackson and Huete, 1991).

Durch die Verbindung von spektralen Reflektanzen, die sowohl die photosynthetischen Eigenschaften von Pflanzen wie auch die Mächtigkeit der Vegetationsschicht erfassen, haben die **VI**'s in der Fernerkundung eine weitreichende Perspektive. Der Vorzug der **VI**'s liegt auch darin, dass Störeffekte, welche sich in den Einzelkanälen bemerkbar machen z. T. im **VI** kompensiert werden.

Schellberg und Kühbauch (1990), Jackson und Pinter (1986) und Jackson und Ezra (1985) fanden bei ihren Untersuchungen an Weizen bzw. Baumwolle heraus, dass bei steigendem BFI in Abhängigkeit von der Blatthaltung die Reflexion im NIR sortenabhängig variiert. Bei Getreidesorten mit planophiler Blatthaltung erreicht die NIR Reflexion erst bei BFI Werten von 7 die Sättigung, wohingegen Sorten mit erektrophiler Blatthaltung die NIR Reflexion schon bei BFI Werten von 5 die Sättigung erreicht. Wird hingegen aus dem roten und NIR Kanal der NDVI berechnet, ist diese Variation bei steigendem BFI nicht mehr festzustellen. Die normalisierten Indizes verringern den durch unterschiedliche Blatthaltung ausgelösten Sorteneinfluß, und ermöglichen z.B. eine weitgehend sortenneutrale Darstellung der Blattentwicklung.

Weitergehende Literatur zu Vegetationsindizes, mit ausführlicheren Anwendungsbeispielen findet sich in einschlägigen Fernerkundungsbüchern (Lillesand, 1994; Hildebrandt, 1996; Mather, 1999; Jensen, 2000)

2.2.3 Operationelle Fernerkundung in der Landwirtschaft

Raumzeitliche Ausprägung von Phänomenen – gemeint sind hier Veränderungen in Pflanzenbeständen auf landwirtschaftlichen Ackerflächen – können mit Hilfe der Fernerkundung kartiert werden (Guyot et al., 1989; Baret et al. 2000). Die Fernerkundung kann wichtige Informationen über den Pflanzenbestand liefern, die für einen effektiven und ökonomisch sinnvollen Einsatz von Pflanzenbehandlungsmitteln und anderen Maßnahmen der Bestandesführung wichtig sind. Nach Atzberger (2003) ist dies aber kein einfaches Unterfangen, da eine Vielzahl von biophysikalischen Parametern und variablen Randbedingungen das Reflexionsspektrum beeinflussen.

Suits (1972) verweist auf die Möglichkeit, mit Hilfe der Satellitenfernerkundung, Stress an Pflanzenbeständen zu messen. Er sah einen ökonomischen Vorteil in der Einbeziehung von Fernerkundungsdaten zur Formulierung und Ausführung von effektiven Managementstrategien. Ein sehr häufiger Faktor der Stress in Pflanzenbeständen auslöst, ist der Befall mit Pilzkrankheiten. In diesem Zusammenhang wird eine Darstellung der Fernerkundung in der Landwirtschaft in den folgenden Abschnitten gegeben.

2.2.3.1 Flugzeuggetragene Fernerkundung in der Landwirtschaft

Da häufig aufgrund eingeschränkter Verfügbarkeit an hochauflösenden Satellitendaten, wie auch in diesem Projekt auf die flugzeuggestützte Fernerkundung zurückgegriffen werden muß, sind diese Anwendungen im Folgenden kurz beschrieben. Prinzipiell nutzt die flugzeuggetragene Fernerkundung die selben Phänomene der spektralen Reflexion wie die Fernerkundung auf Satelliten. Der grundlegende Unterschied ist die bessere räumliche Abbildung der spektralen Eigenschaften im Bild.

Schon 1887 wurden laut Hildebrandt (1987) erste Versuche in der Forstwirtschaft unternommen mittels Luftbildern aus einem Ballon heraus eine Waldbestandskarte anzulegen. In den 20er und 30er Jahren des letzten Jahrhunderts wurden dann Fernerkundungstechniken vorgeschlagen, um die Ausbreitung verschiedener Krankheiten oder Stressfaktoren in Kulturpflanzen vorherzusagen. Taubenhou et al. (1929) nutzten Luftbilder, um einen Befall mit Wurzelfäule an Baumwolle, und Bawden (1933) verwendete Infrarotfilme, um Viruserkrankungen an Kartoffeln und Taback zu erkennen. Aber erst als Colwell (1956) die Möglichkeiten panchromatischer und infraroter Luftbildern aufzeigte – Veränderungen der Reflexion von Getreideblättern, ausgelöst durch Krankheiten, konnten mit Hilfe der Luftbildfotografie nachgewiesen werden – wurde die Luftbildfernerkundung in der Landwirtschaft zunehmend eingesetzt.

Seit Ende der Sechziger Jahre des vorigen Jahrhunderts gibt es verstärkt Bestrebungen, Krankheiten an Kulturpflanzen durch Luftbilder zu identifizieren. Hauptziel der Untersuchungen war die möglichst frühzeitige Erkennung des Befalls mit Krankheiten, um effektivere Bekämpfungsstrategien zu entwickeln. Manzer und Cooper (1967) zeigten, dass die Kraut- und Knollenfäule der Kartoffel in Luftbildfotografien, zwei bis drei Tage bevor Symptome am Boden sichtbar wurden, erkannt werden konnte. Philpotts and Wallen (1969) berichteten über die Möglichkeit mittels Farbinfrarotfotos die Entwicklung von bakterieller Braunfäule und Wurzelfäule in Ackerbohnen zu beobachten. Henneberry et al. (1979) identifizierten Infektionen mit Fußfäule (*Phymatotrichum omnivorum*) an Baumwollpflanzen in infraroten Luftbildern aufgrund der durch den Pilzbefall ausgelösten geänderten Bodenbedeckung der Pflanzen. Die Zuckerindustrie setzt seit Jahren NIR Luftbilder zur Erkennung von Nematodennestern ein und Steddom et al. (2003) nutzten multi- wie hyperspektrale

Fernerkundungsdaten zur Differenzierung zwischen gesunden und mit Nematoden infizierten Zuckerrüben.

Thamm (1987) untersuchte die Möglichkeiten von Luftbildern zur Bestandesdifferenzierung in Ackerschlägen mit Zuckerrüben, Sommergerste und Winterweizen. Die Falschfarbenfilme im Maßstab 1:10.000 wurden visuell sowie optisch-elektronisch ausgewertet. Aufgrund der Analyse der Grauwerte gelang eine Einteilung in drei Ertragszonen, woraus eine detaillierte Unterteilung der Ackerschläge abgeleitet werden konnte. Abgesichert wurde diese Einteilung durch die deutlichen Ertragsunterschiede von bis zu 44%. Hervorgehoben wird von Thamm abschließend die Bedeutung von Luftbildern, die z. Z. so rationell wie keine andere Methode, Informationen über die räumliche Verteilung und die relativen Unterschiede in der Ausprägung des Bestandes liefern.

Mit multispektralen Bildern unternahmen Leon et al. (2003) den Versuch unterschiedliche Pflanzenparameter wie Pflanzenhöhe und -ertrag in Baumwoll- und Sojabohnenfeldern zu erkennen. Zur Aufnahme des grünen, roten und NIR Bildes verwendeten sie Filter mit einer spektralen Bandbreite von 10 nm. Aus den gewonnenen Bilddaten berechneten sie verschiedene Vegetationsindizes und bildeten daraus Korrelationen mit den Pflanzenparametern Wuchshöhe und Ertrag. Es zeigte sich, dass der $NDVI_{(grün)}$ mit Korrelationskoeffizienten von 0,58 und 0,75 in den verschiedenen Feldern zum Zeitpunkt der Baumwollblüte die beste Übereinstimmung mit dem Ertrag zeigte. In den Sojabohnenfeldern trat kein Vegetationsindex explizit hervor, was von den Autoren mit dem hohen Einfluss der Faktoren Wasser und Boden aufgrund von besonderen Witterungsbedingungen begründet wird.

Johnson et al. (2003) untersuchten mit Farbinfrarotbildern das Auftreten von Braunfäule (*Phytophthora infestans*) in Kartoffelfeldern mit Bewässerung. Um das Auftreten der Krankheit zu begünstigen, wurden teilweise die Fungizidbehandlungen unterlassen. Bis zu vier Überfliegungen wurden pro Vegetationsperiode durchgeführt. Die eingescannten und digitalisierten Luftbilder hatten eine räumliche Auflösung von etwa 1 m. Mit einer Zeit- und Variogrammanalyse wurden die Pixel der Kartoffelfelder analysiert. Hierbei konnte ein aggregiertes und weniger zufälliges oder regelmäßiges Auftreten der Krankheit in den Fernerkundungsbildern festgestellt und am Boden verifiziert werden. Das Auftreten von Befallsnestern sowie die Intensität des

Krankheitsbefalls wurde durch die Zeitreihenbeobachtung mit Luftbildern und deren räumlicher Analyse quantitativ erfasst.

Welsh et al. (2003) verglichen mit Luftbildern in einer dreijährigen Studie zwei Methoden zur teilschlagspezifischen Ausbringung von Stickstoff in Winterweizen. Die Stickstoffdüngung steuerten sie zum einen auf Basis von Ertragskarten der vergangenen Jahre, zum anderen zogen sie die aktuellen multispektralen Luftbilder heran. Die Luftbilder wurden kurz vor dem Düngungstermin aufgenommen und anhand des Feldaufgangs in N-Applikationskarten umgesetzt, die die Felder in verschiedene Managementzonen einteilt. Ermittelt wird der Feldaufgang über den NDVI und *ground truth* Daten. Die Methode mit dem gezielten Einsatz von Luftbildern ergab einen Mehrertrag von ca. 5 dt ha⁻¹ im Vergleich zur konventionellen N-Düngung, wohingegen die Methode, basierend auf den historischen Ertragskarten, keine Verbesserung im Ertrag zeigte.

Dohmen (2004) setzt digitale Infrarotluftbilder (780-1000 nm) in verschiedenen Entwicklungsstadien von Pflanzen zum Monitoring in der Landwirtschaft ein. In seinem Verfahren werden die Bildaufnahmen vor Beginn des Schossen im Frühjahr eingesetzt, um Bestandesunterschiede durch Auswinterung oder Minimumfaktoren wie z. B. Temperatur, Feuchtigkeit und Nährstoffe aufzuzeigen; vor dem Ährenschieben von Getreidebeständen werden die Infrarotbilder verwendet, um die Bestandesdichte festzustellen; einige Wochen vor der Ernte wird schließlich festgestellt, ob und wo innerhalb eines Ackerschlags Bestände aufgrund von Wasser- oder Nährstoffunterschieden aber auch bedingt durch Krankheitsbefall früher abreifen.

Trotz der rasanten Entwicklung in der Satellitenfernerkundung verweisen Anwender auf die Vorteile der flugzeuggetragenen Fernerkundung in der Landwirtschaft wie z. B. der höchsten räumlichen Auflösung, flexibleren Kampagnenplanung und teilweise z. Z. noch geringerer Kosten.

2.2.3.2 Satellitengestützte Fernerkundung in der Landwirtschaft

In die Landwirtschaft hat die Satellitenfernerkundung schon vor vielen Jahren Einzug erhalten. Mit *Landsat* wurden z. B. langjährige und großräumige Beobachtungen der Vegetation durchgeführt. Das LACIE¹¹-Projekt der NASA hatte Mitte der siebziger Jahre zum Ziel, weltweite Weizenertragsvorhersagen mit Hilfe von Landsat MSS

Daten zu ermöglichen. Im Mittelpunkt der Beobachtung standen die wichtigsten Weizenexportländer der Welt und, als damals größter Weizenimporteur, die Sowjetunion (Phinney et al., 1979). Mit dem MARS¹²-Programm der Europäischen Union soll eine Echtzeitmessung der Anbauflächen und Erträge aller wichtigen Kulturpflanzen mit Hilfe optischer Satellitendaten durchgeführt werden. Zusätzlich wird während der europäischen Vegetationsperiode regelmäßig ein MARS Bulletin herausgegeben, welches Karten mit dem aktuellen Vegetationszustand sowie Ertragsrisikokarten der EU enthält, die auf Informationen über den Entwicklungsstand der verschiedenen Kulturen und aktuellen meteorologischen Daten beruhen (Taylor et al., 1997). Ein weiteres Forschungsvorhaben der EU war das 1998 für zwei Jahre geplante SABRES¹³ Projekt. Ziel des Projektes war die Etablierung technischer Grundlagen zur Bereitstellung von teilflächigen Informationen aus sehr hoch aufgelösten Satellitendaten an landwirtschaftliche Abnehmer (Blakeman, 2002).

Der große Bedarf an qualitativ hochwertigen Geoinformationsprodukten von Institutionen wie auch kommerziellen Anwendern führte 1998 zur Gründung des Forschungsprojektes ProSmart¹⁴, welches nach einer Verlängerung im Jahr 2002 endete (Kleusberg, 2002). Während der Projektphase wurde unter anderen Zielgruppen auch der Bedarf der Landwirtschaft an Fernerkundungsdaten ermittelt und analysiert, um daraus die zukünftigen Bedürfnisse ableiten zu können. Schwerpunkte wurden auf die regionale und schlagbezogene Ertragsprognose sowie die teilschlagspezifische Stickstoffzustandserfassung und Biomassenabschätzung gelegt (ProSmart, 1999; Kühbauch und Hawlitschka, 2003).

Darüber hinaus kann die Fernerkundung in der Landwirtschaft in einem weiten Anwendungsgebiet eingesetzt werden, z.B. zur Differenzierung unterschiedlicher Kulturpflanzen (Kühbauch, 1991b), Erkennung von Wasserstress (Clarke, 1997, Seelan et al., 2003), Bewässerungsmanagement (Alderfasi und Nielsen, 2001), Bodenwasserverfügbarkeit (Hatfield et al., 1984), Evapotranspiration (Kimball et al., 1999), Bodenversalzung (Barnes et al., 2003), Stickstoffmanagement (Bausch und Duke, 1996), Ertragsverluste durch Abdrift von Pestiziden auf benachbarte Felder (Seelan et al., 2003), Ertragsprognose von Sommerweizen und Gerste (Idso et al., 1980) sowie von Braugerste (Weissteiner und Kühbauch, 2005) bis hin zur

¹¹ LACIE: **L**arge **A**rea **C**rop **I**nventory **E**xperiment

¹² MARS: **M**onitoring **A**griculture with **R**emote **S**ensing

¹³ SABRES: **S**ervices to **A**gri-**B**usiness by **R**emote **S**ensing

Erkennung von Unkräutern (Richardson et al., 1985), tierischem Schädlingsbefall (Everitt et al., 1991, Seelan et al., 2003) und Krankheitserkennung (Cook et al., 1999).

Zur Erkennung von Krankheiten an Kulturpflanzen wurde Anfang der Neunziger Jahre der räumlich grob auflösende Satellit *Landsat 5* eingesetzt. Nilsson (1991) ermittelte die Reflektanzen pilzbefallener Gerste und Raps in den vier MSS Bändern (500-600 nm, 600-700 nm, 700-800 nm und 800-1100 nm) mit einem Exotech Radiometer. Er fand signifikant durch Stengelfäule (*Sclerotinia ssp.*) beeinflusste Reflektanzen an Raps. Befallene Gerste war leicht mit spektralen Messungen von gesunder zu unterscheiden. Durch Krankheiten verursachte Abweichungen in der spektralen Reflexion zeigten einen statistisch signifikanten Bezug zu dem erzielten Ertrag. Daraus schlussfolgerte Nilsson, dass selbst die räumlich und spektral noch grob auflösenden MSS-Satellitendaten zur quantitativen Vorhersage des durch Krankheiten verursachten Ertragsverlustes herangezogen werden können. Auch Sharp et al. (1985) untersuchten mit einem Spektrometer die spektralen Eigenschaften von drei mit Gelbrost und Schwarzrost befallenen Weizensorten in den vier MSS Bändern. Die spektralen Daten zeigten klare Unterschiede in den beiden Krankheiten. Gelbrost verursachte größere spektrale Differenzen zwischen den gesunden und kranken Weizenbeständen als Schwarzrost.

2.2.4 Satellitengestützte Fernerkundung im Präzisionspflanzenbau

Durch die Inbetriebnahme einer neuen Generation von optischen Satelliten wie *IKONOS* und *QuickBird* sind heute Fernerkundungsdaten mit hoher räumlicher Auflösung sowie einer theoretisch bis zu täglichen Wiederholrate kommerziell verfügbar. In Verbindung mit modernen Computern und GIS sehen einige Autoren nun die Möglichkeit des Einsatzes von Satellitendaten, als Unterstützung von teilschlagspezifischen landwirtschaftlichen Managementsystemen (Pinter et al., 2003; Kühbauch und Hawlitschka, 2003; Jürgens, 2000). Seit dem Start dieser neuen Satellitensysteme finden sich in der Literatur auch Hinweise auf die Möglichkeit der teilflächigen Erkennung von Krankheiten. Exakte Versuche, ab welchem Krankheitsstadium oder ab welcher Befallstärke solch eine Detektion möglich ist, stehen noch aus.

¹⁴ ProSmart: **P**roduct development for **S**ystematic **M**arket and Development **A**pproach for **R**emote **S**ensing **T**echniques

Seelan et al. (2003) beschreiben in ihrem Artikel über Fernerkundungsanwendungen in der Präzisionslandwirtschaft einen Versuch über die Auswirkungen von Fungizidbehandlungen auf die Reflexion von Weizenbeständen. Hierzu unterließen sie in zwei Weizenfeldern in zwei Streifen von 37 m bzw. 55 m die Fungizidapplikation. In dem dann aufgenommenen multispektralen *IKONOS* Bild zeichneten sich die ausgelassenen Bereiche klar ab, während die Feldabschnitte mit Fungizidbehandlung im Bild als gesünder identifiziert wurden. Aus der zur Ernte erstellten Ertragskarte gehen die unbehandelten Bereiche klar als ertragsschwächer hervor. Hier wurde ein Ertrag von 41 dt ha^{-1} erzielt, der damit im Durchschnitt um 7 dt ha^{-1} unter den mit Fungizideinsatz erzielten Erträgen liegt.

Einen ersten Versuch zur Erkennung von Krankheiten in einem hochauflösenden *QuickBird* Bild unternahmen Laudien et al. (2004). Sie verglichen die Einsetzbarkeit eines multispektralen *QuickBird*-Bildes mit der des hyperspektralen *AVIS* Sensors zur Erkennung von *Rhizoctonia solani ssp.* an Zuckerrüben. Im Zuckerrübenfeld wurden zudem bodennahe Messungen mit dem Radiometer *FieldSpec® HandHeld* (Hersteller: Analytical Spectral Devices, Inc.) durchgeführt. Dies diente zur Identifikation der Unterschiede in der spektralen Reflexion zwischen kranken und gesunden Zuckerrüben. Nach einer Klassifikation der beiden Bilder in neun Klassen zeigte sich, dass aufgrund der höheren räumlichen Auflösung des *QuickBird* Bildes eine kleinräumigere Identifikation des Krankheitsbefalls möglich war. Jedoch konnten auch mit dieser hohen Auflösung nicht alle Befallsnester entdeckt werden, die mit den bodennahen Spektrometern gemessen identifiziert wurden. Zusammenfassend läßt sich sagen, daß ein multitemporaler, wissensbasierter Ansatz eine verbesserte Unterscheidung zwischen biotischen und abiotischen Einflüssen in Pflanzenbeständen, und hier im Besonderen in Zuckerrüben ermöglichen könnte. Um dies umzusetzen, muss aber der momentane Nachteil von sehr hochauflösenden optischen Satellitensensoren, nämlich die zu geringe Wiederholrate und Abhängigkeit von der Wolkenbedeckung beseitigt werden.

Laut Pinter et al. (2003) bedarf es noch weiterer Untersuchungen, wenn mit Hilfe der Fernerkundung eine Identifizierung einzelner Krankheiten oder eine Unterscheidung zwischen Krankheiten und abiotischen Stressfaktoren durchgeführt werden soll.

2.3 Pilzkrankheiten in Weizen und ihre Ausbreitung

Ein Ziel der Landwirtschaft ist es, die Pflanzenbestände über die Vegetationszeit vital und gesund zu halten, um das Ertragspotenzial und den monetären Gewinn auszuschöpfen. Aufgrund der engen Felderfolge, d. h. der häufigen Wiederkehr der selben Fruchtart auf dem selben Flurstück ist vor allem im intensiven landwirtschaftlichen Pflanzenbau mit hohem Infektionsdruck durch Krankheiten und Schädlinge zu rechnen, in der die im Prinzip für alle Kulturen geltende Selbstunverträglichkeit zum Ausdruck kommt (Kühbauch, 1991a). Alle pilzlichen Erreger können zu Ertragseinbußen von bis zu 30% führen (Habermeyer und Gerhard, 2000). Pflanzenschutzmaßnahmen sind deshalb heute fester Bestandteil des landwirtschaftlichen Pflanzenbaus. Der Präzisionspflanzenbau zielt darauf, die Pflanzenschutzmaßnahmen zeitlich und räumlich präzise zu platzieren.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die drei wichtigsten Pilzkrankungen im Weizen berücksichtigt. In Abb. 2.9 sind *Erysiphe graminis* (Echter Mehltau), *Puccinia recondita* (Braunrost) und *Septoria tritici* (Septoriablattdürre) abgebildet. Diese drei Pilzkrankheiten unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Vermehrungsart, der räumlichen Verteilung im Bestand – horizontal wie vertikal – sowie in den für sie idealen Witterungsverhältnissen.

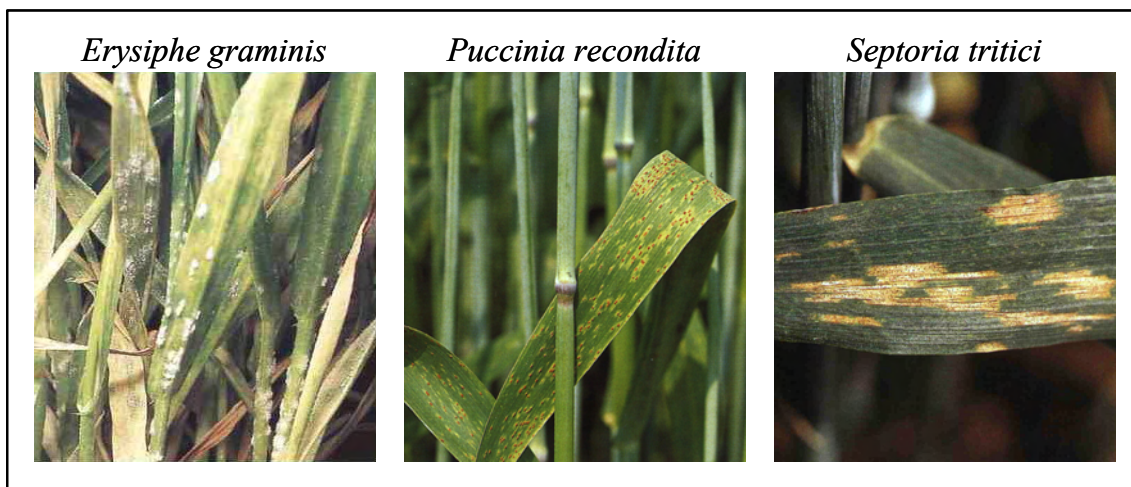


Abb. 2.9 Phänologie der Pilzkrankungen am Weizenblatt: *Erysiphe graminis* (Echter Mehltau), *Puccinia recondita* (Braunrost) und *Septoria tritici* (Septoriablattdürre).

Erysiphe graminis verbreitet sich optimal in einem Temperaturbereich von 15-22 °C und stellt keine besonderen Anforderungen an die Luftfeuchte. Übertragen wird die

windbürtige Krankheit von befallenen Ernterückständen, infiziertem Ausfallgetreide oder befallenen Nachbarschlägen. Mastige Bestände mit hoher Stickstoffdüngung fördern die Ausbreitung. Last (1963) ermittelte, dass Mehлтаupusteln drei Tage nach Inokulation eines Gerstenblattes auftreten; werden die Temperaturverhältnisse von 18-25 °C auf 15 °C reduziert, verlängert sich der Zeitraum auf bis zu eine Woche.

Der Braunrost (*Puccinia recondita*) benötigt zur Überwinterung ein mildes Klima oder eine geschlossene Schneedecke, die ihn vor zu starkem Frost schützt. Während der Vegetation ist warmes Klima mit Nachttemperaturen von 15-20 °C und wenigen Stunden Blattbenetzung ausreichend, um ein vermehrtes Auftreten zu fördern. Wegen der höheren Wärmeansprüche tritt der Braunrost meist erst spät nach dem Ährenschieben auf. Befallene Nachschosser oder befallenes Ausfallgetreide auf Nachbarschlägen bilden Anfangsinfektionsherde, von denen die Sporen der windbürtigen Krankheit verbreitet werden.

Anhaltend nasse Witterungsperioden mit gleichzeitigen Tagesminimumtemperaturen ab 4 °C begünstigen die Entwicklung von *Septoria tritici*. Eine Verbreitung der Sporen, durch die sich *Septoria tritici* vermehrt, findet durch großtropfige Niederschläge statt, welche durch das Abprallen am Blatt die Sporen von unteren Blattetagen auf höhere Blattetagen befördern. Wenn nach dem Regenereignis der Bestand mindestens zwei Tage lang feucht ist, muss mit einer starken Septoriainfektion gerechnet werden. Neuer Befall wird erst nach drei bis vier Wochen sichtbar. Da *Septoria tritici* durch Erntereste auf dem Feld übertragen werden kann, treten erste Infektionen im Weizen teilweise bereits vor der Bestockung auf (Holmes und Colhoun, 1974; Shaner und Finney, 1976; King et al., 1983).

Aufgrund der benötigten spezifischen mikroklimatischen Bedingungen zur Ausbreitung der Pilzkrankheiten ist ein gleichmäßiges flächenhaftes Auftreten der Krankheiten in einem Bestand die Ausnahme (McCartney und Fitt, 1998).

Bjerre (1999) bonitierte 1997 und 1998 in sechs Felder mit Winterweizen die Verteilung von Mehltau (*Erysiphe graminis*). Bei den Erhebungen in einem 24 x 24 m bzw. 12 x 12 m Raster ergab sich eine heterogene Verteilung der Befallsstärke mit Mehltau. In Randbereichen des Feldes, die mit Hecken bepflanzt waren, aber auch an Waldrändern wurde ein stärkerer Befall ermittelt. Über die Vegetationszeit verteilt war das unterschiedlich starke Auftreten von Pilzerregern im Feld räumlich stabil. Die Bestandesdichte, gemessen als der **Ratio Vegetation Index (RVI)**, zeigte auch erhebliche Unterschiede, die aber keinen eindeutigen Einfluss auf die Verbreitung

von Mehltau hatten (Bjerre und Secher, 1998). Auch das Auftreten von *Septoria tritici* wurde an Waldrändern begünstigt, was aufgrund der längeren Blattfeuchtephase in diesen Arealen und den damit günstigen Sporulationsbedingungen der Pilzkrankheit zu erwarten war.

Roelfs (1972) untersuchte mit Hilfe von Sporenfallen die horizontale Ausbreitung von Rostkrankheiten in Getreidebeständen. Hierbei stellte er fest, dass die Ausbreitung der luftbürtigen Erreger stark von der Windrichtung abhängig ist. In Windrichtung fanden sich 72 m vom Ort der Ausbringung der Sporen entfernt noch etwa 20% der Sporen wieder. Die Sporenzählung in den anderen Richtungen ergab nur einen wiedergefundenen Anteil von durchschnittlich knapp über 6% der Ausgangsmenge. Da durchschnittlich 80-90% der gesamten Sporen in den ersten neun Metern um den Eintragungsort wiedergefunden werden, resümiert der Autor, dass eine Messung der Sporen alle 20 m ausreichend für eine adäquate Analyse von Rostepidemien ist.

Wie Abb. 2.9 zeigt, führt der Pilzbefall an Getreide bzw. Weizen zu einer Beschädigung der Blätter, und zu einem Pigmentverlust, der eine analoge Veränderung der spektralen Reflektanzen erwarten lässt. In Kap. 2.2.3 wurde von fernerkundlichen Studien über krankheitsbedingte Veränderungen der spektralen Reflexion von landwirtschaftlichen Kulturen berichtet.

3 Material und Methoden

3.1 Versuchsstandorte

In den Anbaujahren 2001/2002 und 2002/2003 wurden auf der Lehr- und Forschungsstation Dikopshof der Universität Bonn Großparzellenversuche mit Winterweizen angelegt. Als Winterweizen wurde die Sorte *Kanzler* gewählt. Diese Sorte eignet sich aufgrund ihres hohen Ertragspotentials im intensiven Anbau und ihrer starken Anfälligkeit gegenüber Pilzkrankheiten besonders gut zur Entwicklung der gewünschten Vitalitätsunterschiede im Bestand (BSA, 2000). Durch gezielte Bestandesführung sollten Unterschiede hinsichtlich der Nährstoffversorgung (abiotischer Faktor) und des Befalls mit Pilzkrankheiten (biotischer Faktor) provoziert werden. Darüber hinaus wurde eine möglichst homogene Fläche mit geringen Unterschieden in Bezug auf das Relief und das pedologische Profil ausgewählt. Es konnten somit Unterschiede in der Bestandesentwicklung erwartet werden, die größtenteils nicht auf unterschiedliche Bodenverhältnisse zurückzuführen waren.

Im Jahr 2002/2003 kam eine weitere Versuchsanlage auf der Lehr- und Forschungsstation Klein Altendorf hinzu. Hier wurde zusätzlich zu den Faktoren Stickstoffdüngung und Fungizideinsatz der Faktor Bestandesdichte geprüft. Die Fragestellung dazu war, ob durch unterschiedliche N-Düngung und Fungizideinsatz ausgelöste Reflexionsveränderungen des Bestandes zusätzlich durch die Bestandesdichte beeinflusst werden (vgl. 1.1).

3.1.1 Dikopshof

Die Versuchsstation des Instituts für Pflanzenbau der Universität Bonn liegt in der Nähe von Wesseling/Rheinland, ca. 15 km nördlich von Bonn in einer Höhe von 62 m ü. N. N.. Der Dikopshof befindet sich, klimatisch betrachtet, im leicht maritimen Einfluss des Golfstroms. Durch die milden Winter und Sommer stehen der Vegetation ca. 250 Tage zur Verfügung. Auf das ganze Jahr gesehen, ergeben sich folgende langjährige Durchschnittswerte:

Temperatur: 9,7 °C

Niederschlag: 630 mm

Sonnenscheindauer: 1.245 h

Die Lage auf der Mittelterasse des Rheines mit dem darüber abgelagerten Löß führt zu sehr guten Böden – Typ Parabraunerde – mit Bodenzahlen von 77-94.

In Abb. 3.1 und Abb. 3.2 kann der Temperaturverlauf sowie die Niederschlagsverteilung in den Jahren 2002 und 2003 jeweils vom 1. März bis zum 31. Juli am Standort Dikopshof abgelesen werden. Die Temperatur ist als Mittelwert eines Tages in °C angegeben und der Niederschlag als Tagessumme in mm.

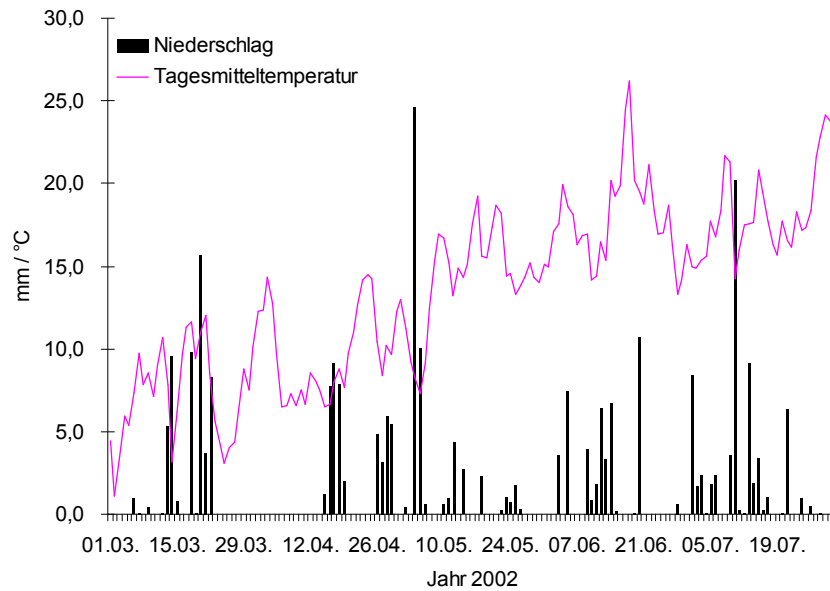


Abb. 3.1 Temperaturverlauf und Niederschlagsverteilung am Standort Dikopshof im Jahr 2002 vom 1. März bis 31. Juli

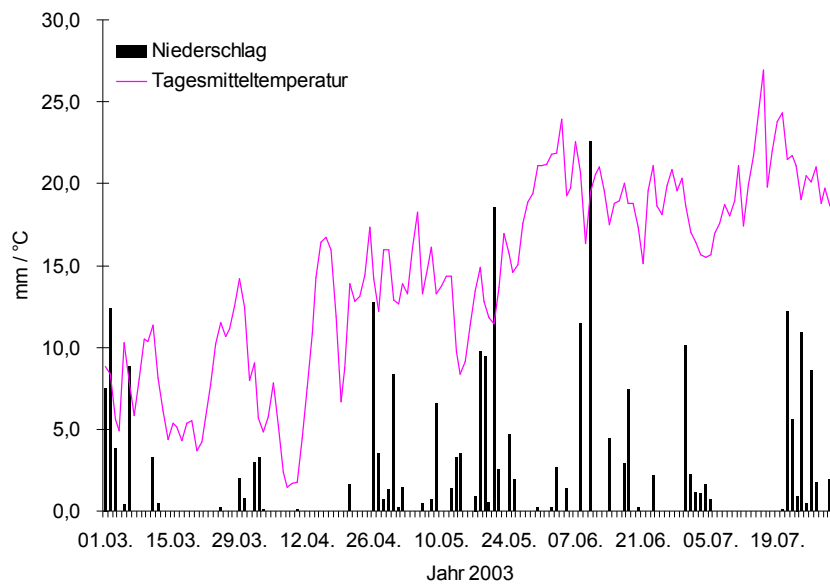


Abb. 3.2 Temperaturverlauf und Niederschlagsverteilung am Standort Dikopshof im Jahr 2003 vom 1. März bis 31. Juli

3.1.2 Klein Altendorf

Die Lehr- und Versuchsanstalt des Instituts für Landwirtschaftliche Betriebslehre der Universität Bonn Klein Altendorf liegt in Rheinbach-Wormersdorf im Süden der Kölner Bucht. In einer Höhe von 175 m ü. N. N. herrscht hier ein atlantisch geprägtes Klima. Dies führt zu einer Vegetationsdauer von ca. 170 Tagen. Die Durchschnittswerte für die wichtigsten Witterungsfaktoren ergeben im langjährigen Jahresdurchschnitt:

Temperatur: 9,2 °C

Niederschlag: 600 mm

Sonnenscheindauer: 1.534 h

Der Boden ist eine Parabraunerde auf Löß und gehört aus pflanzenbaulicher Sicht zu einem der besten Standorte in Deutschland mit einer Ackerzahl von 85-90.

In Abb. 3.3 kann der Temperaturverlauf sowie die Niederschlagsmengen im Jahr 2003 am Standort Klein Altendorf abgelesen werden. Die Temperatur ist als Monatsmittelwert in °C angegeben und der Niederschlag als Monatssumme in mm.

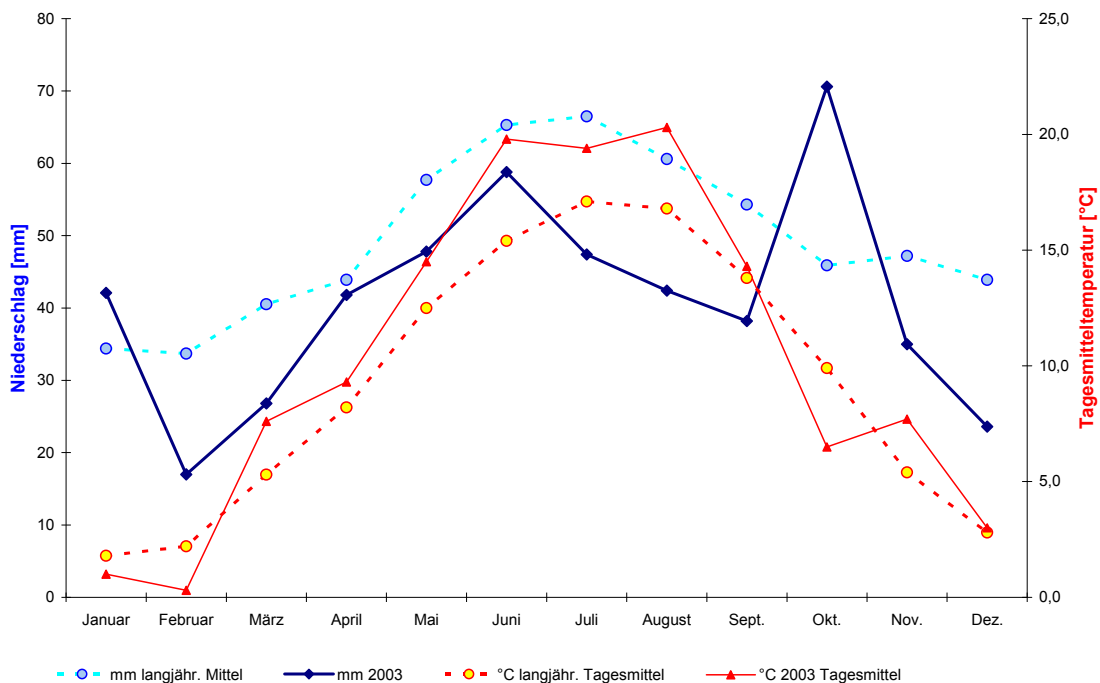


Abb. 3.3 Temperaturverlauf und Niederschlagsmengen am Standort Klein Altendorf im Jahr 2003 (Quelle: OVA Klein-Altendorf)

3.2 Versuchsanlage

3.2.1 Versuchsanlage Dikopshof 2001/2002

Im ersten Versuchsjahr wurde mit Winterweizen der Sorte *Kanzler* eine Blockanlage mit 45 x 45 m² großen Parzellen auf dem ca. 5 ha großen „Schlag VI“ der Lehr- und Forschungsstation Dikopshof angelegt. Vorfrucht auf der Fläche waren Zuckerrüben, deren Blätter auf der Fläche gehäckselt und bei der Bodenbearbeitung mit Pflug und Packer in den Boden eingearbeitet wurden. Am 24. 10. 2001 wurde der Winterweizen mit 330 Körnern m⁻² eingesät. Die Unkrautbekämpfung wurde am 27. 03. 2002 mit 3 l ha⁻¹ Tolkon Flo[®] und 1 l ha⁻¹ Plattform S[®] durchgeführt. Mit den Parzellen wurde ein zweifaktorieller Feldversuch angelegt.

Faktor 1, die Stickstoffversorgung, wurde auf der Hälfte der Parzellen betriebsüblich ausgebracht (N+), die andere Hälfte mit einer reduzierten Aufwandmenge (N-) versorgt; Faktor 2, die Fungizidbehandlung erfolgte in 2 Varianten, einmal die Behandlung mit der betriebsüblichen Aufwandmenge (F+), zum zweiten nicht mit Fungiziden behandelte Parzellen (F-). Es ergaben sich damit vier unterschiedliche Behandlungskombinationen (Tab. 3.1).

Tab. 3.1 Stickstoff- und Fungizidbehandlung der mit der Sorte *Kanzler* bestellten Weizenparzellen; Einzelfaktoren und Faktorkombinationen.

	normale Stickstoffgabe	reduzierte Stickstoffgabe
mit Fungizideinsatz	N+/F+	N-/F+
ohne Fungizideinsatz	N+/F-	N-/F-

Alle Parzellen erhielten zur Bestockung (BBCH¹⁵ 21) am 06. 03. 2002 einmalig 60 kg N ha⁻¹. Zu weiteren Düngungsterminen erhielten nur noch betriebsüblich gedüngte Parzellen (N+) Stickstoff: 40 kg N ha⁻¹ zum Schossen (BBCH 30) am 15. 04. 2002 und 60 kg N ha⁻¹ zum Ährenschieben (BBCH 39) am 16. 05. 2002. Gegen Pilzkrankheiten wurden die gesund zu haltenden Parzellen (F+) am 04. 06. 2002 mit

¹⁵ BBCH: Entwicklungsstadien mono- und dicotyler Pflanzen (**B**iologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, **B**undessortenamt und **C**hemische Industrie)

einer Mischung aus $0,8 \text{ l ha}^{-1}$ Gladio® und $0,2 \text{ l ha}^{-1}$ Sumicidin® behandelt. Als Wachstumsregler kam Moddus® mit $0,4 \text{ l ha}^{-1}$ am 06. 05. 2002 zum Einsatz.

Die einzelnen Parzellen hatten eine Kantenlänge von ca. $45 \times 45 \text{ m}^2$ und an drei Seiten wurde ein drei Meter breiter Streifen frei von Bewuchs gehalten. Hierdurch sollte eine Abgrenzung der einzelnen Parzellen in den fernerkundlichen Aufnahmen erleichtert werden. Die Versuchsanlage wurde vollständig randomisiert mit drei Wiederholungen angelegt (Abb. 3.4).

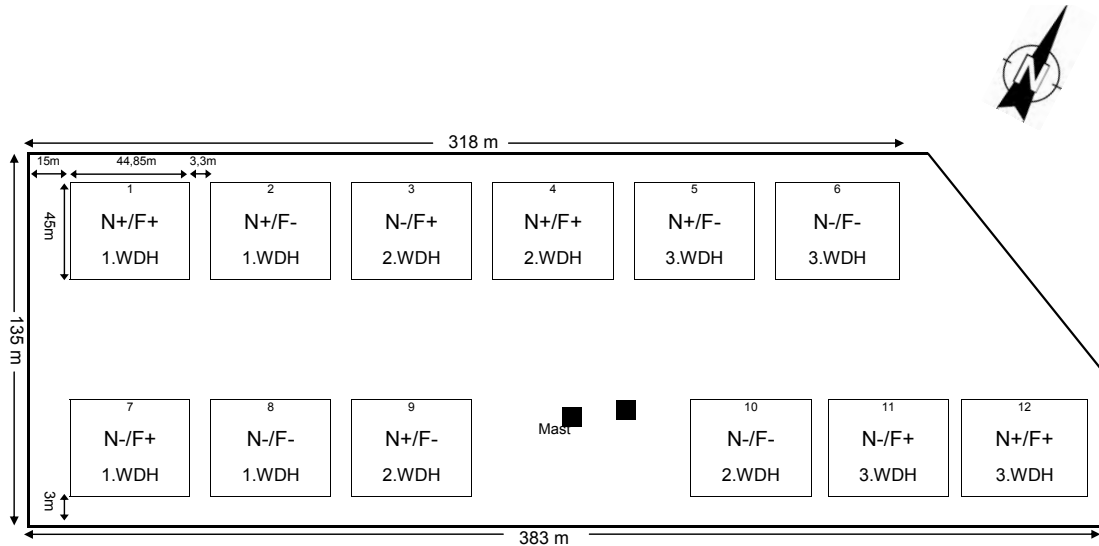


Abb. 3.4 Zweifaktorieller Feldversuch auf Schlag VI der Lehr- und Forschungsstation Dikopshof im Jahr 2001/2002. N+ = normale Stickstoffversorgung, N- = reduzierte Stickstoffversorgung, F+ = mit Fungiziden, F- = ohne Fungizide; 1.WDH, 2.WDH und 3.WDH repräsentieren die Wiederholungen.

3.2.2 Versuchsanlage Dikopshof 2002/2003

Im Anbaujahr 2002/2003 wurde auf „Schlag VIII“ der Lehr- und Forschungsstation Dikopshof ein Feldversuch mit derselben Sorte *Kanzler* und den gleichen Faktorkombinationen wie im Vorjahr angelegt. Die vollständig randomisierte Blockanlage mit drei Wiederholungen basierte auf einem Parzellenraster von $30 \times 30 \text{ m}^2$. Zur besseren Unterscheidung der einzelnen Parzellen in den Fernerkundungsszenen wurden 75 cm breite Streifen zwischen den Wiederholungen freigeernt (Abb. 3.5).

Die Stickstoffdüngung in den normal versorgten Parzellen (F+) wurde wie folgt durchgeführt: 70 kg N ha^{-1} zur Bestockung (BBCH 21) am 17. 02. 2003, 60 kg N ha^{-1} zum Schossen (BBCH 31) am 14. 04. 2003 und 80 kg N ha^{-1} zum Ährenschieben (BBCH 49) am 20. 05. 2003. Eine Behandlung mit Fungiziden in den gesunden

Parzellen (F+) wurde wegen des geringen Pathogendrucks erst am 06. 06. 2003 mit einer Mischung aus $0,5 \text{ l ha}^{-1}$ Amistar, $0,5 \text{ l ha}^{-1}$ Gladio, $0,2 \text{ l ha}^{-1}$ Somicidin und $0,6 \text{ l ha}^{-1}$ Perfektion vorgenommen. Als Wachstumsregler kam CCC[®] am 07. 05. 2003 zum Einsatz.

Vorfrucht waren analog zu „Schlag VI“ im Jahr zuvor Zuckerrüben, deren Blätter gehäckselt und bei der Bodenbearbeitung mit Pflug und Packer eingearbeitet wurden. Am 16. 10. 2002 wurde der Winterweizen mit $330 \text{ Körnern m}^{-2}$ eingesät und die Unkrautbekämpfung am 20. 04. 2003 mit $2,5 \text{ l ha}^{-1}$ Azur durchgeführt.

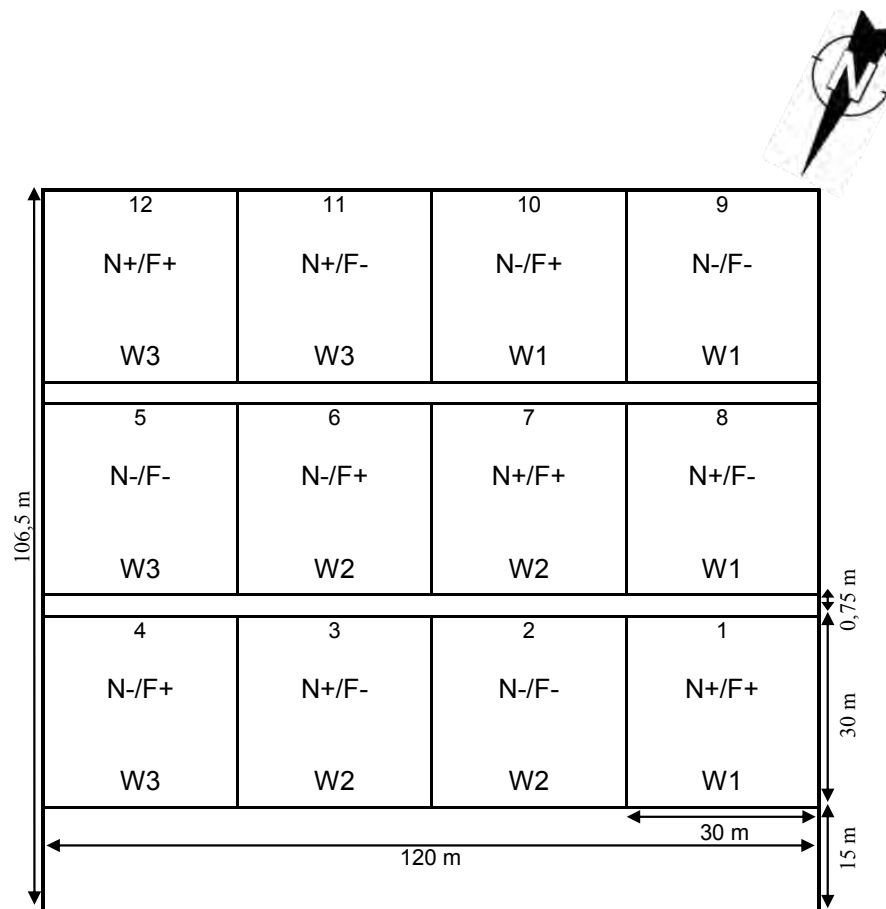


Abb. 3.5 Zweifaktorieller Feldversuch auf Schlag VIII der Lehr- und Forschungsstation Dikopshof im Jahr 2002/2003. N+ = normale Stickstoffversorgung, N- = reduzierte Stickstoffversorgung, F+ = mit Fungiziden, F- = ohne Fungizide; W1, W2, W3 repräsentieren die Wiederholungen.

3.2.3 Versuchsanlage Klein Altendorf 2002/2003

Im zweiten Versuchsjahr, 2002/2003, wurde die ca. 6 ha große Fläche „Kammer“ auf der Lehr- und Forschungsstation Klein Altendorf mit Winterweizen bestellt. In diesem Versuch sollte die Auswirkung der Bestandesdichte auf die spektrale Reflexion

untersucht werden. Hierzu wurde eine Spaltanlage mit zwei Winterweizensorten in drei Saatstärken und drei Wiederholungen angelegt. Die zwei Sorten weisen deutliche Unterschiede in ihrer Bestockungsneigung auf (LWK, 2002). *Novalis* wurde verwendet, da zu erwarten war, dass diese Sorte geringe Saatstärken nicht durch stärkere Bestockung kompensiert. Hingegen war bei der Sorte *Wasmo* aufgrund der ausgeprägten Bestockungsneigung eine deutliche Kompensation geringer Saatstärken, d. h. ein zu jeder Saatstärke relativ dichter Weizenbestand zu erwarten. In den mit der Sorte *Novalis* bestellten Flächen wurden zusätzlich Parzellen mit unterschiedlicher N- und Fungizidbehandlung angelegt. Die leicht erhöhte Anfälligkeit dieser Sorte gegenüber Pilzkrankheiten sollte genutzt werden, um den Einfluss der Bestandesdichte auf die Reflexionseigenschaften des Weizens unter biotischem und abiotischem Stress zu analysieren.

Die drei Saatstärken betragen in beiden Winterweizensorten 150, 300 und 450 Körner m⁻² und wurden in jeweils 15 m breiten Streifen am 21. 10. 2002 ausgesät. Drei Wiederholungen wurden angelegt, sodass der Versuch eine Breite von 270 umfasste. In Saatrichtung wurde die gesamte Länge des Schlages bestellt. Die zusätzlich in die Sorte *Novalis* angelegten Parzellen mit unterschiedlicher Stickstoff- und Fungizidbehandlung waren 45 x 45 m² groß und umschlossen die drei Saatstärken. Aus den zwei Faktoren ergaben sich analog zu den Versuchsflächen am Dikopshof vier Faktorkombinationen. Aus Abb. 3.6 ist der exakte Versuchsaufbau mit den drei Wiederholungen zu entnehmen.

Gedüngt wurde der Winterweizen das erste Mal am 17. 03. 2003 (BBCH 21) gänzlich mit 54 kg N ha⁻¹, bei der Stickstoffdüngung mit 45 kg N ha⁻¹ am 24. 04. 2003 zum Schossen (BBCH 32) wurden die stickstoffreduzierten Varianten ausgelassen. Die dritte Gabe erfolgte am 30. 05. 2003 (BBCH 49) mit 30 kg N ha⁻¹ auf der gesamten Fläche. Aufgrund des geringen Pathogenbefalls im Jahr 2003 wurde nur eine späte Fungizidbehandlung benötigt. Diese erfolgte am 05. 06. 2003 zu BBCH 51 mit 1,0 l ha⁻¹ Jewel Top, dabei wurden die Parzellen ohne Fungizidbehandlung ausgelassen. Die Unkrautbekämpfung erfolgte am 15. 04. 2003 auf der gesamten Fläche mit 2 l ha⁻¹ Azur und 20 g ha⁻¹ Hoestar. Das Blattwerk der Vorfrucht Zuckerüben wurde gehäckselt und bei der Bodenbearbeitung mit Pflug und Packer kurz vor der Winterweizenaussaat eingearbeitet.

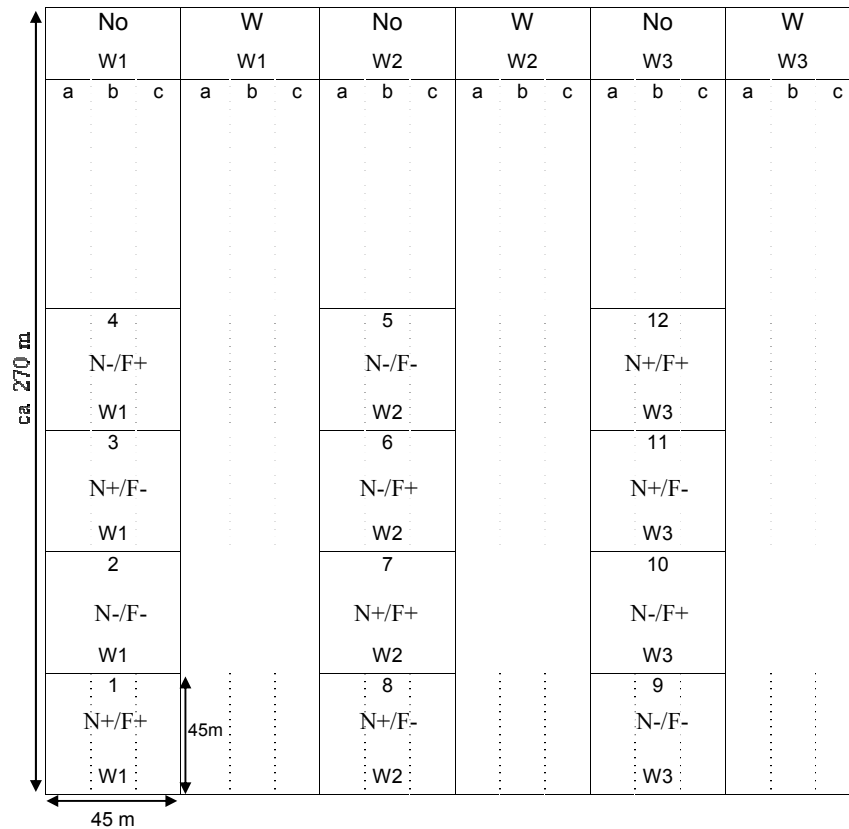


Abb. 3.6 Dreifaktorieller Feldversuch auf Schlag „Kammer“ Lehr- und Forschungsstation Klein Altendorf im Jahr 2002/2003. Faktoren: N+ = normale Stickstoffversorgung, N- = reduzierte Stickstoffversorgung, F+ = mit Fungiziden, F- = ohne Fungizide; Winterweizen-sorten: No = *Novalis*, W = *Wasmo*; Saatstärke in Körner/m²: a = 150, b = 300, c = 450; Wiederholungen: W1, W2, W3.

3.3 Datenerhebung

Folgende Bestandsparameter wurden während der Vegetationsperiode in den Jahren 2002 und 2003 erfasst: Feldaufgang, Krankheitsbefall, Stickstoffversorgung mit SPAD-Meter (vgl. 3.3.1.3), Zahl der Körner je Ähre und Tausendkorngewicht (TKG). Im Jahr 2003 wurde zusätzlich die Biomasse gemessen und in kurzen Abständen digitale Fotos von jeder Parzelle aufgenommen. Auf allen Versuchsfeldern wurde mit Hilfe eines mit GPS-Antenne und Ertragssensor ausgerüsteten Mähdreschers die Ertragsverteilung ermittelt und kartiert.

Entwicklungsphysiologisch wurde der Feldaufgang vor dem Beginn der Bestockung ermittelt.

3.3.1.2 Bodenproben

Im Jahr 2003 wurden Bodenproben auf der Versuchsfläche in Klein Altendorf gezogen. Hierzu wurde in jeder Parzelle an der gleichen Stelle drei Proben mit Hilfe eines Bohrstabes bis in 90 cm Tief genommen. Die drei Proben wurden in die Bereiche 0-30 cm 30-60 cm und 60-90 cm Tiefe unterteilt, gemischt sowie dann ein Aliquot entnommen. Im Labor wurde der Ammonium- und Nitrat-Stickstoff bestimmt.

3.3.1.3 SPAD-Meter

Das Messprinzip des „Minolta SPAD 502 Meter“ der Firma Spectrum Technologies[®] zur Bestimmung der Chlorophyllkonzentration im Blatt beruht auf der Lichtdurchlässigkeit des Blattes im grünen und NIR Wellenlängenbereich. Da die Stickstoffversorgung stark mit der Chlorophyllkonzentration korreliert, ist die Abschätzung des Stickstoffmangels anhand der gemessenen SPAD-Werte möglich (Ahmad et al., 1999). Bei der nicht destruktiven, abgedunkelten Messung am Blatt wird die Reflexion bei 650 nm und die Transmission bei 940 nm gemessen. Die Höhe der Reflexion bei 650 nm ergibt die „Grünheit“ des Blattes und die Transmission in der Wellenlänge von 950 m dient als Normalisation, da Licht dieser Wellenlänge nicht vom Chlorophyllgehalt beeinflusst wird, sondern nur von der Dicke des Blattes abhängig ist. Das Licht in den zwei Wellenlängen wird mit Hilfe von zwei LED's erzeugt und die Intensität von einer Fotodiode gemessen. Der dimensionslose SPAD-Wert hat einen Wertebereich von 0 bis 99, wobei gilt, je höher der SPAD-Wert, desto höher die Chlorophyllkonzentration im betreffenden Blatt (Wood et al., 1993, Adamsen et al, 1999).

3.3.1.4 Biomasse

Zur Bestimmung der Frisch- und Trockenbiomasse wurde im Versuchsjahr 2002/2003 in den Versuchen am Dikopshof und in Klein Altendorf aus jeder Versuchsparzelle zu mehreren Terminen (siehe Tab. 3.3 und Tab. 3.4) eine Probe von drei mal ein Meter Pflanzenreihe herausgeschnitten. Die Proben wurden sofort gekühlt und zur Gewichtsbestimmung und Trocknung ins Labor gebracht. Hier

wurden die Proben für mindestens 48 Stunden getrocknet und dann zurück gewogen. Anschließend wurde der C- und N-Gehalt labortechnisch bestimmt.

3.3.1.5 Bestandshöhe

Die Bestandshöhe jeder einzelnen Parzelle wurde im Versuchsjahr 2002/2003 in den Versuchen am Dikopshof sowie in Klein Altendorf mit einem Zollstock an zehn Pflanzen pro Messpunkt ermittelt. Aus jeweils acht Messpunkten wurde der Mittelwert für jede einzelne Parzelle gebildet.

3.3.1.6 Krankheitsbonitur

Der Krankheitsbefall wurde im ersten Versuchsjahr an zehn randomisierten Stellen in jeder Parzelle bis zur Halmbasis des Weizens visuell bonitiert. Im darauf folgenden Versuchsjahr wurde aufgrund der geringeren Parzellengröße die Anzahl der Boniturstellen verringert; am Dikopshof auf acht, und in Klein Altendorf auf vier randomisierten Stellen.

Bei allen Bonituren wurde der Pflanzenbestand in drei Ebenen aufgeteilt. Jeweils das obere, mittlere und untere Drittel der Blattetagen wurde getrennt bonitiert. Hierdurch sollte der mögliche Einfluss des Auftretens von Pilzkrankheiten an unterschiedlichen Blattetagen auf die Reflexion des gesamten Pflanzenbestandes erfasst werden können. Um einen Wert zu erhalten, der möglichst nicht durch kleinräumige Schwankungen beeinflusst ist, wurde an jedem Messpunkt sternförmig der Befall an sechs Stellen bonitiert und danach gemittelt. Der Befall mit den drei Pilzkrankheiten *Erysiphe graminis*, *Puccinia recondita* und *Septoria tritici* wurde auf der Grundlage des Prozentsatzes der befallenen Blattfläche an der Gesamtblattfläche ermittelt.

3.3.1.7 Kornertragsmessung

Die Ertragsverteilung wurde auf allen Versuchsflächen mit Hilfe eines, mit GPS-Antenne und Ertragssensor ausgerüsteten, Mähdreschers ermittelt und kartiert. Anschließend konnten die Daten mit dem Programm *RDS Precision Farming*© der Firma *RDS Technology Ltd.* visualisiert und aufbereitet werden. In der Arbeit liegt das Augenmerk auf den relativen Ertragsunterschieden im Feld, da Ertragssensoren auch einen Eichfehler haben können und in der vorliegenden Arbeit die absoluten Ertragswerte nicht relevant waren (DLG, 2001).

3.3.2 Datenerhebung – fernerkundlich

3.3.2.1 Satellitenbilder

Die fernerkundliche Beobachtung der Versuchsflächen sollte während der Hauptvegetationsperiode von Mitte April bis Ende Juni mit einer Aufnahmeserie des *QuickBird*-Satelliten erfolgen. Der optische Sensor des *QuickBird* verfügt im Vergleich zu anderen operationellen Satellitensensoren über eine hervorragende spektrale, räumliche und zeitliche Auflösung. Wie jeder optische Sensor ist auch *QuickBird* durch Wolkenbedeckung gestört; die stärkste Einschränkung im operationellen Einsatz erfährt dieses Satellitensystem jedoch durch das kleine Aufnahmefenster. Verschiedene Nutzer konkurrieren deshalb um die brauchbaren Szenen dieses Satellitensensors. Aus diesem Grund konnte im Rahmen dieser Studie nur eine einzige Satellitenszene im Jahr 2002 (Dikopshof) sowie eine im Jahr 2003 (Klein Altendorf) erworben werden.

Der optische Satellit *QuickBird* wurde im Oktober 2001 in seine Umlaufbahn in 450 m Höhe gehoben und liefert seitdem kommerziell Fernerkundungsbilder. Der Sensor des *QuickBird*-Satelliten bietet momentan die beste räumliche Auflösung, die für zivile Zwecke zu erhalten ist. Der eingebaute, sehr hoch auflösende Sensor liefert bei nadir-Aufnahmen im panchromatischen Modus eine maximale räumliche Auflösung von 0,61 m und im multispektralen Modus eine maximale räumliche Auflösung von 2,44 m. Wegen der Abweichung der Aufnahmegeometrie in den gelieferten Szenen vom Dikopshof und Klein Altendorf aufgrund der Verschwenkung des Sensors betrug die räumliche Auflösung des panchromatischen Bildes 0,7 m und die des multispektralen Bildes 2,8 m. Die Satellitenbilder wurden als „Standard Imagery Products“ bezogen und waren sensorkorrigiert, sowie radiometrisch und geometrisch korrigiert. Projiziert wurden die Bilder auf die UTM Projektion (WGS84). Die weiteren technischen Spezifikationen des *QuickBird* Satelliten sind in Tab. 3.5 nachzulesen.

Die Verfügbarkeit der optisch sehr hoch aufgelösten Satellitenbilder ist in unseren Breitengraden sehr beschränkt. Dies hat sowohl mit der relativ häufigen Bedeckung mit Wolken und der nur 3-4tägigen Wiederholrate zu tun, als auch mit der Unzulänglichkeit des Services seitens der Betreiber und Provider. Gleichwohl konnte im Jahr 2002 ein wolkenfreies Satellitenbild von der Versuchsfläche am Dikopshof

mit der *Environmental Quality* „Excellent“¹⁶ erworben werden. Im Jahre 2003 wurde ein Satellitenbild mit der *Environmental Quality* „Fair“ von der Fläche in Klein Altendorf aufgenommen und zugestellt.

Tab. 3.5 Daten und Parameter des *QuickBird* Satelliten, sowie technische Eigenschaften des Sensors (verändert nach: DigitalGlobe®)

QuickBird Parameter	
Launch Date	October 18, 2001
Launch Vehicle	Boeing Delta II
Launch Location	Vandenberg Air Force Base, California
Orbit Altitude	450 km
Orbit Inclination	97,2 Grad, Sonnensynchron
Speed	7,1 km/s
Equator Crossing Time	10:30 (descending node)
Orbit Time	93,5 Minuten
Revisit Time	1-3,5 Tage abhängig von latitude (30° off-nadir)
Swath Width	16,5 km x 16,5 km (nadir)
Metric Accuracy	23-meter horizontal (CE90%)
Digitization	11 bits
Resolution	Pan: 61 cm (nadir) bis 72 cm (25° off-nadir) MS: 2,44 m (nadir) bis 2,88 m (25° off-nadir)
Image Bands	Pan: 450-900 nm Blau: 450-520 nm Grün: 520-600 nm Rot: 630-690 nm NIR: 760-900 nm

3.3.2.2 Hubschrauberbilder

Um trotzdem eine Zeitreihe von Bildern aus einer Vegetationsperiode zu erhalten, wurden im Jahr 2003 zusätzlich zu den bestellten Satellitenbildern Überfliegungen mit einem Hubschrauber durchgeführt. Zur Bildaufnahme wurde eine multispektrale CCD Kamera verwendet, die im Außenbereich des Hubschraubers angebracht wurde. Diese Kamera wurde mit Hilfe eines Laptops gesteuert und lieferte Bilder mit einer Auflösung von 1024 x 1024 Pixel und 8 bit. Die Kamera ermöglichte durch ein hinter dem Objektiv liegendes Prisma und drei CCD-Sensoren die gleichzeitige Aufnahme von drei Kanälen. Diese konnten aus den folgenden vier verfügbaren spektralen Kanälen frei gewählt werden:

¹⁶ *Environmental Quality* gibt die atmosphärischen Bedingungen für die Fernerkundung (Schmutzpartikel, Aerosole usw.) zum Zeitpunkt der Aufnahme in fünf Abstufungen an: Excellent, Good, Fair, Marginal, Poor.

Grün: 500-580 nm

Rot: 620-700 nm

NIR: 735-865 nm

Während aller Überflüge wurde in der Kanalkombination NIR/Grün/Rot (RGB) aufgenommen. Der Ausschluss des blauen Kanals beruhte darauf, dass dieser Kanal bei der Berechnung von Vegetationsindizes so gut wie nie benutzt wird, da dieser nur einen geringen Informationsgehalt zum Pflanzenbestand enthält.

Aufnahmen von der Versuchsfläche am Dikopshof wurden am 16. Mai, 27. Mai, 2. Juni und 13. Juni 2003 gemacht.

3.3.2.3 Bodenbilder

Um einen visuellen Eindruck der verschieden behandelten Parzellen zu erhalten, wurden digitale Fotos von den Versuchsflächen in beiden Anbaujahren mit einer digitalen Kamera (Canon IXUS v³) vom Boden aus gemacht. Im ersten Jahr von den Versuchsflächen und im zweiten Jahr von jeder Versuchsparzelle.

3.4 Datenauswertung

3.4.1 Fernerkundungsdaten

Auf eine weitergehende Prozessierung der Fernerkundungsszenen, z. B. eine Atmosphärenkorrektur, wurde verzichtet, um die radiometrische Information möglichst nicht zu verändern. Albertz (2001) merkt an, dass in vielen praktischen Fällen auf eine Atmosphärenkorrektur verzichtet wird, da komplexe Rechnungen zur Modellierung der Beleuchtung notwendig sind, um eine detaillierte Korrektur des Bildes durchzuführen. Karpouzli (2003) empfiehlt eine Atmosphärenkorrektur nur, wenn eine quantitative Analyse durchgeführt werden soll. Dagegen befindet Mather (1999) eine Korrektur der atmosphärischen Störungen bei einem Vergleich von Reflektanzen zu unterschiedlichen Zeitpunkten oder bei der Berechnung von Indizes aus mehreren Kanälen eines multispektralen Bildes als sehr wichtig. Begründet wird dies damit, dass einerseits die Luftmassen in der Atmosphäre in ständiger Bewegung sind und damit der Einfluss der Atmosphäre auf den Strahlengang zu unterschiedlichen Aufnahmetermen niemals gleich ist und andererseits verschiedene

Wellenlängen unterschiedlich stark beeinflusst werden. Diesen Argumenten ist durchaus zu folgen. In den eigenen Untersuchungen lagen jedoch keine Zeitreihen der Satellitenbilder vor, womit ein maßgeblicher Anlaß für eine Atmosphärenkorrektur entfiel.

Laut Albertz (2001) werden dagegen häufig einfache Methoden eingesetzt, um die Einflüsse der Atmosphäre wenigstens genähert zu reduzieren: „... weitverbreitete Verfahren gehen davon aus, dass die Atmosphäre in infraroten Spektralkanälen keinen nennenswerten Einfluss hat.“ Weitergehend erläutert Albertz, zum Ausführen der „... Methode benutzt man die Histogramme der Grauwerte, um Korrekturen herzuleiten. Auch dabei wird angenommen, dass in der Bildszene dunkle Flächen vorhanden sind, die im sichtbaren und infraroten Licht sehr wenig reflektieren. Dann werden diese Bereiche im Histogramm des Infrarotkanals zu sehr niedrigen Grauwerten führen. Im zu korrigierenden Kanal kürzerer Wellenlängen sind die Flächen aber durch das Luftlicht aufgehellt. Deshalb wird die Verschiebung der niedrigsten Histogrammwerte als Folge des Atmosphäreinflusses interpretiert und daraus ein Korrekturbetrag abgeleitet“ (Abb. 3.7).

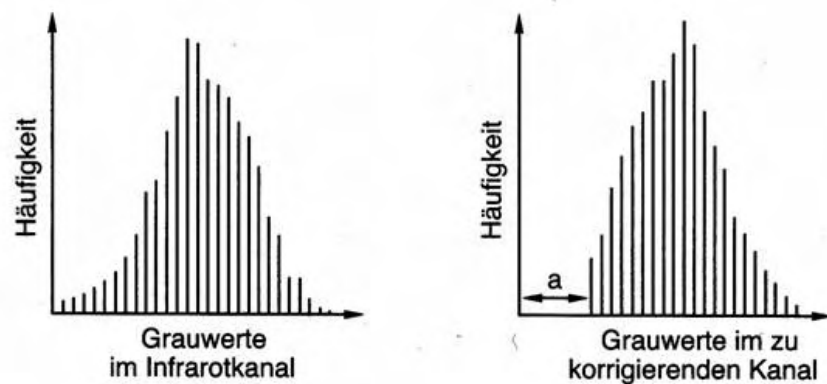


Abb. 3.7 Ableiten eines Korrekturbetrages a aus dem Vergleich von Histogrammen zur Reduktion von Atmosphäreinflüssen auf Satellitenbilddaten (Quelle: Albertz, 2001)

Ein Vergleich der Grauerthistogramme der einzelnen Kanäle des multispektralen *QuickBird* Bildes ergab, dass die Verschiebung des ersten Grauwertes zwischen den Kanälen nur 2,5% betrug. Bei einer Modellberechnung des normalisierten Indizes NDVI ergab sich dadurch eine mögliche Abweichung von $<0,5\%$. Bedingt durch diese geringe Abweichung wird in der vorliegenden Arbeit davon ausgegangen, dass aufgrund der extrem kleinen Beobachtungsfläche – bezogen auf die Entfernung zum Sensor – keine wesentlichen Unterschiede in der Einstrahlung zu erwarten sind.

Hinzu kommt noch, dass durch das Verfahren der Atmosphärenkorrektur eine Veränderung der radiometrischen Information stattfindet, die, wie bereits erwähnt, vermieden werden sollte.

Bei der Luftbildreihe wurde der Einfluss der Atmosphäre aufgrund der geringen Aufnahmehöhe und der nicht vorhandenen Sensorcharakteristika als vernachlässigbar eingestuft.

Aus den oben genannten Gründen war die Konvertierung der vom *QuickBird*-Sensor gemessenen einfallenden Strahlendichte in absolute Reflektanzwerte nicht erforderlich, da nach Mather (1999) diese Umwandlung auch nur dann sinnvoll ist, wenn Fernerkundungsbilder in Zeitreihen miteinander verglichen werden. Im Ergebnisteil wird die Differenzierung der Vitalitätsstufen anhand der relativen Differenzen vorgenommen.

Die Reflexionswerte in den einzelnen Kanälen der Satellitenbilder werden in der vorliegenden Arbeit als Grauwerte im 11 bit Format angegeben, mit 0 = Schwarz, 2047 = Weiß. Die multispektralen Bilder, welche vom Hubschrauber aus aufgenommen wurden, liegen im 8 bit Format vor, so dass hier 0 = Schwarz und 255 = Weiß ist.

Die Auswertung der Bilddaten des Satellitensensors und der CCD-Kamera erfolgte in Form von unterschiedlichen Kombinationen der multispektralen Kanäle: SAVI, $NDVI_{(rot)}$ ¹⁷, $NDVI_{(grün)}$, WdVI (Rousse et al., 1973; Huete, 1988; Clevers, 1988; Gitelson und Merzlyak, 1997). Diese VI's wurden im Hinblick auf die mit den Parzellenversuchen erzeugten Stressmerkmale an Winterweizen aus den vielen in der Literatur beschriebenen Vegetationsindizes (siehe Kap. 2.2.2) als fernerkundliches Kriterium ausgewählt. Da zu erwarten war, dass im Laufe des Wachstums, d. h. mit zunehmender Masse der vitalen Blätter, der bekannte Sättigungsbereich des NDVI überschritten wird (Schellberg und Kühbauch, 1991), wurde zusätzlich der so genannte $NDVI_{(grün)}$ ausgewertet. Der Vorteil des SAVI und des WdVI ist darin zu sehen, dass bei der Berechnung der Indizes störende Reflexionseinflüsse vom Boden berücksichtigt und teilweise beseitigt werden können. Dies sollte sich besonders zu einem frühen und sehr späten Wuchsstadium des Weizenbestandes bemerkbar machen, da dann die Pflanzendecke nicht geschlossen ist und Bodenreflexionen zu einem Mischsignal am Sensor führen.

¹⁷ Im weiteren Verlauf der Arbeit wird der $NDVI_{(rot)}$ der Einfachheit halber nur noch als NDVI bezeichnet.

Die Berechnung und Auswertung der Indizes wurde mit dem Programm ERDAS IMAGINE® 8.5 von ERDAS® durchgeführt.

3.4.2 Ground truth Daten

Die ortsgenau aufgenommenen Daten wie Feldaufgang, Wuchshöhe, Stickstoffversorgung und Krankheitsbefall wurden tabellarisch in EXCEL® aufgearbeitet und dann mit dem Programm ArcView GIS 3.2® räumlich visualisiert. Hierbei wurde zwischen den Messpunkten mittels des Invers-Distance-Weighting (IDW) interpoliert.

Die statistische Auswertung der Fernerkundungsszenen mit den ground truth Daten erfolgte mit dem Programm SAS 8.2®. Die Daten wurden auf Normalverteilung (PROG UNIVARIATE) geprüft, und wenn diese vorlag wurde die varianzanalytische Verrechnung (PROG ANOVA) durchgeführt. Als Irrtumswahrscheinlichkeit wurde $\alpha=0,05$ angenommen. Die errechneten Mittelwerte wurden mit dem TUKEY-Test auf Signifikanz geprüft und durch unterschiedliche Buchstaben gekennzeichnet.

3.4.3 Vergleich verschiedener Boniturraster

Die erstellten Karten aus ArcView 3.2® und die berechneten fernerkundlichen Daten wurden mit dem Programm MiniGis® zusammengeführt. Dieses Programm wurde am Institut für Pflanzenbau erstellt (Lock, 2003) und ermöglicht einen einfach durchzuführenden Vergleich verschiedener Rasterdaten miteinander.

Damit konnten verschiedene Boniturraster auf ihre Eignung hin überprüft werden, so wie es in der zusätzlichen Fragestellung (vgl. 1.1) dieser Arbeit vorgesehen war. Hierzu wurde zuerst eine Rasterkarte der in ArcView 3.2® interpolierten Befalls-, Stickstoff-, Kornertrags- oder NDVI-Karten in dem Programm geöffnet. Danach wird eine der Fragestellung angepasste **Region of interest (Roi)** Karte geladen, um gezielt Werte aus bestimmten Bereichen der Rasterkarte einzugrenzen. Nach dem Aufrufen einer Tabelle, in der den Farbwerten der Rasterkarte definierte Werte – z. B. „Ertrag pro ha“ oder „prozentualer Befall mit Krankheiten“ – zugeordnet werden, liefert das MiniGis® den Durchschnittswert und die Werteverteilung innerhalb der Roi's. Da zur Kennzeichnung der Roi vier Farben zur Verfügung stehen, können gleichzeitig vier Flächen getrennt ausgewertet werden (Abb. 3.8). Die ermittelten Werte werden in einer Textdatei gespeichert und anschließend ausgewertet.



Abb. 3.8 Oberfläche der Software MiniGis[®] zur Auswertung von Rasterdaten. (1) zeigt das gesamte Programm mit geladener Rasterkarte (hier *QuickBird*-NDVI-Bild) und überblendeter Region of interest (Roi) (rote, gelbe und grüne Kreise und Rechtecke). Im rechten Teil (2) ist das Ergebnis der Auswertung der grünen Roi abzulesen. „SNO“ bezeichnet die sample number, „RGB“ die zugehörigen Grauwerte, „Numb.Pixel“ die Anzahl an Pixeln mit entsprechenden RGB-Werten und „Yield“ den Gesamtertrag (Kornertrag, NDVI-Wert usw.) aus allen Pixeln. Mit dem Yield Assistant (3) können die Werte gespeichert und benutzerdefiniert benannt werden. In den Karten (4) und (5) ist beispielhaft die Parzellen- (Rechtecke) sowie Bonitурpunkttauswertung (Kreise) dargestellt.

4 Ergebnisse

Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist der Ergebnisteil in drei Unterpunkte gegliedert. Im ersten Teil werden die beiden Versuchsflächen nach Jahren getrennt dargestellt, da entweder die Versuchsfragestellung unterschiedlich ist oder verschiedene Untersuchungsparameter vorliegen. Im zweiten Teil wird die Möglichkeit der Ableitung von Managementkarten anhand der Satellitenbilder erläutert und graphisch dargestellt. Der dritte Teil behandelt schließlich die notwendige räumliche Auflösung von ground truth Daten im landwirtschaftlichen Versuchswesen zur Validierung von sehr hoch aufgelösten Satellitenbildern.

4.1 Versuchsergebnisse 2002 und 2003

4.1.1 Dikopshof 2002

Die im Versuch erzeugten Unterschiede in Vitalität und Biomasse – ausgelöst durch die variable Fungizid- und N- Behandlung – traten im Verlauf der Vegetationsperiode 2002 auf „Schlag VI“ erwartungsgemäß deutlich hervor. Hilfreich war hierfür neben der Sortenauswahl auch die für die Entwicklung von Pilzkrankheiten günstige feucht-warme Witterung in April und Mai.

Der Feldaufgang war, über das Feld verteilt, sehr heterogen und zeigte große Schwankungen zwischen 41% und 90%. Ein Zusammenhang zwischen dem heterogenen Feldaufgang und der Bodenkarte oder späteren Verteilungsmustern der Krankheiten und Stickstoffversorgung konnte nicht festgestellt werden (Abb. 4.1).

Signifikante Unterschiede in der Stickstoffversorgung der Pflanzenbestände wurden durch die SPAD-Werte (siehe Kap. 3.3.1.3) bestätigt. Ende Mai lagen die Mittelwerte in den ungedüngten Parzellen bei 42,9, in den mit Stickstoff gedüngten bei 49,8 (Abb. 4.1).

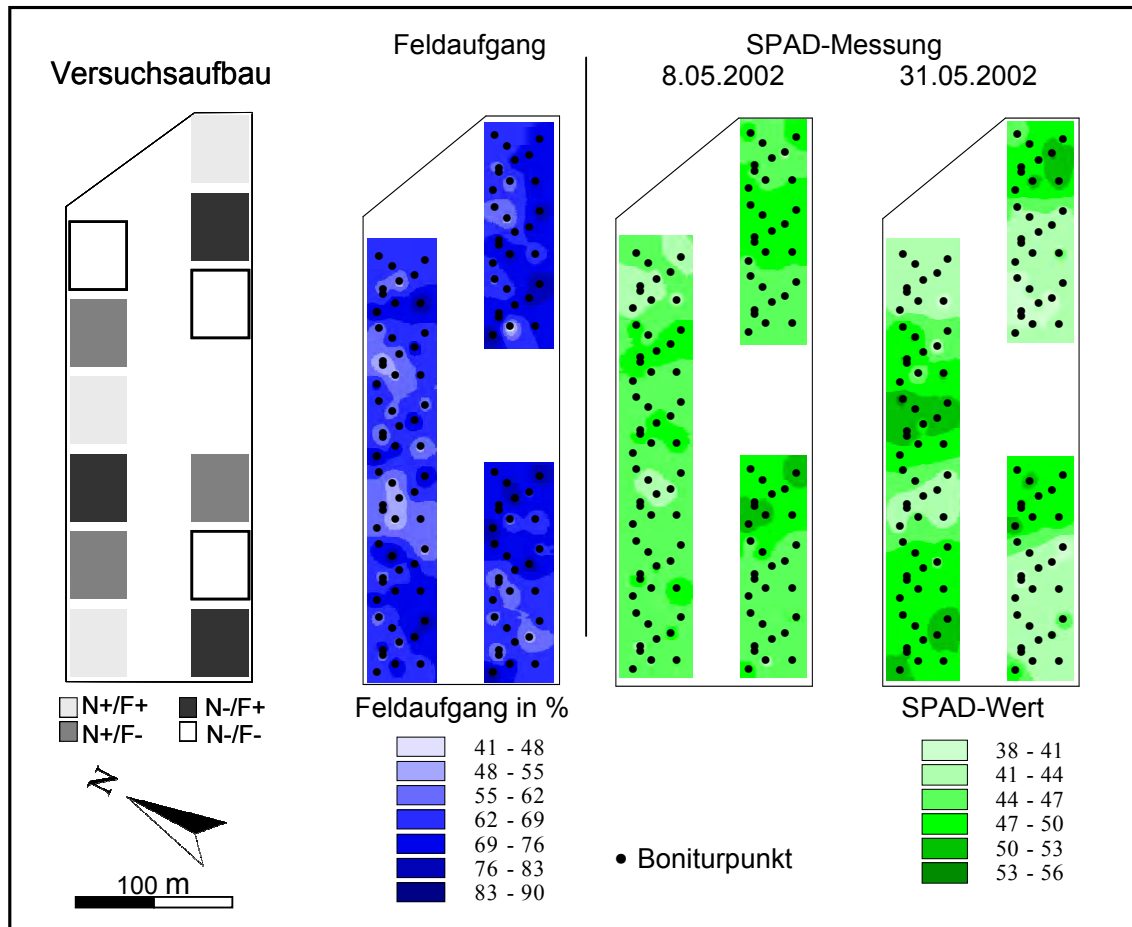


Abb. 4.1 Verteilung von Feldaufgang und SPAD-Messungen vom 08. 05. und 31. 05. 2002 in der Versuchsfläche „Schlag VI“. Zwischen den Boniturstellen wurde mittels Invers-Distance-Weighting interpoliert.

Der Krankheitsbefall begann in den unbehandelten Parzellen ab dem 25. April mit dem ersten Auftreten von *Puccinia recondita* (Braunrost). Bis Ende Mai breiteten sich die Krankheiten in der bewusst für das Experiment gewählten anfälligen Sorte *Kanzler* so stark aus, dass es an einzelnen Boniturstellen auf den unteren Blättern zu Befallsstärken mit *Puccinia recondita* und *Septoria tritici* von bis zu 28 % kam. *Erysiphe graminis*, der Echte Mehltau, trat mit bis zu 5% an den unteren Blättern auf. In den gesund gehaltenen Parzellen konnte nur ein sehr geringer Befall, zumeist auf den unteren Blättern festgestellt werden. Die Verteilung und Entwicklung der einzelnen Krankheiten innerhalb der Parzellen zu den Terminen 16. und 31. 05. 2002 kann Abb. 4.2, Abb. 4.3 und Abb. 4.4 entnommen werden. Die Verteilung mit Pilzkrankheiten ist getrennt nach den unteren, mittleren und oberen Blättern dargestellt.

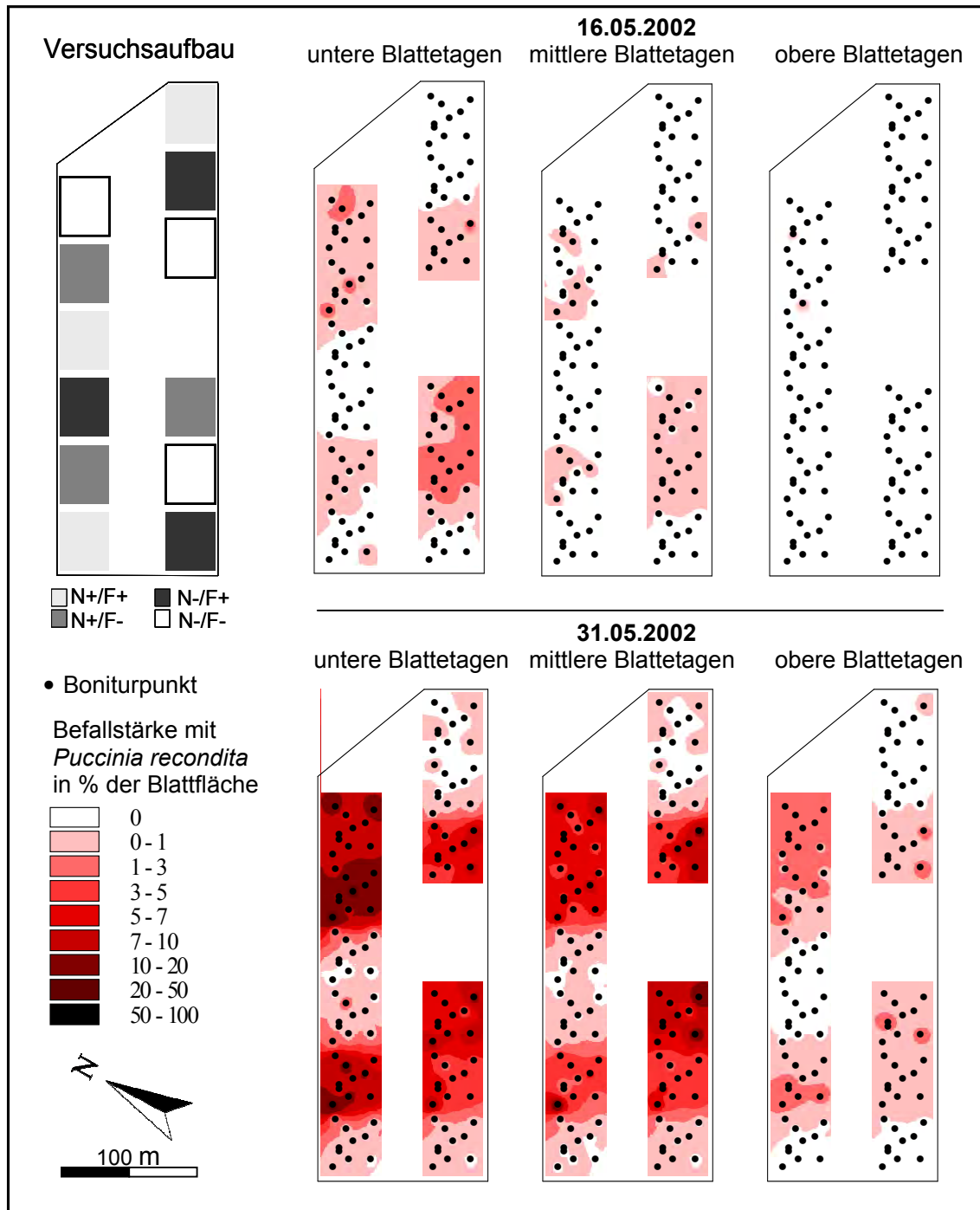


Abb. 4.2 Verteilung des Befalls mit *Puccinia recondita* in % der Blattfläche auf den unteren, mittleren und oberen Blattetagen zu den Terminen 16. und 31. 05. 2002 in der Versuchsfläche „Schlag VI“. Zwischen den Boniturstärken wurde mittels Invers-Distance-Weighting interpoliert.

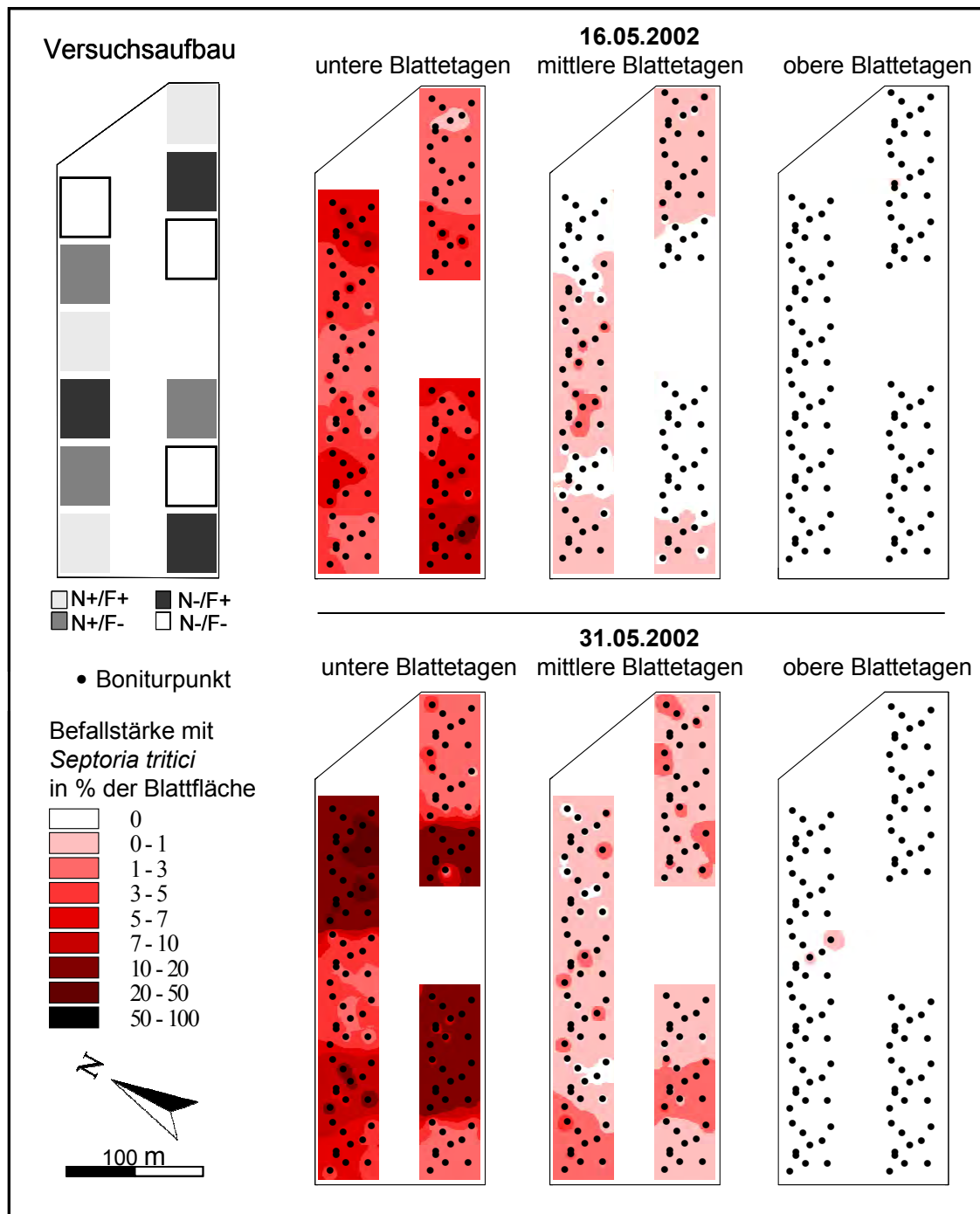


Abb. 4.3 Verteilung des Befalls mit *Septoria tritici* in % der Blattfläche auf den unteren, mittleren und oberen Blattetagen zu den Terminen 16. und 31.05. 2002 in der Versuchsfläche „Schlag VI“. Zwischen den Boniturpunkten wurde mittels Invers-Distance-Weighting interpoliert.

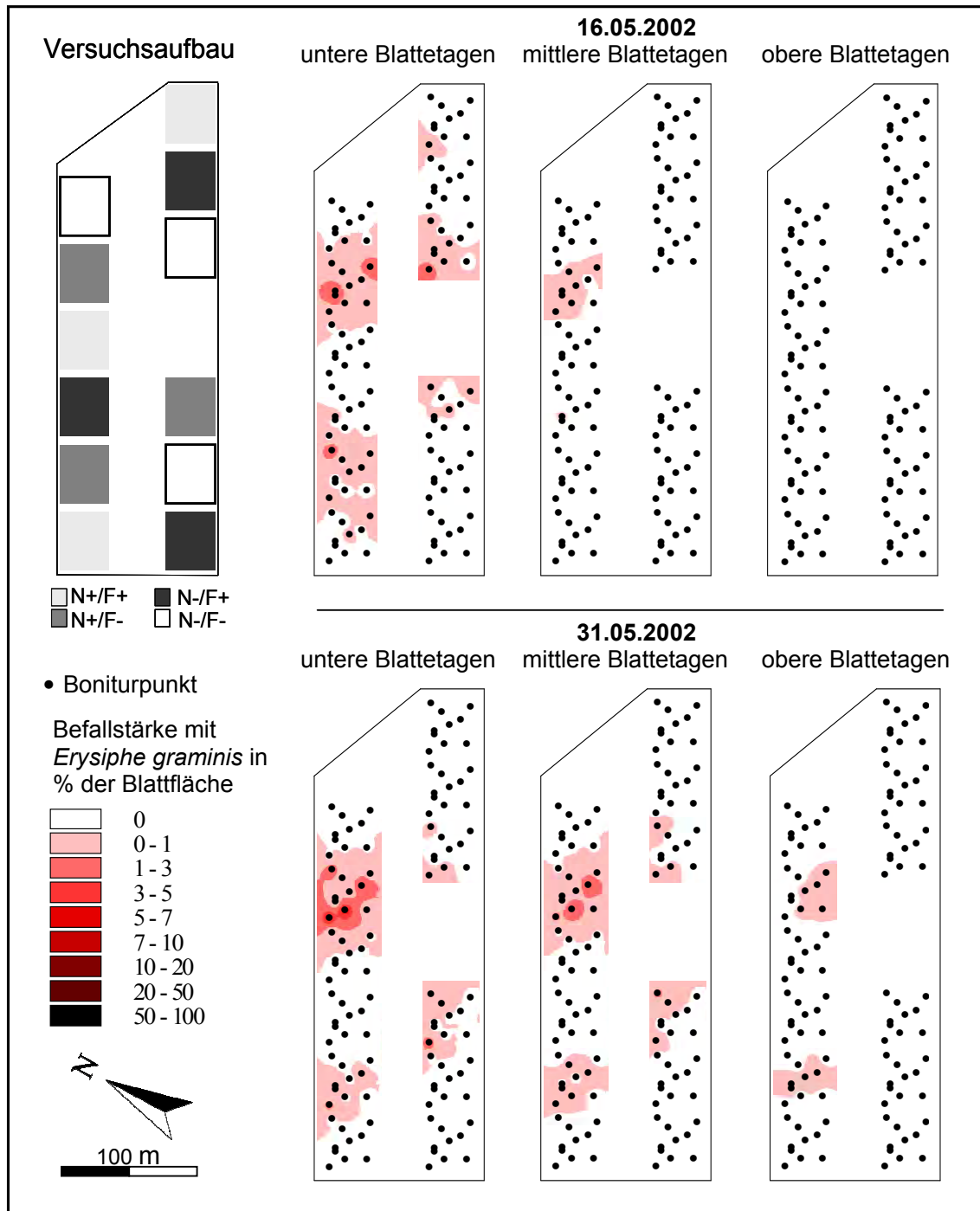


Abb. 4.4 Verteilung des Befalls mit *Erysiphe graminis* in % der Blattfläche auf den unteren, mittleren und oberen Blattetagen zu den Terminen 16. und 31.05.2002 in der Versuchsfläche „Schlag VI“. Zwischen den Boniturstärken wurde mittels Invers-Distance-Weighting interpoliert.

Die Kriterien der Ertragsbildung zeigten deutliche Unterschiede zwischen den vier Behandlungsvarianten. Differenzen im Merkmal „Körner je Ähre“ ergaben zwischen der Faktorkombination N+/F+ und den anderen drei Faktorkombinationen signifikante Unterschiede. N+/F+ hatte im Durchschnitt 51 Körner je Ähre, dagegen N+/F-, N-/F+ und N-/F- im Durchschnitt 46 Körner je Ähre. In den letztgenannten drei Behandlungsvarianten betrug die Differenz im Durchschnitt weniger als ein Korn pro Ähre. Deutlicher fielen die Unterschiede im Tausendkorngewicht aus. Sie betrugen 49,1 g bei N+/F+, 39,7 bei N+/F-, 46,2 g bei N-/F+, 43,3 g bei N-/F- und waren signifikant unterschiedlich (TUKEY-Test). Hiermit erklären sich die relativ großen Unterschiede der Kornerträge in den einzelnen Parzellen.

Die Kornerträge wurden mit einem am Mähdescher angebrachten Ertragssensor gemessen und mittels GPS entsprechenden Ortskoordinaten zugeordnet. Aus den gespeicherten Daten konnten anschließend zweidimensionale Kornertragskarten erstellt werden. Die am 27. 07. 2002 erfassten teilflächigen Erträge, die in Abb. 4.5 in einer Konturkarte dargestellt sind, zeichnen in groben Zügen den Versuchsaufbau nach. Für den Vergleich der Erträge aus den N- und F-Behandlungsvarianten wurden aus diesen Daten jeweils die Kernbereiche (42 x 42 m²) der 45 x 45 m² großen Parzellen herangezogen. In Bereichen der N+/F+ Parzellen erreicht der Ertrag mit bis zu 106 dt ha⁻¹ sein Maximum, während in den N-/F- Parzellen die niedrigsten Erträge mit minimal 47 dt ha⁻¹ festgestellt werden. Die Maximalerträge in den N+/F+ Parzellen sind an dem Standort Dikopshof mit den dortigen hohen Ackerzahlen als normal anzusehen und decken sich mit den sonstigen Weizenerträgen der Lehr- und Forschungsstation von bis zu 110 dt ha⁻¹. Im Durchschnitt der drei Wiederholungen ergaben sich in den 4 Faktorkombinationen folgende Erträge: N+/F+ 101 dt ha⁻¹, N+/F- 75 dt ha⁻¹, N-/F+ 86 dt ha⁻¹, N-/F- 77 dt ha⁻¹. Die Varianten ohne Fungizidbehandlung hatten somit signifikant niedrigere Erträge. Auffällig ist die mit 0,31 bzw 0,37 relativ hohe Standardabweichung in den Varianten mit reduzierter Düngung im Vergleich mit den gedüngten Varianten, die nur eine Standardabweichung von 0,02 bzw. 0,09 zeigten. Festzuhalten ist, dass der Faktor Krankheit auf den Ertrag einen größeren Einfluss hatte als der Faktor Düngung.

Die experimentell erstellten Vitalitäts- und Ertragsunterschiede in der mit dem Ertragssensor eines Mähreschers erstellten Ertragsverteilungskarte (Abb. 4.5) sind wesentlich unschärfer zum Vorschein gekommen, als in dem Satellitenbild (vgl. Abb. 4.6). Dies ist damit zu erklären, dass im Mährescher stets ein Zeitversatz zwischen dem tatsächlichen Ort der Ernte und dem Durchlauf der Getreidekörner am Ertragssensor im Mährescher erfolgt, und auch die benachbarten Mähstreifen nicht präzise aneinander anschließen (siehe weiße Streifen in der Ertragskarte Abb. 4.5).

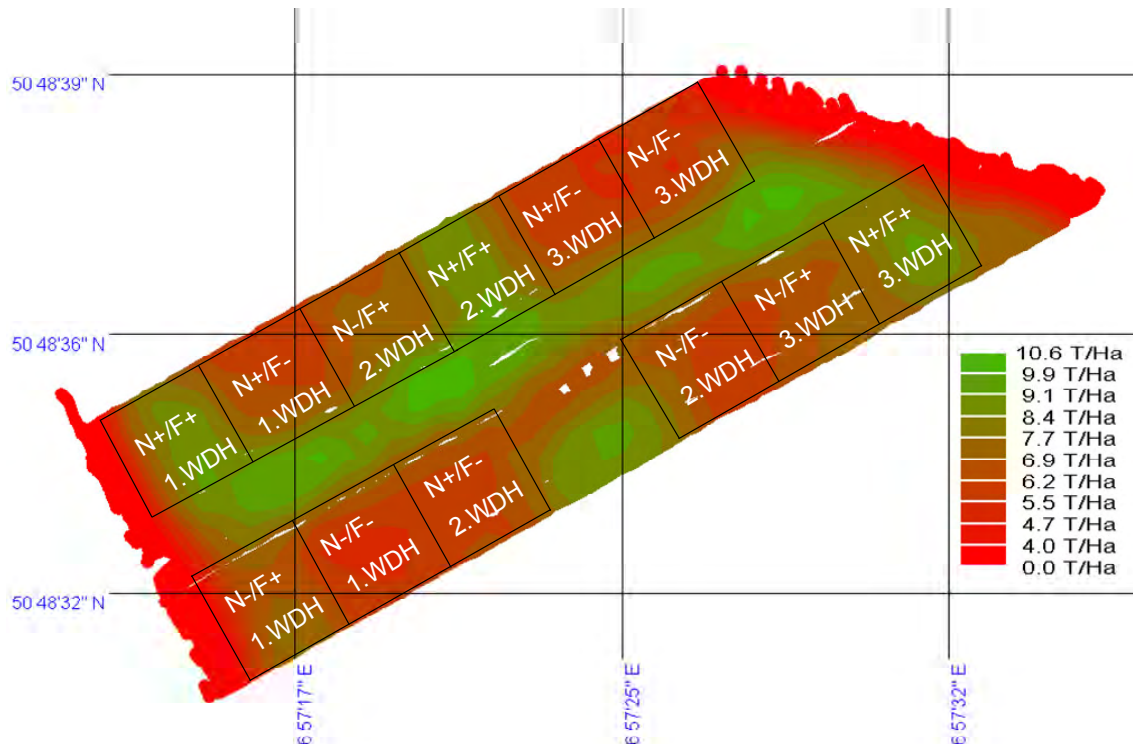


Abb. 4.5 Ertragskarte von „Schlag VI“. Die Daten wurden mit einem, an ein GPS gekoppeltem, Ertragssensor erfasst und danach von dem Programm RDS Precision Farming© der Firma RDS Technology Ltd. in einer Konturkarte dargestellt. Eingebledet ist nachträglich der Versuchsplan mit den zwölf Versuchsparzellen.

In Abb. 4.6 wird deutlich, mit welcher hohen Präzision durch Satellitenfernerkundung unterschiedliche Zustände der Vegetation erfasst werden können; in der Abbildung werden die einzelnen Behandlungskombinationen im spektralen Aufnahmemodus des *QuickBird*, mit 2,8 m räumlicher Auflösung bereits parzellenscharf abgebildet. Noch deutlicher treten die Parzellengrenzen in den panchromatischen Aufnahmen hervor (Abb. 4.11).

Im *QuickBird*-Satellitenbild vom 25. 06. 2002 sind deutliche Reflexionsunterschiede zwischen den vier Faktorkombinationen bereits bei visueller Begutachtung zu erkennen; sowohl in der Falschfarbenkombination RGB = NIR - Grün - Blau (Abb. 4.6), als auch im Vegetationsindex NDVI (Abb. 4.9).

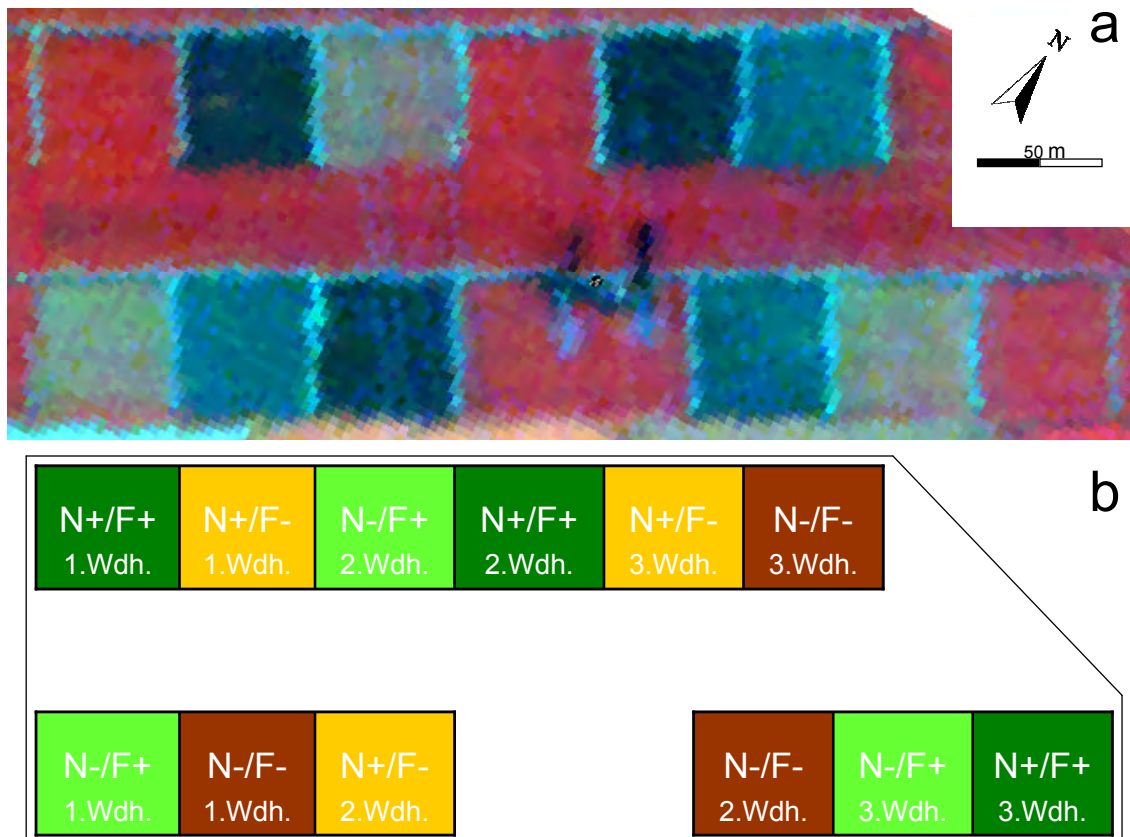


Abb. 4.6 a: *QuickBird*-Satellitenbild vom 25. 06. 2002 in der Kanalkombination 4-2-1 (RGB), räumliche Auflösung 2,8 m. Abgebildet ist „Schlag VI“ der Lehr- und Forschungsstation Dikopshof der Universität Bonn mit der Winterweizensorte *Kanzler*. b: Versuchsaufbau mit den vier Faktorkombinationen (N+, N-, F+, F-) und drei Wiederholungen (Wdh.).

In Abb. 4.7 ist zum selben Aufnahmeterrain (25. 06. 2002) der Verlauf der Reflexion des Sonnenlichts im Spektralbereich des VIS und NIR anhand des blauen, grünen, roten und NIR Kanals abgetragen. Man kann den typischen Verlauf der Reflexion des Sonnenlichts über Vegetation erkennen: Ein leichter Anstieg der Reflexion im grünen Kanal und der starke Anstieg an reflektierter Strahlung im NIR Wellenlängenbereich. Die Varianten N+ zu N-, wie auch F+ zu F- im roten Wellenlängenbereich weisen eine niedrigere Reflexion auf. Im NIR Kanal ist dagegen die Reflexion der Varianten N+ zu N- und F+ zu F- deutlich höher. Die vier Faktorkombinationen in dem Falschfarbenbild erscheinen in folgenden Farben in der Kanalkombination 4-2-1 (Abb. 4.6): N+/F+ rot, N+/F- dunkel grau, N-/F+ beige und N-/F- blaugrau. In allen drei Wiederholungen zeigen sich identische Farbgebungen. Die genauen Zahlenwerte der einzelnen Kanäle können A-Tab. 8.1 entnommen werden.

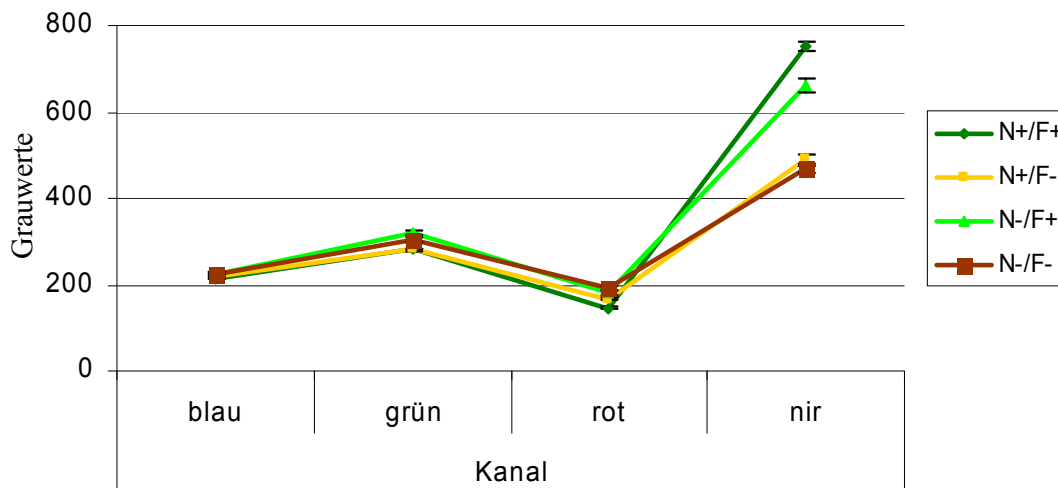


Abb. 4.7 Grauwerte des *QuickBird*-Satellitenbildes von „Schlag VI“ am 25.06.2002 in den Kanälen Blau, Grün, Rot und NIR unter dem Einfluß der Stickstoffdüngung und Fungizidbehandlung des Weizens.

Die bildanalytische Auswertung bestätigte den ersten visuellen Eindruck. Die für jede Parzelle berechneten Vegetationsindizes NDVI, $NDVI_{(grün)}$ und SAVI ergaben in den vier Faktorkombinationen signifikant unterschiedliche Werte (Abb. 4.8) bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$. Der $NDVI_{(grün)}$ zeigte jedoch die größten Unterschiede zwischen N+/F+ und den anderen drei Faktorkombinationen, was mit der späteren Sättigung des $NDVI_{(grün)}$ bei dichter Vegetation zu erklären ist.

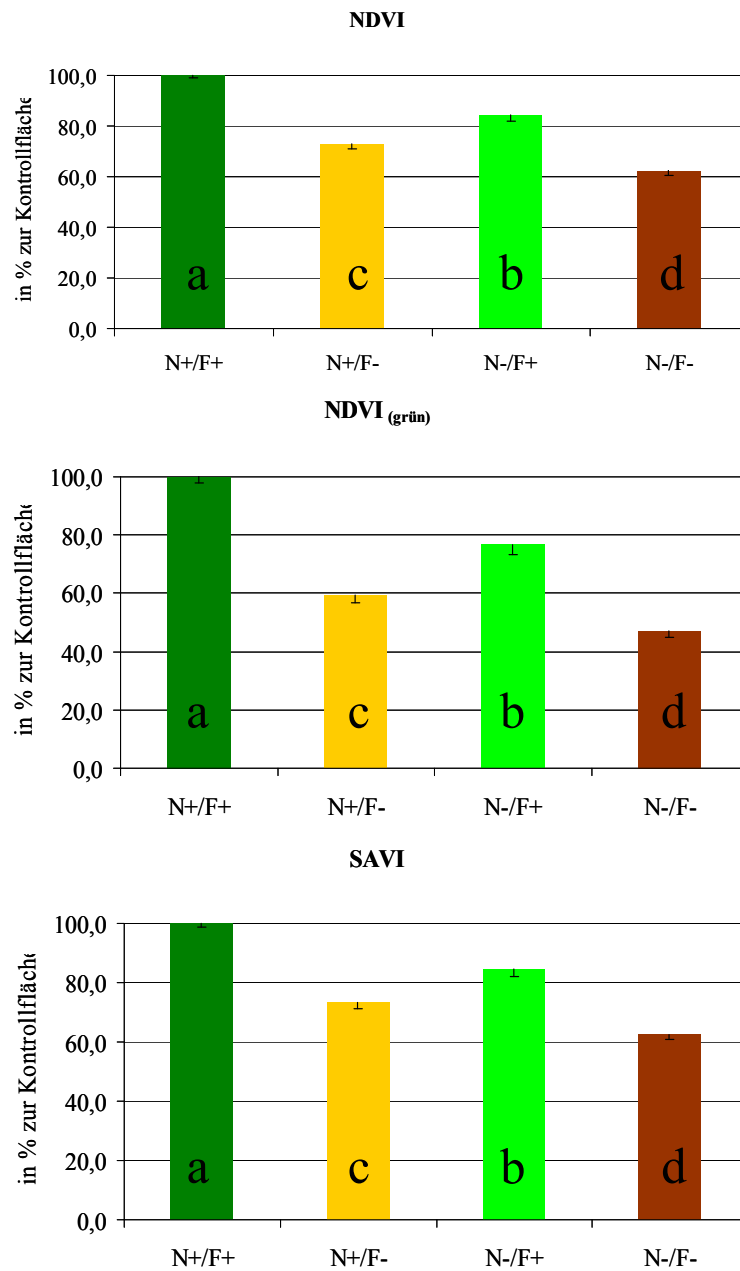


Abb. 4.8 QuickBird-Satellitenbild vom 25. 06. 2002: berechnete Vegetationsindizes der vier Faktorkombinationen; N+/F+ wurde als 100 % gesetzt. Eingezeichnet ist die Standardabweichung. Unterschiedliche Buchstaben in einer Grafik symbolisieren signifikante Differenzen.

In Abb. 4.9 ist beispielhaft das berechnete NDVI-Bild mit dem Versuchsschlag dargestellt. Die scharfe Abtrennung zwischen den verschiedenen Parzellen ist deutlich zu erkennen. Die absoluten NDVI-Werte in den gesunden Parzellen lagen im Mittel der drei Wiederholungen bei 0,67 (N+/F+) und 0,57 (N-/F+), sowie in den Parzellen mit Pilzbefall bei 0,49 (N+/F-) und 0,42 (N-/F-). Die $NDVI_{(grün)}$ -Werte lagen im Durchschnitt bei 0,45 (N+/F+) und 0,35 (N-/F+), sowie in den Parzellen mit Pilzbefall bei 0,27 (N+/F-) und 0,22 (N-/F-). Der Vegetationsindex SAVI brachte folgende Werte in den vier Varianten: 1,01 (N+/F+), 0,85 (N-/F+), 0,74 (N+/F-) und 0,63 (N-/F-). Die Berechnung des WdVI lieferte keine plausiblen Ergebnisse, was an den fehlenden exakten Reflexionswerten über unbedecktem Boden liegen kann. Hier wurden auf Reflexionswerte eines anderen Ackerschlag aus demselben *QuickBird*-Bild zurückgegriffen.

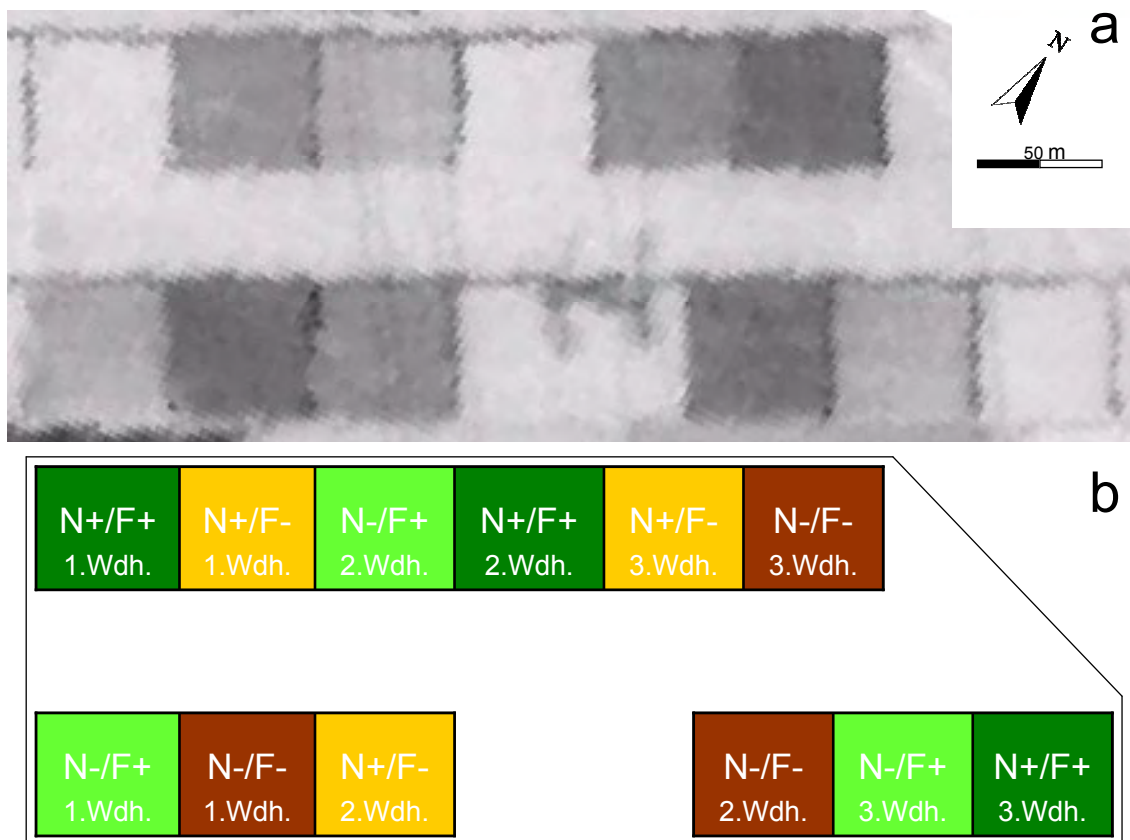


Abb. 4.9 a: *QuickBird*-Satellitenbild vom 25.06. 2002: grauwertkodierte Darstellung des berechneten NDVI; räumliche Auflösung 2,8 m. Abgebildet ist „Schlag VI“ der Lehr- und Forschungsstation Dikopshof der Universität Bonn mit der Winterweizensorte *Kanzler*. b: Versuchsaufbau mit den vier Faktorkombinationen (N+, N-, F+, F-) und drei Wiederholungen (Wdh.).

Die Trennbarkeit der Behandlungsvarianten mittels NDVI wird verdeutlicht in Abb. 4.10. Zwischen den Behandlungsvarianten 1 bis 4 gibt es im NDVI-Bild nur einen minimalen Überlappungsbereich bei den Grauwerten. Eine Trennung zwischen den vier Faktorkombinationen im Satellitenbild ist daher mit einer geringen Fehlerquote möglich. Ähnlich gut zu trennen sind die Grauwerte in den vier Behandlungskombinationen bei den VI's $NDVI_{(grün)}$ und SAVI. Dagegen ist die Trennbarkeit in den einzelnen spektralen Kanälen sehr unterschiedlich. Im blauen Kanal ist die Differenzierbarkeit gering, es zeigen sich nur kleine Unterschiede zwischen den Düngungsvarianten. Der grüne Kanal zeigt zusätzlich noch geringe Unterschiede zwischen den Fungizidvarianten. Deutliche Unterschiede zwischen den Fungizidvarianten sind im NIR Kanal zu erkennen, hingegen aber kaum zwischen den Düngungsvarianten. Eine Unterscheidung zwischen allen vier Behandlungskombinationen – wenn auch nicht so deutlich wie in den VI's – war nur im roten Kanal möglich.

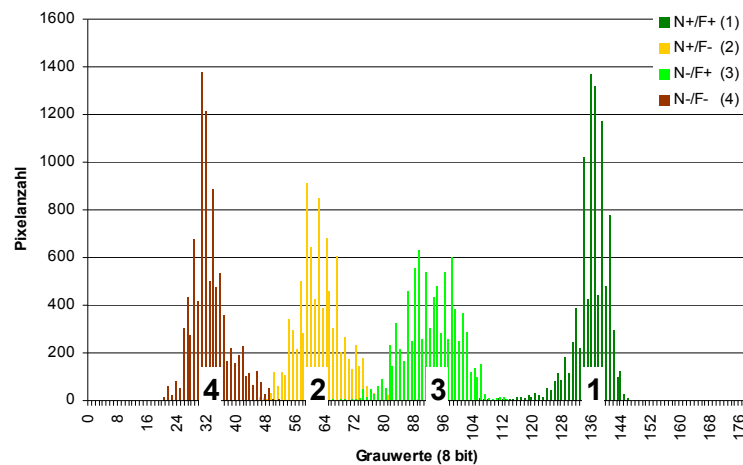


Abb. 4.10 *QuickBird*-Satellitenbild vom 25.06. 2002. Grauwerte-Verteilung im berechneten NDVI-Bild in den vier Faktorkombinationen des Weizenversuchs auf „Schlag VI“ zum Zeitpunkt der Satellitenbildaufnahme am 25.06.2002.

Die sehr hohe räumliche Auflösung des panchromatischen *QuickBird* Bildes ist in Abb. 4.11 zu sehen. Die räumliche Auflösung von 70 cm ermöglicht es, einzelne Fahrspuren exakt zu erkennen und macht sogar Unterschiede innerhalb der Parzellen gut sichtbar (siehe dazu Parzelle N+/F- 1.WDH) Wie gering allerdings in einem panchromatischen Bild die spektrale Information ist, kann an der Tatsache abgelesen werden, dass man sowohl visuell, als auch bildanalytisch nur zwischen zwei Parzellenvarianten unterscheiden kann.

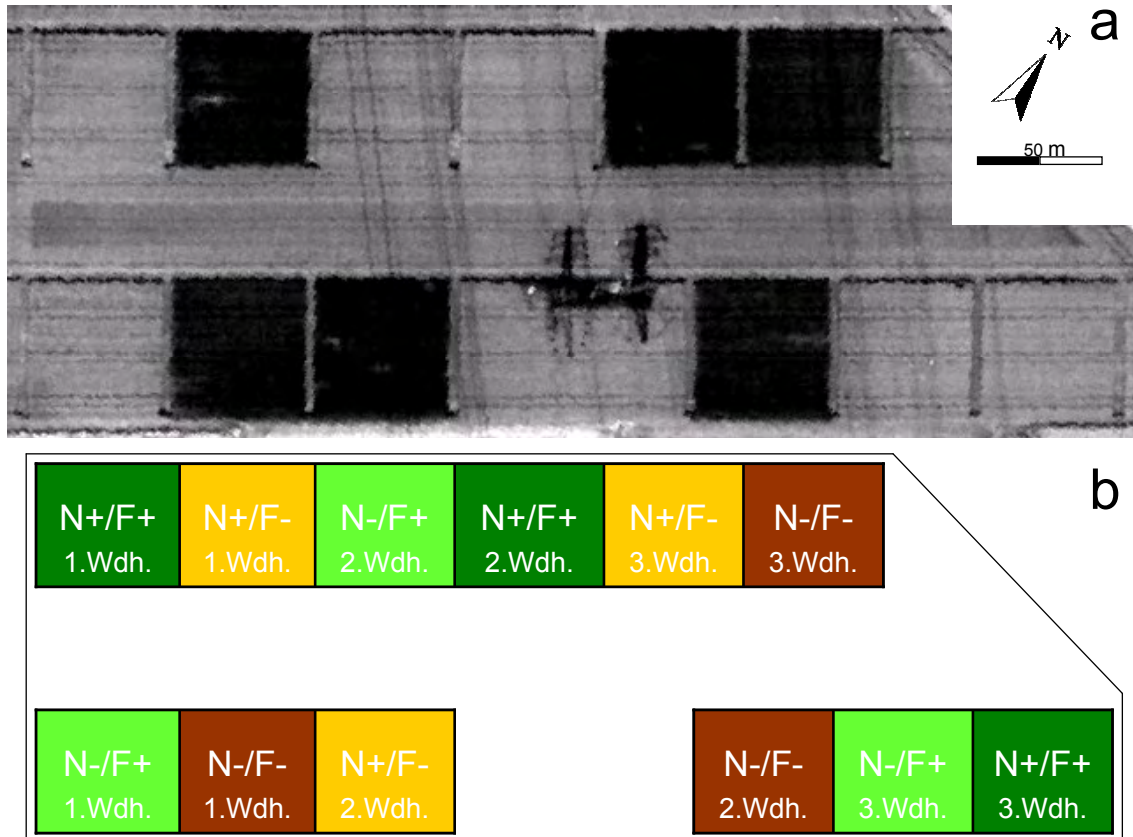


Abb. 4.11 a: *QuickBird*-Satellitenbild vom 25.06. 2002, panchromatischer Mode, räumliche Auflösung 0,7 m. Abgebildet ist „Schlag VI“ der Lehr- und Forschungsstation Dikopshof der Universität Bonn mit der Winterweizensorte *Kanzler*. b: Versuchsaufbau mit den vier Faktorkombinationen (N+, N-, F+, F-) und drei Wiederholungen (Wdh.).

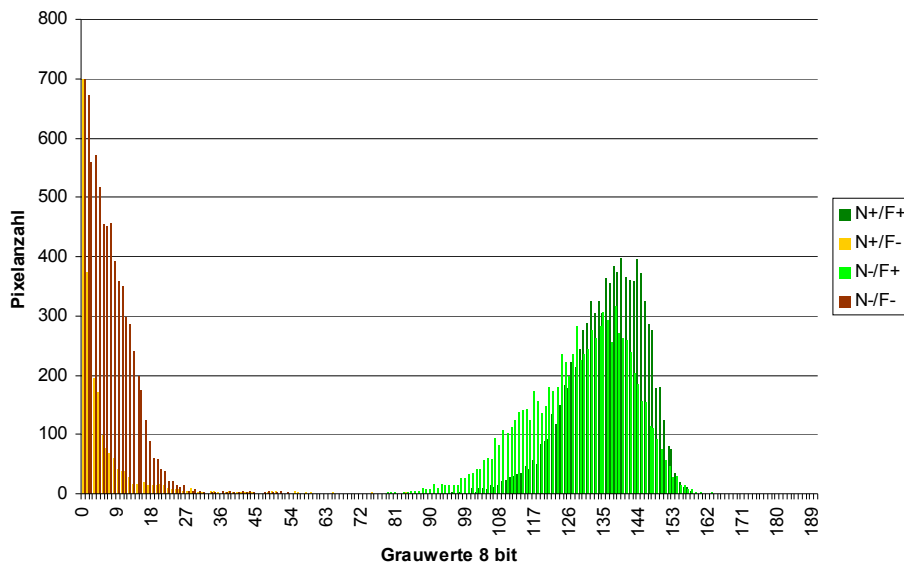


Abb. 4.12 *QuickBird*, panchromatisches Bild. Grauwerteverteilung in den vier Faktorkombinationen des Weizenversuchs auf „Schlag VI“ zum Zeitpunkt der Satellitenbildaufnahme am 25.06.2002.

In Abb. 4.12 ist die Verteilung der Grauwerte in den vier Varianten abgetragen. Die Reflexionswerte in den Varianten N+/F+ und N-/F+ einerseits, sowie N+/F- und N-/F- andererseits sind fast identisch, hingegen unterscheiden sich N+/F+ und N-/F+ signifikant von N+/F- und N-/F-. Somit war im panchromatischen Bild eine Unterscheidung nur zwischen den gesunden und kranken Parzellen möglich.

Der statistische Vergleich von durchschnittlichen NDVI-Werten des Satellitenbildes und gemittelten ground truth Daten innerhalb jeder Parzelle ergab teilweise sehr enge Korrelationen. Zwischen NDVI und befallener Blattfläche am 31. 05. betrug das Bestimmtheitsmaß (R^2) 0,62 und war bei $\alpha = 0,05$ signifikant; NDVI und SPAD-Werte zum 31. 05. waren signifikant korreliert mit $R^2 = 0,41$; die engste signifikante Korrelation ergab sich zwischen NDVI und Ertrag mit $R^2 = 0,88$.

Im Präzisionspflanzenschutz braucht man allerdings möglichst kleinräumige präzise Informationen zum Bestand, welche schnell, großflächig und mit geringem Aufwand mit Fernerkundungssensoren erfasst werden können. Deshalb wurde ein Vergleich zwischen den 120 Boniturstellen in den zwölf Parzellen und den räumlich entsprechenden NDVI-Werten der *QuickBird*-Szene vorgenommen. Hierzu wurde in dem NDVI-Bild aus einem Radius von 3 m um die entsprechende Boniturstelle ein Pixelkollektiv von 9 Pixeln extrahiert und daraus der Mittelwert des NDVI dieser Pixel ermittelt. Durch die Wahl dieses etwa 30 m² großen Ausschnitts konnte sichergestellt werden, dass Fehler in einzelnen Pixeln des NDVI-Bildes, die durch Streuungseffekte bei der Bildaufnahme entstehen konnten, nicht zu verfälschten Ergebnissen führten. Außerdem konnten so kleine Abweichungen der Lagegenauigkeit der Boniturstellen am Boden kompensiert werden.

Im Ergebnis zeigte sich, dass ein kleinräumiger Vergleich zwischen NDVI und ground truth Daten anhand der einzelnen Boniturstellen zu einer größeren Variation als ein Vergleich der durchschnittlichen Parzellenwerte führt. Der Zusammenhang zwischen NDVI und befallene Blattfläche sowie NDVI und SPAD-Werte zum 31. 05. war über die 120 Boniturstellen mit R^2 -Werten von 0,47 und 0,33 deutlich geringer, als mit den Durchschnittswerten der Gesamtparzellen. Ein enger Zusammenhang zeigte sich jedoch auch bei den 120 Boniturstellen in Korrelationsanalyse zwischen NDVI und Ertrag mit $R^2 = 0,52$. Signifikant waren alle drei Werte mit $\alpha = 0,05$ (Abb. 4.13).

Die einzelnen Werte für die 120 Boniturstellen (A-Tab. 8.2) und die Durchschnittswerte aus den zwölf Parzellen (A-Tab. 8.3) können dem Anhang entnommen werden.

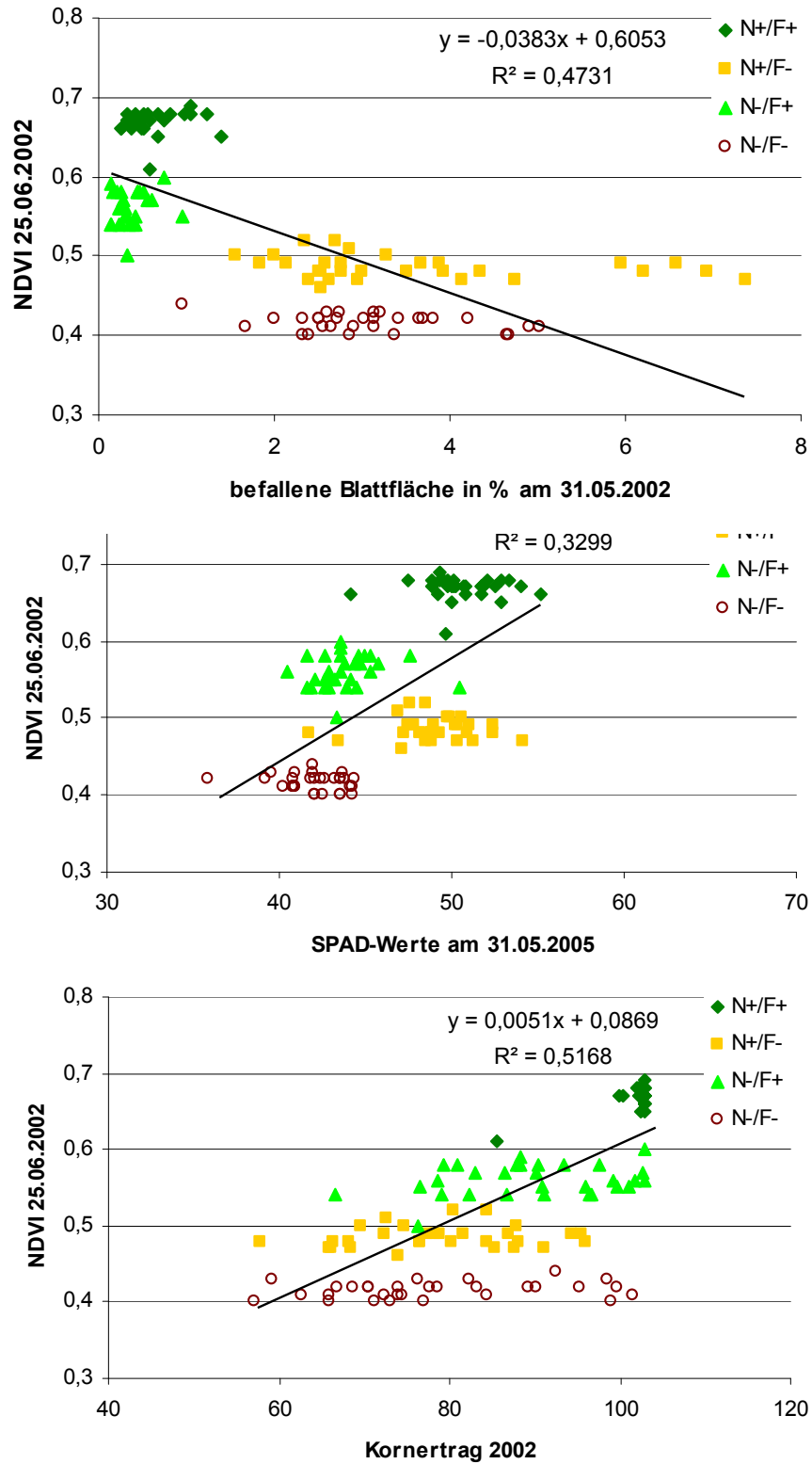


Abb. 4.13 Korrelation des NDVI mit Ertrag, SPAD-Werten und befallener Blattfläche. Verglichen wurde ein der Position des jeweiligen Boniturpunktes entsprechender kreisrunder Ausschnitt aus dem NDVI-Bild vom 25. 06. 2002 von etwa 30 m² Größe mit den ground truth Daten.

4.1.2 Dikopshof 2003

Im Jahr 2003 wurde auf der Lehr- und Forschungsstation Dikopshof ein Parzellenversuch mit den selben Stickstoff- und Fungizidbehandlungskombinationen und veränderter Parzellenanordnung auf einem anderen Ackerschlag durchgeführt.

Pilzkrankheiten waren im Versuchsjahr 2003 auf der Weizenversuchsfläche am Dikopshof ab Ende Mai innerhalb der unbehandelten Parzellen festzustellen. Dieser, aufgrund der trockenen Witterung sehr späte Befall war anfänglich gering. *Septoria tritici* war im unteren Drittel der Pflanze an max. 5% der Blattfläche festzustellen. *Erysiphe graminis* war zu diesem Zeitpunkt mit einem Befall von max. 10% im unteren Drittel und max. 5% im mittleren Drittel auf den Blättern im Bestand vertreten, konnte sich aber aufgrund geänderter klimatischer Bedingungen nicht weiter etablieren und verschwand bis Mitte Juni fast vollständig. Dafür breitete sich *Puccinia recondita* bis Mitte Juni stark aus. An einigen Boniturstellen wurden Befallsstärken von 25% ermittelt. *Septoria tritici* trat im Verlauf der Vegetation nicht stärker hervor.

Für das Experiment hätte man sich tatsächlich einen stärkeren Krankheitsbefall gewünscht. Aufgrund der außergewöhnlich langen Trockenperiode im Frühjahr waren die Ausbreitungs- und Vermehrungsvoraussetzungen für die pilzlichen Schaderreger äußerst schlecht. Dies spiegelt sich auch in der nur einmalig, nicht wie sonst üblich zweimalig, durchgeführten Fungizidbehandlung wieder. Jedenfalls war zu erwarten, dass die Differenzierung der Parzellenzustände hier schwieriger sein würde, als im Jahr zuvor.

Der ermittelte Feldaufgang für jede Parzelle zeigte, wie auch im Jahr zuvor, keinen Einfluss auf die späteren ground truth Messungen im Bestand.

Betriebsüblich gedüngte Parzellen hatten während des gesamten Beprobungszeitraums im Gegensatz zu den ungedüngten Parzellen einen um durchschnittlich 10% signifikant höheren SPAD-Wert. Dagegen wurden die SPAD-Werte durch die unterschiedliche Fungizidbehandlung nicht signifikant in eine bestimmte Richtung hin beeinflusst.

Die Höhenmessung des Bestandes ergab von Ende Mai bis Anfang Juni in den gedüngten Parzellen etwa 5% größere Werte. Ab Mitte Juni bis zum Ende des Beprobungszeitraums glichen sich die Wuchshöhen an und es konnten keine Unterschiede mehr festgestellt werden. Keinen Effekt auf die Wuchshöhe hatte in dieser Untersuchung der Faktor Fungizidbehandlung.

Die frische Biomasse variierte zwischen den gedüngten und ungedüngten Parzellen mit Beginn der ersten Messung am 24. April. Zu diesem Termin wurde in mit erhöhter N-Menge gedüngten Parzellen eine fast doppelt so große Frischmasse gemessen. Zu den späteren Terminen schrumpfte dieser Unterschied zwischen den N-Stufen in der Frischmasse auf nur noch 10%. Mit Ausbreitung der Krankheiten ging die Frischmasse in den nicht mit Fungiziden geschützten Parzellen zurück. Diese Veränderungen waren jedoch nicht signifikant. Die Trockenmasse war nur in der Variante N+/F+ signifikant höher, als in den anderen Versuchsvarianten. In den kranken Parzellen zeigte sich ein Trend hin zu geringeren Trockenmasseerträgen. Die zur Ernte am 14. 07. 2003 ermittelten Ertragsdaten ergaben nach der Auswertung ein sehr ähnliches Muster wie im Jahr zuvor (Abb. 4.14). Im Durchschnitt der drei Wiederholungen ergaben sich folgende Werte: N+/F+ 101 dt ha⁻¹, N+/F- 90 dt ha⁻¹, N-/F+ 95 dt ha⁻¹ und N-/F- 93 dt ha⁻¹. Maximal wurden in (N+/F+)-Parzellen 103 dt ha⁻¹ und minimal in (F+/F-)-Parzellen 77 dt ha⁻¹ geerntet. Aufgrund des wesentlich geringeren Befalls mit Pilzkrankheiten sind die Differenzen nicht so groß, wie im vorherigen Jahr, zeigen jedoch exakt dieselbe Reihung der Ertragsminderung mit N+/F+ > N-/F+ > N-/F- > N+/F-.

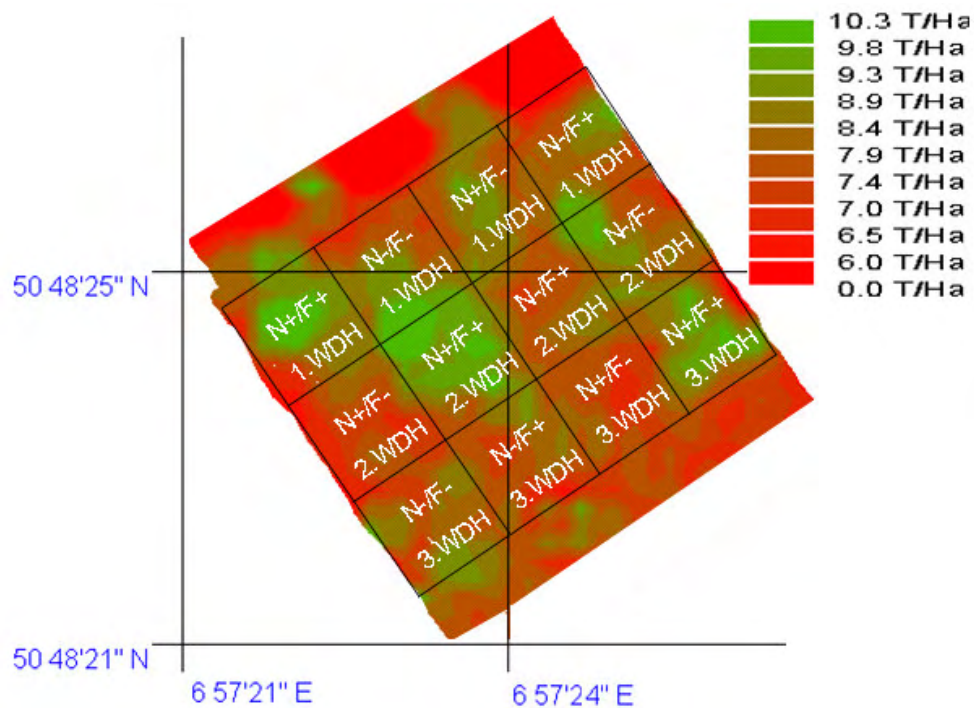


Abb. 4.14 Konturkarte von „Schlag VIII“ mit den Kornertagswerten der GPS gesteuerten Kornertagsmessung im Mähdrescher am 14.07.2003.

Für den Vergleich der ground truth Daten mit den Reflexionswerten der Versuchspartellen wurden die multispektralen Luftbilder herangezogen, da im Jahr 2003 von der Lehr- und Forschungsstation Dikopshof während der Vegetationsperiode kein Satellitenbild von *DigitalGlobe* geliefert werden konnte. Die spektrale Qualität der aufgenommenen Luftbilder erwies sich jedoch im Vergleich zu dem Satellitenbild von 2002 als wesentlich schlechter; nur an vier von sechs Überflugterminen konnten die Luftbilder ausgewertet werden.

Exemplarisch wurde das Luftbild vom 02. 06. 2003 herangezogen, um den Versuch auf „Schlag VIII“ darzustellen (Abb. 4.15). Eine detaillierte Auflistung der Ergebnisse zu den vier Überflugterminen kann den A-Tab. 8.4, A-Tab. 8.5, A-Tab. 8.6 und A-Tab. 8.7 entnommen werden.

Die verschiedenen Behandlungsvarianten der Winterweizenbestände führten zu Veränderungen in der Reflexion in den einzelnen Kanälen. Durch die Berechnung des NDVI in den 12 Parzellen konnten diese Unterschiede klar herausgestellt werden. (N+)-Parzellen hatten im Durchschnitt NDVI-Werte von 0,48 und (N-)-Parzellen von 0,42. Der $NDVI_{(grün)}$ und der SAVI ergaben in den normal mit Stickstoff versorgten Parzellen Werte von 0,44 sowie 0,72 und in den unterversorgten Parzellen im Durchschnitt 0,38 sowie 0,63 (siehe A-Tab. 8.6 im Anhang). Die Berechnung des WDVI aus den Hubschrauberbildern lieferte keine brauchbaren Ergebnisse, da keine Reflexionswerte über unbedecktem Boden in den Bildern vorlagen. Die Pilzkrankungen hatten mit einem maximalen Befall von etwa 5% an der gesamten Blattfläche keinen Einfluss auf die von der Kamera registrierten Reflexionen. Anhand der Korrelationsanalyse konnte kein Zusammenhang zwischen NDVI und Ertrag nachgewiesen werden.

Der Einfluss des Krankheitsbefalls war in den drei aufgenommenen spektralen Kanälen nicht ausgeprägt genug und überdies war die Bildqualität aus dem Hubschrauber schlechter, als die des *QuickBird*-Sensors aus dem Vorjahr. Durch beide Faktoren konnten sehr wahrscheinlich spezifische spektrale Informationen des Pflanzenbestandes der verschiedenen Behandlungskombinationen nicht vom Sensor registriert werden.

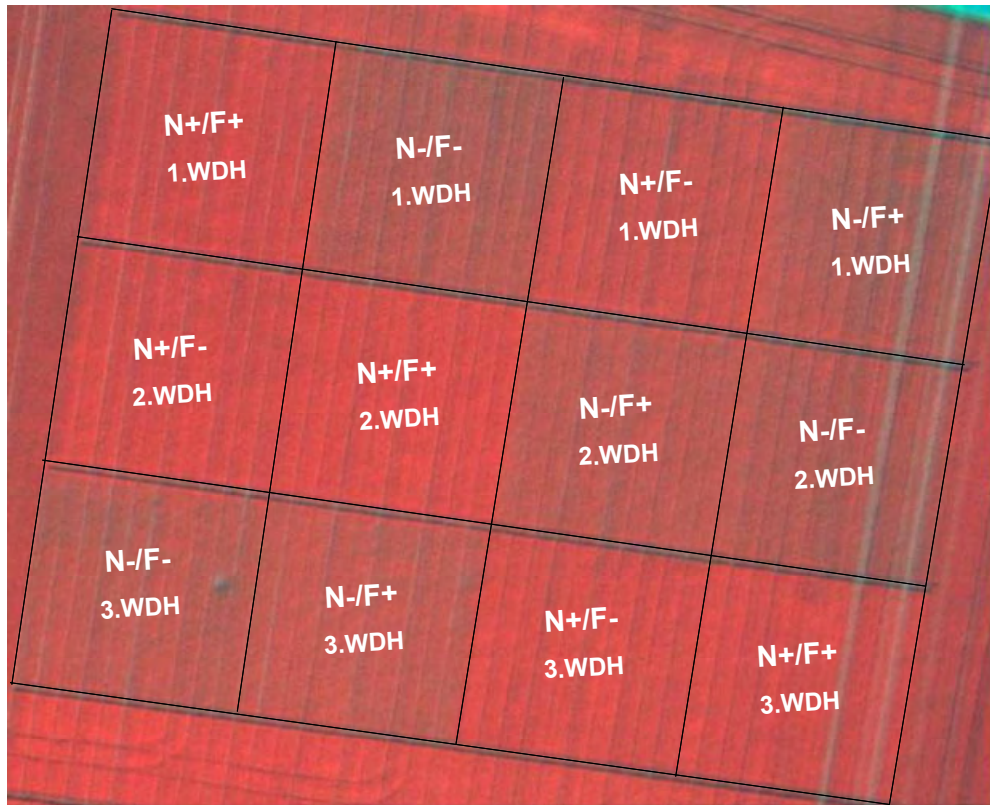


Abb. 4.15 Multispektrales Luftbild vom 2.06.2003 in der Kanalkombination NIR-G-R (R-G-B) von „Schlag VIII“ der Lehr- und Forschungsstation Dikopshof mit einer Auflösung von ca. 25 cm. Eingebildet ist die Versuchsanordnung mit den vier Faktorkombinationen und drei Wiederholungen.

Die Auswertung der Reflexionen des Winterweizenversuchs auf „Schlag VIII“ in den Luftbildern wurde zu den vier Terminen 16.05, 27.05, 02.06. und 13.06 wieder mit dem NDVI durchgeführt. Der Verlauf des aus den drei Wiederholungen gemittelten NDVI ist in Abb. 4.16 von Mitte Mai bis Mitte Juni abgebildet (vgl. A-Tab. 8.8).

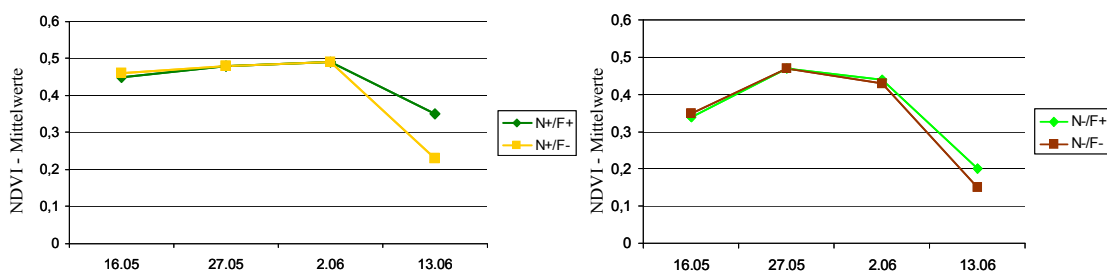


Abb. 4.16 Verlauf des NDVI von Winterweizen, Sorte *Kanzler*, Lehr- und Forschungsstation Dikopshof vom 16.05. bis 13.06.2003. Der NDVI wurde berechnet aus dem roten und NIR Kanal der multispektralen Luftbilder von „Schlag VIII“. Links ist der Verlauf für die stickstoffreduzierten, und rechts der für die normal gedüngten Varianten abgetragen.

Die unterschiedliche Stickstoffversorgung kommt in den Parzellen deutlich zum Vorschein. Der NDVI von betriebsüblich (N+) gedüngten Parzellen zeigt im Gegensatz zu den unterversorgten Parzellen zu allen Terminen einen höheren Wert. Man erkennt einen stetigeren Anstieg der Werte auf hohem Niveau und ein späteres Abfallen des NDVI. Der NDVI in den mit reduzierter Stickstoffdüngung (N-) geführten Parzellen steigt zu Beginn von einem niedrigeren Niveau an, da die Pflanzen residualen Stickstoff im Boden nutzen konnten. Da im Mai die (N-)-Parzellen nicht gedüngt wurden und infolgedessen die Massebildung und Vitalität des Bestandes eingeschränkt war, nahm auch in den mit Fungiziden behandelten Varianten nach dem 02.06. der NDVI ab. Dies deckt sich teilweise mit den Messungen der Biomasse in „Schlag VIII“ und den SPAD-Werten, wobei diese nur die Düngungsunterschiede und nicht die verschiedenen Fungizidbehandlungen wiedergeben.

Der SAVI zeigt einen sehr ähnlichen Verlauf wie der NDVI zwischen dem 16.05. und 13.06. 2003. Aufgrund des sehr geringen Einflusses der Bodenreflexion – die Pflanzendecke ist in diesem Zeitraum weitestgehend geschlossen – war dieses Ergebnis zu erwarten. Der Verlauf des $NDVI_{(grün)}$ ist in den (N+)-Parzellen dem des NDVI relativ ähnlich und zeigt nur einen steileren Anstieg zum dritten Termin. Dieser steilere Anstieg wird durch die spätere Sättigung des $NDVI_{(grün)}$ ausgelöst, die eine Differenzierung bei höheren BFI-Werten erlaubt. In den (N-)-Parzellen zeigen sich deutlichere Unterschiede. Die Werte steigen zum dritten Termin stark an und sinken Mitte Juni nicht so stark ab wie der NDVI und SAVI. Die einzelnen spektralen Kanäle liefern, über die Zeitachse betrachtet, keine sinnvollen Informationen, da die Lichteinstrahlungsintensität der Sonne an den vier Aufnahmetermen unterschiedlich war. Dieses Problem wird bei der Verwendung von Vegetationsindizes umgangen, da hier das Verhältnis zwischen verschiedenen Kanälen an einem Termin berechnet wird und keine absoluten Werte verglichen werden.

In Abb. 4.17 ist der Verlauf des NDVI in den vier Faktorkombinationen zu den Terminen 15.05., 27.05., 02.06. und 13.06. schematisch dargestellt und jeweils mit einer Nahaufnahme der entsprechenden Parzelle unterlegt. Anhand der Nahaufnahmen ist es kaum möglich, zu jedem Termin die vier Faktorkombinationen voneinander zu unterscheiden.

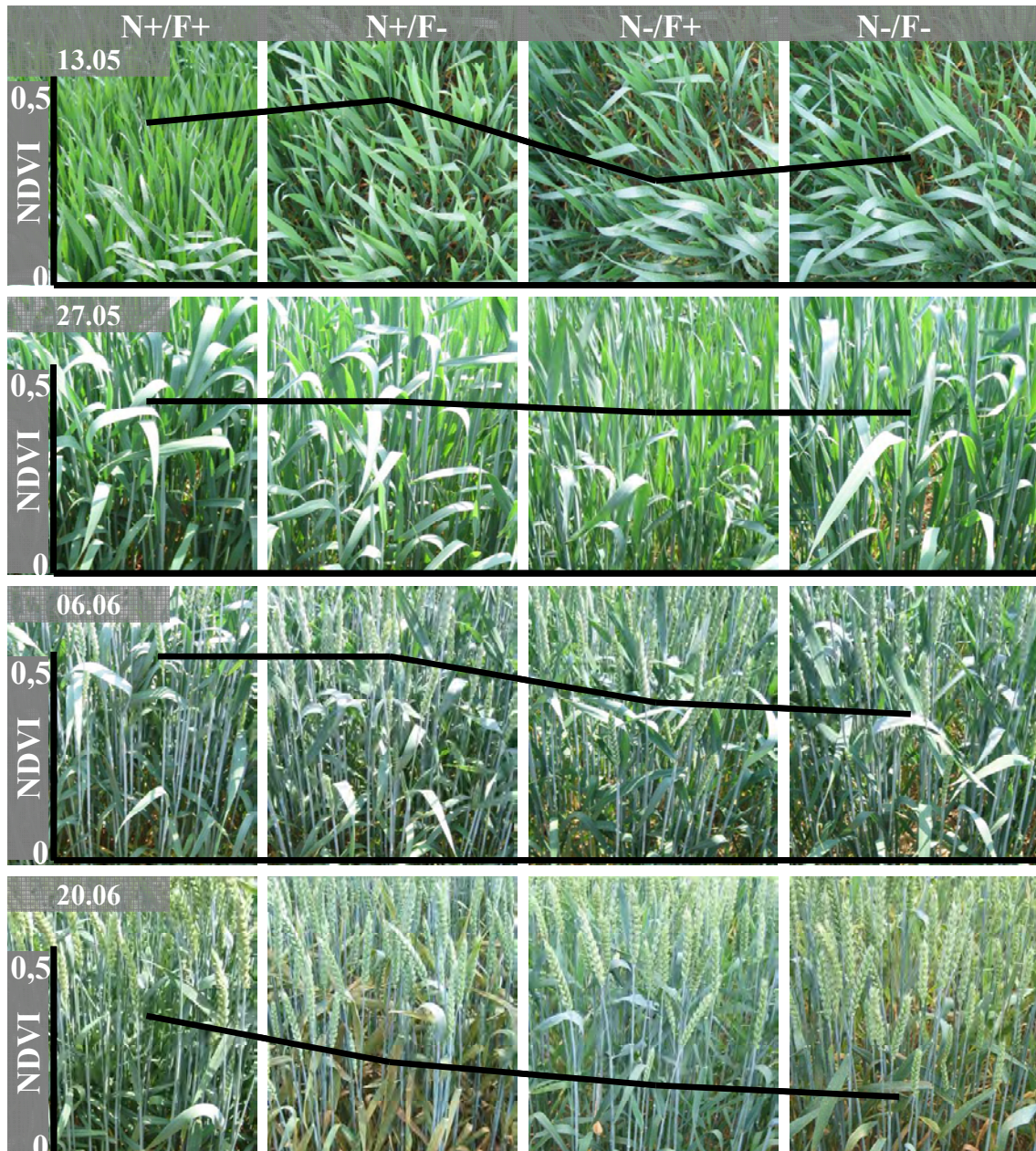


Abb. 4.17 Nahaufnahmen der vier Faktorkombinationen von „Schlag VIII“; von links nach rechts: N+/F+, N+/F-, N-/F+, N-/F-; Aufnahmetermine von oben nach unten: 13. 05., 27. 05., 06. 06. und 20. 06. 2003. Eingebildet ist der Verlauf des NDVI über die vier Faktorkombinationen.

4.1.3 Klein Altendorf 2003

Parallel zu den Versuchen am Dikopshof wurde in Klein Altendorf ein Parzellenversuch angelegt, in dem, neben den N-Stufen und der Fungizidbehandlung, der Effekt, der über die Saatstärke variierten Bestandesdichte auf die Pflanzen-

entwicklung und ihre spektrale Reflexion untersucht werden sollte (vgl. Kap. 3.2.3 S. 37).

Auf der Versuchsfläche in Klein Altendorf verlief die Entwicklung der Pilzinfektionen im Jahr 2003 ungewöhnlich langsam. Wie auch in der Versuchsfläche am Dikopshof war die trockene Witterung die Hauptursache für die langsame Entwicklung der pilzlichen Pathogene. Hinzu kommt, dass die Sorten *Novalis* und *Wasmo* nicht besonders anfällig gegenüber Pilzkrankheiten sind. Die beiden Winterweizensorten wurden aufgrund ihres sehr unterschiedlichen Bestockungsvermögens ausgewählt. Hierdurch sollten die als weiterer Einflussfaktor – der auf die spektralen Reflexionseigenschaften der Pflanzenbestände einwirkt – gewünschten Unterschiede in der Bestandesdichte erreicht werden. Daher ergaben die Bonituren erst ab dem 13. Juni einen visuell erkennbaren Befall mit Pilzkrankheiten. *Puccinia recondita* trat auf den mittleren und oberen Blattetagen mit maximal 3% befallene Blattfläche auf. Befall mit *Septoria tritici* und *Erysiphe graminis* konnte zu diesem Zeitpunkt nicht festgestellt werden. Auch am 17. Juni war nur etwa 1% mit *Septoria tritici* befallene Blattfläche im Bestand vorhanden. *Erysiphe graminis* wurde erneut nicht festgestellt. Der Befall mit *Puccinia recondita* verstärkte sich etwas auf 6% an den mittleren Blattetagen und 5% an den oberen Blattetagen.

Die Ergebnisse der Bodenuntersuchung ergaben eine ungleiche, kleinräumig inhomogene Verteilung von N_{\min} im Boden. Im westlichen Teil des Versuchsfeldes fanden sich bis in 90 cm Bodentiefe Gesamtgehalte an N_{\min} von 20 kg ha^{-1} bis 120 kg ha^{-1} . Dem gegenüber reichte die Spanne im östlichen Teil des Versuchsfeldes von minimal 64 g ha^{-1} bis maximal 214 kg ha^{-1} . Die Verteilung von N_{\min} innerhalb des Schrages ist in Abb. 4.18 dargestellt. Die west-ost Verteilung des Gesamt- N_{\min} Gehaltes bis in 90 cm Tiefe ist sehr deutlich zu erkennen. Auch in den Bodenschichten von 0-30 cm, 30-60 cm und 60-90 cm zeigte sich eine sehr ähnliche Verteilung der N_{\min} Gehalte (vgl. A-Tab. 8.8). Die Verteilung der Gesamt- N_{\min} Gehalte ließ bei der statistischen Auswertung keinen Einfluss auf die Entwicklung der Weizenbestände feststellen. Sowohl der Feldaufgang, als auch die Biomasse und der Ertrag wurden nicht von den unterschiedlichen Gesamt- N_{\min} Gehalten im Boden beeinflusst.

Die experimentell variierte Stickstoffversorgung führte jedoch in den SPAD-Werten über die Vegetationsperiode verteilt an 8 von 10 Messterminen zu signifikanten Unterschieden (TUKEY-Test) zwischen den unterschiedlich gedüngten Parzellen.

Der Faktor Fungizid zeigte dagegen nur am ersten der 10 Messtermine einen signifikanten Unterschied auf die SPAD-Werte. Die Saatstärke hatte nur zu zwei Messterminen einen Einfluss auf die SPAD-Werte. An diesen zwei Terminen ergaben sich in der geringsten Saatstärke mit 150 Körner m^{-2} signifikant höhere SPAD-Werte, als in den andern zwei Saatstärken. Dieses Ergebnis ist durchaus plausibel, da den aus 150 Körnern m^{-2} hervorgegangenen Pflanzen jeweils dieselbe N-Menge zur Verfügung stand, wie den zwei Vergleichsvarianten mit 300 bzw. 450 Körnern m^{-2} . Ein Einfluss der zwei Winterweizensorten sowie der unterschiedlichen Verteilung des Gesamt- N_{min} im Boden konnte bei der statistischen Analyse nicht festgestellt werden.

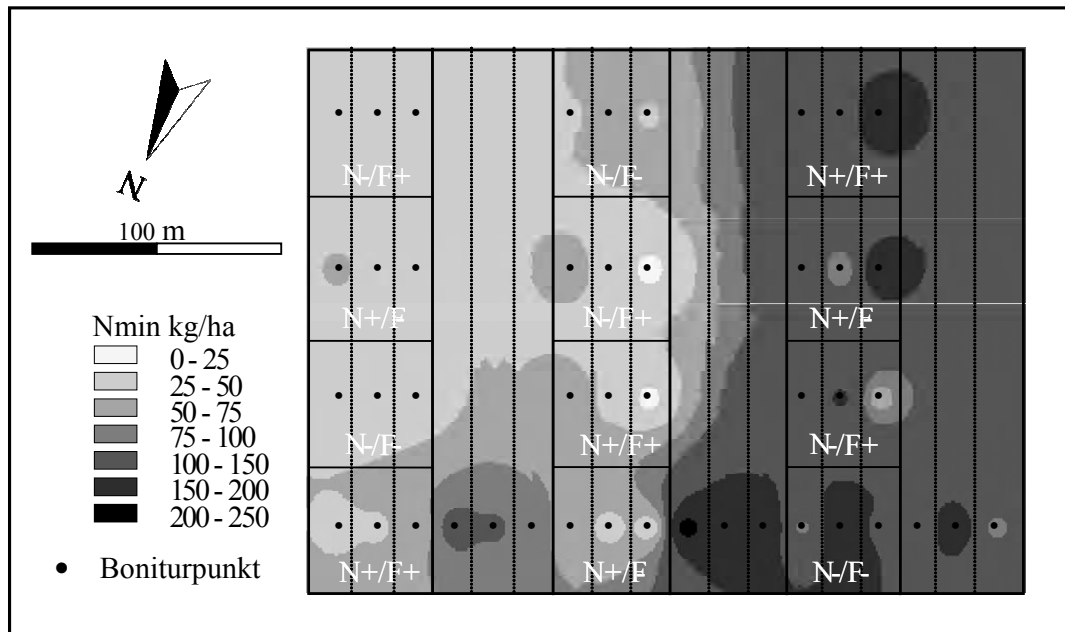


Abb. 4.18 Verteilungskarte der Gesamt- N_{min} Werte bis in 90 cm Tiefe auf dem Versuchsfeld in Klein Altendorf im Frühjahr 2003. Der Versuchsaufbau ist eingeblenndet; Details siehe A-Abb. 8.8.

Die drei Saatstärken führten erwartungsgemäß zu einer unterschiedlichen Anzahl an Pflanzen/ m^2 . In den Saatstärken 150, 300 und 450 Körner m^{-2} wurden Anfang März 101, 169 bzw. 222 Pflanzen m^{-2} gezählt. Statistisch abgesichert werden konnten diese Unterschiede bei $\alpha = 0,05$. Der Feldaufgang in Prozent betrug in der geringen Saatstärke 67,4%, in der mittleren Saatstärke 56,3% und in der dichten Saatstärke 49,4%. Da die erste Düngung einheitlich auf dem ganzen Schlag ausgebracht wurde, konnte kein Unterschied bezüglich Feldaufgang und Düngung festgestellt werden. Auch hatte die unterschiedliche Verteilung von N_{min} im Boden keinen Einfluß auf den

Feldaufgang des Weizens. Warum der Feldaufgang so gering war, konnte auch der Verwalter der Lehr- und Forschungsstation nicht begründen.

Ein Einfluss der Faktoren Düngung und Saatstärke auf die Pflanzenhöhe wurde festgestellt. Die normal gedüngten Parzellen zeigten bis Ende Mai einen signifikant höheren Wuchs. Ab Anfang Juni wurde der Unterschied in der Wuchshöhe zwischen den Parzellen geringer und konnte statistisch nicht mehr abgesichert werden. Der Grund hierfür, war die ganzflächige Ausbringung der dritten Stickstoffgabe. Zwischen den drei Saatstärken zeigten sich teilweise signifikante Wuchshöhenunterschiede. Die Pflanzenbestände der Saatstärke mit 150 Körnern m^{-2} waren im Durchschnitt etwa 2 cm kürzer im Wuchs, als die Pflanzenbestände der Saatstärke mit 450 Körnern m^{-2} . Die Saatstärke mit 300 Körnern m^{-2} konnte statistisch nicht von den beiden anderen Saatstärken unterschieden werden. Ein signifikanter Einfluss der Fungizidapplikation auf die Wuchshöhe wurde nicht nachgewiesen.

Der am Mähdrescher mittels eines Ertragssensors kontinuierlich gemessene Ertrag ergab am 28. Juli die durchschnittlich höchsten Kornerträge von $126,5 \text{ dt ha}^{-1}$ in der Variante N+/F+. Etwas geringer fielen die Erträge bei N+/F- mit $123,6 \text{ dt ha}^{-1}$, N-/F+ mit 120 dt ha^{-1} und N-/F- mit $118,5 \text{ dt ha}^{-1}$ aus. Aufgrund des geringen und späten Krankheitsbefalls zeigten die unbehandelten Parzellen keinen Einbruch des Ertrages gegenüber den gesund gehaltenen Parzellen. Auch waren die Schwankungen im Ertrag innerhalb der Parzellen geringer als in der Versuchsanlage an der Lehr- und Forschungsstation Dikopshof und reichten von Spitzenwerten mit 132 dt ha^{-1} bis hinunter zu $99,2 \text{ dt ha}^{-1}$. Da die am Ertragssensor gemessenen Kornerträge teilweise mehr als 20% über den normalen Weizenerträgen an diesem Standort liegen, dürfen die Werte nicht als absolute Kornerträge, sondern als Verhältnisse betrachtet werden. Wahrscheinlich lag ein Fehler in der Eichung des Ertragssensors im Mähdrescher vor.

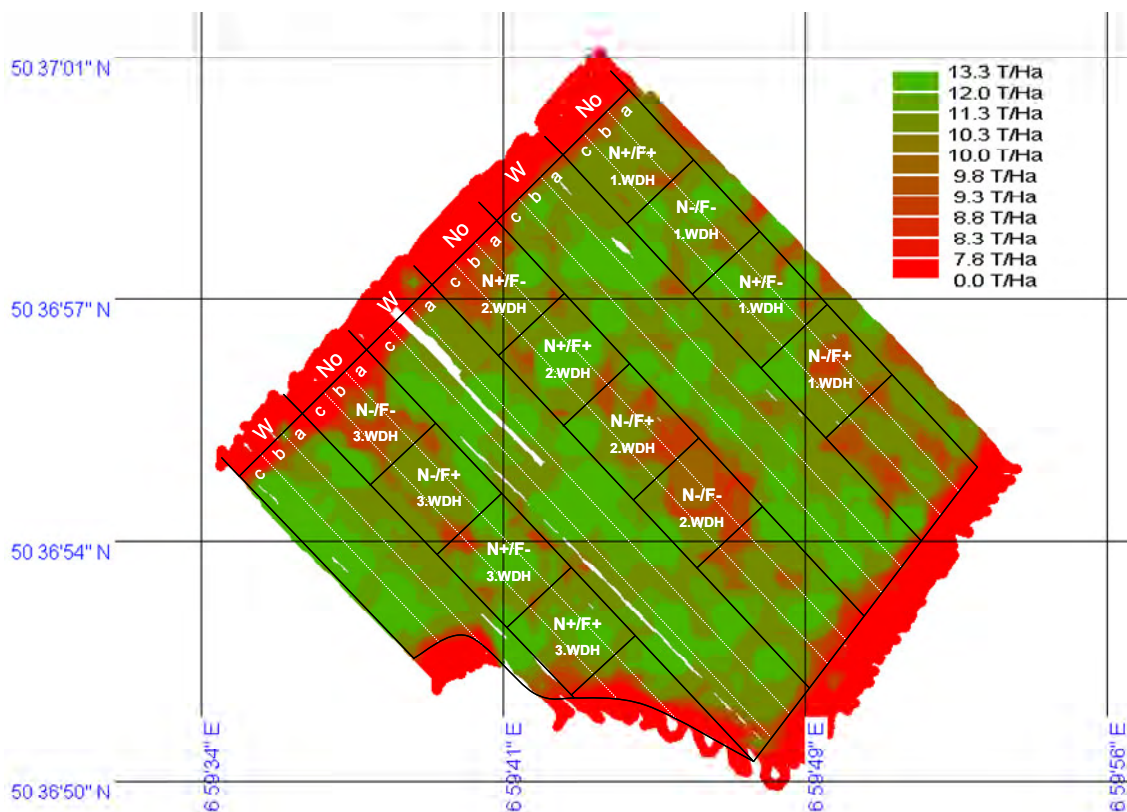


Abb. 4.19 Ertragskarte aus dem Jahr 2003 von Klein Altendorf. Die Daten wurden mit einem an ein GPS gekoppeltem Ertragssensor erfasst und danach von dem Programm RDS Precision Farming© der Firma RDS Technology Ltd. als Konturkarte dargestellt. Eingebledet ist nachträglich der Versuchsplan.

Die Falschfarbendarstellung des *QuickBird*-Satellitenbildes vom 28. 05. 2003 in der Kanalkombination 4-2-1 ist in Abb. 4.20 gezeigt. Unterschiede ergeben sich zwischen den gedüngten (N+) und ungedüngten Varianten (N-). Die Parzellen mit Pilzkrankheiten (F-) zeigten dagegen keine eindeutigen Unterschiede in der Reflexion zu den entsprechenden gesunden (F+) Parzellen. Ein Hauptgrund dafür war die trockene Witterung, die eine Entwicklung von pilzlichen Pathogenen stark unterdrückt hat. Bei den Saatstärken (a,b,c) konnte nur zwischen der dünnsten (150 Körner m⁻²) und dichtesten (450 Körner m⁻²) Saatstärke anhand der Reflexion unterschieden werden. Ein Unterschied zwischen den zwei verschiedenen Winterweizensorten war in der Falschfarbendarstellung nicht festzustellen.

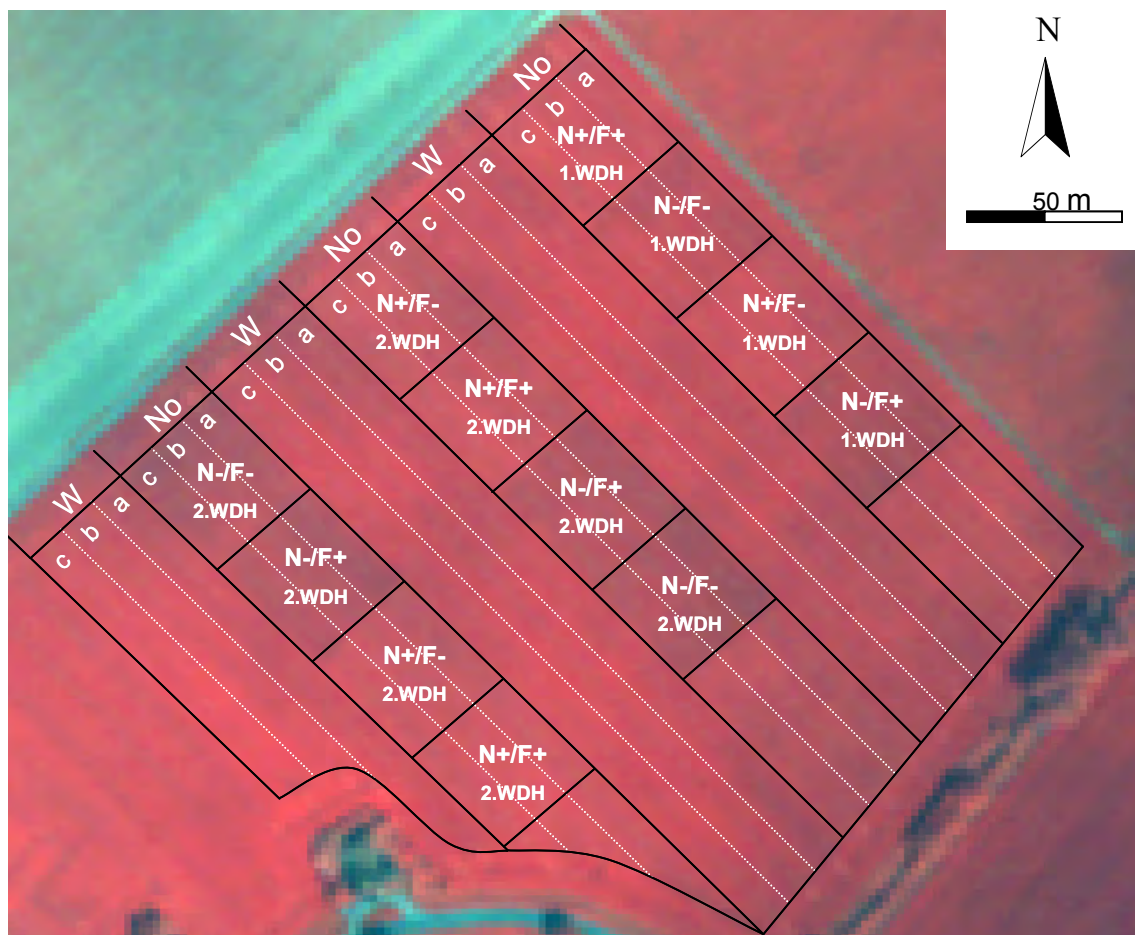


Abb. 4.20 *QuickBird*-Bild vom 28.05.2003. Ausschnittsvergrößerung der Versuchsfläche in Klein Altendorf in der Kanalkombination 4-2-1. Passgenau hinterlegt ist der Versuchsaufbau. Sorte: No=Novalis, W=Wasmo; Saatstärke in Körner/m²: a=150, b=300, c=450; Erläuterung zu den Behandlungen N+,N-,F+ und F- siehe Tab. 3.1.

Das Bild des panchromatischen Sensors an Bord des *QuickBird*-Satelliten lieferte auf den ersten Blick im Gegensatz zu dem multispektralen Bild eindeutigere Unterschiede in den Grauwerten zwischen den verschiedenen Faktoren (Abb. 4.21). Zusätzlich ließen sich, aufgrund der höheren räumlichen Auflösung, die Parzellen schärfer voneinander abgrenzen. Differenziert werden konnte zwischen Parzellen mit (N+) und ohne (N-) Düngung sowie zwischen den Saatstärken. Hier hoben sich besonders deutlich die Feldstreifen mit der dünnsten Aussaat (150 Körner m⁻²) hervor. Differenzen zwischen gesunden und kranken Beständen ließen sich nicht erkennen.

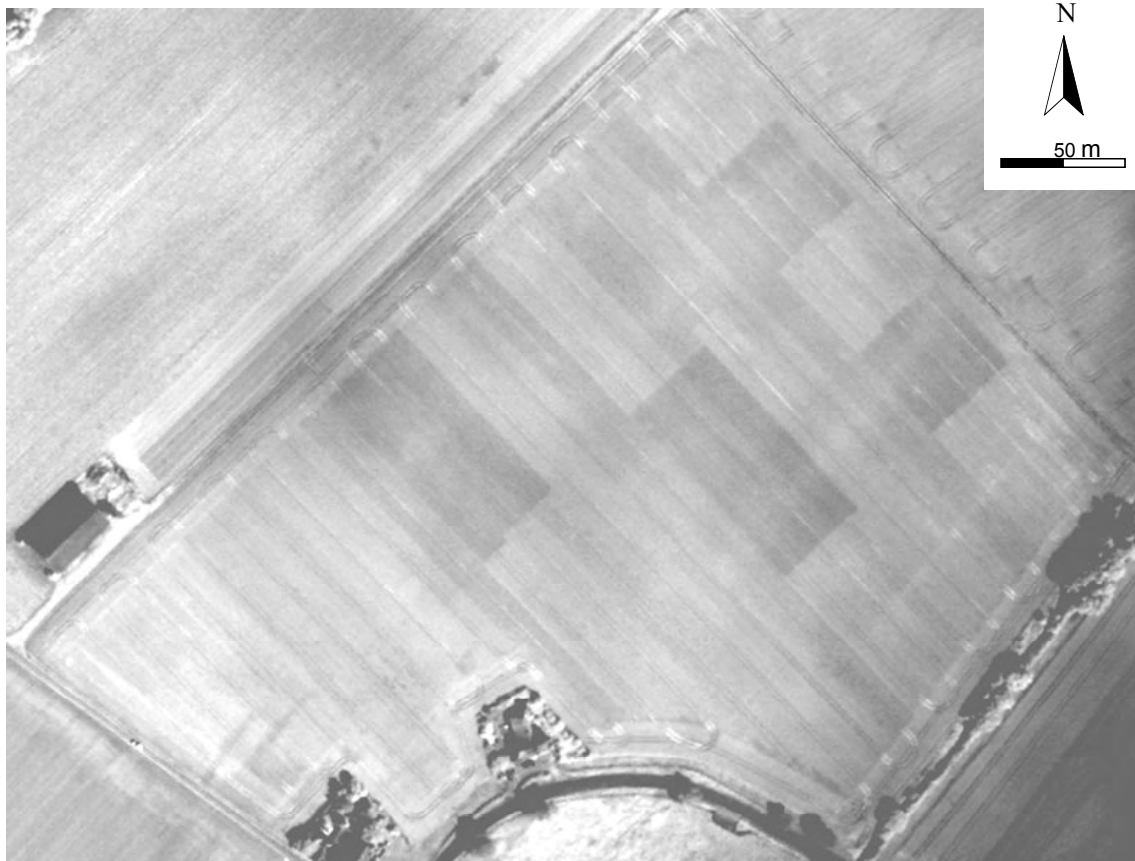


Abb. 4.21 *QuickBird*-Bild vom 28.05.2003. Ausschnittsvergrößerung der Versuchsfläche in Klein Altendorf des panchromatischen Bildes. Der genaue Versuchsaufbau kann Abb. 4.20 entnommen werden.

Das Grauwert histogramm des panchromatischen *QuickBird*-Satellitenbildes in Abb. 4.22 zeigt deutlich zwischen welchen Faktorkombinationen es Unterschiede in der Reflexion gab. Die Parzellen mit normaler Düngung hatten eine höhere Reflexion, respektive höhere Grauwerte und erschienen deshalb im panchromatischen Bild heller. Die ungedüngten Varianten wiesen aufgrund geringerer Reflexionswerte niedrigere Grauwerte auf und erschienen im panchromatischen Bild dunkler.

Eine Differenzierung in gedüngte und ungedüngte Parzellen anhand eines Schwellenwertes in den Grauwerten des panchromatischen Bildes führte zu einer Klassifizierung, in der sowohl 91% der Pixel, welche in gedüngten Regionen lagen erkannt wurden, als auch 11% der Pixel aus ungedüngten Regionen als gedüngte identifiziert wurden. Konkordant dazu wurden 89% aller Pixel über ungedüngten Parzellen als solche identifiziert und 9% der Pixel aus gedüngten Varianten zu den ungedüngten gerechnet.

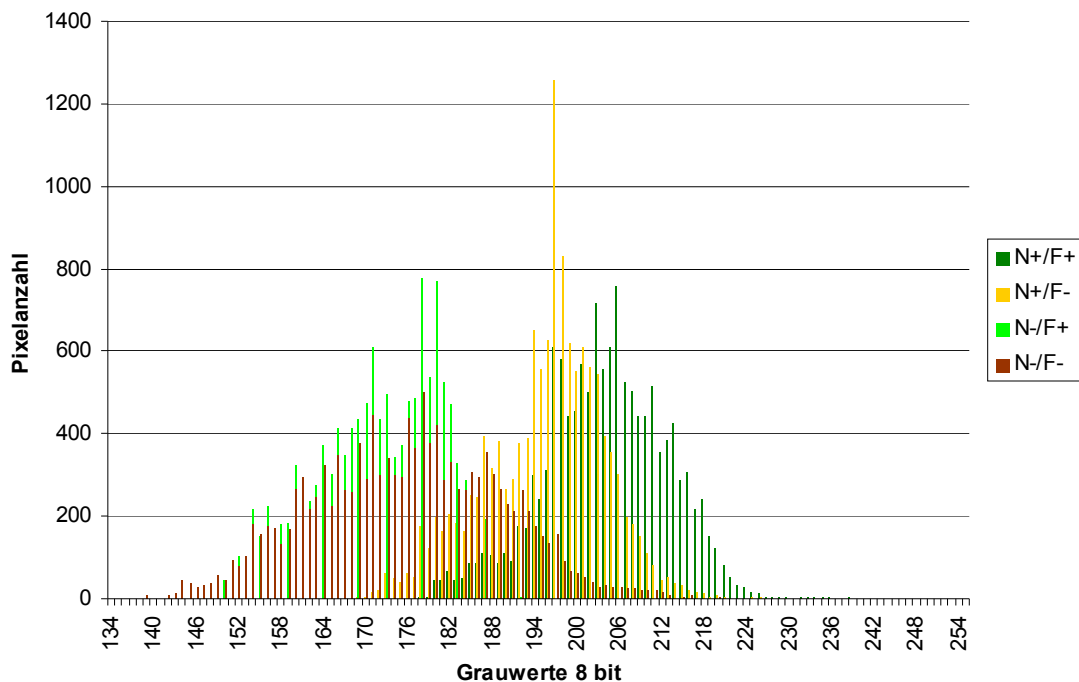


Abb. 4.22 *QuickBird*-Bild vom 28. 05. 2003. Grauwerteverteilung im panchromatischen Bild in den vier Faktorkombinationen des Winterweizenversuchs in Klein Altendorf (vgl. Abb. 4.21).

Die statistische Analyse der einzelnen Kanäle des multispektralen und des panchromatischen Bildes sowie des NDVI, $NDVI_{(grün)}$, SAVI, WdVI und der SPAD-Werte mit den zwei Faktoren „Stickstoff“ und „Fungizide“ ergab folgende signifikante Ergebnisse: die Reduzierung der Stickstoffdüngung führte zu signifikanten Änderungen bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ in der Reflexion der vier spektralen Kanäle, im panchromatischen Bild sowie in allen VI's. Durch die ground truth Daten des SPAD-Meters konnten diese Unterschiede auch im Pflanzenbestand bestätigt werden. Am 3. Juni ergaben sich bei den Messungen signifikante Unterschiede zwischen den gedüngten und ungedüngten Parzellen.

Der Faktor Fungizid hatte im Gegensatz zum Winterweizenversuch auf dem Dikopshof 2002 keine signifikante Auswirkung auf die Reflexion. Der deutlichste Trend in der Reflexion zwischen den gesunden und kranken Pflanzenbeständen konnte mit dem WdVI abgeleitet werden. Hier war der Wert in den gesunden Parzellen um fast 8% höher als in den kranken Parzellen.

Die im Satellitenbild gemessenen Reflexionen ergaben aber Tendenzen die mit den Ergebnissen des Versuchs am Dikopshof im Jahr 2002 im Einklang stehen:

- Die Reflexion im roten Wellenlängenbereich in den kranken Parzellen war leicht höher als in den gesunden Parzellen;
- Im NIR Wellenlängenbereich waren hingegen die Reflexionswerte in den gesunden höher als in den kranken Parzellen;
- NDVI- und SPAD-Meter ergaben in den gesunden Parzellen tendenziell höhere Werte als in den mit Krankheiten befallenen Parzellen.

Die in den einzelnen Parzellen ermittelten spektralen Reflektanzen, sowie die Durchschnittswerte aus den drei Wiederholungen der vier Faktorkombinationen, jeweils für die einzelnen Kanäle und die vier berechneten VI's können der A-Tab. 8.10 entnommen werden. Die statistische Auswertung ist in A-Tab. 8.11 aufgelistet.

Die beiden Sorten *Novalis* und *Wasmo* zeigten bei der statistischen Auswertung signifikante Reflexionsunterschiede im roten und grünen Kanal. Bei der Berechnung der Vegetationsindizes lieferte der WdVI die deutlichsten Unterschiede zwischen *Novalis* und *Wasmo* (Abb. 4.23). Die Vegetationsindizes NDVI, $NDVI_{(grün)}$, und SAVI lagen im selben Trend, konnten aber nicht statistisch abgesichert werden. Die Saatstärken des Winterweizenversuchs zeigten in beiden Sorten zwischen der

dünnsten und dichtesten Aussaat signifikante Unterschiede in den Reflexionswerten des NIR Kanals, sowie in allen vier berechneten Vegetationsindizes. Beispielhaft ist in Abb. 4.23 zu sehen, wie sich die Sorten und Saatstärken in dem berechneten Vegetationsindex WDWI unterschieden. Die weiteren Daten können A-Tab. 8.12 im Anhang entnommen werden.

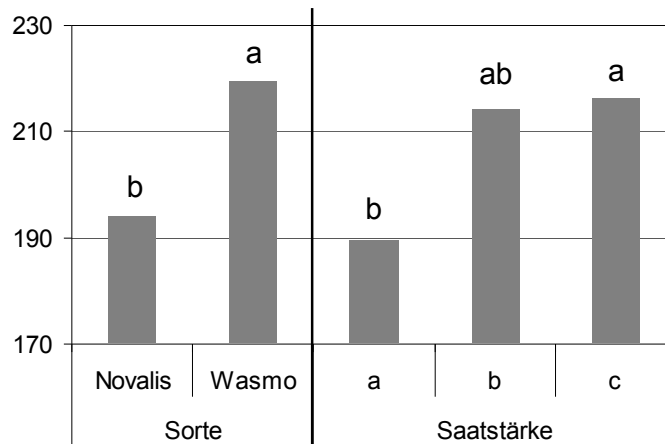


Abb. 4.23 *QuickBird*-Bild vom 28.05.2003: berechneter dimensionsloser Vegetationsindex WDWI. Signifikanz wurde getrennt für Sorte und Saatstärke berechnet. Werte mit gleichen Buchstaben (a, b) sind nicht signifikant verschieden.

Festgestellt werden konnte auch ein signifikant starker Zusammenhang von Kornertrag und NDVI in beiden Winterweizensorten. Ein Vergleich, der aus dem Satellitenbild vom 28.05. berechneten NDVI's und dem am 28. Juli gemessenen Ertrag, ergab eine Korrelation von $R^2 = 0,83$. Diese enge Korrelation deckt sich auch mit den Ergebnissen der Versuche am Dikopshof.

4.2 Ableiten von Managementkarten

Im Precision Farming geht es darum, raumbezogene Informationen in einer für den Anwender geeigneten Form aufzubereiten, d. h. Managementkarten zu erstellen. Die Umsetzung in ackerbauliche Maßnahmen setzt darüber hinaus eine Komprimierung der Fernerkundungsinformation in anwendungsgerechten Skalen voraus. Grundsätzlich gilt, dass die Ausprägung räumlicher Heterogenität in den Feldschlägen hinreichend deutlich sein muß, um sinnvolle Kartierungen und Bestandesführungsmaßnahmen zu begründen.

Unter diesem Aspekt wurde der Versuch unternommen, anhand der gewonnenen Daten aus den Versuchsanlagen Managementkarten abzuleiten. Hierzu wurden die Daten aus dem Versuchsjahr 2002 herangezogen, in dem witterungsbedingt und experimentell eine Heterogenität der Pflanzenbestände zustande kam. Zudem stand in diesem Versuchsjahr von dem Versuch am Dikopshof eine sehr gute *QuickBird*-Satellitenaufnahme zur Verfügung. Im Jahr 2003 lag einerseits kein Satellitenbild vor (Versuchsfläche am Dikopshof) oder andererseits konnten sich Pilzkrankheiten, aufgrund der sehr trockenen Witterung, nicht im Pflanzenbestand etablieren (Versuchsfläche in Klein Altendorf).

Für die Anwendung von Managementkarten ist wesentlich, dass die Zustandskategorien nicht zu fein unterteilt werden, da davon auszugehen ist, dass wenige Zustandskategorien die technische Umsetzung der Karteninformation erleichtern. Es wurden deshalb die räumlichen Daten zum Krankheitsbefall vom 31. 05. 2002 auf die drei Klassen gering, mittel und hoch reduziert. Hierbei wurde nicht der Krankheitsbefall in einzelnen Blatttagen des Getreides berücksichtigt, sondern der Anteil an geschädigter Blattfläche der ganzen Pflanze zusammengerechnet (Abb. 4.24). Häufig wird die Entscheidung über den Einsatz von Fungiziden anhand des Befalls auf den obersten drei Blättern vorgenommen; in diesem Fall soll aber auch der Befall auf unteren Blatttagen berücksichtigt werden, da dieser einen Einfluss auf die Reflexionseigenschaften der oberen Blatttagen haben kann und zusätzlich eine Inokulumquelle für weiteren Befall darstellt.

Um einen Vergleich der erstellten Krankheitskarte anzustellen, wurde die aus dem Satellitenbild vom 25. 06. 2002 berechnete NDVI-Karte ebenfalls in drei Zonen eingeteilt: geringer, mittlerer und hoher NDVI (Abb. 4.24). Der Vergleich von Krankheitsbonitur und NDVI-Karte des Satellitenbildes zeigte eine sehr gute Übereinstimmung, mit hohem Krankheitsbefall und niedrigem NDVI und

andersherum. In 81% der Boniturstellen stimmten mittlerer und hoher Befall mit Pilzkrankheiten und ein niedriger NDVI im Satellitenbild überein. Bei hohem und mittlerem NDVI sowie geringem Krankheitsbefall zeigten sich in 87,5% der Boniturstellen Übereinstimmungen.

Als weiterer Anhaltspunkt zur Überprüfung der oben genannten Karten konnte die Ertragskarte von 2002 herangezogen werden. Hierzu wurde die Karte analog in drei Stufen eingeteilt: geringer, mittlerer und hoher Ertrag. Ein Vergleich mit der NDVI-Karte ergab eine Übereinstimmung der hohen NDVI-Werte und der Regionen mit hohem Ertrag zu 97%. Die Übereinstimmung zwischen mittlerem NDVI und Ertrag sowie geringem NDVI und Ertrag betragen 50% bzw. 57%. Der Abgleich von Ertrag und Befall zeigte, dass in Bereichen von mittlerem und hohem Ertrag zu 82,6% nur ein geringer Befall bonitiert wurde.

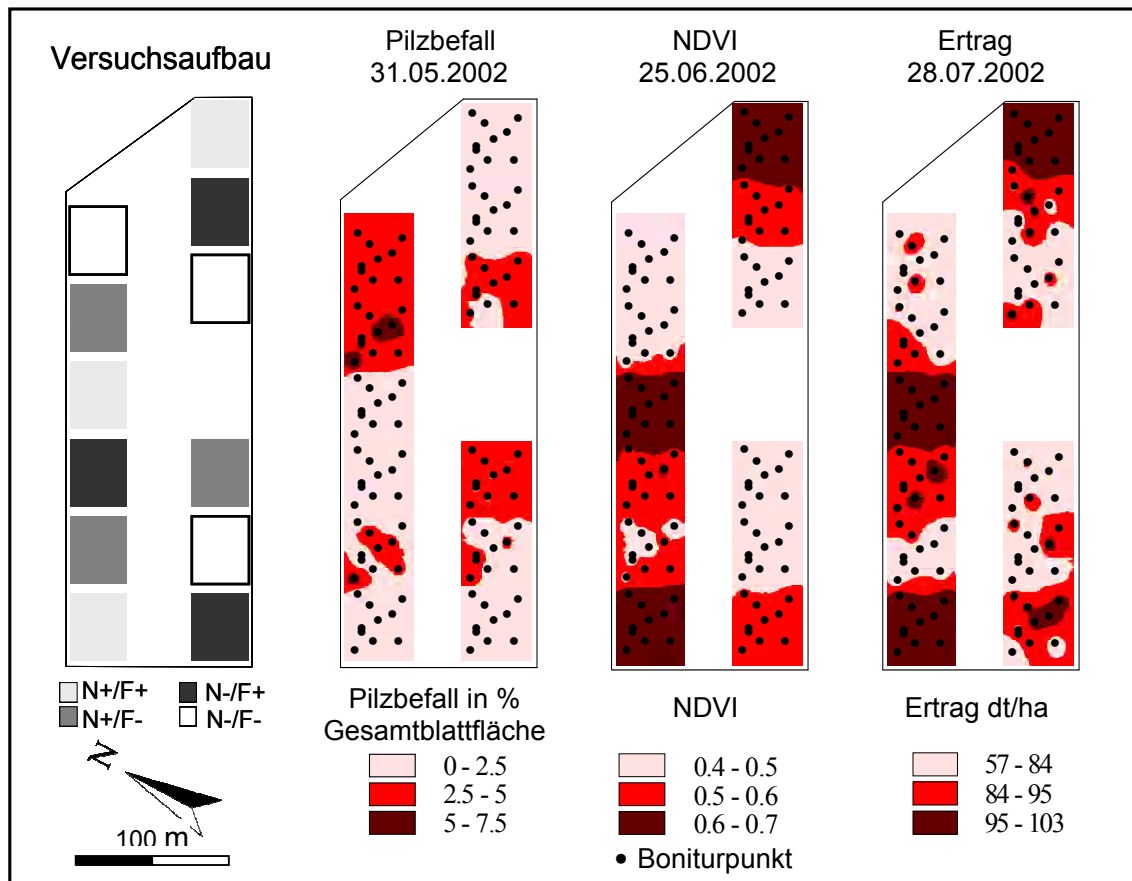


Abb. 4.24 Verteilungskarten von Pilzbefall, NDVI und Ertrag aus Erhebungen an 120 Boniturstellen in zwölf Versuchspartzen von „Schlag VI“ am Dikopshof 2002. Die Einteilung der vier verschiedenen behandelten Versuchspartzen kann dem Versuchsaufbau (links) entnommen werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass aus den Satellitendaten Karten erstellt werden können, die mit hoher Genauigkeit die am Boden gewonnenen teilflächigen Informationen widerspiegeln. Damit diese Karten bei der Bekämpfung von Pilzkrankheiten eingesetzt werden können, ist es sinnvoll, die Information stärker zu komprimieren, bzw. zu vereinfachen. Dies ist nötig, da es z. Z. kein technisches Verfahren gibt, welches eine Reduzierung der Aufwandmenge bei geringem Befall in gleich bleibend dichtem Bestand ermöglicht.

Daher wurde aus dem *QuickBird*-NDVI-Bild eine Karte mit zwei Zonen abgeleitet; zum einen die „Zonen mit voraussichtlich hohem Ertragsrisiko“ und zum anderen die „Zonen mit voraussichtlich geringem Ertragsrisiko“ (Abb. 4.25). Zu 98,3% wurden durch eine Einteilung der NDVI-Werte in hoch und niedrig mittels Schwellenwert, die Areale im Versuchsfeld erkannt, die sich auch in der Fungizidbehandlung unterschieden. Die unterschiedliche Düngung der Parzellen hatte auf diesem sehr guten Standort keinen Einfluss auf die voraussichtliche Einteilung in Zonen mit hohem und geringem Ertragsrisiko. Der Vergleich der vorausgesagten Ertragszonen mit den am Mähdrescher ermittelten Erträgen ergab hohe Übereinstimmungen. 85% der Ertragszonen, in denen ein geringes Ertragsrisiko vorausgesagt wurde, zeigten auch zum Erntetermin normale Erträge und in 80% der mit hohem Ertragsrisiko vorhergesagten Zonen war der Ertrag auch geringer. Hätten alle Zonen, die aus dem NDVI-Bild als Risikozonen erkannt wurden, eine Fungizidbehandlung erhalten, wäre es voraussichtlich nur an neun Boniturstellen zu einem geringeren Ertrag gekommen. Der Flächenanteil mit Ertragseinbußen hätte nach Ausführen der Fungizidapplikation anhand der vorausgesagten Ertragszonen somit nur 7,5% betragen. Ohne Fungizidapplikation hätte der Flächenanteil mit Ertragseinbußen 47% betragen.

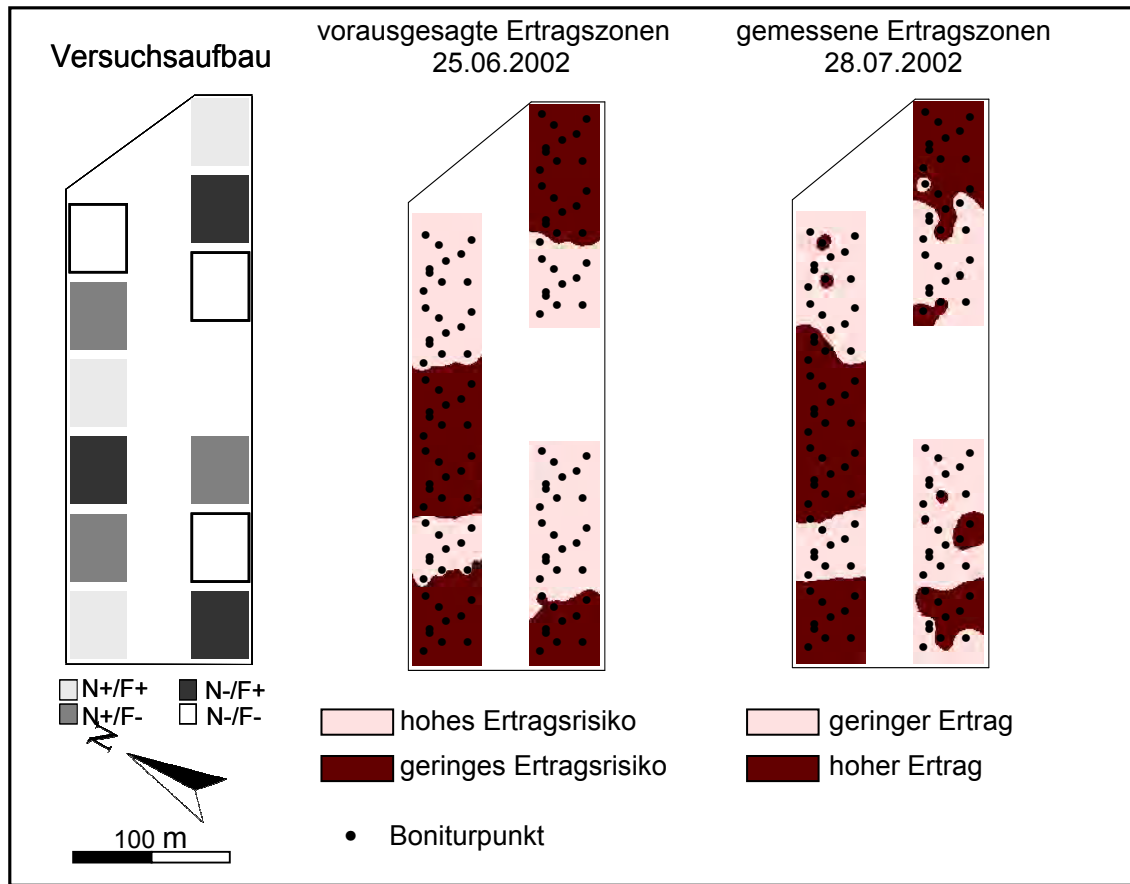


Abb. 4.25 Ertragsrisikozonenkarte 2003 vom Dikopshof. In der Mitte die aus dem QuickBird-NDVI-Bild vom 25.06.2002 abgeleitete Ertragsrisikokarte mit den voraussichtlichen Ertragszonen; rechts die mit dem GPS-gesteuerten Mähdrescher mit Ertragssensor aufgezeichnete Ertragskarte vom 28.07.2002, links zum Vergleich der Versuchsaufbau.

4.3 Räumliche Auflösung von ground truth Daten zur Validierung

Die aus Fernerkundungsbildern herausgefilterten Daten können ohne Referenzdaten nicht verwendet werden, um Rückschlüsse auf den tatsächlichen Zustand der beobachteten landwirtschaftlichen Pflanzenbestände zu ziehen. Hierzu bedarf es ground truth Daten. Diese, im Pflanzenbestand aufgenommenen Daten können dann mit den Informationen der Fernerkundungsbilder in einen plausiblen Zusammenhang gebracht werden. Die extrem hohe Auflösung aktueller optischer Fernerkundungssatelliten macht es aber nahezu unmöglich, für jeden Bildpixel entsprechende Felddaten aufzunehmen. Deshalb wurde empirisch getestet, ob und wie die Genauigkeit der Ergebnisse variiert, wenn die Dichte oder Lage des Probenrasters im Versuchsfeld verändert wird. Herangezogen wurden hierfür wieder die Daten aus

dem Versuchsjahr 2002 von der Versuchsfläche an der Lehr- und Forschungsstation Dikopshof.

Wie zu erwarten, war bei einer Mittelung der zehn Bestandesmesswerte je über die Versuchsparzelle – getrennt für Ertrag und befallene Blattfläche in % - und dem anschließenden Vergleich mit dem durchschnittlichen NDVI-Wert einer Versuchsparzelle die engste Korrelation festzustellen. Hier ergaben sich Korrelationen von $R^2 = 0,91$ zwischen NDVI und Ertrag und $R^2 = 0,61$ zwischen NDVI und befallener Blattfläche in % (Abb. 4.26). Wurde im Gegenzug jeder Bestandesmesspunkt einzeln mit dem räumlich entsprechenden Ausschnitt aus dem NDVI-Bild korreliert, verringerte sich das Bestimmtheitsmaß R^2 auf 0,52 zwischen NDVI und Ertrag und 0,47 zwischen NDVI und befallener Blattfläche in %.

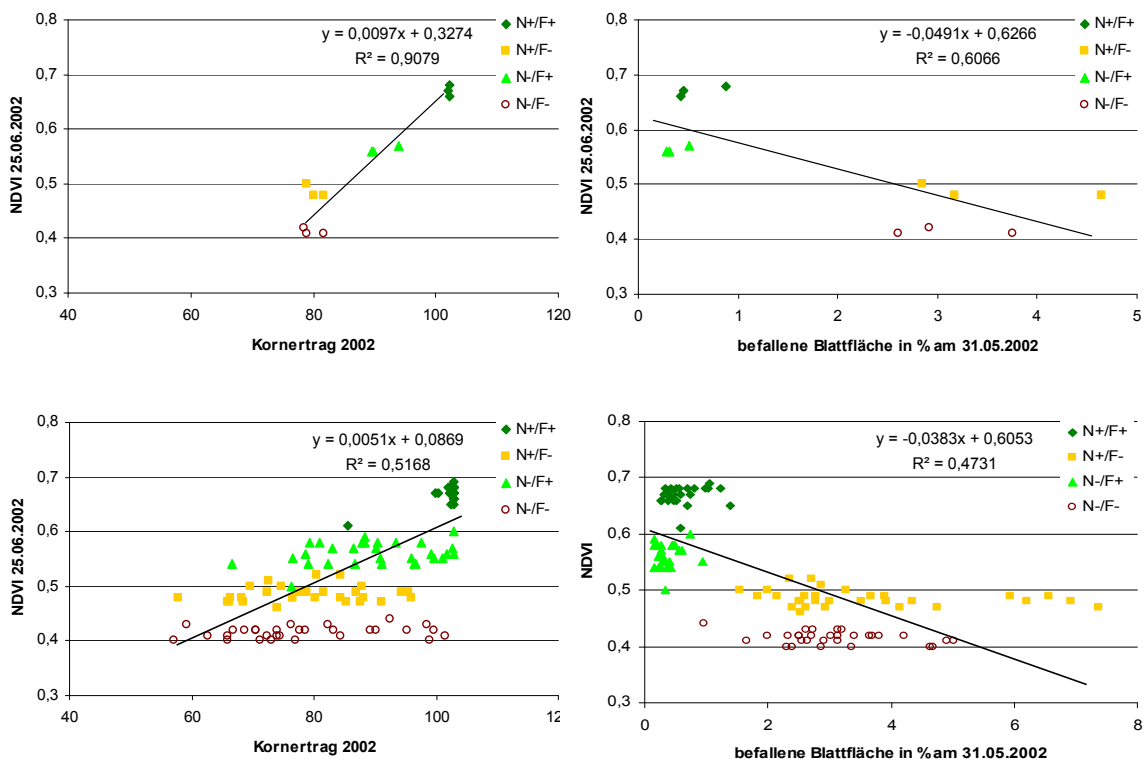


Abb. 4.26 Korrelation des aus dem Satellitenbild vom 25. 06. 2002 berechneten NDVI's mit dem Kornertrag zum Erntezeitpunkt und der befallenen Blattfläche am 31.05. In den oberen beiden Grafiken ist das Bestimmtheitsmaß (R^2) für die zwölf Parzellen aus dem Mittelwert von zehn Boniturstellen einer Parzelle berechnet; in den unteren Grafiken ist das Bestimmtheitsmaß über die 120 einzelnen Boniturstellen berechnet.

Es wurde ermittelt, welches Boniturraster als ideal für diese Versuchsanstellung gesehen werden kann. Hierfür simulierte man aus den im Versuch erhobenen Daten

modellhaft verschiedene Boniturraster. Als einfachstes Boniturraster wurde eine zufällige Boniturstelle aus jeder Parzelle mit dem entsprechenden NDVI-Wert aus dem Satellitenbild korreliert. Danach konnten zwei zufällige Boniturstellen je Versuchsparzelle gemittelt und mit dem entsprechend erhobenen NDVI-Wert für jede Versuchsparzelle korreliert werden. Dieses ließ sich dann ebenfalls mit 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 und 10 Boniturstellen je Versuchsparzelle durchführen. Die Veränderung in der Güte der Korrelation ist in Abb. 4.27 für NDVI und befallene Blattfläche abzulesen. Ein Anstieg der Bestimmtheitsmaße findet hauptsächlich bis zu fünf Messpunkten je Versuchsparzelle statt. Danach ist kein Anstieg in der Güte des Bestimmtheitsmaßes mehr festzustellen. Die Standardabweichung erreicht ab sechs Messpunkten je Parzelle sehr kleine Werte, die durch die Hinzunahme von weiteren Messpunkten nicht wesentlich reduziert werden kann (vgl. A-Tab. 8.13).

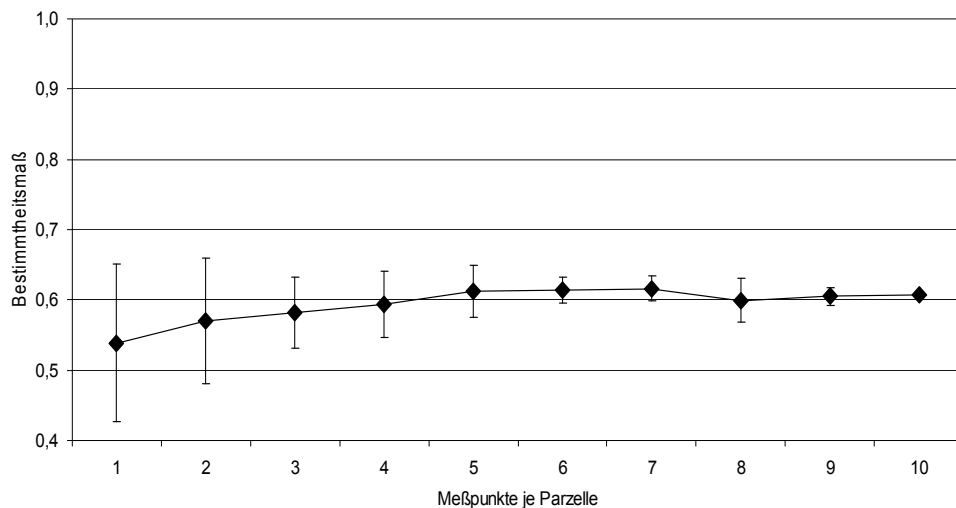


Abb. 4.27 Korrelation von NDVI und befallener Blattfläche am 31.05.: Veränderung von Bestimmtheitsmaß und Standardabweichung bei unterschiedlicher Anzahl von Boniturstellen je Parzelle.

Günstiger wirkt sich das engere Boniturraster auf die Prognose des Ertrages aus. Bei Hinzunahme von 2, 3, 4 oder 5 Messpunkten aus den NDVI-Werten einzelner Rasterpunkte kann eine deutliche Zunahme der Korrelation festgestellt werden (Abb. 4.28). Das Bestimmtheitsmaß steigt von etwa 0,56 auf 0,86. Gleichfalls nimmt die Standardabweichung deutlich ab und erreicht bei 5 Messwerten einen geringen Wert von 0,04. Das Hinzuziehen von weiteren Messpunkten je Parzelle führt nur zu geringen Verbesserungen im Bestimmtheitsmaß. Die Standardabweichung zeigt hier

– wie beim Vergleich von NDVI und befallener Blattfläche – keine kontinuierliche Abnahme mehr (vgl. A-Tab. 8.14).

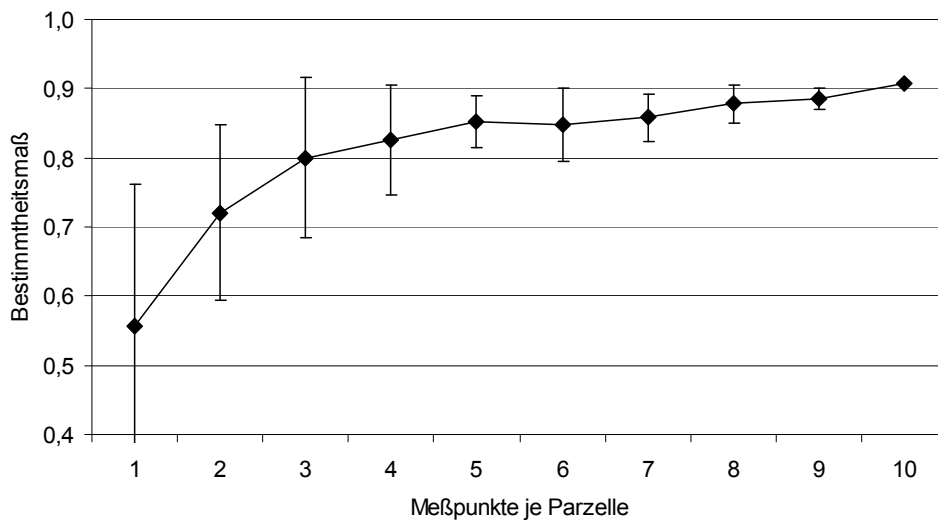


Abb. 4.28 Korrelation von NDVI und Kornertrag zur Ernte: Veränderung von Bestimmtheitsmaß und Standardabweichung bei unterschiedlicher Anzahl von Boniturstellen je Parzelle.

Veränderungen in der Güte des Bestimmtheitsmaßes sind nicht nur von der Anzahl der Boniturstellen abhängig. Die Lage der Punkte zueinander spielt auch eine Rolle. Werden, wie in Abb. 4.29 gezeigt, zwei entfernt von einander liegende Messpunkte je Versuchsparzelle gemittelt ergibt sich ein R^2 von 0,44 zwischen NDVI und Kornertrag (vgl. A-Tab. 8.15). Hingegen steigt R^2 auf 0,77, wenn zwei nah beieinander liegende Messpunkte je Versuchsparzelle gemittelt werden (Abb. 4.30).

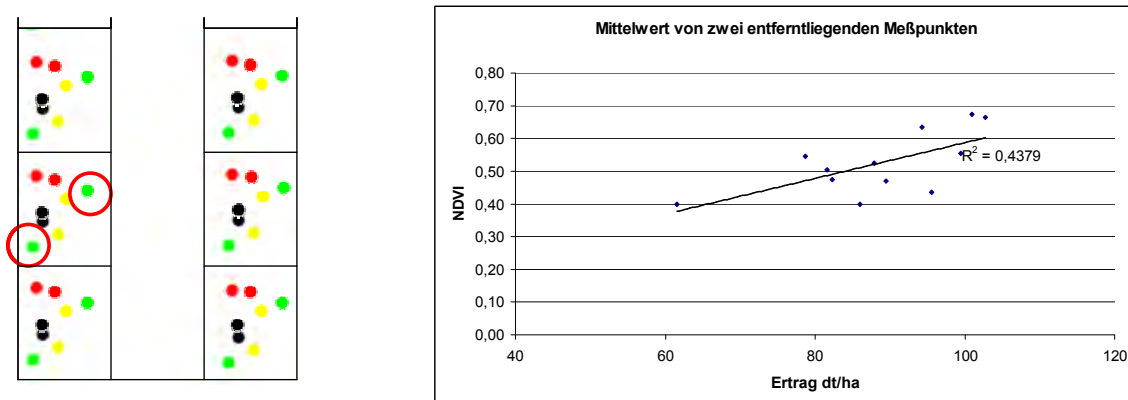


Abb. 4.29 Korrelation von NDVI und Kornertrag unter Verwendung des Mittelwertes von zwei entfernt voneinander liegenden Messpunkten je Parzelle (rot umrandete Messpunkte im linken Teil der Grafik).

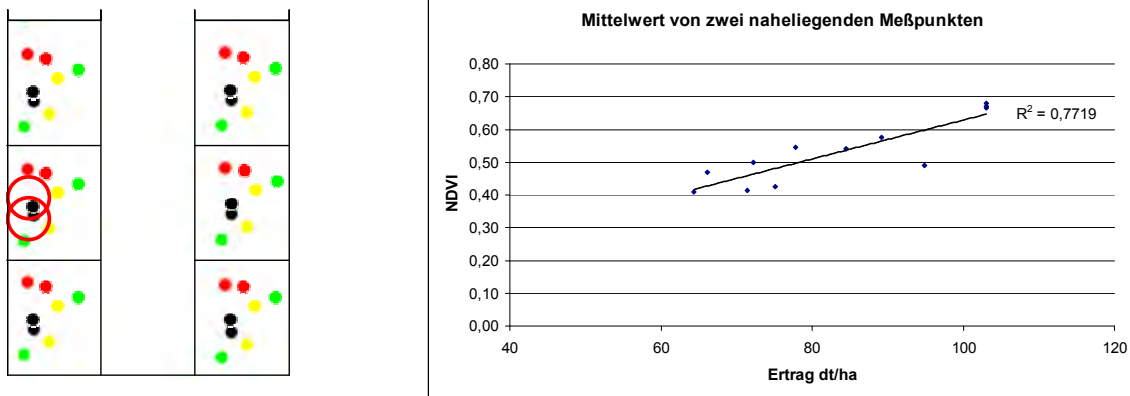


Abb. 4.30 Korrelation von NDVI und Kornertrag unter Verwendung des Mittelwertes von zwei nah beieinander liegenden Messpunkten je Parzelle (rot umrandete Messpunkte im linken Teil der Grafik).

Eine besonders hohe Korrelation zeigte sich zwischen NDVI und Kornertrag bei folgendem Vergleichsmuster: der Mittelwert des Kornertrages von zwei nah beieinander liegenden Messstellen je Versuchsparzelle wurde mit dem Mittelwert des NDVI von der ganzen Versuchsparzelle verrechnet. Hierbei ergab sich in den zwölf Versuchspartzen ein Bestimmtheitsmaß von 0,93.

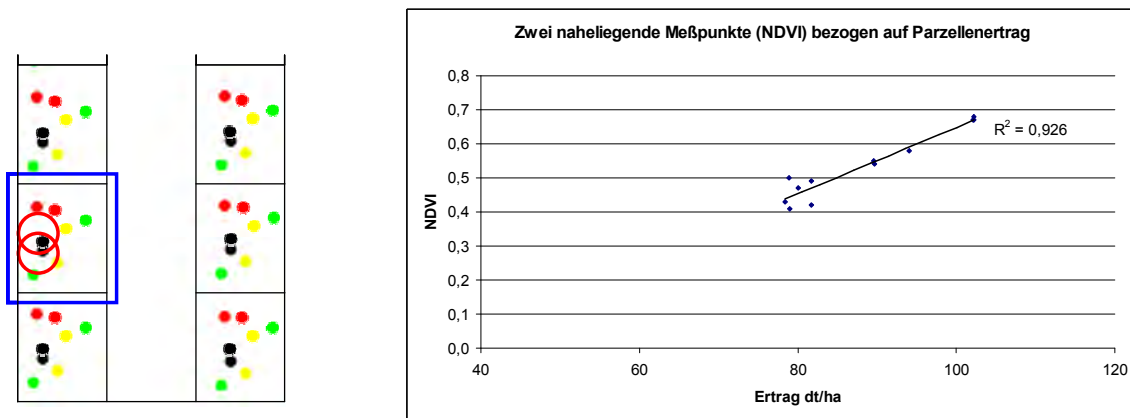


Abb. 4.31 Korrelation von NDVI und Kornertrag unter Verwendung des Mittelwertes von zwei nah beieinander liegenden Messpunkten je Parzelle für den Kornertrag (rot umrandete Messpunkte im linken Teil der Grafik) und des für die gesamte Parzelle gemittelten NDVI-Wertes (blau umrandeter Bereich).

5 Diskussion

Mit dem räumlich hochauflösenden Sensor des *QuickBird*-Satelliten sollte gezeigt werden, wie gut es gelingt, experimentell mit Stickstoffdüngung und Fungizidbehandlung zu unterschiedlicher Vitalität geführte Weizenparzellen zu unterscheiden bzw. zu klassifizieren. Die Untersuchungen zielten auf die Umsetzung der fernerkundlich erfassten Raummuster im Präzisionspflanzenbau, d. h. den zeitlich und räumlich variablen Einsatz von Düngern und Pflanzenschutzmitteln. Zu bearbeiten war in dieser Studie (1) die grundsätzliche Möglichkeit der räumlichen Trennbarkeit von Vitalitätsunterschieden, (2) die Unterscheidung des durch Krankheiten verursachten biotischen Stress von abiotischem, durch relativen Stickstoffmangel ausgelösten Stress, (3) die Überlagerung solcher Stressphänomene im Satellitenbild durch unterschiedliche Bestandesdichten des Getreides, Bodenverhältnisse etc. und (4) die Möglichkeit der Kartengenerierung für teilschlag-spezifische Maßnahmen. Anschließend wird die benötigte räumliche Auflösung von ground truth Daten zur Validierung von Fernerkundungsaufnahmen (5) und die derzeitige Operationalität eines auf Satellitenaufnahmen gestützten Präzisionspflanzenbaus diskutiert (6).

An zwei Standorten, Dikopshof und Klein Altendorf, wurden hierzu 2002 und 2003 Parzellenversuche mit Winterweizen angelegt. 2002 und 2003 wurde auf dem Dikopshof mit Absicht die Winterweizensorte *Kanzler* angebaut, die als besonders empfindlich gegenüber Pilzkrankheiten gilt. In Klein Altendorf wurden 2003 die Sorten *Wasmo* und *Novalis* in drei Saatstärken angebaut, um unterschiedliche Bestandesdichten zu etablieren.

Zu beiden Versuchsjahren sollte in regelmäßigen Abständen die spektrale Reflexion der Pflanzenbestände analysiert werden. Dementsprechend wurden in beiden Versuchsjahren *QuickBird*-Satellitenaufnahmen geordert. Aufgrund der mangelhaften Verfügbarkeit von Satellitenszenen mussten 2003 zusätzlich Überfliegungen der Versuchsflächen mit einem Hubschrauber durchgeführt werden.

5.1 Räumliche Trennbarkeit von Vitalitätsunterschieden in Weizen

Obgleich in den Versuchsjahren 2001/2 und 2002/3 nur jeweils eine auswertbare Satellitenszene zur Verfügung stand, darf davon ausgegangen werden, dass es mit den im Anhang gezeigten Aufnahmen zum ersten Mal gelungen ist, im Feldversuch

durch unterschiedliche Stickstoffdüngung und Fungizidbehandlung erzeugte Vitalitätsunterschiede eines Getreidebestandes in hoher räumlicher und spektraler Präzision parzellenscharf in einem Satellitenbild aufzunehmen. Dass eine Differenzierung unterschiedlich vitaler Pflanzenbestände anhand der Reflexion möglich ist, wurde in früheren Studien gezeigt (Guyot, 1989; Kühbauch, 1991b; Baret et al., 2000). Eine kleinräumige Differenzierung zwischen den Faktoren Stickstoffdüngung und Pilzkrankheiten in einem Satellitenbild war dagegen in dieser Deutlichkeit nicht zu erwarten. Mit diesen Aufnahmen wird das weitreichende Potential der Satellitenfernerkundung im Präzisionspflanzenbau deutlich. Auch Bootink und Verhagen (1997) verweisen in ihren Untersuchungen über die fernerkundliche Unterscheidung zwischen Trockenstress und Nährstoffmangel auf das große Potential der Fernerkundung für den PP. Einen herausragenden Vorteil der Fernerkundung sehen sie in der nicht destruktiven, relativ kostengünstigen und großflächigen Einsetzbarkeit dieser Technik.

In den eigenen Versuchen war auf drei Versuchsflächen mit dem räumlichen hochauflösenden Sensor des *QuickBird*-Satelliten eine exakte Abgrenzung und Differenzierung zwischen gesunden und gestressten Winterweizenbeständen anhand von Reflexionsunterschieden möglich. Im Jahr 2002 zeigten sich diese Unterschiede besonders deutlich, was zum großen Teil auch am Aufnahmezeitpunkt lag. Die Bestände waren am 25. 06. 2002 schon sehr weit entwickelt. Unterschiede, ausgelöst durch die Faktoren Stickstoff und Fungizid, kamen deutlich zum Vorschein. Dies lässt darauf schließen, dass schon zu einem früheren Termin eine Unterscheidung zwischen gesunden und gestressten Weizenbeständen in einem Satellitenbild möglich gewesen wäre. Mit einer Zeitreihe von Satellitenbildern hätte die differenzierte Entwicklung der Weizenbestände und somit die Veränderung in der Reflexion belegt werden können.

Mit beginnender Seneszenz von Pflanzen kommt es zu Veränderungen in der Blattturgescenz, der Blattstruktur und -fläche sowie der Pigmentierung, die sich in der spektralen Reflexion sowohl von Einzelblättern als auch der Pflanzenbestände vor allem im VIS und NIR bemerkbar machen (Clevers, 1989). Eine größere vitale Blattfläche sowie ein höherer Gehalt an Chlorophyll in gesunden Blättern führen zu einer verstärkten Absorption des roten und zur verstärkten Reflexion des NIR Spektralbereichs. Genau diese Unterschiede in der Reflexion des roten und NIR

Kanals konnten zwischen den gestressten und nicht gestressten Pflanzenbeständen im multispektralen Satellitenbild festgestellt werden.

Einen ersten Ausblick auf die mögliche Differenzierung anhand einer Satellitenbildzeitreihe gaben die Ergebnisse aus dem Jahr 2003 von der Lehr- und Forschungsstation Dikopshof. Obwohl die Bedingungen nicht optimal waren – geringer Krankheitsbefall, schlechte Luftbildqualität – konnte ein unterschiedlicher Verlauf des Vegetationsindex NDVI in den vier Behandlungsvarianten im Zeitraum vom 16. 05. bis 13. 06. aufgezeigt werden. Die Unterschiede in der Behandlung ergaben am 13. 06. Differenzen des NDVI zwischen den Behandlungsvarianten von 0,15 bis 0,35. Der Verlauf des NDVI in den normal mit Stickstoff versorgten Varianten unterschied sich in beiden Fungizidstufen deutlich von den mit der geringeren N-Menge gedüngten Varianten. Zu erkennen ist ein gleich bleibender Anstieg der NDVI-Werte auf hohem Niveau und ein späteres Abfallen im Gegensatz zu den unterversorgten Weizenbeständen. Mit dieser fernerkundlichen Information kann nach Büker und Kühbauch (1991) auf die Dauer der Vitalität und Assimilation der Pflanze geschlossen werden, die sich unter sonst gleichen Bedingungen im Ertrag niederschlägt.

Tatsächlich ergaben die Kornertragsmessungen in den Parzellen der höheren N-Stufe deutlich höhere Werte soweit diese auch gegen Krankheiten geschützt wurden. Trotz einer längeren Assimilationsphase kamen in der Variante N+/F- keine höheren Erträge zustande als in den Parzellen der Varianten N-/F+ und N-/F-. Zu vermuten ist hier eine starke Beeinträchtigung der Kornbildung aufgrund des stärkeren Krankheitsbefalls.

Durch die Integration über einem breiten Wellenlängenspektrum gehen im panchromatischen Bild viele Informationen verloren. Daher konnten in der panchromatischen Satellitenaufnahme 2002 keine differenzierte Abstufung der Pflanzenvitalität beobachtet werden. Bemerkenswert ist jedoch, dass sich in der panchromatischen Aufnahme unabhängig, d. h. ungestört von der Stickstoffversorgung, die kranken Parzellen von den gesunden, mit Fungizid behandelten, eindeutig trennen lassen. Im Jahr 2003 kamen, aufgrund des sehr geringen Pilzbefalls, allein die Differenzen des Faktors Stickstoff in der Reflexion des panchromatischen Satellitenbildes zum tragen.

5.2 Unterscheidung von biotischem und abiotischem Stress

Die Identifikation des genauen Faktors, der den Stress an den Pflanzenbeständen auslöst, ist im Pflanzenbau entscheidend um entsprechende pflanzenbauliche Maßnahmen durchzuführen. Daher sollte versucht werden, die im Versuchsfeld hergestellten unterschiedlichen Stresssituationen, anhand der Satellitenbilder zu differenzieren.

Eine Unterscheidung im Satellitenbild zwischen den Faktoren Stickstoff und Fungizid war im Versuchsjahr 2002 eindeutig möglich. Anhand der statistischen Analyse konnten die Unterschiede in der Reflexion statistisch abgesichert werden. Die Reflexionen im roten und NIR Kanal zeigten, wie zu erwarten war, die deutlichsten Unterschiede zwischen den vitalen und gestressten Pflanzenbeständen. An dieser Stelle soll noch einmal darauf hingewiesen werden, dass der Abfall in der NIR Reflexion mit Beginn der Seneszenz an den mit Pilzkrankheiten befallenen Pflanzenbeständen nicht bedeutet, dass seneszente Blätter eine geringere NIR Reflexion aufweisen als vitale Blätter (Guyot, 1989). Die Abschwächung der NIR Reflexion kommt vielmehr dadurch zustande, dass mit fortschreitender Seneszenz ein Abklappen der Blätter, z. T. Blattabfall verbunden ist, der für den Satelliten- oder Flugzeugsensor einen größeren Bodenanteil „sichtbar“ werden lässt, der für sich genommen das NIR des Sonnenlichtes stärker absorbiert, als vitale oder seneszente Blätter.

Im Versuchsjahr 2003 konnten diese Unterschiede tendenziell bestätigt werden. Aufgrund ungünstiger atmosphärischer Bedingungen zum Zeitpunkt der Aufnahme der Versuchsfläche in Klein Altendorf, war es jedoch im Gegensatz zum vorherigen Jahr nicht möglich alle vier Faktorkombinationen voneinander zu trennen. Ein weiterer Grund dafür lag in dem geringen Krankheitsbefall zum Zeitpunkt der Aufnahme am 28. 05. 2003. Erst ab dem 13. 06. konnten Pilzkrankheiten mit Befallstärken von max. 5% befallener Blattfläche festgestellt werden. Aus Sicht des Versuchsanstellers störte vor allem die sehr trockene Witterung in März und April eine Ausbreitung der Krankheiten. Aus demselben Grund war auch eine signifikante Differenzierung zwischen den vier Faktorkombinationen des Versuchsfeldes auf der Lehr- und Versuchsstation Dikopshof in den Luftbildern aus dem Jahr 2003 nicht möglich. An den Versuchen 2003 wird erkennbar, dass schwache Befallsgrade mit Fernerkundungssensoren nicht sicher klassifiziert werden können. In der Praxis würde man aber auf schwachen Krankheitsbefall auch nicht reagieren müssen.

Gleichwohl ist es von prinzipiellem Interesse, auch schwache Defizite der Pflanzenvitalität mit Hilfe der Fernerkundung räumlich zu erfassen.

Die Wirkung von Krankheiten und Nährstoffmangel auf die spektrale Reflexion von Kulturpflanzen wurde in Experimenten unter Feldbedingungen u. a. an Weizen (Schellberg und Kühbauch, 1990) und Zuckerrüben (Dockter et al., 1988) untersucht. Dabei wurden deutliche Veränderungen des NDVI etc. festgestellt. Ebenso stellten Kühbauch (1991b) und Gitelson (1997) fest, dass Bestandesparameter wie Stickstoffversorgung, Fungizidbehandlung, Biomasse und Chlorophyllgehalt einen Einfluss auf den NDVI haben. Auch eine Verringerung des NDVI von Winterweizenbeständen in Abhängigkeit der Befallstärke mit *Septoria tritici* stellte Nicolas (2004) in Feldversuchen fest. In allen Untersuchungen wurde jedoch mit Radiometern gearbeitet, die kein Raummuster der spektralen Reflexion erfassen können.

Dagegen sollte in der vorliegenden Studie eine räumliche Differenzierung zwischen abiotischem und biotischem Stress anhand der optischen Fernerkundungsdaten vorgenommen werden. Mit Hilfe von Vegetationsindizes, welche aus den am Satellitensensor gemessenen spektralen Kanälen berechnet wurden, konnte im *QuickBird*-Satellitenbild vom 25.06. 2002 räumlich zwischen biotischem und abiotischem Stress unterschieden werden. Hierbei zeigte sich, dass der seit vielen Jahren eingesetzte und etablierte Vegetationsindex NDVI auch in der vorliegenden Studie sehr gut die Unterschiede zwischen den unterschiedlich geführten Versuchspartzen widerspiegelt.

In bestimmten Phasen des Pflanzenwachstums sowie bei speziellen Fragestellungen zeigten der $NDVI_{(grün)}$, WdVI und SAVI ihre Vorteile gegenüber dem NDVI. Der $NDVI_{(grün)}$ eignete sich besser zur Unterscheidung von Vitalitätszuständen im späten Wuchsstadium. In der Literatur wird übereinstimmend berichtet, dass mit zunehmender vitaler Biomasse von Vegetationsdecken z. B. $BFI > 3$ der NDVI in einen Sättigungsbereich kommt, ab dem eine weitere Zunahme der Biomasse nicht mehr gemessen werden kann (Schellberg und Kühbauch, 1991). Auch der rote und NIR Spektralbereich haben für sich genommen einen ähnlichen Sättigungsbereich. Gitelson und Merzlyak (1997) schlagen deshalb für die Beobachtung von Vegetationsdecken mit großer vitaler Biomasse den $NDVI_{(grün)}$ vor.

Auch in unserer Untersuchung ergab der $NDVI_{(grün)}$ im Satellitenbild des Jahres 2002 in den Versuchspartzellen an der Lehr- und Forschungsstation Dikopshof eine bessere Trennung zwischen den vier Behandlungsvarianten.

Da bei der Berechnung des WDVI, sowohl der störende Einfluss des Bodens reduziert, als auch der grüne Wellenlängenbereich der Vegetationsdecke genutzt wird, zeigt der WDVI eine höhere Sensitivität als der NDVI gegenüber dem Blattchlorophyllgehalt (Clevers, 1988). In unseren Experimenten zeigte der WDVI, im Gegensatz zu den anderen VI's, nur signifikante Unterschiede in der Reflexion der Sorten *Novalis* und *Wasmo* und zwischen der geringsten ($150 \text{ Körner m}^{-2}$) und dichtesten ($450 \text{ Körner m}^{-2}$) Saatstärke. Die Güte des WDVI und auch die des SAVI hängt zu einem großen Teil von den zur Verfügung stehenden zeitnahen Reflexionsmessungen über blankem Boden ab. Ohne diese Messungen ist nur die Verwendung von Standardreferenzreflexionen möglich, die in unseren Versuchen kein befriedigendes Ergebnis lieferten.

Häufig wird in der Literatur auf den positiven Zusammenhang zwischen NDVI und Ertrag von Winterweizen (Hatfield, 1993, Schelling, 2003) sowie Sommergetreide hingewiesen (Basnyat et al., 2004). Diese berichteten Ergebnisse werden durch unsere Ergebnisse bestätigt. Die Ertragsmessung am Mährescher zeigte die Unterschiede in den vier Behandlungsvarianten deutlich. Zwischen den mit Stickstoff versorgten und den unterversorgten Parzellen zeigen sich zum Teil Unterschiede von mehr als 100%. Auch zwischen den Fungizidvarianten ergeben sich deutliche Unterschiede im Kornertrag. Ähnlich wie in unseren Ergebnissen zeigte der Verlauf des NDVI in vier Faktorkombinationen deutliche Unterschiede über den Vegetationsverlauf. In früheren Untersuchungen mit einem Radiometer (Schellberg und Kühbauch 1990) wird deutlich, in welchen Größenordnungen und Dynamik sich der durch Krankheiten und/oder Nährstoffmangel induzierte Vitalitätsverlust eines Weizenbestandes im NDVI über die Vegetationsperiode abzeichnet. Zum einen fällt der NDVI in den Varianten mit geringer Düngung zu einem früheren Zeitpunkt ab, zum anderen ist in den gesunden Parzellen ein längeres Verweilen des NDVI auf hohem Niveau zu sehen (Abb. 5.1).

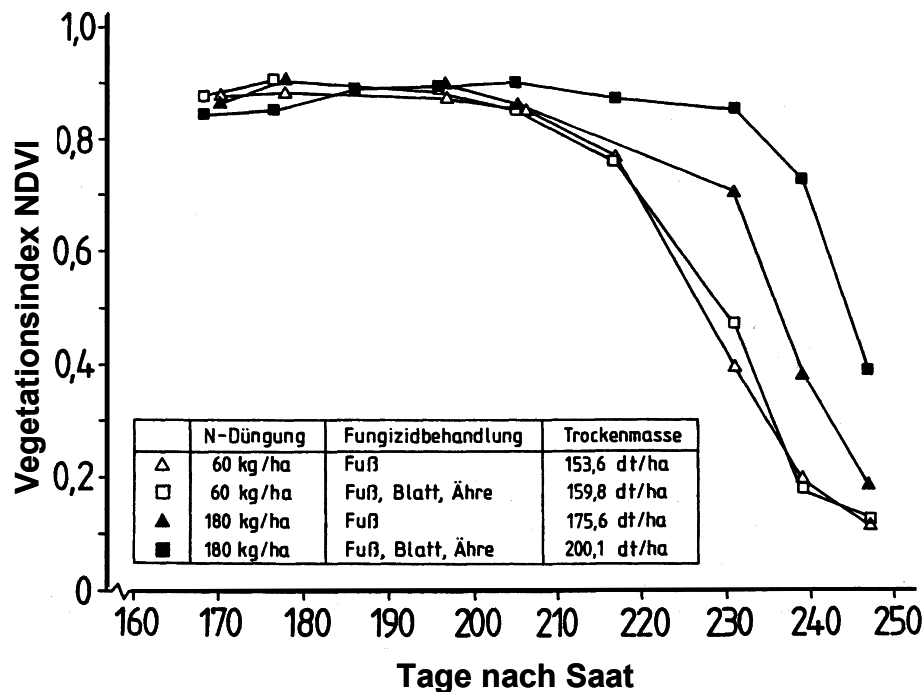


Abb. 5.1 Verlauf des NDVI in vier Faktorkombinationen über die Vegetationszeit, eingeblendet sind die Behandlungskombinationen und die Trockenmasse (Schellberg und Kühbauch, 1990).

Auffällig ist der Unterschied des Räumusters im Satellitenbild im Vergleich zur Ertragskarte. In der Ertragskarte – die im Mähdrescher am Boden erzeugt wird – können die Grenzen der einzelnen Parzellen nicht erkannt werden, während sowohl im multispektralen wie auch teilweise im panchromatischen Satellitenbild aus 450 km Entfernung alle Parzellen sehr deutlich voneinander unterschieden werden können. Das verdeutlicht eindrücklich das Potential, das in der modernen hoch auflösenden optischen Fernerkundung liegt.

Wie wichtig die Verwendung der multispektralen Aufnahmen und der Berechnung von Vegetationsindizes in der Zustandserfassung von Pflanzenbeständen ist, verdeutlicht ein Vergleich der Satellitenbilder mit den vom Boden aus aufgenommenen Digitalfotos (Abb. 4.17). Zugleich unterstreicht dieser Befund die Problematik visueller Bonituren, die auch in anderen Anwendungsbereichen als unzureichend empfunden wird und Anlass für die Entwicklung objektiver Messtechniken mit Kamera- und Sensortechnik ist (Lock et al., 2004; Nonn et al., 2004).

Das Problem der Erkennung von Pilzkrankheiten in einem frühen Stadium wurde schon in Arbeiten von Lorenzen und Jensen (1989) sowie Kurschner et al. (1984) erwähnt, die Untersuchungen mit nicht abbildenden Nahbereichsreflexions-

messungen machten. Sie stellten erst zehn Tage nach der Inokulation von Gerstenblättern mit Mehltau signifikante Änderung in der spektralen Reflexion zwischen 400 und 1100 nm fest. Eine Messung im Satellitenbild ist aufgrund der großen Entfernung und dadurch bedingten Störeinflüssen weitaus schwieriger. Für eine frühere und deutlichere Erkennung von Pilzkrankheiten bedarf es daher Satellitenbilder von sehr hoher Qualität.

Nicht auszuschließen ist, dass zusätzlich zur satellitengestützten Fernerkundung flugzeuggetragene Sensoren entwickelt werden, die mit hyperspektraler Auflösung Informationen liefern, welche nicht nur die räumliche Ausbreitung von Krankheiten oder Vitalitätsdefiziten liefern, sondern darüber hinaus Krankheitsursachen bzw. Erregergruppen erkennen lassen. Denkbar ist auch eine Entwicklung in der zur Ermittlung der räumlichen Ausbreitung bestimmter Krankheiten und Schädlinge, die bereits heute verfügbaren, wesentlich auf Witterungsdaten basierten Prognosemodelle mit Fernerkundungsdaten kombiniert werden.

West et al. (2003) schreiben in ihrem Review über das Potential der optischen Bestandesmessung zur gezielten Kontrolle von Pflanzenkrankheiten, dass jedes System zum Erkennen von Pflanzenkrankheiten seine Schwachstellen in Technik und Auswerteverfahren hat. Ein Ansatz ist daher, mehrere Sensortechnologien gleichzeitig zu verwenden, und Messungen miteinander zu verknüpfen, um ein System zu entwickeln, welches sensibler und differenzierter auf Veränderungen im Bestand reagiert. Hier kann auch die Satellitenfernerkundung mit eingebunden werden, indem große Areale von Kulturen mit Krankheitsbefall oder anderen Stresssymptomen erkannt und hervorgehoben werden.

5.3 Einfluss verschiedener Bestandesdichten, Bodenverhältnisse, etc.

Im Versuchsjahr wurde auf einer Versuchsfläche die Saatstärke von zwei Winterweizensorten variiert, um verschiedene Bestandesdichten zu simulieren. Zwischen den Winterweizensorten *Wasmo*, welche ein hohes Bestockungsvermögen hat und *Novalis*, welche ein geringeres Bestockungsvermögen hat, ergab der berechnete WDVI signifikante Unterschiede in der Reflexion. Dagegen konnte ein Einfluss der Bestandesdichte auf die Reflexion der Sorten *Novalis* und *Wasmo* im Satellitenbild vom 28.05.2003 nur zwischen der dünnsten und dichtesten Saatstärke beobachtet werden. Dies liegt sehr wahrscheinlich an den sehr guten Böden in dem

Untersuchungsgebiet, die es den Pflanzen erlauben anfängliche Unterschiede einer variierten Aussaat durch vermehrte Bestockung und verstärkten Wuchs auszugleichen. Daher waren die Bestandesunterschiede zwischen der normalen Saatstärke und der Saatstärken mit 150 und 450 Pflanzen m^{-2} nicht signifikant. Es ist anzunehmen, dass auf leichten heterogenen Böden Unterschiede in der Bestandesdichte wesentlich stärker zum Vorschein kommen. Dadurch ist der Einfluss auf die Reflexion des Bestandes verstärkt und kann andere Stressfaktoren überlagern.

Die Annahme, dass verschiedene Saatstärken bzw. Bestandesdichten in unseren Untersuchungen keinen signifikanten Einfluss auf die Erkennung von pilzbedingtem Stress an Weizen hatten, bestätigt ein weiterer Punkt. In einem zweiten *QuickBird*-Satellitenbild von der Versuchsfläche in Klein Altendorf vom 13.06.2003, welches erst zum Ende der Studie vorlag und daher bisher nur ansatzweise ausgewertet werden konnte, können die unterschiedlichen Saatstärken weniger gut erkannt werden, als noch in dem Satellitenbild vom 28.05.2003; statistisch konnten keine Unterschiede abgesichert werden. Offensichtlich wurden durch eine verstärkte Bestockung des Getreides dünne Saatstärken ausgeglichen und es kommt zu einem Angleichen der Reflexionen zwischen den unterschiedlichen Saatstärken.

Nicht auszuschließen ist, dass Reflexionsunterschiede aufgrund von Saatstärkeunterschieden auf der einen und Pilzkrankheiten auf der anderen Seite, in unserem Versuchsjahr zu unterschiedlichen Zeiten auftraten. Dadurch wird der Einfluss von verschiedenen Saatstärken auf die Reflexion verringert. Weitere Untersuchungen sind nötig, um mit Versuchswiederholungen und vor allem mit einer Zeitreihe von Fernerkundungsaufnahmen abzusichern, ob diese Annahme zutrifft oder dieser Effekt stark von den Witterungsverhältnissen abhängig ist und somit kein zuverlässiges Abgrenzen der beiden Faktoren Krankheiten und Bestandesdichte möglich ist.

Der Einfluss des Faktors Bodenbonität, könnte auf der Grundlage von Bodenkarten zuverlässig – vor einer fernerkundlichen Klassifikation – berücksichtigt werden. Im Satellitenbild festgestellte Reflexionsveränderungen der Bestände müssen jedenfalls vor dem Hintergrund der Bodenbonität bewertet werden. Darüber hinaus können sich pflanzenbauliche Entscheidungen auf andere Zusatzinformationen stützen, wie Ertragsverteilungskarten, Höhenlinienkarten etc. Nicht unterschätzt werden darf hier die meist jahrelange Erfahrung des Landwirts.

5.4 Möglichkeit der Kartengenerierung

Die sehr guten Übereinstimmungen zwischen den erstellten Managementkarten in Kap. 4.2 und den Boden- und Ertragsmessungen in Kap. 4.1 zeigen, dass es möglich ist aus den Informationen der Satellitenbilder Karten zu erstellen, die sehr genau die Variabilität der Pflanzenbestände im Schlag widerspiegeln. Grundsätzlich besteht Einigkeit, dass die heterogene Verteilung des Bodenzustandes und der Vegetation von Feldschlägen in den pflanzenbaulichen Maßnahmen berücksichtigt werden muß. Aufgrund der heterogenen Verteilung von Pilzkrankheiten innerhalb eines Ackerschlag und der Gefahr toxischer Rückstände von Pestiziden in landwirtschaftlichen Produkten ist es sinnvoll, den Gebrauch von Pflanzenschutzmitteln zu reduzieren. Leon et al. (2003) sehen neben den möglichen ökonomischen Vorteilen des Precision Farming, vor allem den Nutzen für die Umwelt, wie auch die gesellschaftliche Akzeptanz des teilschlagspezifischen Bewirtschaftung von Schlägen mit Düngemitteln und Pestiziden. Dieses werden die treibenden Kräfte bei der Umsetzung und Verbreitung der teilschlagspezifischen Bewirtschaftungsweise sein. Daher ist eine Abkehr von der üblichen Praxis, den ganzen Ackerschlag einheitlich zu behandeln angezeigt. Dafür sprechen nicht nur ökologische Gründe, sondern auch ökonomische, da die Aufwendungen für Pflanzenschutzmittel einen der größten Kostenfaktoren im Betrieb darstellen (Bravo, 2003). Secher et al. (2000) erwähnen eine Einsparung von 13% die mit teilschlagspezifischer Ausbringung von chemischen Betriebsmitteln zu erzielen ist.

Heutzutage werden Entscheidungen zum Einsatz von Fungiziden aufgrund der aktuellen Befallsstärke im Schlag und dem erwarteten Auftreten in der Zukunft gefällt. Laut Paveley et al. (1997) sagt der aktuelle Befall nur wenig über das Auftreten der Krankheit im weiteren Vegetationsverlauf aus. Auch ist der Effekt einer bestimmten Befallsstärke auf den Ertrag im Schlag nicht gleichmäßig verteilt. Es wäre daher ökonomisch unsinnig, nur nach der aktuellen Befallsstärke eine Behandlungsentscheidung zu fällen. In ihren Untersuchungen kommen daher Paveley et al. (1997) zu der Empfehlung, als Entscheidungskriterium die laufende Beobachtung des green leaf area index (GLAI). Hierfür bietet sich die Fernerkundung an, da der GLAI aus dem NDVI abgeleitet werden kann und daher eine regelmäßige, teilflächige und nicht zerstörende Beobachtung der Pflanzenbestände möglich ist.

Weil Fernerkundungsinformationen im Laufe der Vegetationszeit von unterschiedlichen Phänomenen der Pflanzenbestände und des Bodens stammen bzw. benötigt

werden, ist von vorne herein eine relativ hohe räumliche und spektrale Auflösung anzustreben. Die Kartengenerierung wird jedoch der pflanzenbaulichen Maßnahme anzupassen sein. Mit anderen Worten, nicht alle Zustände der Pflanzendecke müssen in allen Details und fein abgestuft klassifiziert werden oder können in der selben Detailtreue im Pflanzenbau maschinell umgesetzt, werden wie sie im Fernerkundungsbild erscheinen. In der Praxis wird es deshalb darauf ankommen, dass z. B. Karten mit räumlicher Auflösung erstellt werden, welche die steuerbaren Teilbreiten des Applikationsgerätes berücksichtigen und in nur wenige Behandlungsstufen unterteilt sind (z. B. geringe, normale, höhere Aufwandmenge). Zudem muss bedacht werden, dass z. B. bei pilzlichen Schaderregern nicht nur in den Zonen gespritzt wird, wo die Krankheit lokalisiert wurde, sondern auch eine umgebende „Pufferzone“ behandelt wird. Bei der Festlegung dieser Pufferzonen können u. U. prognostizierte Befallsrisiken u.a. berücksichtigt werden.

5.5 Räumliche Auflösung von ground truth Daten

Ein Zeit-, wie Kostenfaktor ist die exakte Validierung der durch ein Fernerkundungsbild gewonnenen Informationen mit ground truth Parametern. Es ist in der Praxis, wie auch im Versuchswesen aus ökonomischen aber auch aus Zeitgründen nicht möglich, den ganzen Ackerschlag exakt auf z.B. Krankheiten zu untersuchen. Parker et al. (1997) untersuchten das Auftreten von verschiedenen Krankheiten im Winterweizen. Nach ihren dreijährigen Untersuchungen kamen sie zu dem Ergebnis, dass zum Wachstumsstadium BBCH 31/33 und BBCH 59/61 fast alle Krankheiten in einem zufälligen Muster auftreten. Aufgrund des Verteilungsmusters empfehlen sie ein Boniturraster mit wenigen Boniturflächen und mehreren Pflanzenindividuen innerhalb eines Feldes.

Dementsprechend zeigt Kapitel 4.3. in der Mittelwertbildung zwei nah beieinander im Vergleich zu zwei entfernter voneinander liegender Boniturspunkte innerhalb einer Parzelle wesentlich höhere Korrelationswerte zwischen NDVI und Kornertrag. Die bei der hohen räumlichen Auflösung von Satellitendaten, wie auch Ertragskarten stärker hervortretende Variabilität innerhalb eines Schlages birgt auch das Risiko von Fehlern. Wird z.B. nur ein Pixel des Satellitenbildes als Indikator für die Vitalität eines größeren Areals im Feld herangezogen, kann es sein, dass die Vitalität des Areals falsch interpretiert wird. Darüber hinaus können einzelne Pixel z.B. durch

atmosphärische Störung verfälscht sein kann. Die Mittelwertbildung von mehreren nebeneinander liegenden Pixel würde dieses Risiko reduzieren.

Leon et al. (2003) merken nach ihren zweijährigen luftbildgestützten fernerkundlichen Untersuchungen an Baumwolle und Sojabohne an, dass sie nun anhand der gewonnenen Daten die Probenpunkte im Feld in zukünftigen Untersuchungen besser platzieren können. Sie schlagen vor, die Boniturrasterpunkte nicht in einem regelmäßigen Raster im Feld zu verteilen, sondern in Regionen, mit unterschiedlicher spektraler Reflexion. So entsteht für jeden Schlag ein individuelles Boniturraster, welches an die kleinräumigen Unterschiede im Feld angepasst werden kann.

Unsere Ergebnisse zeigten, dass ein sehr dichtes Boniturraster kaum bessere Ergebnisse bei einem Vergleich von ground truth und Fernerkundungsdaten liefert, als ein weiter gestecktes Raster, welches mit wesentlich weniger Aufwand umgesetzt werden kann. Die verringerte Anzahl an Boniturrasterpunkten könnte noch dahingehend optimiert werden, dass bei der Verteilung der Boniturrasterpunkte die pedologische Heterogenität des Ackerschlaages berücksichtigt wird. Hierzu kann auf vorhandene Boden- oder Ertragskarten aber auch auf das Wissen des Landwirtes zurückgegriffen werden.

5.6 Derzeitige Operationalität eines auf Satellitenaufnahmen gestützten Präzisionspflanzenbaus

Die Satellitenbilder haben deutlich gemacht, welche Möglichkeiten sich für den Präzisionspflanzenbau und Präzisionspflanzenschutz bieten. Die räumliche Verteilung des durch Krankheiten und Stickstoffmangel beeinflussten Erscheinungsbildes der Vegetation kann kartiert und dessen Flächenumfang bestimmt werden. Weitere Untersuchungen sind nötig, um den frühest möglichen Zeitpunkt der Erkennung sowie der Unterscheidung von abiotischem und biotischen Stress mittels Satellitenbildern zu ermitteln, welcher für eine wirkungsvolle Behandlung unabdingbar ist.

Wie Pinter et al. (2003) resümierten, hat die Fernerkundungstechnologie in Verbindung mit Entwicklungen in Globalen Positionierungssystemen (GPS), Mikrocomputern, Geographischen Informationssystemen, Ertragskartierungen und erweiterten Bestandessimulationsmodellen das Potential, die Managementstrategien der Landwirte zu revolutionieren und Präzisionspflanzenbautechniken zu implementieren. Hatfield und Pinter (1993) sehen im Aufkommen von neuen digitalen

Systemen, die räumlich und zeitlich hoch auflösen einen Informationsgewinn, welcher das Management der landwirtschaftlichen Ressourcen revolutionieren wird. Voraussetzung dafür ist eine flächendeckende und zeitnahe sowie kostengünstige Verfügbarkeit der Fernerkundungsinformationen in anwendbarer Form (Lamb, 2000). Kalliany (1998) definiert die Anforderungen des Präzisionspflanzenbaus folgendermaßen:

- Aufnahmen sollen „jederzeit“ möglich sein und danach „rasch“ zur Verfügung stehen;
- die Bilder mögen „einfach“ zu verarbeiten und „eindeutig“ zu interpretieren sein;
- verschiedene Satelliten bzw. Sensoren sollen „problemlos“ zu kombinieren sein;
- schließlich sollten die Daten natürlich auch „kostengünstig“ sein.

Da sich innerhalb eines Schlages Pilzkrankheiten binnen weniger Tage ausbreiten können, ist für den Präzisionspflanzenschutz die kurzfristige Aufnahme und Bereitstellung von Daten unverzichtbar. Nur so kann ein schnelles Eingreifen des Landwirts aufgrund von Veränderungen in der Reflexion gewährleistet werden. Andernfalls ist ein Befall mit Pilzkrankheiten so weit vorangeschritten, dass ein Eingriff mit Fungiziden kaum noch den Bestand „retten“ kann.

Diese o. g. Anforderungen werden derzeit noch von keinem Satellitensystem, auch nicht von den neuesten hochauflösenden optischen Systemen wie *QuickBird* oder *IKONOS* vollständig erfüllt. Es ist aufgrund zu geringer Wiederholraten und kleiner Schwadbreiten dieser Satellitensysteme nicht möglich, jederzeit und in regelmäßigen Zeitintervallen Bilder zu erhalten. Bei Wiederholraten von drei bis vier Tagen ist in unseren Breiten die Chance an einem vorher definierten Termin ein Bild ohne Bewölkung zu erhalten – trotz der in-Track und cross-Track Verschwenkung des Sensors zur Flugbahn – eher gering. Sie führt eher dazu, dass eine einfache und eindeutige Analyse erschwert wird, da bei einer Zeitreihenuntersuchung die Verschwenkung des Sensors zu einem anderen Reflexionsergebnis als bei nadir Sicht führt, welches bei der Analyse bedacht und herausgerechnet werden muss, damit Werte zu unterschiedlichen Terminen vergleichbar sind (Eklundh, 1996). Um einen routinemäßigen Einsatz der Satellitenfernerkundung im praktischen Präzisionspflanzenbau anwendbar zu machen und die Lücke zwischen Nutzererwartungen und Praxis zu schließen, müssen daher neue oder modifizierte Auswertungsalgorithmen entwickelt werden, welche eine weitestgehend

automatische und schnelle, aber auch zuverlässige und übertragbare Aufbereitung und Auswertung der Daten erlauben (Schiewe und Ehlers, 2004).

Ein weiteres Hindernis in der regelmäßigen Verwendung von hochauflösenden optischen Satellitendaten sind neben der eingeschränkten Verfügbarkeit die Kosten. Toler et al. (1981) schlussfolgerten Anfang der 80iger Jahre, dass die operationellen Kosten herkömmlicher Luftbilder der limitierende Faktor in der Erstellung von Luftbilddaten sind.

Inzwischen sind die Kosten für hochauflösende Luftbilder stark gesunken. Grenzdörffer (2004) gibt für hochaufgelöste digitale Luftbilder mit einer Bodenauflösung von 0,5-0,7 m Kosten von ca. 1,50-2,00 €/ha an. Dies hat zum einen mit der relativ weiten Verbreitung und vielfältigen Einsetzbarkeit der Luftbilder zu tun, wodurch eine höhere Auslastung und damit einhergehend eine Reduzierung der Kosten stattgefunden hat. Zum anderen konnten mit dem Einzug der Digitaltechnik die laufenden Kosten für Aufnahme und Speicherung der Daten gesenkt werden, da keine Filme mehr benötigt werden. Eine ähnliche Entwicklung darf auch für die satellitengestützten optischen Sensoren angenommen werden. Wenn erst einmal mehrere Systeme im Einsatz sind und die aufgenommenen Bilddaten von mehreren Endnutzern verwendet werden, dürfte der Preis pro Hektar für die Landwirtschaft zuträglich sein. Zusätzlich würde der Preis pro Hektar deutlich sinken, wenn mehr Flächen je Satellitenszene ausgewertet würden. Dazu muss sich die teilschlagspezifische Bewirtschaftung von Ackerschlägen erst etablieren. Bis dahin wird sich die Nutzung von Satellitenbildern auf kleinen Arealen nicht ökonomisch betreiben lassen.

In unseren Untersuchungen zeichnet sich jedoch ein erhebliches Potential für den Präzisionspflanzenbau ab. Mit optischer Fernerkundung ergeben sich jedoch hohe Anforderungen, nicht nur an die räumliche und spektrale Auflösung der Aufzeichnungen, wie sie bereits von Systemen wie *IKONOS* und *QuickBird* erfüllt werden, sondern vor allem an die zeitliche Auflösung und möglichst großräumige Abdeckung. Hierzu könnte das in Entwicklung befindliche System *RapidEye* maßgeblich zur breiteren Anwendung der Satellitenfernerkundung in der Landwirtschaft, insbesondere im Präzisionspflanzenbau beitragen. Durch die mit *RapidEye* geplanten täglichen Wiederholraten entsteht voraussichtlich auch mit der optischen Fernerkundung eine relative Wetterunabhängigkeit, während die

großräumige Abdeckung erwarten lässt, dass die Fernerkundungsaufnahmen in zuverlässigen Zeitreihen zur Verfügung stehen.

Unsere Erfahrungen mit QuickBird und IKONOS zeigen, dass aufgrund der schmalen Aufnahmestreifen eine äußerst hinderliche Konkurrenzsituation um die Fernerkundungsszenen entsteht, die letztlich keine Zeitreihen zulassen. Hinzukommen muss aber noch bei einem System wie *RapidEye*, dass die Fernerkundungsdaten innerhalb von ein paar Tagen beim Nutzer – radiometrisch wie geometrisch korrigiert – eintreffen, und zu ha Preisen zur Verfügung gestellt werden, die mit den Erlösen in der Landwirtschaft kompatibel sind.

6 Zusammenfassung

Ziel der Studie war es, die Möglichkeiten der optischen und räumlich hochauflösenden Fernerkundung als Instrument zur objektiven Zustandsbeschreibung von Pflanzenbeständen in Ackerschlägen zu nutzen und das Potenzial für die Anwendung im Präzisionspflanzenbau aufzuzeigen.

Mit Hilfe der Fernerkundung sollten das durch Krankheitsbefall, Stickstoffdüngung und Bestandesdichten hervorgerufene unterschiedliche Erscheinungsbild von Weizenbeständen räumlich und spektral hoch aufgelöst abgebildet und die Trennbarkeit unterschiedlicher Vegetationszustände analysiert werden. Im Feldversuch wurden in den Versuchsjahren 2001/2 und 2002/3 Parzellen (45 x 45 m² bzw. 30 x 30 m²) mit der gegen Pilzkrankheiten empfindlichen Winterweizensorte *Kanzler* angelegt, sowie die Sorten *Novalis* und *Wasmo*, welche sich in ihrer Bestockungsfähigkeit unterscheiden. Vitalitätsunterschiede der Pflanzenbestände wurden durch zwei Stickstoffdüngungsstufen, mit und ohne Fungizidbehandlung, am Standort Dikopshof 2001/2 und 2002/3 untersucht. Bestandesunterschiede in Verbindung mit zwei Stickstoffdüngungsstufen, mit und ohne Fungizidbehandlung, wurden am Standort Klein Altendorf 2002/2003 angelegt.

In der Studie konnte festgestellt werden, dass die Verfügbarkeit der optisch sehr hoch aufgelösten Satellitenbilder selbst in unseren Breitengraden sehr beschränkt ist. Dies hat sowohl mit der relativ häufigen Bedeckung mit Wolken als auch mit der nur 3-4tägigen Wiederholrate zu tun. Aus diesen Gründen konnte in den zwei Versuchsjahren nur jeweils ein *QuickBird*-Bild erworben werden. Um trotzdem eine Zeitreihe von Bildern aus einer Vegetationsperiode zu erhalten, wurden im Jahr 2003 zusätzlich Luftbilder aufgenommen.

Die im Versuch erzeugten Unterschiede in Vitalität und Biomasse – ausgelöst durch die variable Fungizid- und N- Behandlung – traten im Verlauf der Vegetationsperiode 2002 deutlich hervor; im Jahr 2003 kam es aufgrund der trockenen Witterung nur zu geringem Krankheitsbefall.

Folgende Ergebnisse können zusammengefasst werden:

- Im Jahr 2002 konnten die gestressten Pflanzenbestände im Satellitenbild, sowohl in einzelnen Spektralkanälen, als auch in den berechneten Vegetationsindizes NDVI, NDVI_(grün), SAVI und WDVI, räumlich sehr gut

identifiziert werden. Eine Identifikation der durch Pilzkrankheiten gestressten Pflanzenbestände konnte in dem Satellitenbild aus dem Jahr 2003 nur tendenziell nachgewiesen werden, wohl aber war die Identifikation der durch N-Mangel gestressten Pflanzenbestände signifikant möglich.

- Eine räumliche wie auch spektrale Abgrenzung des biotischen von dem abiotischen Stressfaktor konnte sehr deutlich im Satellitenbild des Jahres 2002 gezeigt werden. Aufgrund des geringen Befalls mit Pathogenen war eine Abgrenzung der zwei Faktoren voneinander, im Satellitenbild aus dem Jahr 2003, nicht möglich.
- Auf die Möglichkeit der zeitlichen Differenzierung der beiden Faktoren weisen die Ergebnisse der Auswertung der aufgenommenen Zeitreihe von Luftbildern hin. Ab dem Zeitpunkt des verstärkten Auftretens von Pilzkrankheiten unterschieden sich die Parzellen mit den vier Faktorkombinationen in dem berechneten Vegetationsindex NDVI wesentlich stärker.
- Der Einfluss der Bestandesdichte auf die Reflexion kam nur bei großen Unterschieden in der Bestandesdichte zum Tragen und konnte auch nur am 28.05.2003 statistisch abgesichert werden. In einer rund zwei Wochen später erstellten Aufnahme konnten diese Unterschiede nicht mehr statistisch nachgewiesen werden.
- Die Ableitung von Managementkarten konnte räumlich sehr gut, anhand des aus dem Satellitenbild berechneten NDVI-Bildes aufgezeigt werden. Wäre in denen als „Zonen mit voraussichtlich hohem Ertragsrisiko“ klassifizierten Flächen eine Pflanzenschutzmaßnahme erfolgt, hätte der Anteil der Flächen mit geringem Ertrag von 47% auf nur noch 7,5% abgenommen.
- Die Analyse der Anzahl und Verteilung der Boniturstellen innerhalb der Versuchsfläche ergab Ergebnisse, die in die Planung zukünftiger Versuchsanstellungen mit einfließen sollte. Denn es zeigte sich, dass es sinnvoll ist nur an wenigen markanten Stellen im Feld eine sehr gründliche Bonitur durchzuführen, anstatt an vielen Boniturstellen „oberflächlich“ zu bonitieren. Die Auswahl dieser „markanten“ Stellen im Feld könnte anhand von Bodenkarten oder Ertragskarten aus den Vorjahren geschehen.

Obgleich in den Versuchsjahren 2002 und 2003 nur jeweils eine auswertbare Satellitenszene zur Verfügung stand, darf davon ausgegangen werden, dass es mit

den Aufnahmen zum ersten Mal gelungen ist, im Feldversuch durch unterschiedliche Stickstoffdüngung und Fungizidbehandlung erzeugte Vitalitätsunterschiede eines Getreidebestandes in hoher räumlicher und spektraler Präzision parzellenscharf in einem Satellitenbild aufzunehmen. Mit neuen Satellitensystemen wie z.B. *RapidEye*, sollte eines der Hauptprobleme in der Anwendung von sehr hochauflösenden Satellitenbildern im Präzisionspflanzenbau, der zu geringen Wiederholraten, gelöst werden. Dann stünden idealerweise in regelmäßigen Abständen räumlich sehr hoch aufgelöste Bilddaten zur Verfügung, die bei der Entscheidungsfindung in landwirtschaftlichen Managementstrategien wichtige, teilflächenspezifische Informationen über den Pflanzenbestand liefern können.

7 Literaturverzeichnis

- Adams, M.L., Philpot, W.D. und Norvell, W.A. (1999). Yellowness index: an application of spectral second derivatives to estimate chlorosis of leaves in stressed vegetation. *International Journal of Remote Sensing* **20** (18): 3663-3675.
- Adamsen, F.J., Pinter, P.J., Jr., Barnes, E.M., LaMorte, R.L., Wall, G.W., Leavitt, S.W. und Kimball, B.A. (1999). Measuring wheat senescence with a digital camera. *Crop Science* **39** (3): 719-724.
- Ahlich, J.S. und Bauer, M.E. (1983). Relation of agronomic and multispectral reflectance characteristics of spring wheat canopies. *Agronomy Journal* **75**, 987-992.
- Ahmad, I. S., Reid, J F., Noguchi, N., Hansen, A. C. (1999). Nitrogen sensing for Precision Agriculture using chlorophyll maps. In: ASAE/CSAE-SCGR Annual International Meeting, Canada. Paper No. 993035.
- Al-Abbas, A.H., Barr, R., Hall, J.D., Crane, F.L. und Baumgardner, M.F. (1974). Spectra of normal and nutrient deficient maize leaves. *Agronomy Journal* **66**, 16-20.
- Albertz, J. (2001). Einführung in die Fernerkundung: Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitendaten. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt: 249 S..
- Alderfasi, A.A. und Nielsen, D.C. (2001). Use of crop water stress index for monitoring water status and scheduling irrigation in wheat. *Agricultural Water Management* **47** (1): 69-75.
- Andréfouët, S., Kramer, P., Torres-Pulliza, D., Joyce, K.E., Hochberg, E.J., Graza-Perez, R., Mumby, P.J., Riegl, B., Yamano, H., White, W.H., Zubia, M., Brock, J.C., Phinn, S.R., Naseer, A., Hatcher, B.G. und Muller-Karger, F.E. (2003). Multi-sites evaluation of *IKONOS* data for classification of tropical coral reef environment. *Remote Sensing of Environment* **88**: 127-142.
- Asrar, G., Fuchs, M., Kanemasu, E.T. und Hatfield, J.L. (1984). Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agronomy Journal* **76**: 300-306.
- Atzberger, C. (1998). Estimates of winter wheat production through remote sensing and crop growth modeling: a case study on the Carmargue region. Verlag für Wissenschaft und Forschung (VWF), Berlin: 261 S..
- Atzberger, C. (2003). Möglichkeiten und Grenzen der fernerkundlichen Bestimmung biophysikalischer Vegetationsparameter mittels physikalisch basierter Reflexionsmodelle. *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* **1**: 51-61.

- Baret, F., Guyot, G. und Major, D.J. (1989). TSAVI: a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. Proceedings of the IGRASS 12th Canadian Symposium on Remote Sensing **3**: 1355-1358.
- Baret, F. und Guyot, G. (1991). Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. Remote Sensing of Environment **35**: 161-173.
- Baret, F., Weiss, M., Troufleu, D., Prevot, L. und Combal, B. (2000). Maximum information exploitation for canopy characterisation by remote sensing. Aspects of Applied Biology **60**: 71-82.
- Barnes, E.M., Sudduth, K.A., Hummel, J.W., Lesch, S.M., Corwin, D.L., Yang, C., Daughtry, C.S.T. und Bausch, W.C. (2003). Remote- and ground-based sensor techniques to map soil properties. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing **69** (6): 619-630.
- Basnyat, P., McConkey, B., Lafond, G. P., Moulin, A., Pelcat, Y. (2004). Optimal time for remote sensing to relate to crop grain yield on the Canadian prairies. Canadian Journal of Plant Science **84**: 97-103.
- Bausch, W.C. und Duke, H.R. (1996). Remote sensing of plant nitrogen status in corn. Transactions of the ASAE **39** (5): 1869-1875.
- Bawden, F.C. (1933). Infrared photography and plant virus detection. Nature **132**: 168.
- Bill, R., Wagner, U. und Werner, A. (2002). Vorwort in Precision Agriculture – Herausforderung an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis. KTBL, Darmstadt: 522 S..
- Bjerre, K.D. (1999). Disease maps and site-specific fungicide application in winter wheat. In: Proceedings of the 2nd European Conference on Precision Agriculture, Dänemark: 495-504.
- Bjerre, K.D. und Secher, B.J.M. (1998). Field experience with sitespecific application of fungicides to winter wheat. The 1998 Brighton Conference – Pests & Diseases: 987-992.
- Blakeman, R.H. (2002). The use of near real time satellite imagery as an aid to crop management. Programme book: Application of Remote Sensing in Agriculture, 15 January 2002. SCI Agriculture and Environment Group, London.
- BMVEL (2004). Durchführung der Kontrolle durch Fernerkundung in Deutschland im Jahr 2005. Herausgeber: Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft, Referat 617: 18 S..
- Booltink, H.W.G. and Verhagen, J. (1997): Integration of remote sensing, modeling and field measurements towards an operational decision support system for precision agriculture. Precision Agriculture '97, Volume II: Technology, IT and Management. SCI Scientific Publishers: 921 – 929.

- Bravo, C., Moshou, D., West, J., McCartney, A. und Ramon, H. (2003). Early disease detection in wheat fields using spectral reflectance. *Biosystems Engineering* **84** (2): 137-145.
- BSA (Bundessortenamt) (2000). Beschreibende Sortenliste 2000: Getreide, Mais, Ölfrüchte, Leguminosen, Hackfrüchte. Landbuch Verlag, Hannover: 256 S..
- Büker, C. und Kühbauch, W. (1991). Ein Parameter zur Bestimmung der Vitalität von Winterweizen – die Verschiebung des Rot-Infrarot-Anstiegs im Reflexionsspektrum. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften* **4**: 319-322.
- Choudhury, B.J. (1987). Relationship between vegetation indices, radiation absorption and net photosynthesis evaluated by a sensitivity analysis. *Remote Sensing of Environment* **22**: 209-233.
- Cibula, W.G. und Carter, G.A. (1992). Identification of a far-red reflectance response to ectomycorrhizae in slash pine. *International Journal of Remote Sensing* **13**: 925-932.
- Clarke, T.R. (1997). An empirical approach for detecting crop water stress using multispectral airborne sensors. *Hortechonology* **7** (1): 9-16.
- Clevers, J.G.P.W. (1988). The derivation of a simplified reflectance model for the estimation of leaf area index. *Remote Sensing of Environment* **25**: 53-69.
- Clevers J.G.P.W. (1989). The application of a weighted infrared-red vegetation index for estimating leaf area index by correcting for soil moisture. *Remote Sensing of Environment* **29**: 25-37.
- Colwell, R.N. (1956). Determining the prevalence of certain cereal crop diseases by means of aerial photography. *Hilgardia* **26**: 223-286.
- Cook, C.G., Escobar, D.E., Everitt, J.H., Cavazos, I., Robinson, A.F. und Davis, M.R. (1999). Utilizing airborne video imagery in kenaf management and production. *Industrial Crops and Products* **9**: 205-210.
- De Koeijer, K.J., Steven, M.D., Colls, J.J. (2000). Integration of earth observation data with a crop model for yield forecasting. *Aspects of Applied Biology* **20**: 91-98.
- Dial, G., Bowen, H., Gerlach, F., Grodecki, J., Oleszczuk, R. (2003). *IKONOS* satellite, imagery, and products. *Remote Sensing of Environment* **88**: 23-36.
- Dicke, D., Fries, A. und Gerhards, R. (2004). Ermittlung von Schadschwellen für die teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung im Braugerstenanbau. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz. Sonderheft* **XIX**: 413-421.
- DLG (2001). Ertragsermittlung im Mähdrescher – Ertragsmessgeräte für die lokale Ertragsermittlung. DLG Merkblatt 303. Herausgeber: Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft. Bearbeiter: Demmel, M.: 20 S..

- Dockter, K., Schellberg, J., Kühbauch, W., Rüsten, C. von, Tempelmann, U. und Kupfer, G. (1988). Spectral reflectance of sugar beet and winter wheat canopies in the visible and infrared during growth. Proceedings of the 4th International Colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, Aussois, France, 18-22 January 1988: 211-216.
- Dohmen, B. (2004). Digitale Infrarotluftbilder (NIR). In: Precision Farming – Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis. Hrsg.: Hufnagel, J., Herbst, R., Jarfe, A. und Werner, A. Darmstadt, KTBL-Schrift **419**.
- Eklundh, L. (1996). AVHRR NDVI for monitoring and mapping of vegetation and drought in East African environments. Lund University Press, Lund, 187 S..
- Ehlert, D. und Dammer, K.H. (2002). Herbizide, Fungizide und Wachstumsregler. In: Precision Agriculture – Herausforderungen an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis. Precision Agriculture Tage, Bonn. KTBL: 275-292.
- Eiden, G., Dreiser, C., Gesell, G. und König, T. (1991). Large scale monitoring of rangeland vegetation using NOAA/11 AVHRR LAC data. Range Management Handbook of Kenya, 3/4, Nairobi, Oberpfaffenhofen.
- Elvidge, C.D. und Lyon, R.J.P. (1985). Influence of rock-soil spectral variation on assessment of green biomass. Remote Sensing of Environment **17**: 265-279.
- Everitt, J.H., Escobar, D.E., Villarreal, R., Noriega, J.R. und Davis, M.R. (1991). Airborne video systems for agricultural assessment. Remote Sensing of Environment **35** (2-3): 231-242.
- Gausman, H.W. (1974). Leaf reflectance of near-infrared. Photogrammetric Engineering **40**: 183-191.
- Gerhards, R. und Christensen, S. (2003). Real-time weed detection, decision making and patch spraying in maize, sugarbeet, winter wheat and winter barley. Weed Research **43**: 385-392.
- Giglio, L., Kendall, J.D. und Tucker, C.J. (2000). Remote sensing of fires with the TRMM VIRS. International Journal of Remote Sensing **1**: 203-207.
- Gitelson, A.A. und Merzlyak, M.N. (1997). Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. International Journal of Remote Sensing **18** (12): 2691-2697.
- Grenzdörffer, G. (2004). Hochgenaue digitale Luftbilder. In: Precision Farming – Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis. Hrsg.: Hufnagel, J., Herbst, R., Jarfe, A. und Werner, A. Darmstadt, KTBL-Schrift **419**.
- Gutman, G. (1989). On the relationship between monthly mean and maximum-value composite normalized vegetation indices. International Journal of Remote Sensing, **10**: 1317-1325.
- Guyot, G. (1989). Signatures spectrales des surfaces naturelles. Paradigme, Caen, Frankreich: 178 S..

- Guyot, G., Gugon, D. und Riou, J. (1989). Factors affecting the spectral response of forest canopies: A review. *Geocarto International* **3**: 43-60.
- Habermeyer, J. und Gerhard, M. (2000). Pilzkrankheiten. BASF Landwirtschaft: 128 S..
- Hatfield, J.L., Vauclin, M., Vieira, S.R. und Bernard, R. (1984). Surface temperature variability patterns within irrigated fields. *Agricultural Water Management* **8**: 429-437.
- Hatfield, J.L., Pinter, P.J. (1993). Remote sensing for crop protection. *Crop Protection* **12** (6): 403-413.
- Henneberry, T.J., Hart, W.G., Bariola, L.A., Kittock, D.L., Arle, H.F., Davis, M.R. und Ingle, S.J. (1979). Parameters of cotton cultivation from infrared aerial photography. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **45**: 1129-1133.
- Hildebrandt, G. (1987). 100 Jahre forstliche Luftbildaufnahme – zwei Dokumente aus den Anfängen der forstlichen Luftbildinterpretation. *Bildmessung und Luftbildwesen* **55**: 221-224.
- Hildebrandt, G. (1996). Fernerkundung und Luftbildmessung: für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie. Wichmann, Heidelberg: 676 S..
- Holben, B.N. (1986). Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing* **7**: 1417-1434.
- Holben, B.N., Kimes, D.S. und Fraser, R.S. (1986). Directional reflectance in AVHRR red and Near-IR bands for three cover types and varying atmospheric conditions. *Remote Sensing of Environment* **19**: 213-236.
- Holmes, S.J.I. und Colhoun, J. (1974). Infection of wheat by *Septoria nodorum* and *S. tritici* in relation to plant age, air temperature and relative humidity. *Transaction of the British Mycological Society* **63**: 329-338.
- Huete, A.R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* **25**: 295-309.
- Hurt, G., Xiao, X., Keller, M., Palace, M., Asner, G.P., Braswell, R., Brondizio, E.S., Cardoso, M., Carvalho, C.J.R., Fearon, M.G., Guild, L., Hagen, S., Hetrick, S., Moore III, B., Nobre, C., Read, J.M., Sa, T., Schloss, A., Vourlitis, G. und Wickel, A.J. (2003). *IKONOS* imagery for the Large Scale Biosphere-Atmosphere experiment in Amazonia (LBA). *Remote Sensing of Environment* **88**: 111-127.
- Idso, S.B., Pinter, P.J., Jr., Jackson, R.D. und Reginato, R.J. (1980). Estimation of grain yields by remote-sensing of crop senescence rates. *Remote Sensing of Environment* **9** (1): 87-91.
- Isensee, E. und Krippahl, S. (2001). Online-Vergleich von Ertragsmesssystemen im Mähdrescher. *Landtechnik* **4**: 274-275.

- Jackson, R.D. (1983). Spectral indexes in N-space. *Remote Sensing of Environment* **13** (5): 409-421.
- Jackson, R.D. (1986). Remote sensing of biotic and abiotic plant stress. *Annual Review of Phytopathology* **24**: 265-287.
- Jackson, R.D. und Ezra, C.E. (1985). Spectral response of cotton to suddenly induced water stress. *International Journal of Remote Sensing* **6**: 177-187.
- Jackson, R.D., Jones, C.A., Uehara, G. und Santo, L.T. (1981). Remote detection of nutrient and water deficiencies in sugarcane under variable cloudiness. *Remote Sensing of Environment* **11**: 327-331.
- Jackson, R.D. und Pinter, P.J. (1986). Spectral response of architecturally different wheat canopies. *Remote Sensing of Environment* **20**: 43-56.
- Jackson, R.D. und Huete, A.R. (1991). Interpreting vegetation indexes. *Preventive Veterinary Medicine* **11** (3-4): 185-200.
- Jensen, J.R. (2000). *Remote sensing of the environment: an earth resource perspective*. Prentice-Hall, USA: 544 S..
- Johnson, D.A., Alldredge, J.R., Hamm, P.B. und Frazier B.E. (2003). Aerial photography used for spatial pattern analysis of late blight infection in irrigated potato circles. *Epidemiology* **93**: 805-812.
- Jürgens, C. (2000). Fernerkundungsanwendungen im Precision Farming. *Petermanns Geographische Mitteilungen* **144**: 60-69.
- Kalliany, R. (1998). Fernerkundungsdaten – Technische Entwicklungen und ihre Relevanz für den Anwender. *Umweltmonitoring und Umweltmodellierung – Grundlagen einer nachhaltigen Entwicklung. Fachtagung und Intensivworkshop am 2. Juli 1998, Salzburg*: 57-62.
- Kappas, M. (1994). *Fernerkundung nah gebracht. Leitfaden für Geowissenschaftler*. Dümmler Verlag, Bonn. ISBN: 3-427-78711-7: 207 S..
- Kimball, B.A., LaMorte, R.L., Pinter, P.J., Jr, Wall, G.W., Hunsaker, D.J., Adamsen, F.J., Leavitt, S.W., Thompson, T.L., Matthias, A.D. und Brooks, T.J. (1999). Free-air CO₂ enrichment and soil nitrogen effects on energy balance and evapotranspiration of wheat. *Water Resources Research* **35** (4): 1179-1190.
- King, J.E., Cook, R.J. und Melville, S.C. (1983). A review of Septoria diseases of wheat and barley. *Annals of Applied Biology* **103**: 345-373.
- Kleusberg, A., Klaedtke, H.G., Mayer-Föll, R., Stauss, U., Müller, M. und Schleyer, A. (2002). Satellitenbilddaten bei der Erfassung von Landschaftselementen und Nutzungsstrukturen auf der Basis von X- und L-Band SAR-Daten (ERLEN) – Erfahrungen in der Landesverwaltung Baden-Württemberg und aktuelle Projektergebnisse im Rahmen von ProSmart II. Workshop "Satellitenfern-erkundung" am 18.04.2002 in Magdeburg. Einzusehen unter (Stand: 05.03.2005): <http://www.blak-uis.de/servlet/is/Entry.425.Display/>

- Knipling, E.B. (1970). Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment* **1**: 155-159.
- Kühbauch, W. (1991a). Anwendung der Radarfernerkundung in der Landwirtschaft. *Die Geowissenschaften* **4-5**: 122-127.
- Kühbauch, W. (1991b). Artenerkennung und Zustandsbeschreibung landwirtschaftlicher Nutzpflanzenbestände mit Fernerkundung. In: Kühbauch W. und Dockter K. (Hrsg.): *Berichte der Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft (GIL)* **1**: 1-16.
- Kühbauch, W. (2002). Fernerkundung – eine Zukunftstechnologie im Präzisionspflanzenbau. In: *Precision Agriculture – Herausforderungen an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis*. Tagungsband: Precision Agriculture Tage, 13.-15. März in Bonn. KTBL: 79-87.
- Kühbauch, W. und Hawlitschka, S. (2003). Remote sensing – a future technology in Precision Farming. *Proceedings of the Workshop on Application of SAR Polarimetry and Polarimetric Interferometry, POLinSAR 2003, Frascati, Italien*. <http://earth.esa.int/workshops/polinsar2003/pr.html> (Stand: 01.07.2005)
- Kurschner, E., Walter, H., Koch, W. (1980). Measurements of spectral reflectance of leaves as a method for assessing the infestation with powdery mildew. *Journal of Plant Diseases and Protection* **91**: 71-80.
- Lamb, D.W. (2000). The use of qualitative airborne multispectral imaging for managing agricultural crops – a case study in south-eastern Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture* **40**: 725-738.
- Last, F.T. (1963). Metabolism of barley leaves inoculated with *Erysiphe graminis* merat. *Annals of Botany* **27**: 685-690.
- Laudien, R., Bareth, G. und Doluschitz, R. (2004). Comparison of remote sensing based analysis of crop diseases by using high resolution multispectral and hyperspectral data – case study: *rhizoctonia solani* in sugar beet –. In: *Proceedings of the 12th International Conference on Geoinformatics – Geospatial Information Research: Bridging the Pacific and Atlantic*, University of Gävle, Sweden, 7-9 June 2004: 670-676.
- Leon, C.T., Shaw, D.R., Cox, M.S., Abshire, M.J., Ward, B., Wardlaw III, M.C. and Watson, C. (2003). Utility of remote sensing in predicting crop and soil characteristics. *Precision Agriculture* **4**: 359-384.
- Lillesand, T.M. und Kiefer, R.W. (1994). *Remote sensing and image interpretation – 3rd ed.* John Wiley & Sons, Inc., New York: 750 S..
- Lock, R. (2003). Persönliche Mitteilung.
- Lock, R., Rademacher, T., Nonn, H. und Kühbauch, W. (2004). Methods of digital image processing to quantify ground cover of turf grass. *Grassland Science in Europe* **9**: 790-792.

- Lorenzen, B. and Jensen, A. (1989). Changes in leaf spectral properties induced in barley by cereal powdery mildew. *Remote Sensing of Environment* **27**: 201-209.
- Masoni, A., Laura, E. und Mariotti, M. (1996). Spectral properties of leaves deficient in iron, sulphur, magnesium und manganese. *Agronomy Journal* **88** (6): 937-943.
- Manzer, F.E. und Cooper, G.R. (1967). Aerial photographic methods of potato disease detection. *Maine Agricultural Experiment Station Bulletin* **646**: 1-14.
- Masuoka, P.M., Claborn, D.M., Andre, R.G., Nigro, J., Gordon, S.W., Klein, T.A. und Kim, H. (2003). Use of *IKONOS* and Landsat for malaria control in the Republic of Korea. *Remote Sensing of Environment* **88**: 186-193.
- Mather, P.M. (1999). *Computer Processing of Remotely-Sensed Images – An Introduction*. Wiley & Sons LTD, England: 292 S..
- McCartney, H.A. und Fitt, B.D.L. (1998). Dispersal of foliar fungal plant pathogens: mechanisms, gradients and spatial patterns. In: *The Epidemiology of Plant Diseases*. Ed.: Jones, G.D. Kluwer Publishers, Dordrecht: 138-160.
- Metternicht, G. (2002). Vegetation indices derived from high-resolution airborne videography for precision crop management. *International Journal of Remote Sensing* **24** (14): 2855-2877.
- Nilsson, H.E. (1984). Remote sensing of plant stress and disease. *Proceedings of EARSeL/ESA Symposium: Integrative Approaches in Remote Sensing*. Guildford, UK: 115-125.
- Nilsson, H.E. (1991). Hand-held radiometry and IR-thermography of plant diseases in field plot experiments. *International Journal of Remote Sensing* **12** (3): 545-557.
- Nilsson, H.E. (1995). Remote sensing and image analysis in plant pathology. *Canadian Journal of Plant Pathology* **17**: 154-166.
- Nicolas H.E. (2004). Using remote sensing to determine of the date of a fungicide application on winter wheat. *Crop Protection* **23** (9): 853-863.
- Nonn, H., Rademacher, I., Lock, R. und Kühbauch, W. (2004). Kameratechnische Analyse der Narbendichte bzw. Lückigkeit von Rasenflächen. *Rasen, Turf, Gazon* **1**: 11-12.
- Parker, S.R., Shaw, M.W. und Royle, D.J. (1997). Measurements of spatial patterns of disease in winter wheat crops and the implications for sampling. *Plant Pathology* **46**: 470-480.
- Paveley, N.D., Lockley, K.D., Sylvester-Bradley, R. und Thomas, J. (1997). Determinants of fungicide spray decisions for wheat. *Pesticide Science* **49**: 379-388.
- Philpotts, L.E. und Wallen, V.R. (1969). IR color for crop disease identification. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **40**: 87-94.

- Phinney, D.E., Stuff, R.G., Houston, A.G., Hsu, E.M. und Trenchard, M.H. (1979). Accuracy and performance of LACIE yield estimates in major wheat producing regions of the world. Proceedings of Technical Sessions, the LACIE Symposium, **1**, July, NASA Johnson Space Centre, Houston, TX: 575-588.
- Pinter, P.J., Jr. (1986). The effect of dew on canopy reflectance. Remote sensing of Environment **19**: 187-205.
- Pinter, P.J., Jr, Hatfield, J.L., Schepers, J.S., Barnes, E.M., Moran, M.S., Daughtry, C.S.T. und Upchurch, D.R. (2003). Remote Sensing for Crop Management. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing **69** (6): 647-664.
- Polischuk, V.P., Shadchina, T.M., Kompanetz, T.I., Budzanivskaya, I.G. und Sozinov, A.A. (1997). Changes in reflectance spectrum characteristic of Nicotiana debneyi plant under the influence of viral infection. Archives of Phytopathology and Plant Protection **31** (1): 115-119.
- Price, J.C. (1994). How unique are spectral signatures? Remote Sensing of Environment **49**: 181-186.
- ProSmart Endbericht (1999). Demonstrationsbeispiele für innovative Geo-Informationsprodukte im Rahmen der Smart Initiative als Grundlage für InfoTerra/TerraSar. Autor: H. Ricken.
- Puyou-Lascassies, Ph., Podaire, A. und Gay, M. (1994). Extracting crop radiometric responses from simulated low and high spatial resolution satellite data using linear mixing model. International Journal of Remote Sensing **15** (18): 3767-3784.
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R., Kerr, Y.H. und Sorooshian, S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index. Remote Sensing of Environment **48**: 119-126.
- Ranson, K.J., Daughtry, C.S.T., Biehl, L.L. und Bauer, M.E. (1985). Sun-view angle effects on reflectance factors of corn canopies. Remote Sensing of Environment **18**: 147-161.
- Reusch, S. (2001). Effect of viewing geometry on canopy reflectance – practical problems and their solution. In: Proceedings of the International Workshop on Spectroscopy Application in Precision Farming. 16.-18. Januar 2001, Freising, Weihenstephan 64/67.
- Richardson, A.J. und Wiegand, C.L. (1977). Distinguishing vegetation from soil background information. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing **43** (2): 1541-1552.
- Richardson, A.J., Menges, R.M. und Nixon, P.R. (1985). Distinguishing weed from crop plants using video remote-sensing. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing **51** (11): 1785-1790.
- Roelfs, A.P. (1972). Gradients in horizontal dispersal of cereal rust uredospores. Phytopathology **62**: 70-76.

- Rouse, J.W. Jr., Haas, R.H., Schell, J.A. and Deering, D.W. (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: Proceedings of the 3rd ERTS Symposium, NASA SP-351 **1**: 309-317.
- Sawaya, K., Olmanson, L., Heinert, N., Brezonik, P. und Bauer, M. (2003). Extending satellite remote sensing to local scales: Land and water resource monitoring using high-resolution imagery. *Remote Sensing of Environment* **88**: 143-155.
- Schellberg, J. und Kühbauch, W. (1990). Zustandsbeschreibung von Weizenbeständen durch Fernerkundung. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaft* **3**: 205-208.
- Schellberg, J und Kühbauch, W. (1991). Reflexionsmessungen von Weizenbeständen zum Zwecke der fernerkundlichen Zustandsbeschreibung und Ertragsschätzung. *Berichte der Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst-, und Ernährungswirtschaft (GIL)*. Band 1: Fernerkundung in der Land- und Forstwirtschaft, Herausgeber: Kühbauch, W. und Dockter, K.: 61-69.
- Schelling, K., Weissteiner, C., Hünting, K., Kühbauch, W. (2003). Yield and quality estimation of malting barley based on remote sensing and GIS. Benes, T.: *Geoinformation for European-wide Integration – Proceedings of 22nd EARSeL Symposium 2002*, Prague, Czech Republic.
- Schiewe, J. und Ehlers, M. (2004). Semantisches Potential digitaler flugzeuggetragener Fernerkundungssensoren. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation* **6**: 463-474.
- Schneider, T und Manakos, I. (2000). Anisotropie der Rückstrahlung – Störfaktor oder Informationsquelle? Erörterung anhand des Beispiels „precision farming“. *Berichte der GIL*, **13**: 187-190.
- Schowengerdt, R.A. (1997). *Remote sensing, models and methods for image processing – 2nd ed.* Academic Press Limited, London, UK: 522 S..
- Secher, B.J.M., Bjerre K.D., Seierø, M. (2000). Site specific control of pest and diseases – a challenge and an opportunity. *Proc. The BCPC Conference – Pest & Diseases 2000*. Brighton, UK.
- Seelan, S.K., Laguette, S., Casady, G.M. und Seielstad, G.A. (2003). Remote sensing applications for precision agriculture: a learning community approach. *Remote Sensing of Environment* **88**: 157-169.
- Selige, T. (2004). Multispektralanalyse von Fernerkundungsaufnahmen. In: *Precision Farming – Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis*. Hrsg.: Hufnagel, J., Herbst, R., Jarfe, A. und Werner, A. Darmstadt, KTBL-Schrift **419**.
- Shaner, G. und Finney, R.E. (1976). Weather and epidemics of Septoria leaf blotch of wheat. *Phytopathology* **67**: 1051-1056.
- Sharp, E.L., Perry, C.R., Scharen, A.L., Boatwright, G.O. und Sands, D.C. (1985). Monitoring cereal rust development with a spectral radiometer. *Phytopathology* **75**: 935-939.

- Slaton, M.R., Hunt, E.R. und Smith, W.K. (2001). Estimating near-infrared leaf reflectance from leaf structural characteristics. *American Journal of Botany* **88** (2): 278-284.
- Steddom, K., Heidel, G., Jones, D., und Rush, C. M. (2003). Remote detection of rhizomania in sugar beets. *Phytopathology* **93**:720-726.
- Suits, G.H. (1972). The calculation of the directional reflectance of a vegetative canopy. *Remote Sensing of Environment* **2**: 117-125.
- Taubenhous, J.J., Ezekiel, W.N. und Neblette, C.B. (1929). Airplane photography in the study of cotton root rot. *Phytopathology* **19**: 1025-1029.
- Taylor, C., Sannier, C., Delincé, J. und Gallego, F.J. (1997). Regional crop inventories in Europe assisted by remote sensing: 1988-1993. Synthesis report of the MARS Project-Action 1. JRC Technical report EUR 17319, European Commission, Italy: 71 S..
- Thamm, B. (1987). Ermittlung standortbedingter Bestandesdifferenzierungen mittels Falschfarben-Luftbildern. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau, Bodenkunde* **31** (3): 187-195.
- Toler, R.W., Smith, B.D. und Harlan, J.C. (1981). Use of aerial color infrared to evaluate crop disease. *Plant Disease* **65**: 24-31.
- Tucker, C.J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* **8**: 127-150.
- Tucker, C.J. und Garratt, M.W. (1977). Leaf optical system modelled as a stochastic process. *Applied Optics* **16** (3): 635-642.
- Tucker, C.J. und Townshend, J.R.G. (2000). Strategies for monitoring tropical deforestation using satellite data. *International Journal of Remote Sensing* **21** (6 & 7): 1461-1471.
- van der Sande, C.J., de Jong, S.M. und Roo, A.P.J. (2003). A segmentation and classification approach of *IKONOS-2* imagery for land cover mapping to assist flood risk and flood damage assessment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **4**: 217-229.
- Walburg, G., Bauer, M.E., Daughtry, C.S.T. und Housley, T.L. (1982). Effects of nitrogen nutrition on the growth, yield and reflectance characteristics of corn canopies. *Agronomy Journal* **74**: 677-683.
- Weissteiner, C.J. und Kühbauch, W. (2005). Regional yield forecasts by NOAA-AVHRR. *Journal of Agronomy and Crop Science* **191** (4): (in press).
- Welsh, J.P., Wood, G.A., Godwin, R.J., Taylor, J.C., Earl, R., Blackmore, S. und Knight, S.M. (2003). Developing strategies for spatially variable nitrogen application in cereals, part II: wheat. *Biosystems Engineering* **84** (4): 495-511.

- West, J.S., Bravo, C., Oberti, R., Lemaire, D., Moshou, D. and McCartney, H.A. (2003). The potential of optical canopy measurement for targeted control of field crop diseases. *Annual Review of Phytopathology* **41**: 593-614.
- Wiegand, C.L., Richardson, D.E., Escobar, D.E. und Gerbermann, A.H. (1991). Vegetation indices in crop assessments. *Remote Sensing of Environment* **35**: 105-119.
- Wood, C.W., Reeves, D.W. und Himelrick, D.G. (1993). Relationships between chlorophyll meter readings and leaf chlorophyll concentration, N status, and crop yield: A review. In: *Proceedings of the Agronomy Society of New Zealand* **23**:1-9.

8 Anhang

8.1 Verzeichnis der Anhangsabbildungen

A-Abb. 8.1	<i>QuickBird</i> -Satellitenbild vom 25.06.2002 über der Region Wesseling/Bonn; multispektraler Modus in der Kanalkombination 4-2-1 (RGB) mit 2,8 m räumlicher Auflösung und einer Ausdehnung von 8 x 8 km ² ; In der Bildmitte liegt die Lehr- und Forschungsstation Dikopshof, oben rechts ist der Rhein und die weißen „Wattebäusche“ sind Wolken.	121
A-Abb. 8.2	<i>QuickBird</i> -Satellitenbild vom 25.06.2002 über der Region Wesseling/Bonn; panchromatischer Modus mit 0,7 m räumlicher Auflösung und einer Ausdehnung von 8 x 8 km ² ; In der Bildmitte liegt die Lehr- und Forschungsstation Dikopshof, oben rechts ist der Rhein und die weißen „Wattebäusche“ sind Wolken.....	122
A-Abb. 8.3	<i>QuickBird</i> -Satellitenbild vom 28.05.2003 über der Region Meckenheim; multispektraler Modus in der Kanalkombination 4-2-1 (RGB) mit 2,8 m räumlicher Auflösung und einer Ausdehnung von 5 x 5 km ² . In der Bildmitte liegt die Lehr- und Forschungsstation Klein Altendorf, quer durch das Bild verläuft die A61.	123
A-Abb. 8.4	<i>QuickBird</i> -Satellitenbild vom 28.05.2003 über der Region Meckenheim; panchromatischer Modus mit 0,7 m räumlicher Auflösung und einer Ausdehnung von 5 x 5 km ² . In der Bildmitte liegt die Lehr- und Forschungsstation Klein Altendorf, quer durch das Bild verläuft die A61.	124
A-Abb. 8.5	Skizze des Versuchsaufbaus an der Lehr- und Forschungsstation Dikopshof im Jahr 2001/2002	125
A-Abb. 8.6	Skizze des Versuchsaufbaus an der Lehr- und Forschungsstation Dikopshof im Jahr 2002/2003.	126
A-Abb. 8.7	Skizze des Versuchsaufbaus an der Lehr- und Forschungsstation Klein Altendorf im Jahr 2002/2003.....	127
A-Abb. 8.8	N _{min} Verteilung im Jahr 2003 im Versuchsfeld in Klein Altendorf in den Bodenschichten von 0-30 cm, 30-60 cm und 60-90 cm. Zwischen den Boniturpunkten wurde interpoliert nach dem IDW.....	136

8.2 Verzeichnis der Anhangstabellen

A-Tab. 8.1	Min-, Max-, Mean-, Median- und Modewerte sowie Standardabweichung der von 12 Parzellen ermittelten „digital numbers“ (DN) des <i>QuickBird</i> -Bildes vom 25.06.2002 pan = panchromatische Aufnahme (450-900 nm); NIR = DN im Spektralbereich des NIR (760-900 nm); R = DN im Spektralbereich des Rot (630-690 nm); G = DN im Spektralbereich des Grün (520-600 nm); B = DN im Spektralbereich des Blau (450-520 nm); WDVI, NDVI, NDVI _(grün) und SAVI siehe Kapitel 2.2.2 auf Seite 19. ...	128
A-Tab. 8.2	Punktmessungen von Kornertrag 2002, % befallene Blattfläche mit Pilzkrankheiten am 31. 05. 2002 und NDVI aus dem Satellitenbild vom 25. 06. 2002 an den 120 Bonitурpunkten des Versuchs am Dikopshof	129
A-Tab. 8.3	Parzellenmessung von Kornertrag 2002, % befallene Blattfläche mit Pilzkrankheiten am 31.05. 2002 und NDVI aus dem Satellitenbild vom 25. 06. 2002 in den zwölf Versuchspartellen des Versuchs am Dikopshof	130
A-Tab. 8.4	Min-, Max-, Mean-, Median- und Modewerte sowie Standardabweichung der von 12 Parzellen ermittelten „digital numbers“ (DN) des Hubschrauberbildes vom 16.05.2003 NIR = DN im Spektralbereich des NIR (760-850 nm); R = DN im Spektralbereich des Rot (630-700 nm); G = DN im Spektralbereich des Grün (520-600 nm); WDVI, NDVI, NDVI _(grün) und SAVI siehe Kapitel 2.2.2 auf Seite 19. ...	131
A-Tab. 8.5	Min-, Max-, Mean-, Median- und Modewerte sowie Standardabweichung der von 12 Parzellen ermittelten „digital numbers“ (DN) des Hubschrauberbildes vom 27.05.2003 NIR = DN im Spektralbereich des NIR (760-850 nm); R = DN im Spektralbereich des Rot (630-700 nm); G = DN im Spektralbereich des Grün (520-600 nm); WDVI, NDVI, NDVI _(grün) und SAVI siehe Kapitel 2.2.2 auf Seite 19. ...	132
A-Tab. 8.6	Min-, Max-, Mean-, Median- und Modewerte sowie Standardabweichung der von 12 Parzellen ermittelten „digital numbers“ (DN) des Hubschrauberbildes vom 02.06.2003 NIR = DN im Spektralbereich des NIR (760-850 nm); R = DN im Spektralbereich des Rot (630-700 nm); G = DN im Spektralbereich des Grün (520-600 nm); WDVI, NDVI, NDVI _(grün) und SAVI siehe Kapitel 2.2.2 auf Seite 19. ...	133
A-Tab. 8.7	Min-, Max-, Mean-, Median- und Modewerte sowie Standardabweichung der von 12 Parzellen ermittelten „digital numbers“ (DN) des Hubschrauberbildes vom 13.06.2003 NIR = DN im Spektralbereich des NIR (760-850 nm); R = DN im Spektralbereich des Rot (630-700 nm); G = DN im Spektralbereich des Grün (520-600 nm); WDVI, NDVI, NDVI _(grün) und SAVI siehe Kapitel 2.2.2 auf Seite 19. ...	134

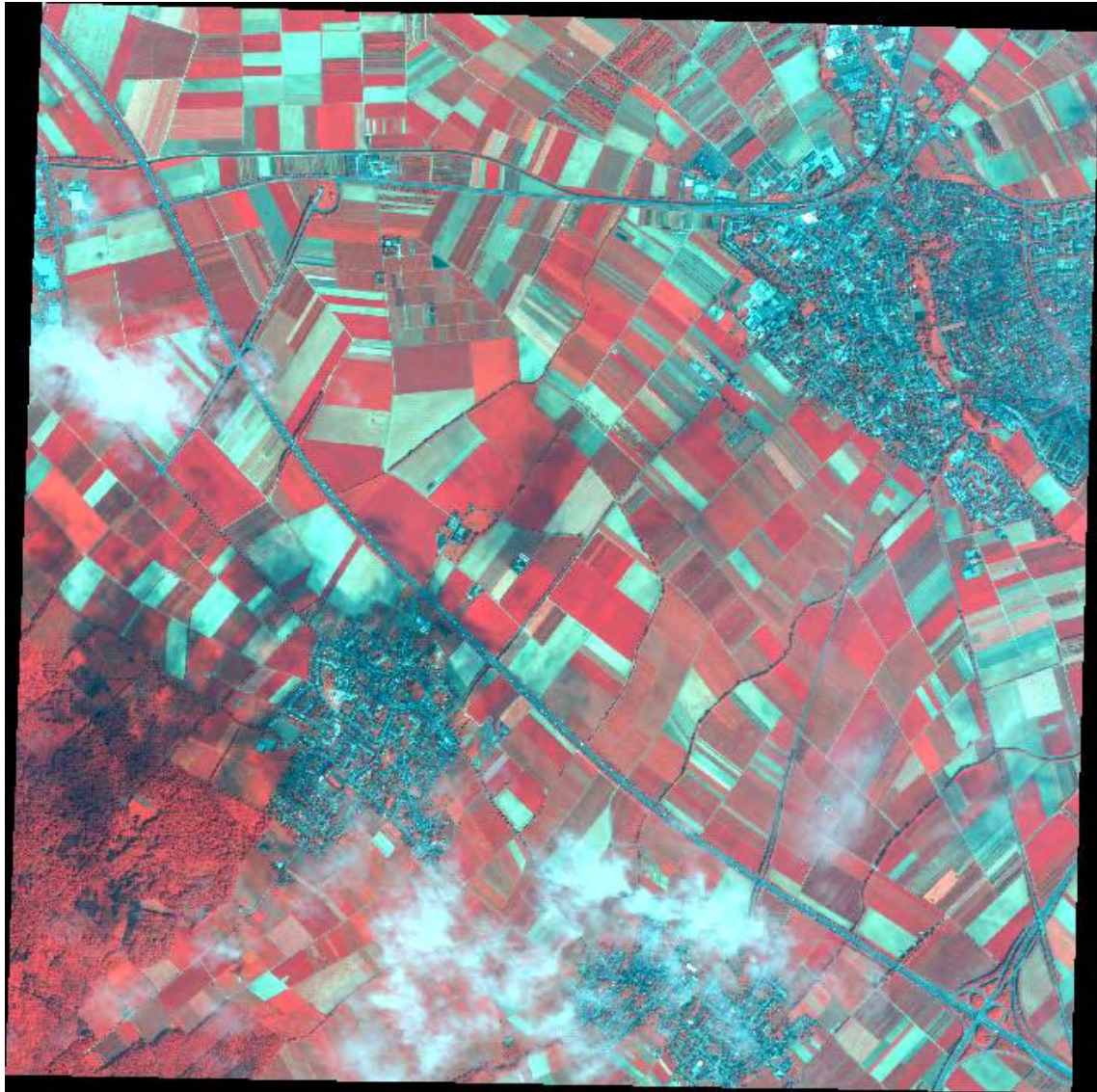
A-Tab. 8.8	Werte der Vegetationsindizes NDVI und NDVI(grün) in den vier Behandlungsvarianten zu den vier Hubschrauberüberflugterminen ..	135
A-Tab. 8.9	Wuchshöhe in cm der Winterweizensorte Novalis im Jahr 2003 an der Lehr- und Versuchsstation Klein Altendorf. Die Messungen am 23. Mai wurden von einer anderen Person erhoben und flossen nicht in die Auswertung mit ein, da ein Verkürzen der Wuchshöhe nicht möglich ist.....	135
A-Tab. 8.11	<i>QuickBird</i> Bild vom 28.05.2003: „digital numbers“ (DN) der vier spektralen Kanäle und des panchromatischen Bildes sowie NDVI-, NDVI _(grün) , SAVI, WDVI und SPAD-Werte in den vier Faktorvarianten der Sorte <i>Novalis</i> auf der Versuchsfläche in Klein Altendorf. Werte mit verschiedenen Buchstaben (a, b) innerhalb eines Parameters und eines Faktors (F, N) sind signifikant verschieden.....	138
A-Tab. 8.12	<i>QuickBird</i> -Bild vom 28.05.2003: „digital numbers“ (DN) der vier spektralen Kanäle und des panchromatischen Bildes sowie NDVI-, NDVI _(grün) , SAVI und WDVI in den einzelnen Parzellen der drei Saatstärken (a,b,c) und zwei Sorten (N,W) auf der Versuchsfläche in Klein Altendorf.	139
A-Tab. 8.13	Korrelation von NDVI und befallener Blattfläche am 31.05.: Veränderung von Bestimmtheitsmaß und Standardabweichung bei unterschiedlicher Anzahl von Boniturstellen je Parzelle	140
A-Tab. 8.14	Korrelation von NDVI und Kornertrag zur Ernte: Veränderung von Bestimmtheitsmaß und Standardabweichung bei unterschiedlicher Anzahl von Boniturstellen je Parzelle.	140
A-Tab. 8.15	Werte des NDVI am 25.06.2002 und Kornertrag 2002 unter Verwendung des Mittelwertes von zwei entfernt voneinander liegenden Messpunkten je Parzelle der Versuchsfläche am Dikopshof.	140
A-Tab. 8.16	Werte des NDVI am 25.06.2002 und Kornertrag 2002 unter Verwendung des Mittelwertes von zwei nah beieinander liegenden Messpunkten je Parzelle.	141
A-Tab. 8.17	Werte des NDVI am 25.06.2002 und Kornertrag 2002 unter Verwendung des Mittelwertes von zwei nah beieinander liegenden Messpunkten je Parzelle für den Kornertrag und des für die gesamte Parzelle gemittelten NDVI-Wertes.	141



A-Abb. 8.1 *QuickBird*-Satellitenbild vom 25. 06. 2002 über der Region Wesseling/Bonn; multispektraler Modus in der Kanalkombination 4-2-1 (RGB) mit 2,8 m räumlicher Auflösung und einer Ausdehnung von 8 x 8 km²; In der Bildmitte liegt die Lehr- und Forschungsstation Dikopshof, oben rechts ist der Rhein und die weißen „Wattebäusche“ sind Wolken.



A-Abb. 8.2 *QuickBird*-Satellitenbild vom 25.06. 2002 über der Region Wesseling/Bonn; panchromatischer Modus mit 0,7 m räumlicher Auflösung und einer Ausdehnung von 8 x 8 km²; In der Bildmitte liegt die Lehr- und Forschungsstation Dikopshof, oben rechts ist der Rhein und die weißen „Wattebäusche“ sind Wolken.

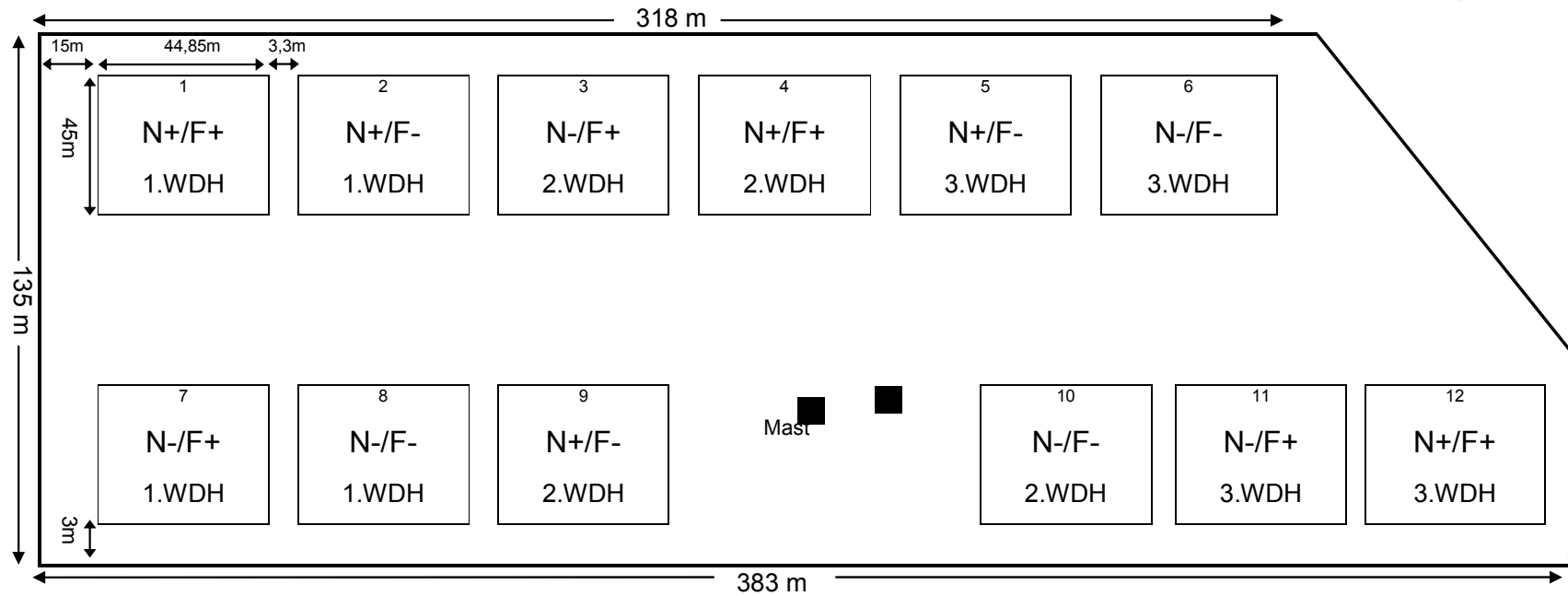


A-Abb. 8.3 QuickBird-Satellitenbild vom 28.05.2003 über der Region Meckenheim; multispektraler Modus in der Kanalkombination 4-2-1 (RGB) mit 2,8 m räumlicher Auflösung und einer Ausdehnung von $5 \times 5 \text{ km}^2$. In der Bildmitte liegt die Lehr- und Forschungsstation Klein Altendorf, quer durch das Bild verläuft die A61.



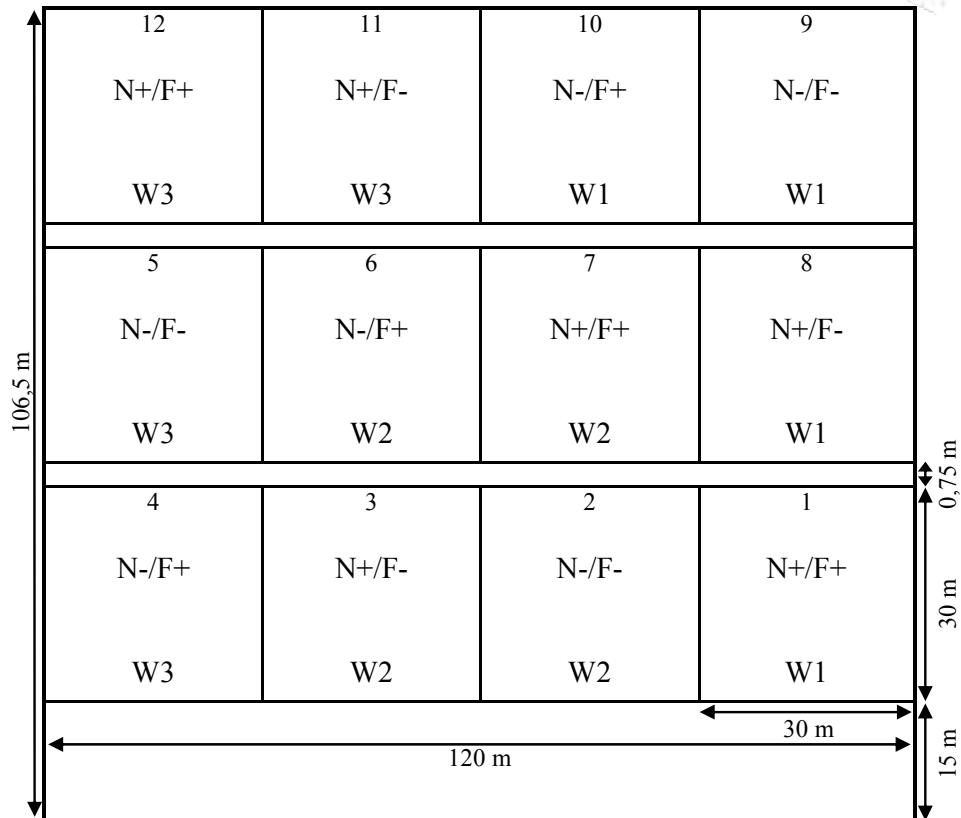
A-Abb. 8.4 *QuickBird*-Satellitenbild vom 28.05.2003 über der Region Meckenheim; panchromatischer Modus mit 0,7 m räumlicher Auflösung und einer Ausdehnung von 5 x 5 km². In der Bildmitte liegt die Lehr- und Forschungsstation Klein Altendorf, quer durch das Bild verläuft die A61.

Versuchsplan 2001/2002 Dikopshof Schlag VI (5,22 ha)



A-Abb. 8.5 Skizze des Versuchsaufbaus an der Lehr- und Forschungsstation Dikopshof im Jahr 2001/2002

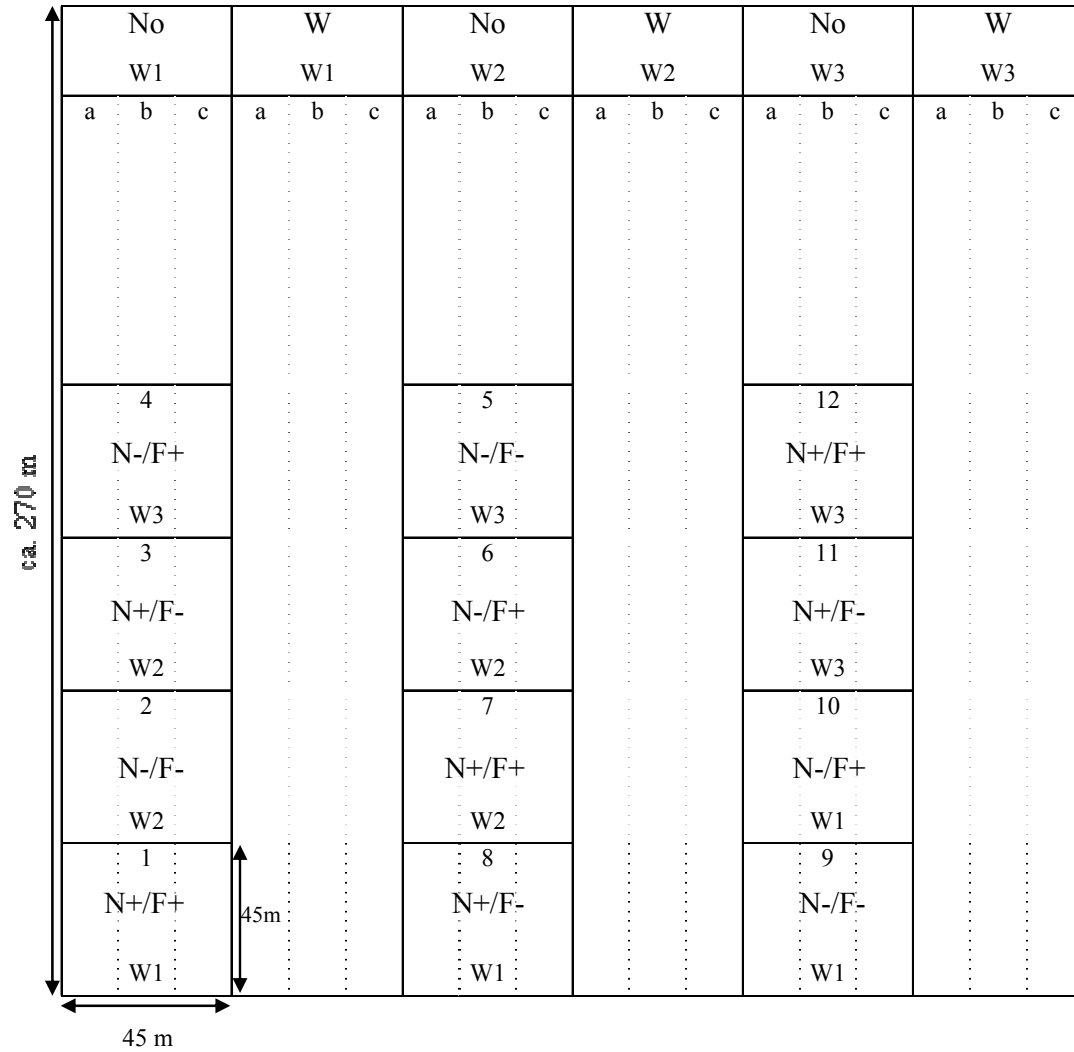
Versuchsplan 2002/2003 Dikopshof Schlag VIII a



A-Abb. 8.6 Skizze des Versuchsaufbaus an der Lehr- und Forschungs-station Dikopshof im Jahr 2002/2003.



Versuchsplan 2002/2003 Klein Altendorf



A-Abb. 8.7 Skizze des Versuchsaufbaus an der Lehr- und Forschungsstation Klein Altendorf im Jahr 2002/2003

A-Tab. 8.1 Min-, Max-, Mean-, Median- und Modewerte sowie Standardabweichung der von 12 Parzellen ermittelten „digital numbers“ (DN) des QuickBird-Bildes vom 25.06.2002

pan = panchromatische Aufnahme (450-900 nm);
 NIR = DN im Spektralbereich des NIR (760-900 nm);
 R = DN im Spektralbereich des Rot (630-690 nm);
 G = DN im Spektralbereich des Grün (520-600 nm);
 B = DN im Spektralbereich des Blau (450-520 nm);
 WDVI, NDVI, NDVI_(grün) und SAVI siehe Kapitel 2.2.2 auf Seite 19.

Parzellen													Durchschnitt der drei Wiederholungen			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	N+/F+	N+/F-	N-/F+	N-/F-
NIR																
Min	717,0	478,0	571,0	700,0	459,0	448,0	609,0	454,0	462,0	453,0	604,0	715,0	710,7	466,3	594,7	451,7
Max	781,0	583,0	702,0	769,0	521,0	493,0	706,0	508,0	531,0	524,0	710,0	771,0	773,7	545,0	706,0	508,3
Mean	757,4	504,0	658,3	746,3	478,8	469,4	661,2	467,1	483,5	475,0	666,5	751,9	751,9	488,8	662,0	470,5
Median	757,8	501,8	658,0	748,8	476,9	470,0	661,7	465,0	482,0	473,8	668,6	752,0	752,8	486,9	662,8	469,6
Mode	762,8	495,6	653,9	753,9	478,9	470,9	665,8	463,9	480,9	475,7	675,6	752,8	756,5	485,1	665,1	470,2
St.Abw.	10,7	14,2	17,4	14,1	10,2	8,7	14,9	9,0	10,7	10,1	20,5	8,7	11,2	11,7	17,6	9,2
R																
Min	173,0	154,0	166,0	139,0	157,0	185,0	169,0	185,0	158,0	176,0	172,0	145,0	152,3	156,3	169,0	182,0
Max	155,0	177,0	202,0	159,0	175,0	504,0	202,0	203,0	178,0	203,0	197,0	163,0	159,0	176,7	200,3	303,3
Mean	144,9	164,9	177,2	145,9	165,4	193,7	186,5	192,9	168,5	189,8	183,6	149,2	146,7	166,3	182,5	192,1
Median	145,0	165,0	178,0	144,9	165,0	184,0	186,9	192,0	167,9	191,0	183,9	148,9	146,3	165,9	182,9	189,0
Mode	145,9	166,9	178,0	144,9	165,0	194,0	189,0	188,9	167,0	193,0	178,0	148,9	146,6	166,3	181,6	192,0
St.Abw.	3,3	3,1	5,4	2,3	3,5	3,0	5,4	4,0	4,0	5,1	5,4	2,4	2,7	3,5	5,4	4,0
G																
Min	271,0	271,0	300,0	270,0	271,0	295,0	305,0	297,0	275,0	282,0	306,0	277,0	272,7	272,3	303,7	291,3
Max	288,0	293,0	337,0	292,0	291,0	311,0	337,0	318,0	296,0	318,0	331,0	297,0	292,3	293,3	335,0	315,7
Mean	277,4	280,1	313,6	278,0	278,8	303,6	324,2	305,6	284,7	302,9	320,7	286,1	280,5	281,2	319,5	304,0
Median	278,0	279,9	313,9	278,0	279,0	303,9	324,9	305,0	283,9	303,0	320,0	286,0	280,6	281,0	319,6	304,0
Mode	278,0	279,9	315,9	277,0	280,9	301,9	326,9	304,0	283,9	306,9	320,9	286,0	280,3	281,6	321,2	304,3
St.Abw.	3,4	3,3	5,4	3,1	3,8	3,6	5,0	3,0	3,9	4,8	4,3	3,3	3,3	3,7	4,9	3,8
B																
Min	206,0	211,0	215,0	210,0	208,0	218,0	217,0	216,0	210,0	216,0	215,0	212,0	209,3	209,7	215,7	216,7
Max	222,0	222,0	234,0	225,0	224,0	232,0	235,0	235,0	228,0	234,0	232,0	225,0	224,0	224,7	233,7	233,7
Mean	213,6	216,1	224,7	215,4	215,8	224,5	225,8	225,0	218,4	224,3	225,4	218,7	215,9	216,8	225,3	224,6
Median	213,9	216,0	225,0	215,0	214,9	225,0	225,9	223,9	218,0	224,0	225,0	219,0	216,0	216,3	225,3	224,3
Mode	210,9	216,0	225,0	215,0	214,9	226,0	227,0	223,9	215,0	224,0	225,0	219,0	215,0	215,3	225,6	224,6
St.Abw.	2,7	1,7	2,9	2,4	2,5	2,7	2,6	2,4	3,9	3,2	3,0	2,3	2,5	2,7	2,8	2,8
Pan																
Min	384,0	305,0	363,0	378,0	296,0	305,0	374,0	308,0	296,0	295,0	372,0	388,0	383,3	299,0	369,7	302,7
Max	431,0	414,0	428,0	430,0	360,0	351,0	432,0	352,0	380,0	370,0	454,0	432,0	431,0	384,7	438,0	357,7
Mean	415,1	329,2	403,9	411,6	319,5	332,5	412,9	333,1	323,1	332,8	411,8	416,4	414,4	323,9	409,5	332,8
Median	416,0	328,8	404,9	411,9	318,8	332,9	413,9	332,9	322,9	332,8	412,7	416,9	414,9	323,5	410,5	332,9
Mode	416,9	328,0	405,9	412,9	318,8	333,9	414,8	337,9	324,9	332,8	415,9	417,9	415,9	323,9	412,2	334,9
St.Abw.	6,6	9,3	9,3	7,4	6,0	6,3	7,9	6,9	7,6	7,9	9,7	6,5	6,8	7,6	9,0	7,1
WDVI																
Min	27,9	-217,3	-165,1	10,6	-239,4	-306,2	-183,8	-314,8	-257,9	-309,6	-197,3	-31,2	2,4	-238,2	-182,0	-310,2
Max	106,0	-133,0	-18,8	94,6	-153,3	-241,8	-47,9	-201,6	-172,8	-232,5	-54,7	75,0	91,9	-153,0	-40,5	-225,3
Mean	76,0	-182,5	-107,7	62,4	-203,5	-274,9	-132,0	-280,9	-214,3	-266,3	-119,6	44,4	60,9	-200,1	-119,8	-274,0
Median	76,7	-184,4	-110,2	64,7	-203,4	-275,2	-135,0	-283,4	-214,3	-265,0	-119,3	46,8	62,7	-200,7	-121,5	-274,5
Mode	65,8	-157,7	-130,2	72,6	-205,1	-277,5	-136,0	-289,1	-219,0	-257,8	-104,3	48,1	62,1	-193,9	-123,5	-274,8
St.Abw.	14,6	13,1	27,4	16,4	14,0	11,8	-27,2	14,8	16,1	14,2	27,2	19,5	16,8	14,4	9,1	13,6
NDVI																
Min	0,650	0,482	0,518	0,638	0,452	0,391	0,519	0,386	0,449	0,385	0,514	0,629	0,639	0,461	0,517	0,387
Max	0,693	0,561	0,618	0,686	0,526	0,442	0,609	0,449	0,517	0,469	0,600	0,682	0,687	0,535	0,609	0,454
Mean	0,679	0,507	0,576	0,673	0,486	0,416	0,560	0,415	0,483	0,429	0,568	0,669	0,674	0,492	0,568	0,420
Median	0,679	0,504	0,575	0,674	0,485	0,415	0,559	0,415	0,484	0,427	0,566	0,670	0,674	0,491	0,567	0,419
Mode	0,678	0,501	0,572	0,675	0,494	0,420	0,548	0,404	0,487	0,413	0,595	0,671	0,674	0,494	0,571	0,412
St.Abw.	0,007	0,013	0,016	0,008	0,012	0,009	0,016	0,010	0,013	0,014	0,019	0,006	0,007	0,013	0,017	0,011
NDVI(grün)																
Min	0,432	0,264	0,320	0,435	0,233	0,188	0,295	0,187	0,230	0,186	0,299	0,403	0,423	0,242	0,305	0,187
Max	0,479	0,333	0,394	0,473	0,303	0,238	0,393	0,244	0,294	0,246	0,386	0,462	0,472	0,310	0,391	0,242
Mean	0,463	0,285	0,355	0,456	0,265	0,214	0,341	0,209	0,259	0,221	0,351	0,446	0,455	0,270	0,349	0,215
Median	0,463	0,283	0,355	0,457	0,264	0,214	0,341	0,208	0,259	0,222	0,351	0,447	0,456	0,269	0,349	0,215
Mode	0,463	0,281	0,353	0,453	0,256	0,212	0,336	0,202	0,252	0,229	0,360	0,450	0,455	0,263	0,350	0,214
St.Abw.	0,008	0,011	0,016	0,008	0,011	0,010	0,016	0,011	0,012	0,011	0,016	0,011	0,009	0,011	0,016	0,011
SAVI																
Min	0,975	0,723	0,776	0,937	0,686	0,587	0,778	0,579	0,673	0,577	0,781	0,915	0,942	0,694	0,778	0,581
Max	1,039	0,841	0,926	1,028	0,793	0,663	0,913	0,673	0,775	0,703	0,899	1,022	1,030	0,803	0,913	0,680
Mean	1,016	0,759	0,862	1,006	0,731	0,624	0,840	0,624	0,724	0,645	0,851	0,998	1,007	0,738	0,851	0,631
Median	1,017	0,755	0,862	1,010	0,728	0,623	0,837	0,623	0,725	0,644	0,848	1,002	1,009	0,736	0,849	0,630
Mode	1,008	0,750	0,857	1,015	0,720	0,630	0,821	0,605	0,737	0,619	0,848	1,006	1,010	0,735	0,842	0,618
St.Abw.	0,012	0,020	0,026	0,015	0,020	0,015	0,026	0,017	0,019	0,021	0,027	0,017	0,015	0,020	0,026	0,018

A-Tab. 8.2 Punktmessungen von Kornertrag 2002, % befallene Blattfläche mit Pilzkrankheiten am 31. 05. 2002 und NDVI aus dem Satellitenbild vom 25. 06. 2002 an den 120 Boniturstellen des Versuchs am Dikopshof

Parzelle	Faktoren	Meßpunkt	Ertrag dt/ha	Befall 31.05.	NDVI 25.06.	Parzelle	Faktoren	Meßpunkt	Ertrag dt/ha	Befall 31.05.	NDVI 25.06.
1	N+/F+	0	102,5	0,7	0,65	7	N-/F+	0	66,6	0,4	0,54
1	N+/F+	1	103,0	1,2	0,68	7	N-/F+	1	86,6	0,3	0,54
1	N+/F+	2	103,0	1,0	0,68	7	N-/F+	2	82,3	0,1	0,54
1	N+/F+	3	103,0	1,4	0,65	7	N-/F+	3	96,5	0,2	0,54
1	N+/F+	4	103,0	1,1	0,69	7	N-/F+	4	96,6	0,1	0,54
1	N+/F+	5	102,7	1,0	0,68	7	N-/F+	5	101,0	0,3	0,55
1	N+/F+	6	103,0	0,8	0,68	7	N-/F+	6	90,8	0,3	0,55
1	N+/F+	7	102,3	0,5	0,68	7	N-/F+	7	78,6	0,3	0,56
1	N+/F+	8	103,0	0,7	0,68	7	N-/F+	8	102,7	0,3	0,57
1	N+/F+	9	103,0	0,4	0,67	7	N-/F+	9	97,5	0,5	0,58
2	N+/F-	0	78,8	6,6	0,49	8	N-/F-	0	57,0	4,6	0,40
2	N+/F-	1	74,7	1,6	0,50	8	N-/F-	1	62,7	2,9	0,41
2	N+/F-	2	69,7	2,0	0,50	8	N-/F-	2	66,0	2,6	0,41
2	N+/F-	3	87,0	2,6	0,49	8	N-/F-	3	90,1	2,0	0,42
2	N+/F-	4	87,8	3,3	0,50	8	N-/F-	4	73,9	1,7	0,41
2	N+/F-	5	81,6	2,8	0,49	8	N-/F-	5	77,0	2,4	0,40
2	N+/F-	6	84,3	2,4	0,52	8	N-/F-	6	66,0	2,3	0,40
2	N+/F-	7	80,4	2,7	0,52	8	N-/F-	7	77,6	2,5	0,42
2	N+/F-	8	72,6	2,9	0,51	8	N-/F-	8	101,6	2,6	0,41
2	N+/F-	9	77,5	1,8	0,49	8	N-/F-	9	95,2	2,3	0,42
3	N-/F+	0	95,9	0,9	0,55	9	N+/F-	0	68,5	4,7	0,47
3	N-/F+	1	90,1	0,6	0,57	9	N+/F-	1	66,2	2,4	0,47
3	N-/F+	2	88,3	0,4	0,58	9	N+/F-	2	66,0	2,9	0,47
3	N-/F+	3	93,3	0,5	0,58	9	N+/F-	3	57,9	3,0	0,48
3	N-/F+	4	86,5	0,6	0,57	9	N+/F-	4	88,0	2,8	0,48
3	N-/F+	5	87,9	0,2	0,58	9	N+/F-	5	74,1	2,5	0,46
3	N-/F+	6	103,0	0,3	0,56	9	N+/F-	6	96,0	2,5	0,48
3	N-/F+	7	91,1	0,4	0,54	9	N+/F-	7	78,3	3,9	0,49
3	N-/F+	8	103,0	0,7	0,60	9	N+/F-	8	84,5	2,5	0,48
3	N-/F+	9	90,5	0,4	0,58	9	N+/F-	9	66,3	4,4	0,48
4	N+/F+	0	99,9	0,6	0,67	10	N-/F-	0	98,5	2,6	0,43
4	N+/F+	1	103,0	0,4	0,67	10	N-/F-	1	76,2	2,7	0,43
4	N+/F+	2	103,0	0,4	0,67	10	N-/F-	2	74,1	2,5	0,42
4	N+/F+	3	103,0	0,3	0,66	10	N-/F-	3	59,2	3,2	0,43
4	N+/F+	4	103,0	0,4	0,67	10	N-/F-	4	70,5	3,1	0,42
4	N+/F+	5	103,0	0,7	0,67	10	N-/F-	5	68,7	3,6	0,42
4	N+/F+	6	102,0	0,4	0,68	10	N-/F-	6	92,6	1,0	0,44
4	N+/F+	7	102,8	0,3	0,68	10	N-/F-	7	82,3	3,1	0,43
4	N+/F+	8	103,0	0,6	0,68	10	N-/F-	8	89,2	3,4	0,42
4	N+/F+	9	103,0	0,5	0,66	10	N-/F-	9	78,5	3,8	0,42
5	N+/F-	0	87,7	7,4	0,47	11	N-/F+	0	76,2	0,3	0,50
5	N+/F-	1	95,4	5,9	0,49	11	N-/F+	1	79,1	0,4	0,54
5	N+/F-	2	94,4	2,1	0,49	11	N-/F+	2	76,5	0,3	0,55
5	N+/F-	3	85,4	2,6	0,47	11	N-/F+	3	83,0	0,6	0,57
5	N+/F-	4	76,6	3,9	0,48	11	N-/F+	4	101,8	0,3	0,56
5	N+/F-	5	80,2	6,2	0,48	11	N-/F+	5	99,3	0,2	0,56
5	N+/F-	6	91,2	4,1	0,47	11	N-/F+	6	99,6	0,4	0,55
5	N+/F-	7	72,3	3,7	0,49	11	N-/F+	7	80,9	0,2	0,58
5	N+/F-	8	68,1	6,9	0,48	11	N-/F+	8	79,2	0,3	0,58
5	N+/F-	9	76,6	3,5	0,48	11	N-/F+	9	88,4	0,1	0,59
6	N-/F-	0	73,0	2,9	0,40	12	N+/F+	0	85,6	0,6	0,61
6	N-/F-	1	70,5	2,7	0,42	12	N+/F+	1	103,0	0,4	0,66
6	N-/F-	2	72,4	3,1	0,41	12	N+/F+	2	103,0	0,5	0,67
6	N-/F-	3	66,9	3,7	0,42	12	N+/F+	3	103,0	0,5	0,66
6	N-/F-	4	99,7	3,0	0,42	12	N+/F+	4	100,3	0,4	0,67
6	N-/F-	5	71,1	3,4	0,40	12	N+/F+	5	103,0	0,3	0,67
6	N-/F-	6	99,0	4,7	0,40	12	N+/F+	6	103,0	0,3	0,66
6	N-/F-	7	74,5	4,9	0,41	12	N+/F+	7	103,0	0,4	0,67
6	N-/F-	8	84,3	5,0	0,41	12	N+/F+	8	103,0	0,4	0,67
6	N-/F-	9	83,2	4,2	0,42	12	N+/F+	9	102,3	0,4	0,67

A-Tab. 8.3 Parzellenmessung von Kornertrag 2002, % befallene Blattfläche mit Pilzkrankheiten am 31.05. 2002 und NDVI aus dem Satellitenbild vom 25.06. 2002 in den zwölf Versuchspartzen des Versuchs am Dikopshof

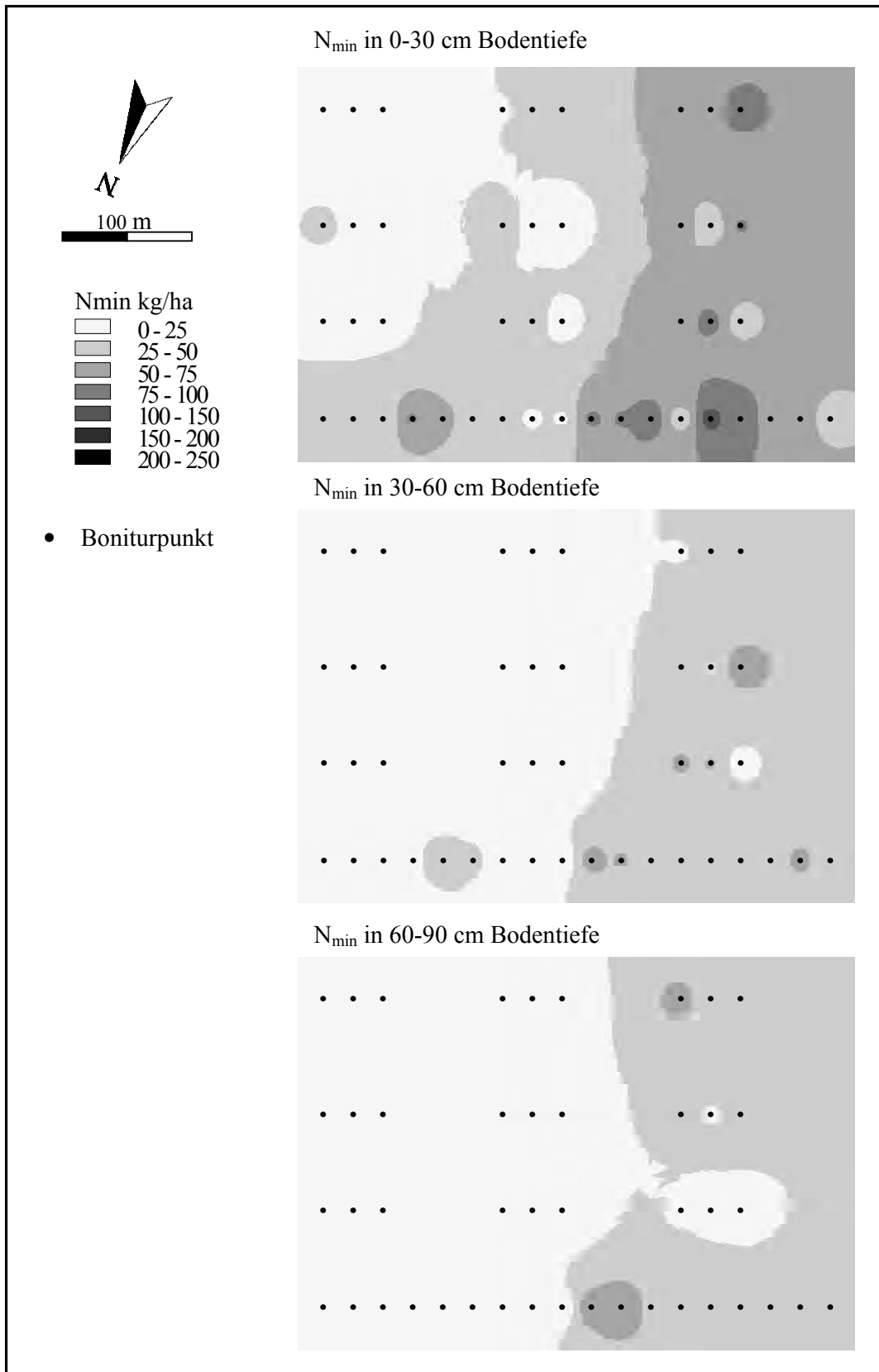
Parzelle	Faktoren	Ertrag dt/ha	Befall 31.05.	NDVI 25.06.
1	N+/F+	102,2	0,9	0,68
2	N+/F-	78,9	2,9	0,50
3	N-/F+	94,0	0,5	0,57
4	N+/F+	102,1	0,5	0,67
5	N+/F-	81,7	4,7	0,48
6	N-/F-	81,7	3,8	0,41
7	N-/F+	89,7	0,3	0,56
8	N-/F-	79,0	2,6	0,41
9	N+/F-	80,0	3,2	0,48
10	N-/F-	78,4	2,9	0,42
11	N-/F+	89,6	0,3	0,56
12	N+/F+	102,2	0,4	0,66

A-Tab. 8.8 Werte der Vegetationsindizes NDVI und NDVI(grün) in den vier Behandlungsvarianten zu den vier Hubschrauberüberflugterminen.

Aufnahmedatum	16.05.2002	27.05.2002	02.06.2002	13.06.2002
N+/F+				
NDVI	0,45	0,48	0,49	0,35
NDVI(grün)	0,20	0,31	0,46	0,22
N+/F-				
NDVI	0,46	0,48	0,49	0,23
NDVI(grün)	0,20	0,40	0,47	0,31
N-/F+				
NDVI	0,34	0,47	0,44	0,20
NDVI(grün)	0,12	0,21	0,41	0,34
N-/F-				
NDVI	0,35	0,47	0,43	0,15
NDVI(grün)	0,12	0,15	0,40	0,36

A-Tab. 8.9 Wuchshöhe in cm der Winterweizensorte Novalis im Jahr 2003 an der Lehr- und Versuchsstation Klein Altendorf. Die Messungen am 23. Mai wurden von einer anderen Person erhoben und flossen nicht in die Auswertung mit ein, da ein Verkürzen der Wuchshöhe nicht möglich ist.

Variante Saatstärke	Mittelwerte der drei Wiederholungen											
	Nb/F			Nb/-			Nr/F			Nr/-		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
7. Mai.	43,6	44,6	46,3	43,2	44,8	46,5	39,3	41,8	41,3	39,2	41,1	39,8
15. Mai.	68,8	67,8	67,5	67,1	67,6	68,1	65,3	64,3	64,5	64,4	64,8	64,7
23. Mai.	62,4	62,8	65,1	62,6	63,5	63,8	58,8	61,1	61,3	61,3	60,8	62,7
13. Jun.	102,8	102,6	102,3	102,8	103,7	103,8	102,1	103,8	102,1	101,7	103,1	103,7
17. Jun.	106,6	106,5	107,0	106,1	107,3	107,2	106,4	106,9	107,2	105,5	106,1	107,1



A-Abb. 8.8 N_{min} Verteilung im Jahr 2003 im Versuchsfeld in Klein Altendorf in den Bodenschichten von 0-30 cm, 30-60 cm und 60-90 cm. Zwischen den Boniturpunkten wurde interpoliert nach dem IDW.

A-Tab. 8.10 Min-, Max-, Mean-, Median- und Modewerte sowie Standardabweichung der von 12 Parzellen ermittelten „digital numbers“ (DN) des QuickBird-Bildes vom 28.05.2003; pan = panchromatische Aufnahme (450-900 nm); NIR = DN im Spektralbereich des NIR (760-900 nm); R = DN im Spektralbereich des Rot (630-690 nm); G = DN im Spektralbereich des Grün (520-600 nm); B = DN im Spektralbereich des Blau (450-520 nm); WDI, NDVI, NDVI(grün) und SAVI siehe Kapitel 2.2.2 auf Seite 19.

Table with 38 columns (1a-11c, 12a-12c, 13a-13c, 14a-14c, 15a-15c, 16a-16c, 17a-17c, 18a-18c, 19a-19c, 20a-20c, 21a-21c, 22a-22c) and rows for various parameters: NIR, R, G, B, Pan, WDI, NDVI, NDVI(grün), SAVI. Each row includes Min, Max, Mean, Median, Mode, and St.Abw. values for each of the 36 parzellen.

A-Tab. 8.11 *QuickBird* Bild vom 28.05.2003: „digital numbers“ (DN) der vier spektralen Kanäle und des panchromatischen Bildes sowie NDVI-, NDVI_(grün), SAVI, WdVI und SPAD-Werte in den vier Faktorvarianten der Sorte *Novalis* auf der Versuchsfläche in Klein Altendorf. Werte mit verschiedenen Buchstaben (a, b) innerhalb eines Parameters und eines Faktors (F, N) sind signifikant verschieden.

Parameter \ Variante	Variante			
	F+	F-	N+	N-
DN _{blau}	226 (a)	227 (a)	227 (b)	225 (a)
DN _{grün}	285 (a)	286 (a)	287 (b)	284 (a)
DN _{rot}	140 (a)	141 (a)	142 (b)	139 (a)
DN _{NIR}	849 (a)	841 (a)	881 (b)	809 (a)
DN _{pan}	443 (a)	440 (a)	457 (b)	427 (a)
NDVI	0,716 (a)	0,712 (a)	0,723 (b)	0,705 (a)
NDVI _(grün)	0,479 (a)	0,492 (a)	0,509 (b)	0,480 (a)
SAVI	1,074 (a)	1,069 (a)	1,085 (b)	1,058 (a)
WdVI	152 (a)	141 (a)	179 (b)	113 (a)
SPAD-Meter	50,7 (a)	50,3 (a)	50,9 (b)	50,2 (a)

A-Tab. 8.13 Korrelation von NDVI und befallener Blattfläche am 31.05.: Veränderung von Bestimmtheitsmaß und Standardabweichung bei unterschiedlicher Anzahl von Boniturstellen je Parzelle

Messpunkte	Bestimmtheitsmaß	Standardabweichung
1	0,5	0,11
2	0,6	0,09
3	0,6	0,05
4	0,6	0,05
5	0,6	0,04
6	0,6	0,02
7	0,6	0,02
8	0,6	0,03
9	0,6	0,01
10	0,6	0,00

A-Tab. 8.14 Korrelation von NDVI und Kornertrag zur Ernte: Veränderung von Bestimmtheitsmaß und Standardabweichung bei unterschiedlicher Anzahl von Boniturstellen je Parzelle.

Messpunkte	Bestimmtheitsmaß	Standardabweichung
1	0,6	0,21
2	0,7	0,13
3	0,8	0,12
4	0,8	0,08
5	0,9	0,04
6	0,8	0,05
7	0,9	0,03
8	0,9	0,03
9	0,9	0,02
10	0,9	0

A-Tab. 8.15 Werte des NDVI am 25.06.2002 und Kornertrag 2002 unter Verwendung des Mittelwertes von zwei entfernt voneinander liegenden Messpunkten je Parzelle der Versuchsfläche am Dikopshof.

Parzelle	Ertrag dt/ha	NDVI
1	102,8	0,67
2	81,6	0,51
3	99,5	0,56
4	101,0	0,68
5	89,5	0,47
6	86,0	0,40
7	78,7	0,55
8	61,5	0,40
9	82,3	0,48
10	95,6	0,44
11	87,9	0,53
12	94,3	0,64

A-Tab. 8.16 Werte des NDVI am 25.06.2002 und Kornertrag 2002 unter Verwendung des Mittelwertes von zwei nah beieinander liegenden Messpunkten je Parzelle.

Parzelle	Ertrag dt/ha	NDVI
1	103,0	0,68
2	72,2	0,50
3	89,2	0,58
4	103,0	0,67
5	94,9	0,49
6	71,5	0,42
7	84,5	0,54
8	64,4	0,41
9	66,1	0,47
10	75,2	0,43
11	77,8	0,55
12	103,0	0,67

A-Tab. 8.17 Werte des NDVI am 25.06.2002 und Kornertrag 2002 unter Verwendung des Mittelwertes von zwei nah beieinander liegenden Messpunkten je Parzelle für den Kornertrag und des für die gesamte Parzelle gemittelten NDVI-Wertes.

Parzelle	Ertrag dt/ha	NDVI
1	102,20	0,68
2	78,90	0,50
3	94,00	0,58
4	102,10	0,67
5	81,70	0,49
6	81,70	0,42
7	89,70	0,54
8	79,00	0,41
9	80,00	0,47
10	78,40	0,43
11	89,60	0,55
12	102,20	0,67

Danksagung

Herrn Prof. Dr. W. Kühbauch gilt mein Dank für die Überlassung dieses Themas, die wissenschaftliche und persönliche Betreuung während der Anfertigung der Arbeit und die Begutachtung.

Bei Herrn Prof. Dr. G. Menz bedanke ich mich für die engagierte Übernahme des Korreferats.

Den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern am Lehrstuhl, auf den Lehr- und Forschungsstationen Dikopshof und Klein Altendorf sowie den studentischen Hilfskräften danke ich für die Hilfe bei der Planung und Durchführung der Versuche.

Für die Hilfe bei der Umsetzung von technischen Details und für die Unterstützung bei der Auswertung der Versuche danke ich Herrn R. Lock und Frau A. Reinders.

Meinen Freunden und Kollegen am Institut, im DFG-Graduiertenkolleg 722 und im ZFL (Zentrum für Fernerkundung der Landoberfläche) danke ich für die wissenschaftliche und persönliche Unterstützung sowie für viele heitere Stunden. Ein spezieller Dank geht hier an Dominik, Eva, Matthias, Miriam, Peter und Tobias.

Meiner Freundin Annette gilt besonders herzlicher Dank, da sie mich während der schwierigen Phasen des Schreibens motiviert sowie durch die Korrektur der Arbeit unterstützt hat.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern Marie-Luise und Erich Jacobi herzlich bedanken, die mir das Studium ermöglicht haben.

Finanziert wurde die Arbeit von der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG im Rahmen des DFG-Graduiertenkollegs 722 *Information Techniques for Precision Plant Protection in Agriculture and Horticulture*.