

Zudem wurden epigäische Raubarthropoden (Laufkäfer, Spinnen) in ihrer Rolle innerhalb des Nahrungsnetzes untersucht (Lang, 1998; Lang et al., 1999; Lang, 2003). Dabei wurden auch habitatspezifische Masse-Längenbeziehungen aufgestellt (Lang et al., 1997), die es erlauben für Habitattypen genauere Biomasseabschätzungen vorzunehmen. Hierbei zeigte sich, dass die zahlenmäßig geringer auftretenden Laufkäfer bei Berücksichtigung ihrer Biomasse das dominierende Element der epigäischen Raubarthropodenfauna sind (Lang, 1998). Bei kontinuierlich über zwei Jahre vorgenommenen Untersuchungen wurden saisonale und habitatspezifische Schwankungen der Populationsdichten verschiedener Artengruppen ermittelt. So scheinen Laufkäfer (Carabidae) und Baldachinspinnen (Linyphiidae) früher in der Saison hohe Populationen zu erreichen, während Wolfspinnen (Lycosidae) und Kurzflügelkäfer (Staphylinidae) im Laufe des Sommerhalbjahres mehr an Bedeutung erlangen. Die Anteile der verschiedenen Räubergruppen unterscheiden sich auch zwischen den Feldfrüchten: Im Mais dominierten Laufkäfer, Baldachinspinnen und Hundertfüßer (Chilopoda), und im Winterweizen Kurzflügelkäfer und wiederum Laufkäfer (Lang, 1998).

Durch Feldexperimente konnten zudem Einflüsse von Raubarthropoden (Laufkäfer, Baldachin- und Wolfspinnen) auf einzelne Beutiergruppen ermittelt werden. Es konnten die Verhältnisse auf Äckern von den Verhältnissen auf Brachen unterschieden werden. Während auf den Brachen die Entwicklung der Abundanzen potenzieller Beutetiere nicht mit der Anzahl von vorhandenen Carabiden und Spinnen korrelierte, waren auf dem Acker solche Effekte nachweisbar (Lang, 1998). Der Gemeinschaft der Raubarthropoden kommt somit im Feld eine wichtige Rolle bei der biologischen Schädlingsbekämpfung zu. So reduzierten Laufkäfer, Baldachinspinnen und Wolfspinnen folgende herbivore „Schädlinge“ in Mais und Winterweizen: Blattläuse, Zikaden und Thripse (Lang et al., 1999; Lang, 2003). Laufkäfer fangen und töten dabei sogar Schädlinge wie z.B. Blattläuse, auch wenn diese nicht zu ihren bevorzugten Beutetieren gehören (Lang & Gsödl, 2001, 2003). Auch ein festgestellter negativer Effekt der Laufkäfer auf Wolfspinnen reduzierte nicht die Effizienz der Schädlingskontrolle der Räubergemeinschaft (Lang, 2003). Die Raubarthropoden bejagten und beeinflussten auch detritivore Beutepopulationen wie z.B. Collembolen (Filsler et al., 1997; Lang, 1998; Filsler & Setälä, 1999). Damit ergeben sich potenzielle Wechselwirkungen mit Stoffkreisläufen im Boden (z.B. eine Beeinflussung der Mineralisierung von Ernterückständen). Zum anderen kann sich die Raubarthropodenfauna in Zeiten geringer Schädlingsdichte durch die Bejagung der Mesofauna erhalten, und damit bereits in individuenstarken Populationen beim ersten Auftreten von Schädlingen präsent sein.

A. Meyer-Aurich, K. Heil, H. Heuwinkel, J. Schächtl,
G. Gerl, M. Kainz, U. Weller, G. Huber

5 Optimierung der Bewirtschaftung von Agrarökosystemen

5.1 Methoden zur Erfassung von bewirtschaftungsrelevanten Agrarökosystemzuständen

Als Grundlage für eine zielgerichtete Gestaltung des Managements von Agrarökosystemen sind Informationen über Standorteigenschaften und das Reaktionsverhalten der Systeme auf Bewirtschaftungsmaßnahmen notwendig. Die Erforschung einer optimierten Landnutzung war deshalb das Ziel im Forschungsverbund Agrarökosysteme München (FAM). Hierfür wurden Agrarökosystemzustände (boden- und pflanzenbürtige Parameter) erhoben und kartiert sowie bewirtschaftungsrelevante Prozesse analysiert. Eine Vielzahl an unterschiedlichen Methoden zur Erfassung von Zuständen und Prozessen in Agrarökosystemen kamen dabei zum Einsatz, wurden weiterentwickelt oder neu etabliert. Die Methoden erfassen Daten auf unterschiedlichen Systemebenen: von Laboranalysen über Feldmessungen des Pflanzenwachstums, nichtdestruktiver Beschreibung der Pflanzenbestände über spektrale Kenngrößen bis hin zu Parzellen- oder Systemversuchen mit kontrollierten Steuergrößen.

5.1.1 Erfassung von Masse, Zustand und Zusammensetzung von Pflanzenbeständen

Die Analyse der Entwicklung von Ertrag, Zusammensetzung und Nährstoffversorgung eines Pflanzenbestandes ist die Basis einer zielgerichteten Steuerung der Bewirtschaftung in Abhängigkeit von Standorteigenschaften und Betriebssystem. Im FAM wurden hierzu verschiedene Methoden der direkten und indirekten Erhebung von Wachstumsabläufen, Erträgen und Pflanzeninhaltsstoffen eingesetzt (siehe Tab. 5.1).

Klassische Methoden. Zur Ermittlung der Wachstumsdynamik von Kulturpflanzen wurden Biomassesschnitte durchgeführt und phänologische Entwicklungszustände erfasst. Standardmäßig werden die Wachstumsdynamik und der Verlauf der Nährstoffaufnahme von Pflanzenbeständen durch Pflanzenschnitte mit nachfolgender Laboranalyse der Proben erfasst. Dieses arbeitsaufwändige sowie kostenintensive Verfahren wurde im FAM als Referenzmethodik genutzt. Es ist auf heterogenen Schlägen mit einer Vielzahl an notwendigen Probepunkten und unter den Bedingungen der landwirtschaftlichen Praxis nur begrenzt durchführbar. Daher wurden

im FAM eine Reihe von Techniken eingesetzt und weiter entwickelt, die eine schnelle, berührungslose Erfassung von Pflanzenaufwuchs und Nährstoffversorgung liefern. Die auf diese Weise generierten Informationen waren die Basis einer standortangepassten, teilschlagbezogenen Bewirtschaftung, deren Wirkung auf Ertragsbildung und Umwelt geprüft wurde.

Tab. 5.1 Übersicht der Methoden zur Erfassung von Pflanzenbeständen im FAM

Methoden	Technik	Ziele	Kenngrößen
Klassische Methoden zur Erfassung von Pflanzenbiomasse und Inhaltsstoffen	Handbeprobung Parzellenversuche Bonitur	Erfassung von Aufwuchs-, Wurzelentwicklung und Inhaltsstoffen Erfassung der Reaktion von Pflanzenbeständen auf veränderte Rahmenbedingungen Grundlage für die Bestandesführung	Masse pro 0,1–3m ² Masse pro 10–200 m ²
Georeferenzierte Ertragsfassung	Mähdrescher/Häcksler	Teilflächenspezifischer Ertrag (Ertragspotenzialkarten)	Blattflächenindex, zeitlicher Verlauf der Entwicklungsstadien Kontinuierliche Erfassung des Ertrages
Georeferenzierte, sensorsgestützte Bonitur von Pflanzenbeständen	Reflexionsoptik: (Feldspektrometer, N-Sensor) Laserinduzierte Chlorophyllfluoreszenz: Chlorophyll-Sensor Fernerkundung NIR-Spektrometer	Biomasse und Pflanzeninhaltsstoffe (N-Versorgung), Ertragschätzung, -prognose, teilflächenspezifische N-Düngung Erfassung des N-Versorgungszustandes, Steuerung der N-Düngung Differenzierung von Teilschlägen, Ertragschätzung, -prognose Wassergehalt in Erntegut Qualität von Hackselgut (N, Faser, Verdaulichkeit etc.), Leguminosenanteil im Klee gras	Vegetationsindices (z.B. REIP, NDVI) Vegetationsindex Ratio Verschiedene Spektralbereiche (VIS, NIR, MIR, thermisches IR) NIR-Vollspektrum

Georeferenzierte Ertragsfassung. Der georeferenzierte teilflächenspezifische Ertrag kann dem Bewirtschafteter Informationen über seine Flächen liefern und ist eine wichtige Eingangsgröße für die Teilschlagbewirtschaftung. Für die flächenauffassende Erfassung der Erträge von Druschfrüchten, Silomais, Kartoffeln und Grünfütter wurden im FAM Systeme getestet, die während der Ernte der Kulturen kontinuierlich den Massedurchsatz der Erntemaschinen messen und über die Verrechnung mit der Flächenleistung den Flächenertrag ermitteln. Die Ertragsmesswerte werden mit Hilfe des Globalen Positionierungssystems (GPS bzw. DGPS) georeferenziert aufgezeichnet.

Während die Gewichtsmessung für Mähdruschfrüchte und bei der Futterernte mittels Feldhäcksler bei einem Vergleich mit Referenzaufnahmen große Genauigkeit zeigte (Auerhammer et al., 1994), war die automatische Ertragsfassung von Kartoffeln in Scheyern oft mit Schwierigkeiten verbunden. Witterungsabhängig und teilflächenspezifisch stark schwankende Beimengungen von Steinen und Klutten verfälschten das Messergebnis erheblich (Demmel et al., 1999).

Voraussetzung für den Einsatz aller Messsysteme ist eine Kalibrierung durch regelmäßiges Gegenwiegen des Erntegutes. Darüber hinaus müssen die Ertragsdaten vor der Verwendung um Fehler aufgrund von Versatzeiten im Mähdrescher, uneinheitlichen Schnittbreiten, schwankenden Fahrgeschwindigkeiten oder Ortsungsfehlern bereinigt werden. Ohne Datenaufbereitung liefern die Ertragsrohdaten am Einzelpunkt sehr ungenaue Ertragsinformationen. Zur Verbesserung der punktbezogenen Ertragsgenauigkeit wurde im Rahmen des Forschungsverbundes ein Programm (EstiYield, Version 1.0, 2002) entwickelt, das ortsbezogene Ertragsdaten aus den Rohdaten am Punkt und in der Nähe liegender Punkte ableitet (Geokonzept, 2002).

Alternativ hierzu kann nach dem Eliminieren von offenbar fehlerhaften Datensätzen durch Aggregation der Daten der flächenbezogene Fehler ausgeglichen werden. Die Ertragsdaten können dann als Konturkarten oder mit rasterbasierten Polygonen abgebildet werden (Steinmayr, 2002). Durch die Aggregation der Daten kann die zu verarbeitende Information stark reduziert und damit die Handhabung vereinfacht werden. Der durch die Aggregation der Daten hervorgerufene Nutzen muss allerdings gegen den Informationsverlust abgewogen werden. Für ein teilflächenspezifisches Management sollte sich die Rastergröße an den kleinstmöglichen Bewirtschaftungseinheiten orientieren. Zur Reduzierung der Fehler der Ertragsermittlung empfiehlt Steinmayr (2002) die Verwendung eines Rasters von mindestens 10 m bis 15 m.

Sensorsgestützte Bonitur von Pflanzenbeständen. Im Vordergrund der Untersuchungen standen die gebildete Biomasse und der N-Versorgungszustand der Pflanzenbestände.

Passive Sensoren. Passive Sensoren wie der seit einiger Zeit in der Praxis im Einsatz befindliche N-Sensor nutzen die Reflexion von Sonnenlicht, um die Biomasse von Pflanzen und deren N-Gehalt während der Überfahrt mit dem Traktor zu

erfassen. Diese Informationen können dazu genutzt werden, eine an die pflanzliche Entwicklung und die standörtlichen Verhältnisse teilflächenspezifisch angepasste N-Düngung vorzunehmen. Fehlerquellen dieser Methode und mögliche Düngestrategien wurden in ihrer Wirkung auf Ertrag und Umwelt im FAM geprüft. Die relative Stickstoffaufnahme kann ab dem Entwicklungsstadium BBCH 30 bei Getreidepflanzen gut erfasst werden (Schmidhalter et al., 2003). Passive reflektionsbasierte Sensoren eignen sich darüber hinaus zur indirekten Ermittlung von Standortpotenzialen (Schmidhalter et al., 2001). In frühen Entwicklungsstadien weisen passive Sensoren den Nachteil der fehlenden Trennung zwischen Boden- und Pflanzenreflexion auf. Bei ausreichender Bodenbedeckung bzw. bei angepasster Messtechnik zur Verringerung der Detektion von Bodenreflexion konnte auch der Aufwuchs und die Stickstoffversorgung von Reihenkulturen wie Kartoffel, Zuckerrübe und Mais mit einem reflexionsoptischen Sensor bonitiert werden.

Bisherige Erfahrungen zeigen, dass vierseitige Reflexionsoptiken kaum strahlungsabhängig sind, allerdings bei sehr geringen Einstrahlungsintensitäten am frühen Morgen und späten Abend nur bedingt geeignet sind. Das Reflexionsverhalten eines Pflanzenbestandes ist abhängig von der Bestandearchitektur (Blattstellung, Pflanzenhabitus). Bei kleinkörnigen Getreidearten konnte jedoch kein wesentlicher sortenspezifischer Effekt auf die Güte der Messung nachgewiesen werden.

Aktive Sensoren. Im FAM wurden weiterhin aktive Sensoren entwickelt und optimiert, die auf dem Prinzip der laserinduzierten Chlorophyllfluoreszenz basieren (Bredemeier & Schmidhalter, 2001; Schächtl et al., 2002; Schächtl et al., 2003; Sticksel et al., 2001). Hierbei liefert ein geräteeigener Laserstrahl ein Licht spezifischer Wellenlänge, welches das Chlorophyll grüner Pflanzen zur Bildung von Fluoreszenzlicht anregt, das wiederum über einen Sensor erfasst wird. Damit ist das System weitgehend unempfindlich gegenüber Variationen der Sonnenstrahlung und der Bodenbedeckung und kann prinzipiell auch nachts eingesetzt werden (Bredemeier & Schmidhalter, 2001). Folglich könnte der Fluoreszenz-Sensor auch in frühen Entwicklungsstadien bei Getreide sowie bei Reihenkulturen verwendet werden, unter Bedingungen, bei denen Messungen mit einem passiven Sensor aufgrund der Detektion eines Mischsignals aus Boden- und Pflanzenreflexion weniger gut geeignet sind. Nachteilig wirkt sich bei aktiven Sensoren die geringe Messfläche aus. Durch ein spannendes Prinzip ergibt sich jedoch die Möglichkeit, diesen Nachteil auszugleichen, wodurch zugleich auch die relative Biomasse erfasst werden kann (Bredemeier & Schmidhalter, 2003). Die laserinduzierte Messung des relativen Chlorophyllgehalts ist deutlich temperaturabhängig. Durch parallele Erfassung der Temperatur kann diese Abhängigkeit herausgerechnet werden.

Fernerkundung. Die Fernerkundung arbeitet mit den Methoden des passiven Sensors. In Scheyern kam vor allem der flugzeuggestützte Daedalus-Scanner zum Einsatz. Hiermit wurden Scans mit einer Bodenauflösung von 1 m generiert. Damit war eine flächendeckende Darstellung des Blattflächenindexes möglich. Es gelang allerdings nicht, eine flächenübergreifende Kalibrierung der spektralen Informationen vorzunehmen. Die Beziehung zwischen Reflexionswert und Pflanzenbestand

musste lokal für jede Messkampagne vorgenommen werden (Sommer et al., 2001). Die Messung wurde auf eine bestmögliche Darstellung der Heterogenitäten in Winterweizen ausgerichtet.

Nah-Infrarot-Reflektionsspektroskopie (NIRS). Anders als bei den bisher vorgestellten Sensoren basiert die Nah-Infrarot-Reflektionsspektroskopie (NIRS) nicht auf der Ausweisung spezifischer Verbindungen sondern prinzipiell darauf, die Information Quotienten bestimmter Wellenlängen anhand ihrer Reflexion, oder über im gesamten Spektrum des NIR (800-2500 nm) zu nutzen. Da die Reflexion im NIR grundsätzlich relativ unspezifisch ist und stark vom Wasser dominiert wird, differenzieren sich Inhaltsstoffe von Proben aus Unterschieden im gesamten Spektrum, die, mit Hilfe multivariater Statistik, in einem 'neuen' Spektrum dargestellt werden. Da die Erfassung eines Spektrums in Sekundenbruchteilen erfolgt, kann die Messung online erfolgen, was auch schon in der Futterbauwirtschaft genutzt wird (Dardenne & Féménias, 1999; Welle et al., 2003). Allerdings stellt die Online-Messung in feuchtem Erntegut hohe Anforderungen an die Messtechnik und Auswertung, unter anderem da Wasser im NIR das dominierende Signal ist, dessen Ausbildung stark durch die Messbedingungen variiert wird (Paul et al., 2002). Die Kalibration einer NIRS-Methode bedarf einer hohen Anzahl an Proben und einer ebenso intensiven Validierung, da die Information nicht spezifisch ist.

Im FAM sollte aufgezeigt werden, dass NIRS geeignet ist, eine breit anwendbare, schnelle und einfache Methode zur Bestimmung des Leguminosenanteiles in Kleegras zu entwickeln. Da die technische Realisierung nachrangig war, wurde das Ziel vorerst nur im Labor an getrockneten, geschroteten Feldproben verfolgt und erfolgreich umgesetzt (Locher et al., 2005 a und b). Durch die Anwendung der Methode auf reale Feldproben konnte die räumliche Differenzierung des Leguminosenertrages im gleichen Feld im Jahresverlauf aufgezeigt werden.

Damit wurde ein Indikator für die N₂-Bindung zugänglich, der eine wesentliche ertragsbestimmende Größe im ökologischen Landbau ist. Erste Schritte zur Übertragung des Messansatzes auf Erntemaschinen wurden im FAM mit dem Prototyp eines gezogenen Mähwerkes unternommen, an dem eine georeferenzierte Ertragsaufnahme appliziert war (Demmel et al., 2003). Auf dieser Basis kann in Zukunft eine Technik entwickelt werden, mit der die Variabilität des Leguminosenertrages in Futterbaugemengen räumlich hoch aufgeschlossen abgebildet wird, um Steuergrößen der Differenzierung zu erarbeiten und eine angepasste Bewirtschaftung abzuleiten. Die Breite der möglichen Nutzung der NIR-Spektren erlaubt es zudem parallel Methoden zur Bestimmung von Inhaltsstoffen zu erarbeiten (Welle et al., 2003).

5.1.2 Erfassung von Bodenzuständen und -prozessen

Die Erfassung von Bodenzuständen dient der Ausscheidung und Charakterisierung von Standorten, um Prozesse zu beschreiben und zielgerichtet die Bewirtschaftung darauf ausrichten zu können. Eine Übersicht zu den Methoden gibt Tab. 5.2. Grundlage dieser Erfassung war die Erhebung eines Basisdatensatzes an 450 Knotenpunkten eines rechteckigen 50 x 50 m Gitters zu Beginn des Projektes. Hier wurden umfangreiche bodenchemische und -physikalische sowie pflanzenphysiologische Untersuchungen durchgeführt (vgl. Kap. 3.1.1. Bodeninventuren). Die Ermittlung der Kenngrößen des Bodenwasserhaushaltes (Retention, gesättigte Wasserleitfähigkeit usw.) erfolgte an weiteren 19 Punkten (Musterprofile).

Diese Daten fanden Verwendung in vielen Untersuchungsbereichen des FAM (Sinowski, 1995). Scheinost (1994) entwickelte auf der Grundlage der Untersuchungsergebnisse der 19 Musterprofile Pedotransferfunktionen, die wichtige Stofffluss-Steuergrößen (Wasserspannungskurven, K/Ca-Austauschkurven, P-Sorptionskurven, austauschbare Kationen) abiotischer Bodenprozesse aus einfachen Basisigenschaften vorhersagen.

Tab. 5.2 Übersicht zu Methoden zur Erfassung von Bodenzuständen und Prozessen

Erfassungsmethode	Ziel	Kenngrößen Spannweiten
Bodenleitfähigkeit (EC _a) mit EM38	Flächige Werte von EC _a , Textur, Wassergehalten (FK, nFK,) mit Ausscheidung von Standorteinheiten und Ertragspotenzialen	EC _a (mS/m), Textur, Wassergehalt (FK, nFK), georeferenziert
Bodenradar (Ground penetrating radar)	Erfassung von Substrat- und Wassergehaltsdifferenzierungen	Geschwindigkeit bzw. Laufzeit einer erzeugten Bodenwelle (m/nsec)
Bodenwiderstand mit Horizontalpenetrometer	Beitrag zur Ableitung von homogenen Teilflächen	georeferenzierter Bodenwiderstand
Zugkraft	Beitrag zur Ableitung von homogenen Teilflächen	geschätzter Bodenwiderstand, georeferenziert (Messung mit EHR am Traktor bei der Bodenbearbeitung)
Reliefanalyse	DGM5	Höhe, Neigung, Exposition, Lokales Einzugsgebiet, TWI

Zur Beantwortung der Fragestellung, welche Prozesse räumliche Variabilität von Bodeneigenschaften verursachen und wie punktförmig erhobene Messungen in räumliche Informationen umgesetzt werden können, wurden von Sinowski (1995) die Ergebnisse der Rasterbeprobungen verwendet. Vorgehensweise war, über die Analyse der Ergebnisse dieser Rasterbeprobungen nach den räumlich differenzierenden Prozessen einer Bodeneigenschaft auf den wahren Verlauf der räumlichen Variabilität zu schließen und die geostatistische Interpolationsmethode daran anzupassen.

Scheinbare elektrische Leitfähigkeit (EM38). Neben dem radarbasierten Erfassungssystem ist die Messung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit des Bodens mit dem Detektor „EM38“ (Geonics Ltd.) ein kostengünstiges Verfahren um flächendeckend Bodeninformationen zu erhalten. Die Kombination dieses Gerätes mit dem DGPS-System liefert eine störungsfreie Kartierung dieser Messgröße bis in eine Bodentiefe von ca. 1,5 m bei einer horizontalen Auflösung unter 5m (Durlacher, 1999).

Leitfähigkeiten werden durch die Konzentration freier Ladungsträger und die Wassergehalte beeinflusst. Daraus ergibt sich eine Kopplung dieser Werte an die Bodentextur, mit einer meist engeren Beziehung zu den Tongehalten. Da die Leitfähigkeitswerte aber auch durch die Nutzung beeinflusst werden (Acker, Wiese, Düngung), kann es an den Feldgrenzen zu Diskontinuitäten kommen. Um zu einer schlagübergreifenden und zeitlich unabhängigen Darstellung zu gelangen, müssen bei den Regressionen derartige Einflussgrößen mit einbezogen werden (Schmidhalter & Heil, 2004).

Eine weitere Möglichkeit den Einfluss der Nutzung zu reduzieren, kann über eine Vorprozessierung der Daten erfolgen. Durch eine Betrachtung benachbarter Punkte entlang von Schlaggrenzen und deren Korrelation gelingt es, die bearbeitungsspezifischen Unterschiede der EM38-Messung zu minimieren und für das Gesamtgebiet zu einer flächendeckenden Beziehung des Tongehaltes zu EC25-Werten zu gelangen (Zipprich et al., 2004). Voraussetzung hierbei ist allerdings eine ausreichend horizontale Kontaktfläche an den Schlaggrenzen.

Mit der Messung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit können vertikale Texturmuster und Substratsprünge nicht unmittelbar erfasst werden. Diese sind aber im Hinblick auf Durchwurzelung und Wasserhaushalt von erheblicher Bedeutung. Die Leitfähigkeitsdaten müssen deshalb mit zusätzlichen Informationen zur standortskundlichen Einordnung unteretzt werden. Dadurch wird die kleinräumige Verteilung von Bodenkenngößen wie Textur, Feldkapazität und nutzbare Feldkapazität ableitbar.

Zur Interpretation der mit dem EM38 gewonnenen Daten wurde im FAM folgen- des Regelwerk angewandt (Schmidhalter & Heil, 2004):

- Messung von Textur und Wassergehalten an repräsentativen Punkten, ausgewählt anhand der flächigen Verteilung der scheinbaren Leitfähigkeit;
- Klassifizierung des Datensatzes nach unterschiedlichen Kriterien (empirische/statistische Differenzierung) z.B. Geologie, Art der Nutzung, Relief mittels Diskriminanzanalyse;
- Herleitung von Regressionen von Leitfähigkeit und Reliefinformationen (DGM5) mit punktuell gemessener Textur und gemessenen Wassergehalten für jedes Cluster;
- Kombination mit Ertragsdaten zur Ausscheidung von Standorteinheiten und Teilflächen mit einheitlichem Ertragspotenzial.

Zentraler Bestandteil dieses Regelwerks ist die Berechnung der Texturgehalte. Den höchsten Beitrag zur Erklärung der Varianzen liefert die Aufteilung nach den bodenbildenden Ausgangssubstraten Lösslehm (LOL) und Molasse (OSM) mit den beiden Formen der Bewirtschaftung (ökologisch, integriert) sowie den Grundwasserböden.

Die flächige Trennung der grundwasserbeeinflussten von terrestrischen Böden sowie die Aufteilung der Standorte nach den Ausgangssubstraten erfolgte mittels Diskriminanzanalysen. Im Falle von Unschärfen wurde zur Feststellung von Grenzen eine Bohrstockkartierung durchgeführt. Bei den Regressionen zur Berechnung der Texturwerte ergaben sich Bestimmtheitsmaße zwischen 0,65 und 0,9. Eingang in die Berechnungen fanden gravimetrische Texturwerte (bezogen auf den Gesamtboden).

Weiterer zentraler Untersuchungsbereich war die räumliche Verteilung der Wassergehalte bei Feldkapazität (FK) und bei nutzbarer Feldkapazität (nFK). Verwendung fanden hier die Θ/V -Beziehungen der 19 Musterprofile in Scheyern. Die Bestimmtheitsmaße zwischen diesen Größen und den Textur- sowie Reliefdaten lagen bei 0,78 und 0,94. Tongehalt sowie lokales Einzugsgebiet bzw. BFI (Selige, mündliche Mitteilung) waren die Prädiktoren.

Mittels der beschriebenen Regressionsbeziehungen wurden in einem Raster von 5×5 m die Werte von Textur und nutzbarer Feldkapazität dargestellt. Für die Auscheidung von Standorteinheiten war eine hierarchische Gruppierung anhand von charakteristischen Bodenausprägungen erforderlich. Der Anteil von Sand und Sklett, Tongehalt als auch Merkmale der Bodenbildung wie Pseudovergleyung oder Vergleyung, kolluviale Ausbildung und Schichtungen waren hier besonders geeignet. Die flächige Trennung geschah anhand von Diskriminanzanalysen. Als Prädiktoren gingen Reliefdaten, Texturwerte und teilweise auch die Ertragsdaten in die Berechnungen ein. In einigen Fällen war auch eine Auscheidung anhand der Reliefdaten möglich. Die Rückklassifizierungen bei den Diskriminanzanalysen zeigten korrekt klassifizierte Werte von ca. 80 Prozent. Diese Standorteinheitengruppen enthalten dabei einen gewissen Anteil nicht auskartierter Einschlüsse sowie Übergänge zu anderen Bodengruppen.

Bodenradar. Ziel des Einsatzes von *Ground Penetrating Radar* (GPR) ist die Erfassung der räumlichen und zeitlichen Variationen des Bodenwassergehaltes. Schwerpunkte der Untersuchungen im FAM waren die Erfassung der Genauigkeit des GPR bei der Wassergehaltsermittlung, die Erfassung der Eindringtiefe der Bodenwelle bei unterschiedlichen Frequenzen und die Ermittlung des effektiven Messvolumens (Sperl, 1999). Die Reproduzierbarkeit und Genauigkeit der GPR-Messungen lag unter optimalen Bedingungen bei bekannten Einflussgrößen bei ca. 1 Prozent. Allerdings zeigte sich, dass die Unterschiede in den ermittelten Was-

sergehalten weitaus stärker von den verwendeten Kalibrierungsfunktionen abhängen als von Geräte-, Mess- und Auswertefehlern. Je nach verwendeter Frequenz variiert die Erfassungstiefe der Bodenwelle bis 1 m. Das Messvolumen der Bodenwelle liegt je nach Länge und Abstand von Sende- und Empfangsspule und der erreichten Grenzflächentiefe bei etwa $1-3 \text{ m}^3$.

Ground Penetrating Radar ist ein geeignetes Verfahren zur kontinuierlichen, störungsfreien Bestimmung des mittleren Wassergehaltes auf einer Volumenskala von einigen Kubikmetern bzw. auf einer Flächenskala bis zu einigen 10^4 m^2 . In heterogenen Medien muss allerdings die Bestimmung der Referenzgeschwindigkeit und der Laufzeitvariationen mit großer Sorgfalt geschehen, da die Interferenzen und Überlagerungen mit anderen Wellen die Identifizierung der Bodenwelle im Radargramm erschweren, in manchen Fällen sogar unmöglich machen. Expertenwissen ist deshalb bei Einsatz und Auswertung erforderlich. Deshalb ist ein Praxisratsatz bisher noch nicht absehbar.

Bodenwiderstand und Zugkraftmessung. Als direkte Methode zur flächigen Erfassung von Bodeneigenschaften wurde die Bodenwiderstandsmessung mit einem Horizontalpenetrometer in unterschiedlichen Tiefen eingesetzt. Es hat sich allerdings gezeigt, dass die verwendete technische Ausattung der Messelemente, besonders der Feuchtesensor, stark anfällig für Verschleiß ist. Vor einem großflächigen Praxisratsatz sind deshalb noch Weiterentwicklungen nötig (Auernhammer & Demmel, 1997). Als weitere Methode zur Erfassung des Bodenwiderstands wurde die Zugkraftmessung mit elektronischer Hubwerksregelung des Zugtraktors während der Bodenbearbeitung erprobt. Die teilflächenspezifisch variierende Zugkraft wird als geschätzter Bodenwiderstand definiert.

Reliefanalyse. Prozesse der Bodenentwicklung sind in einer Landschaft vielfach an bestimmte Reliefpositionen gebunden. In der Landschaftsanalyse werden diese Zusammenhänge genutzt um Bodenzustände abzuleiten. Grundlage ist ein digitales Höhenmodell mit ausreichender Genauigkeit. Am Standort Scheyern kam ein Laserscanmodell mit einem Höhenfehler von max. 50 cm zum Einsatz. Die Reliefklassifizierung unterscheidet Kuppenlagen, Senken konvergente und divergente Hangbereiche. Ebenso wurde eine Analyse des Wassereinzugsgebietes vorgenommen (Sommer et al., 2003). Obwohl prinzipiell eine Zuordnung von erodierten Standorten zu Kuppenpositionen und divergenten Hangbereichen und im Gegenzug von Kolluvien in konvergenten Bereichen denkbar ist, war es für das Versuchsgut nicht möglich, allgemeingültige Regeln mit hoher Prognosequalität für die Zuordnung von Bodeneigenschaften zu Reliefposition aufzustellen (Sommer et al., 2003).

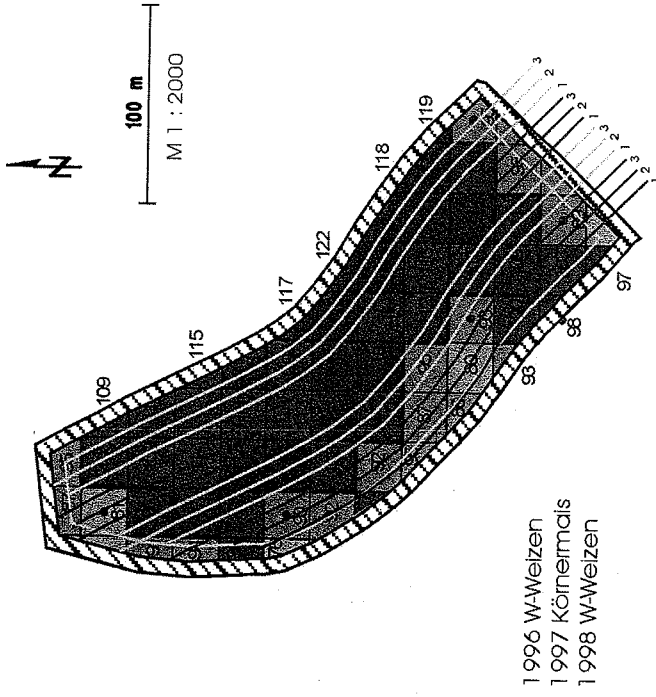
5.1.3 Erfassung der Wirkung von Bewirtschaftungsmaßnahmen auf das Agrarökosystem (Systemversuche, Streifenversuche)

Parzellen-Systemversuche. Parallel zur Einrichtung der beiden Versuchsbetriebe nachstellen, jedoch die Bodenbearbeitung und Düngungsintensität in drei Stufen variieren (vgl. Kap. 1.2.1.2). Im Systemversuch ‚integrierter Pflanzenbau‘ wird die viertgliedrige Fruchtfolge des integrierten Betriebs mit drei Bodenbearbeitungsvarianten, drei Düngungsintensitäten und drei Wiederholungen in einer Spaltanlage auf insgesamt 108 Parzellen angebaut. Im Systemversuch ‚ökologischen Landbau‘ werden die sieben Fruchtfolgefelder mit drei Bodenbearbeitungs- und drei Düngungsvarianten getestet. Aus Platzgründen wurden hier nur zwei Wiederholungen realisiert (126 Parzellen). Mit der Versuchsanstellung können die Auswirkungen von Düngung und Bodenbearbeitung auf Ertrag und andere Ökosystemzustände analysiert werden. Die Spaltanlage als Versuchsdesign und die Anzahl der Wiederholungen stellen einen Kompromiss zwischen dem Versuchsaufwand und der statistischen Absicherbarkeit der Ergebnisse dar. Die vergleichsweise lange Versuchsdauer ermöglicht die Einbeziehung von Jahreseinflüssen in die Analyse der Wirkung von Düngung und Bodenbearbeitung.

Streifenversuche. Um die Vorteile verschiedener teilflächenspezifischer Strategien miteinander vergleichen zu können, wurden verschiedene Dünge- und Saatstärkeversuche in Streifenversuchen¹ geprüft (siehe Maidl et al., 2000; Schmidhalter et al., 2001). Bei den Streifen handelt es sich um die Bearbeitungstreifen in typischer Maschinenbreite, die entweder einheitlich oder entsprechend variierender Boden- oder Pflanzeninformationen teilflächenspezifisch bewirtschaftet werden. Je nach Anlage können die Streifenversuche entweder für den Vergleich verschiedener Bewirtschaftungsstrategien oder für die Analyse teilflächenspezifischer Ertragspotenziale herangezogen werden. Während bei Weizen verschiedene teilflächenspezifische Strategien (Mapping, Online mit Mapping Overlay)² getestet wurden, war das primäre Ziel der durchgeführten Untersuchungen bei Kartoffeln und Mais, die Variabilität der Ertragsbildung zu erfassen, um daraus teilflächenspezifisch optimale Einsatzmengen ableiten zu können. Abb. 5.1 zeigt einen Schlag mit verschiedenen Ertragszonen und drei Bewirtschaftungsstrategien, die in Streifen über den Schlag durchgeführt wurden.

¹ Es handelt sich hier nicht um Streifenanlagen im Sinne des klassischen Versuchswesens.

² Mapping Ansatz: teilflächenspezifische Düngung nach Ertragspotenzial (ermittelt durch langjährige Ertragshebung) Online mit Mapping-Overlay: Düngung nach Ernährungszustand der Pflanze (Sensor) unter Berücksichtigung von standörtlichem Ertragspotenzial.



■ Ertrag < 85 % ■ 85 - 95 % ■ 96 - 105 % ■ 106 - 115 % ■ Ertrag > 115 %

Abb. 5.1 Typische Anordnung eines Streifenversuchs über einen Schlag mit heterogenem Ertragsmuster (relatives Ertragsmuster in Prozent vom mehrjährigen Schlagdurchschnitt in 25 m Rastern, 1,2,3: unterschiedliche Bewirtschaftungsvarianten in Bearbeitungstreifen (Grafik Archiv Landtechnik Weihenstephan)

Für die Auswertung der Versuche bieten sich verschiedene Methoden an. Die eine besteht in der Erfassung der Erträge und Inhaltsstoffe über die einzelnen Streifen. Die Streifen werden dann als Wiederholung der Bewirtschaftungsvarianten aufgefasst. Es ist dabei zu beachten, dass die Verteilung der Ertragsklassen über die Streifen gleich ist, da ansonsten das Ergebnis stark vom Anteil der Ertragsbereiche in den Streifen beeinflusst wird. Aus Abb. 5.1 ist allerdings leicht ersichtlich, dass von einer gleichmäßigen Verteilung der Ertragsklassen auf die einzelnen Streifen nur selten ausgegangen werden kann.

Im FAM wurde der Ertrag zur Analyse der spezifischen Reaktion des Bodens auf unterschiedliche Düngergaben in ausgewiesenen Ertragsbereichen (hoch, mit-

tel, niedrig) mit dem Parzellenmährescher erfasst. Die Miniplots waren in den Ertragszonen der Schläge verteilt, teilweise wurde auch in drei oder vier Ertragszonen differenziert. Die Zuweisung zu den Ertragszonen erfolgte aufgrund historischer Erträge der Vorjahre. Auf der Basis der Ergebnisse der Kleinparzellen im Schlag kann das Gesamtpotenzial für den Schlag geschätzt werden.

5.1.4 Ökonomisch-ökologische Optimierung

Um die komplexen Interaktionen der Landnutzung in den beiden Betriebsteilen des Klostergrundes Scheyern abbilden zu können, wurde jeweils ein Betriebsmodell aufgebaut, in das die für die Betriebe relevanten Produktionsverfahren integriert wurden. Für die Betriebsmodellierung war es notwendig, die beiden Betriebsteile modellhaft mit den für diese geltenden betrieblichen Ansprüchen, Fruchtfolge-restrictionen und relevanten Preisen abzubilden. Für jeden Betriebstyp wurden mögliche Fruchtfolgen aus den bisher realisierten Produktionsverfahren aufgestellt, die mit Hilfe von erarbeiteten Bewertungsmodulen standortspezifisch auf die Erfüllung der Teilziele analysiert wurden. In die Betriebsoptimierung gehen neben dem Deckungsbeitrag der Produktionsverfahren die Werte für die analysierten Indikatoren ein. Auf diese Weise können Szenarien sowohl auf der Basis der Maximierung des Gesamtdeckungsbeitrags als auch auf der Basis der Reduzierung von Umweltbelastungen erfolgen.

Für die Erstellung des Mehrzieloptimierungsmodells wurde das Modellsystem MODAM genutzt (Zander, 2004). Dazu musste das System mit den spezifischen Fruchtfolgen und Indikatoren, die im FAM erarbeitet wurden, angepasst werden. Für die aufzustellenden Produktionsverfahren wurden Ertrag und systemrelevante Inputgrößen in Abhängigkeit von Standortpotenzialen mit Hilfe von im FAM verfügbarem Expertenwissen geschätzt. Die Produktionsverfahren wurden mit den eingesetzten Maschinen und Inputs sowie dem Ertrag zusammengestellt. Die Auswirkungen der Verfahren auf verschiedene Umweltwirkungsbereiche wurden auf der Basis der im FAM erarbeiteten Wirkungszusammenhänge modellhaft abgebildet (Meyer-Aurich et al., 2001; Meyer-Aurich, 2004).

5.2 Auswirkungen der Änderung der Landschaftsstruktur und der Bewirtschaftung auf Ertrag und Ökonomie

5.2.1 Auswirkungen der Eingriffe in die Landschaft (einmalige Maßnahmen)

Die ökonomischen Auswirkungen der Landschaftsumgestaltung des Versuchsgutes sind in erster Linie in der Reduktion der landwirtschaftlich genutzten Flächen sowie der Verkleinerung der Produktivflächen und den damit verbundenen Arbeitsansprüchen zur Bestellung der Felder begründet.

In Tab. 5.3 sind die Veränderungen der Flächennutzung durch die Neugestaltung des Versuchsgutes zusammenfassend dargestellt. Aufgrund verbesserter Formgebung der Schläge erhöhte sich die Länge der Vorgewende im ökologischen und integrierten Betrieb nur um 5 Prozent bzw. 7 Prozent (Wechselberger, 2000). Die Verkleinerung der Felder hat daher nach Berechnungen von Wechselberger (2000) nur zu einer geringen Erhöhung des Arbeitsbedarfes (+1,5 Prozent) und der gesamten Bewirtschaftungskosten geführt.

Tab. 5.3 Flächenbilanz des Versuchsgutes Scheyern durch die Flurneuerung (nach Wechselberger, 2000)

Nutzungskategorien	Ökologischer Betrieb		Integrierter Betrieb		Änderung (%)
	vorher (ha)	nachher (ha)	vorher (ha)	Nachher (ha)	
Ackernutzung	44,2	31,7	36,9	30,1	-19%
Ökologische sgleichsflächen	1,4	5	3,8	6,5	+171%
Grünland	18,5	25,4	1,8	1,8	-
Neue Wege	-	0,6	-	0,3	-
Durchschnittliche Schlaggröße	4,0	2,3	7,4	4,3	-42%

Die Umwandlung von Ackerflächen in aus landwirtschaftlicher Sicht unproduktive Flächen scheint auf den ersten Blick einen bedeutenderen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Betriebe zu haben als die Verkleinerung der Schläge. Bei der Umstrukturierung wurden allerdings vorrangig die Flächen aus der Nutzung genommen, die ohnehin nur geringe oder unsichere Erträge lieferten. Auerswald et al. (2000) konnten beispielhaft vor der Umstrukturierung zeigen, dass auf Teilflächen negative Deckungsbeiträge erwirtschaftet wurden, die eine Stilllegung dieser Flächen nahe legt. Eine Extrapolation der Ergebnisse ist allerdings nur bedingt möglich, da die den Berechnungen zu Grunde liegenden Erträge weit unterdurchschnittlich waren. Weitergehende Analysen zur Auswirkung der teilflächenspezifischen Umwidmung der Flächen stehen noch aus.

Im Rahmen von Ausgleichszahlungen und Agrarumweltprogrammen konnten in der Vergangenheit die Einnahmeausfälle der aus der Nutzung genommenen Flächen zumindest teilweise kompensiert werden. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass Flächen mit einer Größe unter 0,3 ha und weniger als 20 m durchschnittliche Breite bisher nicht prämienerberechtigt waren und somit mit der Flächenumwidmung von kleinen Flächen auf bedeutende Prämien verzichtet werden musste.

Die Flächenumwidmung hat in vielen Fällen positive ökologische Effekte mit sich gebracht, die teilweise auch den Zielen des Landwirts entsprechen. So hat zum Beispiel die Umstrukturierung der Flächen und die Segregation von Teilflächen für einen „grassed waterway“ erheblich zu der in Scheyern festgestellten Reduktion des Bodenabtrags und damit zur Reduktion von Stoffaustag und Off-site-Schäden beigetragen (Fiener & Auerswald, 2003). Es ist davon auszugehen, dass die Reduktion von Bodenabtrag und Stoffaustag auch wirtschaftliche Effekte mit sich bringen, die allerdings bisher nicht weitergehend analysiert wurden. Es ist allerdings nicht zu erwarten, dass die positiven Effekte die Ertrags- und Prämienausfälle monetär ausgleichen können. Unter den gegebenen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen müssen daher, abgesehen von den Kosten die mit der Umstrukturierung direkt im Zusammenhang stehen, die bestehenden Anreize als ungenügend bewertet werden, damit Landwirte eine vergleichbare Umstrukturierung ihrer Flächen vornehmen.

5.2.2 Entwicklung der Erträge im integrierten und ökologischen Betrieb

Zehn Jahre nach Etablierung der beiden Betriebsteile haben sich die Erträge im ökologischen Betrieb auf 55 Prozent bzw. 64 Prozent des Niveaus im integrierten Betriebsteil für die Kulturen Weizen bzw. Kartoffeln eingependelt. Beim Vergleich der Ertragsniveaus in den beiden Betriebsteilen muss allerdings berücksichtigt werden, dass die Böden des ökologischen Betriebs im Durchschnitt geringere Wasserhaltekapazitäten haben und somit nicht allein die Bewirtschaftung die Differenzierung bestimmt. Beim Vergleich der Erträge aus den Systemversuchen der betriebsüblichen Variante erreichen die Erträge ökologischen Versuchsteil 63 Prozent bzw. 46 Prozent des Niveaus im integrierten Betriebsteil für die Kulturen Weizen und Kartoffeln (siehe Tab. 5.4)

Tab. 5.4 Durchschnittliche Erträge im integrierten (IB) und ökologischen Betrieb (ÖB) von 1993 bis 2003 (Körnermais: 1993–1998, 2002, 2003, Silomais: 1999–2003)

	IB	ÖB	Ökologisch in % von integriert
Winterweizen (dt/ha, 86 % TS)	67	37	55 %
Kartoffeln (dt/ha, FM)	370	236	64 %
Winterroggen (dt/ha, 86 % TS)		35	
Sonnenblumen (dt/ha, 91 % TS)		25	
Luzerne-Klee gras (dt/ha, TS)		77	
Grünland (dt/ha, TS)		42	
Körnermais (1993–1998, 2002, 2003, dt/ha, 86 % TS)	87		
Silomais (1999–2003, dt/ha, Frischmasse)	448		

Die Ertragsentwicklung von Winterweizen im integrierten Betrieb wurde in Scheyern in erster Linie durch die Jahreswitterung beeinflusst. Hitzeperioden und Trockenheit (1997, 1999, 2003) besonders im Monat Juli waren vielfach ertragsbestimmend (siehe Abb. 5.2). Die Ernte des Weizens im integrierten Betrieb fand etwa 1–2 Wochen nach der Weizenemte im ökologischen Betrieb statt, sodass im integrierten Betrieb ungünstigere Abreifebedingungen (Trockenheit, Hitzeperiode) einen größeren Einfluss auf die Ertragsentwicklung hatten, als dies im ökologischen Betrieb der Fall war.

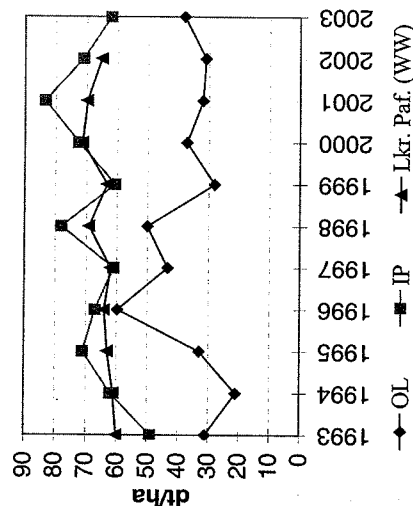


Abb. 5.2 Ertragsentwicklung Winterweizen (14 % TS) Versuchstation Klostergut Scheyern im Vergleich zum Landkreisdurchschnitt (Grafik G. Gerl)

Für die Ertragsentwicklung bei Kartoffeln gilt im integrierten Betrieb im Hinblick auf das Wettergeschehen das Gleiche wie im ökologischen Betrieb. Bei anhaltenden Niederschlägen kann die Kraut- und Knollenfäule allerdings nur durch entsprechende Fungizide gestoppt werden, sodass die gute Wasserversorgung hohe Erträge ermöglichte (siehe 2001 und 2002). Einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Kartoffelerträge hatten neue Anbauverfahren und Düngestrategien im inte-

grierten Betrieb. 1995 und 1999 führten das Mulchpflanzverfahren in Winterrüben und eine nicht angepasste N-Düngestrategie zu Ertragsseinbußen. Der starke Ertragsabfall im Jahr 2003 wurde durch Sortenwechsel und Trockenheit verursacht. Durch die Produktionsrichtung ‚Pflanzguterzeugung‘ konnte im integrierten Betrieb das volle Ertragspotenzial nicht ausgeschöpft werden. Bei den Pflanzkartoffeln wurde Anfang bis Mitte August die Reife eingeleitet (abgetötet), sodass die natürliche Wachstumszeit etwa um 3–4 Wochen verkürzt wurde.

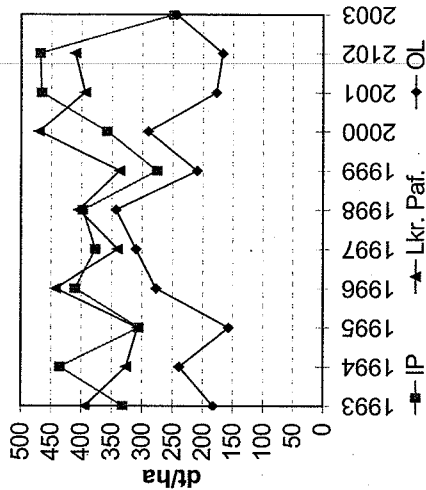


Abb. 5.3 Ertragsentwicklung Kartoffeln (Pflanzguterzeugung) Versuchstation Klostergut Scheyern im Vergleich zum Landkreisdurchschnitt (Grafik G. Gerl)

5.2.3 Auswirkungen der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung

Die Untersuchungen zur teilflächenspezifischen Bewirtschaftung zeigten, dass das ökonomische Potenzial der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung unter den klimatischen und bodenbedingten Gegebenheiten in Scheyern bisher nicht voll ausgeschöpft werden konnte. Die Ursachen dafür sind einerseits darin zu sehen, dass sich die Methoden teilflächenspezifischer Düngeregeln noch in der Entwicklung befinden; andererseits besteht insbesondere unter den humiden klimatischen Bedingungen in Süddeutschland die Schwierigkeit, den Bedarf an Pflanzennährstoffen zum Zeitpunkt der Düngung adäquat vorherzusagen. Mehrjährige Untersuchungen im FAM haben jedoch gezeigt, dass die Stickstoffeffizienz bei Winterweizen und Mais verbessert werden konnte, ohne dass es zu Reduktionen des Ertrages kam (Ebertseder et al., 2003). Weiterhin konnte mit mehrjährigen Untersuchungen gezeigt werden, dass aufgrund des reduzierten Stickstoffeinsatzes die Nitratauswaschung reduziert wird (Schmidhalter et al., 2001 und 2003).

Ein ökonomisches Potenzial in der Höhe zwischen 15 und 85 €/ha für teilflächenspezifische Bewirtschaftungsverfahren konnte für Kartoffeln und Silomais anhand von Produktionsfunktionsanalysen festgestellt werden (Heißenhuber et al., 2004). Die Analyse von teilflächenspezifischen Bewirtschaftungsverfahren von Winter-

weizen zeigte nur geringe Ertragseffekte. Allerdings bewirkte die teilflächenspezifische Düngung eine deutliche Anhebung der Qualität des Ernteguts sowie eine erhöhte Effizienz des Mineraldüngereinsatzes (Huber et al., 2003). Die ökonomischen Effekte dieser Verfahren waren von Jahr zu Jahr sehr unterschiedlich und stark von den verwendeten Düngelgorithmen abhängig. Der Schlüssel für die erfolgreiche teilflächenspezifische Düngung liegt in der Identifizierung von bestmöglich angepassten Düngelgorithmen.

Mit Hilfe des Mapping-Ansatzes wurden erste erfolgversprechende Ansätze erprobt, mit denen umweltlastende Effekte erzielt werden konnten. Durch die Kombination von Mapping mit Online-Ansätzen konnte eine weitere Verbesserung erreicht werden. In der Praxis sind zur Zeit nur einfache Mapping-Ansätze oder rein sensorbasierte Systeme im Einsatz. Bevor kombinierte Systeme praxistauglich sind, ist noch weitere Entwicklungsarbeit notwendig.

5.3 Agrarökosysteme verstehen: Grundlagen für ein optimiertes Management von Agrarökosystemen

5.3.1 Notwendige Standorteigenschaften zum Verständnis von Agrarökosystemen und deren räumliches Muster

Die Untersuchungen im FAM haben das Verständnis dafür verbessert, welche Standortinformationen mit welcher Auflösung benötigt werden, um die Dynamik von Landnutzungssystemen besser zu verstehen. Diese Kenngrößen, die in Scheyern räumlich hoch variabel sind, lassen sich bezüglich ihrer Variation über die Zeit in quasi stabile Informationen (z.B. Bodenkenngroßen, Relief), hoch variable Größen (z.B. Witterung, N-Verfügbarkeit) und anthropogen variierte Größen (Nutzungsgeschichte, Landschaftsgliederung, Betriebssystem, einzelne Bewirtschaftungsmaßnahmen) einteilen. Typischerweise ergibt erst die Kombination unterschiedlich variabler Ausgangsinformationen ein logisches Bild zur Erklärung der Ertragsmuster.

Hochauflösende Methoden der Fernerkundung und verschiedener GPS-gestützter Sensoren haben eine bisher nicht gekannte Fülle an neuen Informationsgrundlagen verfügbar gemacht. Andere Methoden haben sich als zu aufwändig für einen praxisrelevanten Einsatz erwiesen. Insbesondere die Verknüpfung verschiedener Informationsgrundlagen macht Boden- und Pflanzeninformationen in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung verfügbar, sodass das Erkennen von raum-zeitlichen Mustern ermöglicht wird. Die Anwendung dieser Informationen für eine Teil-schlagbewirtschaftung wurde bisher lediglich im Betrieb des integrierten Landbaus eingesetzt. Ein Grund dafür ist, dass im ökologischen Anbau der Betriebsmittelnutzung erheblich niedriger ist als im konventionellen Pflanzenbau und zudem derzeit nur wenige Vorstellungen für teilflächenspezifische Bewirtschaftungsansätze existieren.

Die Umsetzung von teilflächenspezifischen Bewirtschaftungskonzepten im integrierten Betrieb setzt die Kenntnis der räumlichen Variabilität von Standorteigenschaften und die daraus resultierenden differenzierenden Wachstumsbedingungen voraus. Zur Abbildung des räumlichen Musters von Standorteigenschaften haben sich verschiedene Methoden als hilfreich erwiesen. Scheinost (1994) hat anhand der Daten der 19 Musterprofile Pedotransferfunktionen (PTF) für Wasserspannungskurven, K/Ca-Austauschkurven, P-Sorptionskurven, austauschbare Kationen erstellt. Diese neu entwickelten oder verbesserten PTFs weisen (mit Ausnahme der gesättigten Wasserleitfähigkeit) eine hohe Vorhersagesicherheit innerhalb des Generierungsdatensatzes auf. Wegen der Einbeziehung bekannter, naturwissenschaftlich gut begründeter Zusammenhänge sind diese besser als nur rein nach statistischen Kriterien erzeugte Regressionsgleichungen. Eine Validierung an anderen Punkten in Scheyern und darüber hinaus steht allerdings noch aus.

Die für die räumliche Variabilität der Bodeneigenschaften verantwortlichen Prozesse in der Bodenlandschaft wurden in Scheyern nach Sinowski (1995) vor allem von den bodenbildenden Faktoren „Menschliche Tätigkeit“, „Ausgangsgestein“ und „Relief“ beeinflusst. Danach lassen sich Bodenräume mit Substraten aus tertiären Ausgangsgesteinen mit topografischen Variablen von Bodenräumen mit Substraten aus quartären Ausgangsgesteinen trennen. Die nutzbare Feldkapazität weist eine anisotrope räumliche Verteilung mit den Talrichtungen auf. Texturvariablen weisen in einem durch tertiäres Ausgangsgestein geprägten Bodenraum eine höhere Variabilität bei geringerer Reichweite auf als Böden aus Quartär. Nachteilig bei der Vorgehensweise von Sinowski (1995) ist allerdings das fehlende Zusammenführen der Einzelergebnisse zu flächendeckenden standortkundlichen Aussagen als auch der zu große Rastermaßstab.

Das Verscheiden standörtlicher Informationsgrundlagen mit flächenhaften Daten des EM38 führt, wie beschrieben, zu einer räumlichen Differenzierung von Standorten und ermöglicht die Ableitung relevanter, standörtlicher Kenngrößen.

In Abb. 5.4 bis Abb. 5.6 sind die flächigen Verteilungen von EC_a und Ton sowie der nutzbaren Feldkapazität (gewichtete Mittelwerte V-Modus) im Bereich der Flächen A16, 17 und 18 dargestellt. Auffallend ist die beträchtliche Variabilität der dargestellten Parameter. Niedrige Werte von EC_a als auch Ton treten in Bereichen mit überwiegend sandig-kiesigen, tertiären Ablagerungen sowie fehlenden bzw. geringen Loesslehmabdeckungen auf (vor allem in nordwestlichen Teilen des Kartenausschnittes in Abb. 5.4). Ebenfalls geringere Beträge beider Parameter zeigen sich in der Erosionsrinne vom Schlag A16 (nord-östliche Spitze) nach Osten über Schlag A17 zum Schlag A18. Hier wurde Ton infolge häufig auftretenden Oberflächenabflusses verlagert (Durlleser, 1999).

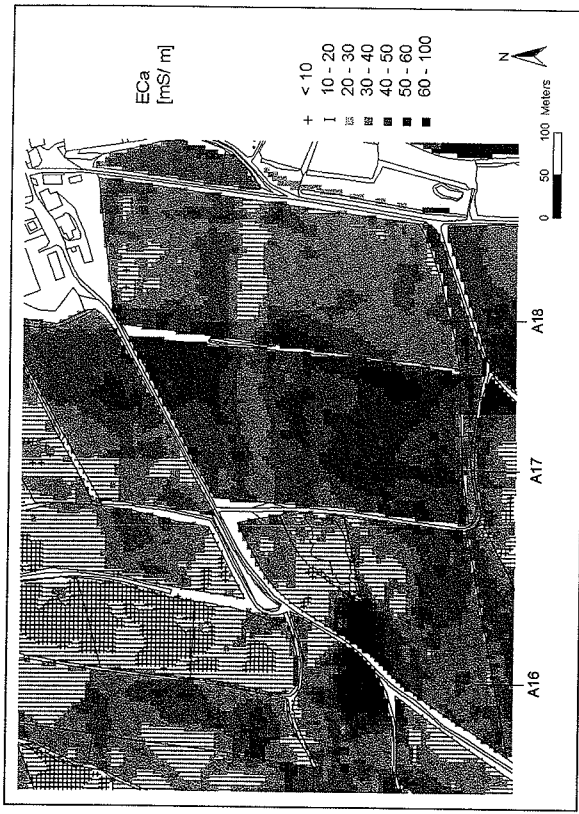


Abb. 5.4 Verteilung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit (EC_a , mS/m), gemessen im V-Modus

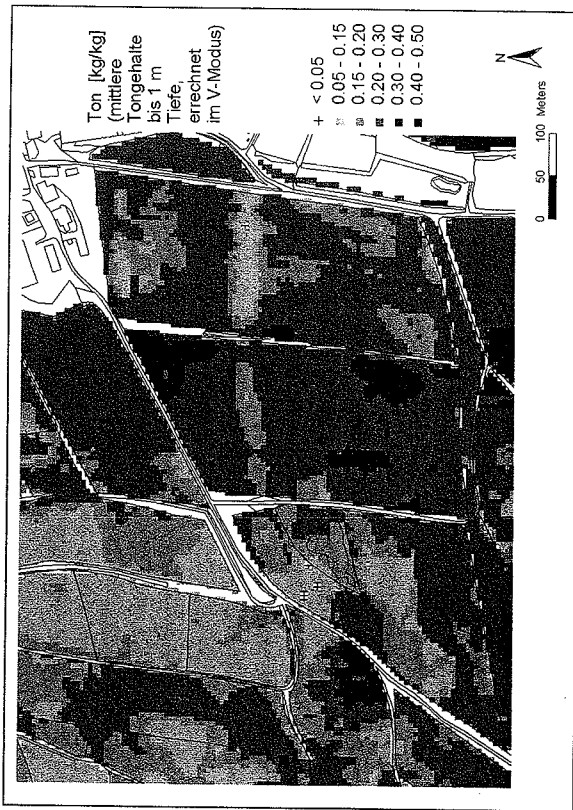


Abb. 5.5 Verteilung der Tongehalte [kg/kg Grobboden], gewichtet nach V-Modus (Grafik K. Heil)

Die Tongehalte weisen insbesondere auf dem Schlag A16 näherungsweise eine Parallelität zu den Höhenlinien auf. Nach Durlusser (1999) stehen hier sandig-kiesige und tonige Schichten des Tertiärs an. Mit rund 100 bis 200 mm/1m weisen die Beträge der nutzbaren Feldkapazität (Abb. 5.6) innerhalb der Flächen beträchtliche kleinräumige Schwankungen auf. Kolluviale und Böden aus Lösslehm zeigen hier die höchsten Beträge.

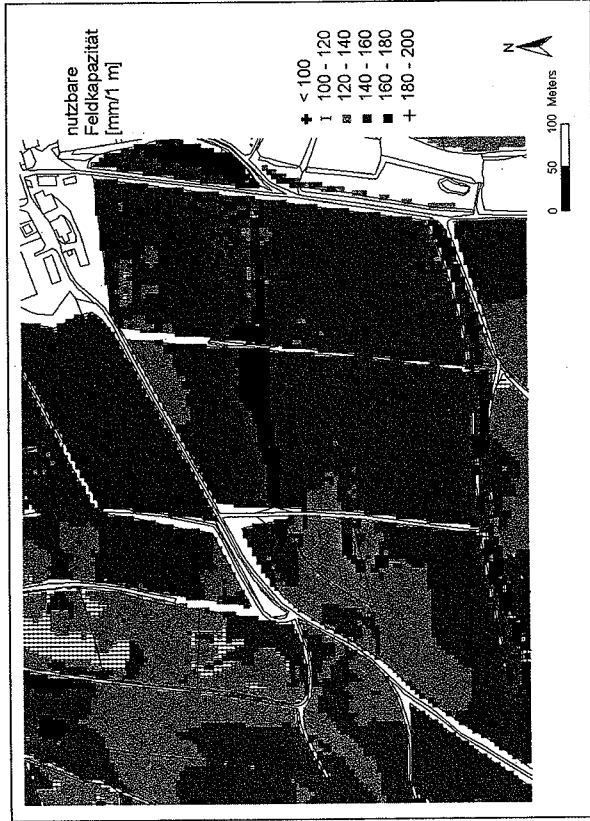


Abb. 5.6 Nutzbare Feldkapazität [mm/1m], gewichtet nach V-Modus (Grafik K. Heil)

Als Beispiel für das Ergebnis der Herleitung der Bodenformen ist in Abb. 5.7 der Schlag A16 (Zuordnung im 5 x 5 m Raster) dargestellt. Die Bedeutung der Bodenformen für den Ertrag kann am Vergleich der Abbildungen 5.7 und 5.8 erkannt werden. Abb. 5.8 zeigt den relativen Ertrag des Winterweizens der Jahre 1999 und 2001. Die niedrigsten Erträge weisen die Flächenteile mit Pseudovergleyung auf (östliche Fläche). Innerhalb dieser Gruppe wirkt die Tiefe des stauwasserbeeinflussten Unterbodens (Sw- bzw. Sd-Horizont) wuchsdifferenzierend. Während im südöstlichen Bereich die Pseudovergleyung (Braunerde-Pseudogley) bereits unmittelbar unter dem Oberboden (Ap) beginnt, liegt die Obergrenze des (Sw) bei der pseudovergleyten Braunerde bei rund 60 cm Tiefe. Hydromorphe Böden haben je nach Ausprägung des Wassereinflusses für das Pflanzenwachstum eine Reihe von Nachteilen:

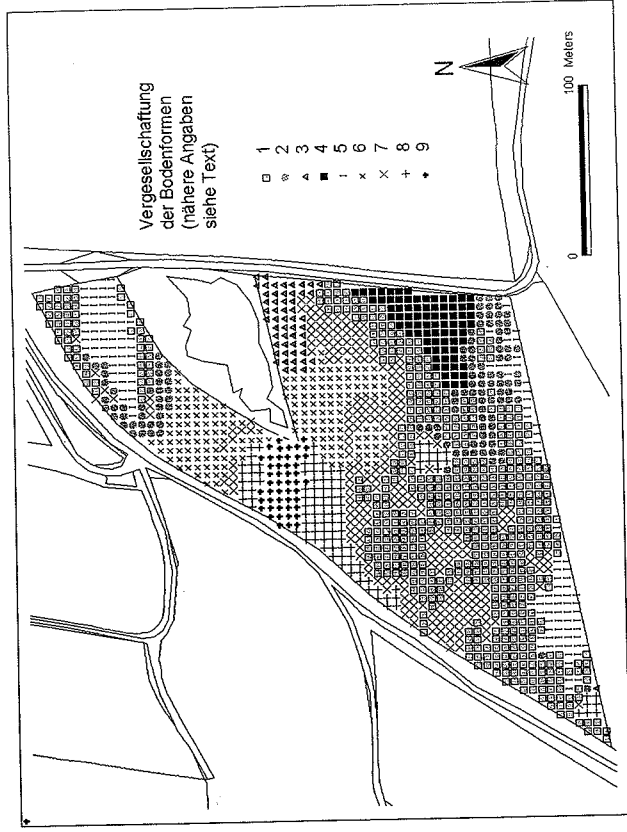


Abb. 5.7 Vergesellschaftung der Bodenformen auf der Fläche A16 (Grafik K. Heil)

- 1 : Parabraunerde/Braunerde aus Lösslehm (mit kiesiger OSM)
- 2 : Braunerde aus Lösslehm mit s/sl, kiesiger OSM
- 3 : pseudovergleyte Braunerde aus Lösslehm (mit wenig kiesiger OSM)
- 4 : Braunerde-Pseudogley aus Lösslehm (mit wenig kiesiger OSM)
- 5 : (pseudovergleytes) Kolluvium aus Lösslehm
- 6 : Braunerde aus lehmiger fein- und mittelsandiger OSM mit etwas Kies und Lösslehm (häufig mit 2–3 dm LOL)
- 7 : Braunerde aus OSM-Material mit 3–5 dm lehmiger Deckschicht
- 8 : Braunerde aus 3–5 dm lehmiger Deckschicht (mit Kies) über toniger OSM
- 9 : (Braunerde)-Pseudogley aus lehmiger Deckschicht mit Kies über tonig-lehmiger OSM

- Die längere Nassphase im Frühjahr führt zu verzögerter Erwärmung infolge der hohen spezifische Wärmekapazität des Wassers.
- Stoffzustand und pH-Wert variieren mit dem Wassergehalt. Ist der Sauerstoff aufgebraucht so fungieren je nach Oxidationsstufe verschiedene organische und anorganische Verbindungen als Akzeptoren von Elektronen. So wird z.B. Nitrat zu N₂O und N₂ und in weiteren Schritten Mn(III,IV)- und Fe(III)-Oxide reduziert. Dies hat unter anderem zur Folge, dass durch gasförmige N-Verluste in hydromorphen Böden die NO₃-N-Effizienz geringer ist als auf terrestrischen Standorten.
- Wassersättigung unterbindet die O₂-Versorgung der Wurzeln, da die O₂-Diffusionsrate innerhalb der wassergefüllten Poren erheblich reduziert ist. In

den Oberboden eindringender Sauerstoff wird zudem schnell durch Mikroben konsumiert.

Die reduzierte biologische Aktivität hat eine gehemmte Nährstoffmineralisierung zur Folge (insbesondere N-Mineralisation).

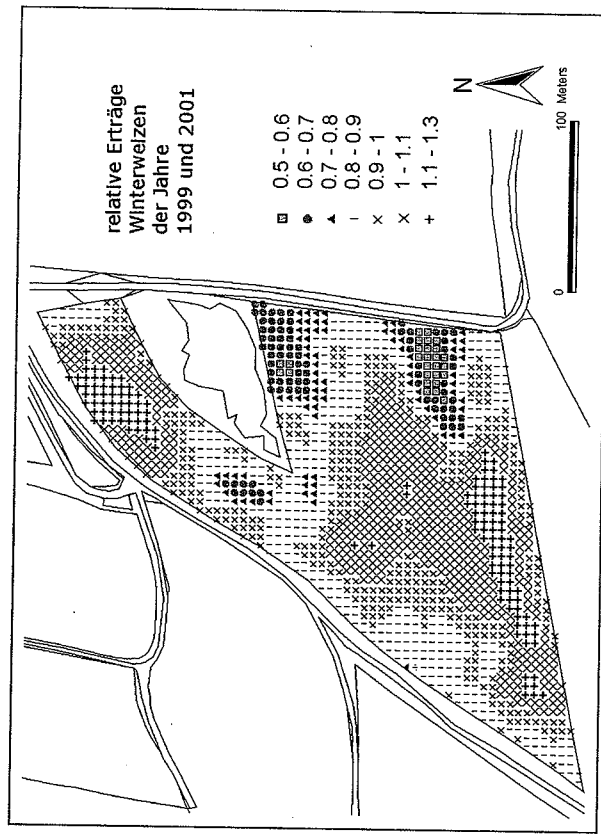


Abb. 5.8 Relative Erträge des Winterweizens, errechnet aus den Medianen (Trockenmasse) der Jahre 1999 und 2001 (Grafik K. Heil)

Ein Vorteil hydromorpher Standorte ist aber vermutlich eine höhere Ertragsstabilität in eher trockenen Jahren. Dieser Befund gilt allerdings nicht für Standorte mit hohen Tongehalten bis in den Oberboden. Hier treten bei trockeneren Verhältnissen deutliche Schwundrisse auf, die Wurzelverletzungen zur Folge haben. Kolluviole erhalten durch Stoffeintrag zusätzliche Wasser- und Nährstoffinputs und zeigen deshalb höhere Erträge. Allerdings neigen diese infolge ihrer Reliefsituation auch zur (Pseudo-)Vergleyung. Dies dürfte der Grund für den unter dem Median liegende Ertrag im östlichen Bereich des Kolluviums (an der Grenze zwischen den Schlägen A16 und A17) sein.

Auf derartigen Standorten führen feuchtere Jahre zu Ertragsrückgängen. Die höchsten Erträge weisen die Flächen mit tieferen, nicht pseudovergleyten Böden auf. Günstige physikalische, chemische und biologische Eigenschaften und keine oder nur geringe Skelettanteile bei hoher nutzbarer Feldkapazität zeigen Standorte mit hohem Lösslehmanteil.

Die dargestellten Zusammenhänge zwischen relativen Erträgen von Winterweizen und Standortigenschaften spiegeln sich auch in der Gegenüberstellung der nutzbaren Feldkapazität mit den jahresspezifischen standortsbezogenen Erträgen wider (Abb. 5.9).

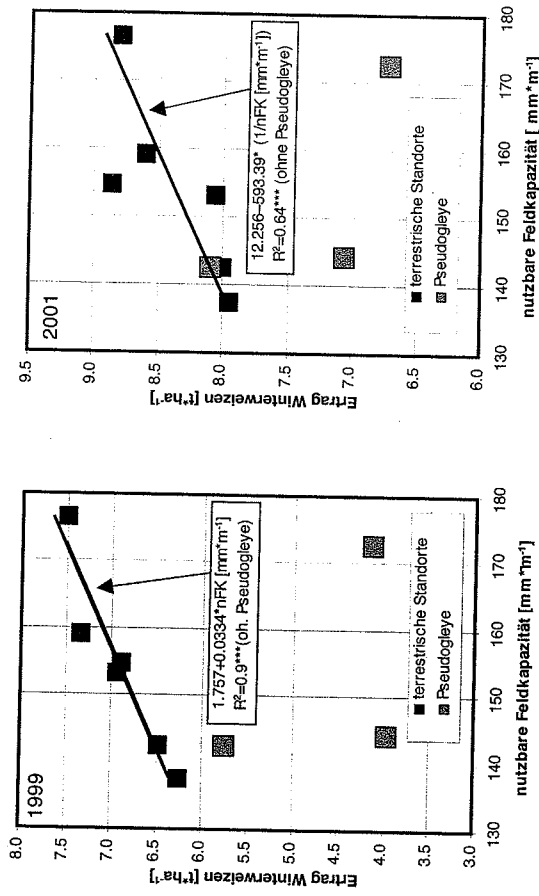


Abb. 5.9 Beziehungen zwischen nutzbarer Feldkapazität und Erträgen von Winterweizen (Trockenmasse) der Standorteinheiten der Fläche A16 für die Erntejahre 1999 und 2001 (Grafik K. Heil)

Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Hauptvegetationszeit (Mai bis Juli) 2001 trockener (Tagesmittel) als 1999 war (268 mm gegenüber 335 mm; Meteorologische Messtation Versuchsgut Scheyern. Werden die pseudovergleyten Standorte außer Acht gelassen, so ergeben sich für die erfassten Wertebereiche nahezu lineare Verhältnisse zwischen beiden Variablen (Selige, 1997) von den Braunerden aus lehmiger fein- und mittelsandiger OSM mit etwas Kies und Lösslehm, über die Braunerden aus OSM-Material mit 3–5 dm lehmiger Deckschicht, hin zu den Kolluvien und Parabraunerden/Braunerden aus Lösslehm (mit kiesiger OSM).

Die niedrigeren Erträge der Pseudogleye waren in der feuchteren Vegetationsperiode 1999 ausgeprägter als 2001. Der oben erläuterte Einfluss von stagnierendem Wassergehalt wird hier deutlich. Feuchtere Jahre sind deshalb für die flächige Ausscheidung derartiger Standorte erforderlich. Für die Teilschlagwirtschaft bedeutet dies, dass sich Art und Intensität von Nutzung und Düngung als auch die Beurteilung des Nährstoffzustandes an den standörtlichen Verhältnissen zu orientieren haben.

Eine vergleichbare Auflösung von Standortinformationen wie mit den EM38-Messungen kann durch die Auswertung von Fernerkundungsdaten erreicht werden. Die Fernerkundung liefert eine Abbildung des Blattflächenindex mit einer Ortsauflösung von ca. 1 m² (Sommer et al., 2001). Ein Vergleich über die Jahre zeigt sowohl ortsfeste Strukturen der Bestandesentwicklung als auch Veränderungen je nach Witterungsverlauf. Verschiedene standortkundliche Ursachen haben eine gleichgerichtete Auswirkung und lassen sich so mittels einer einzelnen Aufnahme nicht abbilden. Eine Interpretation der beobachteten Strukturen kann nur in Verbindung mit weiteren Erfassungsmethoden erfolgen. Die Aufnahmen zeigen eine Heterogenität der Verhältnisse, welche weit unterhalb der Abtastrate des 50 m Beprobnungsrastrer liegt. Wie bei den räumlich differenzierenden EC25-Werten kann eine Zuordnung zu Bodentypen nur über eine Kombination mit weiteren Informationsquellen erfolgen (Sommer et al., 2003).

5.3.2 Bedeutung des räumlichen Musters der N₂-Bindung

Die N-Versorgung in Betrieben des ökologischen Landbaus beruht wesentlich auf der symbiontischen N₂-Bindung der Leguminosen. Zur optimierten Nutzung dieses N in der Fruchtfolge fehlen bisher Kenntnisse zur Variabilität und Steuerung der Höhe der N₂-Bindung innerhalb eines Schlags und dessen Bedeutung in der Fruchtfolge. Im FAM wurde über Parzellenversuche und Feldmessungen eine vereinfachte Messung der N₂-Bindung von Klee-Luzerne-Gras (KLG) validiert, die auf zwei wesentlichen Aspekten aufbaut: (1) 90 Prozent der N-Aufnahme von Leguminosen in einem Gemenge mit Gräsern stammt aus der N₂-Bindung (Heuwinkel 2001; Heuwinkel et al., 2001) und (2) der Leguminosenanteil lässt sich einfach und schnell mit NIRS bestimmen (s. Kap. 5.1.1). Durch die Multiplikation bei den Daten mit dem Gemengeertrag und dem N-Gehalt der Leguminosen errechnet sich die N₂-Bindung des KLG bezogen auf den beernteten Teil des Sprosses. Die Darstellung der räumlichen und zeitlichen Differenzierung der N₂-Bindung im Schlag präzisiert die Abschätzung des tatsächlichen N-Gewinns für den Betrieb und ist Basis zur Untersuchung der Vorruchtwirkung von KLG innerhalb eines Schlages.

Die Variabilität des Leguminosenanteils in der Fläche war über die Zeit reproduzierbar, während der Ertrag stärker in Abhängigkeit von der Witterung schwankte. Beim Leguminosenanteil erwies sich auf allen Messebenen die N-Verfügbarkeit im Boden als treibende Kraft (Heuwinkel et al., 2002). Dies war im nachfolgenden Weizen trotz N-Limitierung nicht erkennbar, da er vermutlich stärker von lateralen Nährstoffflüssen beeinflusst wurde (Heuwinkel et al., 2002). Die Standortwirkung war für die Differenzierung der Getreideerträge im Schlag damit weitaus wichtiger als die Vorruchtwirkung des KLG. Die Untersuchungen lassen aber nicht den Schluss zu, dass die Differenzierung, die das KLG zeigt, längerfristig nicht doch das Ertragspotenzial eines Standortes beeinflusst. Nachdem sich der Leguminosenanteil im FAM als guter Indikator für die N-Versorgung eines Bodens

erwiesen hat, kann die Kombination mit der Differenzierung des Weizenertes, der stärker von lateralen Flüssen abhängig war, Hinweise auf die Bedeutung lateraler (Nährstoff-) Flüsse bringen, deren Erfassung sich bisher sehr schwierig gestaltet. Weniger Erfolg dürfte aber der Einsatz von KLG als Indikator für N-Verfügbarkeit im integrierten Landbau haben, da eine Grundvoraussetzung für das Funktionieren dieses Indikators eine starke N-Limitierung im Boden ist (Heuwinkel, 2001; Heuwinkel et al., 2001), die im integrierten Landbau selten erfüllt ist.

5.3.3 Bedeutung von Bodenbearbeitungssystem und Düngung für den Ertrag (Ergebnisse des „Systemversuchs“)

Im integrierten Systemversuch hatte die N-Düngung bei allen Kulturen einen signifikant positiven Einfluss auf den Ertrag (Varianzanalyse, Irrtumswahrscheinlichkeit 5 Prozent). Während die Erträge der Kulturen beim Einsatz des Pfluges und des Grubbers in den Varianten 1 und 2 (wendend = Pflug, tief mischend = Grubber / Rototiller) auf gleicher Höhe lagen, waren Ertragsseinbußen von 5–15 Prozent in Variante 3 (ohne/flach mischend = Grubber / Rototiller) feststellbar. Die Differenzen konnten aber nur bei Körnermais und bei Weizen nach Körnermais abgesichert werden (Abb. 5.10).

Der Feldaufgang und die zögerliche Jugendentwicklung in den Versuchsjahren wurde erheblich durch das Bodenbearbeitungssystem der Variante 3 beeinflusst. Lückige Bestände bei Weizen und noch deutlicher bei Mais waren als gravierende Mängel erkennbar. Die Ursachen lagen im hohen Maisstrohgehalt im Saathorizont bei Weizen und den niedrigeren Bodentemperaturen im Frühjahr, insbesondere nach der Maissaat. Eine adaptierte Bestelltechnik für die Bewirtschaftungsbedingungen in Variante 3 stand nicht zur Verfügung. Dies muss als Hauptursache der niedrigeren Erträge genannt werden.

Im ökologischen Systemversuch führte die Reduzierung der Bodenbearbeitung zu ähnlich hohen Ertragsseinbußen, die jedoch nur bei Roggen aufgrund der geringen Standardabweichungen statistisch absicherbar sind (Abb. 5.11). Dabei wirken die Konkurrenz durch Wildkräuter und Kleeergras-Durchwuchs und eine gehemmte N-Mobilisierung im Frühjahr gleichsinnig und begrenzen vor allem den Ertrag von Weizen nach Kleeergras und von Kartoffeln. Die differenzierte organische Düngung wurde nur bis 1997 durchgeführt, zeigte aber dennoch im Mittel von 1993–2003 bei Sonnenblumen, Kartoffeln und Weizen nach Luzerne-Kleeergras statistisch absicherbare Wirkungen. Weitergehende Auswertungen zur Wirkung von Düngung und Bodenbearbeitung werden an anderer Stelle diskutiert.

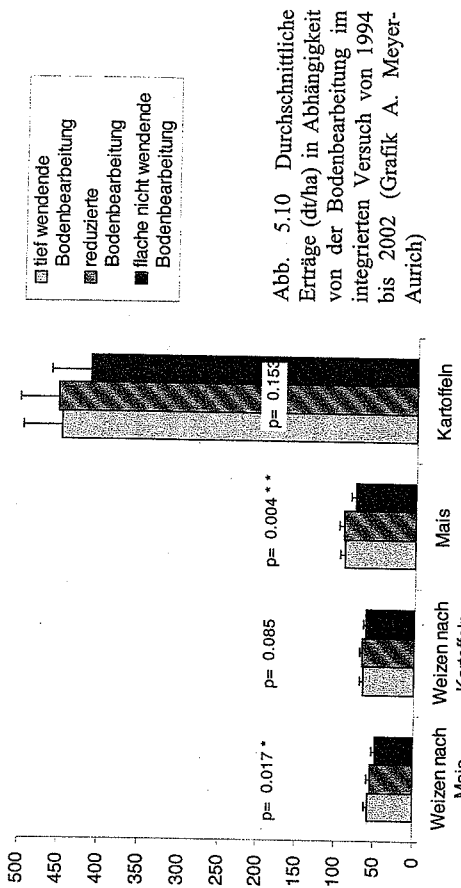


Abb. 5.10 Durchschnittliche Erträge (dt/ha) in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung im integrierten Versuch von 1994 bis 2002 (Grafik A. Meyer-Aurich)

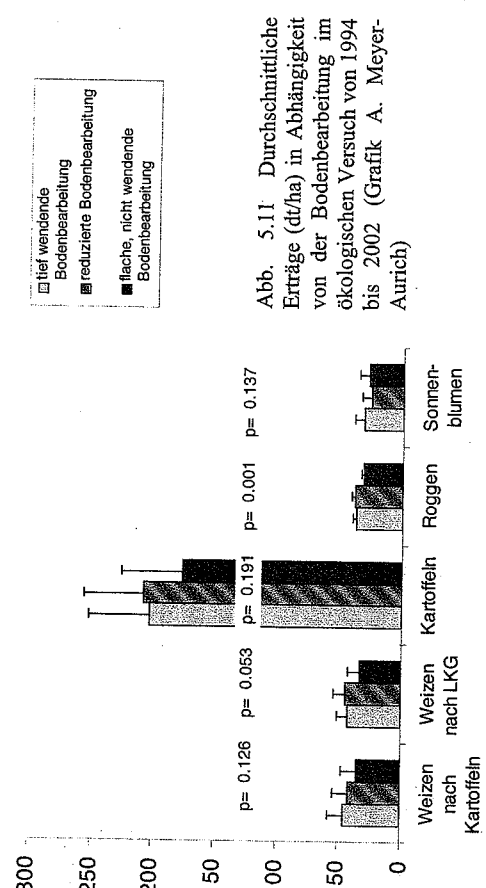


Abb. 5.11 Durchschnittliche Erträge (dt/ha) in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung im ökologischen Versuch von 1994 bis 2002 (Grafik A. Meyer-Aurich)

Zur Analyse der ökonomischen Wirkungen von Bodenbearbeitung und Düngung wurde für den integrierten Versuchsteil für jedes Verfahren der Gewinn der Verfahren ohne Prämien und Ausgleichszahlungen berechnet (Abb. 5.12). Bei den Berechnungen wurde unterstellt, dass der Ersatz des Pfluges zu einer Kostenreduktion von 20 bis 30 €/ha für die beiden reduzierten Bodenbearbeitungsvarianten führt. Zusätzliche Kosten von 10 €/pro ha und Jahr wurden für eine alle zwei Jahre notwendige Totalherbizidbehandlung in den reduzierten Bodenbearbei-

tungsvarianten veranschlagt. Darüber hinaus wurde ein Anspruch an die Arbeitsentlohnung in Höhe von sieben €/ha angenommen.

Die varianzanalytische Auswertung der Wirkung von Bodenbearbeitung und Düngung auf den Gewinn über zwei Rotationen zeigte signifikante Hauptwirkungen von Bodenbearbeitung und Düngung sowie signifikante Wechselwirkungen. Die Erlöse bei der niedrigen und mittleren Düngestufe (vgl. Tab. 1.2, S. 37) sind bei Pflug- und Grubbereinsatz gleich hoch und können bei der mischenden Bodenbearbeitung durch eine Steigerung der N-Düngung verbessert werden, während dann in der Pflug-Variante das ökonomische Optimum überschritten ist. Bei der reduzierten Bodenbearbeitung ist die ökonomische Wirkung der N-Düngung vergleichsweise stärker und das N-Optimum liegt wohl weit höher als im Versuch realisiert wurde. Das ist darauf zurückzuführen, dass N in den Humusvorrat des Bodens eingebaut und somit, zumindest mittelfristig, immobilisiert wird (Kainz et al., 2005).

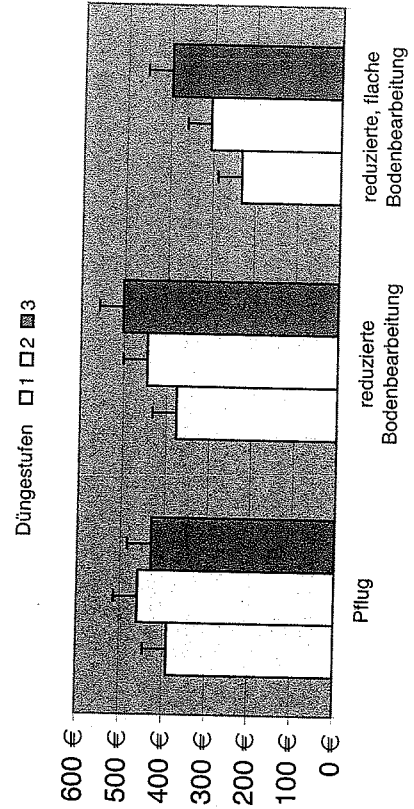


Abb. 5.12 Mittelwerte und gesicherte Differenz (5 Prozent Irrtumswahrscheinlichkeit) des Gewinnbeitrags (€/ha) verschiedener Bodenbearbeitungs-Düngungskombinationen aus dem integrierten Systemversuch (Annahmen siehe Text, Grafik A. Meyer-Aurich)

5.3.4 Mehrzieloptimierung mit MODAM

Die mit dem Modellsystem MODAM durchgeführten Modellrechnungen zeigen, welche ökonomischen Konsequenzen zu erwarten sind, wenn Umweltziele als Betriebsziel (Nebenziel) in die Betriebsplanung einbezogen werden. In den Abbildungen Abb. 5.13 bis Abb. 5.15 sind Ergebnisse zur Analyse des Zusammenhangs von Erosion und Gesamtdeckungsbeitrag des ökologischen und integrierten Betriebs dargestellt.

Jeder Punkt der Grafik in Abb. 5.13 stellt einen Simulationslauf mit nach rechts zunehmender Restriktion an den zulässigen Bodenabtrag dar. Es ist erkennbar, dass im integrierten Betrieb bis zu einer Restriktion auf 4 t/ha Bodenabtrag geringe Einkommenseinbußen hinzunehmen sind. Dies wird im Modell durch die Integration von Zwischenfrüchten und Reduzierung der Bodenbearbeitung vor Mais und Kartoffeln erreicht. Weizenanbau wird im Modell mit wendender Bodenbearbeitung durchgeführt, da der erosionsmindernde Effekt der Bodenbearbeitung bei Weizen vergleichbar klein ist.

Im ökologischen Betrieb ist der Bodenabtrag im ökonomischen Optimum aufgrund der geringeren Erosionsanfälligkeit der Flächen (z.B. aufgrund kürzerer Hanglängen) und der geringeren Erosionsneigung der Fruchtfolgen aufgrund des geringeren Anteils an Reihenkulturen deutlich niedriger als im integrierten Betrieb. Eine weitere Reduktion des Bodenabtrags wird im Modell hauptsächlich durch die Integration von Zwischenfrüchten und Untersaaten erreicht. Da diese Maßnahmen allerdings aufgrund der Notwendigkeit den Stickstoff im System zu halten, zum Teil schon systemimmanent sind, ist das Potenzial für eine Vermeidung von Bodenabtrag über das im ökonomischen Optimum erreichte Maß hinaus begrenzt.

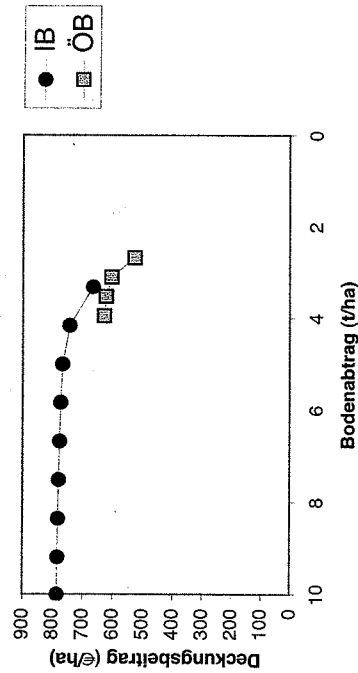


Abb. 5.13 Trade-Off-Kurve zwischen Bodenabtrag und Deckungsbeitrag im integrierten (IB) und ökologischen (ÖB) Betrieb (Grafik A. Meyer-Aurich)

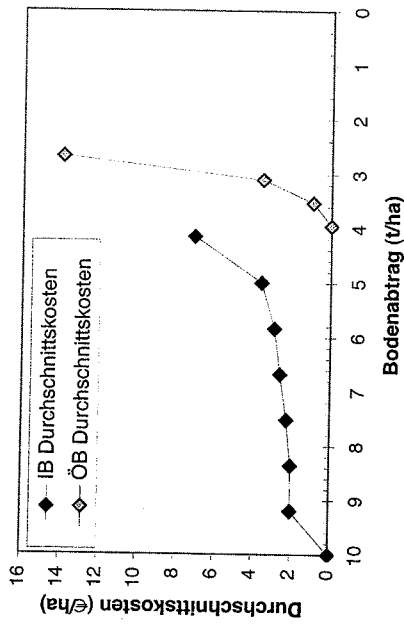


Abb. 5.14 Durchschnittskosten der Vermeidung von Bodenabtrag in Abhängigkeit vom Bodenabtrag für den integrierten (IB) und ökologischen (ÖB) Betrieb (Grafik A. Meyer-Aurich)

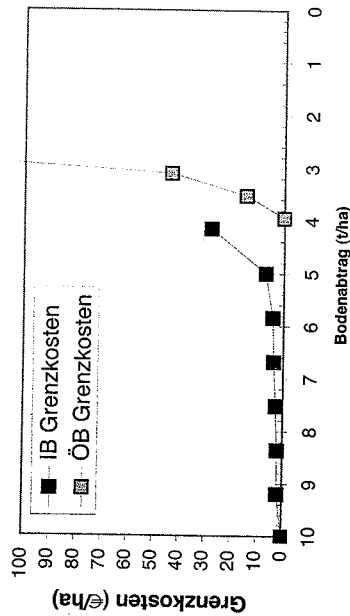


Abb. 5.15 Grenzkosten der Vermeidung von Bodenabtrag in Abhängigkeit vom Bodenabtrag für den integrierten (IB) und ökologischen (ÖB) Betriebsteil (Grafik A. Meyer-Aurich)

Aus den Trade-Off-Kurven lassen sich Durchschnitts- und Grenzkostenkurven für verschiedene Bodenabträge berechnen (Abb. 5.14 und Abb. 5.15), die Aufschluss darüber geben, inwiefern die Betriebe bestimmte Umweltauflagen erfüllen können. Die Grenzkostenkurven können auch als Angebotsfunktionen für Umweltleistungen aufgefasst werden. Wenn zum Beispiel die Reduzierung von Bodenabtrag mit einem theoretisch angenommenen Preis von 20 €/t honoriert würde, läge der ökonomisch optimierte Bodenabtrag des ökologischen Betriebs bei 3,5 t/ha und der des integrierten Betriebs bei 4,5 t/ha. In diesem Szenario wäre der Bodenabtrag gegenüber der ökonomisch optimierten Bewirtschaftung ohne Restriktionen im ökologischen Betrieb um 0,5 t/ha und im integrierten Betrieb um

5,5 t/ha niedriger. Der integrierte Betrieb hat demnach ein deutlich höheres Potenzial zur Reduzierung von Bodenabtrag, als der ökologische.

Trade-Off-Kurven und Grenzvermeidungskostenkurven haben ein bisher wenig genutztes Potenzial, Optionen der Landnutzung und deren Auswirkungen auf die Umwelt und das Einkommen der Landwirte transparent zu machen und zur Diskussion zu stellen. Die Zusammenhänge können zum Beispiel herangezogen werden, um die Zumutbarkeit von Umweltauflagen zu diskutieren oder die Effektivität von Anreizsystemen zu überprüfen. Die Ableitung von aus gesellschaftlicher Sicht optimalen Umweltwirkungen sind theoretisch mit Hilfe der Grenzkostenkurven möglich. Allerdings ist der Grenznutzen, der durch eine verbesserte Umweltqualität erzielt wird, nur in Ausnahmefällen bekannt. Bei der Bodenerosion ist der externe Nutzen einer Verringerung von Bodenabtrag besonders schwer zu quantifizieren, da der Bodenabtrag interne und externe Effekte verursacht.

In anderen Bereichen, wie zum Beispiel der Emission von Treibhausgasemissionen sind Nutzenfunktionen leichter abzuleiten, da durch politische Vorgaben nationale Ziele definiert wurden. In einer Studie von Stein & Strobel (1997) wurden Grenzvermeidungskosten für Deutschland in der Höhe von ca. 100 €/t CO₂ zur Erreichung des in Kyoto festgelegten Ziels zur Verminderung der Emissionen treibhausrelevanter Gase berechnet. In Modellrechnungen konnte gezeigt werden, dass im integrierten Betrieb für weit geringere Kosten Treibhausgasemissionen reduziert werden können (Meyer-Aurich, 2004). Die Reduktion der Treibhausgasemissionen im Modell wurde weitgehend durch eine Reduzierung der mineralischen Stickstoffdüngung erreicht, da die Herstellung der Dünger sehr energieintensiv ist und zusätzliche Emissionen von treibhausrelevanten Gasen nach der Ausbringung zu erwarten sind. Politiken, die eine Reduzierung des Stickstoffdüngereinsatzes honorieren, werden in Deutschland zurzeit kaum diskutiert. Dies ist unter anderem darin begründet, dass im Bereich der Sicherstellung der guten fachlichen Praxis der Stickstoffdüngung immer noch ein Vollzugsdefizit zu beklagen ist und somit kaum zwischen ‚guter landwirtschaftlicher Praxis‘ und einer Umweltleistung differenziert werden kann.

Alternativ zur quantitativen Nutzenmessung schlagen Weersink et al. (2002) vor, Trade-offs und Grenzkostenkurven direkt mit Entscheidungsträgern zu diskutieren und somit die explizite Bewertung der Umweltleistungen zu umgehen. Es muss sich allerdings zeigen, inwieweit diese Vorgehensweise akzeptiert wird und sich als praktikabel erweist.

P. Schröder

6 Übertragbare Ergebnisse aus dem FAM – Erweitertes Systemverständnis

6.1 Theoretischer Hintergrund

Ziel des FAM war es, auf der Basis allen verfügbaren Wissens die Landnutzung für zwei Prototypen intensiver Landbewirtschaftung zu optimieren. Dabei stand die Reduzierung der Umweltbeeinträchtigungen auf ein zumutbares Maß unter der Prämisse der Aufrechterhaltung der Produktivität im Vordergrund. Die optimierte Landnutzung sollte sich dann aus einem verbesserten Systemverständnis ergeben.

Die Forschung des FAM stand dabei stets zwischen der Grundlagenforschung mit Interesse an dringend erforderlichem Basiswissen über Nutzpflanzen und Ökosystemauschnitte und einer angewandten Agrarforschung, die rasch übertragbare Ergebnisse für die Praxis erhoffte. Um solche verallgemeinerbare Ergebnisse zu erlangen, benötigte Agrarforschung eine Absicherung durch Wiederholung des Experiments über die Zeit oder durch eine Wiederholung des Experiments an verschiedenen Orten. Die Anlage des Langzeitversuchssystems enthält deshalb experimentelle und beobachtende Aspekte, die beide zur Absicherung der wissenschaftlichen Ergebnisse und der Steuerung des Systems beitragen haben. Rasterbeprobungen des gesamten Versuchsguts und umfassende Monitoring-Studien standen neben Einzelexperimenten an definierten Kleinflächen oder Einzelpunkten, die mit Laboruntersuchungen verknüpft waren. Entsprechend wiesen die Wahl der Methoden und die Konzeption der einzelnen Teilprojekte somit teilweise in Richtung der einen oder der anderen Forschungsrichtung, interdisziplinäres Arbeiten sollte sie möglichst verbinden.

Kurzfristig angelegte und kontrollierte Laborexperimente haben den Vorteil der direkten Beobachtbarkeit von Effekten, sie ermöglichen aber nur in seltenen Fällen die Extrapolation der Ergebnisse auf die Bedingungen der realen Welt. Umgekehrt ist aber auch nur in den seltensten Fällen die Auswirkung einer landwirtschaftlichen Maßnahme auf einen Standort unmittelbar zu messen. Räumlich und zeitlich können Verschiebungen des Auftretens oder Ausbleibens von Reaktionen des Systems beobachtet werden (Abb. 6.1), die eine weitere Validierung in zusätzlichen Experimenten erforderlich macht.

Relevant für die Bewertung sind dabei sowohl Art und Intensität der einwirkenden Maßnahme als auch der Standort, auf den die Maßnahme eine Wirkung hat. Der Standort ist dabei durch eine bestimmte Sensitivität charakterisiert, die sich durch seine physikochemischen Eigenschaften, aber auch durch seine biotische Ausstattung ergibt und kann durch andere Nutzungsformen vorbelastet sein. Durch aktuelle und nicht wiederholbare Einwirkungen wie die Witterung kann der Standort unterschiedlich auf dieselbe Maßnahme reagieren. Bedingt durch das Puffervermögen biotischer Systeme wird die Belastung zumeist zusätzlich mit einer zeitlichen Verschiebung auftreten. Zudem sind häufig