

Die schlagbezogene Schätzung des Düngereinsatzes – ein Beispiel für das Flächennutzungsmonitoring mit Fernerkundungsdaten

SIBYLLE ITZEROTT & KLAUS KADEN, Potsdam

Keywords: Remote sensing, spectral standard curve, crop classification, fertilizer application, monitoring of agricultural land use on field level

Summary: *Estimation of fertilizer application on field level – an example of land use monitoring with remote sensing data.* Remote sensing can basically make an important contribution to a complex environmental monitoring. Based on a remotely sensed monitoring of land use, spatial information relevant for fertilizer applications can be derived with the required timeliness. An algorithm using spectral standard curves, developed by the authors, was applied in order to identify field crops for seven vegetation periods and four different areas. The resulting land use information was linked according to the fertilization regulation with nitrogen application rates. Results were validated by a comparison to available statistics on farm and administrative district level. By the integration of the remote sensing method not only comparable findings about fertilization quantities were derived, but also a spatially specific input rate for each agricultural plot was determined. The paper demonstrates that remote sensing based methods can be integrated into the applied research.

Zusammenfassung: Die Fernerkundung kann einen wichtigen Beitrag zu einem komplexen Umweltmonitoring leisten. Basierend auf der Kontrolle der Flächennutzung mittels Fernerkundungsdaten können raumkonkrete und zeitnahe Aussagen z. B. über den Düngereinsatz gemacht werden. Ein von den Autoren entwickelter Algorithmus zur Anwendung spektraler Normkurven wurde zur Identifikation von Ackerkulturen für sieben Vegetationsperioden und vier räumlich getrennte Gebiete getestet. Die so gewonnenen Flächennutzungsinformationen wurden entsprechend der Düngeverordnung mit Stickstoff-Düngegaben verknüpft. Die Prüfung der Ergebnisgüte erfolgte auf Betriebsebene und Kreisebene mit verfügbaren Statistiken. Die Einbindung der Fernerkundungsmethode ermöglicht nicht nur vergleichbare Aussagen über die Düngemengen, es kann außerdem ein spezifischer, bisher in dieser Qualität nicht vorhandener Raumbezug hergestellt werden, der für jeden Einzelschlag eine konkrete Angabe verzeichnet. Dies ermöglicht im Vergleich zur heutigen Praxis, Aussagen zum Nährstoffinput auf administrative und/oder naturräumliche Einheiten zu beziehen. Der Beitrag weist die prinzipielle Integrationsfähigkeit dieses fernerkundungsbasierten Ansatzes in die angewandte Forschung nach.

1 Einleitung

Umweltorientierte Forschungen sind in den letzten Jahren in das Blickfeld der Gesellschaft getreten. Politik und Öffentlichkeit erwarten Antworten auf Fragen, die sich zwischen ökonomischen, ökologischen und

sozialen Ansprüchen ergeben und im Sinne der Nachhaltigkeit gelöst werden sollen. Durch Modelle und Simulationen versucht man gegenwärtig zu Prognosen zu gelangen, die Handlungsempfehlungen geben (Decision Support Systems). So greift man z. B. bei der Umsetzung der europäischen Was-

serrahmenrichtlinie auf Modelle zurück, die auf Kenntnissen über Wassermenge und -güte basieren. Dafür sind präzise Raum-Zeit-Informationen über die Flächennutzung notwendig, um einerseits über Nährstoffbilanzen zu Aussagen über die Wassergüte zu kommen und um andererseits über Transpirationsraten die Grundwasserneubildung besser abschätzen zu können. Dabei können die Vorteile der Fernerkundung hinsichtlich der Raum-Zeit-Auflösung genutzt werden. Hier, wie auch für viele andere angewandte Problemstellungen aus der Praxis, kann die Flächennutzung als Ansatzpunkt dienen. Sie entspricht dem aktuellen Abbild unserer Umwelt und integriert unter dem Landschaftsbegriff das Zusammenwirken natürlicher und anthropogener Komponenten des menschlichen Lebensraumes. Einen großen Teil an der Flächennutzung nimmt die landwirtschaftliche Nutzung ein. Sie ist durch die Einbringung von Nährstoffen in den Boden und den Entzug durch die Pflanzen ein wesentlicher Faktor in der Betrachtung von diffusen Nährstoffbewegungen. Stickstoff entscheidet als essentieller Pflanzennährstoff über Ertrag und Qualität der angebauten Ackerkultur. Gleichzeitig wirken Stickstoffeinträge auf die Umweltbereiche Wasser, Boden und Luft und können dort zu unnatürlichen Anreicherungen führen. 1996 wurde in Deutschland eine Düngeverordnung (DüV) verabschiedet und so die gesetzliche Grundlage geschaffen, die Umweltbelastungen durch die Landwirtschaft zu reduzieren und zu kontrollieren. Sie regelt mit ihrer Neufassung 2007 (BRD 2007) und dem Bundes-Bodenschutzgesetz (BRD 2001) die Düngung nach guter fachlicher Praxis, schafft Rahmenbedingungen für eine umweltfreundliche Ausbringung von Düngemitteln und verpflichtet den Landwirt, Aufzeichnungen über Zu- und Abfahren von Nährstoffen zu machen sowie Bodenuntersuchungen durchzuführen und nachzuweisen. Ziel ist es, durch nachhaltige Bewirtschaftungsformen unter anderem auch die Gewässergüte laut Wasserrahmenrichtlinie (EU 2000) zu verbessern. Das Anbauverhalten der Landwirtschaftsbetriebe wird somit eine entscheidende Kontrollgröße.

Fruchtfolgen bildeten noch bis 1990 das Kernstück des Anbaus. Heute findet man kaum noch geregelte Fruchtfolgen. Globalisierte Absatzmärkte, betriebswirtschaftliche Zwänge und Förderprogramme haben, verbunden mit verbesserten Bewirtschaftungsmöglichkeiten, zu einem in Raum und Zeit stark variablen Anbau geführt. Monitoringprogramme für die landwirtschaftliche Flächennutzung können daher nicht an standardisierten Fruchtfolgen ansetzen. Für ökonomisch und ökologisch orientierte Analysen (z. B. die Entwicklung von Förderprogrammen oder die Verringerung der Umweltbelastung) benötigt man zuverlässige Aussagen über das kurz-, mittel- und/oder langfristige Anbauverhalten der Landwirte, das als jährliches Anbaumuster aus Fernerkundungsdaten ermittelt werden kann.

Im Folgenden soll im Anwendungsbeispiel vorgestellt werden, wie auf der Grundlage einer durch Fernerkundungsdaten gewonnenen raum- und zeitpräzisen Fruchtfolgeklassifizierung eine Düngegabeabschätzung durchgeführt wird, die als Eingangsparameter in Nährstoffbilanzmodelle dienen kann. Dabei zielt die Darstellung auf die Bewertung großer naturräumlicher und administrativer Raumeinheiten, wie Landkreise und Flusseinzugsgebiete, da für diese der Ermittlungsaufwand aus Betriebsstatistiken nicht zu leisten ist und bisher Abstriche in der Zeit- und Raumpräzision (in der Regel erfolgt in Modellen eine zufällige räumliche Verteilung der statistisch ermittelten Fruchtartenanteile gekoppelt mit Richtwerten der Düngempfehlung) hingenommen werden mussten. Auch in der hier dargestellten Methode werden Richtwerte der Düngempfehlung verwendet, durch die Verknüpfung mit der Fruchtartenklassifizierung gelingt jedoch die exakte räumliche Verortung der Düngeeinträge.

2 Die Flächennutzung als Gegenstand der Fernerkundung

Zweifelsohne ist die Flächennutzung momentan ein zentrales Aufgabenfeld der Fernerkundung. Flächennutzungsparame-

ter werden bereits für verschiedene Raum-Zeit-Analysen verwendet. Dabei zeigt die nachfolgende Analyse einzelner Forschungsansätze in den wissenschaftlichen Reihen der letzten Jahre ein bereits beachtliches Spektrum von Einsatzmöglichkeiten von Fernerkundungsdaten. Ohne den Anspruch auf eine vollständige Analyse zu erheben, zeichnen sich unseres Erachtens unterschiedliche Inhaltskomplexe ab, für die sich durch die Ableitung der Flächennutzungsdynamik aus Fernerkundungsdaten die Datengrundlage verbessert.

Die *Nachhaltigkeit der Landnutzung* und der damit beabsichtigte Schutz der Ressourcen (z. B. Boden, Wasser, Flora, Fauna) zielen auf das Erkennen von Indikatoren für die Nachhaltigkeit und deren Kontrolle. Beides ist verknüpft mit einem Landnutzungsmonitoring. So wird bei (SMITH et al. 1998, 2000) der Nachhaltigkeitsbegriff u. a. mit „crop rotation, control land use, cropping patterns und diversity“ abgegrenzt und in einem Modell die Gefährdung der Nachhaltigkeit durch die landwirtschaftliche Nutzung bewertet. VAN DER VLIST et al. (1998) verbinden die Landnutzungsplanung mit „Space-time differentiation“ und „differences between land-use activities“ und leiten aus deren Kenntnis eine Balance zwischen ländlicher Entwicklung und Umweltschutz ab. TAPIADOR et al. (2003) stellen bereits eine *Landnutzungskartierungsmethode* als Richtlinie für die Regionalplanung vor, die auf Fernerkundungsmethoden zurückgreift. Sie beschränkt sich aber auf invariante Nutzungsarten und verharrt demzufolge bei „crops for dry farming, crops for irrigated lands, fruits, grazing and pastures“ als Einheiten der landwirtschaftlichen Nutzung. Kenntnisse über die Landnutzungsdynamik sind auch für *Modellierungen und Szenariobetrachtungen* unabdingbar. Bisher gehen diese Parameter in unterschiedlicher Raum-Zeit-Auflösung in Modelle und Szenarios ein. OENEMA et al. (1998) beschränken sich bei der Modellierung des Nitratreintrags von der Landwirtschaft ins Grundwasser im Wesentlichen auf „farming systems“ und beziehen den Raum-Zeit-Aspekt kaum ein. Ebenso wird bei (FERRIER et al. 1994) die

Landnutzungsänderung nur marginal und sehr grob strukturiert für die Simulation von Nitratreinträgen in ein Flusssystem berücksichtigt. (EKHOLM et al. 2000) beschränken sich bei ihrer Darstellung des Zusammenhangs von Einzugsgebietscharakteristik und Nährstoffkonzentration auf Ackerlandanteile, ohne deren Bewirtschaftung weiter zu differenzieren. Beschränkt auf jeweils kleine Landschaftsausschnitte wird bei (OPPELT 2002, STROPPIANA et al. 2005 und TICKSEL et al. 2004) auf der Basis von Hyperspektraldaten aus Flugzeugaufnahmen bereits ein klarer Zusammenhang zwischen Fruchtart, Pflanzenzustand und Nährstoffgehalt von Boden und Pflanze hergestellt. Tendenziell ist festzustellen, dass Fernerkundungsdaten als Basis für eine verbesserte Berücksichtigung der Flächennutzung in Modellen erkannt worden sind. So nutzen (KING et al. 2005) verschiedene Fernerkundungsdaten als alternativen Input für ein Abflussmodell und setzen diese u. a. zur differenzierten Erfassung des Bedeckungsgrades in drei Abstufungen ein. Das zeigt eine Prinziplösung auf, jedoch ohne Darstellung ihrer Tragfähigkeit für multitemporale Ansätze. Ähnliche Einschätzungen gelten für (SOUCHERE et al. 2003) bzw. (MARTINEZ-CASASNOVAS et al. 2005) hingegen greifen das „*multi-year cropping pattern*“ explizit auf und stellen einen Lösungsansatz vor. Der aktuelle Bedarf für solche Lösungen zeigt sich beispielsweise bei (WECHSUNG et al. 2000), wo die Flächennutzungsdynamik mittels Zufallsverteilung in die Modellierung einfließt. Bei (NEARING et al. 2005) werden Szenarios in Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad vorgestellt ohne diesen räumlich zu fixieren. (CHEN et al. 2004) diskutieren die Rolle der Fernerkundung bei der Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie. Das allgemeine Potenzial der Fernerkundungsdaten als Entscheidungsgrundlage, wie beispielsweise bei (KALLURI et al. 2003) dargestellt, gibt Anregungen für verschiedene Anwendungen, speziell auch für Raum-Zeit Analysen. Dies erfordert an GIS angepasste und integrierte Analysemethoden bis hin zur Entwicklung eines monitoringfähigen Analysepakets, wie in Grundzügen bei (MARACCHI et al. 2000) bereits vorgestellt.

Das Spektrum an Monitoringaufgaben, die mit in Raum und Zeit konkreter Flächennutzungskontrolle verbunden sind, ist somit weit und weist den Weg zur Integration der Fernerkundung in die angewandte Forschung.

Wie in fast allen Anwendungsbeispielen festzustellen ist, besteht insbesondere bei Monitoringansätzen das Problem der Übertragung von empirischen, am Einzelfall gewonnenen Lösungen auf andere Raum- und Zeitausschnitte. Um das zu beheben, muss die Datenauswertung auf verallgemeinerten Zeitabläufen aufbauen. Für die Flächennutzung bieten sich Bewirtschaftungszyklen an, die als normierte phänologische Abläufe abgebildet werden können. Wie schon bei (BADHWAR et al. 1984, GUERIF et al. 1996 und CLEVERS et al. 2000) und von den Autoren in vorangegangenen Veröffentlichungen (ITZEROTT & KADEN 2006) dargestellt, ist die Verwendung spektraler Normkurven und ein speziell dafür zugeschnittener hierarchisch strukturierter Klassifizierungsalgorithmus eine geeignete Methode, Monitoringansätze für die Kontrolle der Flächennutzungsdynamik zu realisieren.

Auf dieser Basis können Fruchtfolgen kontinuierlich erfasst werden. Durch eine anschließende Verknüpfung mit Düngeempfehlungswerten wird die Basis für die Bewertung potenzieller ökologischer bzw. ökonomischer Konsequenzen des Düngeverhaltens gelegt. Dabei stellen die Autoren die prinzipielle Integrationsfähigkeit eines fernerkundungsbasierten methodischen Ansatzes in die angewandte Forschung in den Mittelpunkt.

3 Methodik

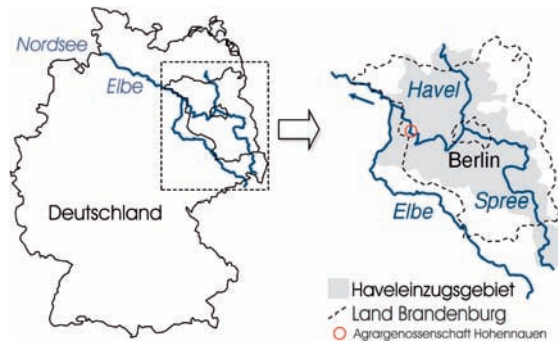
Die Entwicklung des Verfahrens erfolgte in zwei Hauptschritten: der Gewinnung von Normkurven aus einer 15-jährigen Folge von 35 atmosphärenkorrigierten Landsat-TM/ETM-Datensätzen und der Generierung eines Algorithmus zur Verwendung der Normkurven in einer Klassifizierung für einzelne Anbaujahre.

Aus der Verknüpfung der Anbauinformation von 6 Agrarbetrieben für etwa 400

Ackerflächen mit der Information eines Vegetationsindex (NDVI) dieser Flächen der Jahre 1987 bis 2002 wurden Normkurven für die 12 typischen landwirtschaftlichen Kulturen (Winterweizen, Winterroggen, Wintergerste, Wintererbsen, Silomais, Sommergetreide, Zuckerrüben, Kartoffeln, Ölfrüchte und Leguminosen, Feldgras im ersten Anbaujahr, Feldgras als Dauerkultur, Brache) erstellt. Besonderes Augenmerk lag dabei auf der phänologisch exakten Einordnung des abgebildeten Entwicklungszustandes für jede Kultur zu jedem der Aufnahme-termine. Nur so besteht die Möglichkeit, die Information aus verschiedenen Beobachtungsjahren mit unterschiedlicher Witterungsausprägung auf ein phänologisches Normjahr zu transformieren. Die entstandene Normkurve verknüpft folglich jeden Phänozustand einer Kultur mit einer konkreten Spektralinformation, in diesem Fall mit dem mittleren NDVI sowie einem durch Maximum- und Minimumwert definierten Toleranzintervall.

Der Klassifizierungsalgorithmus ist auf die schlaggenaue Erkennung von Ackerkulturen ausgerichtet. Er verwendet das Parallelepipedverfahren, ist pixelorientiert und hierarchisch angelegt. Eigene Untersuchungen haben gezeigt, dass für die optimale Trennung der Fruchtarten eine jährliche Bildfolge von 5 Datensätzen zur Verfügung stehen müsste, die etwa an den Tagen 100, 135, 185, 225 und 255 des phänologischen Normjahres aufgezeichnet sein sollte. Die tatsächlich für die Jahre zur Verfügung stehende Aufnahmeanzahl weicht davon zum Teil deutlich ab (siehe Abb. 1). Im hierarchischen Ansatz werden zunächst Dauerkulturflächen ermittelt, danach Winter- und Sommerkulturen separiert und nach erfolgreicher Maskierung getrennt klassifiziert. Die Ergebnisse der Teilklassifizierungen werden verknüpft und abschließend einer schlagbezogenen Majoritätsanalyse unterzogen. Die jeweilige Entscheidungsregel kann unmittelbar aus den Normkurven gewonnen werden. Die für das Anbaujahr existierenden Bilddatensätze müssen dazu in das phänologische Normjahr eingepasst werden. Für jede Kultur wird anhand von Beobachtungsdaten

Jahr	Ausnahmetermine
1994	21. Juli, 22. August
1995	25. Oktober, 5. Mai, 8. Juli, 9. August
1996	1. Februar, 21. April, 8. Juni, 11. August; 14. Oktober
1997	14. Oktober, 24. April, 2. Juni*, 15. September
1998	26. März, 21. Juni*
1999	30. April, 11. Juli, 13. September
2000	12. Februar, 2. Mai, 19. Juni, 14. August



* IRS-C Aufnahme

Abb. 1: Liste der Landsat-TM/ETM-Aufnahmen für die jährliche Fruchtartenklassifizierung und Lage des Untersuchungsgebietes.

des DWD der in der Aufnahme abgebildete phänologische Zustand ermittelt und die zugehörigen Spektralwerte der Normkurve entnommen.

Das eigentliche Untersuchungsgebiet ist das Einzugsgebiet der Havel (ausgenommen der Spree) mit seinen administrativen und naturräumlichen Einheiten. Es hat eine Fläche von ca. 14000 km², liegt im Nordostdeutschen Tiefland und ist durch intensive landwirtschaftliche Nutzung auf überwiegend sandigen Böden geprägt (BRONSTERT & ITZEROTT 2006). Die Kalibrierung des Algorithmus und die Validierung der Ergebnisse wurden wegen der benötigten statistischen Daten an Teilräumen durchgeführt. Diese wurden so ausgewählt, dass sie das naturräumliche Spektrum des Havelgebietes (JACOBS 2006) in groben Zügen abdecken (Bodengüte, Wasserdargebot). Exemplarisch werden die Ergebnisse für die Agrargenossenschaft Hohennauen und die Kreise Oberhavel und Havelland vorgestellt.

4 Ergebnisse

Die Nutzung des Verfahrens ermöglichte eine zügige Ermittlung der Anbaukulturen für verschiedene Anbaujahre und Gebietsausschnitte. Insgesamt wurde der Algorithmus für sieben verschiedene Vegetationspe-

rioden (1994–2000) angewendet. Dabei wurden vier räumlich getrennte Testgebiete (jeweils etwa 750 km²) untersucht. Außerdem wurde für die Jahre 1999 und 2000 das gesamte Einzugsgebiet der Havel (mit Ausnahme des Einzugsgebietes der Spree – ca. 14000 km²) mit diesem Ansatz bearbeitet. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt unter drei Aspekten. Auf Betriebsebene wird zunächst für die sieben Jahre für ausgewählte Schläge das Ergebnis der Fruchtartenklassifikation und die damit verknüpfte Düngemengeinformation den Anbauinformationen gegenübergestellt. In diesem Zusammenhang wird der Einfluss der Bodeneigenschaften auf die Ergebnislage verdeutlicht. Des Weiteren wird für das Jahr 2000 ein schlaggenauer Vergleich der im Verfahren geschätzten mit den empfohlenen Düngemengen für die Agrargenossenschaft Hohennauen vorgestellt. Abschließend erfolgt eine Bewertung der gewonnenen Düngemengeinformation für zwei Landkreise des Einzugsgebietes.

4.1 Darstellung der Ergebnisse für Einzelschläge

Eine zentrale Rolle in der Bewertung der Ergebnisse kommt der Einzelschlagbetrachtung zu, weil nur auf dieser Raumebene exakte Vergleichskriterien zur Verfügung ste-

hen. Das betrifft sowohl Anbauinformationen hinsichtlich Kultur und Düngengebe als auch die Naturraumausstattung. Die sechs ausgewählten Schläge (siehe Tab. 1) besitzen eine unterschiedliche Naturraumausstattung. Die Schläge 1, 5 und 6 sind grundwasserferne Standorte mit unterschiedlicher Bodenqualität sandiger bis sandig/lehmiger Substrate. Die Bodenwertzahlen schwanken zwischen 29 und 33. Sie sind alle dem Landbaugesamt III zugeordnet. Die Schläge 2 und 3 sind unterschiedlich stark grundwasserbeeinflusste Niederungsstandorte. Die Bodenwertzahlen liegen knapp über 40. Sie repräsentieren das Landbaugesamt II. Der Schlag 4 fällt in den ehemals überfluteten Auenbereich. Es dominieren Auengleye auf grund- und stauwasserbeeinflussten Standorten mit Bodenwertzahlen um 35 (Landbaugesamt III). Die Beispiele repräsentieren das Spektrum der natürlichen Anbaugrundlagen im Gebiet der Brandenburgischen Platten und Niederungen. Verglichen werden die konkreten Angaben der Agrargenossenschaft Hohennauen über Anbaukultur und Düngemengen (erste Zeile oben) mit den aus den Fernerkundungsdaten ermittelten Fruchtfolgen, die mit den Düngempfehlungen für das Land Brandenburg verknüpft wurden (unten). Ergänzend wird die Düngempfehlung des Landes Brandenburg für die Kultur auf einem entsprechend ausgestatteten Standort angegeben (zweite Zeile oben). Es wird deutlich, dass der Betrieb im Vergleich zur Empfehlung höhere Düngemengen für Raps und Getreide und geringere Gaben für Mais und Zuckerrüben einsetzt.

Ein Vergleich der aus den Fernerkundungsdaten ermittelten Ergebnisse mit den Angaben der Agrargenossenschaft erlaubt eine Bewertung des Ansatzes. Geht man zunächst ganz formal an die Ergebnisdiskussion heran, sind 29 von 42 Zuweisungen der Fruchtart richtig erfolgt. Das entspricht einer Quote von 69,1 % und bestätigt den für die Gesamtgenauigkeit ermittelten Wert von 70 % in (ITZEROTT & KADEN 2007). Dabei treten zwischen einzelnen Jahren Unterschiede auf. Gute Übereinstimmung bei der Fruchtartenermittlung besteht für die Jahre

1995 bis 1997 und 2000. Für diese Jahre stand eine ausreichende Anzahl von Satellitenszenen zur Verfügung (siehe Abb. 1), welche die zur Differenzierung notwendigen phänologischen Zustände der Kulturen abbilden. So existieren für das Anbaujahr 2000 4 bzw. 5 Satellitenszenen, die am 19. September 1999, 12. Februar, 02. Mai, 19. Juni und 14. August aufgezeichnet wurden. Hier wird ein breites Spektrum aus der Phänologie der Pflanzen abgebildet. Hinzu kommen Witterungsmerkmale, die für große Abschnitte des Jahres nahe an den Durchschnittswerten liegen. Allerdings wird durch den Witterungsbericht des DWD für Mai bis Mitte Juni eine deutlich negative Wasserbilanz festgestellt, die einen gravierenden Einfluss auf das Wachstum aller Winterfrüchte hat und insbesondere auf leichten Böden zu Trockenschäden führt. Die ab Ende Juni einsetzenden Niederschläge führten ab Juli zu einer ausgeglichenen Wasserbilanz. Das erlaubte für die Sommerfrüchte ein rasches Angleichen an den durchschnittlichen phänologischen Entwicklungsgang. So sind Extremwirkungen wie Dürreschäden bei Winterkulturen speziell auf die sandigsten Standorte begrenzt. In diesem Jahr bekam nur Schlag 6 eine Fehlzuzuweisung von Winterroggen zu Wintergerste. Der Naturraumtyp 410 deutet auf einen ungünstigeren Standort für die Landwirtschaft hin, der sich im Grenzbereich zum Landbaugesamt IV befindet und demzufolge anfällig für Dürreschäden war. Das Klassifizierungsergebnis belegt dies und bestätigt insgesamt die Stabilität des Verfahrens, wo durchaus gewisse witterungsbedingte Verschiebungen im Wachstumsverlauf toleriert werden.

Die weniger guten Klassifizierungsergebnisse für die Jahre 1994, 1998 und 1999 haben zwei Ursachen. Entweder ist die Zahl der für die Klassifizierung zur Verfügung stehenden Bilddatensätze zu gering bzw. die Zeitpunkte bilden den typischen Phänologieverlauf der Kultur nur unzureichend ab, oder die Witterungsbedingungen waren für einzelne Kulturen so extrem abweichend, dass der dem Verfahren innewohnende Toleranzbereich für einzelne Standorte überschritten wurde.

Tab. 1: Vergleich der Angaben des Agrarbetriebes zu Frucht und Düngung (jeweils oben: erste Zeile – tatsächliche Düngung; zweite Zeile – Düngeempfehlung) mit den Ergebnissen der Fruchtartenklassifizierung und der Verknüpfung mit Düngemengen (jeweils unten) für ausgewählte Schläge; graue Felder zeigen erhebliche Klassifizierungsfehler an.

Schlagnummer	Naturraumtyp (HAASE 1991)	Bodenwertzahl (RBS) Landbaugebiet (L.BG)	1994		1995		1996		1997		1998		1999		2000		Stückstoffgabe über 7 Jahre	Mittlere Stickstoffgabe	
			Frucht *)	Stickstoffgabe (kg/ha)	Frucht	Stickstoffgabe (kg/ha)	Frucht	Stickstoffgabe (kg/ha)	Frucht	Stickstoffgabe (kg/ha)	Frucht	Stickstoffgabe (kg/ha)	Frucht	Stickstoffgabe (kg/ha)	Frucht	Stickstoffgabe (kg/ha)			
1	412	31 III	BRA	0	BRA	0	BRA	0	BRA	0	BRA	0	BRA	0	BRA	0	0	0	0
			ÖL	43	BRA	0	BRA	0	BRA	0	BRA	0	BRA	0	BRA	0	BRA	0	43
2	512	41 II	WGE	139	WRA	204	WWE	158	WGE	139	SMA	110	WWE	158	WGE	139	1047	149,6	
			WGE	129	WRA	149	WWE	141	WGE	129	SMA	132	BRA	0	WGE	129	809	115,6	135,7
3	519	42 II	ZURÜ	160	WWE	158	SMA	110	ZURÜ	160	WWE	158	WWE	158	SMA	110	1014	144,7	
			ZURÜ	184	WWE	141	SMA	132	ZURÜ	184	KAR	137	GRAS	100	SMA	132	1010	144,3	150,7
4	618	35 III	WGE	106	SMA	95	WWE	125	SMA	95	WWE	125	WRO	88	WRA	168	802	114,5	
			WWE	104	SMA	114	KAR	117	SMA	114	WWE	113	WRO	92	WRA	123	771	110,1	112,3
5	414	33 III	SOBL	90	WRO	92	WRO	92	SMA	95	WRO	92	WRO	92	SMA	95	648	92,6	
			SGTR	89	WRO	90	WRO	90	SMA	114	BRA	0	WGE	104	SMA	114	677	96,7	82,4
6	410	29 III	WRO	92	WRO	92	ÖL	60	WRO	92	ÖL	60	WRO	92	WRO	92	580	82,9	
			WRA	90	WRO	90	ÖL	43	WRO	90	GRAS	100	WGE	104	WGE	104	654	76,6	93,4
			Σ	587	Σ	641	Σ	545	Σ	581	Σ	545	Σ	588	Σ	604			
				596		584		519		631		519		552		588			
				657		584		523		631		482		400		602			

*) BRA: Brache, ÖL: Erbsen und Lein, WGE: Wintergerste, WWE: Winterweizen, WRO: Winterroggen, WRA: Winterraps, SMA: Silomais, SOBL: Sonnenblumen, KAR: Kartoffeln, ZURÜ: Zuckerrüben, SGTR: Sommergetreide, GRAS: Feldgras

In Abb. 2 wird das Phänomen des Einflusses der Standorteigenschaften explizit sichtbar. Die dort markierten Schläge sind im Anbauregister als mit Roggen bestellt ausgewiesen. Im Ergebnis der Klassifikation werden einige Schläge richtig erkannt, andere aber als Gerste identifiziert (D). Die Ursachen dieser unterschiedlichen Zuweisung lassen sich bei genauem Vergleich der Standortbedingungen eindeutig benennen. Der

dargestellte Kartenausschnitt der Reichsbodenschätzung (A) kennzeichnet einen Streifen stark sandigen Lehms (SL – Bildmitte), flankiert von sanddominierten Substraten. Die richtig erkannten Schläge weisen wegen des sandig-lehmigen Substrats eine bessere Feldkapazität der Böden auf (17 bis 20 % der Bodentrockenmasse, DOBERS 2002), die Böden der falsch klassifizierten Schläge im oberen und unteren Bildteil haben dagegen



Abb. 2: Einfluss der Bodeneigenschaften auf die Ergebnislüte bei der Klassifizierung von Winterroggenflächen (rote Rahmen): (A) Ausschnitt der Karte der Reichsbodenschätzung; (B) Farbmischbild von Landsat-TM (Band 5, 4 und 3) vom 2. Mai 2000; Farbmischbild (Band 5, 4 und 3) vom 19. Juni 2000, (D) Klassifizierungsergebnis der Winterroggenflächen: Grün-Winterroggen, Gelb-Wintereraps, Hellgelb-Wintergerste.

eine geringere Bodentrockenmasse von 10 bis 15 %. Während dieser Unterschied im Mai noch nicht zum Tragen kommt und der Entwicklungsfortschritt aller Roggenflächen als gleich einzuschätzen ist (B), zeichnet er sich im Juni am Reifezustand deutlich ab (C). Die Flächen mit besserer Wasserversorgung befinden sich im für diesen Zeitpunkt typischen Milchreifstadium (grün im Farbmischbild). Die Bestände auf den sanddominierten Äckern sind dagegen bereits abgereift und entsprechen im Spektralsignal der zeitiger reifenden Gerste (violett im Farbmischbild). Es wird klar, dass eine Verbesserung der Ergebnislüte zukünftig wesentlich von einer Integration der Standortparameter in den Algorithmus abhängen wird. Das bedeutet, dass es Normkurven einer Kultur für verschiedene Standorttypen geben muss. Das gilt speziell für Jahre mit extremer Witterungscharakteristik.

4.2 Darstellung der Ergebnisse für die Agrar-genossenschaft Hohennauen

Die Betriebsebene stellt die grundlegende Bezugsebene für statistische Erhebungen in der Landwirtschaft dar. Wurde im Ein-

zelschlagbezug vordergründig der Einfluss von Standorteigenschaften auf die Ergebnislüte der Fruchtartenklassifizierung diskutiert, steht jetzt die Bewertung der aus der Klassifizierung abgeleiteten Düngegaben anhand der Betriebskennwerte im Mittelpunkt. Abb. 3 stellt beide Datensätze flächenhaft gegenüber.

Die jährliche, schlaggenaue Feldfrucht-kartierung aus Fernerkundungsdaten (siehe Abb. 3A) kann auf der Grundlage der Brandenburgischen Düngeempfehlung problemlos mit zu erwartenden Düngegaben verknüpft und so eine Karte der Stickstoffdüngung abgeleitet werden (siehe Abb. 3C). Ein Vergleich mit der Karte der Düngemenge nach Angaben des Betriebes (siehe Abb. 3D) muss jedoch berücksichtigen, dass Abweichungen durch zweierlei Ursachen hervorgerufen werden. Einerseits bestehen Unterschiede zwischen der tatsächlichen Düngegabe und den Brandenburgischen Düngeempfehlungen. So werden für Wintereraps im Landbauggebiet II 149 kg/ha empfohlen, die Genossenschaft beaufschlagt 204 kg/ha (siehe Tab. 1). Andererseits führt fehlerhaftes Klassifizieren der Kultur zu falscher Zuweisung von empfohlenen Düngemengen. Das ist der hier tatsächlich zu bewertende

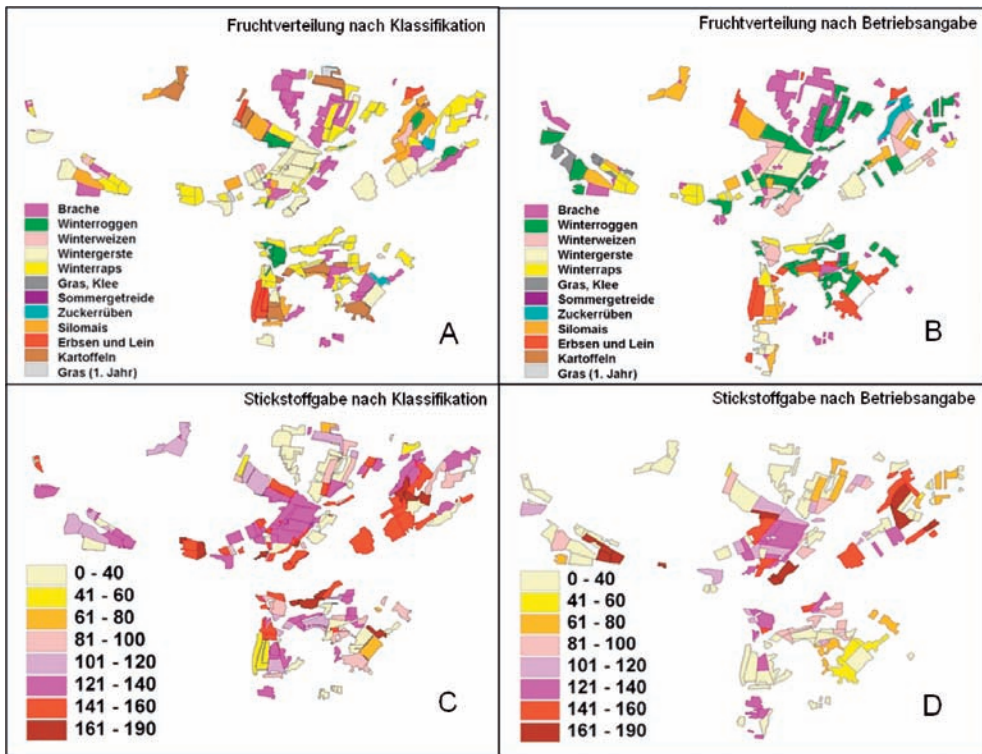


Abb. 3: Vergleich der Ergebnisse der Fruchtartenklassifizierung (A) und der Verknüpfung mit Düngemengen (C – kg/ha pro Jahr) mit den Angaben des Agrarbetriebes über Anbau (B) und Düngung (D – kg/ha pro Jahr) für das Jahr 2000.

Fehler, weil nur er aus dem Verfahren resultiert. Abb. 4 schließt deshalb die aus der landwirtschaftlichen Praxis entstehenden Abweichungen aus. Dargestellt wird die Differenz der Düngemengen, die sich aus der Verknüpfung der Brandenburgischen Empfehlung einerseits mit der Anbauinformation und andererseits mit dem Klassifizierungsergebnis ergibt.

Erhebliche Fehleinschätzungen beschränken sich auf 13 % der Fläche. Besonders gravierend wirken sich Klassifikationsfehler aus, die Brachen betreffen. Das berührt sowohl nicht erkannte Brachflächen als auch fälschlicherweise als Brache klassifizierte Flächen. Da Brachen nicht gedüngt werden, ergibt sich daraus immer ein erheblicher Fehler. Außerdem zeigen sich beträchtliche Differenzen durch Fehlzuweisung zwischen Ölfrüchten/Leguminosen und Kartoffeln.

Beide Klassen besitzen ähnliche Normkurven (ITZEROTT & KADEN 2006) aber einen stark verschiedenen Düngbedarf. Zu deutlichen Fehlern in der Düngabschätzung (30 % der Fläche) kommt es, wenn Verwechslungen zwischen Kulturen mit hohem Düngbedarf und solchen mit geringerem Nährstoffanspruch entstehen. Das betrifft insbesondere die anspruchsvollen Kulturen Winterraps und Winterweizen sowie Zuckerrübe. Geht es also speziell um die Zielgröße Stickstoffdüngung ergeben sich für das Flächennutzungsmonitoring unterschiedliche Genauigkeitsanforderungen hinsichtlich der Trennung der Kulturarten. Hieraus lassen sich bei entsprechenden Zielvorgaben Wichtungen und Gruppierungen ableiten, die beispielsweise daraufhin zielen, Gruppen von Kulturpflanzen zu bilden, die ähnliche Dünggaben erhalten, oder beson-

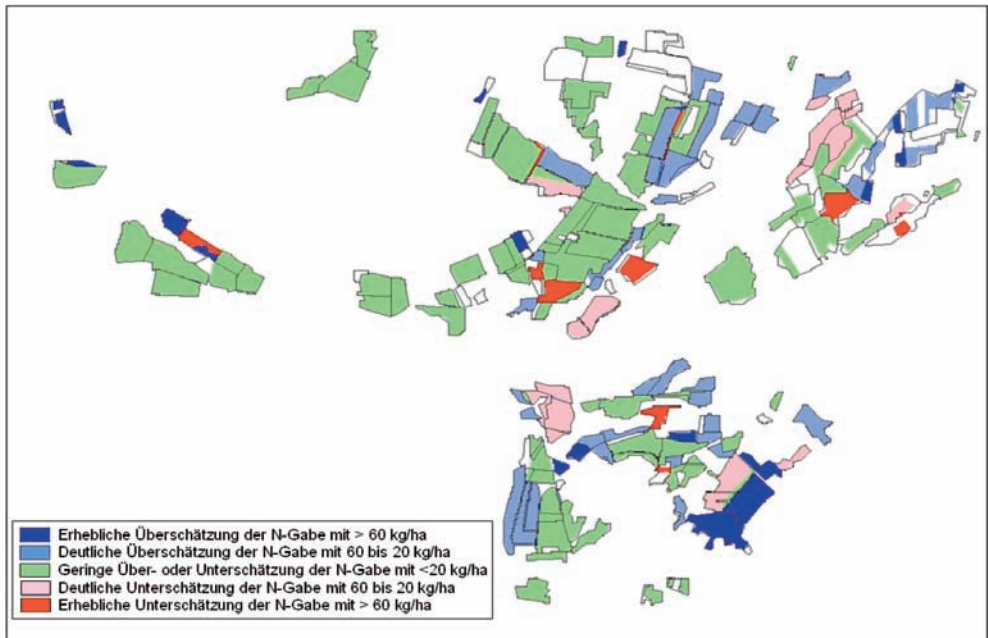


Abb. 4: Karte der Über- bzw. Unterschätzung der Stickstoffgabe für das Jahr 2000, die sich aus der Nutzung der klassifizierten an Stelle der tatsächlichen Fruchtartenverteilung ergibt.

ders solche Klassen sicher zu trennen, deren Düngegaben sich erheblich voneinander unterscheiden. Für 57 % der Fläche kann konstatiert werden, dass keine oder nur eine geringe Abweichung zur Düngeempfehlung besteht. Dieses Ergebnis wird dadurch beträchtlich aufgewertet, dass diese Angaben einen echten Schlagbezug haben.

4.3 Darstellung der Ergebnisse für Landkreise

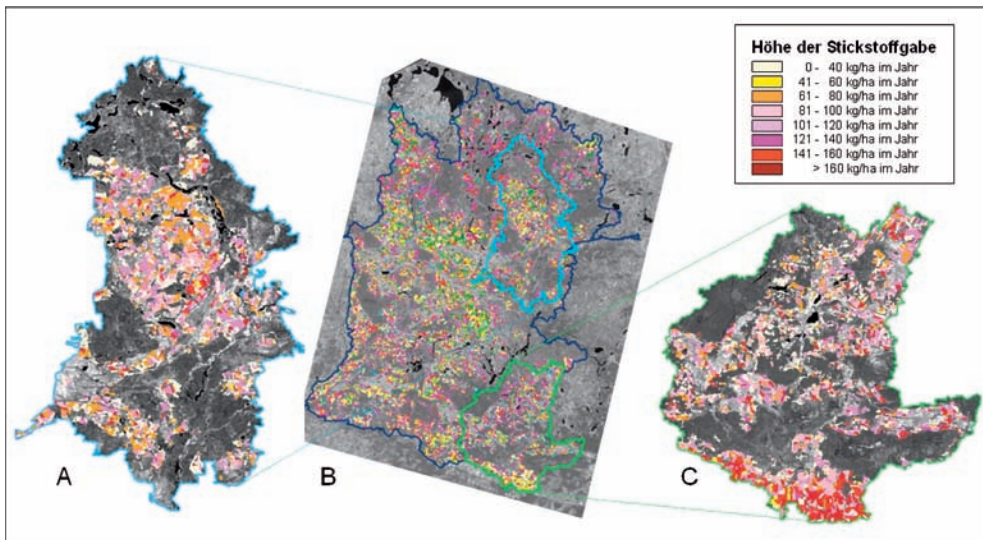
Ein weiterer Anwendungsvorteil der Geofernerkundungsmethode wird deutlich, wenn man den Aspekt des räumlichen Auflösungsvermögens betrachtet. Satellitengestützte Fernerkundungssysteme bilden in der Regel großflächig ab. Damit können großen Räumen zu einem Zeitpunkt bestimmte Eigenschaften zugeordnet werden. Im vorliegenden Beispiel wurden für das Einzugsgebiet der Havel auf der Grundlage großräumiger Flächennutzungsanalysen Düngegabenbeschätzungen für verschiedene Jahre vorgenommen.

Damit wurden flächen- und zeitgenaue Informationen gewonnen, die in dieser Art bisher in Statistiken nicht erfasst sind. Derzeit gilt für Düngeinformationen wie für andere statistische Daten: je höher die Verwaltungsebene, desto höher der räumliche Generalisierungsgrad der Aussagen. So existieren in den Agrargenossenschaften allgemeine durch Kultur und Landbaugesamt (Ackerwertzahl) differenzierte Düngevorgaben, die sich mehr oder weniger an die Brandenburgischen Düngeempfehlungen anlehnen (REIFENSTEIN 2004). Eine Kreisdüngestatistik hingegen existiert bisher nicht. Hier kann man lediglich auf Anbaustatistiken zurückgreifen. Erfasst werden jedoch nur die Anbauanteile (%) der einzelnen Kulturen für den gesamten Landkreis. Flächengenaue Informationen für die Bewertung der Lage-treue liegen auf dieser Ebene nicht vor. Gerade diese Lücke kann durch das vorgestellte Verfahren geschlossen werden.

Entsprechend der Darstellung der Ergebnisse auf Betriebsebene soll auch hier eine Betrachtung der ermittelten Düngegaben

Tab. 2: Vergleich der aus der Kreisstatistik und den Fernerkundungsdaten ermittelten Düngegaben (t) der Landkreise Oberhavel und Havelland für die Jahre 1999 und 2000.

Element	Landkreis Oberhavel						Landkreis Havelland					
	1999			2000			1999			2000		
	Kreisstatistik	Eigenermittlung	%	Kreisstatistik	Eigenermittlung	%	Kreisstatistik	Eigenermittlung	%	Kreisstatistik	Eigenermittlung	%
N	2757,1	3302,7	120	2798,2	3103,9	111	4829,2	5372,0	111	4868,2	4906,1	101
P	681,6	707,5	104	687,3	673,0	98	1100,0	1068,6	105	1108,5	1068,6	96
K	2607,2	2923,7	112	2620,6	3072,6	117	4369,3	4826,2	112	4384,5	4826,2	110

**Abb. 5:** Karten der aus der Klassifikation ermittelten Fruchtartenverteilung (B – Legende vgl. Abb. 3) für das Einzugsgebiet der Havel (ohne Spree) sowie der daraus abgeleiteten Verteilung der Stickstoffdüngegabe für den Kreis Oberhavel (A) und das Einzugsgebiet der Nuthe (C) für das Jahr 2000.

angeschlossen werden. Zum Vergleich wurde eine eigens durchgeführte Berechnung des Landesamtes für Verbraucherschutz und Flurneuordnung des Landes Brandenburg herangezogen. Die Düngemengen der Kreise für Stickstoff, Phosphor und Kalium werden basierend auf betriebsbezogenen Angaben geschätzt. Darin gehen die Angaben des Betriebes über die Anbaufläche der einzelnen Kulturen ein, die mit der Düngeempfehlung entsprechend der mittleren Ackerwertzahl des jeweiligen Betriebes verknüpft wurden. Die Schätzung ist also los-

gelöst von der flächentreuen Anbindung der Information. Schon hier zeigt sich die Überlegenheit einer Methode, die Fernerkundungsdaten integriert und ermittelte Werte genau angewendet wird. Die errechneten Werte wurden zu den aus den Fernerkundungsdaten abgeleiteten Düngegaben in Bezug gesetzt. Diese wurden für jeden Schlag der Kreise Oberhavel und Havelland nach der Ermittlung der Kultur durch Zuweisung der Düngemenge entsprechend der Empfehlung des Landes Brandenburg in Abhängigkeit von der Bodengüte (Landbaugebiet) gewon-

nen. Für das bereits charakterisierte Jahr 2000 (siehe Tab. 2) und das Vorjahr 1999, in dem sowohl die ungünstige Witterung als auch die Anzahl und Aufnahmetermine der Satellitendaten die Ergebnisqualität beeinflussten, ergab sich eine relativ gute Übereinstimmung. Erwartungsgemäß tritt der größere Unterschied im Jahr 1999 auf. Hier bilden sich die oben erwähnten Probleme ab. Winterroggen wird teilweise als Wintergerste identifiziert, was zu erhöhten Düngeannahmen (z. B. 14 kg/ha im LBG III) führt. Der Landkreis Oberhavel ist eher durch grundwasserferne Standorte gekennzeichnet. Für ihn wurden, bedingt durch Trockenstresserscheinungen, auf extremen Standorten mehr Fehlklassifikationen verzeichnet, was auch hier zu etwas höheren Abweichungen der Werte führt. Die aus beiden Ansätzen ermittelten Zahlen sind ohne weiteres als gleichwertig anzusehen. Die im Fernerkundungsansatz ermittelten Werte charakterisieren die Größenordnungen der Kreisstatistik. Ursachen für die Abweichung von maximal 20 % können sowohl die der Klassifizierung innewohnenden Fehler als auch der gewählte Schätzansatz auf Basis der Kreisstatistik, der auf Anteilen und Mittelwerten beruht, sein.

Ein weiterer Vorteil der Methodik liegt darin, dass verschiedenste Raumbezüge hergestellt werden können (vgl. Abb. 5). Während bisher in der Raumplanung Betrachtungsräume durch administrative Grenzen definiert wurden, setzt sich immer mehr die Erkenntnis durch, dass Analysen, Diagnosen und Prognosen bezogen auf Naturraumgrenzen vorgenommen werden müssen. Das berücksichtigen moderne Ansätze zunehmend. So setzt die europäische Wasserrahmenrichtlinie beim Einzugsgebiet an und nicht bei Staats- und Landesgrenzen. Die vorgestellte Methode trägt dieser Tatsache Rechnung, indem der Raumausschnitt jederzeit durch entsprechende Masken in interessierende Teilräume bis hin zur Raumeinheit des Schlages aufgegliedert werden kann. Differenziert betrachtet werden können beispielsweise Teilräume, die sich aus Naturraumgrenzen (Flusseinzugsgebiete etc.), administrativen Untereinheiten

(Kreisebene, Gemeindeebene etc.), unterschiedlichen ökonomischen Bewertungen (nach Landbaugebiet, nach Wirtschaftsweise etc.), ökologischen Sensibilitäten (Naturschutzkategorien, Trinkwasserschutzzonen etc.) und sozialen Rahmenbedingungen (Förderprogramme, Ausgleichszahlungen etc.) ergeben. Das macht den qualitativen Sprung im Ansatz aus. Die Fernerkundungsmethode kann somit administrativ und naturräumlich verankerte Informationen verknüpfen und die Lücke zwischen beiden schließen helfen. So zeigt Abb. 5 die räumliche Bezugseinheit „Einzugsgebiet“ als Basis und die untergeordneten Raumeinheiten „Landkreis“ (administrativ) und „Teileinzugsgebiet“ (naturräumlich). Es ist also nicht nur möglich, Angaben und Aussagen über die Stickstoffdüngegaben für das Einzugsgebiet als Ganzes, sondern z. B. über die Stickstoffgaben für Teileinzugsgebiete, für einzelne Landkreise und/oder für Anteile eines Landkreises in einem Teileinzugsgebiet zu machen. In der gängigen behördlichen Praxis ist das Erstellen flächennutzungsbezogener Aussagen immer dann sehr aufwendig, sobald sie flächengenau oder im Naturraumbezug erfolgen sollen. Flächengenauere Informationen liegen bestenfalls kleinräumig vor. Naturräumliche Grenzen spielen in der Datenerfassung momentan eine untergeordnete Rolle. Es existieren keine klaren Verantwortungsbereiche und oft wird die Erfassung durch administrative Strukturen zerstückelt.

5 Diskussion

Unabhängig von der Bewertung der Vorzüge des Verfahrens (ITZEROTT & KADEN 2007) soll abschließend explizit noch einmal auf die Anwendungsvorteile der Fernerkundung beim Flächennutzungsmonitoring verwiesen werden.

Landschaftsplanung ist heute als eine auf verschiedenen politisch-administrativen Raumebenen verankerte Aufgabe zentraler Entwicklungssteuerung anzusehen. Das Spektrum reicht dabei von global bis lokal und liegt z. B. bei der UNESCO, der EU, den Bundesministerien der BRD, den Bun-

desländern, Landkreisen und Gemeinden. Diese Ebenen haben ihre speziellen administrativen Bezugseinheiten geschaffen und zur Basis ihres Handelns gemacht. Nicht für alle komplexen Fragestellungen sind diese Raumeinheiten optimal geeignet. Immer häufiger verlangen Lösungsansätze im Themenbereich der Flächennutzung die Berücksichtigung von Grenzen im Natur- und Wirtschaftsraum. Ein exakterer Raumbezug wird notwendig, der den gegenwärtigen Anforderungen, die aktuelle Nutzung besser an die naturräumliche Ausstattung zu knüpfen, gerecht wird. Ein Flächennutzungsmonitoring auf Fernerkundungsbasis eignet sich als Mittler zwischen administrativen und natürlichen Bezugsräumen. Ein weiterer Vorteil liegt in der jährlichen Wiederholbarkeit der Erhebung. Nur auf dieser Basis lässt sich ein Monitoringeffekt begründen. Flächennutzungswechsel und Entwicklungsdifferenzierungen sind abbildbar. Sie stehen für eine wirklichkeitsnahe Abbildung und sind unabdingbar für realistische Vorhersagemodelle und Szenarien.

Das vorliegende Beispiel konnte zeigen, dass die raumkonkrete Abschätzung der jährlichen Düngegabe auf der Grundlage eines fernerkundungsbasierten Flächennutzungsmonitorings möglich ist. Das zentrale Kriterium für die Ergebnisqualität ist die Güte der Nutzungserfassung. Im vorgestellten Ansatz wurde diese auf Grundlage von spektralen Normkurven realisiert. Für einzelne Jahre konnten im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren durchaus vergleichbare Klassifizierungsgenauigkeiten erzielt werden (BRENNING et al. 2006). Im Fall von Jahren mit sehr ungünstigem Witterungsgeschehen zeichnete sich auf Grenzstandorten landwirtschaftlicher Produktion ab, dass eine Normkurve je Kultur als zu unspezifisch angesehen werden muss. Ein zusätzliches Problem ergibt sich aus der Ähnlichkeit im phänologischen Ablauf der Kulturen. Ihre exakte Trennung in einer Klassifizierung erfordert unabhängig vom Verfahren die Verwendung bestimmter geeigneter Aufnahmezeitpunkte. Liegen diese nicht vor, ist die Klassifizierungsgüte grundsätzlich eingeschränkt. Das gilt genauso für Klassifizie-

rungsverfahren mit anderen Ansätzen, ist also kein dem Verfahren innewohnendes Problem. Somit liegen Potenzen zur Verbesserung der Ergebnisqualität zum einen in der Verdichtung der Aufnahmefolgen durch verkürzte Wiederkehrzeiten (in zukünftigen Satellitenmissionen wie RapidEye oder EnMAP) und zum zweiten in der Berücksichtigung wachstumsdifferenzierender Naturraumbedingungen (natürliche Wasserverfügbarkeit und Bodengüte) und Bewirtschaftungsmaßnahmen (Bewässerungsmaßnahmen, Düngemanagement) durch spezifizierte Normkurven. Als dritter Aspekt kann die Nutzung von Hyperspektralinformationen zukünftiger Sensoren (EnMAP) zur Ableitung der phänologischen Zustandsinformation aus dem Satellitendatensatz Eingang ins Verfahren finden.

Monitoringaufgaben, die Gegenstand der administrativen Umweltüberwachung sind, verlangen einen exakten Raum- und Zeitbezug der relevanten Parameter. Dieser Forderung kann nur durch universelle Klassifizierungsansätze mit übertragbaren Entscheidungsregeln nachgekommen werden. Die Entwicklung eines Ansatzes zur Verwendung spektraler Normkurven berücksichtigt diesen Fakt. Das hier vorgestellte Verfahren erweist sich als durchaus praktikabel.

Eine hohe Güte der Klassifizierung ermöglicht ohne weiteres eine Verknüpfung mit Kenngrößen, die mit der Flächennutzungsdynamik korrespondieren. Oft muss hier wie auch in allen anderen Verfahren insbesondere bei großflächigen Betrachtungen von konkreten Werten abstrahiert werden. Im Fall der Düngung wurde mit standardisierten Düngerichtwerten gearbeitet. Trotz dieses Kompromisses können durch den exakten Raum- und Zeitbezug des Ergebnisses deutlich realitätsnähere Düngegeschätzungen als Eingangsparameter in Nährstoffbilanzmodelle bereitgestellt werden.

Ein wesentliches Ziel der Grundlagenforschung in der Fernerkundung muss darin bestehen, praxisrelevante Ergebnisse zu erzielen. Das erfordert, die Vorteile in der Raum- und Zeitauflösung der Daten in eine kontinuierliche Überwachung von Prozes-

sen im Umweltbereich zu überführen. Das vorgestellte Verfahren leistet dadurch, dass es die Forderung nach Übertragbarkeit der Klassifizierungsregeln aufnimmt, unter Berücksichtigung der genannten Potenzen für die Weiterentwicklung des Verfahrens einen beachtenswerten Beitrag zur Entwicklung von stabilen Monitoringsystemen.

Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Forschungsprojektes „Bewirtschaftungsmöglichkeiten im Einzugsgebiet der Havel“ durchgeführt (BRONSTERT & ITZEROTT 2006) und vom BMBF unter dem Kennzeichen 0330227 gefördert. Gedankt sei insbesondere Herrn Dr. Neubert für die Bereitstellung der Düngeschätzung auf Kreisebene sowie den Gutachtern für die wertvollen Hinweise zur Überarbeitung des Manuskripts.

Literatur

- BRENNING, A., KADEN, K. & ITZEROTT, S., 2006: Comparing classifiers for crop identification based on multitemporal Landsat TM/ETM data. – 2nd Workshop of the EARSeL Special Interest Group on Land Use & Land Cover, CD-ROM.
- CHEN, Q., ZHANG, Y., EKROOS, A. & HALLIKAINEN, M., 2004: The role of remote sensing technology in the EU water framework directive (WFD). – *Environmental Science & Policy* 7: 267–276.
- CLEVERS, J., VONDER, O., JONGSCHAAP, R., DESPRATS, J., KING, C., PREVOT, L. & BRUGIER, N., 2000: Monitoring wheat growth by calibrating a crop growth model using optical satellite data. – *Geophysical Research Abstracts, Hydrology and Earth System Sciences* 2: 424–429.
- BADHWAR, G.D., 1984: Use of LANDSAT-derived profile features for spring small-grains classification. – *International Journal Remote Sensing* 5 (5): 783–797.
- BRD, 2001: Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten. – Bundes-Bodenschutzgesetz-BodSchG, zuletzt geändert am 09.09.2001.
- BRD, 2007: Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (DüV). – Zuletzt geändert am 27.02.2007.
- BRONSTERT, A. & ITZEROTT, S., 2006: Bewirtschaftungsmöglichkeiten im Einzugsgebiet der Havel – Abschlussbericht zum BMBF-Projekt. – Brandenburgische Umweltberichte, Band 18, Potsdam.
- DOBERS, E.S., 2002: Verfahren der Standorterkundung für den standortspezifischen Ackerbau. – *Göttinger Bodenkundliche Berichte* 115, 226 S., Göttingen.
- DWD, 1991 – 2000: Agrarmeteorologischer Wochenbericht für Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg und Berlin. – Deutscher Wetterdienst, Wetteramt Potsdam.
- ITZEROTT, S. & KADEN, K., 2006: Ein Algorithmus zur Klassifizierung landwirtschaftlicher Fruchtarten anhand spektraler Normkurven als Alternative zu überwachten Verfahren auf Basis von Trainingsgebieten. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* 6/06: 509–518.
- ITZEROTT, S. & KADEN, K., 2007: Gütebewertung für die Klassifizierung landwirtschaftlicher Fruchtarten aus spektralen Normkurven. – *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* 2/07: 109–120.
- JACOBS, J., 2006: Entwicklung von Landschaftsszenarien für die Bewirtschaftung von Flusseinzugsgebieten nach den Anforderungen der EU-Wasserrahmenrichtlinie. – Dissertation, Universität Potsdam, Institut für Geoökologie.
- EKHOLM, P., KALLIO, K., SALO, S., PIETILAINEN, O.-P., REKOLAINEN, S., LAINE, Y. & JOUKOLA, M., 2000: Relationship between catchment characteristics and nutrient concentrations in an agricultural river system. – *Water Research* 34 (15): 3709–3716.
- EU (2000): Richtlinie 2000/60/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. – *Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft L* 327: 1–72.
- FERRIER, R.C., WHITEHEAD, P.G., SEFTON, C., EDWARDS, A.C. & PUGH, K., 1995: Modelling impacts of land use and climate change on nitrate-nitrogen in the river Don, North-East Scotland. – *Water Research* 29 (8): 1950–1956.
- GUERIF, M., BLÖSER, B., ATZBERGER, C., CLASTRE, P., GUINOT, J.P. & DELECOLLE, R., 1996: Identification de parcelles agricoles à partir de la forme de leur évolution radiométrique au cours de la saison de culture. – *Photo-Interpretation* 1: 12–22.
- HAASE, G., BARSCH, H., HUBRICH, H., MANNFELD, K. & SCHMIDT, R., 1991: Naturraumerkundung und Landnutzung – Geochorologische Verfahren zur Analyse, Kartierung und

- Bewertung von Naturräumen. – Akademie Verlag, Berlin.
- KALLURI, S., GILRUTH, P. & BERGMAN, R., 2003: The potential of remote sensing data for decision makers at the state, local and tribal level: experiences from NASA's Synergy program. – *Environmental Science & Policy* **6**: 487–500.
- KING, C., LECOMTE, V., LE BISSONNAIS, Y., BAGHDADI, N., SOUCHÈRE, V. & CERDAN, O., 2005: Remote-sensing data as an alternative input for the STREAMT runoff model. – *Catena* **62**: 125–135.
- MARACCHI, G., PÉRARNAUD, V. & KLESCHENKO, A.D., 2000: Applications of geographical information systems and remote sensing in agrometeorology. – *Agricultural and Forest Meteorology* **103**: 119–136.
- MARTINEZ-CASASNOVAS, J.A., MARTIN-MONTEIRO, A. & CASTERAD, M.A., 2005: Mapping multi-year cropping patterns in small irrigation districts from time-series analysis of Landsat TM images. – *European Journal of Agronomy* **23**: 159–169.
- NEARING, M.A., JETTEN, V., BAFFAUT, C., CERDAN, O., COUTURIER, A., HERNANDEZ, M., BISSONNAIS, Y., NICHOLS, M.H., NUNES, J.P., RENSCHLER, C.S., SOUCHÈRE, V. & VAN OOST, K., 2005: Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover. – *Catena* **61**: 131–154.
- OENEMA, O., BOERS, P.C.M., VAN EERDT, M.M., FRATERS, B., VAN DER MEER, H.G., ROEST, C.W.J., SCHRÖDER, J.J. & WILLEMS, W.J., 1998: Leaching of nitrate from agriculture to groundwater: the effect of policies and measures in the Netherlands. – *Environmental Pollution* **102**, S 1: 471–478.
- OPPELT, N., 2002: Monitoring of Plant Chlorophyll and Nitrogen Status Using the Airborne Imaging Spectrometer AVIS. – Dissertation, LMU München: Fakultät für Geowissenschaften.
- REIFENSTEIN, V., 2004: Analyse der Umsetzung der Düngerahmenempfehlung des Landes Brandenburg für Stickstoff in drei Landwirtschaftsbetrieben im Haveleinzugsgebiet. – Diplomarbeit, Potsdam.
- SMITH, C.S. & MC DONALD, G.T., 1998: Assessing the sustainability of agriculture at the planning stage. – *Journal of Environmental Management* **52**: 15–37.
- SMITH, C.S., MC DONALD, G.T. & THWAITES, R.N., 2000: TIM: Assessing the sustainability of agricultural land management. – *Journal of Environmental Management* **60**: 267–288.
- SOUCHÈRE, V., KING, C., DUBREUIL, N., LECOMTE-MOREL, V., BISSONNAIS, Y., & CHALAT, M., 2003: Grassland and crop trends: role of the European Union Common Agricultural Policy and consequences for runoff and soil erosion. – *Environmental Science & Policy* **6**: 7–16.
- SOUCHÈRE, V., CERDAN, O., DUBREUIL, N., BISSONNAIS, Y. & KING, C., 2005: Modelling the impact of agri-environmental scenarios on runoff in a cultivated catchment (Normandy, France). – *Catena* **61**: 229–240.
- STICKSEL, E., SCHÄCHTL, J., HUBER, G., LIEBLER, J. & MAIDL, F., 2004: Diurnal Variation in Hyperspectral Vegetation Indices Related to Winter Wheat Biomass. – *Precision Agriculture* **5** (5): 509–520.
- STROPPIANA, D., BOSCHETTI, M., CONFALONIERI, R., BOCCHI, S. & BRIVIO, P.A., 2005: Analysis of hyperspectral field radiometric data for monitoring nitrogen concentration in rice crops. – *SPIE Proceedings: Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology VII*.
- TAPIADOR, F.J. & CASANOVA, J.L., 2003: Land use mapping methodology using remote sensing for the regional planning directives in Segovia, Spain. – *Landscape and Urban Planning* **62**: 103–115.
- VAN DER VLIST, M.J., 1998: Land use planning in the Netherlands; finding a balance between rural development and protection of the environment. – *Landscape and Urban Planning* **41**: 135–144.
- WECHSUNG, F., KRYSANOVA, V., FLECHSIG, M. & SCHAPHOFF, S., 2000: May land use change reduce the water deficiency problem caused by reduced brown coal mining in the state of Brandenburg? – *Landscape and Urban Planning* **51**: 177–189.
- WEICHERT, A., 2004: Erfassung des Bodeneinflusses auf die phänologische Entwicklung von Winterroggen mit multitemporalen Fernerkundungsdaten. – Diplomarbeit, Freiberg.
- Anschriften der Autoren:
- Dr. SIBYLLE ITZEROTT, GeoForschungsZentrum Potsdam, Sektion Fernerkundung, Telegraphenberg A 17, D-14473 Potsdam, Tel.: +49 -331-2881107, Fax: +49 -331-2881192, e-mail: itzerott@gfz-potsdam.de
- Dr. KLAUS KADEN, Universität Potsdam, Institut für Geoökologie, Karl-Liebknecht-Strasse 24-25, D-14476 Potsdam, Tel.: +49 -331-9772107, Fax: +49-331-9772092, e-mail: kkaden@rz.uni-potsdam.de
- Manuskript eingereicht: Juni 2007
Angenommen: Januar 2008