

Erfassung und Beurteilung von Seen und deren Einzugsgebieten mit Methoden der Fernerkundung

Laufener Seminarbeiträge 2/03



Erfassung und Beurteilung von Seen und deren Einzugsgebieten mit Methoden der Fernerkundung

Tagungsband der ANL-Fachveranstaltung
vom 11. bis 12. September 2003 in Laufen

Leitung:

Dr. Elisabeth Obermaier
Dipl.-Biologin, Bayerische Akademie
für Naturschutz und Landschaftspflege (bis 11.03)

Prof. Dr. Ulrich Ammer
Lehrstuhl für Landnutzungsplanung
und Naturschutz, TU München

Prof. Dr. Arnulf Melzer
Limnologische Station der TU München

Herausgeber:

Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)
D - 83406 Laufen/Salzach, Postfach 1261
Telefon (0049)08682/8963-0,
Telefax (0049)08682/8963-17 (Verwaltung) und (0049)08682/8963-16 (Fachbereiche)
E-Mail: poststelle@anl.bayern.de
Internet: <http://www.anl.de>

2004

Zum Titelbild: Das Bild zeigt ein Anwendungsbeispiel zur Kartierung von submersen Makrophyten im Flachwasserbereich um die Insel Reichenau (Bodensee). Vergleich der Prozessierungsergebnisse von DAEDALUS- Aufnahmen im Juli 2001 und 2002.

Spezielle MIP-Module korrigieren in dieser Anwendung den Einfluss der Wassersäule auf das Reflexionssignal, ermöglichen die Berechnung der Reflexionseigenschaften des Seegrundes und interpretieren diese Spektren dann als Mischsignal aus verschiedenen Sediment- oder Bewuchsklassen. Im Ergebnisbild werden Klassen von bodennahen Makrophyten (*Characeen*) in der Farbe grün, von hoch wachsenden Makrophyten (hier: hauptsächlich *Potamogeton perfoliatus* & *pectinatus*) in rot und unbedeckte Seegrund-Sedimente in blau dargestellt (siehe Beitrag HEEGE et al. S. 67-71).

Laufener Seminarbeiträge 2/03

Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (ANL)

ISSN 0175 - 0852

ISBN 3-931175-71-5

Die Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege ist eine dem Geschäftsbereich des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz angehörende Einrichtung.

Die mit dem Verfassernamen gekennzeichneten Beiträge geben nicht in jedem Fall die Meinung der Herausgeber wieder. Die Verfasser sind verantwortlich für die Richtigkeit der in ihren Beiträgen mitgeteilten Tatbestände.

Die Zeitschrift und alle in ihr enthaltenen einzelnen Beiträge sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der AutorInnen oder der Herausgeber ist unzulässig.

Schriftleitung und Redaktion: Dr. Notker Mallach (ANL, Ref. 12) in Zusammenarbeit mit Dr. Elisabeth Obermaier

Satz: Fa. Hans Bleicher, Laufen

Druck und Bindung: E. Grauer Offsetdruck, Laufen

Druck auf Recyclingpapier (100% Altpapier)

Widmung zum 70. Geburtstag von Prof. em. Dr. Ulrich Ammer



Auf den ersten Blick mag es eigenartig erscheinen, dass einem Geehrten seine eigenen Werke zum Geschenk überreicht werden. Herr Prof. Dr. Ulrich Ammer hat nämlich nicht nur den Einführungsaufsatz im vorliegenden Heft geschrieben, sondern war auch wesentlich an der Durchführung der dieser Publikation zu Grunde liegenden Fachveranstaltung beteiligt.

Da aber die Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege in den letzten beiden Jahrzehnten das Glück hatte mit dem jetzigen Jubilar in vielfältiger Weise zusammen zu arbeiten, ist es uns eine besondere Ehre, Ihm zum Dank und als kleine Anerkennung seiner Verdienste die vorliegende Schrift aus der Reihe „Laufener Seminarbeiträge“ zu überreichen.

Universitätsprofessor Dr. Ulrich Ammer vollendete am 28. Januar 2004 sein 70. Lebensjahr. Vor seiner Emeritierung im Frühjahr 2001 hatte er den Lehrstuhl für Landnutzungsplanung und Naturschutz an der Studienfakultät für Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement im Wissenschaftszentrum Weihenstephan der Technische Universität München (TUM) inne. Allein in der Errichtung dieses Lehrstuhls zeigt sich bereits die erstaunliche Weitsicht von Prof. Dr.

Ammer, und auch die Fülle der von ihm aufgegriffenen Themen und Forschungsbereiche weist weit über bislang rein forstliche Aspekte hinaus bis hin zur „FERNERKUNDUNG“.

Schon lange vor Rio de Janeiro 1992 erkannte Prof. Dr. Ammer die Erhaltung der Biodiversität als Grundsatzelement einer nachhaltigen Landnutzung und dies übrigens nicht nur im Forst, wie sich unter anderem auch mit seiner Vortragstätigkeit über das Thema Ökologischer Landbau auf manchem früheren Seminar der ANL belegen lässt. All dies erfolgte bereits zu einer Zeit als es noch schwierig war, für dieses Thema kompetente Referenten zu gewinnen. Seine wissenschaftliche und berufliche Anerkennung über den universitären Bereich hinaus ist auch erkennbar in zahlreichen Ernennungen zu verschiedenen Ehrenämtern. So ist Herr Prof. Dr. Ammer u. a. auch Mitglied im Obersten Naturschutzbeirat in Bayern, im Vorstand des Bayerischen Naturschutzfonds sowie beim Deutschen Rat für Landespflege und bereits weit über ein Jahrzehnt im Präsidium (bzw. zeitlich überschneidend im damaligen Kuratorium) der Bayerischen Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege. In dieser Eigenschaft hat er sich stets in besonderer Weise mit den Interessen der ANL identifiziert und sich für den Aufbau und Ausbau der Akademie eingesetzt.

Wir von der ANL wünschen Herrn Prof. Dr. Ammer zu seinem 70. Geburtstag alles erdenklich Gute, noch viele gesunde Lebensjahre und weiterhin Schaffenskraft auch im sogenannten Ruhestand bzw. Unruhestand und wünschen uns – keineswegs uneigennützig – noch viele Jahre weiterer guter Zusammenarbeit und seine wohlwollende Unterstützung im Präsidium der ANL mit dem gemeinsamen Ziel der Erhaltung der uns umgebenden und von uns zu bewahrenden Biodiversität.

Dr. Christoph Goppel
Direktor der Bayerischen Akademie für
Naturschutz und Landschaftspflege

Programm der Fachtagung		5-6
Einführung - Erfassung und Beurteilung von Seen und deren Einzugsgebieten mit Methoden der Fernerkundung	Ulrich AMMER	7-10
<i>I. Welche Informationen zur Landnutzung benötigen Behörden und Kommunen zur Erfüllung der Auflagen von Programmen und Richtlinien nationaler und europäischer Art</i>		
Bedarf aus wasserwirtschaftlicher und naturschutzfachlicher Sicht	Klaus ARZET	11-13
Bedarf aus landwirtschaftlicher Sicht	Paul RINTELEN	15-19
Bedarf aus der Sicht eines Planungsbüros	Ulrike PRÖBSTL	21-24
<i>II. Welchen Beitrag kann die Fernerkundung heute leisten?</i>		
Allgemeine Einführung in das fernerkundliche Umfeld	Thomas SCHNEIDER und Stefan ZIMMERMANN	25-36
Förderaspekte im Erdbeobachtungsprogramm des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) (Präsentation in Stichworten)	Bernd VENNEMANN	37-38
Einsatz von Fernerkundung im Rahmen aktueller Forschungsprojekte zur Gewässerökologie an der Universität Hohenheim	Klaus SCHMIEDER und Annette WOITHON	39-45
AQUATIC: Erfassung und Beurteilung von aquatischen und terrestrischen Feuchtgebieten mit sehr hoch auflösenden FE-Daten	Thorsten ANDRESEN, Claudius MOTT, Thomas SCHNEIDER, Caroline ROGG und Arnulf MELZER	47-53
AQUATIC: Identifizierung und Monitoring von Landnutzungs-/Landoberflächen-Typen in einem multitemporalen/multisensoralen Ansatz	Claudius MOTT, Thorsten ANDRESEN, Caroline ROGG, Thomas SCHNEIDER und Ulrich AMMER	55-65
<i>III. Die Rolle der Fernerkundung (FE) in einem integralen Monitoringkonzept auf Landschaftsebene</i>		
Physikalisch basierte Prozessierung multispektraler Fernerkundungsdaten von Binnengewässern	Thomas HEEGE, Clivia HÄSE, Anke BOGNER und Nicole PINNEL	67-71
Fernerkundung von Wasserinhaltsstoffen	Peter GEGE	73-78
Stofftransport-Modellierung zur Bestimmung der potentiellen Einträge aus dem Wassereinzugsgebiet	Florian HOFFMANN, Stefan ZIMMERMANN und Arnulf MELZER	79-83
Erfassung und Beurteilung von Wassereinzugsgebieten auf Landschaftsebene mit GIS und Fernerkundung: Landschaftsstruktur als Indikator	Hermann KLUG und Thomas BLASCHKE	85-99

Programm der Fachtagung

„Erfassung und Beurteilung von Seen und deren Einzugsgebieten mit Methoden der Fernerkundung“
vom 11.-12. September 2003 in Laufen

Donnerstag, 11. September 2003

Dr. Elisabeth Obermaier, ANL Prof. em. Dr. Ulrich Ammer	Begrüßung der Teilnehmer
Prof. em. Dr. Ulrich Ammer, TUM, Lehrstuhl für Landnutzungsplanung und Naturschutz, Freising-Weihenstephan	Einführung: Welche Informationen zur Land- nutzung benötigen Behörden und Kommunen zur Erfüllung der Auflagen von Programmen und Richtlinien nationaler und europäischer Art
Dr. Klaus Arzet, Wasserwirtschaftsamt München	Bedarf aus naturschutzfachlicher und wasser- wirtschaftlicher Sicht
Dr. Paul Rintelen, Bayer. Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Agrarökonomie, München	Bedarf aus landwirtschaftlicher Sicht
PD Dr. Ulrike Pröbstl, Arbeitsgruppe für Landnutzungsplanung, Institut für ökologische Forschung, Etting-Polling	Bedarf aus der Sicht eines Planungsbüros
Dr. Bernd Vennemann, DLR, Programmdirektion „Raumfahrt“, Bonn	Welchen Beitrag kann die Fernerkundung heute leisten?
Dr. Thomas Schneider, TUM, Iffeldorf	Allgemeine Einführung in das fernerkundliche Umfeld
Dr. Klaus Schmieder, Universität Hohenheim, Stuttgart	Das Schilfprojekt Bodensee, Efplus
Thorsten Andresen, TUM, Iffeldorf	AQUATIC: Erfassung und Beurteilung von aquatischen und terrestrischen Feuchtgebieten mit sehr hoch auflösenden FE-Daten
Claudius Mott, TUM, Freising	AQUATIC: Identifizierung und Monitoring von Landnutzungs-/Landoberflächen-Typen in einem multitemporalen/multisensoralen Ansatz
	Exkursion zum Waginger und Tachingener See Ziel: Verdeutlichung der Möglichkeiten und Grenzen der FE Demonstrationen: Ober/Unterwasser Spektralmess- geräte (Goniometer mit ASD Feldspektrometer, Ramses für die Unterwasserspektroskopie), Probennahme, Besprechung von Problemstellen (Land/Wasser)

Freitag, 12. September 2003

Dr. Susanne Jäger,
DLR, Programmdirektion „Öffentliche Märkte“,
Bonn

Die Rolle der FE in einem integralen Monitoring-
konzept auf Landschaftsebene (1)

Stefan Zimmermann,
TUM, München

Betrachtungen zur Rolle des Einzugsgebietes auf
die Qualität von Seen

Dr. Thomas Heege,
TUM, Iffeldorf

Makrophytenkartierung mit Hyperspektraldaten

Dr. Peter Gege,
DLR, Institut für Methodik und Fernerkundung,
Wessling

Wasserinhaltsstoffe

Die Rolle der FE in einem integralen Monitoring
konzept auf Landschaftsebene (2):

Florian Hoffmann,
TUM, Iffeldorf

Stofftransport-Modellierung zur Bestimmung der
potentiellen Einträge aus dem Wassereinzugsgebiet

PD Dr. Thomas Blaschke,
Universität Salzburg

„Die Landschaftsebene“

Prof. em. Dr. Ulrich Ammer,
TUM, Freising-Weihenstephan

Abschlussdiskussion

Erfassung und Beurteilung von Seen und deren Einzugsgebieten mit Methoden der Fernerkundung

Einführung in das Tagungsthema

Ulrich AMMER

Es ist ein Kennzeichen unserer Zeit, dass wir alles – möglichst auch Emotionales – messen, quantifizieren und dokumentieren wollen und dass diese Grundveranlagung – zumindest der Deutschen – noch in dem Maße wächst, wie uns die Technik Speicher- und Bearbeitungskapazitäten durch immer neue Computersysteme zur Verfügung stellt. Im Einklang mit dieser Entwicklung steigen die Anforderungen in allen Landnutzungsbereichen nach mehr und differenzierterer Information.

Ein Beispiel: Noch vor 10 Jahren genügte zur Beantragung von Fördermitteln aus dem KULAP-Programm die Angabe der Parzellen-Nr. und die dazugehörige Fläche einer bestimmten Nutzungsart. Heute muß die Nettonutzfläche angegeben werden, d.h. die Katasterfläche vermindert um etwaige Gehölzflächen, oder durch Einzelbäume überschirmte Flächen, bzw. ungenutzte Raine etc. Diese Flächen sind aus Luftbildern über Computerprogramme zu ermitteln, wobei der jeweilige Landwirtschaftsbetrieb über eine spezielle PIN-Nr. Zugang zu dieser Fernerkundungsinformation bekommt.

Abgesehen davon, dass diese Praxis naturschutzfachlich katastrophale Auswirkungen hat, weil die Landwirte das Problem im Zweifel mit der Motorsäge lösen, zumal Baum, Gehölz oder Hecke ohnehin Bewirtschaftungshindernisse darstellen und weil viele Bauern dem z. T. erheblichen Aufwand der Flächenkorrektur nicht gewachsen sind, – also abgesehen von dieser indirekten Aufforderung zur Vernichtung wichtiger landschaftlicher Strukturen, zeigt dieses Beispiel, dass auch in einem kartografisch gut erfassten und mit Fachplänen überzogenen Land zunehmend genauere, zeitlich wiederholbare und kostengünstig lieferbare Informationen zur Landnutzung gefordert werden. Die Überprüfung der Einhaltung von Mahdterminen z.B. bei Streuwiesen im Rahmen von Vertragsnaturschutzregelungen, die Vorauswahl von FFH-Gebieten, um den Behebungsaufwand zu verringern oder um Gebietsgrenzen festzulegen, oder Auswertungen für die Umsetzung von Gewässerpflegeplänen sind weitere Beispiele aus der Praxis.

Ein weiterer Bereich ist das **Monitoring** insbesondere in schwer zugänglichen Gebieten, etwa im aquatischen Bereich oder in den Alpen, bei welchen letzteren

es zunehmend wichtiger wird, über aktuelle Informationen zur Beurteilung risikohafter Entwicklungen zu verfügen, ob es sich nun um das Abschmelzen der Gletscher, den schleichenden Verlust der Schutzfähigkeit von Bergwaldbeständen (durch Sturm, Borkenkäfer oder Wild) oder das Ausmaß von Lawineneignissen handelt.

Aber auch außerhalb solcher Gebiete wird der Kontrollbedarf weiter zunehmen, ich denke nur an die Verfolgung und Überprüfung von Ökokontoregelungen (z.B. Aufforstungen, Anlage von Streuobstwiesen oder anderer Biotopflächen) oder den zu erwartenden Kontrollaufwand, wenn in Bayern ab 2004 der Vertragsnaturschutz im Wald realisiert werden soll. Hier wird es darum gehen, förderfähige Maßnahmen langfristig und flächenbezogen zu verfolgen wie z.B. die Renaturierung von Mooren und Auewäldern, den Verzicht auf Nutzung z.B. das Stehenlassen von Altbaumgruppen, den Erhalt oder die Schaffung von Freiflächen im Wald bis hin zu deutlichen Einschränkungen der Baumartenwahl.

Noch einmal: all diese Informationen müssen **aktuell**, rasch, wiederholbar und kostengünstig zur Verfügung gestellt werden. Terrestrische Begehung ist deshalb auf ein Minimum zu reduzieren. Von daher bieten sich Verfahren der Fernerkundung an, wobei das gute alte Luftbild trotz einer hohen Auflösung und Detailgenauigkeit noch immer den Mangel hat, schwer d.h. nur begrenzt automatisch auswertbar zu sein. Für eine fachlich qualifizierte Aussage bedarf es in der Regel immer noch des geübten Interpreten, auch wenn neuere Verfahren z.B. durch das Einbeziehen von Expertenwissen die Aussagemöglichkeiten verbessert haben; so lassen sich z.B. Baumarten, die im Luftbild kaum unterschieden werden können dann trennen, wenn über Regelwerke festgelegt werden kann, dass z. B. in einer bestimmten Höhenlage oder auf einem bestimmten Standort nur noch eine Baumart in Frage kommen kann.

Allein von der Wiederholungsrate, von den Kosten der Datenbeschaffung, aber auch von der Automatisierbarkeit der Auswertung her, verfügen deshalb die seit etwa 20 Jahren existierenden satellitengestützten Aufnahmesysteme wie das des amerikanischen Landsat oder des indischen IRS über eine große Attraktivität.

Mit jedem Überflug erfassen sie 50-180 km breite Geländestreifen und bieten sich daher zur Beobachtung und Kartierung größerer Gebietseinheiten an. Vor allem in Entwicklungsländern oder solchen mit unzureichender Datenbasis im Landnutzungsbereich können diese Systeme sehr hilfreich sein. So sind unter Nutzung von LANDSAT 7 Daten bzw. 3D-Darstellungen für das nordwestchinesische Lößgebiet (Abb. 1) Landnutzungskarten (Abb. 2) erstellt und mit einer Gefährdungskartierung (Abb. 3) entscheidende Grundlagen für die dringend notwendige Verringerung der Erosion mit ausreichender Detailgenauigkeit entwickelt worden (ZHOU, 2000; AMMER, FISCHER, SCHMITT und SEITZ, 2003), ein Ergebnis, das terrestrisch weder bezahlbar noch wegen des Mangels an Fachkräften kurzfristig realisierbar gewesen wäre.

Die Nutzungsmöglichkeiten von Satellitenaufnahmen haben aber auch ihre Grenzen, und es gehört wohl zu den Jugendsünden der Fernerkundungswissenschaft, diese lange Zeit nicht deutlich genug gemacht zu haben. Dadurch sind Hoffnungen geweckt worden, die im Bereich großmaßstäblicher Informationen wegen der groben Auflösung aber auch auf Grund atmosphärischer Einflüsse und einer z. T. eingeschränkten Verfügbarkeit nicht erfüllt werden konnten (vgl. auch SEMMT, 2002, SCHNEIDER et al., in diesem Heft).

Neuere Entwicklungen bei Satelliten wie IKONOS oder QUICK BIRD versprechen aber erhebliche Verbesserungen im Bezug auf die geometrische Auflösung und die zeitliche Verfügbarkeit der Daten. Zu-

sammen mit Fortschritten in der Interpretation etwa durch die Verfahren der objektorientierten Bildanalyse (DE KOK, 2001) oder der Nutzung von OFF-Nadir-Reflexionsaufnahmen (MANAKOS, 2003) sind weitere Einsatzmöglichkeiten bis hin zur *precision agriculture* denkbar.

Vor diesem Hintergrund und den ständig steigenden Anforderungen an Daten für Programme und Richtlinien, nicht nur nationaler sondern vermehrt auch europäischer Art, soll auf dieser Veranstaltung über die Rolle der Fernerkundung kritisch diskutiert und sollen Erfahrungen über ihre Anwendung im Landnutzungsbereich ausgetauscht werden.

In einem ersten Abschnitt geht es in den Referaten von Dr. Arzet, Dr. Rintelen und Dr. Pröbstl zunächst einmal darum, den **Bedarf** an Informationen zur Landnutzung bzw. im Rahmen der Planung deutlich zu machen.

In einem zweiten Themenblock werden Herr Dr. Venemann und Herr Dr. Schneider darstellen, welchen Beitrag die Fernerkundung heute zu leisten vermag und an 3 konkreten Beispielen soll aufgezeigt werden, wie gut aquatische und terrestrische Feuchtgebiete erfaßt und beurteilt werden können bzw. in wie weit Landoberflächentypen mit einem multitemporalen bzw. multisensoralen Ansatz zu identifizieren sind.

Im Anschluss daran wird eine Exkursion zum Waginger bzw. Tachinginger See führen, bei der Methoden, Verfahren und Probleme vor Ort diskutiert werden können.



Abbildung 1
Lösshügellandschaft nördlich von Yan'An, Provinz Shaanxi, P.R. China

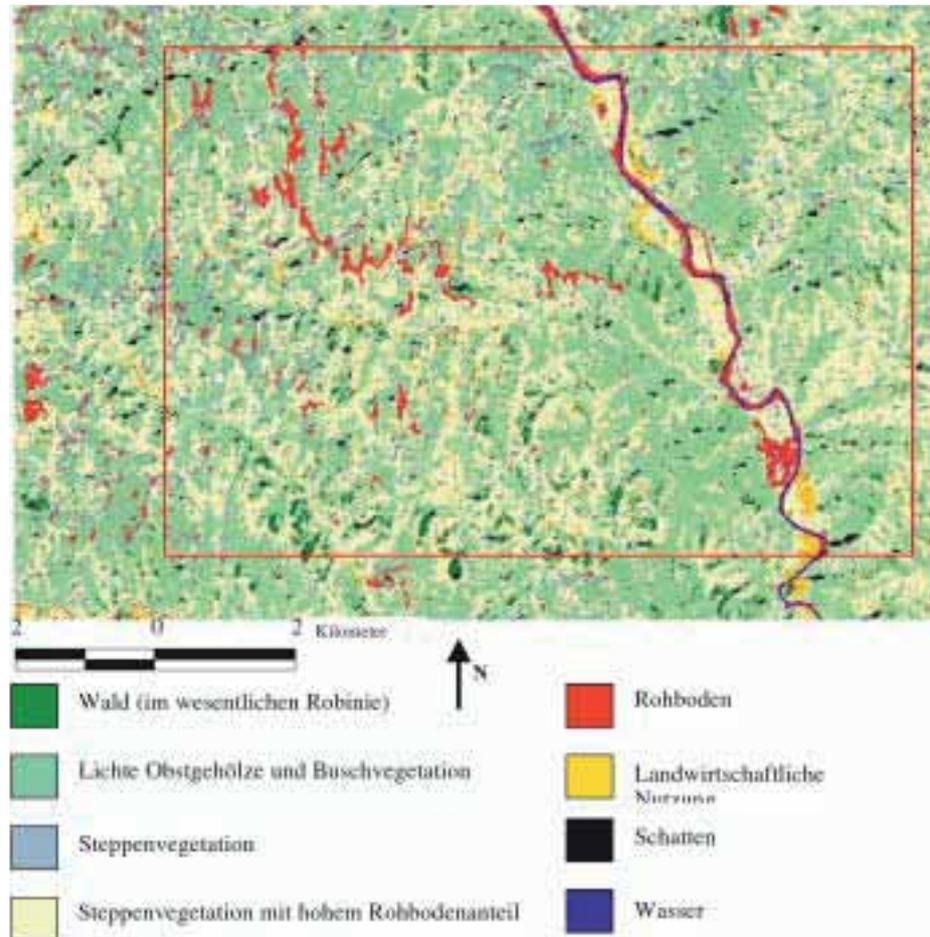


Abbildung 2a

Ergebnis der Klassifizierung der LANDSAT ETM 7-Szene für das Untersuchungsgebiet I (bei Yan'An)

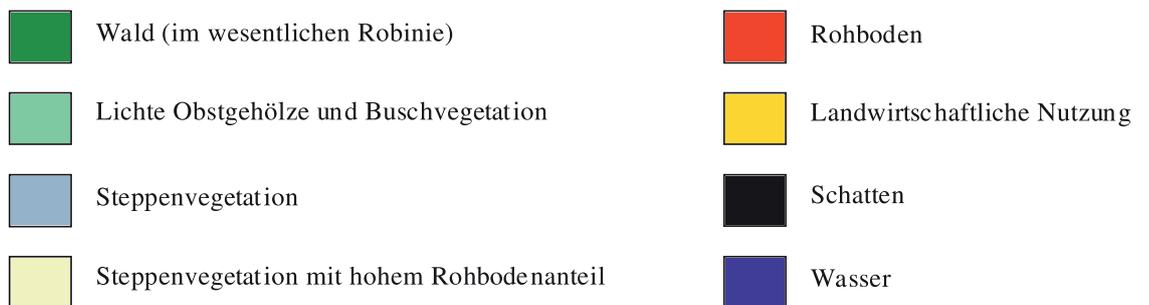
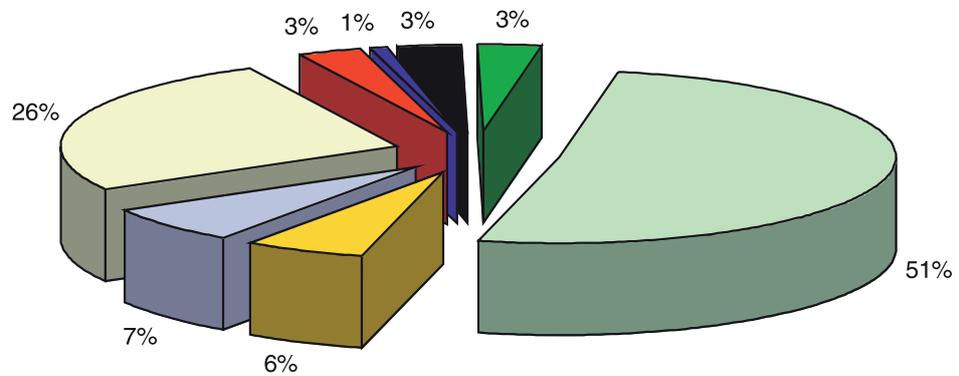


Abbildung 2b

Prozentuale Verteilung der Landnutzungsclassen im Untersuchungsgebiet I (bei Yan'An)

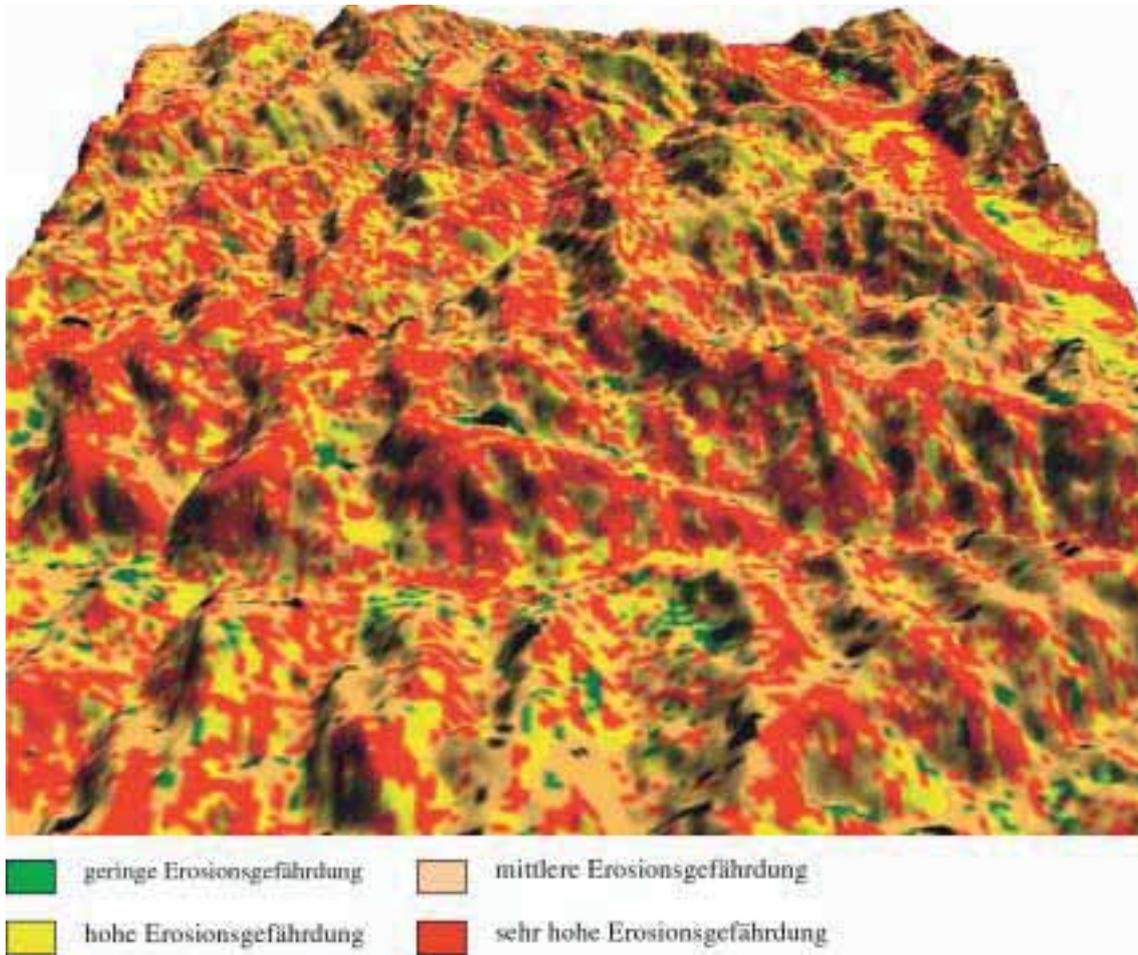


Abbildung 3

3D-Darstellung der Erosionsgefährdung entsprechend dem Schutzpotential der Landnutzungsformen im Untersuchungsgebiet I (bei Yan'An)

Morgen wollen wir in einem dritten Block die Thematik auf eine höhere Ebene, die der **Landschaft** heben und dabei vor allem Fragen erörtern, die sich aus der Beschaffenheit des Einzugsgebietes oder dem Stofftransport für die Qualität von Seen ergeben.

Literatur

AMMER, U.; C. CHEN, A. FISCHER, U. SCHMITT & R. SEITZ (2003):

Schlußbericht des Forschungsvorhabens „Degradierungsgefahren und Renaturierung durch Wiederbewaldung in Lößlandschaften der nordchinesischen Provinz Shaanxi, VR China“ beim BMBF, Förder-Nr. 0339743, Kurzfassung (40 S.) im Druck.

DE KOK, R. (2001):

Objektorientierte Bildanalyse – ein Lösungsansatz für den automatischen Einsatz sehr hoch auflösender Satellitendaten für forstliche Fragestellungen, Dissertation an der TUM Freising, 113 S.

MANAKOS, I. (2003):

Informationsableitung aus „OFF-Nadir-Reflexionsaufnahmen“ zur Entscheidungsunterstützung in „Precision Agriculture“, Dissertation an der TUM Freising, 230 S.

SEMMT, W. (2002):

Umweltbeobachtung im Hochgebirge mit operationell arbeitenden Satellitensystemen unter Verwendung von Daten aus Geoinformationssystemen, Dissertation an der TUM Freising, 186 S.

ZHOU, M. (2000):

Erosion Control and Reforestation in Loess Plateau in Shaanxi Province: a case study applying object-oriented image analysis approach and Landsat-7 ETM + data; Masterarbeit an der TUM Freising, 84 S.

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. em. Ulrich Ammer
Lehrstuhl für Landnutzungsplanung
und Naturschutz
Technische Universität München
Am Hochanger 13
85354 Freising

Erfassung und Beurteilung von Seen und deren Einzugsgebieten mit Methoden der Fernerkundung

Bedarf aus wasserwirtschaftlicher und naturschutzfachlicher Sicht

Klaus ARZET

Zusammenfassung

Berichtspflichten und Planungen zum Status quo, Monitoring, Bewirtschaftung und Management von Zielen und Maßnahmen nehmen im Bereich der Wasserwirtschaft und des Naturschutzes in Gewässern und anderen Naturräumen auf der Ebene der Bundesländer und Europas ständig zu.

Automatisierte Datenerfassungs- und Verarbeitungsmethoden der Fernerkundung können dabei einen wichtigen Beitrag z. B. bei der Erstellung von Gewässerentwicklungsplänen oder bei der Grundlagenermittlung für die EG-Wasserrahmenrichtlinie und die Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie liefern.

In der wasserwirtschaftlichen bzw. naturschutzfachlichen Arbeitspraxis haben sie aber bisher nur vereinzelt Fuß gefasst.

Aus der Wasserwirtschaft gibt es Anwendungsbeispiele aus den Bereichen der Gewässerentwicklungsplanung an Seen, der Ermittlung und Festsetzung von Überschwemmungsgebieten bei Fließgewässern oder der Bewertung von See-einzugsgebieten (z. B. Chiemsee, Starnberger See, Waginger/Tachingener See).

Im Naturschutz haben Methoden der Fernerkundung im Zusammenhang mit der Landschaftsnutzung und Flächenkontrolle (Vertragnaturschutzprogramm) eine gewisse Bedeutung. Ansätze gibt es auch bei der Erstellung von Landschaftsentwicklungskonzepten (Moorentwicklungskonzept des LfU).

Ausgehend von den vorliegenden Anwendungsbeispielen werden Anforderungen an die Fernerkundung aus der Sicht der wasserwirtschaftlichen und naturschutzfachlichen Alltagspraxis formuliert.

1. Einführung

Unter den Methoden der Fernerkundung versteht man die Gesamtheit der Verfahren zur Gewinnung von Informationen über die Erdoberfläche durch Messung und Interpretation der von ihr ausgehenden (Energie-) Felder. Als Informationsträger dient dabei die von der Erde reflektierte oder emittierte elektromagnetische Strahlung (DIN). Man unterscheidet heute zwischen der Luftbild- und Satellitenbildtechnik. Die traditionelle Luftbildtechnik hat durch die Entwicklung und den Einsatz von automatisierten multispektralen Verfahren (Scan-Bilder) eine wesentliche Erweiterung ihrer Möglichkeiten erfahren.

Der „Blick von oben“ besticht durch die Möglichkeit, Ausschnitte der Erdoberfläche automatisiert und präzise in ihrer Gesamtheit zu erfassen. In zahlreichen Projekten wird an der Verbesserung der technischen Methoden gearbeitet (u. a. High Tech Offensive Bay-

ern). Im Mittelpunkt des Interesses stehen die höhere (spektrale) Auflösung von Erfassungsgeräten, die Umsetzung der aufgezeichneten Strahlung in fachlich brauchbare Informationen, variable Maßstabebenen und die operationelle Anwendung.

2. Ermittlung und Bedarf von fachlichen Grundlagen – heute und morgen

Berichtspflichten und Planungen zum Status quo, Monitoringprogramme, Bewirtschaftung und Management von aquatischen, amphibischen und terrestrischen Lebensräumen zur Erreichung des guten Zustandes eines Gewässers (nach EG-WRRL) oder eines guten Erhaltungszustandes (nach FFH-RL) nehmen im Bereich der Wasserwirtschaft und des Naturschutzes auf der Ebene der Bundesländer und des Bundes kontinuierlich zu (z. B. EG-Wasserrahmenrichtlinie, FFH-Richtlinie u. a.). Die automatisierte Datenerfassung und Auswertung mittels Fernerkundungsmethoden könnte eine wesentliche Hilfe bei der Grundlagenermittlung sowie bei der Erstellung von Berichten und Planungen darstellen.

Potentielle wasserwirtschaftliche und naturschutzfachliche Anwendungsbereiche für die Methoden der Fernerkundung sind:

Grundlagenermittlung Wasserwirtschaft

- Die Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie, die u. a. eine Bestandsaufnahme des Status Quo, ein Monitoring, die Erstellung von Bewirtschaftungsplänen sowie die Umsetzung von Maßnahmenprogrammen und -plänen vorsieht,
- die Erstellung von Plänen zur Gewässerentwicklung und dem vorbeugenden Hochwasserschutz,
- die konzeptionelle Planung für die Gewässerentwicklung und Gewässerstrukturkartierung,
- die Ermittlung und Festsetzung von Überschwemmungsgebieten sowie
- das bayerische Auenprogramm.

Grundlagenermittlung Naturschutz

- Die Umsetzung von Natura 2000 (Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie und Vogelschutz-Richtlinie),
- Ermittlung und Abgrenzung von Lebensraumtypen,
- das Arten-Biotopschutzprogramm und der Biotopverbund,

- Flächenentwicklungskonzepte,
- Flächenkontrollen der Landnutzung im Zusammenhang mit dem Vertragsnaturschutzprogramm (VNP) sowie
- die Aufnahme von Vegetationsentwicklungen (z. B. Seeuferkartierungen des LfU, Flächenmanagement).

Im Zusammenhang mit der Grundlagenermittlung für die Umsetzung der genannten EG-Richtlinien besteht darüber hinaus eine Schnittstelle zwischen Wasserwirtschaft und Naturschutz, die die wasserabhängigen FFH- und Vogelschutzgebiete betrifft.

Gemeinsame Ziele im Sinne der EG-Richtlinien sind dabei die Erhaltung und Wiederherstellung eines guten (ökologischen) Zustandes eines Gewässers (EG-WRRL) sowie die Vermeidung von Verschlechterungen, den Fortbestand bzw. die Wiederherstellung eines günstigen Erhaltungszustandes zum Schutz prioritärer Lebensräume und Arten (Natura 2000).

Die Fernerkundung könnte einen wichtigen Beitrag leisten, die fachübergreifende Zusammenarbeit in den genannten Aufgabengebieten zu fördern, sowie Synergien bei der Erstellung von nachhaltigen Nutzungs- und Entwicklungskonzepten im Bereich der Wasserwirtschaft, des Naturschutzes und angrenzenden Gebieten (Land- und Forstwirtschaft, Raumplanung und Bauleitplanung) freizusetzen.

3. Anwendungsbeispiele aus der Praxis

Bereits heute wird die Fernerkundung in ausgewählten Bereichen und Projekten eingesetzt.

Zu erwähnen sind

- die Bereitstellung von Informationen aus Satellitenbildern für die Vor- und Nachsorge bei Überschwemmungskatastrophen,
- die Ertragsermittlung landwirtschaftlicher Nutzflächen,
- die weitergehende Hochwasservorsorge,
- dem Trinkwasserschutz,
- Ökosystemanalysen (Biodiversität in alpinen Regionen, Vegetationskartierungen) und
- die Ermittlung von Wasserqualitätsparameter mittels Landsat TM Bildern.

Als aktuelle Anwendungsbeispiele aus der Wasserwirtschaft sind zu nennen

- die Luftbilddauswertung im Rahmen von Gewässerentwicklungsplänen an Fließgewässern und Seen,
- die luftbildgestützte Ermittlung und Ausweisung von Überschwemmungsgebieten im Zusammenhang mit der weitergehenden Hochwasservorsorge,
- Satellitengestützte Einzugsgebietsanalyse für Landnutzungsdaten
- (Verschneidung von CORINE-Satellitendaten mit INVEKOS-Daten, Europ. Integriertes Flächenerkundungssystem mit Luftbild- und Satellitenbildern zur Überwachung von landwirtschaftlich genutzten Flächen) und

- das HTO-Projekt Waginger See (High-Tech-Offensive Bayern).

Der fachliche Naturschutz nutzt die Möglichkeiten der Fernerkundung

- bei der fachlichen Grundlagenermittlung z. B. beim Gewässerentwicklungsplan Chiemsee und Starnberger See,
- bei der Aktualisierung von Seeuferkartierungen (z. B. Chiemsee, Starnberger See)
- im Fach-Informationssystem „FIS-Natur“ (Ortho-Fotos, Satellitenbild, Vermessung von Flächen),
- bei der Flächenkontrolle nach dem Vertragsnaturschutzprogramm (Landschaftsnutzungserhebungen mit LANDSAT)
- in der Landespflege z. B. bei der Erstellung eines Moorentwicklungskonzeptes durch das LfU

4. Anforderungen an die Zukunft – Ausblick

Aufbauend auf den vielen Ansätzen in den unterschiedlichen Bereichen erscheint es notwendig, die vorhandenen Einsatzbereiche für die Fernerkundung zu systematisieren und den vorhandenen Wissensstand für die Praxis festzustellen („State of the Art“).

Im Bereich der Technik sind die Voraussetzungen für eine Effizienz und Qualität der Fernerkundungsdaten zu schaffen.

Die Maßstabsebenen sollten hinsichtlich der Fragestellungen verfeinert und angepasst werden (u. a. höhere Auflösung, variable Maßstabsebenen 1 : 10 000 und kleiner).

Die Kosten stehen im Wettbewerb mit herkömmlichen Verfahren und sind vor dem Hintergrund von Kosten-Nutzen-Aspekten zu erwägen.

In der Zukunft gilt es zwischen Wissenschaft und Praxis eine Brücke in der Form zu schlagen, dass sowohl der wissenschaftliche Fortschritt als auch der praktische Nutzen gleichermaßen davon profitiert. Erfolgreich erprobte Erkundungsmethoden in Einzelprojekten (vgl. oben) sind im Hinblick auf ihren operationellen Einsatz in der Routine und Praxis zu überprüfen und zu bewerten.

In Anlehnung an die Ermittlung von fachlichen Grundlagen ist folgender Bedarf festzustellen:

Was braucht die Wasserwirtschaft

- Die Korrelation von Fernerkundungsdaten mit Felddaten, mit dem Ziel die Reproduzierbarkeit und die Genauigkeit von gewässerspezifischen Daten zu verifizieren,
- automatisierte Datenerfassung- und Verarbeitungsmethoden,
- Anwendung der Datenaufnahme auf die Vorhersage von Gewässerzustandsentwicklungen (z. B. Aussagen zum Eutrophierungsgeschehen, der Uferentwicklung, Gewässerstrukturen) ⇒ bioindikatorische Interpretation von Daten

- (Statistische) Habitatanalysen und Luftbilddauswertung (Schilfkartierung),
- Erfolgskontrollen von Maßnahmenprogrammen,
- automatisierte Fernerkundung von Gewässerparametern (Morphologie, Wasserqualität)
- Verbesserung der quantitativen Bestimmung z.B. des Chlorophyll- und Schwebstoffgehalts, der Sichttiefen, Temperatur in Seen,
- Einzugsgebietsanalysen zur Abschätzung von diffusen Nährstoffeinträgen aus landwirtschaftlichen Nutzflächen (Hangneigungen, Nutzungsart),
- Verknüpfung von Fernerkundungsdaten mit Geographischen Informationssystemen.

Was braucht der Naturschutz

- Die Korrelation von Fernerkundungsdaten mit Felddaten, mit dem Ziel die Reproduzierbarkeit und die Genauigkeit von naturschutzfachlichen Daten zu verifizieren,
- automatisierte Datenerfassung- und Verarbeitungsmethoden,
- Flächenabgrenzung (up/down-scaling),
- Dokumentation des Istzustandes und großräumiger Veränderungen von Flächen (Flächenentwicklungskonzepte)
- Vorhersage von Vegetationsentwicklungen (Sukzessionen)
- Aufnahme der Seeufervegetation, von Eingriffsflächen, Unterscheidung von Vegetationseinheiten und deren Vitalitätsstufen,
- (Statistische) Habitatanalysen und Luftbilddauswertung,
- Biotopschutz mittels Fernerkundung mit dem Ziel Veränderungen in Biotopen frühzeitig zu erkennen,
- Erfolgskontrollen von Maßnahmenprogrammen und Managementplänen
- Kontrolle von Landoberflächen,
- Ökosystemüberwachung.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Fernerkundung das Potential hat, sich zu einer Schlüsseltechnologie der Zukunft im Umweltbereich zu entwickeln. Der heutige technische Standard lässt hoffen, dass die umfangreichen Aufgaben der Wasserwirtschaft und des Naturschutzes im Bereich des Monitorings und der Prognose von Umweltveränderungen im Zusammenspiel mit den herkömmlichen Methoden schon bald effizienter und kostengünstiger gestaltet werden könnten. In vielen Bereichen ist die Fernerkundung bereits heute ein unverzichtbarer Partner für ein modernes Gewässer- bzw. Umweltmonitoring. Für eine breite operationelle Anwendung bedarf es aber noch intensiver gemeinsamer Anstrengungen von Forschung und Verwaltung. Neue Bildinterpretationstechniken und die Weiterentwicklung der Aufnahme und Auswertetechniken schaffen hierzu die erforderlichen Voraussetzungen. Die verstärkte Zusammenarbeit der Fachverwaltungen (Wasserwirtschaft, Naturschutz, Landwirtschaft, Landesvermessung) untereinander sowie mit den Universitäten auf der einen und mit innovativen Unternehmen auf der anderen Seite könnte den „Blick aus der Ferne“ schon bald auch in der operationellen Praxis revolutionieren.

Anschrift des Verfassers:

Dr. Klaus Arzet
 Wasserwirtschaftsamt München
 Praterinsel 2
 80538 München

Welche Informationen aus der Fernerkundung benötigen die Landwirtschaftsbehörden zur Erfüllung der Auflagen von Programmen und Richtlinien?

Paul-Michael RINTELEN

Fernerkundungsdaten werden schon seit längerem in der Landwirtschaftsverwaltung eingesetzt, um Flächengrößen und Anbauverhältnisse festzustellen. Daneben existieren, mehr als in anderen Fachdisziplinen, historisch gewachsen eine Menge statistischer Erhebungen zur landwirtschaftlichen Produktion. In diesem Beitrag soll geklärt werden, ob neue, hochauflösende Fernerkundungsdaten die Informationen über die Landnutzung verbessern können und ob diese Verbesserung notwendig ist. Im Kontext des Themas ist daher auch zu klären, was die Landwirtschaftsverwaltung beziehungsweise -beratung leisten soll beziehungsweise leisten kann.

Bei der Beurteilung der Einsatzmöglichkeiten von Fernerkundungsdaten sind die Ausführungen nicht beschränkt auf das Umfeld der Seen und Fließgewässer, sondern sollten darüber hinaus allgemein interpretiert sein.

Was soll die Landwirtschaftsverwaltung beziehungsweise -beratung leisten?

Es ist – unter anderem – Aufgabe der staatlichen Landwirtschaftsverwaltung, durch Forschung, Schulung, Beratung und Kontrolle für die Bewirtschaftung der landwirtschaftlichen Flächen nach den Regeln einer „guten fachlichen Praxis“ zu sorgen. Der Begriff „gute fachliche Praxis“ kann in diesem Zusammenhang gleichgesetzt werden mit einer „standortgerechten Landwirtschaft“ oder auch dem der „ordnungsgemäßen Landwirtschaft“.

Mit der Notifizierung der EU-Agrarpolitik werden vermutlich die Kontrollaufgaben weiter an Bedeutung gewinnen, wenn es darum geht, ob Fördermittel in voller Höhe oder eventuell bei Nichteinhaltung einer guten fachlichen Praxis nur gekürzt ausgezahlt werden.

Zur guten fachlichen Praxis der Landnutzung zählen wir es auch, für ausreichend naturnahe Lebensräume in der Landschaft zu sorgen. Im bayerischen Kulturlandschaftsprogramm wird die Anlage neuer Strukturelemente und die Erhaltung bestehender gefördert.

Fernerkundung hat in der Landwirtschaftsverwaltung Tradition

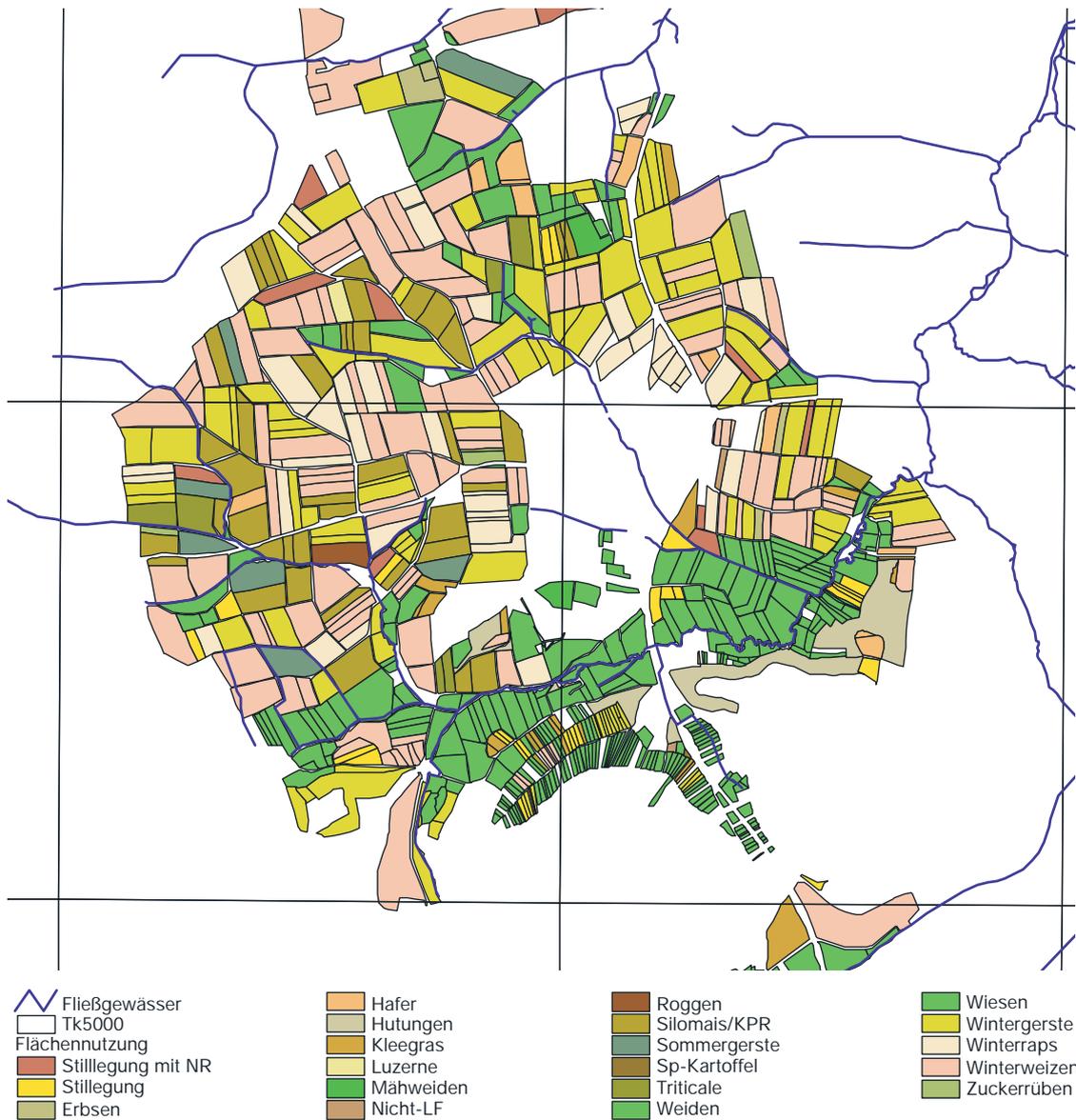
Seit 1992, dem Zeitpunkt der ersten Stufe der EU-Agrarreform, werden im Rahmen von INVEKOS (Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem) die Angaben der Landwirte zur Art der Flächennutzung und zur Flächengröße mit Luftbildern und Satellitendaten überprüft. Während anfangs Flächennutzungen auf analogen Karten mit Farbstiften eingezeichnet wurden, wurden bald darauf die gescannte und vektorisierte Flurkarte in ein GIS-System übernommen. Ab dem Jahre 2005 ist ein GIS-gestütztes INVEKOS-System europaweit vorgeschrieben.

Über die aktuelle Flächennutzung im Maßstab 1 : 5 000 haben wir exakte Informationen für alle landwirtschaftlichen Nutzflächen in Bayern (siehe Abbildung 1). Entsprechend den Vorschriften der EU werden jährlich 5 % dieser Flächen die Angaben der Landwirte dazu exakt nach Größe und Nutzung überprüft. Dies erfolgt durch eine Kombination aus Luftbilddauswertungen, Auswertungen von Satellitendaten und Vor-Ort-Kontrollen.

Auch bei der Struktur- und Nutzungskartierung, einem Verfahrensabschnitt der ländlichen Neuordnung, werden Luftbilder eingesetzt.

Was fehlt, um die definierten Ziele zu erreichen?

Die aktuelle Nutzung der Flächen, auch der Nutzungswandel im Laufe der letzten Jahre, ist im INVEKOS dokumentiert. Künftige ökologische Forderungen verlangen eine differenziertere Landnutzung. Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden, sind Intensitäts- und Standortparameter zu diesen Flächen, die Hinweise zu einer standortgerechten Nutzung geben können, notwendig. Der ortskundige Berater hat natürlich die notwendigen Kenntnisse, nur sind diese für räumliche Auswertungen nicht verfügbar. Karten der Bodenschätzung (1:5000), aus denen einige dieser Parameter abgeleitet werden könnten, liegen nicht digital vor. Ohne ausreichende Informationen kann weder geplant noch beraten werden. Hier nimmt die Landwirtschaftsberatung keine Sonderstellung ein.



Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
Institut für Agrarökonomie

Abbildung 1

Flächennutzung und digitale Flurkarte

Intensitätsparameter

Vor allem die Intensität der landwirtschaftlichen Flächennutzung beeinflusst die natürlichen und anthropogenen Systeme im Umfeld. Intensitätsparameter zur aktuellen Nutzung einzelner Flächen fehlen uns. Es ist zwar möglich, aus Metadaten der Betriebe Schlüsse auf die Nutzungsintensität aller Betriebsflächen zu ziehen, diese Ableitungen sind jedoch nicht ortstreu.

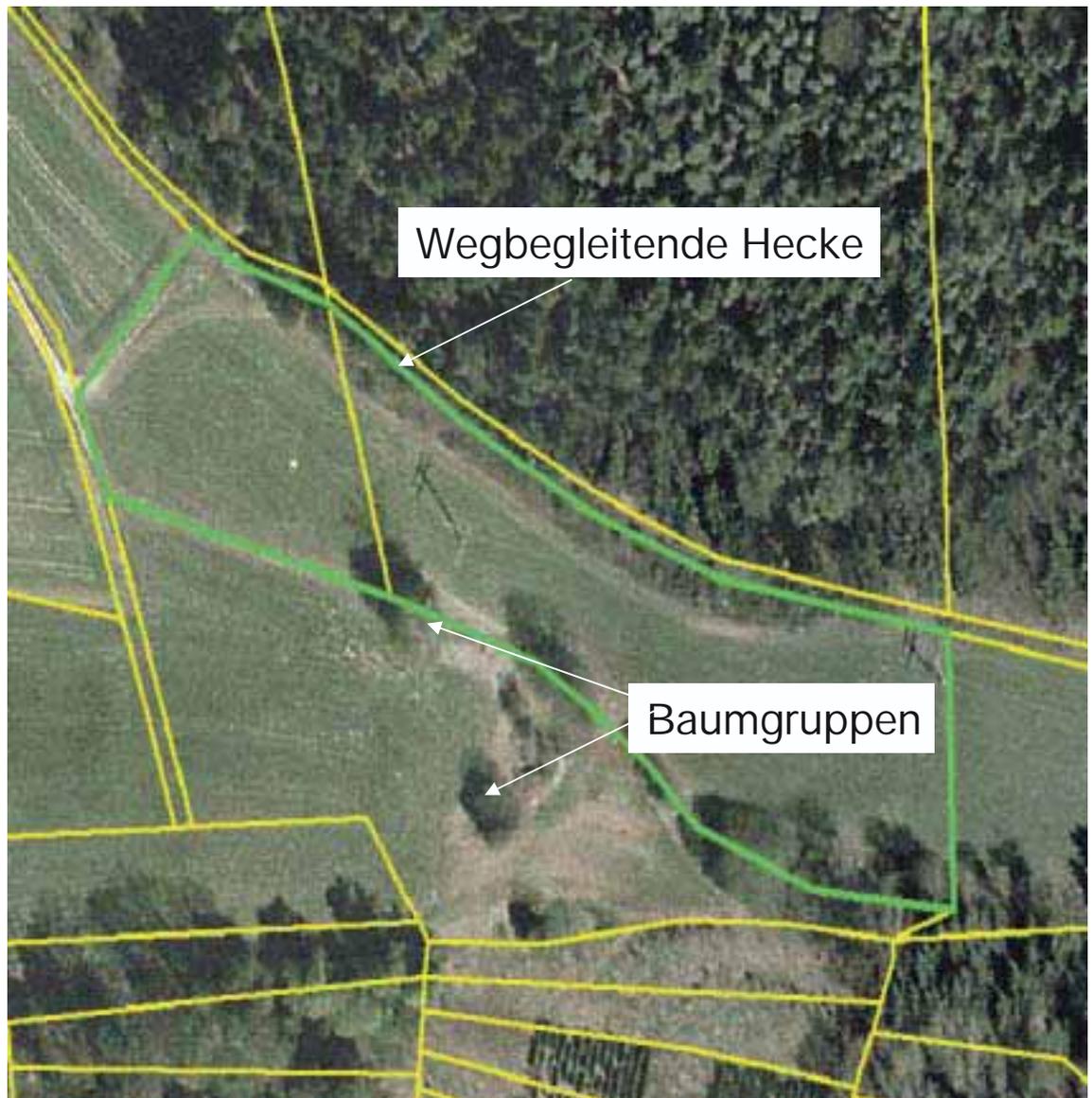
Längerfristige Ertragsfeststellungen

Erträge landwirtschaftlicher Kulturen werden für Bayern, die Landkreise und Erzeugungsgebiete jährlich erhoben. Diese amtliche Ernteermittlung hat für ein-

zelne Flächen oder kleinere Räume keine Gültigkeit. Selbst wenn die Standortparameter einzelner Flächen bekannt wäre, ließe sich auf eine standortgerechte Nutzung erst dann schließen, wenn auch die Erträge bekannt sind.

Dokumentation

Wir haben in Bayern mittlerweile einen Pachtanteil von über 50% an der landwirtschaftlich genutzten Fläche, mit starken regionalen Abweichungen. Je höher dieser Pachtanteil ist, desto mehr Informationen über die Flächen gehen verloren, weil keine Aufzeichnungen vorhanden sind und der Verpächter oft die Flächen seit langem nicht mehr oder gar nicht selbst bewirt-



Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
Institut für Agrarökonomie

Abbildung 2

Informationen zu Strukturen in der Landschaft. Kombination aus Luftbild und digitaler Flurkarte

schaftet hat. Pächter hätten eine gute Grundlage für Intensitätsentscheidungen in der Pflanzenproduktion, wenn sie die Historie der neu zugepachteten Flächen genau kennen würden.

Wenn es gelingen könnte, mit neuer Satellitendatentechnik die Intensität einzelner landwirtschaftlicher Flächen besser zu beschreiben als dies heute möglich ist, wäre eine gezielte Beratung im Sinne einer standortgerechten Bodennutzung möglich beziehungsweise besser möglich, als dies heute bei unserem jetzigen Informationsstand ist.

Ökologisch bedeutsame Strukturen

Über die Lage, Größe und Qualität von Strukturen in der Feldflur ist wenig bekannt. Wenn mit hochauflö-

senden Daten diese Strukturen besser analysieren werden können, wäre es möglich, die Vernetzung von Strukturen effizienter und rascher aufzuzeigen und Lücken dort zu schließen, wo sie anhand der Auswertung aufgezeigt werden (Abbildung 2).

Diffuse Nährstoffwanderung

Austräge von Pflanzennährstoffen aus landwirtschaftlichen Flächen werden heute mit einfachen Nährstoffbilanzen auf Betriebs- bzw. Gebietsebene ermittelt. Ein klarer Ortsbezug fehlt. Intensitätsparameter zu einzelnen Flächen könnten wesentlich deutlichere Bezüge herstellen lassen zwischen diffusen Belastungen und landwirtschaftlicher Flächennutzung. Der derzeitige Rechenweg und die Verbesserungsmöglichkeiten sind in Abbildung 3 abzulesen.

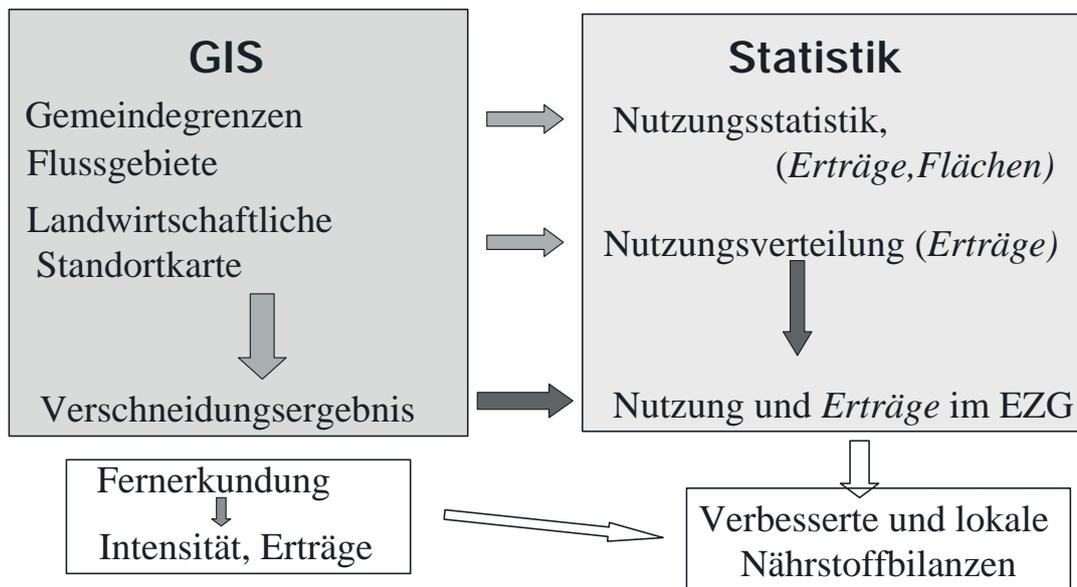


Abbildung 3

Nährstoffbilanzen. Verbesserungsmöglichkeiten durch Fernerkundung

In Planungen zur Flurneuordnung werden derzeit Programme eingesetzt, mit denen die Erosionsanfälligkeit einzelner Flächen bei unterschiedlichen Anbauverhältnissen und Hanglängen festgestellt wird. Wären Bildauswertungen so aussagekräftig, dass eine tatsächliche Erosion klar zu erkennen ist, könnte das für die Arbeit mit diesen Programmen sehr hilfreich sein (Abbildung 4).

Einsatz hochauflösender Bilddaten im GIS

Es ist wohl unstrittig, dass Bilddaten nur Teil eines Informationssystems sein können. In einem geographischen Informationssystem sollten Bilddaten mit anderen digitalen Informationen und weiteren Metadaten zusammengefasst werden. Dies gilt sowohl für die praktische Landwirtschaft selbst wie für Verwaltung und Beratung.

Einsatz in der Praxis:

Präzisionslandwirtschaft hat zum Ziel, pflanzenbauliche Maßnahmen so zu steuern, dass mit möglichem geringem Mitteleinsatz ein optimaler Pflanzenwuchs erreicht wird. Dieses ökonomische Optimum ist in der Regel identisch mit einem ökologischen, falls die Fläche für Landbewirtschaftung geeignet bzw. vorgesehen ist. Steuerungsparameter sind Bodenkarten, Ertragskarten oder N-Sensoren. Boden- und Ertragskarten könnten in Zukunft aus hochauflösenden Bilddaten stammen (Abbildung 5). Die Technik, die heute zu einer präzisen Produktionssteuerung zur Verfügung steht, ist nach wie vor teuer. Ihr Einsatz lohnt nur dort, wo ausreichend große Flächen zur Verfügung stehen.

Bodenerosion wird zunehmend zum Problem bei größeren Ackerschlägen. Vorbeugende Maßnahmen gegen Erosionsereignisse könnten über Informationen aus Satellitenbildern zielgerecht eingesetzt werden.

Für eine aktuelle Prozesssteuerung landwirtschaftlicher Maschinen sind Informationen von Satellitendaten in absehbarer Zeit ungeeignet. Dazu werden die benötigten Daten nicht zeitnah genug zur Verfügung stehen. Die ausgewerteten Daten sollten vielmehr in ein Informationssystem eingehen, das die längerfristige Intensität der Nutzung und deren Auswirkungen beschreibt.

Einsatz in der Verwaltung und Beratung:

In diesem Bereich dürfte der Einsatz von hochauflösenden Satellitendaten eher greifen als in der Praxis. Wie bereits erwähnt, könnte die Beschreibung der Nährstoffflüsse, um diffuse Einträge aufzudecken und zu vermeiden, wesentlich verbessert werden. Auch das Erkennen von Feldstrukturen, das unabdingbar ist für einen gezielten Biotopverbund, könnte wesentlich präzisiert und beschleunigt werden. Der Einsatz zur besseren Steuerung und Beurteilung von Auflagen im Rahmen der Cross-Compliance wird die Nutzung dieser Daten in Zukunft unabdingbar machen. Denn nur wenn die Verwaltung bessere Kenntnis über die Nutzung der landwirtschaftlichen Flächen hat, insbesondere über die Intensität der Nutzung, kann auch die Förderung gezielter erfolgen.

Exkurs

Es ist festzustellen, dass digitale geographische Informationen derzeit noch viel zu wenig genutzt und vernetzt werden. Dabei ist es nicht unbedingt die Inkompatibilität unterschiedlicher Systeme, die eine Nutzung erschwert, es ist vielmehr oft die Unkenntnis



Abbildung 4
Informationen zur Erosion

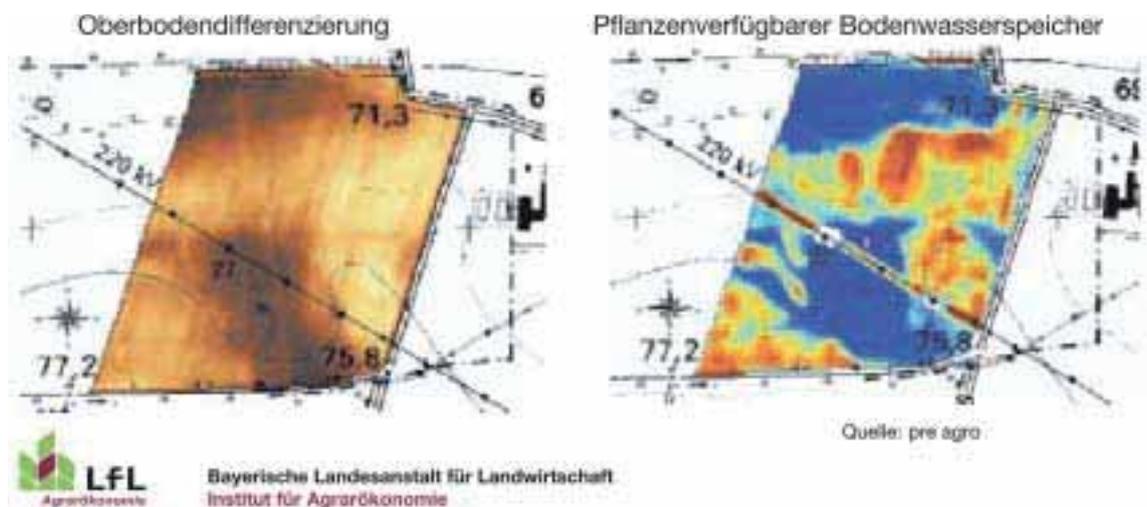


Abbildung 5
Differenzierte Schlagdaten aus Luftbildauswertungen

über die bereits vorhandenen Informationen beziehungsweise die fehlende Bereitschaft, Daten miteinander zu verknüpfen. Ein Bündeln der vorhandenen Informationen ist unbedingt notwendig.

Ein Großteil bestens nutzbarer Informationen, die zur besseren Beschreibung der Umfelder von Flüssen und Seen vorhanden sind, liegen in großen Bereichen lediglich analog vor. Vor der Implementierung neuer Systeme sollte geprüft werden, ob nicht eine digitale Erfassung analoger Informationen und ein Zusammenspielen mit vorhandenen digitalen Daten den selben Erfolg haben könnte als neuere Systeme.

Anschrift des Verfassers:

Ltd. Landwirtschaftsdirektor
Dr. Paul-Michael Rintelen
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
Institut für ländliche Strukturentwicklung,
Betriebswirtschaft und Agrarinformatik
Infanteriestraße 1
80797 München
E-Mail: agraroeconomie@lfl.bayern.de

Welche Informationen zur Landnutzung aus der Fernerkundung benötigen Planungsbüros

Ulrike PRÖBSTL

Abstract

Die Methoden der Fernerkundung lassen sich in vielen Arbeitsfeldern der Landschaftsarchitektur mit großem wirtschaftlichen und fachlichen Gewinn insbesondere in Bestandsaufnahme und Konfliktanalyse einsetzen.

Dennoch unterbleibt in vielen Fällen der Einsatz durch

- fehlende Ausbildung
- fehlende Informationen zum aktuellen Leistungsbild bei den Landschaftsarchitekten
- die wirtschaftliche Situation und der Einarbeitungsaufwand in spezielle Software sowie
- Skepsis bezogen auf Qualität und Aussageschärfe insbesondere in Bezug auf naturschutzfachliche Planungen.

Diesen Hemmnissen gilt es im Hinblick auf die Qualität und Wirtschaftlichkeit von Planungen zu begegnen. Ein verbesserter Kenntnisstand und eine Kooperation sollte gefördert werden. Dies erfordert von Seiten der Fernerkundung aber in besonderem Maße, dass nicht vorrangig über neue Anwendungsgebiete, sondern mit größerer Ehrlichkeit über Grenzen, Stärken und Schwächen geredet wird. Wünschenswert wäre eine Checkliste, in der abgestimmt auf das Leistungsbild mögliche Datenquellen, Auflösungen, technische Anforderungen und Kostenrahmen genannt sind. Dies würde planungsmethodisch und wirtschaftlich die Voraussetzungen für eine gezielte und erfolgreiche Kooperation erhöhen.

Das Feld der Landschaftsplanung gehört zu den möglichen „Abnehmern“ und Nutzern von Informationen aus der Fernerkundung aus Satellitendaten aber auch aus der Luftbildinterpretation.

Anwendung von Daten aus der Fernerkundung¹⁾ in diesen Bereichen der Planung. Die Bewertung richtet sich danach, in welchem Umfang und mit welchem Stellenwert für die gesamtplanerische Aussage die Fernerkundung eingesetzt werden kann.

Folgende Tabelle zeigt einen Überblick über die Arbeitsfelder der Landschaftsplanung und die mögliche

Tätigkeitsbereich²	Anwendungsgebiete für Erzeugnisse aus der Fernerkundung	Bewertung des Bedarfs
Großräumige Landschafts-sanierungen Revitalisierungen von Sonderflächen, Industrie- und Siedlungsbrachen	Hilfe zur Bestandsaufnahme Herstellung von digitalen Daten Bewertungsgrundlage	hoch
Gesamtkonzepte zur Renaturierung von Gewässern und deren Einzugsgebiete	Abgrenzung relevanter Räume Vorbereitung der Bestandsaufnahme Herstellung digitaler Daten grobe Bewertungen	hoch
Stadtentwicklung und Stadtsanierung	Anwendung theoretisch möglich aber digitale Grundlagen liegen in hoher Aktualität vor	gering
Dorferneuerung	Fernerkundungsdaten bei grober Strukturkartierung einsetzbar, die ansonsten nötige hohe Detailgenauigkeit machen Vorortaufnahmen unabdingbar	gering

¹⁾ Unter dem Begriff Fernerkundung werden Methoden zur Datengenerierung und Datenanalyse zusammengefasst. Hier sind vor allem neuentwickelte Methoden zur Informationsgewinnung und Datenverarbeitung gemeint, die über die einfache Luftbildauswertung hinausgehen

²⁾ Landschaftsplanerische Leistungen entsprechend des Leistungsbildes für Landschaftsarchitekten BDLA, Stand 2000

Flächennutzungspläne und Landschaftspläne	Abgrenzung von Nutzungsbereichen, insbesondere der Feld- und Waldverteilung Abgrenzung relevanter Räume	mittel
Bebauungs- und Grünordnungsplan	in der Regel ist eine terrestrische Vermessung und Analyse sinnvoller	gering
Siedlungsökologische Konzepte	bei großflächigen Konzepten einsetzbar, in der Regel aber weniger, da Detailuntersuchungen und eine detaillierte Bewertung der Habitatqualität erforderlich sind	mittel – gering
Grünkonzepte für Stadtteile; Entwicklung von Grünverbindungen	Bestandsaufnahme, Entwicklung von Zonierungskonzepten; Anhaltspunkte für Bewertungen	hoch
Biopotententwicklung und Verbundkonzepte	Für grobe Konzeption gut geeignet; für konkrete Darstellungen sind terrestrische Aufnahmen unabdingbar, insbesondere für Bewertungen der Verbundfunktion, von Störungsgraden etc.	mittel
Unterschutzstellungsverfahren von Schutzgebietsvorschlägen	Für grobe Konzeption gut geeignet; für konkrete Darstellungen sind terrestrische Aufnahmen unabdingbar, insbesondere für grundstücksscharfe Abgrenzung und die Bewertung von Störungen und Belastungen u.v.a.	mittel
Planung von Sportanlagen Wintersport, Wassersport, Reitsport, Golf, Erholungsplanung in der Landschaft	Eignung zur Bestandsaufnahme; Abschätzung von Flächeneignung bzw. Eingriffserheblichkeit; Bewertung der Potentiale und Vorbereitung der Konfliktanalyse	hoch
Eingriffsregelung Aufbau von Ökokonten	Beitrag zur Vorauswahl geeigneter Ausgleichsräume	gering
Umweltverträglichkeitsstudien	Bei großmaßstäblichen Studien und umfangreicher räumlicher Alternativen-suche ein wichtiges Instrument der Bestandsaufnahme und –analyse; Grundlage für Bewertungen und Vorabschätzungen; bei Standortprüfung kleiner Anlagen gering bis mäßig einsetzbar	hoch
Umwelterheblichkeitsabschätzungen; strategische Umweltprüfung	da meist in großen Maßstäben durchgeführt oder für größere räumliche Aufnahmen gut einsetzbar für Bestand-sanalyse, grobe Analysen, Erstellen der Bewertungsgrundlagen	hoch
FFH-Verträglichkeitsstudie	Studie erfordert in hohem Maße Kenntnis der Strukturen vor Ort	gering
Fachbeiträge zur Flurbereinigung	Für die Vorbereitung von Strukturkartierungen gut. Mit hohem Anteil terrestrischer Aufnahmen zu ergänzen	mittel

Abbau- und Rekultivierungsplanung	Ausgangszustand und –strukturen besitzen eine geringe Relevanz, daher auch geringe Bedeutung bei Bestandsaufnahme	gering
FFH-Managementplan	Für die Vorbereitung von Bestandsaufnahmen und Vertiefungen eine wichtige Grundlage	mäßig

Theorie und Praxis

Diese sicherlich nicht ganz vollständige Zusammenstellung zeigt rasch, dass in vielen Bereichen die Fernerkundung eingesetzt werden könnte und zusammen mit Geografischen Informationssystemen sowie neuen Analysemöglichkeiten ein wichtiges, vielfältig anwendbares Werkzeug darstellen könnten. Betrachtet man die Situation in der Praxis, dann zeigt sich bisher in den meisten Büros nur ein geringer Einsatz von hochwertigen Fernerkundungsdaten in der Planung. Will die Fernerkundung den Platz erhalten, der ihr vom Leistungsbild und den technischen Möglichkeiten her gebührt, dann gilt es die Ursachen für diese Diskrepanzen aufzufinden und zu lösen.

Worin liegen diese:

Die **Ausbildung in der Landschaftsplanung** erfolgt planungsorientiert, d.h. ein hoher Aufwand in der Lehre wird nicht dahingehend eingesetzt, wie eine optimale Datenbeschaffung für Planungsunterlagen erfolgt, sondern wie Planungen, Planungsergebnisse, Verbundkonzepte, funktionsfähige Reitwege oder optimal rekultivierte Kiesgruben aussehen.

Die Vorstellung von neuen Möglichkeiten der Fernerkundung unter Berufskollegen im Rahmen eines Seminars als Zusatzprogramm an der Hochschule löste unerwartete Überraschung und „Aha“-Effekte aus, die es eigentlich nicht geben dürfte. **Die fehlenden Kenntnisse im Berufsstand** sind daher ein weiterer Grund für die Diskrepanzen. Dieser Effekt wird dadurch verstärkt, dass die Fernerkundung sowohl in der Benutzerfreundlichkeit, der Effizienz als auch in der Leistungsfähigkeit eine große Entwicklung durchlaufen hat, diese außerhalb der Hochschule im Büroalltag aber nur wenig nachvollzogen wird.

Also ist alles nur eine Frage der Information? Mit Sicherheit stecken weitere Faktoren dahinter.

Bereits mit der Integration von GIS- und CAD-Systemen im Büro begann ein fortgesetzter „Aufrüstungs- und Nachlernwettbewerb“. Auch viele freiberufliche Kollegen kennen das Gefühl der Ohnmacht vor immer neuen Updates, die sie vor die Abwägung zwischen der alten und der neuen Version stellt. Die Frage ob, man als Büro nicht den Anschluss verliert, stellt sich in Tagen **angespannter Wirtschaftslage** erst recht. Den neuen Funktionen stehen dabei die Vertrautheit mit dem alten Programm, die Kosten für die Neuanschaffung und der **Zeitaufwand für die Einarbeitung** gegenüber.

Es ist gut nachvollziehbar, dass vor diesem Hintergrund Softwarepakete der Fernerkundung im praxisorientierten Arbeitsfeld der Landschaftsplanung kaum Anwendung finden. Die Bürostruktur erlaubt vielfach ebenfalls nur in wenigen Fällen die Einarbeitung eines oder gar mehrerer Mitarbeiter in dieses Gebiet. Ausnahmen bilden hier allenfalls größere Consultingbüros, die jedoch eher die Ausnahme im Berufsfeld darstellen.

Wenn diese Leistungen im Büro nicht erbracht werden, dann könnten sie vergeben werden. Büros mit Schwerpunkten in großräumigen Konzepten, Umweltverträglichkeitsstudien besitzen diese **Partnerschaften** und profitieren von der rasch fortschreitenden Effizienz der Fernerkundung, ihrem flexiblen Einsatz und den daran ableitbaren Analysemöglichkeiten. Gehören diese Leistungen nicht zum regelmäßigen Angebot eines Büros, dann wird eine solche Partnerschaft nicht gesucht. Aus Kostengründen wird häufig auch auf eine **Vergabe** verzichtet, um Mitarbeiter bei der Bestandsaufnahme zu beschäftigen und das Honorar im Büro zu behalten. Nicht immer ist dies tatsächlich wirtschaftlicher, aber bei ungünstiger Wirtschaftslage nachvollziehbar.

Neben diesen Ursachen, die auf

- Ausbildungsdefiziten,
- Informationsdefiziten,
- Aufwand für die Integration im Büro und Folgekosten sowie
- der wirtschaftlichen Lage beruhen,

gibt es auch **fachliche Bedenken**. Erkennbar werden diese bereits in der eingangs vorgestellten Tabelle. Die Eignung wurde immer dann eingeschränkter bewertet, wenn der Anteil des Bedarfs an präziser, verlässlicher Informationen für die Planung besonders hoch ist, bzw. der Erhebungsmaßstab bis zum Einzelbaum, zum Kleinstbiotop reicht, oder das Ziel die aufwändigen Ermittlung und Abgrenzung von Beeinträchtigungen und Strukturen ist. Hierbei müssen die Daten aus der Fernerkundung durch eine Vielzahl weiterer Erhebungen oder Erfassungen ergänzt werden.

Vor allem im naturschutzfachlichen Bereich werden dabei auch vielfach die Grenzen der Fernerkundung rasch deutlich. So sind z.B. ausgesäte, geplante Bereiche im Bereich von Skipisten bei einer Ortsbegehung leicht zu unterscheiden und stellen für die Bewertung der ökologischen Stabilität eine unverzichtbare Information dar. Die gleichen Bereiche sind

durch die Fernerkundung nur schwer abgrenzbar, häufig ist daher eine terrestrische Verifizierung nötig. Das gleiche gilt z. B. für die Ökotope in Feuchtlebensräumen, Seeufer u.v.a..

Dieses Bewusstsein – „ich muss sowieso ins Gelände“ – verhindert ebenfalls vielfach bereits in einer frühen Phase eine mögliche Anwendung von Fernerkundungsdaten.

Strategien für die Zukunft

Ein Abbau der bestehenden Hemmnisse in der Anwendung und der Nutzung von Fernerkundungsdaten in der landschaftsplanerischen Praxis dient, da sind sich alle Anwender, die beide Seiten kennen, einig, der Effizienz und Qualität von Planung, wenn die Chancen und Grenzen der Fernerkundung beachtet werden. Um dieses Ziel zu erreichen erscheinen folgende Maßnahmen wünschenswert:

- die Integration der Fernerkundung in der landschaftsplanerischen Ausbildung, zumindest als Wahlfach oder Praktikumsangebot,
- die Darstellung und Veröffentlichung von Musterplanungen in Seminaren und Fachorganen der Landschaftsplanung mit Fernerkundung innerhalb des Planungsprozesses. Im Mittelpunkt sollten dabei nicht die vielfältigen Möglichkeiten, sondern eher die Grenzen der Fernerkundung stehen,
- eine an das eingangs beschriebene Leistungsbild angepasste Checkliste, die beschreibt welche Satellitendaten, welcher Anbieter, in welcher Auflösung, welche Kosten entstehen, welche Leistungen der Planungsaufgabe entsprechend eingesetzt werden können und wo solche Leistungen „eingekauft“ werden können.
- Ein besonderes Augenmerk sollte dabei auch auf die Kombination bisheriger und neuer Angebote aus der Fernerkundung liegen und
- es sollte dargestellt werden, wie die Wirtschaftlichkeit durch eine effiziente Nutzung von Fernerkundungsdaten erhöht wird.

Keine Erwähnung gefunden hat bisher ein weiterer Effekt, der meines Erachtens auch häufig in der Landschaftsplanung zu wenig Beachtung gefunden hat: der Einsatz von Auswertungsergebnissen der Fernerkundung zur aktiven Bürgerbeteiligung und zum Aufzeigen von Entwicklungsreihen. Die Folgen fehlender Pflege, die Zunahme von Erosionsereignissen, aber auch ganz aktuell z. B. die Dokumentationsreihe zum Verlust der alpinen Gletscher belegen beispielhaft welche Chancen bestehen würden um die Begeisterung und Bereitschaft für die Planung mit Fernerkundungsdaten zu wecken.

Insgesamt hoffe ich, dass durch diesen Beitrag das Potential einer Zusammenarbeit deutlich geworden ist und ein Anreiz für ein verstärktes Miteinander auf verschiedenen Ebenen und Arbeitsfeldern gegeben wird.

Anschrift des Verfassers:

AGL	
	Arbeitsgruppe für Landnutzungsplanung Institut für ökologische Forschung
	PD Dr. Ulrike Pröbstl St. Andrästr.8 82398 Etting-Polling
	Tel. 08802/91091 Fax -92 e-mail: office@agl-proebstl.de

Allgemeine Einführung in das fernerkundliche Umfeld

Thomas SCHNEIDER ^{1), 2)} & Stefan ZIMMERMANN ¹⁾

Abstract

Bei vielen Praktikern weckt der Begriff „Fernerkundung“ lediglich die Assoziation „Luftbild“. Die Information eines Luftbildes ist auch dem Nicht-Fernerkundler zugänglich, da die Abbildung der Realität mit den vertrauten Sehgewohnheiten übereinstimmt. Im wissenschaftlichen Bereich ist das klassische Luftbild schon längst von digitalen Systemen abgelöst. Im Gegensatz zur photo-chemischen Strahlungserfassung des Luftbildes lassen sich die photovoltaisch erfassten Signale digitaler Systeme eichen und in physikalische Messwerte umwandeln. Darüber hinaus haben die Detektoren moderner digitaler Systeme eine deutlich höhere Lichtempfindlichkeit und decken Spektralbereiche ab, die für photographische Verfahren nicht zugänglich sind. Die geforderte „quantitative“ thematische Fernerkundung ist über digitale Systeme wesentlich besser möglich. Für die Identifikation und Zustandsbeschreibung liefern multi- bis hyperspektrale optische Systeme mit Abstand die besten Ergebnisse. Ein Schwerpunkt der fernerkundlichen Grundlagenforschung befasst sich heute mit Fragen der Normalisierung der Fernerkundungsdaten einschließlich der Korrektur von atmosphärischen, topographischen, Beleuchtungs- und Beobachtungsrichtung abhängigen Effekten hin zum „physikalischen Messwert“. Erst dieser erlaubt die Erstellung eines übertragbaren „Fingerabdrucks“ oder „Profils“ der gesuchten Landbedeckungsklassen.

Fernerkundung ist immer bloß die Interpretation einer Abbildung der Realität. Die thematische Auflösung eines vor Ort kartierenden Fachmannes kann daher nie erreicht werden. Im Gegenzug ist der Fachmann nicht in der Lage, die Grenzen der kartierten Einheiten so genau zu erfassen, wie dies der Fernerkundung möglich ist. Speziell für Monitoring-Aufgaben wird daher ein kombiniertes Verfahren vorgeschlagen: die Basisinventur sollte über „Vor Ort Kartierung“ unter Einbindung von „a priori“ Information aus Fernerkundungsdaten erhoben werden. Ein Monitoring in verkürzten Intervallen von zwei bis fünf Jahren sollte über FE Daten erfolgen. Bei Auftreten von Verdachtsmomenten können diese Flächen terrestrisch überprüft werden.

Zumindest für Forschungs- und Entwicklung von Expertensystemen im naturschutzfachlichen Umfeld der lokalen Maßstabebene, denen sich der Workshop gewidmet hat, sind multi- bis hyperspektrale Systeme mit geometrischen Auflösungen im Meterbereich gefordert. Hochwertige Systeme, die in der Lage sind, die gewünschten Informationen zu liefern, sind allerdings teuer. Zur Kostensenkung wird eine fachübergreifende Mehrfachnutzung hochwertiger Datensätzen in integralen Ansätzen vorgeschlagen. Modular wird für jedes Landschaftselement ein eigenes Expertensystem entwickelt, das über die Verknüpfung von Wachstums- mit Reflexionsmodellen die bestmögliche Zustandsbeschreibung erlaubt und darüber hinaus die Entwicklung von Szenarien ermöglicht. Die Ergebnisse der einzelnen Module werden dann zu Aussagen auf Landschaftsebene zusammengeführt.

1. Einleitung

Fernerkundung – laut klassischer Definition ist das eine **„Methode um Informationen über Objekte abzuleiten ohne mit diesen in direktem Kontakt zu stehen“**. Viele Praktiker assoziieren mit dem Begriff Fernerkundung (FE) bis heute immer noch den Begriff „Luftbild“. Dabei ist das analoge Luftbild herkömmlicher Art heute nur noch auf der lokalen fachlichen Ebene im Einsatz. Bei regionalen bis globalen Fragestellungen und in der Wissenschaft ist das Luftbild seit vielen Jahren bereits durch digitale FE-Systeme abgelöst. Dieser Trend setzt sich zunehmend auch auf der lokalen Maßstabebene durch.

Dem Fernerkundler muss allerdings klar sein, dass der thematisch arbeitende Fachmann Erhebungsmethoden anwendet, die im jeweiligen fachlichen Umfeld etabliert und allgemein akzeptiert sind. Die FE, soweit sie überhaupt eine Rolle spielt, ist eine unter mehreren Informationsquellen. Am häufigsten wird das Luftbild genutzt und zwar zur einfachen Orientierung im Gelände, sowie als Kartiergrundlage ähnlich einer Kartengrundlage. Bevor Bewährtes durch neue Methoden ersetzt wird, müssen gute Gründe dafür vorliegen. Mit den Entwicklungen der letzten Jahre, sowohl auf dem Sensor- als auch auf dem Softwaresektor, sind wir der Meinung, dass die FE heute in der Lage ist Alternativen anzubieten, die den Praxisansprüchen genügen. Hinzu kommt, dass die knappen Mittel der Öffentlichen Hand und die zunehmenden Verpflichtungen nationaler und internationaler Abkommen und Richtlinien auch die Verwaltungen zwingen, über neue Wege nachzudenken.

Bevor näher auf die heutigen Entwicklungen der Fernerkundung und auf die speziellen Anforderungen der lokalen Maßstabebene eingegangen wird, soll erstmal aus der Sicht des Fernerkundlers hinterfragt werden, was die Praxis von der FE erwartet:

- die Fernerkundung soll Bereiche erfassen, die schwer zugänglich sind
- soll schnelle Übersicht schaffen
- soll quantitative Aussagen treffen
- soll Dokumentation, bildliche Darstellung der Aussagen ermöglichen
- etc.

¹⁾ Limnologische Station

²⁾ Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der TU München

Impliziert wird, dass FE die Aufgaben löst, die ein im Gelände arbeitender Fachmann nicht oder nur schwer bewältigen kann. Erwartet werden vergleichbare Ergebnisse ohne die „subjektive“ Komponente des menschlichen Bearbeiters! D.h., es ist eine Erwartungshaltung da, die so nicht erfüllt werden kann. Wieso das so ist, liegt vor allem an dem hoch komplexen Prozess zwischen „Bild“ und „Information“. Auf den ersten Blick sind das alles „ja bloß bunte Bilder“. Bei den „Bunten“ sehen die Farben meist „künstlich“ aus, jedenfalls völlig anders, als in Natura oder auf dem Farbfoto. Es sind so genannte „Falschfarben“, die durch Belegung der Rot-, Grün-, Blau-Farbkanonen (RGB-Darstellung) der Braunschen Röhren unserer Computerbildschirme mit Signalen anderer Spektralbereiche entstehen. Erkennbar bleiben in jedem Fall Strukturen, wie z.B.:

- die Verteilung der Häuser in Ortschaften
- das Straßennetz
- das Entwässerungssystem
- Berge und Täler, Seen, Wälder und Äcker
- etc.,

alles Elemente, die so oder ähnlich auch in der Topographischen Karte zu sehen sind. Durch Analogieschlüsse sind wir sogar in der Lage, Entfernungen abzuschätzen. Wenn z.B. bekannt, dass München von Garmisch etwa 80 km entfernt ist, kann geschätzt werden, wo die Hälfte dieser Strecke liegt, etc..

Mit dem Wort „Analogieschluss“ nähern wir uns allmählich dem Kernanliegen thematischer, fernerkundlicher Auswertungen: Dem „Bildverstehen“, der Informationsextraktion aus „Bildern“ oder „digitalen Daten“. Dieses beruht auf völlig anderen Informationen, als die, die dem kartierenden Fachmann beim Geländebezug zur Verfügung stehen! KENNEWEG et al. (1991) beschreiben diesen Sachverhalt sehr anschaulich: Sowohl Aufnahmeeinheit, als auch Informationseinheit und Informationsart sind bei Geländeerhebung und fernerkundlicher Auswertung völlig unterschiedlich. Für den Forstfachmann etwa ist die **Aufnahmeeinheit** der Baum im Bestand, die **Informationseinheit** der Baum, bzw. Baumteile und die **Informationsart** sind die Originalsymptome wie Vergilbung, Nadelausfall, etc.. Im klassischen, visuell auszuwertenden Luftbild ist die Abbildung der zu beurteilenden Objekte vertraut. Sie sind vergleichbar

dem Blick aus der Ferne, etwa vom Gegenhang im Gebirge. Die Detailtreue wird zugunsten des synoptischen Blicks auf die Umgebung reduziert. So können einzelne Nadeln nicht mehr betrachtet werden, die Informationsart bleibt aber vergleichbar: es ist die Farbe, die Struktur der Einzelelemente. Ganz anders stellt sich die Situation im Falle digitaler Systeme dar. Digitale Satellitensysteme erfassen als **Aufnahmeeinheit** etwa ganze Großräume, im Falle von Flugzeuggestützten Systemen immerhin noch ganze Bestände, Vegetationseinheiten. Völlig unterschiedlich ist die **Informationseinheit** und die **Informationsart** digitaler Systeme. Informationseinheit ist das Pixel, also das pro Detektorelement integral abgebildete Rückstreusignal in dem entsprechenden Spektralbereich. Die Informationsart hingegen wird über die Intensität des pro Pixel und pro Wellenlängenbereich erfassten Rückstreusignals abgeleitet. Die in einem Pixel enthaltene Information ist bei erster Annäherung etwas ziemlich Abstraktes, dem Laien nicht direkt Zugängliches. Erst das Wissen über die Hintergründe erlaubt es aus einem Pixel fachliche Information zu extrahieren. Dem Fachpraktiker fehlt dieses spezielle Wissen in der Regel, dem „reinen“ Fernerkundler meist das fachliche Wissen um die Information richtig zu deuten. Notwendig ist ein „aufeinander Zugehen“.

Alle „Fernerkundler“, die Beiträge zu diesem Band liefern, haben eine fachliche Ausbildung als Naturwissenschaftler und befassen sich seit Jahren mit Umweltrelevanten Fragestellungen. In dem speziellen Dialog zwischen Fernerkundler und Praxis fühlen wir uns als Vermittler:

- Als Ökologen befassen wir uns mit den Prozessen. Physiologisch/phänologisch bedingten auf Objektebene, mit Vernetzungen, Strukturen, Stofftransportprozessen auf Landschaftsebene.
- Als Fernerkundler möchten wir den aktuellen Zustand so genau wie möglich beschreiben und versuchen dazu den „Fingerabdruck“ oder das „Profil“ der Objekte unseres Interesses in den FE-Daten zu finden. Wir sehen unsere Rolle darin, **reproduzierbare, objektive** Verfahren zur **automatisierten** Ableitung der benötigten Informationen aus FE-Daten zu entwickeln.

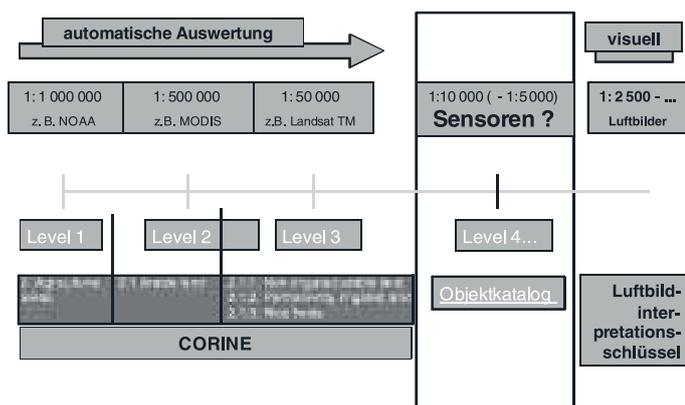
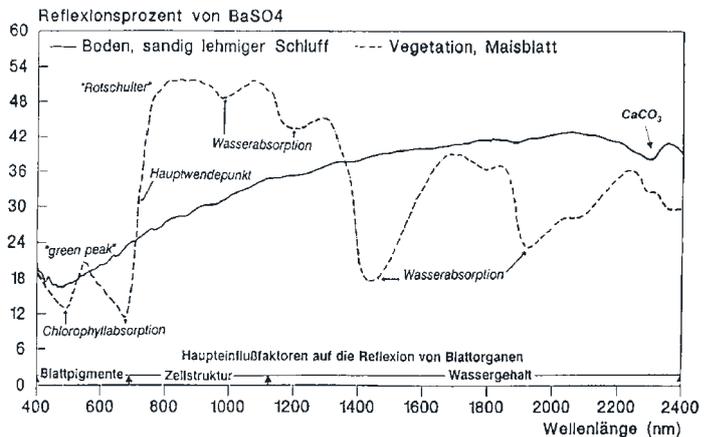


Abbildung 1
Maßstabbereich der Untersuchungen im „lokalen“ Umfeld. Die „Automatisierung“ der Informationsextraktion auf dieser Maßstabsebene ist im Umweltbereich Neuland (MOTT et al., 2002)

Abbildung 2

Laborspektren (Spektralsignaturen) eines sandig lehmigen Schluffs und eines Maisblattes. Markiert sind Bereiche die Hinweise auf den Pigment- und Wassergehalt sowie auf die Zellstruktur erlauben sowie diagnostisch wichtige Absorptionszonen (nach SCHNEIDER, 1995)



Die Herausforderung der wir uns stellen ist, dass wir Lösungen im „lokalen“ Umfeld suchen! Es ist der Bereich zwischen regionaler Erhebung, die typischer Weise mit Systemen des Landsat Typs bei Bodenauflosungen zwischen 15 und 30 m erhoben werden, und der Ebene auf der lokale Maßnahmen umgesetzt werden, also 1:1000 und größer (Abb. 1). In dem angestrebten Maßstabbereich von ca. 1:5000 fällt jede Fehlklassifikation sofort auf. Damit die Methode auf dieser Ebene der lokalen Kontrolle akzeptiert wird, müssen die Ergebnisse mindestens gleiche Genauigkeit haben, die Kosten sollten aber geringer, bzw. der Nutzen höher sein. Die Beiträge dieses Bandes sollen einen Eindruck vermitteln, wie wir uns die Informationsextraktion aus FE-Daten vorstellen, welche Teilaspekte zu beachten sind und, als Ausblick, wo wir weiterhin Forschungsbedarf sehen.

2. Rahmenbedingungen Fernerkundung

2.1 „Signaturen“ die Informationsträger

Die quantitative FE versucht den „Fingerabdruck“ oder das „Profil“ der Objekte herauszuarbeiten, die fachlich von Interesse sind. Dazu gehören sowohl die typischen „Objektsignaturen“, als auch der räumliche Kontext in den ein Objekt eingebettet ist. Die Objektsignaturen sind mit allen Bildanalysepaketen analysierbar. Nachbarschaft, Topologie oder gar Kontextwissen ist erst seit Einführung der objektorientiert arbeitenden Bildanalysesoftware eCognition einer breiteren Anwenderschicht zugänglich. Für SCHNEIDER et al. (2000) stellen diese neuen Möglichkeiten einen Paradigmenwechsel in der Bearbeitung von Fernerkundungsdaten dar. Wie die Methode eCognition funktioniert und welche Ergebnisse damit erzielt werden können wird in den Aufsätzen von ANDRESEN et al. und MOTT et al. in diesem Band vorgestellt und soll daher an dieser Stelle nicht weiter behandelt werden.

Was versteht man aber unter „Signaturen“? Im herkömmlichen Sinne sind das „Unterschriften“, also Charakteristika, die Objekte eindeutigen kennzeichnen. Ist man in der Lage die Signaturen zu „lesen“ können Oberflächen identifiziert und Rückschlüsse auf deren Zustand gezogen werden. Fünf Signaturtypen

sind bekannt, die grundsätzlich zur Ableitung thematischer Informationen aus FE-Daten geeignet sind: **spektrale, texturale, temporale, polarisations- und richtungsabhängige** Signaturen.

Der **spektralen Signatur** wird allgemein der höchste Informationsgehalt bezüglich der ableitbaren Objekteigenschaften zugerechnet. Die spektrale Signatur ist bis auf die unterste, auf die Zellebene bzw. noch tiefer, auf die atomare/molekulare Ebene, zurückzuführen. Auf dieser Ebene finden die Absorptions-, Transmissions-, und Mehrfachreflexionsvorgänge, aber auch die Emissionsvorgänge statt, welche die charakteristischen Spektralsignaturen von Objekten der Erdoberfläche bestimmen (Abb. 2). Hinzu kommt, dass sich die spektralen Signaturen durch alle fernerkundlich erfassbaren Skalenebenen durchpausen und auch auf allen Skalenebenen relevant sind. Dabei sind neben den abgedeckten Spektralbereichen auch die Anzahl der Spektralbänder und möglichst schmale Bandbreiten wichtig, um eine möglichst genaue Quantifizierung der abgeleiteten Merkmale zu erzielen. Abbildende Spektrometer (oder Hyperspektralsensoren) sind für die detaillierte Erfassung spektraler Signaturen ausgelegt. Eine Auflistung der momentan im Einsatz befindlichen Systeme dieser Bauart und deren Spezifikationen ist u.a. bei SCHAEPMANN (2003) über das Internet abrufbar.

Bezogen auf den landwirtschaftlichen Bereich, nennt GERSTL (1990) die **richtungsabhängigen Signaturen** als diejenigen mit dem möglicherweise höchsten Informationsgehalt. Richtungsabhängige Signaturen sind auf die Anisotropie der Rückstrahlung zurückzuführen und haben ihre Extreme in der spiegelnden und der diffusen Reflexion (Abb. 3). Bei Vegetationsoberflächen wird das Anisotropieverhalten von der Pflanzenarchitektur und Bestandesstruktur beeinflusst und überlagert die Spektralinformation. Sensoren mit on-track multidirektionaler Datenerfassung (MOMS-02, Spot5, ALOS, MISR, Chris/Proba) erlauben die Auswertung der Anisotropieinformation. Für die quantitative Analyse richtungsabhängiger Signaturen, aber auch für die Korrektur von Anisotropieeffekten spektraler Signaturen, ist allerdings ein Reflexionsmodell

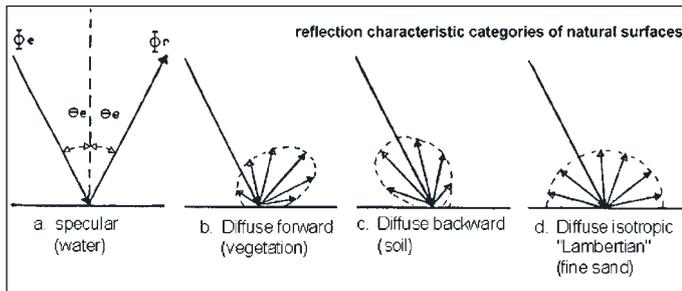


Abbildung 3
Reflexionscharakteristik natürlicher Oberflächen (SCHNEIDER et al., 1999)

der jeweiligen Oberfläche Voraussetzung (SCHNEIDER & MANAKOS, 2000).

Will man den Momentzustand der Landbedeckung im natürlichen oder naturnahen Umfeld erfassen, so ist eine hohe räumliche und auch spektrale Genauigkeit von Vorteil. Eine kombinierte Auswertung von **richtungsabhängigen, textuellen, temporalen und polarisations Signaturen** kann zusätzliche Hinweise liefern, mit deren Hilfe die Identifikation und Zustandsbeschreibung verbessert werden kann.

2.2 Das „passende“ Aufnahmesystem

Der Fachpraktiker fordert immer höhere „Auflösung“ und meint damit, dass immer kleinere Details erkennbar sein sollen. Für den Fernerkundler ist damit die räumliche, oder „geometrische“ Auflösung gemeint, die ja lediglich einen der fernerkundlich relevanten Auflösungstypen darstellt. Der Sinn des Wunsches nach höherer geometrischer Auflösung ist aus Sicht des Praktikers einleuchtend: mit zunehmender räumlicher Auflösung sehen die Bildprodukte einem klassischen Luftbild immer ähnlicher. Der Praktiker kann das „Bild“ verstehen und wie ein Luftbild visuell, d.h. qualitativ auswerten.

Der FE-Fachmann ist mit digitalen Daten in der Lage quantitativ zu arbeiten. Die pro Pixel erfassten Strahlungsäquivalenten Signale sind Messwerte anhand derer Objekte identifiziert und deren Zustand beurteilt werden kann. Die Frage, die sich dem Praktiker immer stellt ist die, wie das gewünschte Ergeb-

nis mit möglichst geringem Aufwand erzielt werden kann. Diese Frage hängt primär mit dem von der Aufgabenstellung geforderten Aufnahmesystem zweitens aber auch mit der gewählten Auswertemethode zusammen.

Hilfestellung bei der Entscheidung für das passende System gibt die „Checkliste Sensor“ in Tabelle 1, welche eine Reihe von Entscheidungs-Kriterien auflistet und die Alternativen anreißt. Ausgehend von der avisierten Anwendung für Inventur und Monitoring im **lokalen, natürlichen bis naturnahen** Umfeld soll anhand dieser Liste aus der Vielzahl vorhandener Systeme zur Erdbeobachtung eine Auswahl der in Frage kommenden Systeme getroffen werden.

Ein FE-Sensor „sammelt“ sehr vereinfacht ausgedrückt, Photonen. Ob das aus dem Weltraum oder aus der Luft geschieht, spielt prinzipiell erstmal keine Rolle. Im Falle der photo-chemischen Methode des klassischen Luftbildes werden die Photonen, bildlich gesprochen, grob „gewogen“. Die photo-voltische Strahllichtmessung erlaubt es Photonen zu zählen. An diesem Punkt setzt die digitale FE an: sie ermöglicht es, die Reflexion/Emission der Objekte zu „messen“ und damit zu quantifizieren! Darüber hinaus lassen sich die Ergebnisse digital abspeichern und in vorhandene Konzepte, etwa Fachinformationssysteme (FIS) integrieren.

Eine Schlüsselstellung zum Verständnis der Zusammenhänge spielt das Kriterium „Auflösung“. Die

Plattform Position:	<ul style="list-style-type: none"> • Flugzeug (Luft) • Satellit (Weltraum)
Signal Erfassung:	<ul style="list-style-type: none"> • foto-chemisch → analoge FE <ul style="list-style-type: none"> • Fotografie: SW, Farb-, CIR • foto-voltisch → digitale FE <ul style="list-style-type: none"> • aktive: Radar, Laser, Sonar • passive: Video, Scanner, Digitalfotografie
Spektralbereich:	<ul style="list-style-type: none"> • optisch: (400 - 2500 nm) • thermal: (3,5 - 6 μm, 9 - 13 μm) • Mikrowellen (Radar): (0,0001 - 1 m)
Auflösung:	<ul style="list-style-type: none"> • geometrische • spektrale • radiometrische • zeitliche (temporale)
Andere:	<ul style="list-style-type: none"> • Kosten !!!! • Integrierbarkeit in vorhandene Konzepte (GIS) • etc.

Tabelle 1
Kriterien zur Auswahl des adäquaten Systems bei gegebener Fragestellung „Checkliste Sensor“

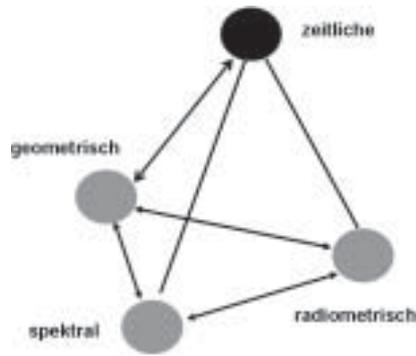


Abbildung 4
Tetrapode der Sensor-Kriterien „Auflösung“

Verbesserung der Leistungsmerkmale eines FE-Systems wird über die Optimierung der „technischen“ Parameter geometrische, spektrale und radiometrische Auflösung erreicht. Jede Änderung eines „technischen“ Parameters (spektral, geometrisch, radiometrisch) hat Einfluss auf die beiden anderen (Abb. 4). Das technisch Machbare im Bereich Detektorempfindlichkeit, also die Fähigkeit Photonen zu zählen (radiometrische Auflösung), gibt hier den Takt vor. Die Verbesserung der geometrischen Auflösung von 20 m auf 10 m führt zu einer Reduktion der theoretisch erfassbaren Photonen auf 25% (Wurzelfunktion, Pixelgröße wird zwar über die Kantenlänge definiert, die Wirkung bezieht sich aber auf die Fläche!), die Halbierung der spektralen Bandweite um 50% (lineare Beziehung). Lediglich Silizium-Detektoren sind derzeit empfindlich genug, um den Submeter-Bereich von einer Weltraum-Plattform aus zu erreichen. Die geometrisch „sehr hoch auflösenden“ Weltraumgestützten Systeme Ikonos (Space Imaging Caterra, 1999), Quick Bird (2001) müssen sich aus diesem Grund auf den sichtbaren und nahen Infrarot-Bereich beschränken. Abbildende Spektrometer, die dem Anwender einen optimalen Zugriff auf die Eigenschaften der Objekte der Erdoberfläche bieten, sind mit der für lokale Anwendungen geforderten geometrischen Auflösung im Meterbereich derzeit lediglich als Flugzeugsensoren verfügbar. „Günstige“ Systeme, wie AVIS (GTCO), CASI-1, oder spektral sehr hoch auflösende Systeme, wie ROSIS (DLR), arbeiten ebenfalls nur im Silizium Bereich von ca. 400-1000 nm. Systeme, die den kurzwelligen Infrarotbereich abdecken (HyMap, CASI-2), oder sogar in das thermale Infrarot Daten erfassen können (AVIRIS, ARES), sind technisch wesentlich anspruchsvoller, da die Detektoren stabil gekühlt werden müssen.

Die zeitliche Auflösung ist prinzipiell eine reine Kostensache. Bei Flugzeuergfassung müsste häufiger geflogen werden, bei Satellitensystemen würden mehrere, baugleiche Systeme eine deutliche Verbesserung der Datenerfassungswahrscheinlichkeit mit sich bringen. Das Rapid Eye Konzept, das letztere Variante vorsieht, und vor allem die Landwirtschaft mit Daten versorgen möchte, ist leider bis heute nicht

realisiert. Von praktischem Interesse, da mit Auswirkungen auf die notwendigen Vorverarbeitungsschritte, ist auch die Beziehung zwischen geometrischer und zeitlicher Auflösung. Mit zunehmender geometrischer Auflösung werden die Bodenstreifen schmäler. Von 180 km bei Landsat TM/ETM+ auf 11 km bei Ikonos. Die gewünschten Bahnparameter, polar, um die gesamte Erde abzudecken, sonnensynchron, d.h. immer zur gleichen Uhrzeit, um vergleichbare Aufnahmebedingungen zu haben, geben den Takt für die Umrundungszeiten vor (ca. 90 min bei einer Bahnhöhe von ca. 750 km). Bei diesen Vorgaben überfliegt der Landsat Sensor das gleiche Objekt im 16 Tage-Rhythmus, bei Ikonos würde das ca. 240 Tage dauern. Die von der Betreiberfirma angegebene Wiederholfrequenz wird nur dadurch erreicht, dass das System um +/- 40° geneigt werden kann und durch diesen Schrägblick den Aufnahmebereich auf ca. 600 km rechts und links der projizierten Bahnspur ausweiten kann. Die Folgen sind allerdings vergleichbar dem Weitwinkelleffekt bei Flugzeugsensoren: unterschiedliche Beleuchtungssituationen je nach Blickwinkel sowie geometrische „Verzeichnungen“ aufgrund der Topographie.

Die derzeitigen Grenzwerte der „Auflösung“ ziviler Systeme liegen bei:

- spektrale (Bandbreite, -anzahl):
 10nm, über 200 Bänder von 400 bis 2500
 und von 8000 bis 13000 nm
 (Rosis, AVIRIS, HyMap, ARES)
- geometrisch (räumliche A):
 0,05m (HRSC AX)
- radiometrisch (Dynamikbereich Detektor):
 16 BIT entsprechend 64536 Grauwerte
- zeitlich (Aufnahmewiederholung):
 2-3 Tage aus dem Weltraum
 (Ikonos, Quick Bird)

Für den avisierten Anwendungsbereich im lokalen, natürlichen bis naturnahen Umfeld sind Systeme gefragt, die diesen Grenzwerten möglichst nahe kommen. Das in Kapitel 3 vorgestellte Gesamtkonzept sowie die in diesem Band vorgestellten Untersuchungen beruhen auf weltraumerfassten Daten des Ikonos-Typs (AQUATIC Vorhaben) sowie auf hyperspektrale Flugzeugdaten der Systeme DAIS, ROSIS und HyMap (HTO Vorhaben).

2.3 Notwendigkeit der „Normalisierung“

Die Zielsetzung von Objektivität und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse führt zur Notwendigkeit der Eichung der vom Sensor erfassten relativen Signale. Erst durch diese „Normalisierung“ werden die Daten zu „physikalischen Messwerten“. Die Faktoren, die das FE-Signal verändern und berücksichtigt werden müssen, lassen sich grob in drei Gruppen einteilen:

- Sensor spezifische (Detektorkalibrierung, Objektivverzeichnungen)
- Beleuchtungs- und Beobachtungswinkel abhängige Einflüsse (Anisotropieeffekte)

- Atmosphärische und topographische Einflüsse, im Falle der Gewässerfernerkundung zusätzlich Einflüsse durch die Wassersäule und die Wasseroberfläche

Die kombinierte topographisch- und atmosphärische Korrektur von Fernerkundungsdaten ist der entscheidende Schritt zu den geforderten „physikalischen Messwerten“ (ATCOR 4, Richter & Schläpfer, 2002) (in naher Zukunft unter Berücksichtigung von Blickwinkelwirkungen). Neuralgische Punkte in diesem Umfeld sind (i) das Fehlen hochgenauer, aktueller Oberflächenmodelle für die Korrektur Topographie bedingter Einflüsse sowie (ii) ausreichende Information über die Atmosphäre während der Aufnahmen.

- Die simultane Befliegung mit hyperspektralen Systemen, zur Ableitung der spektralen Signaturen, und photogrammetrischen Systemen, zur Berechnung eines hochgenauen, aktuellen Oberflächenmodells, ist die Methode der Wahl. Dieser Lösungsansatz ist allerdings sehr kostspielig. Im Rahmen des HTO Vorhabens (2001) ist eine gemeinsame Befliegung von HyMap und HRSC erfolgt, die zu diesem Zeitpunkt allerdings noch nicht ausgewertet ist.
- Während einer Sensorbefliegung werden zeitgleich Spektrometernmessungen am Boden durchgeführt. Durch den Vergleich von Boden- und Flugzeugerfassten Daten kann für jeden Wellenlängenbereich die Transmission der Atmosphäre bei der Normalisierung berücksichtigt werden.

Die zu „physikalischen Messwerten“ korrigierten Daten sind der Input für die Berechnung von abgeleiteten Parametern. Diese werden direkt für die Initialisierung von Modellen, etwa so genannter „Soil, Vegetation, Atmosphere Transfer“ (SVAT) Modelle zum Stofftransport, zur Klimaforschung und vielem mehr genutzt.

Diese Modelle simulieren die Wechselwirkungen zwischen EM-Strahlung und dem Objekt der Erdoberfläche und dienen u.a. der Ableitung von phänologisch/physiologischen Merkmalen, wie sie für die Parametrisierung von Wachstums- und Ertragsmodellen benötigt werden. Kurz angerissen wird dieser Punkt in Kapitel 2.5, der Einsatz der FE im „precision farming“ Konzept.

Das Erreichen der Zielsetzung der Normalisierung von FE-Daten zu „physikalische Messwerte“ möchte ich als „Hausaufgabe der Fernerkundung“ bezeichnen. Die Korrektur von Anisotropieeffekten hat bis heute den Status der Grundlagenforschung nicht verlassen. An dieser Stelle soll daher nicht vertiefend darauf eingegangen werden. Einen Einblick in die Komplexität solcher „Normalisierungen“ geben die Aufsätze von GEGER et al. (2004), und HEEGE et al. (2004) in diesem Band für den Bereich der Gewässerfernerkundung.

2.4 Automatisierung der Auswertungen

In der Auswertung führt die Forderung nach immer besserer Auflösung unweigerlich zur Konfrontation mit dem **Prinzip der Inkompatibilität von „Genauigkeit“ und „Komplexität“** (precision and complexity), das ZADEH (1973) wie folgt beschreibt: *„as the complexity of a system increases, the ability to make precise and yet significant statements about its behaviour diminishes...“*

In der fernerkundlichen Praxis bedeutet das nichts weiter als dass mit zunehmender „Auflösung“, – wobei nicht nur die räumliche sondern auch die spektrale, radiometrische, zeitliche und nicht zuletzt die thematische Auflösung gemeint sind – die Automatisierung der Auswertungen schwieriger wird, da die Komplexität der Daten vielfach zunimmt. Dies bedeutet auch, dass sich die Merkmalsräume der gesuchten Klassen immer mehr überlagern (KENNEWEG et al., 1991). Anschaulich kann dieses Verhalten anhand der zunehmenden geometrischen Auflösung dargestellt werden (Abb. 5). Das Landsat TM Pixel mit 30 m (weiße, äußere Markierung) ist eindeutig als „Waldpixel“ zu klassifizieren. Mit zunehmender Auflösung „zerfällt“ das Objekt in Pixel mit unterschiedlichen Bedeutungen: Krone Sonnenbeschienen, Krone im Schatten, Schatten am Boden, Vegetation, Fels, nackter Boden, sämtliche Übergänge. In der FE spricht man von einer spektralen Dekorrelation mit der Folge steigender Varianz der Grauwerte innerhalb von „nutzedefiniert sinnvollen“ Objekten, in diesem Fall des „Objektes“ Wald. Dieses „Übergangsphänomen“ ist mit der Fraktaltheorie von MANDELBROT (1983) gut zu beschreiben. Ist Pixel- und

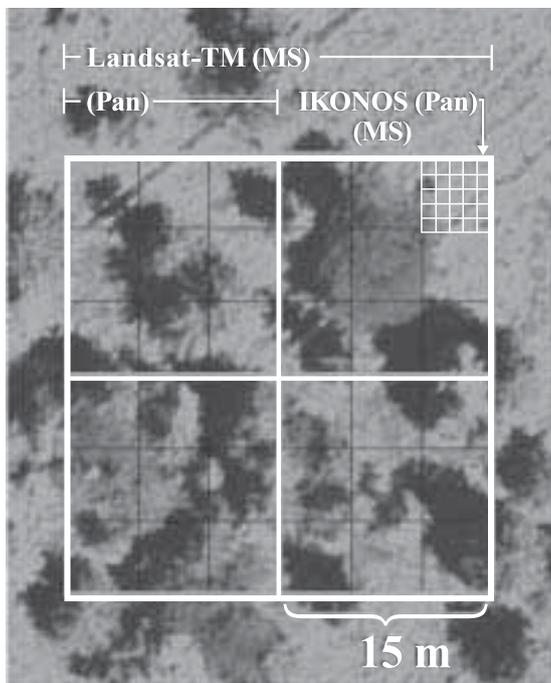
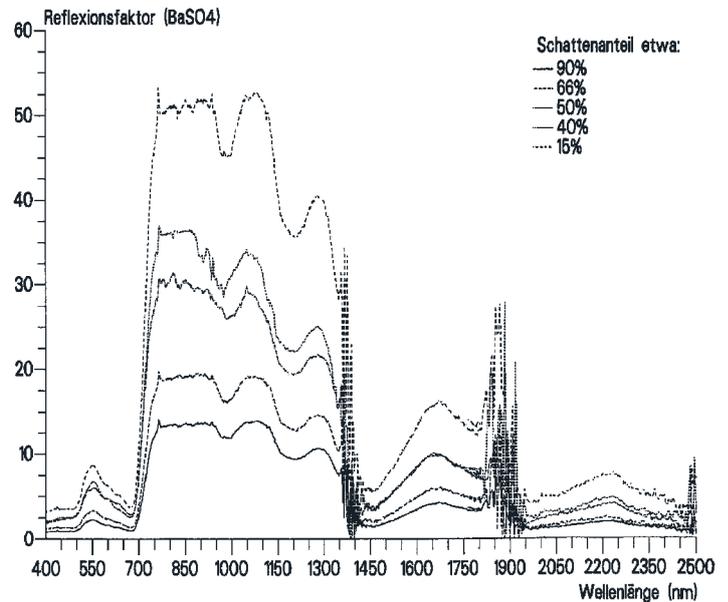


Abbildung 5

Mit zunehmender geometrischer Auflösung „zerfällt“ das Landsat TM „Waldpixel“ (weiß) in „Unterobjekte“. Eine traditionelle, Pixelgestützte Klassifikation des Waldes ist nicht mehr möglich

Abbildung 6

Einfluss des Schattens auf die Reflexionsintensität (Reflexionsfaktor in Prozent), gemessen mittels eines GER SIRIS Feldspektroradiometers über einer Fichtenkronen des Högelwald Altbestandes



(Unter-)Objektgröße deutlich unterschiedlich ist eine Unterscheidung möglich. Schwierig wird es im Bereich der Fraktalsprünge, d.h. wenn Pixel und Objekt ähnlich groß sind. Wie Fehlert das 1984 theoretisch und KENNEWEG et al. 1991, praktisch nachgewiesen haben, erfolgt bei Wald der „Sprung“ der fraktalen Dimension bei ca. 4 - 6 m! Dieses bedeutet u.a., dass die räumliche Auflösung des Systems an die Größe der gesuchten Objekte angelehnt sein muss, damit die charakteristischen Merkmale erkannt werden können.

Der Einfluss des Schattens, der spektral neutral ist (SCHNEIDER, 1995), d.h. das Verhältnis der Intensitäten über den Wellenlängenbereich nicht verändert, ist in Abb. 6 zu sehen. Übertragen in Grauwerte, etwa für das nahe Infrarot bei 860 nm (Reflexionsfaktor 0% gleich Grauwert 0, Reflexionsfaktor 60% gleich Grauwert 255) würde das Histogramm, das ja als Entscheidungsgrundlage für die Klassenzuordnung dient, eine Verteilung über nahezu $\frac{2}{3}$ des gesamten Merkmalsbereichs allein für diesen Baum aufzeigen.

2.5 Informationsextraktion

Das in den vorigen Abschnitten beschriebene Dilemma der zunehmenden „Auflösung“ betrifft natürlich auch und vor allem die Ansätze zur Übertragung „konventioneller“, auf der visuellen Interpretation beruhender Konzepte, auf „automatisierbare“, auf digitale FE-Daten gestützte Methoden. Als Lösungsansatz wird die Absicherung der Ergebnisse durch vorhandene Informationen mit Methoden der „**Wissensbasierten Bildanalyse**“ vorgeschlagen. Komponenten einer „Wissensbasierten Bildanalyse“ im Umweltbereich haben Buck et al., (2001) als eine Kombination aus vorhandener Wissensbasis, bestehend aus theoretischem und praktischem Wissen von Experten und Praktikern, in Datenbanken gespeicherten GIS Daten und aktuellen Fernerkundungsdaten beschrie-

ben, die über die Schnittstelle einer so genannte „Inferenzmaschine“ in ein computergestütztes Entscheidungssystem integriert werden (Abb. 7). Bei gekonnter Umsetzung werden die Abläufe, die im Kopfe eines Fachmanns ablaufen, wenn er eine Entscheidung trifft, nachvollzogen.

Ein Beispiel, wie so ein Expertensystem für die Teilschlagbewirtschaftung („precision farming“ PF) in der Landwirtschaft aussehen könnte, ist in Abb. 8 skizziert. Das im Rahmen des DFG Gruppenvorhabens IKB Dürnast (AUERNHAMMER et al., 1999) konzipierte Expertensystem „PF“ besteht aus einem Entwicklungsmodul („laboratory loop“) und einem Anwendungsmodul („operational application chain“). Die Entscheidungsfindung beruht auf der Verknüpfung von Reflexions- und Wachstumsmodellen. Diese erfolgt über Messungen im Tagesgang und über die Vegetationsperiode („laboratory loop“) bei bekannten Düngegaben und Witterungsverlauf:

- Der Beobachtungs- und Beleuchtungsabhängigkeit des Oberflächentyps durch Reflexionsmessungen nach dem Goniometerprinzip ➔ Reflexionsmodell
- Der Bestandesparameter durch photogrammetrische Messungen der Blattflächenausrichtung, der spiegelnden, der beschatteten Blattanteile, des Bodens, etc. ergänzt durch destruktive Messungen der Biomasse (feucht/trocken), des Chl-Gehalts, etc. ➔ Wachstumsmodell

Da Wachstums- und Reflexionsmodell anhand des gleichen „Objektes“ entwickelt wurden, kann eine optimale Anpassung erfolgen. Durch Inversion des Reflexionsmodells lassen sich dann die Bestandsparameter mit hoher Korrelationswahrscheinlichkeit bestimmen.

Im „operational application chain“ wird anhand der Wachstumsmodelle eine Schätzung der Bestandsentwicklung vorgenommen. Durch Inversion der FE-Daten wird diese Schätzung überprüft und bei Bedarf angepasst (erwartete Reflexion/tatsächlich

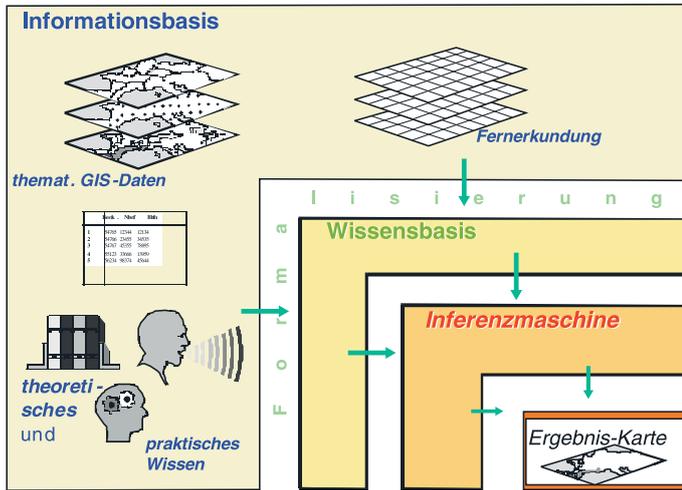


Abbildung 7

Wissens-, Informations- und Datenfluss in einem Expertensystem zur Bewertung bis Entscheidungsfindung (Buck et al., 2001)

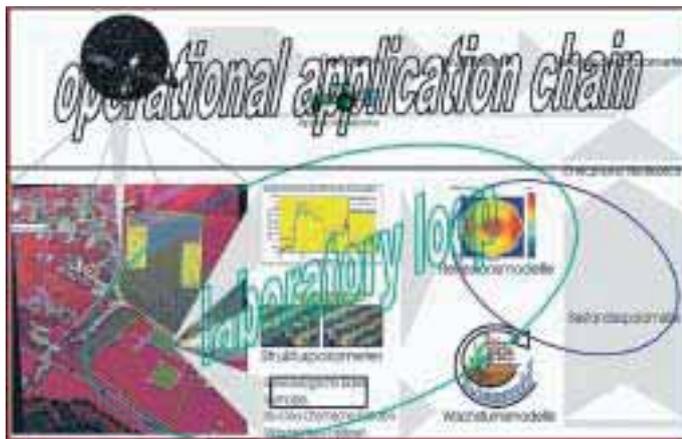


Abbildung 8

Ablaufschema bei der Entwicklung und Anwendung eines Expertensystems im „Precision Farming“ Umfeld. Die Steuerung erfolgt über Wachstumsmodelle, die mittels FE parametrisiert und dem jeweiligen Entwicklungsstand bei gelungener FE Aufnahme angepasst werden („operational application chain“, oben). Die Entwicklung der Regelwerke hierzu erfolgt durch Geländemessungen („laboratory loop“, unten) bei denen Reflexions- und Wachstumsmodelle geeicht werden. (SCHNEIDER & MANAKOS, 2003)

beobachtete Reflexion). Danach wird die zu applizierende Dünge- oder Spritzmenge bestimmt und die Applikationskarte für den Bordcomputer erstellt. Da FE-Daten optischer Systeme vom Bewölkungsgrad abhängen, wird zwischen der Anpassung des Wachstumsmodells und der Erstellung der Applikationskarte in der Regel eine zeitliche Lücke liegen. Eine Feinabstimmung, die die aktuelle Situation berücksichtigt, soll über einen „real-time“ Sensor erfolgen. Das Signal des „real-time“ Sensors wird wiederum über das Reflexionsmodell „normalisiert“.

PF stellt die zurzeit wohl höchsten Ansprüche an solche Expertensysteme. Identifikation ist kein Thema. Sowohl die Feldfrucht als auch der Standort und die Historie des Schlags sind bestens bekannt. Erkannt werden muss der Zustand, und das möglichst genau. Ökologische aber auch ökonomische Erfolge hängen von der Entscheidung durch das Expertensystem ab. In der „real time“ Ausbaustufe muss die Entscheidungsfindung quasi zeitgleich mit der Ausbringung des Düngers oder Pflanzenschutzmittels erfolgen. Im naturnahen (z.B. Vertragsnaturschutz) bis natürlichen Umfeld (Biotope) sowie auch im Forstbereich ist der Zeitfaktor weniger kritisch. In diesen Bereichen muss die Information nicht in direkt umzusetzende Maßnahmen einfließen, ein jährlicher Abgleich mit den Modellvorhersagen erscheint ausreichend.

3. Konzept auf Landschaftsebene

Die von nationalen und EU Richtlinien, Verpflichtungen etc. den Gemeinden und Kommunen aufgebürdeten Berichtspflichten auf der einen Seite, die Überprüfung der letztendlich vom Steuerzahler finanzierten Subventionen im Agrar- und Umweltbereich auf der anderen Seite – Beispiele für beide Fälle sind von Ammer, Arzet und Rintelen in den vorausgehenden Beiträgen dieses Bandes vorgestellt worden – machen deutlich, dass die gesamte Landschaft mit allen Komponenten in regelmäßigen Abständen inventarisiert bzw. überwacht werden muss. Es geht dabei um regelmäßige, genau definierte Informationserhebungen, um Monitoring. Dabei soll in der Regel nur festgestellt werden, ob sich etwas geändert hat. Diese Information über Geländebegehungen zu erheben ist zu zeitaufwändig und dadurch zu teuer und letztendlich subjektiv. Selten wird derselbe Fachmann zur Verfügung stehen und fast nie wird der gleiche Zustand vorliegen. Auf der anderen Seite ist Fernerkundung immer bloß die Interpretation einer Abbildung der Realität. Die thematische Auflösung eines vor Ort kartierenden Fachmannes kann daher nie erreicht werden. Im Gegenzug ist der Fachmann nicht in der Lage, die Grenzen der kartierten Einheiten so genau zu erfassen, wie dies der Fernerkundung möglich ist.

Speziell für Monitoring-Aufgaben wird daher ein kombiniertes Verfahren vorgeschlagen: die Basisinventur sollte über „Vor-Ort-Kartierung“ unter Einbindung von „a priori“ Information aus Fernerkundungsdaten erhoben werden. Ein Monitoring in verkürzten Intervallen sollte über FE-Daten erfolgen. Ergibt die Auswertung der FE-Daten Verdachtsmomente auf potentielle Verschlechterungen im naturschutzfachlichen Sinn, so können betroffene Flächen gezielt terrestrisch überprüft werden. Auf diese Weise lässt sich der Einsatz des Vor-Ort-Kartierens auf ein Minimum reduzieren.

Um ein derartiges Konzept umsetzen zu können, müssen allerdings erst einmal die Wirkungskreisläufe auf den verschiedenen Maßstabebenen verstanden und Computergerecht modelliert werden. Dieses geht nur in interdisziplinärer Zusammenarbeit. In der Test- und Entwicklungsphase schlagen wir ein „geschlossenes System“ vor. In einem ersten Ansatz betrachten wir das Einzugsgebiet eines Sees als „geschlossenes System“ im Sinne der ökologischen Forschung. Auf dieser Ebene können sowohl die Einzelkomponenten als auch das Gesamtsystem untersucht werden.

Eine Auswahl der Prozesse, die verstanden werden müssen sind:

- Wachstums- und Reflexionsmodelle der Einzelkomponenten
- Wechselbeziehungen zwischen den Komponenten auf Einzugsgebietsebene
- zeitliche Dynamik der Prozesse

Zur Umsetzung dieses Konzepts benötigt man Expertenwissen:

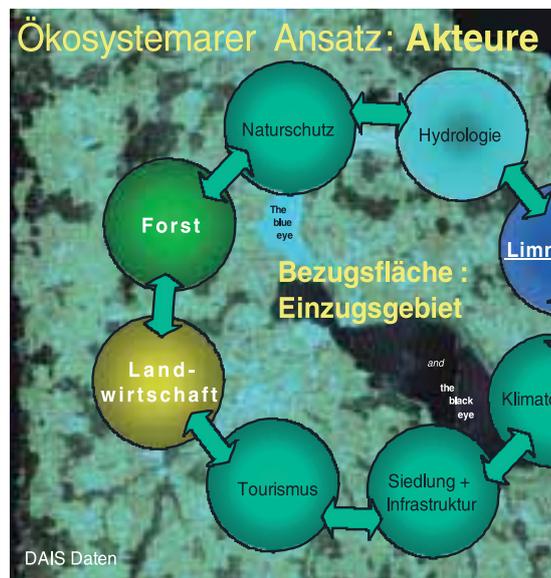


Abbildung 9

Schema des avisierten interdisziplinären Ansatzes in einem „geschlossenen“ System im Einzugsgebiet des Waging-Tachinger Sees. In weißem Fettdruck sind die momentan laufenden Untersuchungen dargestellt (nach: SCHNEIDER et al., 2003)

- phänologisch/physiologisches Wissen auf Ebene der Einzelkomponenten
- Wechselwirkung von Sonneneinstrahlung / Vegetation / Boden / Atmosphäre
- Bildanalyse
- Etc.

In Abb. 9 ist das Schema des avisierten interdisziplinären Ansatzes in einem „geschlossenen“ System am Beispiel der Einzugsgebiete der Waging-Tachinger Seen aufgezeigt. In weißem Fettdruck sind die momentan bearbeiteten Bereiche dargestellt (nach: SCHNEIDER et al., 2003). Die Aufsätze von Schmieder et al., Andresen et al., Mott et al., Gege et al., Heege et al., alle in diesem Band, sowie das vorgestellte Beispiel aus dem Teilschlagbereich vermitteln einen Eindruck über den Stand der Forschung bei der Bearbeitung der einzelnen Module. Die Beiträge von Hoffmann et al. und Klug et al. in diesem Band zeigen auf, wie die Beurteilungsschemata auf Einzugsgebietsebene funktionieren und worauf sie aufbauen.

4. Diskussion und Ausblick

Fernerkundung ist ein Indizienbeweisverfahren! Diese, den Studenten der Erstsemester vorgetragenen Schlagworte sollen darauf hinweisen, dass Fernerkundung immer bloß die Interpretation einer Abbildung der Realität ist. Die thematische Auflösung eines vor Ort kartierenden Fachmannes kann nie erreicht werden. Festsustellen ist allerdings auch, dass der kartierende Fachmann vor Ort heute ebenfalls an seine „Auflösungsgrenzen“ stößt: die eine oder andere Unterart lässt sich erst über gentechnische Bestimmungsmethoden einordnen. Generell müssen wir akzeptieren, dass jede Maßstabsebene spezifische Detailerkennungs-Schwellwerte besitzt. Der Versuch, diese zu verschieben, scheitert unweigerlich.

Sowohl der Ökologe als auch der Fernerkundler muss immer wieder feststellen, dass er die Ergebnisse nie so genau erzielen kann, wie er das gerne hätte. Der Mensch, vor allem der Wissenschaftler, ist immer bemüht eine möglichst gute Absicherung seiner Ergebnisse zu erreichen. Bekannt ist dieses Phänomen als Tendenz zur Überdefinition. Im operationellen Bereich der Auftragsabwicklung stehen Kosten/Nutzen-Aspekte im Vordergrund. Hier lautet das Motto „so viel wie nötig, so wenig wie möglich“. D.h., der Wissenschaftler versucht sein Ergebnis bis auf die letzte Nachkommastelle abzusichern, der Praktiker hingegen mit möglichst geringem Aufwand den bestmöglichen Ertrag zu erzielen. Im wissenschaftlichen Umfeld ist der Bearbeiter sein strengster Kontrolleur. In der Praxis ist es notwendig die abgelieferten Produkte zu kontrollieren. Dem Fachmann, der gutachterlich eine Karte nach Kartierschlüssel erstellt, die bestenfalls mit ausführlicher Dokumentation der einzelnen Aufnahmepunkte abgegeben wird, vertraut man notgedrungen. Dabei ist der Geländekartierer unter Zeitdruck (Kosten!) und von den momentanen Verhält-

nissen (Ausprägung) der zu erfassenden Fläche abhängig (zumindest die quantitative Artenzusammensetzung wird z.B. im trockenen Sommer 2003 deutlich anders aussehen). Er wird auch nicht alle Grenzen ablaufen können, allein schon um das Biotop, das er erfassen soll nicht zu zertrampeln. Die Ergebnisse von FE-Auswertungen können – anders als bei Geländebegangsdaten, die praktisch Unikate darstellen – nicht nur sofort überprüft sondern auch zu einem späteren Zeitpunkt unter Berücksichtigung neuer Erkenntnisse nochmals ausgewertet werden (Dokumentation).

Die Bestrebungen im Geobereich gehen dahin, Expertensysteme zu entwickeln, die es erlauben FE-Daten unter Einbeziehung bereits vorhandener Geodaten sowie von praktischem und theoretischem Wissen auszuwerten. Die Ergebnisse sollen dadurch abgesichert und der Informationsextraktionsvorgang nachvollziehbar und jederzeit reproduzierbar gestaltet werden. Die Zusammenarbeit von Ökologen und Fernerkundler hat das Ziel, aus FE-Daten die Merkmale abzuleiten, die der Ökologe zur fachlichen Bewertung, bzw. – in einer fortgeschrittenen Integrationsstufe – zur Initialisierung seiner Modelle benötigt. In unserem Ansatz stammen die Indizien oder „stützenden Informationen“ aus vorhandenen Geodaten, das Konzept beruht auf theoretischem und praktischem Wissen. Im Idealfall trägt die FE bloß durch Bestätigung oder Ablehnung der Hypothese zur Validierung des Ergebnisses bei. Dieses wiederum ist sofort und eindeutig überprüfbar.

Als Wissenschaftler, Ökologe und/oder Fernerkundler, arbeiten wir wertneutral. Erst der Land- oder Forstwirtschaft, Naturschützer, Kommunalpolitiker, etc. verfolgt konkrete Ziele, deren Erfüllung mit Maßnahmen sichergestellt werden müssen. Erst die Umsetzung dieser Maßnahmen erfordert Planung. Wir bieten die Grundlage dafür. In dem lokalen Maßstabsbereich unserer Untersuchungen sind wir der direkten Kontrolle durch den Endnutzer ausgesetzt. Jeder der betroffenen Akteure kann überprüfen was wir erreicht haben. Er kann uns an den Pranger stellen oder aber anhand einer nüchternen Kosten/Nutzen Analyse feststellen, ob sich die Angelegenheit für ihn rechnet. Es ist wie in der Medizin: der Schritt von der Diagnose durch den Hausarzt zur Gerätemedizin. Oft ist dieser Schritt nicht notwendig, in einigen Fällen aber Leben rettend und für das Erkennen von systematischen Zusammenhängen, etwa von Umwelteinflüssen und Krankheitsbild schlicht unerlässlich. Vergleichbar ist die Folge zunehmender „Auflösung“ auch in der FE: ein Anstieg der Kosten!

Das für Monitoring-Aufgaben vorgeschlagene kombinierte Verfahren mit einer Basisinventur über „Vor-Ort-Kartierung“ unter Einbindung von „a priori“ Information aus Fernerkundungsdaten spart Kosten und verknüpft die Erfahrung des thematisch arbeitenden Fachmanns und des Fernerkundlers bereits in der Planungsphase. Ein „reduzierter“ Monitoringzyklus in

Intervallen von ein, zwei bis fünf Jahren, eingeschaltet zwischen den vorgeschriebenen „großen“ Aktualisierungszyklen, soll über FE Daten erfolgen. Bei Auftreten von Verdachtsmomenten können die „verdächtigen“ Flächen ja jederzeit terrestrisch überprüft werden. Das Verfahren hat sich in dem seit Jahren zur Kontrolle der subventionierten Ackerflächen durchgeführten MARS Programm der EU bestens bewährt. Die zeitliche Staffelung wird durch die Fragestellung und die geforderten Aktualisierungszyklen vorgegeben. In einem Vorschlag von SCHNEIDER et al. (2003) wird dieser Gedanken sogar dahingehend ausgeweitet, dass in geeigneten Fällen das Monitoring sogar auf einzelne sensible Landschaftselemente, in diesem Falle Seen, reduziert werden kann. Die Seen dienen in dem Szenario als Indikatoren für den Zustand des gesamten Einzugsgebietes. Über FE gestützte Verfahren, wie sie in den Beiträgen von GEGE et al. und HEEGE et al. in diesem Band vorgestellt werden, wird eine Art Bioindikation durchgeführt. Stofftransportmodelle, wie von HOFFMANN et al., in diesem Band vorgestellt, erlauben es festgestellte Veränderungen in das Einzugsgebiet bis zum Verursacher zurück zu verfolgen.

Die Frage, welche Systeme für die Bereitstellung der fachlichen Information letztendlich benötigt werden, kann hier und heute nicht abschließend beantwortet werden. Wie komplex die Kriterien zur Auswahl des geeigneten Systems sind, ist in den vorangegangenen Kapiteln angesprochen worden. Die harten Randbedingungen werden in der Praxis in dem Spannungsfeld zwischen Abgabepflicht und verfügbarem Kostenrahmen austariert werden. Aktive Systeme, wie Mikrowellen (Radar), mit dem Vorteil Bewölkungs- und Tageszeit unabhängig zu sein, oder Laserscan an Land und Sonar im Wasserkörper, lassen im ersten Ansatz lediglich die Ableitung von Strukturinformationen zu. Damit können zwar hervorragende Gelände-, Oberflächen- oder Tiefenmodelle erstellt werden, Identifikation und Zustandsbeschreibung sind aber nur sehr eingeschränkt möglich. Es ist aber nicht auszuschließen, dass die Kombination mit optischen Sensoren in Zukunft erfolgreich sein wird. Für die Forschungs- und Entwicklungsphase der Expertensysteme in dem naturschutzfachlichen Umfeld der lokalen Maßstabsebene sehen wir zu jetzigem Zeitpunkt die multi- bis hyperspektralen optischen Systeme mit geometrischen Auflösungen im Meterbereich als am besten geeignet an. Da die Verfügbarkeit eines aktuellen und hochgenauen DOMs für die Einpassung der Fernerkundungsdaten in und an die bereits vorhandenen Geodaten, eine unabdingbare Voraussetzung sind und darüber hinaus natürlich auch die Struktur fachlich interessiert, fordern wir die zeitgleiche Erfassung von Stereodaten mit drei bis fünfmal höherer geometrischer Auflösung. Im Rahmen des HTO Vorhabens am Waging-Tachinger See ist diese Kombination im Sommer 2003 mit HyMap (hyperspektral) und der HRSC (Stereo) geflogen worden. Von den Ergebnissen dieser Flugkampagne erwarten wir die

Bestätigung dieses Konzeptes. Das neue Flugzeuggetragene hyperspektrale System ARES, das gemeinsam von der DLR und dem GFZ ab 2005 betrieben werden wird, sieht diese Sensorkombination als Basis constellation vor.

Zu beachten ist allerdings, dass hochwertige Systeme, die in der Lage sind, die gewünschten Informationen zu liefern, teuer sind. „Günstige“ Daten erscheinen uns hingegen als regelrecht hinausgeschmissenes Geld!! Die Lösung dieses „Gordischen Knotens“ sehen wir in einer fachübergreifenden Mehrfachnutzung hochwertiger Datensätze in integralen Ansätzen. Modular wird für jedes Landschaftselement ein eigenes Expertensystem entwickelt, das über die Verknüpfung von Wachstums- mit Reflexionsmodellen die bestmögliche Zustandsbeschreibung erlaubt und darüber hinaus die Entwicklung von Szenarien ermöglicht. Die Ergebnisse der einzelnen Module werden dann zu Aussagen auf Landschaftsebene zusammengeführt. Voraussetzung hierfür ist die Amtsübergreifende Koordination der Datenerfassung.

Es liegt auf der Hand, dass integrale Konzepte, wie die für die Landschaftsebene und im Detail für die Teilschlagbewirtschaftung skizzierten, noch nicht Umsetzungsreif sind. Andererseits besteht die Freiheit der Forschung u.a. auch darin, heute darüber nachzudenken, was in fünf bis zehn Jahren machbar sein wird. Ob ein derartiges Konzept in die Umsetzungsphase kommt, hängt von den gesetzlichen Rahmenrichtlinien ab. Für das Monitoring naturschutzfachlich (FFH, Ramsar) oder im Vertragsnaturschutz gemeldeter Flächen (z.B. KULAP) kann die Methode heute schon angewandt werden und wird in diesen Bereichen zu merklichen Kosteneinsparungen führen.

5. Danksagung

Die Aussagen, die in diesem Aufsatz vertreten werden, beruhen auf den Ergebnisse diverser Forschungsvorhaben, die durch die DFG (IKB Dürnast), das BMBF/DLR (MOMS-02, AQUATIC) und das Bayerische Forschungsministerium (HTO) gefördert wurden und werden. Des Weiteren bedanke ich mich bei den Mitarbeitern meiner Forschergruppe sowie den Kooperationspartnern von der Uni Hohenheim und vor allem des DLR/DFD, ohne die die vorgestellten Konzepte nicht hätten entwickelt werden können.

6. Liste der verwendeten Abkürzungen:

ALOS: Advanced Land Observing Satellite
 AQUATIC: Einsatz hochauflösender Satellitendaten und moderner Bildanalysemethodik zur Erfassung aquatisch/limnologisch relevanter Parameter der oberbayerischen Seen.
 ARES: A New Reflective / Emissive Imaging Spectrometer for Terrestrial Applications

ATCOR: Atmospheric & Topographic Correction; <http://www.rese.ch/atcor/atcor4/>
 AVIRIS: Advanced Visible Infra Red Imaging Spectrometer, <http://aviris.jpl.nasa.gov/>
 AVIS: Airborne Visible-Infrared Spectrometer, <http://www.infofarm.de/doc/virtmesse/gtco.htm>
 BMBF: Bundesministerium für Bildung und Forschung
 CASI 1+2: Compact Airborne Spectrographic Imager, <http://www.casi.ca/>
 CHRIS/Proba: Compact High Resolution Imaging Spectrometer/Project for On-Board Autonomy
 DAIS: Digital Airborne Imaging Spectrometer; <http://www.op.dlr.de/dais/dais-scr.htm>
 DFD: Deutsches Fernerkundungs Datenzentrum
 DFG: Deutsche Forschungsgemeinschaft
 DLR: Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt
 DOM: Digitales Oberflächenmodell
 FE: Fernerkundung
 FFH: Flora Fauna Habitat Richtlinie
 GFZ: Geoforschungszentrum Potsdam
 GTCO: Ground Truth Center Oberbayern
 HRSC: High Resolution Stereo Camera - Airborne; <http://solarsystem.dlr.de/FE/hrsc.shtml>
 HTO: High Tech Offensive Bayern
 HyMAP: Hyperspectral Mapper, Integrated Spectronics, <http://www.intspec.com/>
 IKB: Informationssystem Kleinräumige Bestandesführung
 Ikonos: Space Imaging Cattera, <http://www.spaceimaging.com/>
 KULAP: Kulturlandschaftsprogramm
 MISR: Multiangle Imaging Spectro Radiometer
 MOMS-02: Modularer Optoelektronischer Stereo Scanner 02
 QuickBird: DigitalGlobe; <http://www.digitalglobe.com/>
 RAMSAR: „Übereinkommen für den Schutz von Feuchtgebieten von internationaler Bedeutung“
 ROSIS: Reflective Optics System Imaging Spectrometer, <http://www.op.dlr.de/neoe/fo/rosis/home.html>
 SPOT: Satellite Probatoire de l'Observation de la Terre
 TM/ETM+: Thematic Mapper/Enhanced Thematic Mapper plus

7. Literatur

ANDRESEN, T.; C. MOTT, TH. SCHNEIDER & S. ZIMMERMANN (2004):
AQUATIC: Erfassung und Beurteilung von aquatischen und terrestrischen Feuchtgebieten mit sehr hoch auflösenden FE-Daten; Erfassung und Beurteilung von Seen und deren Einzugsgebiet mit Methoden der Fernerkundung, 11.-12. September 2003 in Laufen

ARZET, K. (2004):
Welche Informationen zur Landnutzung benötigen Behörden und Kommunen zur Erfüllung der Auflagen von Programmen und Richtlinien nationaler und europäischer Art – Bedarf aus wasserwirtschaftlicher und naturschutzfachlicher Sicht; Fachtagung, Erfassung und Beurteilung von Seen und deren Einzugsgebiet mit Methoden der Fernerkundung, 11.-12. September 2003 in Laufen

AUERNHAMMER, H.; M. DEMMEL, F.X. MAIDL, U. SCHMIDHALTER, T. SCHNEIDER & P. WAGNER (1999):
An On-Farm Communication System for Precision Farming with Nitrogen Real-Time Application. ASEA Paper No. 99 11 50, St. Joseph, MI, USA

GERSTL, S. A. W. (1990):
Physics concepts of optical and radar reflectance signatures: A summary review; International Journal of Remote Sensing, Vol. 11:1109-1117.

HEEGE, T. (2004):
Makrophytenkartierung per Fernerkundung; Erfassung und Beurteilung von Seen und deren Einzugsgebiet mit Methoden der Fernerkundung, 11.-12. September 2003 in Laufen

HOFFMANN, F. (2004):
Stofftransport-Modellierung zur Bestimmung der potentiellen Einträge aus dem Wassereinzugsgebiet; Erfassung und Beurteilung von Seen und deren Einzugsgebiet mit Methoden der Fernerkundung, 11.-12. September 2003 in Laufen

KENNEWEG, H.; B. FÖRSTER & M. RUNKEL (1991):
Diagnose und Erfassung von Waldschäden auf der Basis von Spektralsignaturen. BMFT Abschlussbericht Waldschäden, Techn. Univ.Berlin.

KLUG, H. & T. BLASCHKE (2004):
Erfassung und Beurteilung von Wassereinzugsgebieten auf Landschaftsebene; Erfassung und Beurteilung von Seen und deren Einzugsgebiet mit Methoden der Fernerkundung, 11.-12. September 2003 in Laufen

LINSEISEN H.; A. SPANGLER, K. HANK, P. WAGNER, T. STEINMAYR, M. DEMMEL, H. AUERNHAMMER, I. MANAKOS, T. SCHNEIDER & J. LIEBLER (2000):
Daten, Datenströme und Software in einem Informationssystem zur teilflächenspezifischen Pflanzenproduktion (Data, data flow and software in an information system for site-specific plant production), Zeitschrift für Agrar-informatik, 8(2), pp. 36-43, 2000

MANDELBROT, B.B. (1978):
The fractal geometry of trees and other natural phenomena; Geometrical Probability and Biological Structures: Buffon's 100th Anniversary Conference (Paris, 1977): Ed. Roger Miles & Jean Serra (Lecture Notes in Biomathematics, 23), New York: Springer, 235-249.

MOTT, C.; T. ANDRESEN, C. ROGG, TH. SCHNEIDER, S. ZIMMERMANN & U. AMMER (2004):
AQUATIC: Identifizierung und Monitoring von Landnutzungs-/ Landoberflächen-Typen in einem multitemporalen/multisensoralen Ansatz; Erfassung und Beurteilung von Seen und deren Einzugsgebiet mit Methoden der Fernerkundung, 11.-12. September 2003 in Laufen

MOTT, C.; T. ANDRESEN & Th. SCHNEIDER (2002):
Objektorientierte Bildanalyse mit eCognition: Möglichkeiten - Lösungen? - Grenzen!; CGI Nutzertreffen, Iffeldorf, 25/26.02.02

RICHTER, R.; & D. SCHLÄPFER (2002):
„Geo-atmospheric processing of airborne imaging spectrometry data. Part 2: atmospheric/topographic correction“; Int. J. Remote Sensing 23:2631-2649 (2002).

RINTELEN, P. (2004):
Welche Informationen zur Landnutzung benötigen Behörden und Kommunen zur Erfüllung der Auflagen von Programmen und Richtlinien nationaler und europäischer Art – Bedarf aus landwirtschaftlicher Sicht; Fachtagung, Erfassung und Beurteilung von Seen und deren Einzugsgebiet mit Methoden der Fernerkundung, 11.-12. September 2003 in Laufen

SCHAEPMANN, M.(2003):
Michael Schaeppman's Comprehensive List of Imaging Spectrometers; http://www.geo.unizh.ch/~schaepp/research/apex/is_list.html

SCHMIEDER, K. (2004):
Auswirkungen des Extremhochwassers 1999 auf die Ufer-röhrichte des Bodensees; ; Fachtagung, Erfassung und Beurteilung von Seen und deren Einzugsgebiet mit Methoden der Fernerkundung, 11.-12. September 2003 in Laufen

SCHNEIDER, TH. (1995):
Möglichkeiten und Grenzen der spektralen Trennbarkeit ackerbaulicher Oberflächentypen – eine Abschätzung anhand spektroskopischer Untersuchungen über die Vegetationsperiode; Dissertation am Lehrstuhl für Landnutzungsplanung und Naturschutz der LMU München. Schriftenreihe der ZADI, Band 4, ISSN 0947-661X

SCHNEIDER, TH.; I. MANAKOS, P. REINARTZ & R. MÜLLER (1999):
Anisotropy information from MOMS-02/Priroda stereo data sets – an additional physical parameter for land surface characterisation; International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 32, Part 7-4-3 W6, Valladolid, Spain, 3-4 June

SCHNEIDER, Th & I. MANAKOS (2000):
Anisotropie der Rückstrahlung – Störfaktor oder Informationsquelle? Erörterung anhand des Beispiels „precision farming“; Berichte der Ges. für Informatik in Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft, Band 13; GIL Tagung, S187-190, ISBN3-932987-02-0

SCHNEIDER, Th.; A. BUCK, R. DE KOK & I. MANAKOS (2000):
Objektorientierte Bildanalyse – Paradigmenwechsel in der thematischen Bearbeitung von Erdbeobachtungsdaten?; Festschrift zur Emeritierung von Prof. U. Ammer, Verlag Wissenschaft & Technik Berlin, ISBN 3-89685-564-6

SCHNEIDER, TH. & I. MANAKOS (2003):
BRDF Approximation of maize and canopy parameter retrieval by ProSail inversion; Procc. of the 3rd EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, Oberpfaffenhofen, May 13-16

ZADEH, L.A. (1983):
The role of fuzzy logic in the management of uncertainty in expert systems; Fuzzy Sets and Systems 11, 199-227, 1983.

Anschrift der Verfasser:

Thomas Schneider und Stefan Zimmermann
Limnologische Station der TUM
Hofmark 3
82393 Iffeldorf
e-mail: Tomi.Schneider@lrz.tum.de

Förderaspekte im Erdbeobachtungsprogramm des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR)

Bernd VENNEMANN

1. Erdbeobachtung – Zielsetzung

- Erschließung des Nutzungspotentials der satellitengestützten Erderkundung für Staat, Wissenschaft und Wirtschaft.
- Förderung des Aufbaus privatwirtschaftlicher Systeme für neue Märkte und Geodatendienste, z. B. bei der Kartierung, für die Land- und Forstwirtschaft, Rohstoffsuche, Bauplanung und dual-use.
- Im Bereich wissenschaftlicher Erderkundungsmissionen: Beiträge zu Atmosphären- und Klimaforschung, Geowissenschaften, Nutzung von optischen und Radardaten für Land- und ozeanographische Anwendungen.
- Öffentliche Aufgaben: Entwicklung der nächsten Generation von Systemen für
 - Wetterbeobachtung
 - Umweltmonitoring z. B. für die Überprüfung von internationalen Konventionen, raumgestützte Aufklärung, Katastrophenvorbeugung und humanitäre Hilfe.

2. Erdbeobachtung – Programmschwerpunkte

Im nationalen Programm:

- Pilot- und Demonstrationsprojekte zur Vorbereitung der routinemäßigen Nutzung neuer Anwendungen
- Durchführung wissenschaftlicher Missionen
- Leitprojekte zur Unterstützung der Entwicklung von privatwirtschaftlichen Satellitensystemen
- Instrumentenentwicklungen

Im ESA Programm:

- Beteiligung an den Missionen ERS, Envisat und dem neuen Erdbeobachtungsprogramm „Living Planet“ mit den Programmelementen:
 - Earth Explorer Core und Opportunity Missionen
 - Nutzungsvorbereitung/Marktentwicklung (DUE, EOMD)
 - Earth Watch Missionen (incl. ESA GMES Service Element)

Im DLR FuE Programm:

- Entwicklung von Fernerkennungsverfahren und -systemen
- Entwicklung und Durchführung von Fernerkundungsmissionen
- Bodensegmente und Datenauswertung

3. Nutzungsvorbereitung

Programmatisches Ziel: Demonstration vollständiger End-to-end-Ketten vom Sensormesswert bis zum Informationsprodukt

Deshalb Ausrichtung des Förderprogramms „Nutzungsvorbereitung“ im wesentlichen

- auf nationale Leitprojekte (TerraSAR, RapidEye) zur Unterstützung der Serviceentwicklungen in Industrie und Wissenschaft bzw. Informationserstellung für öffentliche Einrichtungen
- Cal/Val nationaler Sensoren
- verstärkte Kooperation mit Modellierern (andere Förderprogramme) zur Entwicklung integrierter Produkte
- Automatisierung der Informationsextraktion

dabei stärkere Verzahnung (nicht Abgrenzung) mit anderen PTs und DFG, sowie den Nutzungsprogrammen ESA-GMES, Data User Elements (DUE), Earth Observation Market Development (EOMD) sowie EU-PR6

4. PROSMART I, II (DLR)

- Vorbereitung der routinemäßigen Nutzung von Terra SAR-X Daten durch Demonstration von industriegetragenen Services in Zusammenarbeit mit Innovationspartnern auf der Basis von Anforderungen von Referenzkunden
- Operationalisierung der Prozessierungskette (Integration innovativer Anwendungstechnologien)
- Demonstrationsbeispiele in Ergebniskatalog zusammengestellt
- Industrie derzeit in Phase II Ext.

5. ESA-GMES Projekte unter deutscher Führung

- SAGE – Service für Advanced Geo-Information on Environmental Pressure and State Prime Contractor Infoterra GmbH,
Kontakt: Dr. S. Kuntz
 - Aqua-Sage
Risiko von Wasserverschmutzung und Wassermangel
 - Soil-SAGE Bodenversiegelung
- Forest Services Consortium-ForestServe
Prime Contractor GAF AG,
Kontakt: Dr. T. Häusler
- Waldflächenkarte und andere Landnutzungen sowie deren Änderungen, Entwaldung und (Wieder-) Aufforstung, Waldaufbau, Biomasse, Wald-Umwelt-Indikatoren

6. EU-GMES Projekte unter deutscher Führung

Geoland-GMES products & services, integrating EO monitoring capacities to support the implementation of European directives and policies related to „land cover and vegetation“

- Prime Contractor Infoterra GmbH,
Kontakt: A. Kaptein
- Kern-Service: Allgemeine Landbedeckung mit Arbeitsbereichen
 - Boden und Wasser
 - Naturschutz
 - Raumplanung



Anschrift des Verfassers.

Dr. Bernd Vennemann
DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Programmdirektion „Raumfahrt“
Königswinterer Str. 522-524
53227 Bonn
Bernd.Vennemann@DLR.de

Einsatz von Fernerkundung im Rahmen aktueller Forschungsprojekte zur Gewässerökologie an der Universität Hohenheim

Klaus SCHMIEDER und Annette WOITHON

1. Einleitung

Die Uferzonen von Seen zählen als Schnittstellen zwischen Wasser und Land zu den Lebensräumen höchster Biodiversität, deren Störung bzw. Zerstörung gravierende Auswirkungen auch auf die benachbarten Ökosysteme hat. Viele Verlandungsbereiche stehender Gewässer sind nach der FFH-Richtlinie der EU als Natura 2000-Gebiete ausgewiesen. In Baden-Württemberg liegen ein Großteil der Natura 2000-Flächen in Feuchtgebieten oder angrenzend an Stillgewässer, hierbei nehmen die naturnahen **Uferbereiche des Bodensees** einen großen Flächenanteil ein (OSTENDORP et al. 2003).

Das Institut für Landschafts- und Pflanzenökologie der Universität Hohenheim (Stuttgart) erforscht und beobachtet bereits seit Beginn der 90er Jahre die ökologischen Zusammenhänge und Zustände der Vegetation in der Flachwasserzone des Bodensees. Neben den Felduntersuchungen spielte dabei immer auch die Auswertung von Fernerkundungsdaten eine entscheidende Rolle. So wurden u. a. für das Jahr 1993 die submersen Makrophyten auf Basis von Echtfarben-Luftbildern für den gesamten Bodensee flächendeckend kartiert (SCHMIEDER 1998), von 1999 bis 2002 erfolgte ein Monitoring der Röhrichtentwicklung nach einem Hochwasserereignis auf Basis von Colorinfrarot(CIR)-Luftbildern (SCHMIEDER et al. 2002).

Bedingt durch die wasserrechtlichen Anforderungen der EU-Wasserrahmenrichtlinie gewinnt neben dem Einzugsgebietsmanagement auch die gezielte Überwachung der empfindlichen Seeuferbereiche an Bedeutung. Hierfür werden zeitsparende und automatisierte Verfahrensabläufe benötigt, die nur unter Verwendung von volldigitalen, flächendeckenden und kalibrierbaren Fernerkundungsdaten entwickelt werden können. Diesem Handlungsbedarf wird in einem aktuellen Projekt mit dem Kurztitel EFPLUS Rechnung getragen. Unter der ausführlichen Projektbezeichnung „Entwicklung von automatisierten Fernerkundungsverfahren zur effektiven Unterstützung von Planungsprozessen in der Uferzone von Seen“ werden am Institut für Landschafts- und Pflanzenökologie der Universität Hohenheim und am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR, Oberpfaffenhofen) auf Basis von Multi- und Hyperspektralscannerdaten kostengünstige und automatisierte Instrumente für die zukünftige Erfassung und Bewertung des Zustandes von Seeuferzonen entwickelt.

Im folgenden werden die Methoden und Ergebnisse des Projekts „Auswirkungen des Extremhochwassers 1999 auf die Flächendynamik und Bestandsstruktur der Uferöhrichte des Bodensees“ dargestellt. Zudem wird auf die weitere Auswertung dieser Fernerkundungsdaten zur Schilfvegetation im Rahmen des Folgeprojekts EFPLUS eingegangen.

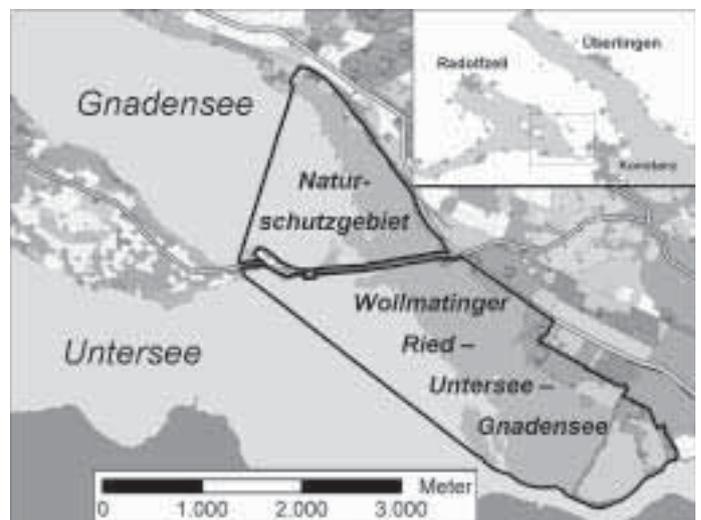


Abbildung 1
Lage des Naturschutzgebietes Wollmatinger Ried - Untersee - Gnadensee

2. Untersuchungsgebiet

Alle Fernerkundungsdaten, die im Rahmen der hier beschriebenen Projekte verwendet wurden, wurden am baden-württembergischen Bodenseeufer erhoben. Der Bodensee ist in den Obersee und den wesentlich flacheren und kleineren Untersee aufgeteilt und weist als einziger nicht-staugeregelter Alpensee ein natürliches Wasserstandsregime mit einem Maximum im Juni und einem Minimum im Spätwinter auf. Auf Grund dieser Wasserstandsdynamik und der beträchtlichen Größe sind in der Uferzone des Bodensees vielfältige Lebensräume ausgebildet, die bedeutende Natura 2000-Gebiete darstellen. Insgesamt sind am Bodenseeufer Naturschutzgebiete mit einer Gesamtfläche von 53,64 km² ausgewiesen, die europaweit zu den wichtigsten Brut-, Mauser- und Überwinterungsreviere für Zugvögel zählen (OSTENDORP et al. 2003).

Im folgenden werden beispielhaft aus den Fernerkundungsprojekten ausgewählte Ergebnisse vorgestellt, die u. a. im Gebiet des Naturschutzgebietes Wollmatinger Ried-Untersee-Gnadensee am baden-württembergischen Bodenseeufer liegen. Dieses bedeutende FFH-Gebiet mit ausgedehnten Röhrichtflächen erstreckt sich auf einer Fläche von insgesamt 757 ha vom Ufer des Seerheins westlich von Konstanz über den Reichenauer Damm bis hin zum östlichen Gnadensee bei Allensbach-Hegne (vgl. Abb. 1).

3. Methoden

3.1 Datenerhebung über Fernerkundung

Die Datenerhebung im Schilfprojekt erfolgte durch photogrammetrische Auswertung von CIR-Luftbildern, die im Maßstab 1:5000 vorlagen. Die Luftbilder wurden während des Monitoringzeitraums von 2000 bis 2002 jeweils kurz vor dem Austrieb der Schilfrispen Ende Juli aufgenommen. Zusätzlich zu diesen Projektbefliegungen konnten für einige Teilflächen auch panchromatische bzw. Echtfarben-Luftbilder aus den Jahren 1962, 1967 und 1978 in die Analysen miteinbezogen werden. Zudem lagen als Vergleich zu dem Zustand vor dem Extremhochwasser Luftbilder vor, die 1993 sowie während der Hochwasserphase 1999 aufgenommen wurden.

Die stereoskopischen Auswertungen wurden an einem Planicom P33 (Zeiss Oberkochen) durchgeführt, die Digitalisierung erfolgte mit dem Programm MicroStation (Bentley Systems, USA), die Flächenanalyse und quantitative Auswertung unter Verwendung der Geographischen Informationssysteme (GIS) ArcInfo, ArcView 3.2 und ArcGIS 8.2 (ESRI, Kranzberg).

Für die Flächenbilanzierung wurden aus den Luftbildern der Jahre 1993, 1999 und 2000 die Bestandsgrenzen der aquatischen Röhrichte digitalisiert, ebenso in ausgewählten Gebieten für die Jahre 1961, 1967 und 1978. Neben der quantitativen Bilanzierung der Röhrichtflächen war die Zuordnung von Schädigungskategorien ein weiterer Schwerpunkt des Pro-

jekts. Aus den Luftbildserien 2000 und 2002 wurden 5 verschiedene Schädigungsgrade des aquatischen Röhrichts abgegrenzt und digitalisiert (vgl. Tab. 1). Die Kontinuität in der Beurteilung der verschiedenen Schädigungsgrade wurde durch regelmäßige Überprüfung von Referenzflächen und Interpretation durch ausschließlich einen Bearbeiter gewährleistet.

Zusätzlich zu diesen digitalen Geometriedaten wurden Geländedaten zu Bestandsstruktur, Halmmorphologie und zu Reservestoffgehalten in Abhängigkeit vom jeweiligen Schädigungsgrad erhoben. Beide Datenerhebungen wurden aufeinander abgestimmt, so dass flächenscharfe Aussagen zur Bestandsstruktur der Schädigungsgrade, zu Bestandsbiomasse und aktiver Oberfläche (Biofilm) gemacht werden konnten.

Für 2002 wurden neben den CIR-Luftbildern auch Scannerdaten mit dem flugzeuggetragenen Multispektralsensor DAEDALUS AADS1268 von ausgewählten Röhrichtbereichen aufgenommen. Diese Daten wurden vom DLR kalibriert, maskiert und georeferenziert (HEEGE et al. 2003). Mittels Trainingsflächen wurde die Schilfvitalität in drei Kategorien bei einer Auflösung von 1 x 1 m klassifiziert. Diese automatisierten Klassifikationsergebnisse wurden mit den Ergebnissen der manuellen Interpretation durch räumliche Überlagerung im GIS evaluiert.

3.2 Quantifizierung und räumliche Analyse der Veränderung der Schilfbestände

Über GIS-basierte Auswertungen wurden die Flächen der Bestandsverluste infolge des Extremhochwassers 1999 sowie die Erholung der Bestände bis 2002 ermittelt. Zudem wurde die räumliche Abhängigkeit des Schilfrückgangs und der Schädigungskategorien in Bezug auf Sohlniveau und Uferverbauung überprüft. Hierfür wurde ein in 20 cm Höhenstufen unterteiltes digitales Bodenseetiefenmodell (BRAUN & SCHÄRPF 1994) und Daten der strukturellen Uferbelastung (TEIBER 2001) verwendet. Außerdem wurde unter Verwendung der Felddaten die Veränderung der Gesamtbiomasse der Schilfröhrichte am baden-württembergischen Seeufer für den Monitoringzeitraum 2000-2002 berechnet. Dabei wurde die mittlere Bestandsbiomasse der verschiedenen Schädigungsgrade mit dem Flächenanteil des entsprechenden Schädigungsgrades eines Kartierungsjahres multipliziert und aufsummiert.

Zusätzlich konnte über Verschneidung der Flächengeometrien der Schädigungsgrade eines Jahrgangs mit dem digitalen Höhenmodell die potentiell durch Aufwuchs besiedelbare Stängeloberfläche (Biofilm) abgeschätzt werden. Die Quantifizierung des submersen Stängelabschnittes (H) erfolgte auf Basis einer Gitterzellen-Auflösung von 5 x 5 m und unter Annahme des mittleren Mittelwassers. Mit dem mittleren Stängeldurchmesser ($D = 2r$, gemittelt über alle Halmklassen) eines Schädigungsgrades wurde die mittlere submerse Stängeloberfläche (O) des jeweiligen Schädigungsgrades nach der Formel $[O = 2 \pi r H]$

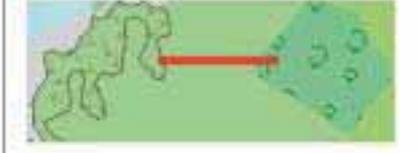
Tabelle 1

Kartierschlüssel zur Differenzierung der Schädigungsgrade in den Seeferröhrichten des Bodensees anhand von CIR-Luftbildern (SCHMIEDER et al. 2002)

Schadklasse	Struktur	Seeseitiger Röhrichttrand	Beispiel
G 1 ungeschädigt	dichte, homogene Bestände	Rand scharf, wenig ausgefranst	
G 2 schwach geschädigt	weitgehend homogene Bestände mit vereinzelten Auflichtungen oder Lücken	geringe Randauflockerung	
G 3 deutlich geschädigt	inhomogene Bestände mit deutlichen Lücken	streckenweise mit deutlich sichtbarer Randauflösung	
G 4 stark geschädigt	Einzelhalm Auflösung oder Auflösung in Horste bzw. Halmgruppen; Stoppelanteile dominieren	starke Randauflösung	
G 5 extrem geschädigt	Halmdichte sehr gering; sehr hoher Stoppelanteil	randlich sehr stark aufgelöste Bestände mit nicht mehr klar identifizierbarer Bestandsgrenze	

Tabelle 2

Quantifizierung der Habitatparameter für Brutreviere des Drosselrohrsängers unter Verwendung räumlicher Strukturmaße (vgl. WOITHON & SCHMIEDER 2004)

Habitatparameter	Räumliche Quantifizierung	Beispiel
Buchtenreicher Schilfrand	Quantifizierung des Flächen-Randlinien-Verhältnisses basierend auf dem eines Kreises $SI = \frac{P}{2\sqrt{\pi} \cdot a}$	
Lockerer, vitaler Schilfbestand	Reklassifizierung der Schädigungsklassen zu einem Vitalitätsindex	
Nutzung von Gehölzbeständen als Nahrungsgebiet	Verhältnis aus der Fläche der Gehölzstruktur und der euklidische Distanz zum nächstliegenden Röhrichtpatch $DI = \frac{a_w}{d^2}$	
Vermeidung von Neststandorten, die durch Wind- und Wellenexposition gefährdet sind	Quantifizierung der horizontalen Flächenausrichtung eines Röhrichtpatches in Abhängigkeit von der Hauptwindrichtung SW $EI = \sin(\alpha_d)$	

bestimmt. Multipliziert mit der mittleren Halmzahl pro m² und der Fläche eines Bestands mit einem bestimmtem Schädigungsgrad auf den entsprechenden

Sohnniveaus ergab sich der Biofilmmflächenanteil dieses Schädigungsgrades und aufsummiert über alle Schädigungsgrade die gesamte Biofilmmfläche des

aquatischen Röhrichts am baden-württembergischen Ufer des Bodensees. Der Biofilm auf der Sediment- und Schilfstreuoberfläche wurde dabei nicht berücksichtigt.

3.3 Quantifizierung von Schilfstrukturen

Schäden und Bestandsausfälle der Schilfvegetation haben stets Auswirkungen auf das gesamte Uferökosystem. Die Beurteilung solcher ökosystemaren Veränderungen ist möglich, indem man einzelne Funktionsbereiche des Röhrichtgürtels untersucht. Im Rahmen des Projekts EFPLUS wurde die Eignung der Schilfflächen als Bruthabitat für den Drosselrohrsänger (*Acrocephalus arundinaceus* L.) untersucht (WOITHON & SCHMIEDER 2004). Hierfür wurden die digitalen Geometriedaten der Luftbilddatenauswertung verwendet und nach strukturellen und raumbezogenen Gesichtspunkten quantifiziert. Über explizit räumliche Strukturmaße, sog. landscape metrics (MCGARIGAL & MARKS 1994; BLASCHKE 2000), wurde das Potenzial der Schilfflächen als Niststandorte analysiert und ein Bruthabitatmodell für das Naturschutzgebiet Wollmatinger Ried-Untersee-Gnadensee erstellt.

Da der Drosselrohrsänger ausschließlich im aquatischen Schilf ab einem Wasserstand von 50 cm brütet, konnte durch Überlagerung der Schilfflächen mit einer entsprechenden Sohlneivemaske das potenzielle Bruthabitat ermittelt werden. Für die Berechnung der Habitateignung dieser Flächen wurden anschließend die Habitatfaktoren buchtenreicher Schilfrand, vitaler Schilfbestand, Entfernung zu Gehölzstrukturen und Vermeidung von Wind- und Wellenexposition über Strukturindikatoren quantifiziert und zu einem Habitateignungsindex zusammengefasst (Tab. 2).

4. Ergebnisse

4.1 Bestandsanalyse

Die Digitalisierung der wasserseitigen Röhrichtgrenzen aus den Luftbildserien 1993, 1999 und 2000 ergab, dass 24,4% (30,3 ha) des im Jahre 1998 noch 124 ha großen Bestands abgestorben sind. Rechnet man diesen Rückgang auf die 44 km lange Schilffuferstrecke um, so entspricht dies einer Regression der seeseitigen Schilffront um 6,9 m. Relativ gering war die Regression im Bereich von Flussmündungen.

In renaturierten Uferbereichen konnten sich die aquatischen Röhrichte vor dem Hochwasser von 1993 bis 1998 stark vermehren. Die Verluste durch das Extremhochwasser waren im Vergleich zu übrigen Gebieten deutlich geringer. Allerdings liegen diese Schilfbestände wegen des bei der Renaturierung erhöhten Sohlneivaus fast ausschließlich oberhalb der Mittelwasserlinie (MMW = 395,27 müNN = 337 cm Pegel Konstanz), so dass sie nicht mit den ‚natürlichen‘ Röhrichtern vergleichbar sind, die bis 50 cm unterhalb der MMW-Linie vorkommen. Sie wurden dadurch später überflutet, auch waren sie hierdurch in einer späteren Wachstumsphase betroffen, und die Überflutung hielt nicht so lange an wie in den tiefer gelegeneren Gebieten.

4.2 Schilfschädigung

Die Digitalisierungsergebnisse der Schädigungsgrade aus der Luftbildserie zeigten ein heterogenes Schadbild. 27% der Röhrichtflächen von 1998 des flachen Untersees wiesen eine starke bis extreme Schädigung (G4, G5) infolge des Extremhochwassers auf, weitere 27% zeigten deutliche Schäden (G3), während 46% nur leicht oder gar nicht geschädigt waren. Im Obersee waren die stark bis deutlich Flächenanteile wesentlich größer als im Untersee. Hier wiesen insgesamt nahezu 70% der aquatischen Röhrichtflächen größere Schäden auf.

Zwischen dem Ausmaß der Schilfschädigung und dem Sohlniveau besteht ein klarer Zusammenhang. Abbildung 3 verdeutlicht, dass stark bis extrem geschädigte Bestände vor allem in seeseitigen tiefliegenden Bereichen zu finden sind. Dies lässt den Schluss zu, dass das Extremhochwasser als primäre Ursache für den Schilfrückgang gesehen werden kann. Auch der Vergleich der Luftbildserien aus den Jahren 1961 und 1967 konnte einen deutlichen Flächenverlust als Folge des Hochwassers im Jahre 1965 nachweisen (SCHMIEDER et al. 2003).

Im Laufe des Projektzeitraums von 2000 bis 2002 konnten Erholungstendenzen nachgewiesen werden. Starke Schädigungsgrade sind zugunsten nicht oder nur schwach geschädigter Flächen zurückgegangen, während Röhrichtbestände, die nach dem Hochwasser als „extrem geschädigt“ erfasst wurden, vollständig abgestorben sind und von außen neu besiedelt werden müssen. Schilfbestände, die durch Treibgutanschwemmung geschädigt wurden, konnten sich wieder regenerieren. Untersuchte Flächen vor und neben Uferverbauungen zeigten wesentlich stärkere Schilfschäden. Da in diesen Bereichen das höher liegende, landseitige Röhricht fehlt, besteht bei starken Schäden die Gefahr, dass die vorhandenen Restflächen völlig absterben und eine Wiederbesiedlung der Flächen nicht mehr möglich ist.

Die Entwicklung der Röhrichte am baden-württembergischen Bodenseeufer zeigte einen starken Zusammenhang mit den hydrologischen Variationen. Vor allem in Perioden mit mehreren Niedrigwasserjahren in Folge, wie Ende der 1980er und in den Jahren 1996-1998 konnten sich die Schilfröhrichte stärker seewärts ausbreiten. Mehrere Frühjahrshochwasser in Folge führten unabhängig vom Jahresmaximum zu nachhaltigen Schäden vor allem der tiefgelegenen Röhrichtbestände.

4.3 Auswirkungen auf das Ökosystem

Vergleicht man die Veränderungen der Bestandsbiomasse im Zeitraum von 1998 bis 2002 mit den Ergebnissen der Bestandsflächen, so sind die Auswirkungen des Extremhochwassers hinsichtlich der Bestandsbiomasse deutlich gravierender. Während die Flächenverluste bei 24% lagen, gingen im Zeitraum von 1998 bis 2000 durch das Extremhochwasser 44% der Bestandsbiomasse verloren. Die Biofilmmfläche verringerte sich um 47%, die Regeneration und da-

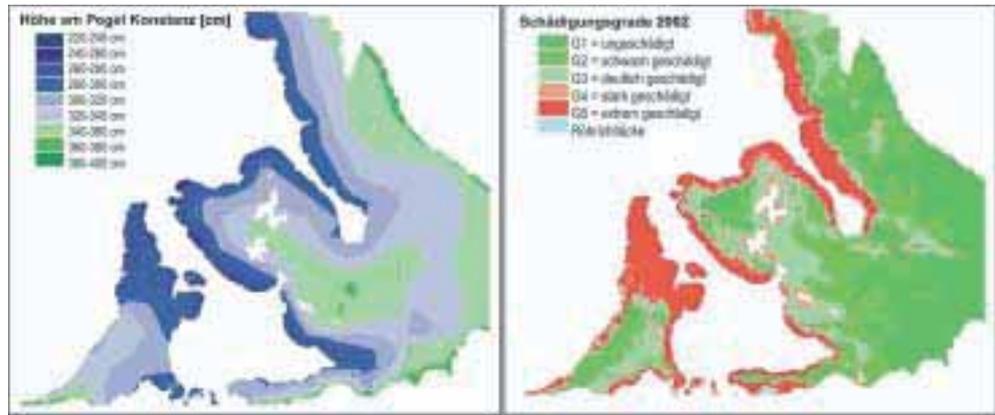


Abbildung 2
 Vergleich des Höhenmodells mit den Schädigungsgraden im Nordteil des NSG „Wollmatinger Ried-Untersee-Gnadensee“

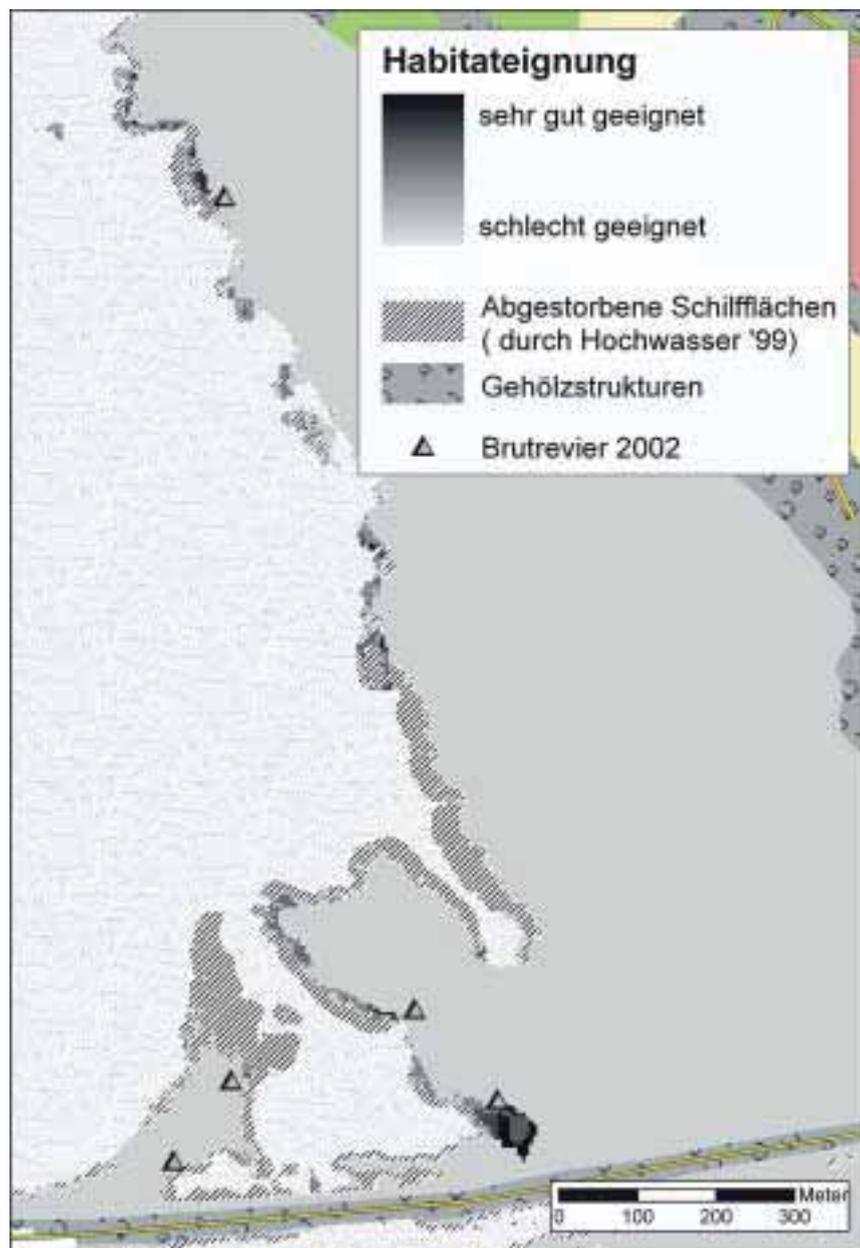


Abbildung 3
 Habitateignungskarte für Brutreviere des Drosselrohrsängers (*Acrocephalus arundinaceus*) für das Jahr 2002 im Nordteil des NSG „Wollmatinger Ried-Untersee-Gnadensee“

mit die Erholung der Ökosystemfunktion erfolgte deutlich langsamer als bei der Bestandsbiomasse. Dies spiegelt die realen Verhältnisse der Bestandsstruktur wider, nach denen sich die Erholung vor allem in den Beständen auf hohem Sohlniveau abspielte, während tieferliegende Bestände, die für die Bereitstellung der Oberfläche für Aufwuchsalgen und Bakterien maßgebend sind, nur wenig Erholungstendenzen zeigten.

Das Absterben der Röhrichtflächen auf niedrigem Sohlniveau hatte u. a. Konsequenzen für bestimmte schilfbrütende Vogelarten. Durch das Extremhochwasser 1999 gingen beispielsweise ca. 70% der potentiellen Bruthabitatfläche des Drosselrohrsängers im Nordteil des Naturschutzgebietes Wollmatinger Ried verloren (WOITHON & SCHMIEDER 2004). Aus Abbildung 3 ist außerdem ersichtlich, dass die verbliebenen über das Bruthabitatmodell als geeignet klassifizierten Habitate im Jahr 2002 lediglich teilweise besetzt waren. Dies ist ein Hinweis auf einen Rückgang der Population infolge des Extremhochwassers, was durch Kartierungen der Brutreviere bestätigt wird (unveröff. Daten Naturschutzzentrum Wollmatinger Ried). Die im vorliegenden Fall über manuelle Luftbildinterpretation gewonnene Datenbasis für die Modellierung der Habitatqualität des Drosselrohrsängers wird innerhalb des Projektes auf die Basis automatisiert klassifizierter Multispektralscannerdaten umgestellt werden. Der Vergleich der Ergebnisse ermöglicht die Validation der automatisiert gewonnenen Fernerkundungsprodukte.

5. Diskussion

Bei der Beurteilung des Vegetationszustandes leisten fernerkundliche Methoden einen wesentlichen Beitrag zur Visualisierung hinsichtlich Maßnahmenplanung und Berichterstattung. Gerade der Rückgang von Uferföhrichten war in den letzten Jahrzehnten eine wichtige Thematik in limnologischen Forschungsprojekten (BRIX 1999). Neben der detaillierten Bestandserfassung stellt die Möglichkeit des historischen Vergleichs einen wichtigen Gesichtspunkt zur Anwendung von Luftbildern im Uferzonenmanagement dar. Die photogrammetrischen Auswertungen innerhalb des hier vorgestellten Projektes über mehrere Jahrzehnte haben gezeigt, dass die natürlichen Wasserstandsschwankungen des Bodensees der primäre Faktor für die Röhrichtdynamik sind. Der Rückgang und die seewärtige Ausbreitung von aquatischen Schilfröhrichten sind natürliche Vorgänge, die einer zeitlichen Schwankungsbreite von mehreren Jahrzehnten unterliegen. Managementmaßnahmen sollten daher auf diesen Zeithorizont abgestimmt sein.

Die am Bodensee lokal sehr unterschiedlichen Schadbilder nach dem Extremhochwasser von 1999 lassen vermuten, dass am Ausmaß der Schädigung weitere Faktoren beteiligt sind, die über Luftbildanalysen nur bedingt erfasst werden können. Um Schädigungen

durch Vogelfraß, Parasitenbefall oder sedimentchemische Bedingungen erkennen zu können, sind gezielte Felduntersuchungen notwendig.

Zur Kartierung und Zustandsbeschreibung von emergenten Makrophyten werden häufig stereoskopische Luftbildauswertungen in Kombination mit Vor-Ort-Begehungen vorgenommen. Solche Auswertungen sind mit einem hohen personellen, zeitlichen und finanziellen Aufwand verbunden. Die Fülle der wasserwirtschaftlichen Überwachungs-, Planungs- und Entwicklungsaufgaben erfordert jedoch für eine kostengünstige und schnelle Bereitstellung der Datengrundlage automatisierte Datenerfassungs- und -verarbeitungsverfahren.

Prinzipiell sind automatisierbare Verfahren nicht mit photogrammetrischen Methoden möglich, da nicht alle notwendigen Zusatzinformationen bei der analogen Aufnahme abgespeichert sind. Mit Aufnahmen moderner, entsprechend ausgerüsteter multispektraler Sensoren sind automatisch digitale Informationen für die räumliche Zuordnung und Klassifizierung der Bildpunkte vorhanden. In aktuellen Voruntersuchungen zur Implementation von Verfahren zur Berechnung der Reflexionseigenschaften der litoralen Oberflächen aus multispektralen Fernerkundungsaufnahmen sind bereits erfolversprechende Ergebnisse erzielt worden. So konnte in neuester Zeit bereits großflächig die Ausdehnung und Dichte von Schilfbeständen als auch die Kartierung von submersen Oberflächen aus multispektralen Fernerkundungsdaten berechnet werden (BÖCKER et al. 2003; HEEGE et al. 2003).

Im Rahmen des Projekts EFPLUS werden Methoden für eine flächendeckende Erfassung und Bewertung von Seeuferzonen auf Basis von Vegetationsparametern erarbeitet. Unter Verwendung von multi- oder hyperspektraler Daten werden operationell einsetzbare Verfahren entwickelt und hochaufgelöste Daten bereitgestellt (HEEGE et al. 2003). Diese Daten fließen in ein zu entwickelndes Planungsinstrument für die Wasserwirtschaft ein, das eine einfache und schnelle Beurteilung des ökologischen Zustandes der Uferzone hinsichtlich einzelner Kriterien ermöglicht. Aus den Fernerkundungsdaten werden bioindikativ interpretierbare bzw. planungsrelevante Informationen abgeleitet, welche über den Zustand des Lebensraumes Aufschluss geben. Das Kriterium der Habitateignung für Vögel und Fische ist hierbei ein wichtiger Gesichtspunkt bei Planung und Umsetzung von Schutzmaßnahmen. Die Ergebnisse einer Bruthabitatmodellierung für den röhrichtbrütenden Drosselrohrsänger zeigen das Potential des avifaunistischen Bewertungsindikators in der naturschutzfachlichen Planungspraxis auf. Der Drosselrohrsänger kann auf Grund seiner engen ökologischen Einnischung während der Brutzeit als Leitart für die ökologische Funktionsfähigkeit aquatischer Röhrichte angesehen werden. Er steht stellvertretend nicht nur für die Habitateignung des Schilfs als Mauserplätze

für Wasservögel, sondern auch für ökologische Funktionen wie z. B. Erosionsschutz oder den sog. Selbstreinigungseffekt des Gewässers (SCHMIEDER et al. 2002). Die Ableitung von Bioindikationswerten aus hochauflösenden Fernerkundungsdaten ist eine wichtige Voraussetzung für die Aussage über den Zustand der Uferbiozönose, die nach den Maßgaben der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie gefordert werden.

Da die Modellbildung auf Basis der Fernerkundungsdaten über quantitativ erfassbare Strukturmaße erfolgte, ist eine Übertragung und Automatisierung der Monitoring- und Entscheidungsprozesse innerhalb eines GIS-basierten Informationssystems umsetzbar. Die anhand von hochauflösenden, flugzeuggetragenen Sensoren erarbeiteten Prozessierungsketten sind auch für Daten von satellitengetragenen Sensoren geeignet, so dass das Projekt der Vorbereitung zukünftiger operationeller Anwendung von hochauflösenden, multi-spektralen Satellitendaten im Gewässerschutz dient.

6. Danksagung

Die Untersuchungen wurden durch den Projektträger BW-Plus des Landes Baden-Württemberg beim Forschungszentrum Karlsruhe finanziell gefördert. Wir bedanken uns auch bei den Gewässerdirektionen in Rottweil und Ravensburg, beim Institut für Seenforschung in Langenargen und bei der Internationalen Gewässerschutzkommission für den Bodensee für ihre Unterstützung.

7. Literatur

- BLASCHKE, T. (2000):
Landscape metrics: Konzepte eines jungen Ansatzes der Landschaftsökologie im Naturschutz. *Archiv für Naturschutz & Landschaftsforschung* 9: 267-299.
- BÖCKER, R.; K. SCHMIEDER & A. WOITHON (2003):
Entwicklung von automatisierten Fernerkundungsverfahren zur effektiven Unterstützung von Planungsprozessen in der Uferzone von Seen (Teil A). Förderkennzeichen BWC 21010. Zwischenbericht anlässlich des Statusseminar des BWPLUS am 11./12.03.2003, Forschungszentrum Karlsruhe. <http://bwplus.fzk.de/berichte/ZBer/2003/ZBerbw-21010.pdf>.
- BRAUN, E. & K. SCHÄRPF (1994):
Internationale Bodensee-Tiefenvermessung 1990. Stuttgart. 98 S.
- BRIX, H. (1999):
The european research project on reed die-back and progression (EUREED). *Limnologica* 29: 5-10.

HEEGE, T.; C. HÄSE, A. BOGNER & N. PINNEL (2003):
Airborne Multi-spectral Sensing in Shallow and Deep Waters. *Backscatter – Observing Aquatic Environments* 14: 17-19.

MCGARIGAL, K. & B. J. MARKS (1994):
FRAGSTATS. Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. Version 2.0. 67 S.

OSTENDORP, W.; N. WALZ & R. BRÜGGEMANN (2003):
Grenzüberschreitender Seeuferschutz im Spannungsfeld von Nutzungsinteressen am Beispiel Bodensee (Teil 1). *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung. Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie* 15(2).

SCHMIEDER, K. (1998):
Submerse Makrophyten der Litoralzone des Bodensees 1993 im Vergleich mit 1978 und 1967. *Berichte der Internationalen Gewässerschutzkommission Bodensee*. 46. 171 S.

SCHMIEDER, K.; M. DIENST & W. OSTENDORP (2002):
Auswirkungen des Extremhochwassers 1999 auf die Flächendynamik und Bestandsstruktur der Uferföhrichte des Bodensees. *Limnologica* 32: 131-146.

SCHMIEDER, K.; M. DIENST & W. OSTENDORP (2003):
Einfluss des Wasserstandsganges auf die Entwicklung der Uferföhrichte an ausgewählten Uferabschnitten des westlichen Bodensees in den vergangenen 40 Jahren. *Schr. Ver. Gesch. Bodensee* 121: 143-165.

TEIBER, P. (2001):
Zustandsbeschreibung des Bodensees – digitaler Datensatz. *Internationale Bodenseekonferenz/Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg/Regio Bodensee*.

WOITHON, A. & K. SCHMIEDER (2004):
Bruthabitatmodellierung für den Drosselrohrsänger (*Acrocephalus arundinaceus L.*) als Bestandteil eines integrativen Managementsystems für Seeufer. *Limnologica* (eingereicht).

Anschrift der Verfasser:

Anette Woithon und Klaus Schmieder
Universität Hohenheim
Institut für Landschafts- und Pflanzenökologie (320)
Ökologiezentrum 2
August-von-Hartmann-Str. 3
70593 Stuttgart
E-Mail: awoithon@uni-hohenheim.de

AQUATIC: Erfassung und Beurteilung von aquatischen und terrestrischen Feuchtgebieten mit sehr hoch auflösenden FE-Daten

Thorsten ANDRESEN, Claudius MOTT, Thomas SCHNEIDER, Caroline ROGG, Arnulf MELZER

Kurzfassung

Diese Untersuchung befasst sich mit der Anwendung objektiver Bildanalyseverfahren. Ziel ist die Entwicklung übertragbarer und damit objektiv vergleichbarer Klassifikationen auf der Basis sehr hoch aufgelöster Fernerkundungsdaten.

Die Landoberfläche wird mit einer Kombination aus Satellitenbilddaten, im Bereich von 4 bis 1 Meter und Luftbildern mit einer Auflösung von bis zu 40 cm beobachtet. In diesem Maßstabsbereich (1:2 500 bis 1:10 000) können bereits naturschutzfachlich bedeutsame Objekte automatisiert klassifiziert werden.

Im Uferbereich des Starnberger Sees und der südlich anschließenden Osterseen werden mit dieser Methode zielgerichtet Feuchtgebiete, die weitere Landbedeckung, wie z. B. Grünland sowie Makrophyten innerhalb der Wasserfläche analysiert. Insbesondere die Schilf- und Hochmoorbereiche stehen im Vordergrund. Diese Methode kann vor allem zwischen schilfdominierten und eher spärlich mit Schilf besetzten Bereichen unterscheiden. Letzteres kann besonders in unmittelbarer Wassernähe auf geschädigte Schilfbestände hindeuten.

Mit der vorgestellten Methode lassen sich unterschiedliche Fernerkundungsdatentypen auf verschiedenen Maßstabsebenen vergleichbar auswerten. So werden mit einer Kombination aus historischen s/w-Luftbildern und sehr hoch auflösenden Satellitenbildern des IKONOS-Typs raumzeitliche Analysen der Entwicklung von Feuchtgebieten möglich.

1. Einleitung

Die aktuell verfügbaren Erdbeobachtungssatelliten der IKONOS-Generation liefern räumlich sehr hoch auflösende Bilddaten, vergleichbar mit der Qualität von Luftbildern. Darüber hinaus bieten sie zusätzliche spektrale Informationen, bis hinein in den nahen Infrarot-Bereich.

Auf der Basis wissenbasierter, objektorientierter Bildanalysemethoden mit dem Programm eCognition wurden im Rahmen des Projektes AQUATIC Verfahren zur automatisierten Klassifikation von Feuchtgebieten im ufernahen Bereich entwickelt. Es sollten Auswertemethoden für heterogene, sehr hoch auflösende Fernerkundungsdaten mit einer objektorientierten Bildanalysemethodik entwickelt werden. Diese Verfahren sollen in Verwaltungs- und Planungsbehörden auf Landesebene zum Einsatz kommen, um dort einen

aktuellen Kenntnisstand der Land- und Gewässerhältnisse zu gewährleisten und so bei Planungs- und Arbeitsabläufen die Entscheidungsfindung zu unterstützen. Ziel ist es, die vorhandene Datenbasis (IKONOS, Orthofotos, Hyperspektraldaten) kombiniert so auszuwerten, dass eine regelmäßige Analyse der Landoberflächen unterstützt wird.

2. Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet liegt ca. 40 km südlich von München im oberbayerischen Voralpengebiet. Es umfasst den Starnberger See inklusive der südlicher gelegenen Osterseen. Das Gebiet zählt zu den wichtigsten Naherholungsgebieten des Münchner Raums. Teile des Starnberger Sees und der größte Teil der Osterseen sind als Naturschutzgebiet ausgewiesen, viele der schützenswerten Bereiche sind ebenfalls als FFH-Gebiet gemeldet und der gesamte Raum steht unter dem Schutz der Ramsar-Konvention.

Die morphologische Entwicklung des Starnberger Sees wurde bislang kontrovers diskutiert. Die am häufigsten zitierte Theorie (MUNTHE zitiert in ROTHPLETZ 1917) besagt, dass der Starnberger See durch Glazialerosion des Isar-Loisach-Gletschers während der Würm-Eiszeit und durch subglaziale Schmelzwasserflüsse geschaffen wurde. Die Osterseen hingegen sind eine Kette von 19 Toteisseen, die während der Rückzugsphase des Isar-Loisach-Gletschers entstanden sind. Der Starnberger See wurde gegen Ende der letzten Eiszeit von seinem Hauptzufluss, der Loisach, abgeschnitten und besitzt dadurch, als einziger Voralpensee, wie die Osterseen keine direkten Zuflüsse aus dem Gebirge. Aus diesem Grund erfahren beide nur einen geringen Sedimenteintrag. Dieses stellt eine der wichtigsten Voraussetzungen für ihren Erhalt dar.

3. Stand der Forschung

Die Überwachung von Feuchtgebieten basierte bislang in erster Linie auf der visuellen Interpretation von Luftbildern (CIR oder Farbe) sowie auf Satellitendaten im mittel auflösenden Bereich. Multispektrale Sensoren wie Landsat TM oder der auf dem in-

dischen IRS-1A oder 1B fliegenden LISS II oder auch SPOT XS liefern Auflösungen bis 20 m. So können nur flächenmäßig sehr große Feuchtgebiete erkannt werden, da die minimale Kartiereinheit (MMU – minimum mapping unit) dieser Daten zwischen 0.09 ha und 0.04 ha liegt. Neuere hoch auflösende Satelliten haben bislang kaum Eingang in die Feuchtgebietsfernerkundung gefunden. Die Anwendung wissens- oder regelbasierter Klassifikationsverfahren hingegen schon. Beispielsweise klassifizieren LUNETTA und BALOGH (1999) ausgedehnte Feuchtgebiete in Maryland und Delaware anhand von Landsat TM5 Daten. Zum Einsatz kommt ein regelbasierter Ansatz, welcher mit Hilfe vorklassifizierter Bilder zunächst in einem GIS zwischen hydrischen und nichthydrischen Bereichen unterscheidet. Diese Information wird dann mit einer statistischen Landbedeckungsklassifikation kombiniert. Die Ergebnisse verbessern sich durch dieses Verfahren. Die Autoren erwarten eine weitere Verbesserung durch die Kombination multisaisonaler Aufnahmen. Houhoulis und Michener (2000) erkennen Veränderungen in Feuchtgebieten mit multispektralen SPOT XS Daten und kombinieren diese mit externen Kartierungen des amerikanischen **National Wetland Inventory (NWI)**. Durch diese Vorabgrenzung vermeiden sie ebenfalls eine spektrale Konfusion zwischen Feuchtgebieten, landwirtschaftlicher Nutzung und Wäldern. Es kommt hier eben falls ein regelbasierter Ansatz zum Einsatz. Multispektrale Daten des SPOT Satelliten werden von JENSEN et al. (1993) zur Veränderungsanalyse von Rohrkolben- und Teichrosenbeständen am Savannah River in South Carolina verwendet. Multisaisonale Daten werden hier für die Erkennung, vor allem der Schwimmblattvegetation eingesetzt und mit panchromatischen SPOT Daten kombiniert. SADER et al. (1995) weisen für Feuchtwälder nach, dass ein regelbasierter GIS-Ansatz die Klassifikationsqualität gegenüber rein statistischen Verfahren signifikant steigert.

4. Datenbasis

Die im folgenden dargestellten Ergebnisse stammen aus einer kombinierten Analyse von satellitengestützten IKONOS-Daten, hyperspektralen CASI-Daten und einer Orthofoto-Zeitreihe. Die Satellitenaufnahmen wurden April und August 2001 aufgenommen, die CASI-Aufnahmen Mitte September 1999 und die Orthofotos in den Jahren 1956, 1964, 1976, 1999 und 2000. Diese sehr hoch auflösenden Daten decken einen Bereich der räumlichen Auflösung von 4 m bis 40 cm ab. Die Daten sind aufeinander angepasst (georeferenziert) und liegen im Gauß-Krüger System (Zone 4) vor. Zusätzlich wurden bestehende Kartierungen, z.B. ATKIS und eine Biototypenkartierung in die Datenbasis integriert.

Die IKONOS Satellitendaten stehen im Mittelpunkt dieser Untersuchung. Sie wurden gewählt, weil sie die ersten kommerziell verfügbaren räumlich sehr hoch auflösenden Satellitendaten sind. Darüber hinaus bie-

ten sie einen Überblick über sehr große Gebiete (in dieser Untersuchung ca. 265 km²). Die Aufnahmegeometrie innerhalb einer Satellitenbildszenen ist einheitlich. Bei flugzeuggetragenen Systemen unterscheidet sie sich von Aufnahme zu Aufnahme. Die multispektrale Information bis hinein ins nahe Infrarot ist notwendig für die erfolgreiche Vegetationskartierung. OZESMI und BAUER (2002) sehen als wesentliche Vorteile der Satellitenbilddauswertung den regelmäßigen Überflug zur gleichen Tageszeit (Monitoring), die sehr große räumliche Abdeckung und den erhöhten Informationsgewinn in Kombination mit Luftbildern.

Hyperspektrale Daten versprechen aufgrund ihrer sehr hohen Anzahl an Spektralkanälen (hier 20 ausgewählte von 48 aufgenommenen Kanälen) zusätzliche Information bei der Analyse von Vegetationsbedeckten Landoberflächen, bei sehr hoher räumlicher Auflösung.

In dieser Untersuchung wurde die Datenbasis um schwarz-weiß Luftbilder erweitert, da diese sehr weit in die Vergangenheit zurückreichen (zum Teil bis 1941) und heute regelmäßige Routinebefliegungen durchgeführt werden. Die Auswertung von Orthofoto- oder Luftbildzeitreihen ermöglicht genauere Analysen der Entwicklung einer Landschaft.

5. Methode

Klassische statistische Klassifikationsverfahren sind nicht mehr in der Lage, den hohen Informationsgehalt der hier verwendeten sehr hoch auflösenden Fernerkundungsdaten auszuwerten (vgl. SCHNEIDER et al. 2000). Deshalb wurde hier eine objektorientierte, wissensbasierte Bildanalysemethode angewendet.

Der Fokus der verwendeten Methode liegt auf der möglichst detaillierten Klassifikation ufernaher Feuchtgebiete, mit besonderer Berücksichtigung der Schilfgürtel und Hochmoorbereiche.

Ziel ist es Klassifikationsregelwerke zu entwickeln, die flexibel und leicht auf andere Daten übertragbar sind. Diese Regeln wurden so entwickelt, dass auch mit dieser heterogenen Datenbasis vergleichbare Klassifikationsergebnisse erzeugt werden.

Es wird zielgerichtet gearbeitet, d.h. dass Objekte die zu anderen Landbedeckungen, als Feuchtgebiete und Wasserflächen gehören in mehreren Schritten vorab ausmaskiert werden. Diese Objekte, wie z.B. Wald oder Siedlung werden an anderer Stelle im Projekt weiter bearbeitet (vgl. MOTT et al. in diesem Band). Für eine flächendeckende Darstellung oder auch für die gegenseitige Korrektur von Klassen werden die Ergebnisse von beiden Projektpartnern kombiniert. Aufgrund dieser zielgerichteten Strategie können Objekte leichter klassifiziert werden, da bereits im Voraus spektrale Verwechslungen vermieden werden.

Bei dieser Studie kommt das objektorientierte Bildanalyseprogramm eCognition zum Einsatz. Eine

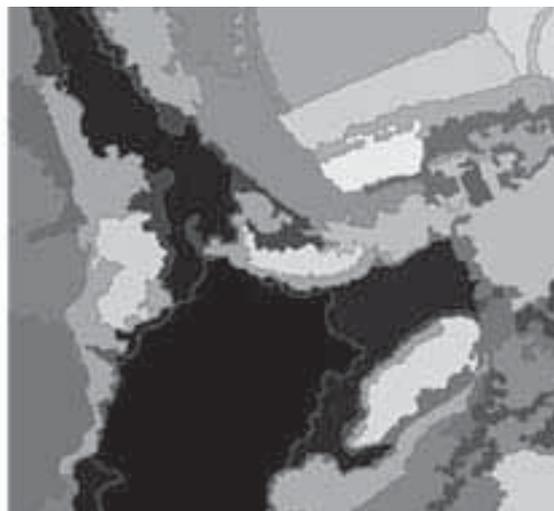


Abbildung 1

Objekte in eCognition. Links: Original IKONOS-Bild. Rechts: Segmentierte Objekte

Bildanalyse mit diesem Programm basiert auf zwei wesentlichen Schritten. Es wird eine Sequenz von Segmentierungs- und anschließenden Klassifikations-schritten abgearbeitet.

Die Segmentierung gruppiert die Bildpunkte eines Datensatzes in homogene Bildbereiche (Abbildung 1) auf unterschiedlichen Maßstabsebenen. Bei der Segmentierung wird gleichzeitig eine Datenbank mit Objektmerkmalen erzeugt. Die anschließende Klassifikation entspricht dann im Wesentlichen einer Datenbankabfrage (MOTT et al. 2002). Die in der Datenbank enthaltenen Objekteigenschaften werden aus der spektralen Information des Bilddatensatzes berechnet, es sind aber auch statistische Merkmale, Textur, Form- und Lageparameter sowie Nachbarschaftsbeziehungen enthalten. Ein weiterer Durchbruch von eCognition ist die Eigenschaft, bereits bei der Klassifikation externe Information, beispielsweise aus bestehenden Kartierungen zu integrieren.

Die wesentliche Unterscheidung zu bisherigen Klassifikationsverfahren ist, dass nun mit homogenen Bildobjekten (Objektprimitiven) gearbeitet wird, die in einem anschließenden Schritt zu aussagekräftigen Objekten zusammengefasst werden.

Objektdefinition/Klassenhierarchien

Aussagekräftige Objekte sind somit die wichtigste Voraussetzung für eine wissensbasierte Klassifikation von Fernerkundungsdaten. Die mit den geeigneten Verfahren segmentierten Regionen sind die Objekte oder zunächst, da noch unklassifiziert, die Objektprimitive eines Bildes. Es handelt sich um untereinander disjunkte Teilgebiete eines Bildes mit der Eigenschaft, dass jeder Bildpunkt einer Region mindestens einen Nachbarn hat, der derselben Region angehört (BÄHR und VÖGTLE 1998, S.128).

Die Frage was eigentlich ein Objekt ist, kann im Rahmen dieses Artikels nicht genau beantwortet werden, zumal hierbei auch philosophische Aspekte diskutiert werden müssten. Soweit es sich aber um den

Überschneidungsbereich GIS-Fernerkundung handelt, muss festgestellt werden, dass der Objektbegriff nicht immer übereinstimmt. Während es z.B. in einem GIS um reale oder abstrakte Objekte der Umwelt geht (BARTELME 2000, S.23), handelt es sich bei kartographischen Modellen eher um ein Darstellungsproblem. Bei der ALK sind Objekte fachliche Einheiten, die je nach Fachgebiet und Sichtweise unterschiedliche elementargeometrische Objekte kombinieren (SAURER und BEHR 1997, S.185). In der Fernerkundung hingegen ist dieser Begriff eher neu und die Prinzipien der Objektorientierung der Informatik werden nur zum Teil mit Vererbungs- und Gruppierungsstrategien umgesetzt. In eCognition kommt für die Klassifikation ein unscharfes „fuzzy“-Verfahren zum Einsatz. Hierbei können Objekte auch mehr als einer Klasse zugeordnet werden. In der Kartographie, bei ATKIS oder ALK beispielsweise wird mit einer strengen Abhängigkeit gearbeitet. Da hier Grenzen eindeutig sein müssen, gehören auch Objekte zu genau nur einer Klasse. In der Natur sind Objekte allerdings auch nicht immer eindeutig zu trennen, insbesondere wenn sie in Übergangszonen liegen. Besonders deutlich wird das, wenn mehrere Fachleute der gleichen Disziplin unabhängig voneinander ein Urteil fällen.

Die Entwicklung von Regelwerken für die Klassifikation der Fernerkundungsdaten erfordert die Definition einzelner Objekte der Realität auf Basis der bei der Segmentierung entstandenen Objekteigenschaften, die in der Objektdatenbank enthalten sind.

Dafür wird Expertenwissen, z. B. die menschliche Erfahrung eines Fernerkundungsspezialisten herangezogen aber auch bereits formalisiertes Wissen, z. B. aus Kartieranleitungen (BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (BFN) 1995) wird integriert. Die so gefundenen Parameter müssen auf ihre Eignung zur Trennung von Klassen überprüft werden. Beispielsweise kann eine Klassendefinition von Feuchtgebieten dann so aussehen:

Aus der Literatur (SADER et al. 1995, S.137) lassen sich folgende Eigenschaften ableiten. Feuchtgebiete sind:

- Dominiert von Hydrophyten,
- das Substrat ist wassergesättigt
- in der Nähe zu Wasserkörpern,
- haben eine geringe Hangneigung (<8%); sowie eine topographische Position in Mulden

Übertragen auf die verfügbaren Parameter in eCognition ist eine Definitionsmöglichkeit diese:

- Distanz zu Wasserobjekten
- NDVI
- spektraler Mittelwert blau
- spektraler Mittelwert rot
- spektraler Mittelwert NIR
- Grenze zu Feuchtgebieten oder Wasser
- DOM (Hangneigung)

Die Objektdefinition aus der Kartierung bzw. der Erfahrung, also die Überlegung, was ein Objekt wirklich ausmacht, kann nicht exakt in eCognition abgebildet werden. Die wesentliche Information in Fernerkundungsdaten ist die spektrale Reflexion in bestimmten Wellenlängenbereichen. Diese Tatsache spiegelt sich auch in den Objektdefinitionen des Regelwerks wider. In der obigen Feuchtgebietsdefinition wird überwiegend Information aus dem blauen-, roten- und nahen Infrarotbereich genutzt, zusammen mit daraus abgeleiteter Information wie einem Vegetationsindex (NDVI). Eine Stärke des objektorientierten Verfahrens kann hier direkt abgebildet werden, die Beziehung zu Nachbarobjekten über die Abfrage der Distanz zu Wasser. Durch die Möglichkeit externe Informationen direkt zu nutzen könnte hier beispielsweise ein digitales Oberflächenmodell (DOM) zusätzlich genutzt werden, um die Eigenschaft der Hangneigung im Regelwerk abzubilden.

Auf diese Weise sind im Projekt Regelwerke für die unterschiedlichen Daten erzeugt und miteinander abgeglichen worden, die folgende Klassen trennen können:

Tabelle 1

Auswahl der unterscheidbaren Klassen.

I = IKONOS, C = CASI, O = Orthofoto

Klasse	Datenbasis
Wasser	I, C, O
Tiefes Wasser	I, C, O
Flachwasser	I, C, O
Verbindungskanäle	I, C, O
Submerse Makrophyten	I
Schwimmblattvegetation	I, O (nur 1956)
Boote	O
Schilf	I, C, O
Dichtes Schilf	I, C
Seggendominiert	I, C
Verbuschtes Feuchtgebiet	I, C, O

Moor	I, C, O
Offene Moorbereiche	I, C, O (als Hochmoor)
Verbuschte Moorbereiche	I
Entwässerungskanäle	I, C
Wald	I (externe Ebene)
Einzelgehölz	I, O
Siedlungsgrün	O
Lichtung	C
Lineare Gehölze	I, O
Siedlung/Verkehr	I, C, O
Siedlung	I, O *
Straßen	I, O *
Landwirtschaft	I, C ¹⁾
Wiese/Weide	I, C *
Acker	I, C *
Acker abgeerntet	I, C *

Regelwerke in eCognition wurden streng hierarchisch aufgebaut. Sie grenzen zunächst z.T. durch Vorklassifikation übergreifender Klassen, wie Feuchtgebiet sowie schrittweiser Ausscheidung von sicheren Klassen unwichtige Objekte ab. Anschließend werden nur noch die gesuchten Landbedeckungseinheiten detailliert klassifiziert (vgl. ANDRESEN et al. 2002, LÖSCHENBRAND et al. 2003).

6. Ergebnisse

Im Rahmen dieser Studie wurden verschiedene Testgebiete im Uferbereich des Starnberger Sees und an den Osterseen analysiert. Im Folgenden wird eine Auswahl von Ergebnissen anhand einiger Testgebiete präsentiert.

Vorklassifikation

In einem Vorklassifikationsschritt werden auf einer groben Segmentierungsebene in den IKONOS-Daten übergreifende Landbedeckungsklassen unterschieden. Auf dieser Ebene existieren große Objekte, die zunächst Landbedeckungseinheiten zusammenfassen, die sich spektral eindeutiger unterscheiden lassen. Entsprechend der in Tabelle 1 aufgeführten Klassen werden hier Feuchtgebiete, Wälder, Grünland, Acker und Wasserflächen klassifiziert. Die Vorgehensweise für Orthofotos oder auch CASI-Daten unterscheidet sich hiervon in dem Sinne, dass hier streng hierarchisch auf mehreren Ebenen diese groben Landbedeckungsklassen getrennt werden. Schließlich werden in der gesamten Datenbasis aber die gleichen Klassen abgegrenzt.

Die Genauigkeit der mit den IKONOS-Daten klassifizierten Einheiten liegt nach der Korrektur mit einem externen Waldlayer für potentielle Feuchtgebiete bei 95,81 % Produzenten- und 82,09 % Benutzergenauigkeit. Potentielle Moorbereiche lassen sich auf dieser Maßstabsebene mit einer Genauigkeit von 95,22 % bzw. 80,37 % (Produzenten- und Benutzergenauigkeit) klassifizieren. Grünland wird abgeleitet, um spektrale

¹⁾ Diese Klassen wurden bei den CASI-Daten bzw. Orthofotos nicht bearbeitet und sind deshalb nicht in der Tabelle enthalten.



Abbildung 2
Hochmoorbereiche mit Verbuschungstendenzen östlich der Osterseen. IKONOS August 2001

Überschneidungen mit Feuchtgebieten zu minimieren und erreicht eine Genauigkeit von 98,43% (Produzentengenauigkeit) bzw. 94,80% (Benutzergenauigkeit).

Die Analysen der Klassifikationsqualität wurden auf Basis von Testflächen durchgeführt. Die Testflächen wurden durch Kartierung, Luftbilder und Geländekampagnen verifiziert.

Verbuschung in Moorbereichen

Ein Ziel war die Klassifikation der Landoberfläche in einer höheren Detailgenauigkeit. Im Bereich der Osterseen fallen in den Fernerkundungsdaten sehr schnell die vorklassifizierten potentiellen Hochmoorbereiche des Weid- und des Schechenfilzes (Abbildung 2) östlich der Osterseen auf. Diese lassen sich mit der im Projekt *AQUATIC* entwickelten Methode von den sonstigen Feuchtgebieten unterscheiden. Darüber hinaus wird innerhalb dieser Bereiche zwischen verbuschten Flächen und offenen Hochmoorflächen unterschieden.

Die Genauigkeitsanalyse auf Basis einer Fehlermatrix zeigt für die offenen Moorbereiche im August Werte von 93,25% (Produzentengenauigkeit) und 97,01% (Benutzergenauigkeit). Aufgrund von Überschneidungen mit bewaldeten Bereiche kann die Klasse der verbuschten Bereiche (moor, shrub encroachment) nicht in diese Genauigkeitsbereiche vordringen, liegt aber mit 92,19% bzw. 73,70% (Produzenten- bzw. Benutzergenauigkeit) in einem sehr guten Bereich. Es zeigt, dass Objekte der Referenz zum größten Teil richtig klassifiziert wurden (Produzentengenauigkeit), aber darüber hinaus zu viele Objekte ebenfalls als verbuscht klassifiziert wurden (Benutzergenauigkeit), die laut Referenz zu einer anderen Klasse gehören.

Die Feuchtgebiete sowie die Moorbereiche wurden vorher mit einer Waldklassifikation (vgl. MOTT et al. in diesem Band) verschnitten und die Klassen gegenseitig korrigiert. In Überschneidungsbereichen

kann dennoch nicht eindeutig zwischen Wald und verbuschtem Hochmoorkomplex unterschieden werden. Visuelle Fernerkundungsinformationen stammen von der Oberfläche und können nicht durch z.B. Baumkronen hindurchsehen. Deshalb wird der Waldklassifikation Vorrang eingeräumt. Wälder werden hier mit einer Genauigkeit von 97,76% (Produzentengenauigkeit) bzw. 100% (Benutzergenauigkeit) klassifiziert werden.

Verbuschungsentwicklung aus Orthofotos

Die Entwicklung der Verbuschung innerhalb der Moorbereiche kann mit Hilfe der Analyse der vorliegenden Orthofotozeitreihen nachvollzogen werden. Am nördlichen Rand des Weidfilzes, westlich der Osterseen wird über drei Zeitpunkte (1964, 1976 und 1999) die Entwicklung des Baum- und Buschbestandes am Hochmoorrand aufgezeigt. Hiermit können Verbuschungstendenzen erfasst und analysiert werden. Bei einer quantitativen Analyse hat ROGG (2003) nachgewiesen, dass es einen reinen Zuwachs an baumbestandenen Flächen von 19 ha gab, was über die 35 Jahre von 1964 bis 1999 eine Zunahme 25% ergibt (Abbildung 3).

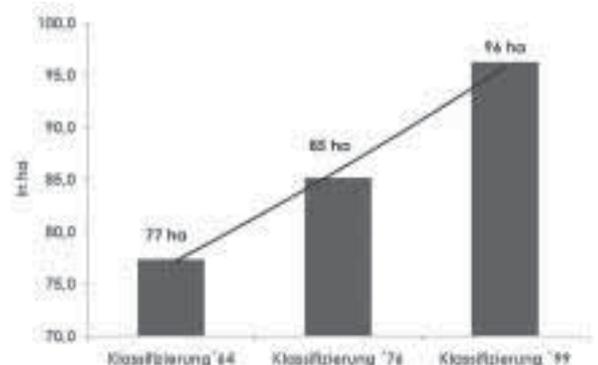


Abbildung 4
Anstieg des Waldanteils am Nordende des Weidfilzes. Analyse anhand einer Orthofotozeitreihe

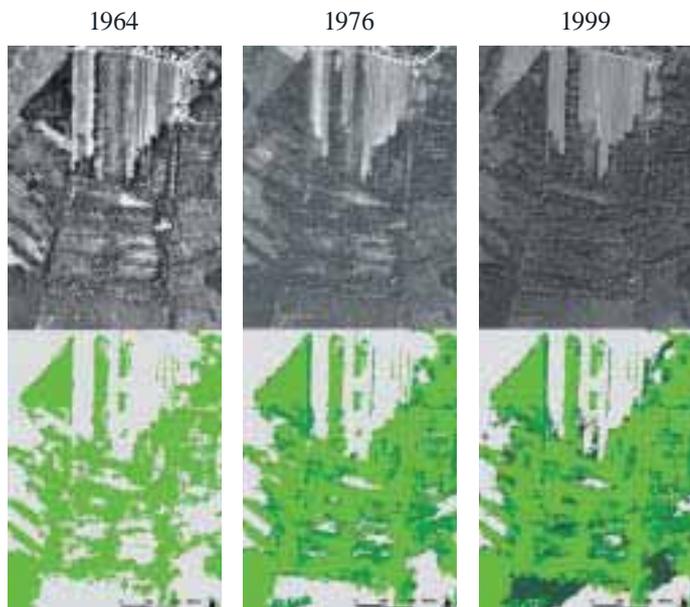


Abbildung 4

Verbuchungsentwicklung am Nordrand des Weidfilzes. Oben: Orthofotos. Unten: Klassifikation der einzelnen Jahre (verändert nach ROGG et al. 2003)

Abbildung 4 zeigt, dass 1999 die verbuchten Bereiche des Hochmoores (unten rechts, dunkelgrün) erfasst und hier der Waldfläche zugeordnet werden. Aufgrund der geringen Grauwertinformation von Orthofotos sind Fehlklassifikationen nicht vollständig zu vermeiden. Ebenso fällt die unterschiedliche Qualität der Aufnahmen aus den verschiedenen Jahren auf. Diese Unterschiede sind zwar in den Regelwerken weitestgehend berücksichtigt, erschweren aber dennoch die einheitliche Klassifikation. Im jeweils oberen Bereich der Abbildungen sind teilweise Feldbereiche als Wald klassifiziert (vor allem 1976).

In einer Nachbearbeitung durch einen Experten, im Abgleich mit Kartierungen oder Klassifikationen auf Basis anderer FE-Daten lassen sich solche Unzulänglichkeiten aber sehr schnell erkennen und beseitigen.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die hier in Auszügen präsentierte Studie zeigt, dass sehr hoch auflösende Fernerkundungsdaten sehr viele Informationen in einem Maßstabbereich bereitstellen, der für die lokale Anwendung gefordert ist. Im Rahmen aktueller Richtlinien, wie der FFH-, der Wasserrahmenrichtlinie oder auch der Ramsar-Konvention sind Überwachungsmaßnahmen gefordert, die der Gesetzgeber und die Behörden für die lokale Ebene umsetzen müssen.

Die Auswertung sehr hoch auflösender FE-Daten mit einem objektorientierten, wissensbasierten Ansatz führt zu einer sehr hohen Klassifikationsqualität. Die entwickelten Regelwerke zeichnen sich durch die Stabilität der Klassifikationsergebnisse bei einer vergleichsweise einfachen Übertragbarkeit aus. Dennoch können diese Auswertungen nur ein Werkzeug für den Experten sein, das seine Arbeit unterstützt. Eine Kombination von Expertenwissen, mit bestehender Geoinformation (wie Kartierungen oder den gezeigten Orthofotozeitreihen) sowie der wissensbasierten

Auswertung von Fernerkundungsdaten, welche in einem GIS weitergeführt werden kann ist notwendig. Nur in dieses Zusammenspiel ermöglicht die schnelle, exakte und möglichst kostengünstige Überwachung schützenswerter Lebensräume. Die Werkzeuge für so ein Expertensystem sind vorhanden, die Umsetzung erfordert aber nach wie vor einige Anstrengungen von allen Seiten.

8. Danksagung

Diese Studie ist im Rahmen des Projektes *AQUATIC* entstanden, welches durch das BMBF gefördert wird. Projekt-nummer: 50 EE 0040 & 50 EE 0041. Vielen Dank auch an die Diplomanden Caroline Rogg und Florian Löschenbrand.

9. Literatur

- ANDRESEN, T.; C. MOTT, S. ZIMMERMANN, T. SCHNEIDER & A. MELZER (2002): Objectoriented information extraction for the monitoring of sensitive aquatic environments. IGARSS, Toronto.
- BÄHR, H.-P. & T. VÖGTLE (1998): Digitale Bildverarbeitung. Anwendung in Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung. 3. Auflage, Heidelberg.
- BARTELME, N. (2000): Geoinformatik. Modelle, Strukturen, Funktionen. 3. Auflage, Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hongkong, London, Mailand, Paris, Singapur, Tokio.
- BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (BFN) (1995): Systematik der Biotoptypen- und Nutzungstypenkartierung (Kartieranleitung). Bonn-Bad Godesberg.
- HOUHOULIS, P. F. & W. K. MICHENER (2000): Detecting wetland change: A rule-based approach using NWI and SPOT-XS data. Photo-grammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.66, 2, S.205-211.
- JENSEN, J. R.; S. NARUMALANI, O. WEATHER-BEE & H. E. MACKEY (1993): Measurement of Seasonal and Yearly Cattail and Waterlily Changes Using Multidate Spot Panchromatic Data. Photo-grammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.59, 4, S.519-525.

- LÖSCHENBRAND, F.; C. MOTT, T. ANDRESEN, S. ZIMMERMANN, T. SCHNEIDER & U. KIAS (2003):
Objektorientierte Klassifikation hyperspektraler CASI-Daten zur Ableitung naturschutzfachlich relevanter Landbedeckungs-Parameter. *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung (AGIT)*, Salzburg, XV, S.268-273.
- LUNETTA, R. S. & M. E. BALOGH (1999):
Application of multitemporal Landsat 5 TM imagery for wetland identification. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.65, 11, S.1303-1310.
- MOTT, C.; T. ANDRESEN, C. ROGG, T. SCHNEIDER, S. ZIMMERMANN, & U. AMMER (unveröff.):
Identifizierung und Monitoring von Landnutzungs-/Landoberflächen-Typen in einem multitemporalen/multisensoralen Ansatz. ANL Fachtagung: Erfassung und Beurteilung von Seen und deren Einzugsgebiet mit Methoden der Fernerkundung, Laufen, .
- MOTT, C.; T. ANDRESEN, S. ZIMMERMANN, T. SCHNEIDER & U. AMMER (2002):
„Selective“ region growing – an approach based on object-oriented classification routines. *IGARSS*, Toronto, .
- OZESMI, S. L. & M. E. BAUER (2002):
Satellite remote sensing of wetlands. *Wetlands Ecology and Management*, Vol.10, S.381-402.
- ROGG, C.; S. ZIMMERMANN, T. SCHNEIDER, T. ANDRESEN, C. MOTT & U. KIAS (2003):
Monitoring von naturschutzrelevanten Flächen mit Hilfe objektorientierter Bildanalyse anhand S-W-Luftbilder im Naturschutzgebiet Osterseen. *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung (AGIT)*, Salzburg, XV, S.381-386.
- ROTHPLETZ, A. (1917):
Die Osterseen und der Isar-Vorlandgletscher. München.
- SADER, S. A. D. AHL & W. S. LIOU (1995):
Accuracy of Landsat-TM and Gis Rule-Based Methods for Forest Wetland Classification in Maine. *Remote Sensing of Environment*, Vol.53, 3, S.133-144.
- SAURER, H. & F.-J. BEHR (1997):
Geographische Informationssysteme. Eine Einführung. Darmstadt.
- SCHNEIDER, T.; R. DE KOK, A. BUCK & I. MANAKOS (2000):
Objektorientierte Bildanalyse – Paradigmawechsel in der thematischen Auswertung von Erdbeobachtungsdaten? In: Lehrstuhl für Landnutzungsplanung und Naturschutz (2000): *Landnutzungsplanung und Naturschutz. Aktuelle Forschungsberichte. Festschrift zur Emeritierung von Professor Dr. Ulrich Ammer.* Freising, S.234-258.

Anschrift der Verfasser:

Thorsten Andresen,
Thomas Schneider
und Prof.Dr. Arnulf Melzer
Limnologische Station der TUM
Hofmark 3
82393 Iffeldorf

AQUATIC: Identifizierung und Monitoring von Landnutzungs-/Landoberflächen-Typen in einem multitemporalen/multisensoralen Ansatz

Claudius MOTT, Thorsten ANDRESEN, Caroline ROGG, Thomas SCHNEIDER, Ulrich AMMER

Zusammenfassung

In diesem Artikel werden Ergebnisse des Projektes AQUATIC vorgestellt. Bei diesem Kooperationsvorhaben zwischen dem Lehrstuhl für Landnutzungsplanung und Naturschutz der TU München und der Limnologischen Station Iffeldorf wurde der Einsatz von sehr hoch auflösenden Satellitendaten im operationellen Umfeld vorbereitet. Erklärtes Ziel von AQUATIC war es, die Auswertung auch im großmaßstäblichen Auflösungsbereich (1:5000 bis 1:10000) zu automatisieren, zumal die visuelle Interpretation oder der Geländebegang sehr zeit- und kostenintensiv sind. Der Schwerpunkt des hier beschriebenen Projektteils lag auf der Ausarbeitung von automatisierten Klassifikationsstrategien für ufernahe Landnutzung/Landbedeckung.

Im ersten Abschnitt des Artikels wird der Bedarf an aktuellen und detaillierten Geo-Daten beleuchtet, sowie die Schwierigkeiten bei der automatisierten Klassifikation sehr hoch auflösender Daten. Anschließend werden die Grundprinzipien der hier verwendeten objektorientierten Analysemethoden erläutert und die Trennung nach „stabilen“ und „instabilen“ Objekteigenschaften erklärt. Zusammenfassend wird ein Überblick über den Ablauf einer objektorientierten Klassifikation gegeben.

Das Untersuchungsgebiet des Projektes AQUATIC wird in Abschnitt zwei dargestellt. Es umfasst den Starnberger See und die Region um die Osterseen, das 20 km bis 55 km südwestlich von München liegt.

Anhand von drei Beispielstudien werden im dritten Abschnitt die Einsatzmöglichkeiten objektorientierter Analysemethoden dargelegt. Es wird gezeigt, dass sich digitale Luftbilder und Satellitendaten mit automatisierten Methoden bei sehr hohen Genauigkeiten klassifizieren lassen. Des Weiteren wird die Aktualisierung und Fortschreibung von bestehenden GIS-Daten als ein potenzielles Einsatzfeld an einem Beispiel dargestellt. Dies spielt besonders in Zusammenhang mit der Monitoring- und Berichtspflicht entsprechend der FFH-Richtlinie eine wichtige Rolle.

1. Einleitung

Die Landschaft Europas hat sich in den vergangenen Jahrzehnten einschneidend verändert. Arten und Lebensräume wurden durch die Ausbreitung von Siedlungsgebieten, Industrie und Verkehrsflächen deutlich dezimiert. Verschiedene gesetzliche Richtlinien wurden in den vergangenen Jahrzehnten erlassen, um eine nachhaltige Entwicklung in den Mitgliedstaaten der EU zu gewährleisten. Für das Vorhaben „AQUATIC“, das hier vorgestellt wird, sind vor allem zwei Richtlinien relevant. Die „Fauna-Flora-Habitat-Richt-

linie“ (FFH-RL) und die „Wasserrahmenrichtlinie“ (WRRL) setzen verbindliche Maßnahmen zur Erhaltung eines natürlichen Zustandes der Landschaft Europas, wie auch zur Bewahrung der Gewässergüte.

Die Planungsbehörden der Länder haben die Aufgabe die Anforderung der genannten Richtlinien umzusetzen und die entsprechenden naturschutzfachlichen Ziele durchzusetzen. Um diese Aufgabe zu erfüllen sind flächendeckende Kartierungen und Grundlagen-erhebungen bezüglich der Landnutzung und Landschaftsstruktur notwendig.

Fernerkundliche Erfassungsmethoden eignen sich um den Planungsbehörden räumliche Informationen zu liefern. Große Flächen können vergleichsweise kostengünstig und regelmäßig erfasst werden. Es besteht eine große Auswahl an verschiedenen Datentypen, die in räumlicher und spektraler Auflösung variieren und so entsprechend der Nutzeranforderung gewählt werden können. Diese Technologie hat in bestehende Inventur-, Überwachungs- und Planungsverfahren der Behörden bislang nur wenig Eingang gefunden. Dies hat vielerlei Ursachen. Die bis vor wenigen Jahren verfügbaren Satellitendaten konnten aufgrund ihrer technischen Limitierungen die geforderte Detailtiefe nicht erfüllen. Satellitensensoren der jüngsten Generation liefern nun höchstauflösende Bilddaten, welche den Nutzeransprüchen gerecht werden. Des Weiteren liegt zum Teil ein Informationsdefizit auf Seiten der Behörden vor, was Fernerkundungsanwendungen tatsächlich liefern können und wo potentielle Einsatzmöglichkeiten innerhalb der Planungsverfahren bestehen.

Die Aufgabe eines Vorhabens wie *AQUATIC* liegt darin, den Einsatz von Fernerkundungsdaten im operationellen Umfeld vorzubereiten. Als qualitativer Maßstab für das automatisierte Verfahren gilt das Leistungsvermögen eines menschlichen Interpreters, der bei solchen Aufgaben nach wie vor die Methode der Wahl darstellt. Am menschlichen Interpret sind im Wesentlichen zwei Punkte zu kritisieren. Seine Arbeit ist sehr zeitintensiv und somit teuer, und die Ergebnisse sind subjektiv, also nicht reproduzierbar.

Grundsätzlich gilt es nachzuweisen, dass sich höchstauflösende Fernerkundungsdaten mit den entwickelten Ansätzen bei der notwendigen Genauigkeit auswerten lassen, bestenfalls bei einem Kostenvorteil gegenüber der konventionellen Methode. Ist dieses, rein wissenschaftliche, Ziel erreicht, so ist als nächstes die Umsetzung in die praktische Anwendung anzustreben.

Hochauflösende Fernerkundungsdaten

Fortschritte in der Sensortechnologie führen zur Entwicklung geometrisch, radiometrisch und spektral immer höher auflösender Systeme. Man erhofft sich von den damit erfassten Daten genauere Kenntnisse über die Bodenbedeckung, um daraus neue Anwendungen im großmaßstäblichen Bereich zu entwickeln. Mit jeder Verbesserung der Auflösung steigt auch die Komplexität des Informationsgehaltes. Bei einer Pixelgröße von unter 5 m, die heute von der IKONOS Sensor Generation erreicht wird, stoßen die herkömmlichen, Pixelbasierten Klassifikationsmethoden an ihre Grenzen (DE KOK ET AL. 1999; SCHNEIDER & STEINWENDNER 1999). Traditionelle fernerkundliche Klassifikationsverfahren bewerten mit verschiedensten mathematisch-statistischen Methoden die spektrale Ausprägung eines Bildpunktes und weisen diesem eine Klasse zu. Einzelne Bildpunkte werden als voneinander unabhängige Elemente betrachtet. Bei sehr hoch auflösenden Fernerkundungsdaten steigt die spektrale Varianz der Pixelwerte, die eine thematisch sinnvolle Klasse abbilden. Auf Bildpunktebene ist das empfangene Signal nicht mehr eindeutig einer Klasse zuzuordnen. Die aus Pixelbasierten Klassifikationen resultierenden thematischen Karten sind zum Teil unvollständig und in der Flächenausbreitung stark zergliedert. Man hat in diesem Zusammenhang aus dem Radar-Bereich stammenden Begriff „Salt and Pepper“-Effekt übernommen (BLASCHKE et al. 2000). Mit zunehmender Auflösung tritt dieser Effekt verstärkt auf. Die Grenzen Pixelbasierter Verfahren bei der Auswertung sehr hoch auflösender Datensätze haben Objektorientierte Analysemethoden in den Mittelpunkt des Interesses gerückt.

Objektorientierte Auswertung in der Fernerkundung

Im Projekt *AQUATIC* wurde das seit 1999 verfügbare Bildanalyseprogramm eCognition eingesetzt. Diese Software nutzt einen so genannten objektorientierten Ansatz zur Analyse von Fernerkundungsdaten. In der Fernerkundung bedeutet Objektorientierung, dass nicht einzelne Pixel in ihrer spezifischen spektralen Ausprägung betrachtet werden, sondern vielmehr Cluster angrenzender Pixel, so genannte Segmente oder Bild-Objekte. Diese Bild-Objekte werden in einem ersten Segmentierungsschritt aus benachbarten Bildpunkten aufgrund ihrer spektralen Ähnlichkeit gebildet. Man geht davon aus, dass benachbarte Bildpunkte, die spektral ähnlich sind, wahrscheinlich zur selben Landbedeckungsklasse gehören. Parallel zur Segmentierung wird in eCognition eine Objektdaten-

bank aufgebaut, die für jedes Segment die spezifischen Eigenschaften speichert. Das sind unter anderem die spektralen Mittelwerte eines jeden Kanals, die Standardabweichung über das Segment, Formparameter oder Nachbarschaftsbeziehungen. Für SCHNEIDER et al. stellen gerade die Nutzung der Objektdatenbank einen entscheidenden Schritt dar. Die Fernerkundungswelt hat durch die Nutzung der Objektdatenbank Zugriff auf Analysemethoden, die bisher nur der GIS-Welt vorbehalten waren (SCHNEIDER et al. 2000). Die Formulierung von Klassifikationsregelwerken entspricht im Prinzip dem Aufbau einer komplexen Datenbankabfrage.

Des Weiteren lässt sich mit eCognition eine hierarchische Bildobjektstruktur aufbauen mit Bildobjektebenen mit verschiedenen großen Segmentausprägungen. Die Objektebenen sind sowohl vertikal als auch horizontal miteinander vernetzt, d.h. jedes Segment „kennt“ seine Nachbar-, Über- und Unterobjekte (Abb. 1). Diese Information ist in einer Datenbank verfügbar und kann in Klassenregelwerke implementiert werden. So lassen sich Objekte thematisch zusammenfassen. Eine Streuobstwiese besteht beispielsweise in den Unterobjekten aus einem Teil Wiese und einem Teil Obstbaum.

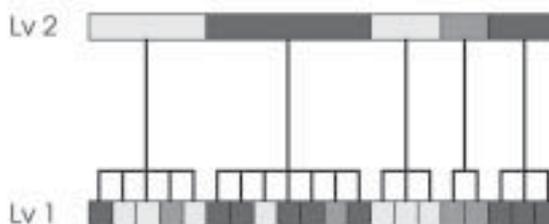


Abbildung 1:

zeigt schematisiert die hierarchische Verknüpfung zwischen verschiedenen aufgelösten Ebenen (oder Level). Die Segmente auf Level 2 „kennen“ die Zusammensetzung der Segmente auf Level 1 und können so thematisch zusammengefasst werden.

Die Zugehörigkeit eines Bild-Objektes zu einer Klasse wird über Regelwerke bestimmt. Es werden Gültigkeitsbereiche eines Objektattributes (oder Objekteigenschaft) für die jeweilige Klasse festgelegt. Auf diese Weise wird das Wissen des Experten über die Eigenschaftsausprägung einer Klasse implementiert. In eCognition steht eine Vielzahl an verschiedensten Objekteigenschaften zur Verfügung, welche im Handbuch ausführlich beschrieben werden (BAATZ et al. 2002).

Bei Ansicht eines Bildes nimmt der Betrachter unbewusst eine Vielzahl von Informationen auf und hat entsprechend seiner Erfahrung verschiedene Assoziationen. Die Art und Weise wie der Experte einen bildlichen Datensatz wahrnimmt und analysiert lässt sich in eCognition ansatzweise nachbilden. Zum Verständnis sei hier ein Beispiel für die Klasse Straßenkörper genannt. Ein Straßenkörper ist visuell sofort

Tabelle 1

Links dargestellt sind die Erkennungsmerkmale der Klasse „Straßenkörper“ und rechts die Klassenattribute, die bei der Umsetzung in eCognition verwendet wurden.

Straßenkörper visuell	Straßenkörper eCognition
<ul style="list-style-type: none">- grauer Farbton- langgezogene, nicht natürliche Strukturen- typische, netzartige Strukturen	<ul style="list-style-type: none">- geringer bis mittlerer Grauwert- geringe Textur- Form:<ul style="list-style-type: none">Länge zu Breite,Shape Index,Verhältnis Segmentgrenze zu Fläche- keine Objekthöhe (DOM)

durch seine typische vernetzte Struktur, seinen Farbton und seiner Linienhaften Formen erkennbar. Diese Struktureigenschaften lassen sich in eCognition durch Formattribute beschreiben. In Abbildung 1 sind die visuellen Erkennungsmerkmale auf einem Luftbild den Klassenmerkmalen in eCognition gegenüber gestellt (Tab. 1).

„Stabile“ und „instabile“ Objektattribute

Die Objektattribute lassen sich in instabile und stabile Attribute unterscheiden (MOTT et al. 2002). Als „instabil“ gelten Eigenschaften eines Segmentes die auf den Werten der Datengrundlage beruhen. Als Beispiel hierfür seien die spektralen Objektmittelwerte oder die Standardabweichung pro Segment genannt.

Die Instabilität dieser Eigenschaften hat verschiedene Ursachen:

- **Sensorspezifische Einflüsse.** Jeder Sensor hat spezifische Abbildungseigenschaften, sowohl räumlich als auch spektral.
- **Atmosphärische Einflüsse.** Arbeitet man mit Datensätzen unterschiedlicher Aufnahmezeitpunkte, so ist der atmosphärische Einfluss auf die Daten verschieden stark ausgeprägt. Dies resultiert in unterschiedlichen Spektralmesswerten einer Klasse.
- **Topografische Einflüsse.** Deutliche Geländemorphologie hat Einfluss auf die Reflektionsantwort. So hat ein Landoberflächentyp auf der Sonnenabgewandten Seite eine Hangs andere Spektralmeswerte als auf der Sonnenzugewandten Seite.
- **Blickwinkelabhängige Einflüsse.** Abhängig vom Blickwinkel des Sensors im Verhältnis zum Sonnenstand ist die Reflektion verschieden. Dieser Effekt wird Anisotropie genannt und ist Schwerpunkt aktueller Forschung.
- **Temporale Einflüsse.** Bei unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten spielt die jeweilige Vegetationsperiode eine entscheidende Rolle. Abhängig davon zu welchem Zeitpunkt im Jahr eine Aufnahme gemacht wird, haben Landbedeckungsklassen unterschiedliche Eigenschaften. So hat ein Kartoffelacker im April eine völlig andere Signatur als im August.

„Stabile“ Eigenschaften beschreiben dagegen die Beziehungen zwischen einzelnen Segmenten. Diese werden in der Literatur häufig als räumliche Beziehungen („spatial relationships“) adressiert (TON et al. 1991). Durch Hinzunahme solcher Beziehungen lassen sich auch Klassen unterscheiden, welche spektral nicht voneinander trennbar sind (GURNEY und TOWNSHEND 1983).

Zum Verständnis des Unterschiedes zwischen „stabilen“ und „instabilen“ Eigenschaften sei ein Beispiel genannt. Der spektrale Mittelwert für einen Bootssteg ist in einem Luftbild, einem PAN-IKONOS Bild und CASI-Infrarotkanal verschieden. Auch bei einer IKONOS-PAN Aufnahme an einem trübem Tag kann sich die spektrale Erscheinung eines Bootsstegs von der eines wolkenfreien Tages unterscheiden. Als „stabil“ gelten semantische oder räumliche Beziehungen zwischen Objektklassen. So ist ein Bootssteg immer in direkter Nachbarschaft zu Wasser und hat ein bestimmtes Verhältnis von Länge zu Breite.

Das bedeutet, dass „instabile“ Eigenschaften für jeden Datentyp und Aufnahmezeitpunkt angepasst werden müssen, während die „stabilen“, also die semantischen Beziehungen, übernommen werden können. Die Trennung nach semantischen und von der Datengrundlage abhängigen Parametern erleichtert eine Übertragbarkeit der Regelwerke.

Überblick

Das Ergebnis einer Objektorientierten Klassifikation lässt sich als Vektordatensatz im ArcView Shape-Format ausgeben. Dem Nutzer stehen die Geometrien, die zugewiesene Landnutzungs-kategorie und die Objektattribute zur Weiterverarbeitung und Verwaltung in einem GIS zur Verfügung.

In Abbildung 2 sind die Schritte einer objektorientierten Klassifikation schematisiert dargestellt.

2. Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet des Projekts *AQUATIC* umfasst den Starnberger See und die Region um die Osterseen. Es liegt etwa 20 bis 55 km südwestlich von München und verteilt sich auf 15 Gemeinden innerhalb der Landkreise Starnberg, Bad Tölz und Weilheim-Schongau. Das Untersuchungsgebiet liegt im Ammer-Loisach-Hügelland und ist als Eiszerfallslandschaft mit seinen typischen glazialen Geländemorphologien zu charakterisieren. Das Landschaftsbild ist vielseitig und durch einen kleinräumigen Wechsel von verschiedenen Landschaftselementen geprägt. Dies sind vor allem Siedlungen, Kulturland, Wälder und freie Moorflächen. Das Kulturland wird in der Hauptsache in Form von Mähwiesen und Weiden genutzt. Ein kleiner Teil der landwirtschaftlichen Nutzflächen wird auch zum Maisanbau genutzt. Das Gesamtgebiet ist zu einem großen Teil bewaldet, wobei hier Aufforstungen durch Fichten dominieren.

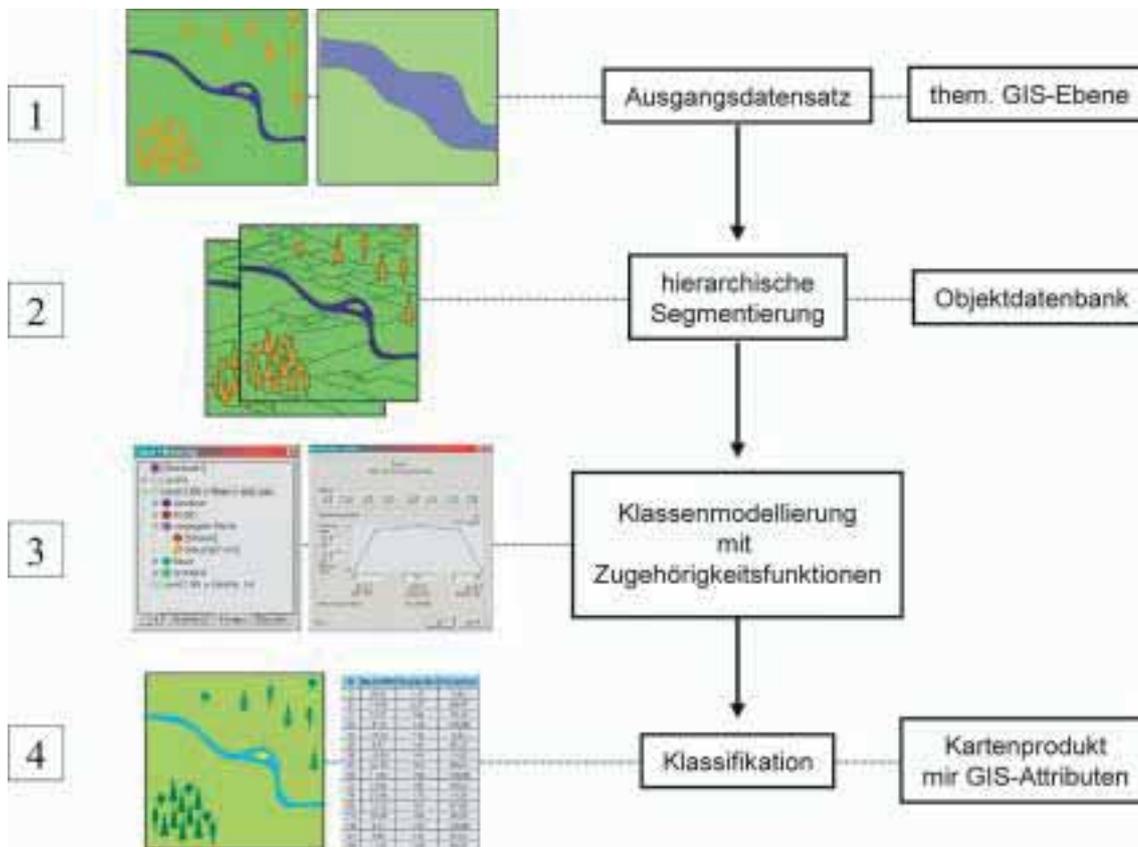


Abbildung 2

Schematischer Ablauf einer Objektorientierten Klassifikation

1. Ausgehend von einem Bilddatensatz können Zusatzinformationen, wie z. B. Höhenmodelle oder bereits existierende Kartierungen, in den Klassifikationsprozess integriert werden.
2. Segmentierung von Bildobjekten anhand der Homogenität benachbarter Bildpunkte. Parallel dazu wird eine Objektdatenbank aufgebaut, welche die Objekteigenschaften verwaltet. Bei der Segmentierung ist die Integration von externen GIS-Datenebenen möglich, d.h. bestehende Geometrien bzw. Segmentgrenzen können übernommen werden. Die Segmentierung kann in verschiedenen Maßstabsebenen durchgeführt werden, wobei die einzelnen Ebenen miteinander verknüpft sind.
3. Aufbau eines Regelwerkes, welches die Zugehörigkeit eines Bildobjektes anhand seiner Eigenschaften beschreibt. Dieses Regelwerk repräsentiert die Wissensdatenbank die für die Klassifikation aufgebaut wird. Die spektralen, strukturellen und kontextuellen Eigenschaften und Beziehungen einer Objektklasse werden nachmodelliert.
4. Klassifikation der Objekte. Das Ergebnis kann als Vektordatensatz ausgegeben werden, inklusive der Eigenschaften aus der Objektdatenbank.

Die Gesamtfläche des Untersuchungsgebiets wird durch die Ausdehnung der verfügbaren IKONOS-Satellitendaten vorgegeben und beträgt ca. 265 km². Naturschutzfachlich interessant sind vor allem die Feuchtflächen, die eine Vielzahl von geschützten Tier- und Pflanzenarten beheimaten. Eine Fläche von 74 km² sind als Naturschutz-, FFH- oder SPA- Gebiet (Special Protected Area – nach (79/409/EWG)) ausgezeichnet, wobei das SPA-Gebiet Starnberger See allein 56 km² umfasst.

Innerhalb des gesamten Untersuchungsgebietes wurden kleinere Testgebiete ausgewählt, welche für das Gebiet typische Landschaftsstrukturen aufweisen. In diesen Testgebieten wurden verschiedene methodische Ansätze unter Nutzung von höchstauflösenden Luftbildern, multisaisonalen IKONOS-Daten und externen GIS-Datenebenen entwickelt. Im Folgenden

werden Methode und Ergebnisse des Projektes *AQUATIC* im Teilbereich Landnutzung anhand verschiedener Anwendungsbeispiele vorgestellt.

3. Methoden und Ergebnisse

3.1 Analyse von hochauflösenden Luftbildern

Im bayerischen Landesvermessungsamt werden Luftbilder seit Beginn der 40er Jahre archiviert. Luftbilder sind die einzige Datenquelle, welche eine Analyse der Landschaftsentwicklung über mehr als fünf Jahrzehnte erlaubt. In diesem Abschnitt soll auf die Fragestellung eingegangen werden, inwieweit es mit Objektorientierten Analysemethoden möglich ist, die Landnutzung aus aktuellen S/W Luftbildern festzustellen und retrospektiv die Landschaftsentwicklung



Abbildung 3
Testgebiet „Iffelder Seengruppe“. S/W Luftbild von 6/2000. Größe: 136ha.

zu erfassen, um Entwicklungstendenzen abzuleiten. Als Testgebiet wurde die „Iffelder Seengruppe“ gewählt, da sowohl Siedlungs-, Wald-, als auch Feuchtgebiete zu finden sind (Abb. 3). Zur Bearbeitung standen S/W Luftbilder aus den Jahren 1956, 1976 und 2000, welche im Frühsommer und Herbst geflogen wurden zur Verfügung. Die Luftbilder lagen digital vor und hatten eine räumliche Auflösung von 40-80 cm/Pixel.

Um das Erstellen von Regelwerken einfach und vor allem transparent zu gestalten, wurde beim Aufbau der binäre Ansatz eines Entscheidungsbaumes verfolgt. In einem ersten Schritt wurde „Wasser“ von „Nicht-Wasser“ unterschieden. Die Klasse „Nicht-Wasser“ setzte sich aus „Siedlung“ und „Nicht-Siedlung“ zusammen. Die Klasse „Nicht-Siedlung“ bestand aus „Wald“ und „Nicht-Wald“. Die nächste Unterteilung von „Nicht-Wald“ setzte sich schließlich aus „Feuchtgebiete“ und „Sonstige Flächen“ zusammen. Abbildung 4 zeigt ein Schema des prinzipiellen Aufbaus. Dieser Aufbau hat sich hinsichtlich der Übertragung auf die unterschiedliche Luftbildjahrgänge als sinnvoll erwiesen (ROGG 2003).

In den jeweiligen Aufnahmen der Jahre 1956, 1976 und 2000 ließen sich, abhängig von der Qualität der Luftbilder noch weitere Klassen unterscheiden. In Abbildung 5 ist die Klassifikation des Luftbildes von 2000 für die Iffelder Seengruppe dargestellt. So wurde für das Jahr 2000 in dem Gebiet „Iffelder Seengruppe“ Flachwasser von Tiefenwasser unterschieden. Es wurden kleinere Gehölzstrukturen von

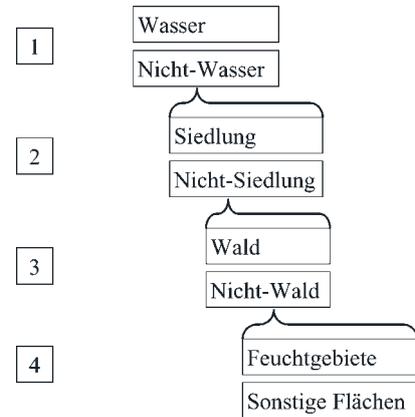


Abbildung 4
Aufbau des Klassifikationsregelwerks in Anlehnung an einen Entscheidungsbaum

größeren Waldflächen diskriminiert und innerhalb der Feuchtgebiete sogar aquatisches Schilf klassifiziert. Bei den Siedlungen konnten zusätzlich Straßen getrennt werden, sowie Grünflächen innerhalb der Siedlung. Zur Erstellung der Regelwerke wurden hauptsächlich der mittlere Grauwert eines Objektes, seine Standardabweichung und verschiedene Texturparameter verwendet. Ein hoher zusätzlicher Informationswert stellte die Höheninformation dar, die aus Stereoluftbildpaaren abgeleitet wurde. Vor allem für die Klassifikation von Wald- und Siedlungsflächen war die Höheninformation wertvoll. Zum Teil wurden Nachbarschaftsbeziehungen verwendet, wie bei der Klasse „aquatisches Schilf“, welche in unmittelbarer Nachbarschaft zu offenen Wasserflächen liegt. Auch bei der Klasse „Siedlungsgrün“ war die Nachbarschaft zur Klasse „Siedlung“ Bedingung.

Um die Qualität der Klassifikation zu prüfen wurde eine Genauigkeitsanalyse durchgeführt. Als Referenz diente eine Landnutzungskartierung die im Rahmen einer Diplomarbeit an der Limnologischen Station erstellt wurde (KANGLER 2003). Für einen sinnvollen Vergleich hat man die Landnutzungsklassen der Kartierung thematisch zusammengefasst.

Die Analyse der Produzentengenauigkeit (Pixel, die innerhalb einer Landbedeckungsklasse der Referenz als richtig klassifiziert wurden) für das Testgebiet „Iffelder Seengruppe“ 2000 ergab für die Klasse „Wasser“, dass 96% der kartierten Wasserflächen erkannt wurden. Von der Klasse „Siedlungs- und Verkehrsflächen“ wurden 78% erfasst und für „Wald/Gehölze“ 90% der Waldfläche. Die Klasse „Feuchtgebiete“ erreichte 55% Übereinstimmung (Tab. 2).

Die Analyse der Benutzergenauigkeit (Pixel, die innerhalb einer Landbedeckungsklasse der Klassifikation als richtig klassifiziert wurden) ergab, dass die Wasserflächen zu 98% mit der Kartierung übereinstimmten. Bei den „Siedlungs- und Verkehrsflächen“ waren 95% klassifizierter Siedlungsfläche korrekt und bei der Klasse „Wald/Gehölze“ war die Übereinstimmung

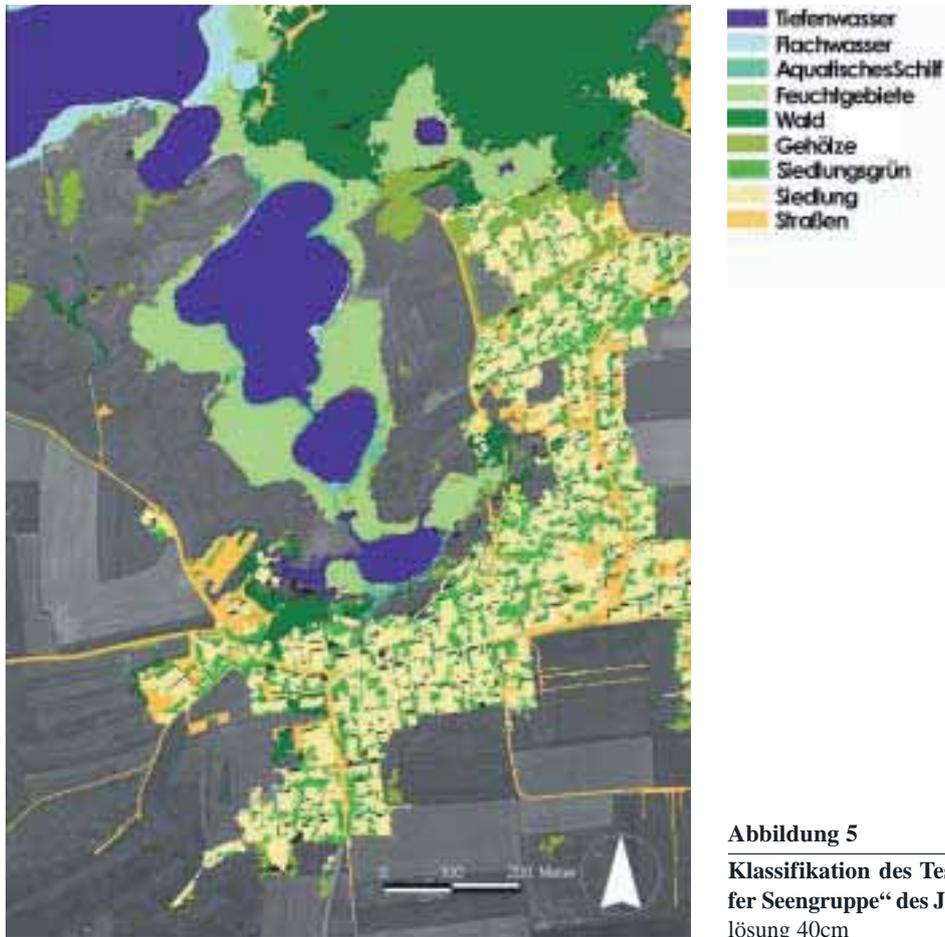


Abbildung 5
Klassifikation des Testgebietes „Iffeldorfer Seengruppe“ des Jahres 2000. Pixelauflösung 40cm

	Produzentengenauigkeit	Benutzergenauigkeit
Wasser	14 ha / 14,6 ha 96%	14 ha / 14,3 ha 98%
Siedlung/Verkehr	27 ha / 34,8 ha 78%	27,1 ha / 28,5 ha 95%
Wald/Gehölze	11,7 ha / 13,0 ha 90%	11,7 ha / 17,5 ha 67%
Feuchtgebiet	8,9 ha / 16,2 ha 55%	8,9 ha / 10,3 ha 86%

Tabelle 2
Zusammenfassung der Produzenten- und Benutzergenauigkeit für das Testgebiet „Iffeldorfer Seengruppe“ 2000

mung 67%. Bei der Klasse „Feuchtgebiete“ stimmte ein Anteil von 86% der klassifizierten Fläche (Tab. 2).

Eine Genauigkeitsanalyse für die Klassifikationen der Jahre 1956 und 1976 war nicht möglich, weil hierfür keine Referenzdaten vorlagen. Da die Herangehensweise dieselbe war, ist davon auszugehen, dass die Genauigkeiten in einem ähnlichen Bereich liegen.

Die Information über die frühere Landnutzung erlaubt eine Ableitung von Entwicklungstendenzen. Als Beispiel wurde die Siedlungsentwicklung von Iffeldorf herausgegriffen. Die Analyse hat ergeben, dass die Siedlungsfläche in nur 44 Jahren um 124% zugenommen hat, also mehr als eine Verdoppelung in weniger als 5 Dekaden. In Abbildung 6 ist die Siedlungsfläche gegen die Zeit in einem Diagramm dargestellt.

Es ist erkennbar, dass der Entwicklungstrend sich leicht exponentiell verhält und hier möglicherweise bezüglich des Flächenverbrauchs Maßnahmen zu treffen sind.

3.2 Klassifikation von IKONOS-Daten

Im Projekt *AQUATIC* wurden zwei IKONOS-Datensätze vom April 2001 und August 2001 bearbeitet. Es galt zu analysieren, ob diese Daten mit objektorientierten Analysemethoden flächendeckend klassifiziert werden können. Multispektrale IKONOS-Daten haben eine räumliche Auflösung von 4 m und messen in

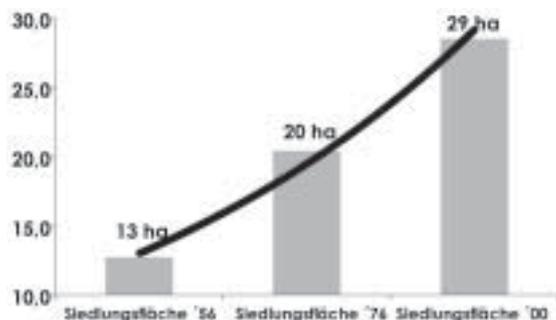


Abbildung 6
Entwicklung der Siedlungsfläche Iffeldorf von 1956 bis 2000

vier Spektralbereichen (blau, grün, rot und nahes Infrarot). Zudem wird ein panchromatischer Kanal (PAN) aufgenommen, der vom blauen Spektrum bis in das nahe Infrarot reicht. Bei diesem liegt die räumliche Auflösung bei 1 m. In der vorgestellten Untersuchung wurden kombiniert PAN und multispektrale Daten rund um die Osterseen bis zum südlichen Ende des Starnberger Sees bearbeitet. Das FFH- und Naturschutzgebiet Osterseen war vollständig abgedeckt. Das Gebiet umfasst eine Fläche von ca. 4500 ha. Hinsichtlich des Klassifikationsmaßstabs sind die Vorgaben des LWF und LfU aus der Kartieranleitung für Lebensraumtypen der FFH-RL berücksichtigt worden. Die Landbedeckungsklassen wurden im Maßstab 1:5000 mit einer Mindestkartiergröße von 0,01 ha erfasst (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ 2003). Dementsprechend wurden die Segmentierungsparameter gewählt.

Um eine Übertragbarkeit und Weiterverarbeitung der Klassifikation zu gewährleisten wurde das Klassenschema am normierten Schlüssel des BfN angelehnt (BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ 1995). Das waren „2000 Binnengewässer“, „4000 landwirtschaftliche Nutzflächen“ („4200 Wiesen- und Weiden“, „4120 Mais“), „6000 Einzelbäume, Feldgehölze, Gebüsche“, „7000 Wälder“ („7100 Laubwald“, „7200 Nadelwald“) und „9000 Siedlung, Verkehr, Freizeit und Erholung“. Die Klasse „Feuchtgebiete“ wurde in diesem Projektteil zusammengefasst betrachtet. Diese stand für „3000 Moor, Sümpfe“, „2100 Ufervegetation“ und „2200 Röhrichtvegetation“. Die Abgrenzung der Feuchtgebiete wurde im Wesentlichen aus den Ergebnissen des Projektpartners der Limnologischen Station übernommen (ANDRESEN et al. 2004).

Bei der Entwicklung der Regelwerke für die Klassentrennung flossen verschiedene Aspekte ein. Bestimmend war das Expertenwissen des Bearbeiters und zahlreiche Literaturangaben (insbesondere BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ 1995) darüber welche Objektattribute typisch oder untypisch für eine Klasse sind. Neben dem Expertenwissen war die Analyse von Testsegmenten entscheidend. Für jede der gesuchten Klassen wurden repräsentative Trainingssegmente ermittelt. Die Auswahl dieser Segmente beruhte auf der Feldkenntnis des Bearbeiters und dem Erscheinungsbild des Segmentes. Mit den in eCognition zur Verfügung stehenden Werkzeugen wurden die Objektattribute der Testsegmente hinsichtlich der Trennbarkeit der Klassen untersucht. Hier waren neben den spektralen Werten, besonders die Texturereigenschaften, d. h. die Grauwertvariationen innerhalb eines Segments, von großer Bedeutung.

Die Klassifikation wurde auf verschiedenen Maßstabsebenen durchgeführt. Vergleichbar der Beschreibung von CURRAN und ATKINSON (2002) wiesen die gesuchten Klassen in den einzelnen Ebenen verschiedene Merkmalsausprägungen auf. Manche der Klassen waren auf einer kleineren Maßstabsebene besser trennbar, als auf einer großmaßstäblichen Ebene.

ne. Dementsprechend wurden drei verschiedene Ebenen erstellt.

Auf der Ebene 1 mit den kleinsten Segmenten wurden Laubbäume von Nadelbäumen unterschieden, da hier die Trennung durch das Spektralsignal am eindeutigsten war. Um Laubbäume und Nadelbäume noch genauer zu unterscheiden wurden Spektralinformationen aus den IKONOS-Datensätzen beider Aufnahmezeitpunkte verwendet. In der Aprilszene waren die Laubbäume unbelaubt. Zudem wurden Schatten in Baumbeständen durch Nachbarschaftsbeziehungen extrahiert. Dies war notwendig, da auf der höheren Ebene 2 mit größeren Segmenten die Baumbestände inklusive Schatten zu „7000 Wälder“ zusammengefasst wurden. Auf Ebene 2 wurden auch „6400 Einzelbäume“ und „6200 Gehölze“ anhand von Nachbarschaftsbeziehungen und Schwellwerten bei den Segmentgrößen diskriminiert.

Ferner wurden auf Ebene 1 kleine versiegelte Flächen klassifiziert. Diese lagen innerhalb von Siedlungsbereichen und Straßenzügen. Auf Ebene 2 wurde diese Information abgefragt und mit weiteren Attributen verknüpft, um „9200 Verkehrsflächen“ und „9100 Siedlung/Gewerbe“ zu klassifizieren. Die Bedingung für diese Klassen war, dass jede einen gewissen Anteil an versiegelten Flächen in den Unterobjekten auf Ebene 1 aufweisen musste. War diese Bedingung erfüllt, so wurde nach Form und Textur geprüft. Bei hoher Textur und deutlich fraktaler Ausprägung des Segments wurde die Klasse „9100 Siedlung/Gewerbe“ zugewiesen. War die Form des Segments länglich oder hatte einen hohen Wert beim Verhältnis Segmentlänge zu Segmentfläche, so wurde die Klasse „9200 Verkehrsflächen“ zugewiesen. Die Unterscheidung von „9100 Siedlung/Gewerbe“ und „9200 Verkehrsflächen“ war zum Teil nicht exakt und beinhaltete auch „9300 Freizeit- und Erholungsflächen“, die sich nicht trennen ließen. So wurden diese Klassen „9100“, „9200“, und „9300“ zur Klasse „9000 Siedlung, Verkehr und Freizeit“ zusammengefasst. Das Siedlungsgrün innerhalb der Siedlungsfläche wurde über Nachbarschaftsbeziehungen integriert.

Auf der dritten Maßstabsebene wurden die Klassen „4200 Wiesen“, Weiden und Grünland“, „4120 Mais“ und „abgeernteter Acker/Rohboden“ klassifiziert. Diese kleinste Maßstabsebene war am besten geeignet um flächige Landbedeckungsklassen zu finden. Durch großflächige Segmente wurde die spektrale Varianz dieser Klassen (z. B. hervorgerufen durch Ackerfurchen oder natürliche Inhomogenitäten) integriert. Zur Klassenbeschreibung dienten neben den spektralen Mittelwerten, auch die Flächengröße und die Form. Wiesen und Weiden weisen meist eine Mindestgröße auf und Äcker tendieren zu rechteckigen oder zumindest kompakten Formen. Diese Eigenschaften sind erst auf der kleinmaßstäblichen Ebene 3 deutlich ausgeprägt und wurden dort entsprechend beurteilt. Auf Ebene 2 wurde wiederum die Information der übergeordneten Ebene 3 abgefragt und zur Klasse „4000 landwirt-

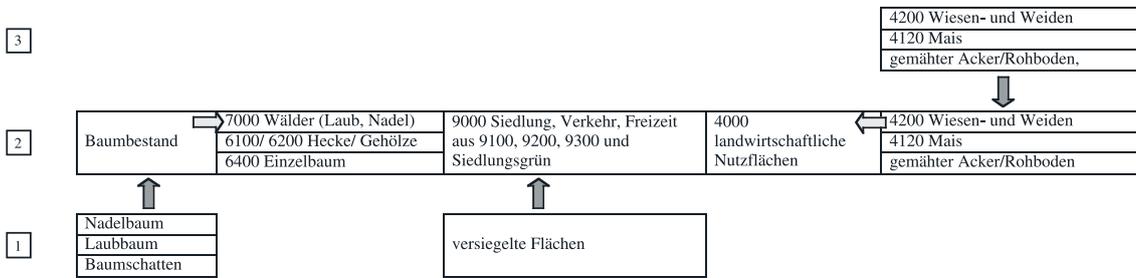


Abbildung 7

Auf Ebene 2 wird die Information aus der kleineren Maßstabebene 3 und der größeren Maßstabebene 1 zusammengeführt. Manche der Objekteigenschaften sind nur bei bestimmten Maßstäben kennzeichnend. So wurde für jeden Landoberflächentyp der optimale Klassifizierungsmaßstab gewählt. Durch Abfrage der Ober- und Unterobjekte wurde Ergebnis anschließend auf Maßstabebene 2 zusammengeführt

schaftliche Nutzflächen“ zusammengefasst. In Abbildung 7 sind die beschriebenen multiskalaren Zusammenhänge schematisiert dargestellt.

Die Genauigkeitsanalyse wurde auf Segmentbasis durchgeführt. Die Auswahl der Referenzsegmente erfolgte über eine Feldkampagne, wobei hier sowohl GPS-Punkte als auch Vor-Ort-Fotografien zur Dokumentation genommen wurden. Insgesamt wurden 282 Segmente ausgewählt, wobei sich diese von den Trainingsflächen unterschieden. Feuchtgebiete und offene Wasserflächen (3000 Moor, Sümpfe, 2100 Ufervegetation und 2200 Röhrichtvegetation, 2000 Binnengewässer) wurden von der Analyse ausgenommen.

Auf höchsten Abstraktionsebene (Klassen 4000, 7000, 9000) wurden hervorragende Genauigkeitswerte von über 98% erreicht (Tab. 3). Nur bei „9000 Siedlungen, Verkehr, Freizeit, Erholung“ erreichte die Genauigkeit einen niedrigeren Wert von 85,2%. Hier traten Verwechslungen mit „4000 landwirtschaftlichen Nutzflächen“ und unklassifizierten Flächen auf. Der Grund mag darin liegen, dass „4200 Weiden und Wiesen“ im Randbereich von Siedlungen fälschlicherweise als Siedlungsgrün ausgewiesen wurden. Des Weiteren war diese Klasse sehr heterogen in ihrer Merkmalsausprägung, weshalb Teile unklassifiziert blieben (3,3%).

Auf einer niedrigeren Abstraktionsebene wurden „Laub-“ und „Nadelbäume“, „6100/6200 Hecke/Gehölze“ und „6400 Einzelbaum“ geprüft. Zudem auch die Unterklassen von „4000 landwirtschaftliche Nutzflächen“. Die Ergebnisse bewegten sich zwischen 80% und 100% und damit im Rahmen dessen was ein erfahrener Photointerprete leisten kann. Hinzuweisen ist allerdings, dass das Computergestützte eCognition Verfahren gewisse Schwachstellen aufweist: die Abstraktionsfähigkeit des Menschen bei der räumlichen Grenzziehung kann nicht nachgeahmt werden. Die automatische Segmentierung bewertet ausschließlich die spektralen Homogenitäten benachbarter

Pixel. Es werden zum Teil Grenzen gezogen, welche ein menschlicher Bearbeiter nicht anfertigen würde. So werden zum Beispiel Straßenzüge unterbrochen, weil sie von Alleebäumen überdeckt sind. Diese Art von (systembedingtem) Fehler lässt sich mit der Hinzunahme thematischer Ebenen ausgleichen. GIS-Daten mit Straßengeometrien existieren landesweit (z.B. ATKIS) und können als Vorinformation integriert werden. Dadurch lässt sich gezielt in sensiblen und veränderlichen Bereichen klassifizieren, während Flächen die über lange Zeiträume unveränderlich sind, einfach übernommen werden.

3.3 Aktualisierung von bestehenden Kartierungen.

Die Zusammenführung und Nutzung von GIS-Daten und der Information aus aktuellen FE Daten im Auswertungsprozess wurde in zahlreichen Studien untersucht (z.B. BUCK et al. 1999, MCNOLEG 1996). Bei der Segmentierung in eCognition lassen sich GIS-Ebenen integrieren und die Information aus diesen im Klassifikationsprozess nutzen. Vektor-Daten können als so genannte thematische Ebenen eingelesen werden. Bei der Segmentierung selbst werden die Grenzen der thematischen Ebenen berücksichtigt, das heißt existente Geometrien übernommen. Die inhaltlichen Attribute der Polygone können zur Klassifikation herangezogen werden.

In dem vorstellten Anwendungsbeispiel wurde ein kleiner Teil der Bayernweiten Seeuferkartierung (SUK) von 1987 im Naturschutzgebiet Osterseen verwendet. Ziel war es zu demonstrieren, dass es möglich ist bestehende Geoinformation zu nutzen und zu aktualisieren. Die Seeuferkartierung lag digital im ArcView-Shape Format vor und konnte direkt in den Klassifikationsprozess integriert werden. Die Aktualisierung wurde beispielhaft für Gehölz- und Waldstrukturen durchgeführt. Die Basisklassen der SUK waren „Azonale Gehölze“ und „Wald/Forst“. Der Vektordatensatz

Benutzer- / Prod.genauigkeit	4000 lw Nutzfl.	9000 Siedlung, ...	7000 Wälder	unklassif.
4000 lw Nutzfl.	98,4% / 99,6%	0% / 0%	0% / 0%	10,4%
9000 Siedlung, ...	1,6% / 6,8%	100% / 85,2%	1,2% / 4,7%	3,3%
7000 Wälder	0% / 0%	0% / 0%	98,8% / 99,5%	0,5%

Tabelle 3

Benutzer- und Produzentengenauigkeit auf der höchsten Abstraktionsebene

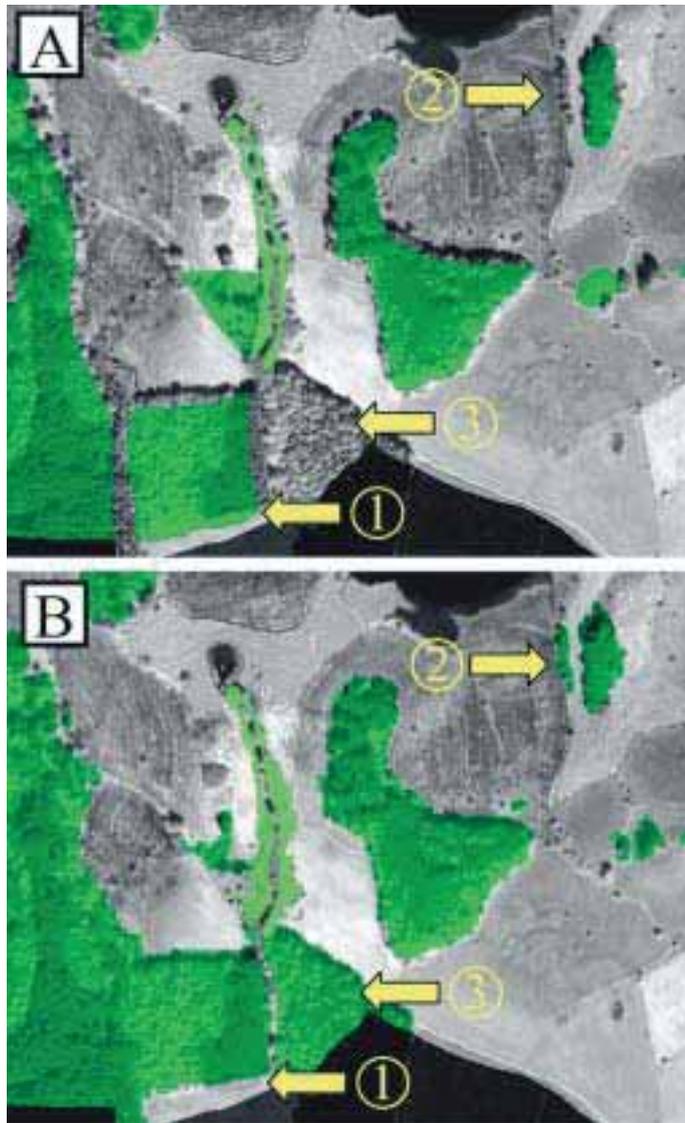


Abbildung 8

(A) zu sehen ist die Seeuferkartierung (SUK) aus dem Jahr 1987 über einer IKONOS-PAN Szene aus dem Naturschutzgebiet Osterseen. Hellgrün angezeigt wird die Klasse „Azonale Gehölze“, dunkelgrün die Klasse „Wald/Forst“. Dunkel unterlegt ist der Bereich, der nicht von der SUK erfasst wurde. Erkennbar sind Lageungenauigkeiten (1), nicht erfasste Strukturen (2). Der Wald bei (3) ist in der SUK als „Wiese/Weide deklariert (nicht dargestellt). In (B) ist die aktualisierte Klassifizierung dargestellt. Die vorhandenen Abgrenzungen wurden genauer erfasst und erweitert (1, 2, 3)

wies verschiedene „Problemzonen“ auf. Verglichen mit den aktuellen IKONOS-Daten traten Lagefehler und ungenaue Geometrien auf. Diese geometrischen Ungenauigkeiten sind durch die Herangehensweise von 1987 bedingt, da die SUK nicht digital erstellt wurde und hier systembedingte Fehler auftauchten. In Teilbereichen wurde auch inhaltlicher Aktualisierungsbedarf festgestellt. Zum Teil wurden Baumgruppen und Gehölze nicht erfasst. Manche der Flächen, die 1987 als „Wiese/Weide“ deklariert wurden, sind eindeutig der Klasse „Wald/Forst“ zu zuweisen (und müssen aufgrund der Baumgrößen schon damals existiert haben).

Das Regelwerk für die Klassen „Azonale Gehölze“ und „Wald/Forst“ basierte auf den Informationen der SUK. Man ging davon aus, dass diese Klassen im Naturschutzgebiet weitgehend unberührt blieben. Innerhalb der Ausdehnung der Basisklassen in der SUK wurden die aktuellen Spektral- und Texturwerte der IKONOS-Daten abgefragt. Waren die Werte plausibel für Gehölze und Bäume, so wurde die Information der SUK als „richtig“ übernommen. In Be-

reichen in welchen die Spektralwerte mehr für einen anderen Nutzungstyp sprachen, wurde die Grenze aktualisiert. Im nächsten Schritt ging man dann von der Nachbarschaft und Distanz bereits gefundener Regionen aus. Waren in der Nähe einer bereits als „richtig“ befundenen Struktur weitere Gehölze oder Bäume, so wurden diese der nächstgelegenen Klasse entsprechend zugewiesen. Auf diese Weise wurden die Ausdehnungen der Klassen „Azonale Gehölze“ und „Wald/Forst“ erweitert. Es konnten weitere Baumgruppen erfasst werden und vom heutigen Standpunkt falsche Klassifizierungen aktualisiert werden (Abb. 8).

Eine visuelle Überprüfung ergab, dass wenige Einzelbäume nach wie vor nicht erfasst wurden, aber insgesamt die Ausdehnung der Klassen wesentlich genauer war. Dies gilt vor allem in Bezug auf die Bereiche, die 1987 als „Wiese/Weide“ deklariert wurden.

In dieser Detailstudie wurde gezeigt, dass eine Aktualisierung der Flächenabgrenzungen automatisiert möglich ist. Auch Ungenauigkeiten bei der Co-Registrierung verschiedener Datensätze können durch ge-

schickte Formulierung von Distanzbeziehungen vernachlässigt werden. In dieser Studie wurden allerdings nur Ansätze für „Azonale Gehölze“ und „Wald/Forst“ erarbeitet. Eine Weiterentwicklung der Regelwerke hinsichtlich weiterer Klassen der SUK ist denkbar.

4. Schlussfolgerung

Anhand von Anwendungsbeispielen wurden Möglichkeiten Objektorientierter Analysemethoden bei hochauflösenden Fernerkundungsdaten untersucht. Verschiedene Datengrundlagen wurden, teils unter Hinzunahme von externer Zusatzinformation, erfolgreich bearbeitet. Es wurde gezeigt, dass sich auch höchstauflösende FE-Daten mit automatisierten Methoden bei sehr guten Genauigkeiten klassifizieren lassen. Des Weiteren ist die Aktualisierung und Fortschreibung von bestehenden GIS-Daten ein potentielles Einsatzfeld. Dies ist insbesondere in Zusammenhang mit Monitoring- und Berichtspflicht entsprechend der FFH-Richtlinie interessant. Fernerkundungsanwendungen können hier unterstützende Informationen liefern, vor allem bezüglich der Ausdehnung eines Lebensraums oder etwaigen Veränderungen innerhalb einer sensiblen Zone. Mit der Objektorientierten Methode ist es möglich über eine große Fläche die Geometrien auf Vektor-Basis zu ermitteln und entsprechende (Vor-)Klassifikationen zu liefern. Diese können zum Beispiel den Kartierer im Gelände unterstützen. Eine manuelle Delinierung kann so auf ein Minimum reduziert werden. Existieren bereits GIS-Daten über ein Gebiet, wie zum Beispiel die Bayernweite Seeuferkartierung aus den 80er Jahren oder die Biotopkartierung von Bayern, so ist es möglich diese Information zu nutzen. Besonders im Bereich des Monitoring können, wenn eine Erstinventur bereits abgeschlossen ist, FE-Daten Hinweis auf Veränderungen oder Verschlechterung eines Lebensraums liefern.

Die Klassifikation von Luftbildern wurde bisher hauptsächlich von menschlichen Photointerpretern durchgeführt. Unter Nutzung objektorientierter Methoden ist die automatisierte Auswertung in greifbare Nähe gerückt. Die zusätzlich verfügbaren Objekteigenschaften erlauben eine detaillierte geometrische, als auch inhaltliche Informationsextraktion bei sehr guten Genauigkeiten. Es wurde gezeigt, dass sich Luftbilder für großmaßstäbliche Klassifikationen eignen und durch die Bearbeitung historischer Luftbilder auch Entwicklungstrends ableiten lassen (ANDRESEN et al. 2004., ROGG 2003). Bayern wird seit dem Jahr 2002 flächendeckend im dreijährigen Turnus durch Farbluftbildbefliegungen erfasst. Das bedeutet, dass diese Datengrundlage auch in Zukunft konstant und regelmäßig verfügbar ist. Dies ist eine Voraussetzung für regelmäßiges Monitoring. Mit den hier vorgestellten Methoden lässt sich

diese Datenquelle automatisiert nutzen und so Veränderungen feststellen.

Hochauflösende IKONOS-Daten sind ebenfalls automatisiert, bei sehr guten Genauigkeiten auswertbar. Die Nutzung von multisaisonalen Daten aus verschiedenen Vegetationsperioden erlaubt ein wesentlich differenzierteres Bild der Landschaft. Durch die Integration von Expertenwissen bei der Klassifikation lassen sich genaue thematische Aussagen treffen. Die Landbedeckung wird sowohl qualitativ, quantitativ als auch geometrisch erfasst. Die Aussagen lassen sich entsprechend dem Informationsbedarf hierarchisch strukturieren. Je nachdem, welche Abstraktionsebene (z.B. „Maisanbaufläche“, „Grünland“, ... „Landwirtschaft“) oder Maßstabsebene (z.B. „Einzelbäume“ („Baumbestand“) gefragt ist.

Eine operationelle Anwendung von Fernerkundung erfordert jedoch eine gewisse „Standardisierung“ der gemessenen Bilddaten. Die „instabilen“ Einflüsse müssen minimiert werden. Eine genaue Kalibrierung der Daten muss das Ziel sein, um eine Übertragbarkeit von Klassifikationsregelwerken zu gewährleisten. Die Modellierung der Einflüsse soll es möglich machen die Reflektionsmesswerte zu normalisieren, also in physikalische und reproduzierbare Werte umzurechnen. Diese Werte sind dann idealerweise Ausgangspunkt einer fernerkundlichen Analyse. Ist dies einmal gegeben so wäre der konsequente nächste Schritt der Aufbau einer Datenbank mit Klassifikationsregelwerken. Diese könnte Information für verschiedenste Landbedeckungsklassen in unterschiedlicher Detailtiefe und zur jeweiligen Vegetationsperiode enthalten.

Das hier vorgestellte Gesamtkonzept kann als eine Art integrativer Ansatz verstanden werden. Bereits vorhandene (Geo-)Information wurde verwendet und weiterverarbeitet. Vorliegendes Wissen wird also gezielt in den Klassifikationsprozess integriert. Dies ist zum einen das Wissen eines Experten um die Merkmalsausprägung und Wechselbeziehungen eines Landbedeckungstyps. Zum anderen kann Vorinformation in digitaler Form vorliegen, wie Oberflächenmodelle oder GIS-Kartierungen (z.B. ATKIS, SUK, Biotopkartierung, etc.). Die Berücksichtigung kombinierter Informationsquellen schafft dem Nutzer ein Informationsplus („value-adding“), verglichen mit der isolierten Betrachtung einzelner Datenquellen.

5. Danksagung

Diese Studie ist im Rahmen des Projektes *AQUATIC* entstanden, welches durch das BMBF gefördert wird. Projektnummer: 50 EE 0040 & 50 EE 0041. Vielen Dank auch an die Diplomanden Caroline Rogg und Florian Löschenbrand.

6. Literatur

- ANDRESEN, T.; C. MOTT, S. ZIMMERMANN, T. SCHNEIDER & A. MELZER (2004): Erfassung und Beurteilung von aquatischen und terrestrischen Feuchtgebieten mit sehr hoch auflösenden FE-Daten. ANL Fachtagung: Erfassung und Beurteilung von Seen und deren Einzugsgebiet mit Methoden der Fernerkundung, Laufen.
- BAATZ, M.; U. BENZ, S. DEGHANI, M. HEYNEN, A. HÖLTJE, P. HOFMANN, I. LINGENFELDER, M. MIMLER, M. SOHLBACH, M. WEBER & G. WILLHAUK (2002): eCognition User Guide 3. München.
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ, B. L. F. W. U. F. (2003): Kartieranleitung für die Lebensraumtypen nach Anhang I der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie in Bayern.
- BLASCHKE, T.; S. LANG, E. LORUP, J. STROBL & P. ZEIL (2000): Object-oriented image processing in an integrated GIS/remote sensing environment and perspectives for environmental applications. In: Cremers, A., Greve, K. (2000): Environmental Information for Planning, Politics and the Public. Marburg.
- BUCK, A.; R. DE KOK, T. SCHNEIDER & U. AMMER (1999): Improvement of a forest GIS by integration of remote sensing data for the observation and inventory of „protective forests“ in the Bavarian Alps. IUFRO Conference on Remote Sensing and Forest Monitoring, Rogow, Poland.
- BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (1995): Systematik der Biotoptypen- und Nutzungstypenkartierung (Kartieranleitung). Bonn-Bad Godesberg.
- CURRAN, P. J. & P. M. ATKINSON (2002): Issues of scale and optimal pixel size. In: Stein, A., van der Meer, F.D., Gorte, B. (2002): Spatial Statistics for Remote Sensing. Dordrecht, Boston, London, S.115-133.
- DE KOK, R.; T. SCHNEIDER, M. BAATZ & U. AMMER (1999): Object based image analysis of high resolution data in the alpine forest area. Joint WSf ISPRS WG I/1, I/3 und IV/4: SENSORS AND MAPPING FROM SPACE 1999, Hannover, Deutschland.
- GURNEY, C. M. & J. R. G. TOWNSHEND (1983): The Use of Contextual Information in the Classification of Remotely Sensed Data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.49, 1, S.55-64.
- KANGLER, G. (2003): Historisch-geographische Landschaftsanalyse mit GIS als Grundlage für Naturschutzplanung – dargestellt am Gebiet um die Osterseen –. Diplomarbeit, Limnologische Station, TU München, Freising/Weihenstephan.
- MCNOLEG, O. (1996): The Integration of GIS, Remote Sensing, Expert Systems and Adaptive Co-Kriging for Environmental Habitat Modeling of the Highland Haggis using Object-Oriented, Fuzzy-Logic and Neural-Network Techniques. Computers & Geosciences, Vol.22, 5, S.585-588.
- MOTT, C.; T. ANDRESEN, S. ZIMMERMANN, T. SCHNEIDER & U. AMMER (2002): „Selektives“ region growing – ein Objektorientierter Klassifikationsansatz. Angewandte Geographische Informationsverarbeitung (AGIT), Heidelberg, XIV, S.363-368.
- ROGG, C. (2003): Monitoring von naturschutzrelevanten Flächen mit Hilfe Objektorientierter Bildanalyse anhand s/w-Luftbilder im NSG Osterseen. Diplomarbeit, Limnologische Station, TU München, Iffeldorf, 123 S.
- SCHNEIDER, T.; R. DE KOK, A. BUCK & I. MANAKOS (2000): Objektorientierte Bildanalyse – Paradigmawechsel in der thematischen Auswertung von Erdbeobachtungsdaten ? In: Lehrstuhl für Landnutzungsplanung und Naturschutz (2000): Landnutzungsplanung und Naturschutz. Aktuelle Forschungsberichte. Festschrift zur Emeritierung von Professor Dr. Ulrich Ammer. Freising, S.234-258.
- SCHNEIDER, W. & J. STEINWENDNER (1999): Landcover Mapping by Interrelated Segmentation and Classification of Satellite Images. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.32, 7-4-3 W6.
- TON, J. C.; J. STICKLEN & A. K. JAIN (1991): Knowledge-Based Segmentation of Landsat Images. Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.29, 2, S.222-232.

Anschrift der Verfasser:

Claudius Mott
Lehrstuhl für Landnutzungsplanung und Naturschutz
Am Hochanger 13
85354 Freising
e-mail: Claudius.Mott@lrz.tum.de

Physikalisch basierte Prozessierung multispektraler Fernerkundungsdaten von Binnengewässern

Thomas HEEGE¹⁾²⁾, Clivia HÄSE³⁾, Anke BOGNER¹⁾, Nicole PINNEL²⁾

1. Einführung

Die Fernerkundung leistet mit der zeitlich und räumlich aufgelösten Kartierung und Bilanzierung Beiträge zur Erforschung und Überwachung von Gewässern. Fernerkundungsprodukte können zur Bio-Indikation genutzt werden, um den Zustand von Seen zu bewerten. So sind zum Beispiel die per Fernerkundung zugängliche Biomasse oder die Primärproduktion des Phytoplanktons ein wichtiger Indikator für die Trophie und hierüber auch für die Wasserqualität aquatischer Ökosysteme. Das gleiche gilt für die Häufigkeits- und Artenverteilung der Vegetation in Flachwasserbereichen: Flächendeckende Kartierungen werden zur ökologischen Bewertung von Gewässern genutzt. Mit traditionellen Kartierungsmethoden bedeutet dies einen hohen Personal-, Zeit- und Finanzierungsaufwand. Zusätzlich ist die räumliche Auflösung und Flächendeckung bei solchen Einsätzen begrenzt. Daher werden sie an großen Gewässern wie dem Bodensee zusätzlich durch Luftbilder unterstützt, die bislang personalintensiv visuell ausgewertet werden mussten.

Aktuelle Forschungsaktivitäten in der Gewässerfernerkundung konzentrieren sich folglich auf die Entwicklung von übertragbaren und automatisierbaren, volldigitalen Auswertemethoden. Damit Herstellungskosten und die Qualität von Fernerkundungsprodukten kalkulierbar werden, müssen operationelle Prozessketten standardisierte und vergleichbare Datenprodukte erzeugen. Erst dadurch wird eine kosteneffektive Auswertung möglich. In Binnengewässern beeinflusst die Vielfalt der Wasserinhaltsstoffe, der Flachwasserzonen (Vegetationsarten, Wassertiefe, ...), der Aufnahmebedingungen (Atmosphäre, Wasseroberfläche, Aufnahmegeometrie, ...) die über Fernerkundungssysteme messbaren Größen auf sehr komplexe Weise. Daher sind hier physikalisch basierte Verfahren für eine effektive Datenauswertung erforderlich.

In diesem Artikel wird eine physikalisch basierte Prozesskette vorgestellt. Anhand verschiedener Anwendungsbeispiele und multitemporaler Auswertungen sollen die Vorteile der Übertragbarkeit und der

Modularität mit flexiblen Erweiterungsmöglichkeiten, aber auch derzeitige Grenzen verdeutlicht werden. In der Anwendung werden Wasserinhaltsstoffe, die Produktionsraten des Phytoplanktons und die submerse Vegetation in Uferzonen in hoher räumlicher Auflösung kartiert.

2. Modular Inversion Program

Das Modular Inversion Program (MIP) ist eine Entwicklungs- und Prozessierungssoftware für Produkte aus multispektralen Fernerkundungsdaten. Inversion bedeutet, dass aus den vom Fernerkundungssensor gemessenen Signalen zurückgeschlossen wird auf die ihnen zugrunde liegenden physikalischen Ursachen: dies sind die optischen Prozesse basierend auf den stofflichen optischen Eigenschaften der Bestandteile in den Medien Atmosphäre und Wasserkörper. Bestandteile wie Wasserinhaltsstoffe können dann über ihre stoffspezifischen optischen Materialkonstanten quantitativ berechnet werden.

Die Architektur des Programm-Systems besteht aus übertragbaren physikalischen Algorithmen, die von den Inversionsprogrammen genutzt werden. Die invertierbaren Parameter sind verschiedene Bestandteile der Atmosphäre, des Wasserkörpers und der Seegrund – oder Bodenbedeckung.

Programm-Module existieren zur Berechnung von Aerosolen, zur Korrektur von atmosphärischen Einflüssen und von Wasseroberflächen-Spiegelungen, zur Berechnung von Wasserinhaltsstoff-Konzentrationen, von Produktionsraten des Phytoplanktons, in Flachwasserbereichen auch zur Wasserkörper-Korrektur und zur Klassifikation von submersen Makrophyten und Bodensedimenten. Diese Programm-Module sind teilweise iterativ verknüpft. Sie werden über Kontroll-Dateien gesteuert und erlauben so die Stapel-Verarbeitung von Bilddaten.

Die interne Software-Struktur von MIP ist ebenfalls modular aufgebaut, so dass verschiedene Funktionen sowohl separat wie auch gekoppelt verwendet werden können. Wichtige interne Module sind Programm-

¹⁾ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR Oberpfaffenhofen), Institut für Methodik der Fernerkundung, Postfach 1116, 82230 Wessling, E-Mail: thomas.heege@dlr.de

²⁾ Technische Universität München, Limnologische Forschungsstation Iffeldorf, Hofmark 3, 82393 Iffeldorf

³⁾ GKSS Forschungszentrum GmbH, Max-Planck-Straße 1, 21502 Geesthacht

Bibliotheken der verschiedenen Algorithmen, der mathematischen Funktionen und Optimierungsverfahren für die Inversion, Funktionen für die Interaktion verschiedener Datensätze und für die Nutzung von Daten verschiedenster optischer Fernerkundungssensoren. Aktuelle MIP Entwicklungen konzentrieren sich auf die Prozessierung von hyperspektralen Sensordaten.

3. Bildanalyse und Produkte

Das Prozessierungssystem wurde am Bodensee mit Datensätzen des multispektralen flugzeuggestützten Scanners DAEDALUS AADS 1268 (11 Spektralkanäle, 5 VIS Kanäle bei 435, 485, 560, 615, 660 nm, FOV +/- 43°) getestet. Die DAEDALUS Daten wurden zwischen 1996 und 2002 aufgenommen und am DLR Oberpfaffenhofen prozessiert. Die Vor-Prozessierung (Kalibration, Maskierung, Georeferenzierung) wurde mit der Bildverarbeitungssoftware XDI-BIAS des DLR ausgeführt. Die folgenden Abbildungen zeigen Ergebnisse der Inversion und Datenprozessierung.

3.1 Wasserinhaltsstoffe im Bodensee

Im Ost-Teil des Bodensees finden sich häufig große räumliche Konzentrationsunterschiede von Wasserinhaltsstoffen. Abbildung 1 zeigt die aus DAEDALUS-Daten berechneten Wasserinhaltsstoffe für Phytoplankton-Pigmente (P) und Schwebstoffe (S) am 16. April 1996 zum Zeitpunkt der Phytoplankton-Frühjahrsblüte. Auffällig ist die unterschiedliche räumliche Verteilung von P und S: Aufgrund des komplexen, nicht-linearen Zusammenhangs zwischen den Wasserinhaltsstoffen und der Wasserfarbe kann für solche Gewässer nur mit physikalisch basierten Algorithmen eine operationelle und quantitative Auswertung von Fernerkundungsdaten erfolgen. Im Nordosten sieht man die höchsten Schwebstoffkonzentrationen, die aus dem Zufluss des Alpenrheins stammen und somit anorganischen Ursprungs sind. Die Phytoplankton-Verteilungen sind größtenteils unabhängig von den Schwebstoffen. Allerdings beobachtet man bei hohen Phytoplankton-Konzentrationen ebenfalls einen leichten Anstieg von Schwebstoffen, da Phytoplankton aus partikulärem Material besteht und hier den organischen Teil der Schwebstoffe bildet. Hohe Konzentrationen von Phytoplankton werden hauptsächlich im südlichen Teil des Bildes und ausgehend von den Flachwasserzonen gefunden. Dies könnte darauf hinweisen, dass sich die Frühjahrsblüte im Bodensee aus den Flachwasserbereichen heraus entwickelt. Eine entsprechende These wird seit Jahrzehnten von Biologen und Hydrophysikern diskutiert, ist jedoch ohne räumlich und zeitlich aufgelöste Messungen, wie sie die Fernerkundung liefern kann, schwer nachzuweisen.

Zur Validation der Fernerkundungsdaten wurden in situ Wasserproben während verschiedener DAEDALUS Überflüge entnommen und auf die optisch do-

minanten Wasserinhaltsstoffe S (Schwebstoffe), P (Phytoplankton-Pigmente, hier Chlorophyll a und Phäophytin), Y (Gelbstoffe – gelöste farbgebende Stoffe) analysiert. Auf der anderen Seite wurden die multitemporalen Fernerkundungsdatensätze alle in der gleichen Weise und unabhängig von den in situ Messungen prozessiert. Abbildung 2 zeigt den Vergleich zwischen den in situ Daten und den Fernerkundungsdaten für verschiedene Befliegungstermine und an verschiedenen Messpunkten im See. Die Standardabweichung für Schwebstoff liegt bei 0.6 mg/l (22%), für Chlorophyll bei 1 µg/l (17%). Dies ist ein relative geringer Fehler angesichts der Tatsache, dass die Wasserproben zum Teil mit einer zeitlichen Diskrepanz von bis zu 5 Stunden von den Überflügen entnommen wurden. Eine Differenzierung zwischen Gelbstoff und Chlorophyll war mit den Daten des DAEDALUS Scanners nicht möglich, da seine spektrale Auflösung mit nur vier nutzbaren Kanälen im sichtbaren Spektralbereich zu gering ist. Darum musste im Inversionsalgorithmus der Gelbstoff konstant gehalten werden. Im Fall der Klarwasserphase am 30.5.96 mit hohen Schwankungen von Detritus und Gelbstoff im Bodensee konnte daher kein zuverlässiges Ergebnis für die Phytoplankton-Verteilung berechnet werden. Mit hyperspektralen Fernerkundungssensoren, bei denen mehr Spektralkanäle für die Inversion genutzt werden können, sollten die drei optisch dominanten Wasserinhaltsstoffe quantitativ und unabhängig voneinander berechnet werden können.

3.2 Primärproduktion des Phytoplanktons

Zur Berechnung der Produktionsraten des Phytoplanktons wurde ein Algorithmus entwickelt, der die Gesamtproduktionsrate der Wassersäule aus den der Fernerkundung zugänglichen Parametern berechnet. Die der Fernerkundung zugänglichen Größen sind u. a. die oberflächennahen Konzentrationen von Wasserinhaltsstoffen einschließlich Chlorophyll des Phytoplanktons und die einfallende Sonnenstrahlung (PAR – photosynthetically active radiation). Modellparameter wie die Lichtabschwächung im Wasserkörper werden physikalisch aus diesen Eingabegrößen in der Prozesskette berechnet. Die benötigten physiologischen Parameter des Phytoplanktons, wie die lichtgesättigte Photosyntheserate, wurden aus einem langjährigen Satz von Messungen am Bodensee bestimmt. Aufgrund ihrer deutlich geringeren Schwankungsbreite verglichen mit der Chlorophyllkonzentration konnten die physiologischen Parameter ohne größere Einbuße in der Genauigkeit als konstant angesetzt werden. Ob dieses Verfahren auf andere Gewässer übertragbar ist, muss im Einzelfall anhand von Messungen überprüft werden.

Für das Anwendungsbeispiel in Abbildung 2 wird die Fernerkundungsaufnahme vom 16. April 1996 (siehe Abbildung 1) zur Berechnung der Produktionsraten verwendet. Beim Vergleich mit den Verteilungsstruk-

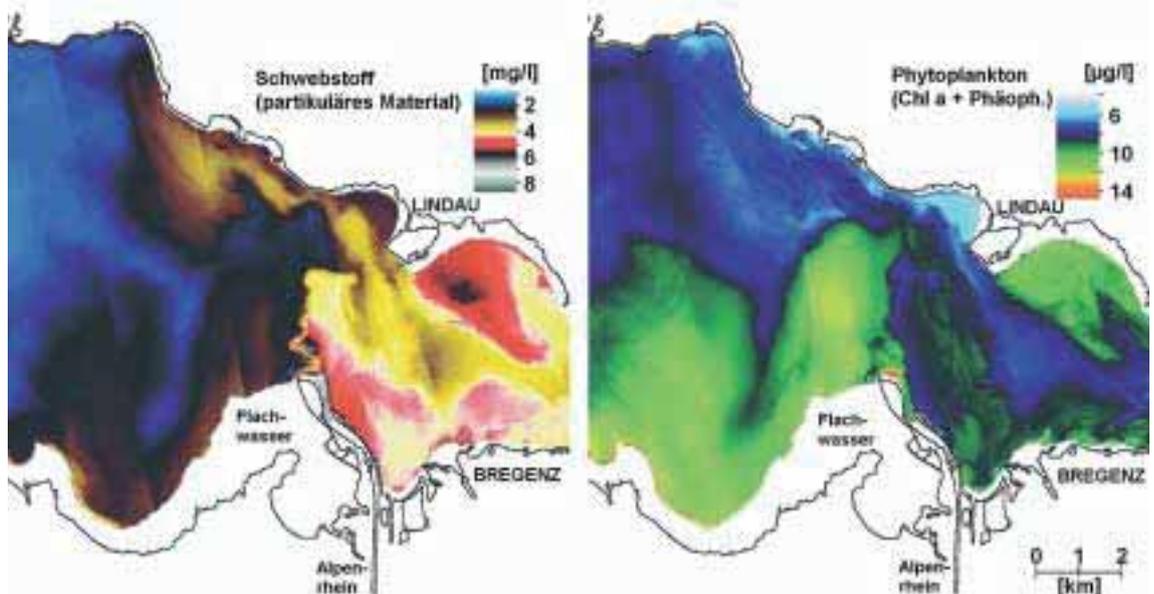


Abbildung 1

Verteilung der Wasserinhaltsstoffe Schwebstoff und Phytoplankton-Pigmente im östlichen Bodensee am 16.4.1996, 12:30 MEZ

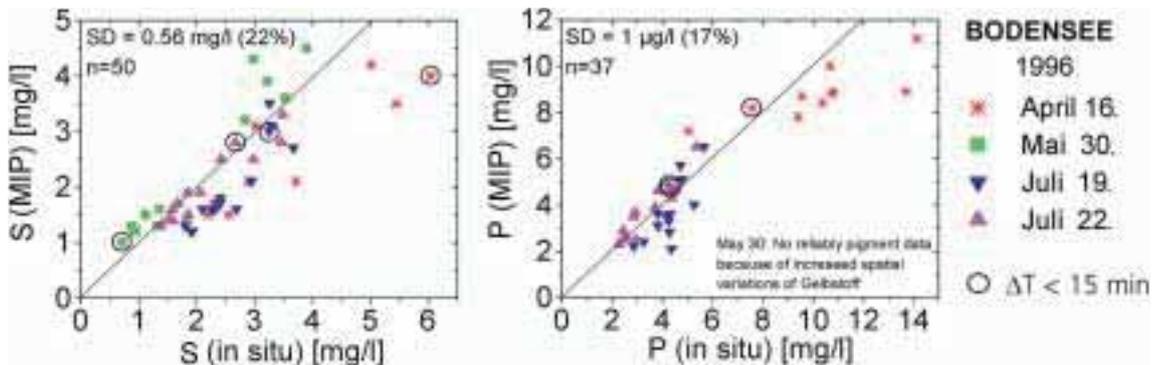


Abbildung 2

Vergleich der Konzentrationen von Schwebstoff und Phytoplankton-Pigmenten (Chlorophyll a und Phäophytin) zwischen Fernerkundungsmessungen (berechnet mit MIP) und Laboranalysen von Wasserproben

turen der Wasserinhaltsstoffe aus Abbildung 1 werden die zwei wichtigsten Einflussfaktoren auf die Primärproduktion veranschaulicht: A) Mit steigendem Chlorophyll-Gehalt (P) steigt die Produktion. B) Die Wassertrübung – im Nord-Osten der Szene vorrangig durch anorganische Schwebstoffe verursacht – verringert das verfügbare Licht und damit die Produktionsraten. Dieser Effekt ist auch im Bereich der erhöhten Phytoplankton-Konzentrationen östlich der Insel Lindau dominant.

Die Validation der auf Fernerkundungsdaten angewandten Methode zur Berechnung der Primärproduktion steht noch aus. Bei Verwendung der Methode mit entsprechenden in situ gemessenen Eingabedaten aus dem langjährigen Bodensee-Datensatz wurde ein mittlerer Fehler von 22% für die Berechnung der Produktionsraten gegenüber den in situ-Inkubationen (Radiocarbon-Methode) bestimmt.

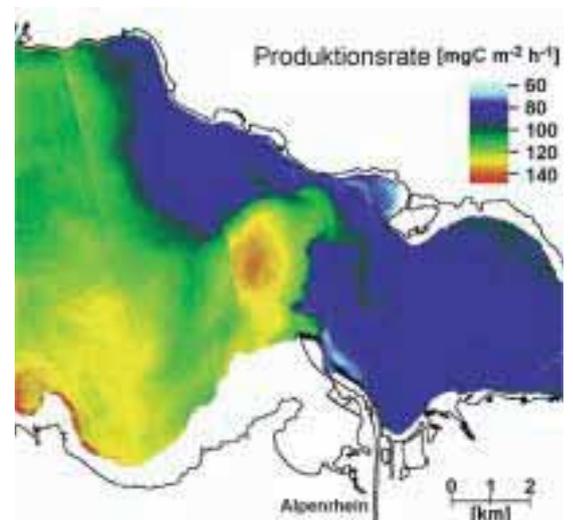


Abbildung 3

Verteilung der Produktionsraten des Phytoplanktons im Bodensee am 16.4.1996

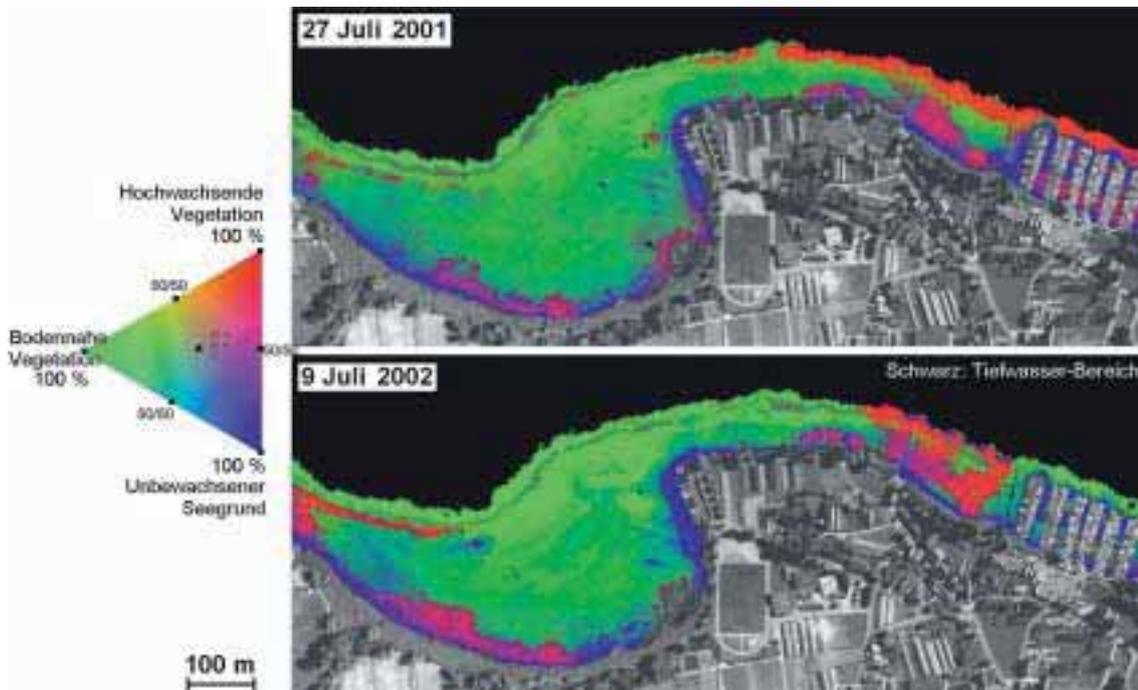


Abbildung 4

Bedeckung des Seegrundes im Flachwasserbereich nördlich der Insel Reichenau. Vergleich der Prozessierungsergebnisse von DAEDALUS-Aufnahmen im Juli 2001 und 2002

3.3 Unterwasser-Vegetation in Flachwasser-Bereichen

Abbildung 4 zeigt ein Anwendungsbeispiel zur Kartierung von submersen Makrophyten im Flachwasserbereich um die Insel Reichenau (Bodensee). Spezielle MIP-Module korrigieren in dieser Anwendung den Einfluss der Wassersäule auf das Reflexionssignal, ermöglichen die Berechnung der Reflexionseigenschaften des Seegrundes und interpretieren diese Spektren dann als Mischsignal aus verschiedenen Sediment- oder Bewuchsklassen. Im Ergebnisbild werden Klassen von bodennahen Makrophyten (*Characeen*) in der Farbe grün, von hoch wachsenden Makrophyten (hier: hauptsächlich *Potamogeton perfoliatus* & *pectinatus*) in rot und unbedeckte Seegrund-Sedimente in blau dargestellt (siehe Farbdreieck in Abbildung 4). Mischungen der drei Farben entsprechen den Mischungs-Verhältnissen der Bodenbedeckung zwischen den drei Klassen. Jeder Bildpunkt enthält also Informationen über den Bedeckungsgrad aller Klassen gleichzeitig, wobei die Summe der Bodenbedeckung immer 100 Prozent ist. Aufgrund der unterschiedlichen Wuchshöhe und dem Einfluss der Wassersäule auf das Signal konnten die beiden Makrophytengruppen der *Characeen* und der Gattung *Potamogeton* sehr gut unterschieden werden trotz der spektralen Limitierungen des DAEDALUS Sensors.

Abbildung 4 zeigt einen Ausschnitt eines dreijährigen Datensatzes der Seegrund-Bedeckung in den Flachwasserzonen der Insel Reichenau. Wiederum wurden die multitemporalen DAEDALUS-Datensätze in einem automatisierbaren Verfahrensablauf pro-

zessiert. In der Abbildung können zwischen den Jahren 2001 und 2002 kleine räumliche Veränderungen im Bewuchs der submersen Vegetation erkannt werden, jedoch bleiben wichtige Merkmale bestehen. Der Bodenbewuchs konnte unter den Bedingungen zum Befliegungszeitpunkt bis zu einer Wassertiefe von 4,5 m kartiert werden. Dies entspricht in etwa der maximalen optischen Tiefe, aus der plausible Reflexionsspektren nach der Wasserkorrektur hergeleitet werden können. Obwohl zur Prozessierung (noch) Zusatzdaten über die Bodentiefe benötigt werden, zeigt die multitemporale Auswertung, dass die Datenverarbeitung und Auswertung stabile und vergleichbare Ergebnisse hervorbringt. Alle wesentlichen Strukturen werden richtig erkannt. Eine systematische Validation ist neben der Weiterentwicklung des Systems Inhalt der derzeit laufenden Projekte in Kooperation mit den Universitäten Hohenheim und Konstanz.

An der limnologischen Forschungsstation der TU München wird derzeit untersucht, inwieweit sich einige Makrophyten-Arten durch spezifische Signaturen der Reflexionsspektren mit Hyperspektralsensoren unterscheiden lassen. Solche Informationen kämen einer Verbesserung von Bio-Indikationsbestimmungen mit Fernerkundungsmethoden zugute. Damit könnte die Fernerkundung Monitoring-Programme, wie sie z. B. für die Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie erforderlich sind, effektiver unterstützen.

Die Übertragbarkeit und Anwendung der Fernerkundungsmethoden auf unterschiedliche Gewässer in Süddeutschland wird derzeit untersucht. Bereits jetzt lassen die vorliegenden Ergebnisse erwarten, dass phy-

sikalisch basierte Algorithmen in der Fernerkundung eine effektive Operationalisierung der Datenauswertung für verschiedene Gewässertypen und Aufnahmebedingungen ermöglichen werden.

4. Danksagung

Diese Arbeiten wurden bzw. werden gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG in dem Sonderforschungsbereich (SFB) 454 „Bodensee-Litoral“, im SFB 248 „Stoffkreislauf des Bodensees“, vom Bayerischen Staatsministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst in der HighTechOffensive Oberbayern („Einsatz angewandter Gewässerfernerkundung: Pilotprojekt Waging-Tachinger See“, Haushaltsnr. 000290), im Kooperationsvorhaben Universität Hohenheim & DLR Oberpfaffenhofen „EFPLUS“ („Entwicklung von automatisierbaren Fernerkundungsverfahren zur Unterstützung von Planungsprozessen in der Uferzone von Seen“, Projektträger BWPlus/Baden Württemberg, Förderkennzeichen BWC21011) und im ENVOC-Verbundprojekt („A new view of the oceans“), gefördert durch das BMBF und dem HGF-Strategie-Fond. Ein besonderer Dank gilt allen Projektpartnern sowie Prof. M. Tilzer, Dipl. Biol. S. Wolfer (Univ. Konstanz) für die Unterstützung mit in situ Daten, Prof. J. Fischer und Dr. T. Heinemann (Freie Universität Berlin) für die Unterstützung mit dem Matrix Operator Model MOMO und Dipl. Phys. V. Amann (DLR Oberpfaffenhofen) für die Flugplanung und Operation des DAEDALUS-Scanners.

5. Literatur

HEEGE, Thomas (2000): Flugzeuggestützte Fernerkundung von Wasserinhaltsstoffen am Bodensee. (Dissertation, Freie Universität Berlin), publiziert als DLR-Forschungsbericht Vol.2000-40, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Köln.

HEEGE, Thomas & Jürgen FISCHER (2004): Mapping of water constituents in Lake Constance using multispectral airborne scanner data and a physically based processing scheme. Canadian Journal of Remote Sensing CJRS, Vol. 30, No. 1, pp. 1-10 (im Druck)

HEEGE, Thomas; Anke BOGNER & Nicole PINNEL (2003): Mapping of submerged aquatic vegetation with a physically based process chain. Proc. Remote Sensing 2003, September 8-12 2003, Barcelona, Spain. Edited by E. Kramer. SPIE – The International Society for Optical Engineering, Vol. 5233, CD-ROM proceedings

HEEGE, Thomas; Clivia HÄSE, Anke BOGNER & Nicole PINNEL (2003): Airborne multi-spectral sensing in shallow and deep waters. Backscatter, Vol. 14, No.1, pp. 17-19

Anschriften der Verfasser:

Siehe Fußnoten auf Seite 67

Fernerkundung von Wasserinhaltsstoffen

Peter GEGE

Es gibt drei Klassen von Wasserinhaltsstoffen, die sich fernerkunden lassen: Phytoplankton, gelöste organische Substanzen (Gelbstoff) und Schwebstoff. Der Artikel erläutert zunächst die Methodik der quantitativen Bestimmung. Danach wird die Verfügbarkeit entsprechender Software für unterschiedliche Sensoren diskutiert. Abschließend folgt eine Übersicht von Instrumenten auf Satellit und Flugzeug und eine Diskussion ihrer Eignung für die Gewässerfernerkundung.

1. Einleitung

Information über Wasserinhaltsstoffe läßt sich per Fernerkundung nur im Sichtbaren gewinnen, denn wie Bild 1 illustriert, sieht nur in diesem Spektralbereich ein Fernerkundungssensor in das Wasser hinein. Infrarot- und Radarsensoren, die auch häufig zur Erdbeobachtung eingesetzt werden, erfassen bei Gewässern nur die Oberfläche (einige Mikro- bzw. Millimeter). Es lassen sich deshalb nur solche Inhaltsstoffe fernerkunden, die auch die Farbe des Wassers beeinflussen. Sie werden entsprechend ihrer Absorptions- und Streueigenschaften in drei Klassen eingeteilt: Phytoplankton, gelöste organische Substanzen (Gelbstoff) und Schwebstoff. Je nach Wellenlänge ist der Einfluss der drei Klassen unterschiedlich. In Kapitel 2 wird beschrieben, wie sich dies ausnutzen läßt, um durch sog. Inversionsverfahren die drei Klassen zu trennen und Konzentrationen quantitativ zu bestimmen. Wie es mit der Verfügbarkeit entsprechender Software aussieht, wird in Kapitel 3 erläutert. Kapitel 4 gibt eine Übersicht über Erdbeobachtungssatelliten, Kapitel 5 über Flugzeugsensoren, die in Europa verfügbar sind.

Abbildung 1

Absorption von reinem Wasser und daraus berechnete Dicke der Wasserschicht, aus der 90% der im Wasser reflektierten Strahlung stammt (sog. Signaltiefe z_{90}). Nur im Sichtbaren (VIS) sieht man ins Wasser hinein, bei anderen Wellenlängen absorbiert Wasser elektromagnetische Strahlung so stark, daß das rückgestreute Signal von einer sehr dünnen Schicht an der Oberfläche stammt. In Gewässern ist z_{90} aufgrund von Inhaltsstoffen meist deutlich kleiner als bei reinem Wasser. (TIR = Thermisches Infrarot; K, X, C, L = sog. „Bänder“, bei denen typische Radarsensoren arbeiten.)

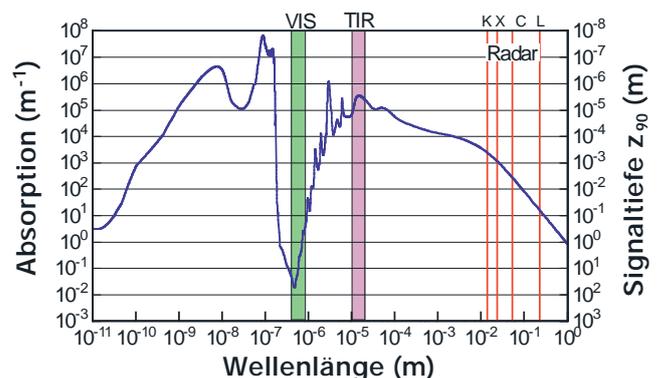
2. Methodik

Das Meßsignal, das ein Instrument auf Satellit oder Flugzeug mißt, wenn es auf eine Wasseroberfläche blickt, ist von vielen Faktoren abhängig. Neben den Wasserinhaltsstoffen sind dies vor allem Streuung und Absorption der Atmosphäre, Reflexionen an der Wasseroberfläche, Blickwinkel und Sonnenstand. Die beiden letzteren lassen sich relativ einfach berücksichtigen, doch die Korrektur des von der Atmosphäre und der Wasseroberfläche stammenden Signals ist aufwendig und fehleranfällig. Diese Störsignale müssen sehr genau berechnet werden, da sie mehr als 90 Prozent des Meßsignals ausmachen können.

Nach Korrektur der Faktoren, die nichts mit den Wasserinhaltsstoffen zu tun haben, rechnet man das Meßsignal üblicherweise in ein Reflexionsspektrum $R(\lambda)$ um. Es gibt an, welcher Bruchteil R des einfallenden Lichts bei der Wellenlänge λ im Wasser reflektiert wird. $R(\lambda)$ hängt im wesentlichen von den Wasserinhaltsstoffen ab und geringfügig vom Sonnenstand. Für tiefes Wasser, wo man den Bodeneinfluss vernachlässigen kann, läßt sich $R(\lambda)$ in guter Näherung durch folgende Gleichung beschreiben:

$$R(\lambda) = f \cdot \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)}$$

Die optischen Eigenschaften des Wassers und der Wasserinhaltsstoffe werden durch die Spektren $a(\lambda)$ und $b_b(\lambda)$ charakterisiert, wobei a der Absorptionskoeffizient und b_b der Rückstreuoeffizient ist. a ist ein Maß dafür, welcher Bruchteil des einfallenden Lichts beim Durchlaufen einer Strecke von 1 Meter



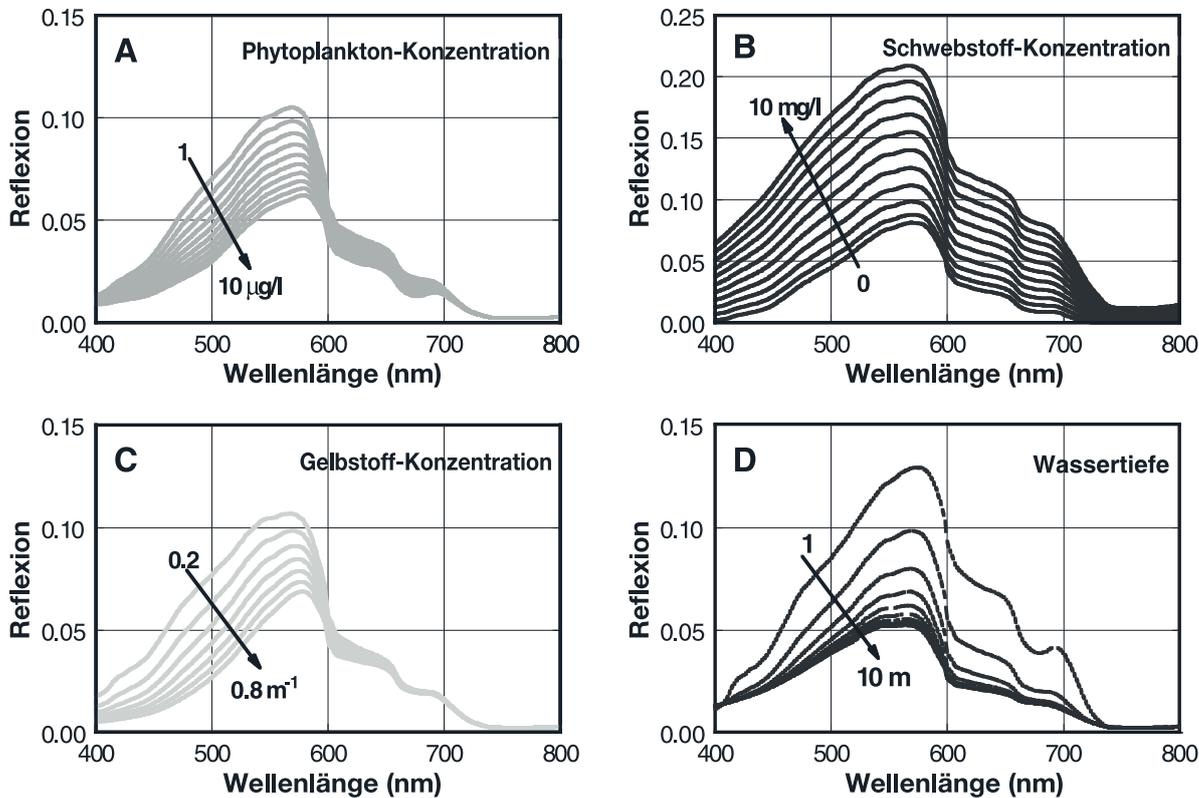


Abbildung 2

Modellrechnungen zur Variabilität der Reflexionsspektren im Flachwasser. Für die Konzentrationen von Wasserinhaltsstoffen und die Reflexion des Bodens wurden Bodenseetypische Verhältnisse angenommen (2 µg/l Phytoplankton, 2 mg/l Schwebstoff, 0,3 m⁻¹ Gelbstoff-Absorption bei 440 nm, Sedimentspektrum vom Bodensee). In den Bildern A, B, C trägt die Wassertiefe 2 Meter und die Konzentration von jeweils einem Wasserinhaltsstoff wurde in einem Bodenseetypischen Konzentrationsbereich variiert, in Bild D wurde die Wassertiefe verändert. Konzentrationsänderungen von Phytoplankton (A) und Gelbstoff (C) bewirken ähnliche Änderungen im Spektrum, daher ist ihre Trennung schwierig. Änderungen der Konzentration von Schwebstoff (B) und der Wassertiefe (D) führen zu relativ eindeutigen spektralen Änderungen, daher lassen sich diese Parameter recht genau bestimmen.

absorbiert wird; b_b , welcher Teil auf dieser Strecke zurückgestreut wird (Streuwinkel von 0 bis 90°).¹⁾ a und b_b haben daher die Einheit m^{-1} . Beide Koeffizienten sind additiv, das heißt es addieren sich die Beiträge von reinem Wasser und aller Inhaltsstoffe. Der Proportionalitätsfaktor f hängt geringfügig von a und b_b sowie vom Sonnenstand ab. Er liegt etwa bei 0,33. Die Gleichung ist auch intuitiv plausibel: Sie besagt, dass die Reflexion umso höher ist, je größer die Rückstreuung, und dass umso weniger Licht reflektiert wird, je mehr das Wasser absorbiert.

Kennt man die spezifischen (= auf die Konzentration normierten) Absorptions- und Rückstreuenspektren der Wasserinhaltsstoffe, so kann man mit der oben angegebenen Gleichung das Spektrum $R(\lambda)$ für beliebige Konzentrationen berechnen. Für Flachwasser müssen darüber hinaus das Reflexionsspektrum des Bodens und die Wassertiefe bekannt sein. Dies nennt man Vorwärtsrechnung. Bild 2 zeigt einige Beispiele für Flachwasser. Man erkennt, wie unterschiedlich die

einzelnen Inhaltsstoffe und die Wassertiefe sowohl Amplitude wie auch Kurvenverlauf von $R(\lambda)$ beeinflussen.

In der Praxis ist die Fragestellung umgekehrt: man mißt $R(\lambda)$ und will daraus die Konzentrationen der Inhaltsstoffe und eventuell Wassertiefe und Bodentyp berechnen. Dies nennt man Inversion. Es gibt dafür zwei prinzipiell unterschiedliche Typen von Algorithmen: empirische und analytische.

Empirische Algorithmen basieren auf einem statistisch ermittelten Zusammenhang zwischen dem Messsignal und der unbekannt GröÙe. Es sind die klassischen Algorithmen der Fernerkundung, z.B. das Blau-Grün-Verhältnis zur Bestimmung von Chlorophyll im offenen Ozean oder der NDVI für die Biomasse von Landvegetation. Häufig werden nur zwei Spektralkanäle verwendet; manche Algorithmen benutzen gar nur einen, wenige drei oder mehr. Durch diese Beschränkung auf wenige Spektralkanäle wird nur ein Teil der Information genutzt und entspre-

¹⁾ Genauer: Das Verhältnis von absorbierter zu einfallender Intensität ist $\exp(-a \cdot z)$, das von rückgestreuter zu einfallender Intensität ist $\exp(-b_b \cdot z)$, wobei z die Weglänge ist.

chend ist die Genauigkeit prinzipiell eingeschränkt. In vielen Fällen lassen sich solche Algorithmen überhaupt nicht einsetzen, z.B. wenn nur zwei Spektralkanäle verwendet werden und zwei oder mehr veränderliche Größen das Messsignal beider Kanäle beeinflussen, wie das etwa in Küsten- und Binnengewässern der Fall ist. Da die Algorithmen durch Regression von Sensorsignalen mit Messdaten entwickelt werden, muss ein repräsentativer Datensatz gemessen werden. Die Messungen müssen möglichst zeitnah zum Überflug des Satelliten oder Flugzeugs erfolgen und sollten den gesamten Dynamikbereich erfassen, der in der Szene vorkommt. Aufgrund von Veränderungen des Sonnenstandes und der Atmosphäre ist es häufig ungewiss, ob sich ein Algorithmus, der während einer Kampagne entwickelt wurde, auf andere Termine übertragen läßt. Dieser langen Liste an Nachteilen stehen zwei Vorteile gegenüber: Die Auswertung von Bilddaten geht schnell und einfach, und man benötigt kein Modell.

Analytische Algorithmen basieren auf einem physikalischen Modell und können die gesamte Spektralinformation nutzen, die der Sensor misst. Sie sind daher prinzipiell genauer als empirische Algorithmen. Das zugrundeliegende Modell erlaubt es, viele Simulationsrechnungen durchzuführen, so dass ein wesentlich größerer Wertebereich der zu bestimmenden Größen abgedeckt werden kann als dies durch Messungen möglich ist. Außerdem läßt sich die Genauigkeit jedes abgeschätzten Parameters angeben. Es gibt zwei Nachteile: erstens muss ein genaues Modell vorliegen inklusive verlässlicher Information über die optischen Eigenschaften aller Stoffe, die den Strahlungstransfer merklich beeinflussen. Zweitens ist die Rechenzeit deutlich länger als bei empirischen Verfahren. Die Nachteile verlieren immer mehr an Bedeutung: es gibt zunehmend genauere Modelle und die Computer werden immer leistungsfähiger. Deswegen ersetzen analytische Algorithmen mehr und mehr die empirischen.

Gebräuchliche analytische Verfahren zur Inversion sind z.B. Fitten, neuronale Netze oder Interpolation in vorwärtsberechneten Spektralbibliotheken. Das Prinzip ist immer dasselbe: man ermittelt jenes Modellspektrum, das dem gemessenen Spektrum am ähnlichsten ist. Die dazugehörigen Modellparameter sind die gesuchten Ergebnisse. Die Verfahren unterscheiden sich im wesentlichen darin, wie sie aus der unendlich großen Zahl an Modellspektren die geeigneten auswählen.

3. Software

Software zur Kalibration von Instrumenten ist immer sensor-spezifisch. Sobald die Daten kalibriert sind, kann die weitere Auswertung im Prinzip mit sensor-unabhängigen Programmen erfolgen, die als einzigen sensor-spezifischen Input die spektralen Eigenschaften des Instruments benötigen. Doch solche generischen Programme gibt es wenige. In der Praxis wird die Datenauswertung deshalb fast immer mit Instrument-spezifischer Software durchgeführt. Es gibt jedoch nicht für jeden Sensor operationelle Software, so dass die Nutzer oft selbst die Programme entwickeln.

Im Bereich der Gewässerfernerkundung existiert operationelle Software nur für Satellitensensoren, die speziell für Gewässer entwickelt wurden: MERIS, MODIS, MOS-B und SeaWiFS. Sie wird in der Regel nicht vom Nutzer bedient, sondern der Datenprovider liefert neben den kalibrierten Daten auch die abgeleiteten Produkte aus. Dies sind die Konzentrationen von Phytoplankton, Schwebstoff und Gelbstoff im tiefen Wasser.

Das DLR entwickelt geräteunabhängige operationelle Software zur Datenauswertung:

- WASI. Dieses Programm ist für optische Schiffsmessungen gedacht. Es eignet sich sowohl für die Simulation von Messungen als auch zur Auswertung.

Tabelle 1

Wichtigste Typen optischer in-situ-Messungen, die vom Programm WASI unterstützt werden. Für alle Typen sind physikalische Modelle implementiert, mit denen spektral aufgelöste Messungen sowohl simuliert wie auch analysiert werden können.

Typ der Messung	Optionen
Absorption	der Inhaltsstoffe / des Wasserkörpers
Attenuation	für abwärtsgerichtete Bestrahlungsstärke
Reflexion	für Bestrahlungsstärke- / Strahldichtesensoren für tiefes / flaches* Wasser oberhalb / unterhalb der Wasseroberfläche
Bodenreflexion	für Bestrahlungsstärke- / Strahldichtesensoren
abwärtsgerichtete Bestrahlungsstärke	oberhalb / unterhalb der Wasseroberfläche
aufwärtsgerichtete Strahldichte	oberhalb / unterhalb der Wasseroberfläche

*Algorithmen für Flachwasser sind in Entwicklung und stehen in der aktuellen Version noch nicht zur Verfügung.

tung. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Typen von Messungen, die unterstützt werden. WASI ist frei verfügbar und kann zusammen mit einem Handbuch von einem ftp-Server heruntergeladen werden (Server: ftp.dfd.dlr.de, Nutzer: anonymous, Passwort: [Email-Adresse], Verzeichnis: /pub/WASI).

- MIP. Dieses Programm ist für optische Flugzeug- und Satellitendaten gedacht. Es eignet sich zur Auswertung von multi- und hyperspektralen Bild- daten von Gewässern. Es befindet sich noch im Entwicklungsstadium. Eine kurze Beschreibung findet sich im Artikel von HEEGE et al. dieses Tagungsbandes.

4. Satelliten

Tabelle 2 gibt einen Überblick über aktuelle Erdbeobachtungssatelliten. Die Liste ist nicht vollständig, sondern enthält nur die wichtigsten Satelliten. In der Tabelle wird zwischen Satelliten für Landanwendungen und solchen für Gewässer unterschieden. Sie unterscheiden sich signifikant in der räumlichen und spektralen Auflösung sowie in der Wiederholrate.

„Landsatelliten“ zeichnen sich durch eine hohe räumliche Auflösung aus (1-30 m), was aber nur auf Kosten der spektralen Auflösung realisiert werden kann. Bei höchster räumlicher Auflösung im Meterbereich kommt nur dann genügend Energie auf den Detektor, wenn die gesamte Strahlung im Sichtbaren aufintegriert wird, das heißt indem eine Schwarzweiß-Aufnahme mit nur 1 Spektralkanal gemacht wird. Solche sog. „panchromatischen“ Aufnahmen mit Auflösungen von 61 cm bis 2,50 m liefern Quickbird, IKONOS und SPOT. Für Farbbilder werden meist 4 Spektralkanäle verwendet: 3 im Sichtbaren (VIS) und 1 im nahen Infrarot (NIR). Die räumliche Auflösung ist entsprechend 4-fach geringer als mit 1 Spektral-

kanal. Instrumente mit 1 bis 4 Kanälen sind im wesentlichen als „Fotoapparate“ gedacht. Sie erlauben qualitative Aussagen und Klassifizierungen, aber für quantitative Analysen sind sie nur bedingt geeignet. 6-kanalige Sensoren wie Landsat-ETM und ALI haben vor allem im Roten und nahen Infrarot eine bessere spektrale Auflösung, was der Analyse von Landvegetation zugute kommt. Für Gewässer liegen die Kanäle nicht optimal.

„Wassersatelliten“ haben typischerweise 8 oder mehr Spektralkanäle im Sichtbaren und nahen Infrarot, aber die räumliche Auflösung liegt nur zwischen 300 und 1000 Metern. Für viele Anwendungen, vor allem für Binnengewässer, ist diese Auflösung nicht ausreichend. Sie ist die Folge der Forderung nach hoher Wiederholrate: Da sich Gewässer normalerweise in viel kürzeren Zeiträumen verändern als Landoberflächen, werden Satelliten für Gewässeranwendungen in der Regel so konzipiert, dass jeder Ort auf der Erde bereits nach wenigen Tagen wieder aufgenommen wird, während die Wiederholrate für Landsensoren typischerweise bei zwei, drei Wochen liegt. Die unterschiedlichen Wiederholraten erreicht man dadurch, dass man bei Gewässersatelliten Weitwinkel- und bei Landsatelliten Teleobjektive verwendet. Damit erzielt man bei ersteren eine Bildstreifenbreite von einigen tausend Kilometern, bei letzteren von einigen zehn bis hundert Kilometern. Bei ähnlicher Zahl von Bildpunkten pro Zeile ist deshalb die räumliche Auflösung von Gewässersensoren etwa zehn- bis hundertmal geringer als bei Landsensoren.

Der Gewässersensor mit der höchsten räumlichen Auflösung ist MERIS. Mit 300 Meter Pixelgröße ist er auch für größere Binnengewässer geeignet. Er wurde am 1.3.2002 mit dem europäischen Umweltsatelliten ENVISAT gestartet und liefert seit dem 10.7.2003 operationell Daten, u. a. von Wasserinhaltsstoffen.

Tabelle 2

Aktuelle Erdbeobachtungssatelliten

	Satellit	Sensor	räumliche Auflösung	Wiederholrate	Kanäle VIS-NIR
Land	Quickbird	(Kodak)	0.61/2.44 m	1-3.5 Tage	1/4
	IKONOS	(Kodak)	1/4 m	2-3 Tage	1/4
	SPOT 5	HRG/HRS	2.5/10 m	> 2 Wochen	1/4
	TERRA	ASTER	15 m	16 Tage	3
	Landsat 7	ETM <small>defekt seit 31.5.2003</small>	15/30 m	2-3 Wochen	1/6
	EO-1	ALI	30 m	4-16 Tage	6
	EO-1	Hyperion	30 m	4-16 Tage	220
Wasser	ENVISAT	MERIS	300 m	2 Tage	15
	IRS-P4	OCM	360 m	2 Tage	8
	TERRA AQUA	MODIS	250/500/ 1000 m	1 Tag	2/5/ 12
	IRS-P3	MOS-B	520 m	24 Tage	13
	SeaWiFS	WiFS	1000 m	2 Tage	8

Die Daten können bei der europäischen Weltraumorganisation ESA gekauft werden (<http://cat.envisat.esa.int/>). Die ESA-Produkte basieren auf globalen Algorithmen. Genauer sind lokale Algorithmen, die an bestimmte Bedingungen angepaßt sind. Solche wurden von GKSS und DLR für die Nordsee, Ostsee und den Bodensee entwickelt. Für die Überprüfung und den Vergleich wurden 2003 eine Reihe von Messkampagnen durchgeführt, die zur Zeit ausgewertet werden.

Von den in Tabelle 2 aufgeführten Sensoren nimmt Hyperion eine Sonderstellung ein: von der Wiederholrate (4-16 Tage) und der räumlichen Auflösung (30 m) her ist er ein „Landsatellit“, aber mit 220 (!) Kanälen bietet er eine außergewöhnlich hohe spektrale Auflösung. Die Spektren sind auch über Gewässern kaum verrauscht, so dass er für Gewässeranwendungen geeignet ist. Er ist Vorreiter einer neuen Klasse von Satellitensensoren, die hyperspektral räumlich hochaufgelöste Daten liefern. Noch gibt es wenige dieser Instrumente und keine operationellen Auswerteverfahren.

5. Flugzeugsensoren

Bevor ein Instrument für einen Satelliten gebaut wird, wird immer erst eine Flugzeugversion entwickelt. Es dauert dann Jahre, bis eine weltraumtaugliche Version um die Erde kreist. Aus diesem Grund ist die technische Entwicklung von Flugzeugsensoren jener von Satellitensensoren immer um einige Jahre voraus. Außerdem verringert sich bei Flugzeugsensoren ein Problem von Satelliteninstrumenten: das der Datenmenge. Einen Überblick über Flugzeugsensoren, die in Europa für die Gewässerfernerkundung eingesetzt werden, gibt Tabelle 3. CASI, Daedalus und HyMap sind kommerzielle Geräte, die in größerer Stückzahl gebaut wurden; AISA, EPS-a, MIVIS und ROSIS sind Einzelanfertigungen.

Während Satelliten für globale Fragestellungen unverzichtbar sind, lassen sich viele regionale Anwendungen besser mit Flugzeugen bedienen, vor allem, wenn es auf hohe räumliche Auflösung ankommt. Die räumliche Auflösung von Flugzeuginstrumenten ist variabel, denn sie hängt von der Flughöhe und der Fluggeschwindigkeit ab. Mit jedem Sensor von Tabelle 3 läßt sich eine Auflösung von ca. 1 Meter erreichen, zum Teil besser. Die Bildgröße ist ebenfalls variabel: Die Zahl der Bildpunkte einer Zeile ist zwar immer gleich (typischerweise 500-1000), aber wieviele Zeilen ein Bild hat, hängt davon ab, wie lange der Sensor eingeschaltet bleibt, denn das Bild entsteht Zeile für Zeile durch die Vorwärtsbewegung des Flugzeugs. Wählt man die Flughöhe so, dass die räumliche Auflösung z.B. 1 Meter beträgt, so erhält man folglich Bildstreifen, die 0,5-1 km breit und in der Regel einige Kilometer lang sind. Um größere Gebiete abzudecken, muss das Flugzeug einen Zickzackkurs fliegen und die Bildstreifen müssen nachträglich zusammengesetzt werden.

Das DLR besitzt zwei Flugzeugsensoren, Daedalus und ROSIS. Ab 2005 steht zusätzlich HyMap zur Verfügung. Zur automatischen Datenauswertung wurde das in Kapitel 3 erwähnte Programm MIP entwickelt. Ursprünglich für den Daedalus konzipiert, danach auf den ROSIS angepaßt (mit Abstrichen bei der spektralen Auflösung), wird es in Kürze für alle Sensoren anwendbar sein. Bisher können quantitativ die Konzentrationen von Phytoplankton und Schwebstoff ermittelt werden; die Gelbstoffbestimmung ist sensorbedingt unzuverlässig. Aus Daedalus-Daten vom Bodensee wurde die erste Verteilungskarte der Primärproduktion in einem Binnengewässer berechnet. Neben diesen quantitativen Analysen im Pelagial werden mit den Sensoren und Algorithmen des DLR zunehmend Anwendungen im Flachwasser- und Uferbereich erschlossen, siehe den Artikel von HEEGE et al. in diesem Tagungsband.

Tabelle 3

Flugzeugsensoren, die in Europa eingesetzt werden. Land = Herstellerland

Land	Sensor	Kanäle	Spektralbereich	spektrale Bandbreite
FI	AISA	bis 288	430 - 900 nm	1.8 nm
CA	CASI	bis 288	400 - 1000 nm	1.9 nm
USA	Daedalus	11	430 nm - 12 µm	26 - 78 nm
NL	EPS-a defekt seit 2001	25	406 - 995 nm	15 nm
AU	HyMap	126 32	450 - 2500 nm 8 - 12 µm	15 - 20 nm 100 - 200 nm
I	MIVIS	20 50 9 340 - 540	430 - 830 nm 1150 - 1550 nm 1980 - 2450 nm 8210 - 12700 nm	20 nm 8 nm 64 nm 10 nm
D	ROSIS	115	430 - 860 nm	4 nm

6. Weiterführende Information

Lehrbücher

BUKATA, R. P.; J. H. JEROME, K. Y. KONDRATYEV & D. V. POZDNYAKOV (1995):
Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Coastal Waters. CRC Press

GORDON, H. R. & A. MOREL (1983):
Remote assessment of ocean colour for interpretation of satellite visible imagery, a review. Springer-Verlag

JERLOV, N. G. (1968):
Optical Oceanography. Elsevier Scientific Publ. Company

JERLOV, N. G. (1976):
Marine Optics. Elsevier Scientific Publ. Company

JERLOV, N. G. & E. STEEMANN NIELSEN [eds.] (1979):
Optical Aspects of Oceanography. Academic Press

KIRK, J. T. O. (1983):
Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Cambridge University Press

KONDRATYEV, K.Y.; N.N. FILATOV, O.M. JOHANNESSEN, V.V. MELENTYEV, D.V. POZDNYAKOV, S.V. RYANZHIN, E.V. SHALINA & A.I. THIKHOMIROV (1999):
Limnology and remote sensing - a contemporary approach. Springer

MOBLEY, C. D. (1994):
Light and Water. Academic Press

POZDNYAKOV, D. & H. GRASSL (2003):
Colour of inland and coastal waters – a methodology for its interpretation. Springer

PREISENDORFER, R. W. (1976):
Hydrologic Optics. Available on CD-ROM from the Office of Naval Research, Ocean Atmosphere and Space Department (www.onr.navy.mil)

ZIMMERMANN, G. (1991):
Fernerkundung des Ozeans. Akademie Verlag

Umfangreiche Literaturliste: www.ioccg.org

Satelliten- und Flugzeugsensoren:

KRAMER, H. J. (2002):
Observation of the Earth and Its Environment. Survey of Mission and Sensors. 4th Edition, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, ISBN:3-540-60933-4, 1514 p.

ALI:
<http://eo1.gsfc.nasa.gov/Technology/ALHome1.htm>

ASTER:
<http://asterweb.jpl.nasa.gov/default.htm>

ENVISAT:
<http://envisat.esa.int/>

Hyperion:
<http://eo1.gsfc.nasa.gov/Technology/Hyperion.html>

IKONOS:
<http://www.infoterra-global.com/ikonos.htm>

Landsat-ETM:
http://eosims.cr.usgs.gov:5725/SENSOR_INSTRUMENT_DOCS/landsat_etm+_sensor_abs.html

MERIS:
<http://envisat.esa.int/instruments/tour-index/meris/>

MODIS:
<http://modis.gsfc.nasa.gov/>

MOS-B:
http://www.ba.dlr.de/NE-WS/ws5/index_mos.html

OCM:
<http://www.isro.org/irsp4.htm>

Quickbird:
<http://www.infoterra-global.com/quickbird.htm>

SeaWiFS:
<http://seawifs.gsfc.nasa.gov/SEAWIFS/BACKGROUND/>

SPOT 5:
<http://www.spot.com/home/system/future/spot5/welcome.htm>

Anschrift des Verfassers.

Peter Gege
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
(DLR Oberpfaffenhofen)
Institut für Methodik der Fernerkundung,
Postfach 1116
82230 Weßling.
E-Mail: peter.gege@dlr.de

Stofftransport-Modellierung zur Bestimmung der potentiellen Einträge aus dem Wassereinzugsgebiet

Florian HOFFMANN, Stefan ZIMMERMANN und Arnulf MELZER

Zusammenfassung

Die Qualität von Gewässern wird entscheidend durch das Einzugsgebiet geprägt. Intensive landwirtschaftliche Nutzung hat häufig zu einer Eutrophierung der Gewässer geführt. Zur Ermittlung der Belastungsquellen und deren quantitativen Beschreibung ist eine Modellierung der Stoffflüsse im Einzugsgebiet sinnvoll. Diese dient als Grundlage zur Entwicklung von Maßnahmen, die sich dadurch präziser und effektiver gestalten lassen.

Der in diesem Projekt bearbeitete Hopfensee gehört zu den am stärksten nährstoffbelasteten Seen in Bayern. Probleme bereiten vor allem Phosphoreinträge aus diffusen Quellen. Um Maßnahmen zu deren Reduzierung treffen zu können wurde eine GIS-gestützte, flächenscharfe Modellierung vorgenommen. Dabei wurde besonderes Augenmerk auf das Austragsgeschehen von Grünlandflächen gelegt.

Die quantitative Berechnung der Phosphorfrachten baut auf einer Simulation der Wasserflüsse auf. Durch aktuelle Forschungsergebnisse und Messungen lassen sich den einzelnen Wasserflüssen Nährstoffkonzentrationen zuweisen. Die mittels eines GIS berechneten Phosphorausträge werden in einer Gewässergefährdungskarte zusammengefasst, die als Grundlage für Umsetzungsmaßnahmen in der Landwirtschaft dient. Extensivierungsmaßnahmen und andere den Phosphoreintrag verringernde Maßnahmen können dadurch gezielter und effizienter als bisher umgesetzt werden. Die Validierung ergibt ein hohes Bestimmtheitsmaß der Regression zwischen den Messwerten und den Modellierungsergebnissen.

Aus hochauflösenden Fernerkundungsdaten gewonnene Informationen zur Landnutzung stellen einen wichtigen Eingabefaktor dar, durch den die Genauigkeit der Modellierung und damit die Aussagekraft für die Umsetzung gesteigert werden kann.

1. Einleitung

Die Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) sieht eine Abschätzung der Belastung der Oberflächengewässer durch Stoffeinträge aus punktuellen und diffusen Quellen, sowie Maßnahmen zur Verminderung dieser Einträge vor. Bisherige Modell- und Bilanzierungsmethoden bilden den Stoffaustrag unter Grünland gar nicht oder nur sehr stark vereinfacht ab. Da aber in den Einzugsgebieten vieler Voralpenseen überwiegend Grünlandnutzung betrieben wird, ist es notwendig genau diesen Nährstoffeintragspfad zu bewerten.

Bei der Eutrophierung von Seen ist vor allem Phosphor relevant, so dass man sich bei der Modellierung auf diesen beschränken kann. Um Maßnahmen zur Verringerung der Phosphoreinträge treffen zu können, müssen die diffusen Quellen und ihre räumliche

Verbreitung möglichst quantitativ berechnet werden. Die Belastung eines Gewässers bestimmt sich zum einen aus der natürlichen Beschaffenheit seines Einzugsgebietes und dessen anthropogener Nutzung. Die Intensität der landwirtschaftlichen Nutzung, die zu keiner negativen Veränderung des Gewässersystems führt, wird durch die morphometrische Beschaffenheit des Gewässers bestimmt und wird her durch den Berechnungsansatz von VOLLENWEIDER & KERKES (1982) bestimmt.

Am Beispiel des Hopfensees wurde in Zusammenarbeit mit dem Wasserwirtschaftsamt (WWA) Kempten eine Modellierung der Phosphoreinträge durchgeführt. Da in der Vergangenheit durch Maßnahmen die punktuellen Nährstoffeinträge schon weitgehend reduziert werden konnten, kommen für die weiterhin hohen Phosphoreinträge vor allem die diffusen Quellen in Frage. Da die landwirtschaftliche Nutzung im Einzugsgebiet zu 100% aus Grünlandnutzung besteht, wurde vom Modellierungsansatz eine flächig differenzierte Berechnung des Phosphoraustrages auf Grünlandflächen gefordert.

Der bei Füssen im Allgäu gelegene Hopfensee hat ein Einzugsgebiet von 3322 ha, wovon 2191 ha landwirtschaftlich als Grünland genutzt werden. Mit 192 ha Seefläche, einer geringen mittleren Tiefe und einer Wassererneuerungszeit von 127 Tagen, reagiert der Hopfensee sehr empfindlich auf die eingetragenen Phosphorfrachten.

2. Berechnungsansatz

Für die Berechnung der Wasserflüsse und der Phosphorfrachten in einem GIS waren möglichst präzise, digitale Datengrundlagen notwendig. Da die späteren Aussagen für den Maßstab 1:5000 getroffen werden sollten, wurden auch die Eingangsdaten in diesem Maßstab erhoben. Die benötigten Eingangsdaten sind in der Abbildung 1 zusammengefasst. Das Höhenmodell wurde aus den Höhenlinien der Flurkarte im Maßstab 1:5000 berechnet und entsprechend aufbereitet. Die Nutzungskartierung musste erstellt werden und wurde aufgrund von s/w Orthophotos und einer Geländebegehung aufgenommen. Daten zum Boden wurden aus der Reichsbodenschätzung übernommen und anhand von Werten aus AUERSWALD & SCHMIDT (1986) umgerechnet. Beim Gewässernetz

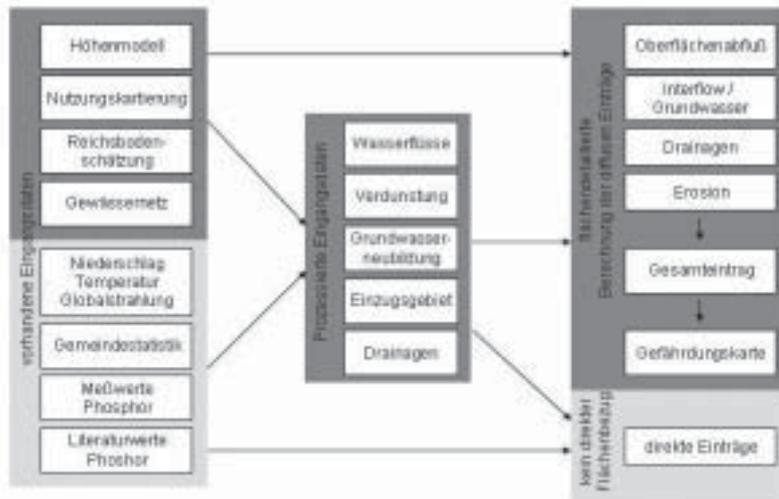


Abbildung 1

Ablaufschema der Modellierung des Phosphoreintrages in den Hopfensee

konnte auf eine sehr genaue Kartierung des Wasserwirtschaftsamtes Kempten zurückgegriffen werden, bei der neben den Fließgewässern und Gräben auch alle Drainageeinleitungen aufgenommen wurden.

Um die Phosphoreinträge quantitativ abschätzen zu können, wurde eine Modellierung der Wasserflüsse mit dem Programm WaSim-ETH (SCHULLA 1997) durchgeführt. Auf diesen Berechnungen aufbauend wurden die Phosphorfrachten für die Eintragspfade Oberflächenabfluss, Interflow, Grundwasser, Drainage und Erosion berechnet. Da hier Literaturdaten aus dem Alpenvorland und Messwerte aus dem Einzugsgebiet vorlagen, war eine flächig detaillierte Berechnung möglich. Für die Eintragspfade Direkteintrag durch Weidewirtschaft und Hofflächen sowie Kanalisation, lagen nur allgemeine Schätzwerte nach HAMM (1991) vor, so dass hier keine detaillierte flächenbezogene Modellierung vorgenommen werden konnte. Eine Berechnung fand als Mittelwert für das gesamte Einzugsgebiet statt.

Die Berechnung der Wasserflüsse erfolgte unter Linux mit dem Programm Wasim-ETH (SCHULLA 1997). Dabei wurde der Berechnungsansatz nach Penan-Moneith und das Bodenmodell nach dem Topodelansatz verwendet. Die Berechnung erfolgte aufbauend auf den Eingangsdaten Niederschlag, Temperatur, Globalstrahlung, Landnutzung und Bodenart. Die weitere Bearbeitung und Zuordnung der Phosphorfrachten erfolgte mit dem Spatial Analyst unter ArcGIS, wobei eine Rasterauflösung von 10 x 10 m verwendet wurde.

Für die Berechnung des Oberflächenabflusses wurden aktuelle im bayerischen Voralpenland gemessene Phosphor-Frachten (POMMER ET AL. 2000) mit den berechneten Wasserflüssen multipliziert. Oberflächenabfluss tritt nur nach langanhaltenden Niederschlägen oder Starkregenereignissen auf, so dass nur ca. 7% der Niederschlagsmenge abzüglich Verdunstung als Oberflächenabfluss in die Gewässer gelan-

gen. Da Oberflächenabfluss nur auf geneigten Flächen auftritt (SCHMIDT & PRASUHN 2000) wurden nur die Flächen mit einer Hangneigung größer 3% ausgewählt.

Die Berechnung des Phosphoraustrages über die Austragspfade Interflow und Grundwasser erfolgte nach dem Ansatz von RINGER & STREBEL (1980). Als wichtige Grundlage hierfür diente die anhand der Wasserflüsse berechnete Grundwasserneubildungsrate.

Zur Berechnung der Phosphorfrachten aus den drainierten Flächen standen neben einer genauen Kartierung der Drainagegräben und -Einleiter auch Phosphorkonzentrationsmessungen aus dem Einzugsgebiet zur Verfügung. Um die Drainagen in die Modellierung mit einzubeziehen mussten die drainierten Flächen ermittelt werden. Dazu wurden zum einen ein Puffer von 25 m um die kartierten Drainagen gelegt und zum anderen aus dem Höhenmodell Flächen mit überdurchschnittlich viel Zuschusswasser aus der Umgebung ermittelt. Die so berechnete Fläche ergibt 485 ha, was 22% der Grünlandflächen darstellt. Da bei Drainagen in organischem Boden ein ca. dreimal so hoher Phosphoraustrag wie bei mineralischem Boden zu erwarten ist, wurden die berechneten Drainageflächen diesbezüglich ausgewählt.

Die Abschätzung des Bodenabtrages wurde analog zu der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung (ABAG) (SCHWERTMANN ET AL. 1986) vorgenommen.

Die einzelnen Austragspfade werden zu einer Gesamtaustragskarte zusammengefasst und mit zu erwartenden Phosphorausträgen anderer von Ackerland geprägter Einzugsgebiete verglichen. Dabei ergibt sich im Vergleich zu von Ackerland dominierten Einzugsgebieten ein relativ geringer Phosphoraustrag.

Um den Phosphoraustrag bezüglich seines Gefährdungspotentials für den Hopfensee einzustufen wurde die zur Erreichung eines mesotrophen Zustandes akzeptable Phosphormenge nach VOLLENWEIDER

Tabelle 1

Zusammenstellung der Phosphoreinträge in den Hopfensee

Eintragspfad	P-Gesamt in t/a EZG
Kanalisation	0,42
Atmosphärische Deposition ins Gewässer	0,08
Waldsstreu	0,05
Direkteinträge von Hofflächen	0,149
Direkteinträge durch die Weidewirtschaft	0,416
Oberflächenabfluß / Abschwemmung	0,131
Interflow (Zwischenabfluß)	0,55
Grundwasserabfluß	0,11
Drainageabfluß	0,635
Erosion	0,717

& KERKES (1982) berechnet. Diese liegt durch die morphometrische Ausprägung des Hopfensees mit 1200 kg/a sehr niedrig, so dass die siebenstufige Gefährdungskarte viele Flächen mit Handlungsbedarf ausweist.

3. Ergebnisse

Die Berechnung der Phosphoreinträge ergibt eine Gesamtsumme von 3,258 t/a, was einem durchschnittlichen Phosphorausstrag von 0,98 kg/ha*a im Einzugsgebiet entspricht. Die Spanne der Phosphorausträge reicht dabei von 0,01 bis 4,5 kg/ha*a. Die Phosphorfrachten sind bezüglich Ihrer Eintragspfade in Tabelle 1 angegeben.

Die Gefährdungskarte grenzt die Maßnahmenbereiche sehr kleinflächig ab. Durch die exponentielle Einteilung der Skala tragen die als stark und sehr stark eingestuften Flächen überproportional zur Phosphorbelastung bei. Die mit einem Gefährdungspotential von stark und sehr stark eingestuften Flächen haben einen Anteil von 53% am Gesamtphosphorausstrag obwohl sie nur 23% der landwirtschaftlichen Flächen ausmachen. Auf diesen Flächen durchgeführte Maßnahmen versprechen eine besonders hohe Effektivität und können anhand der Detailkarten zu den Austragspfaden gezielt vorgenommen werden.

Eine Bewertung der einzelnen Eintragspfade lässt folgende Schlussfolgerungen bezüglich einer Maßnahmenplanung zu:

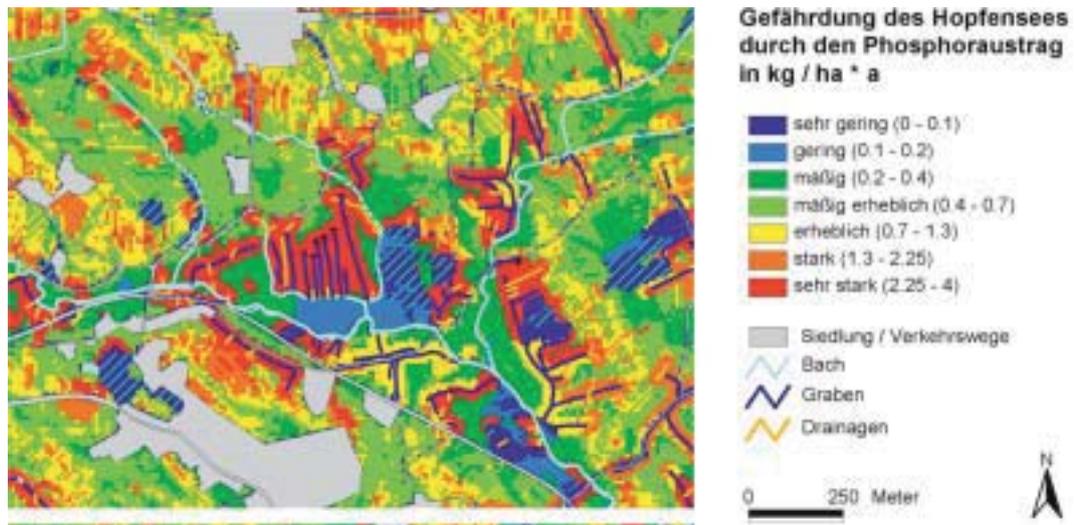


Abbildung 2

Ausschnitt aus der Gefährdungskarte. Die Abbildung zeigt in zwei Ausschnitten die hohe räumliche Auflösung (10 x 10 m) der modellierten Phosphorausträge. Die roten Bereiche entstehen im oberen Teil durch intensive Wiesennutzung auf drainierten Moorböden. Im unteren Teil der Abbildung zeigt sich deutlich die Form eines Drumlins, der intensiver Beweidung und Wiesennutzung unterliegt und dessen besonders steile Hangpartien als stark Gefährdend dargestellt werden.

- Kanalisation und Direkteinträge durch Weidewirtschaft sind mit 0,84 t/a sehr bedeutende Eintragspfade. Der Berechnungsansatz ist aber sehr allgemein und auch eine räumliche Zuordnung ist nur bedingt möglich, so dass hier nur sehr allgemeine Maßnahmenempfehlungen gegeben werden können
- Der Oberflächenabfluss spielt mit 4 % am Gesamteintrag eine untergeordnete Rolle
- Interflow und Grundwasser ist mit 20 % am Gesamteintrag sehr bedeutend, die Modellierung ergibt aber eine relativ gleichmäßige Verteilung über das Einzugsgebiet, so dass eine flächendetaillierte Formulierung von Maßnahmen auf dieser Grundlage nicht möglich ist
- Die bei der differenzierten Berechnung des Phosphoraustrages besonders durchschlagenden Faktoren sind die Drainagen und die Erosion. Diese sind mit 19 % und 22 % für das Gesamtergebnis sehr bedeutend und für die Formulierung von Maßnahmen besonders relevant

4. Validierung

Die Validierung erfolgte anhand von Messungen mittels Dauerprobennehmern und Schöpfproben. Bei den Dauerprobennehmern konnte die gemessene jährliche Phosphorfracht mit dem Modellierungsergebnis verglichen werden. Dies war für die Teileinzugsgebiete des Doldener Baches und der Hopfensee Achen möglich. Beim 2384 ha großen Einzugsgebiet der Hopfensee Achen ergibt die Modellberechnung mit 2735 kg/a eine um ca. 32% (4026 kg/a) zu niedrige Phosphorfracht. Die Abweichung vom Mittelwert der Messungen (690 kg/a) beim 698 ha großen Einzugsgebiet des Doldener Baches liegt bei 10% (757 kg/a). Die Messwerte am Doldener Bach wurden aber aufgrund des großen Schwankungsbereiches (435-945 kg/a) und der nur für 2 Jahre vorliegenden Messungen hier nicht weiter verwendet. Die Messungen an der Hopfensee Achen liegen dagegen seit 1997 bis heute konstant um die 4000 kg/a.

Ein direkter Vergleich zwischen den Schöpfproben und den Modellberechnungen ist nicht möglich, da

der Abfluss für die Teileinzugsgebiete nicht gemessen wurde. Für die Validierung (Abb. 3) wurde daher die Annahme getroffen, dass der Abfluss mit zunehmender Einzugsgebietsgröße linear zunimmt. Die gemessenen mittleren Phosphorkonzentrationen wurden dafür mit der Teileinzugsgebietsgröße in ha multipliziert. Dieser Wert wurde mit den für das entsprechende Teileinzugsgebiet berechneten Gesamt P-Austrag in kg/a verglichen. Dies ergab ein hohes Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,85$, so dass angenommen werden kann, dass das Modell die Phosphorausträge räumlich richtig verteilt berechnet.

5. Schlussfolgerungen

Die Berechnung von Phosphorausträgen unter Grünland stellt eine besondere Herausforderung dar, der momentan nur durch eine starke Vereinfachung und Verallgemeinerung durch die Modellierung Rechnung getragen werden kann. Gründe hierfür sind die starke Koppelung von Austragsvorgängen an Starkregenereignisse, die nicht mit vertretbarem Aufwand ermittelbare Düngeintensität von Grünlandflächen und das Fehlen von erprobten Modellen zur Abschätzung des Phosphoraustrages unter Grünland. Auch die Anwendung von Austragswerten und Berechnungsverfahren, die für andere Maßstabs- und Anwendungsbereiche – insbesondere Ackerland – entwickelt wurden, sind kritisch zu betrachten. Dies ist vor allem bei der Berechnung der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung der Fall, da diese nicht für Grünlandstandorte wie Weiden auf extrem steilen Lagen entwickelt wurde. Trotz dieser vielen Unsicherheiten bei den Eingangswerten und der Berechnung ergibt die Validierung eine gute Übereinstimmung. Diese lässt zudem die Schlussfolgerung zu, dass die Modellberechnung die Nährstoffaustragsquellen räumlich richtig verteilt (Schöpfproben), aber um ca. ein Drittel zu niedrig abschätzt (Dauerproben). Um das Modell noch zu verfeinern und den Gegebenheiten im Voralpenland noch besser anzupassen, sind Messkampagnen der einzelnen Austragspfade unter Grünland mit verschiedenen Nutzungen, Bodenarten und Hanglagen notwendig.

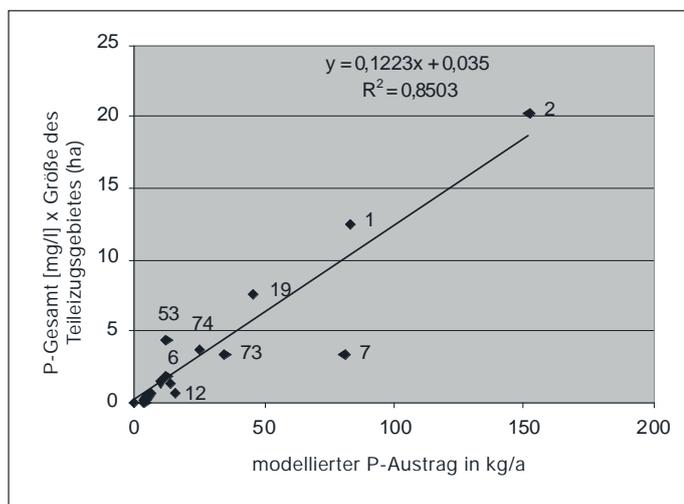


Abbildung 3
Validierung der Modellberechnung mit den Schöpfproben

Wie sinnvoll sich die Modellierungsergebnisse in Maßnahmen umsetzen und sich die sehr flächenscharf vorliegenden Einteilungen der Gefährdungstufen im Gelände nachvollziehbar wieder finden lassen, wird sich durch die momentan laufende Anwendung durch die Landwirtschaft noch zeigen. In einer engen Zusammenarbeit mit dem Amt für Landwirtschaft sollen die Ergebnisse der Modellierung noch verbessert werden. Dazu werden Informationen zu den Phosphorgehalten der Oberböden eingearbeitet. Auf der Grundlage dieser neuen Berechnung sollen dann in Zusammenarbeit mit den Landwirten Massnahmen zur Reduzierung der Phosphoreinträge getroffen werden.

6. Literatur

- AUERSWALD, K. & F. SCHMIDT (1986):
Atlas der Erosionsgefährdung in Bayern, Karten zum flächenhaften Bodenabtrag durch Regen.– GLA Fachbericht Nr. 1, Herausgeber und Verlag des Bay. Geolog. Landesamtes
- HAMM, A., HSGB. (1991):
Studie über Wirkungen und Qualitätsziele von Nährstoffen in Fließgewässern.– Academia Verlag, Sankt Augustin.
- POMMER, G.; R. SCHRÖPEL & F. JORDAN (2001):
Austrag von Phosphor durch Oberflächenabfluß auf Grünland.– Wasser & Boden, 53/4, 34-38, Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin
- RENGER, M. & O. STREBEL (1980):
Jährliche Grundwasserneubildung in Abhängigkeit von Bodennutzung und Bodeneigenschaften.– Wasser und Boden 32(8), S.362-366

SCHMIDT, C. & PRASUHN, V. (2000):
GIS-gestützte Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffeinträge aus diffusen Quellen in die Gewässer des Kantons Zürich. Schriftenreihe der FAL (35), Schweiz

SCHULLA, J. (1997):
Hydrologische Modellierung von Flußgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaveränderungen.– Diss. ETH 12018, Verlag Geographisches Institut ETH Zürich

SCHWERTMANN, U.; W. VOGL & M. KAINZ (1987):
Bodenerosion durch Wasser – Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen.– Stuttgart: Ulmer, 64 Seiten

VOLLENWEIDER, R. A. & J. KERKES (1982):
OECD cooperative programme for monitoring of inland waters (eutrophication control).– Synthesis Report, Paris

Anschrift der Verfasser:

Dipl.-Ing.(FH) Florian Hoffmann
Limnologische Station der TU München
Hofmark 1-3
82393 Iffeldorf
FH@geolim.de

Erfassung und Beurteilung von Wassereinzugsgebieten auf Landschaftsebene mit GIS und Fernerkundung: Landschaftsstruktur als Indikator

Hermann KLUG, Thomas BLASCHKE

Zusammenfassung

Durch die für die Mitgliedsstaaten der EU verbindlichen Anforderungen der Wasserrahmenrichtlinie (EU-Kommission 2000, Richtlinie 2000/60/EG)(WRR) wird in mehreren Beitrittsstaaten eine bis dahin kaum gekannte, naturräumlich definierte Planungsebene eingeführt, die über administrative Grenzen hinweg verläuft. Fernerkundungsdaten und GIS-Methoden sind zur Erfüllung der Aufgaben der WRR (z.B. Bereitstellung automatisierter Datenerfassungsmethoden, Erstellung und Aktualisierung von Landschaftszuständen) unverzichtbar. Dafür werden Indikatoren benötigt, um insbesondere Veränderungen in Art und Intensität der Landnutzungen, Auswirkungen punktueller oder linearer Infrastruktureinrichtungen, Folgen moderner Freizeitnutzungen usw. zu klassifizieren. Während stoffliche Veränderungen meist punktuell vor Ort gemessen und anschließend interpoliert werden, spielen Landnutzung und Landschaftsstruktur eine besondere Rolle für den langfristigen Ressourcenschutz. Landschaftsstrukturmaße (LSM) beschreiben dabei spezifische Arrangements von Nutzungen. Die Landnutzung dient gleichsam als Superindikator und das räumliche Anordnungsgefüge der Einzelelemente wird hinsichtlich ihrer Größen, Formen, Verteilungen und Nachbarschaften analysiert. Auf der landschaftlichen Ebene können direkte stoffliche und funktionale Veränderungen kaum flächendeckend direkt erfasst werden. So wird das räumliche Wirkungsgefüge verwendet, um z.B. sich gegenseitig beeinflussende Distanz- und Nachbarschaftsbeziehungen und -funktionen unterschiedlicher Nutzungen zu quantifizieren und Konfliktpotenziale frühzeitig aufzuzeigen.

1. Einleitung und Zielsetzung

Die Wasserrahmenrichtlinie fordert die Zusammenarbeit zwischen gemeinschaftlicher, einzelstaatlicher und lokaler Ebene, die die Einbeziehung der Öffentlichkeit einschließt. Sie soll Lösungen zu grenzüberschreitenden Wasserproblemen leisten, aquatische Ökosysteme und die direkt von ihnen abhängenden Landökosysteme wie auch Feuchtgebiete schützen (EU-KOMMISSION 2000). Die Verschlechterung des Zustandes von Oberflächen- und Grundwasser auf Gemeinschaftsebene soll verhindert und ein guter Zustand hinsichtlich der Wasserqualität angestrebt werden. Neu ist damit einerseits der Aspekt, dass Planung nicht mehr ausschließlich auf Gemeinde, Kreis-, Bezirks- und Landesebene stattfindet. Zum anderen tritt Ressourcenmanagement und eine Vorsorgeperspektive in den Vordergrund.

Der Fokus der Informationsbereitstellung für politische und sozioökonomische Entscheidungsfindungen kombiniert mit einer integrierten Bewertung der

Landschaft führt zur Entwicklung landschaftsökologischer Modelle. Ergebnisse der Modelle sind Indikatoren, die den Zustand des Wassereinzugsgebietes (WEG) räumlich explizit beschreiben. Da die hydrologischen Systeme vom räumlichen Anordnungsmuster (Englisch: *pattern*) der Landschaftskomponenten (Strukturelemente) auf Basis der Landnutzung und deren interaktiv ablaufenden Prozessen beeinflusst werden und umgekehrt diese beeinflussen, sollen landschaftliche Funktionen und Prozesse hinsichtlich ihrer raum-zeitlichen Veränderungen analysiert werden. Dazu dienen so genannte Landschaftsstrukturmaße (Englisch: *landscape metrics*), die die räumliche Verteilung der Landschaftselemente quantifizieren (BLASCHKE, 2000).

Zur praktischen Umsetzung der WRR sind räumlich explizite Deskriptoren für ein konkretes Monitoring und zur Erstellung eines Bewirtschaftungsplanes notwendig. In diesem Beitrag wird die Bedeutung „der Landschaftsebene“ diskutiert und die Analyse der Landschaftsstruktur auf dieser Maßstabsebene vorgestellt. Andere, hier nicht behandelte Bereiche im Zusammenhang mit der WRR sind äußerst wichtig. Angesichts der gebotenen Kürze werden nur einige Aspekte hervorgehoben, die für die Planung neue Impulse geben und die Erfassung und Beurteilung von Wassereinzugsgebieten sowie deren Charakter unterstützen können. Dabei wird auf prinzipielle Probleme in Zusammenhang mit Quantifizierungen räumlicher Anordnungen eingegangen. Insbesondere werden bestehende Interpretationsprobleme von Landschaftsstrukturmaßen für die Bewertung von Landschaftszuständen angeführt.

Diese Betrachtungsweise setzt angesichts der Größe der Planungsräume und der Datenvielfalt praktisch zwingend den Einsatz Geographischer Informationssysteme (GIS) und Fernerkundung voraus. Auch in der WRR ist der Aufbau von Informationssystemen vorgeschrieben. Es werden Ansätze diskutiert, mit denen unter Zuhilfenahme von GIS und Fernerkundung sozioökonomische und umweltbedingte Einflüsse auf die Landschaft dargestellt und bewertet werden können. Ferner werden Entwicklungsrichtungen für ein Wassereinzugsgebietsmanagement in einer integrierten, holistischen Betrachtung der Land-

schaft herausgestellt. Insbesondere wird auf die in der WRR erfassten und benötigten Informationen Bezug genommen, die zur Entscheidungsunterstützung dienen können.

2. Die Landschaftsebene: Notwendigkeit von GIS und Fernerkundung

2.1 Landschaftsebene

Der Begriff Landschaftsebene (Englisch: *landscape level*) ist mit einer jahrzehntelangen Forschungstradition insbesondere in der deutschsprachigen Geographie und Landschaftsökologie verbunden. Ob es den spezifischen Landschaftsmaßstab gibt, ist umstritten. Von einigen nordamerikanischen Ökologen wird dies bezweifelt (ALLEN 1998), da der Begriff auf die menschliche Komponente ausgerichtet ist und die spezifische Maßstabebene der Landschaftsökologie (*landscape level*) nicht zuletzt durch eine sozialisierte Wahrnehmung von Landschaft bzw. Landschaftsästhetik manifestiert ist. Sie ist auf dem Skalenniveau (*level*) angesiedelt, auf dem der Mensch agiert, auf dem er seinen Einfluss geltend macht, auf dem er die durch ihn hervorgebrachten, und die Kulturlandschaft determinierenden physisch-materiellen Gegebenheiten schafft. Das was u. a. LAVERS und HAINES-YOUNG (1993) als *landscape level* bezeichnen, wird von verschiedenen Biologen und Ökologen abgelehnt. Vor allem ALLEN (1998) argumentiert in seinem Aufsatz „... *the landscape level is dead*“, dass in ökosystemarer Sicht diese Zentrierung nicht gerechtfertigt wäre, da verschiedene Organismen ihre Umwelt eben auf unterschiedliche Arten und in unterschiedlichen Skalen wahrnehmen. Die menschliche Betrachtungsweise und der daraus resultierende Maßstab wäre demzufolge nur einer von vielen. Europäische Ansätze der Landschaftsforschung und die deutschsprachige Landschaftsökologie hingegen gehen davon aus, dass *der* Landschaftsmaßstab durch menschliche Interaktion und Einflussnahme definiert ist und typischerweise durch eine Gebietsgröße von einigen Kilometern bis wenigen zehner Kilometern Durchmesser bestimmt ist (FORMAN 1995).

2.2 Diskretisierung und Quantifizierung

Die spezifische Maßstabebene der Landschaftsökologie (*landscape level*) ist darüber hinaus durch eine sozialisierte Wahrnehmung von Landschaftsästhetik manifestiert. Dieser Maßstab der menschlichen (Inter-)Aktion ist auch Grund für die kartographische Einteilung realer Objekte („*crisp entities*“) in flächenhafte, linienhafte und punkthafte Erscheinungen, wie z. B.: Städte, Felder, Parkplätze, Autobahnen, kleinere Straßen, Hecken, Flüsse, Grenzlinien und Baumgruppen. Festzuhalten ist aus dieser zunächst theoretisch anmutenden Diskussion: Landschaft besteht aus vielfältigen Elementen, Eigenschaften und Zusammenhängen. Es geht um das Erkennen von Zusammenhängen interdisziplinärer Strukturen zwischen biotischen wie abiotischen Komponenten der Um-

welt, die in Wechselbeziehung zueinander stehen und in ihrem Verhalten Regelmäßigkeiten und/oder Gesetze erkennen lassen. Da wir viele Parameter und Prozesse bei der Untersuchung größerer Gebiete (Wassereinzugsgebiete!) nicht direkt messen können, müssen diese über die Landnutzung als eine Art „Superindikator“ modelliert werden. Die Landnutzung ist entsprechend der Analysen regelmäßig zu aktualisieren.

Verschiedene Autoren verstehen unter Landschaft einen beliebig großen räumlichen Ausschnitt der Erdoberfläche, der durch einheitliche Struktur und gleiches Wirkungsgefüge seiner Komponenten bestimmt ist (z. B. STÜDEMANN und ECKERT 1999, JESSEL 1998, JACSMAN und SCHILTER 1995). Die Betrachtungsebene wäre dann durch den Stoffwechsel zwischen Gesellschaften und Natur festgelegt. Das Konzept der Landschaft und die landschaftsökologische Arbeitsweise betont in jedem Fall die Integration aller für die Betrachtungsebene notwendigen Komponenten, den Landschaftszusammenhang. Der „nordamerikanische Ansatz der Landschaftsökologie“ (vereinfacht nach BLASCHKE 1997) fokussiert dagegen vor allem auf quantitativen Methoden der Landschaftsanalyse, insbesondere der in diesem Beitrag angewandten „*landscape metrics*“ (TURNER 1990, FORMAN 1995, GUSTAFSON 1998, BLASCHKE 2000, TURNER et al. 2001). Darin wird die Landschaftsstruktur durch so genannte Landschaftsstrukturmaße (LSM; im englischen: *landscape metrics*) quantifiziert. In diesem reduktionistischen und anfangs stark pragmatischen Ansatz wird implizit vorausgesetzt, dass die Landnutzung und die spezifische Anordnung der kartierten Einheiten die Landschaftsstruktur widerspiegelt. Dazu müssen zu einem oder mehreren Zeitpunkten GIS Daten vorliegen, die sich häufig direkt oder indirekt auf Fernerkundungsaufnahmen stützen.

Diese „*landscape metrics*“ bietet eine nahezu unüberschaubare Vielzahl an Maßen an (GUSTAFSON, 1998; BLASCHKE, 2000; MCGARIGAL, 2002; MCGARIGAL et al. 2004), die in diversen Softwarelösungen implementiert sind (LANG et al. 2003). Heute steht weniger die Entwicklung weiterer Algorithmen im Mittelpunkt der Forschung als vielmehr Arbeiten zur Interpretation der Maßzahlen, deren Verhalten und Übertragbarkeit sowie auch zur Vergleichbarkeit unterschiedlicher Testgebiete (LANG et al. 2002, KLUG et al. 2003).

Alle LSM basieren auf der Abgrenzung kleinster, für den jeweiligen Betrachtungsmaßstab als relativ homogen geltender räumlicher Einheiten (vgl. Abbildung 1). Wassereinzugsgebiete sind typischerweise einige bis hunderte Quadratkilometer groß und enthalten je nach Betrachtungs- und Kartiermaßstab eine ausreichende Anzahl räumlicher Einheiten an Landnutzung, Landbedeckung oder Habitaten. Damit kann deren spezifische Anordnung räumlich-quantitativ analysiert und charakterisiert werden.

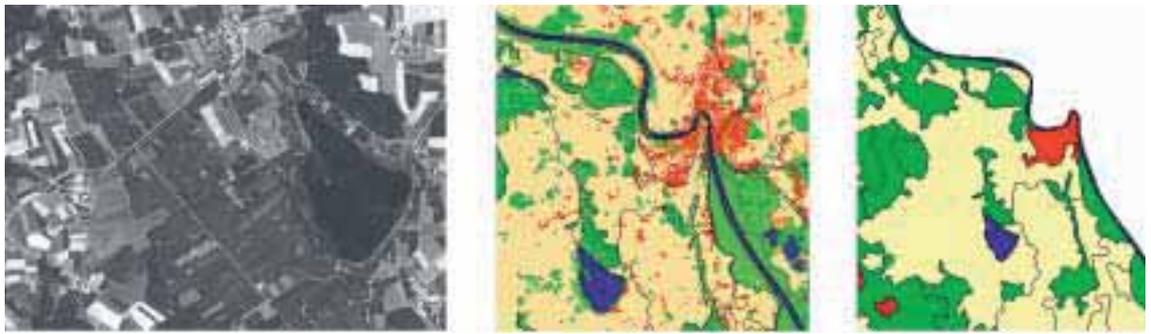


Abbildung 1

Ableitung homogener Einheiten der Landnutzung. Beispiel der starken Abstraktion von der Informationsvielfalt einer Fernerkundungsaufnahme (links: panchromatisches Satellitenbild mit 4 m Bodenauflösung), zu einer satellitenbildgestützten Landbedeckungsklassifikation (Mitte) im Vergleich mit vorliegenden ATKIS-Daten der Landnutzung (rechts) für einen Ausschnitt im Gebiet des Abtsdorfer Sees bei Laufen (Oberbayern)

2.3 Dimensionsstufen

Wassereinzugsgebiete bestehen aus Subsystemen, deren Summe (bestimmter Funktionen und Prozesse) zusätzliche emergente Eigenschaften aufweisen, als die bloße Summe der Einzelelemente. Prinzipiell können sie – unter vereinfachenden Rahmenbedingungen wie z.B. ausschließlich oberirdischer Abfluss – auf Basis digitaler Geländemodelle abgeleitet werden (MOORE und GALLANT 1991, MOORE et al. 1993). Auch hierfür existieren diverse Softwareprodukte wie z.B. SAGA (<http://134.76.76.30/saga/html/index.php>). Wassereinzugsgebiete liegen damit in hierarchischen Systemen vor, die mit der Dimensionsstufenlehre nach HERZ (1974) dargestellt werden können. Es wird zugrunde gelegt, dass verschiedene ökologische Prozesse der Erde unterschiedliche Reichweiten und Wirkungsgrade besitzen. Diese sind unterteilt in räumliche Größenordnungen der untersuchten Objekte sowie eine bestimmte Intensität bei der Analyse und Synthese.

Topische Dimension: Diejenige Betrachtungsstufe der Landschaftsökologie, in welcher die landschaftsökologischen Grundeinheiten („Tope“) ausgeschieden und untersucht werden. Diese elementare Grundeinheit wird in ihrer Verbreitung als homogen angenommen, auf Grundlage dessen weitere Analysen mit Landschaftsstrukturmaßen erfolgen können.

Chorische Dimension: Der Maßstabbereich der zur Untersuchung von Ökotopegefügen beiträgt, in dem die Verbreitung eines Merkmals als mehr oder weniger homogen angenommen wird („Chore“). Es wird die Theorie zugrunde gelegt, dass eine Chore mit einer maßstäblichen Verbreitung von etwa Kleineinzugsgebieten mit Analysemaßstab von etwa 1:50 000 aus Elementen der Tope aufgebaut wird.

Regionische Dimension: Analysebereich der geographischen Dimensionen, die Flächenabgrenzungen auf Basis der Choren vollziehen und einen Geltungsbereich im Rahmen von Untersuchungen von größeren Einzugsgebieten in Tal- und Gebirgslandschaften aufweisen (gen. Makrochoren).

Geosphärische Dimension: Die Geosphärischen Dimension wird je nach Aggregationsniveau auch als Megachore, Georegion und gesamte Geosphäre bezeichnet, in der gesamtirdische Prozesse Betrachtung finden.

Innerhalb eines Maßstabbereichs einer geographischen Dimension sind die Inhalte der untersuchten Objekte vergleichbar. Sie besitzen damit die gleiche Aussagekraft hinsichtlich des Wesens der Objekte. In einem abgegrenzten Forschungsmaßstab werden gleichartige Methoden zur Erreichung des Kenntnissziels angewandt. Für die Ebene der Wassereinzugsgebiete hat sich im deutschsprachigen Raum bisher kein spezifisches Methodenspektrum etabliert.

Notwendige Grundlagen für Analyse und Monitoring sind angesichts der Ausdehnung der WEG meist Fernerkundungsdaten (BLASCHKE 2002). Die verfügbaren Sensoren mit unterschiedlicher räumlicher, spektraler und zeitlicher Auflösung sowie die Brauchbarkeit der Produkte im Rahmen der Analyse von WEG werden u.a. in ASPINALL und PEARSON (2000) diskutiert. Die Fernerkundungsdaten dienen primär der Generierung von relevanten ökologischen Einheiten (Objekten) auf Basis von Klassifikationen und Segmentierungen (vgl. Abbildung 2), die heutzutage zunehmend auf Basis objektbasierter Methoden (z.B. eCognition) generiert werden. Fernerkundung war bisher stark auf pixelbasierten Auswertungen der Daten fixiert. In Kombination mit GIS bieten sich jedoch zunehmend objektbasierte Methoden an, um die raumstrukturellen Eigenschaften der WEG zu charakterisieren. Diese Anforderungen und die a priori mittel- bis kleinmaßstäbige Betrachtung führen zunehmend zu einem Einsatz von Verfahren aus dem Bereich GIS und Fernerkundung. In aktuellen Tendenzen der Bildverarbeitung wachsen beide Komponenten stark zusammen (BLASCHKE und STROBL 2001) und es entsteht eine Arbeitsrichtung, die als objektbasierte Bildverarbeitung bezeichnet werden kann. Dieser Ansatz findet derzeit fast ausschließlich auf Basis von Bildsegmentierungen Anwendung. Es

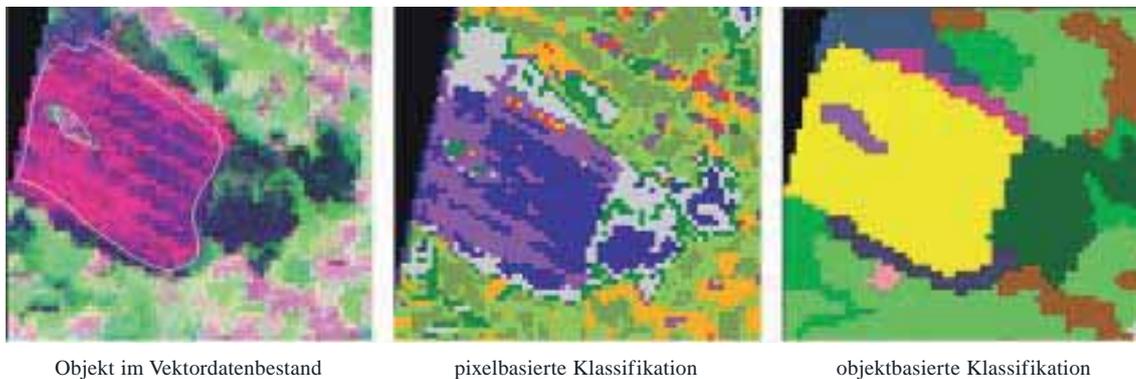


Abbildung 2

Vergleich einer pixelbasierten mit einer objektbasierten Klassifikation mit Referenz des Objektes im Vektordatenbestand

stellt sich immer mehr heraus, dass bei hochauflösenden Daten, vor allem also bei Luftbildern bzw. Orthophotos, die Pixel meist deutlich kleiner sind als die Erkenntnisobjekte. LANG et al. (2003b) stellen klassische Luftbildinterpretation mit anschließendem Digitalisieren einer objekt-basierten, auf Bildsegmentierung beruhenden Methode gegenüber und unterstreichen die prinzipielle Eignung im Landschaftsmonitoring.

3. Strukturbeschreibung und -analyse von Wassereinzugsgebieten

3.1 Die Erfüllung der Anforderungen der Wasserrahmenrichtlinie mit Landschaftsstrukturmaßen

In diesem Beitrag kann kaum auf Einzelaspekte der WRR wie z.B. Monitoring und mengenmäßige Kontrolle der Wasserentnahme/-führung etc. eingegangen werden. Vielmehr geht es um die Betrachtung flächenhafter ökologischer Zusammenhänge, die die Gewässergüte beeinflussen. Zu diesem Zweck legen die Autoren die Annahme zugrunde, dass die explizite Anordnung von Flächen (*patches*) in der Betrachtung und Erfüllung von Landschaftsfunktionen und Potenzialen essentiell ist (vgl. Abbildung 3). Um Aussagen über die Landschaftszustände formulieren zu können ist es notwendig, die Prozesse und Funktio-

nen der Kompartimente der Landschaft (Boden, Wasser, Klima/Luft, Relief, menschliche Einflussnahme) und deren Interaktionen zu verstehen. Dies ist nach O'NEILL et al. (1988) auf Grund folgender Hypothese möglich: „*aspects of spatial pattern [...] can be correlated with ecological processes*“.

Basierend auf der Hypothese, dass das Arrangement von Landnutzungen und deren zugrunde liegenden Prozesse einen entscheidenden Einfluss auf die Wasserqualität haben, werden horizontale Flächenparameter miteinander in Beziehung gesetzt. Es wird hierbei von der Annahme ausgegangen, dass punktuelle Emissionsquellen durch entsprechende Ver- und Gebote eliminiert werden und damit nicht zur Beeinträchtigung der Gewässer beitragen. Im Mittelpunkt des Beitrags stehen die diffusen Emissionen durch Austrag von Nähr- und Schadstoffen aus der Landwirtschaft, hervorgerufen durch Wind, Erosion und Zwischenabfluss (*interflow*). Um die letztgenannten Prozesse quantifizieren zu können, ist eine quantitative Erfassung und statistische Beschreibung von ökologisch relevanten räumlichen Einheiten Voraussetzung.

Im Folgenden wird eine Auswahl der Forderungen der WRR beleuchtet und dem gegenübergestellt inwieweit GIS, Fernerkundung und Landschaftsstrukturmaße zur Erfüllung dieser Forderungen eine tragende Rolle spielen können.

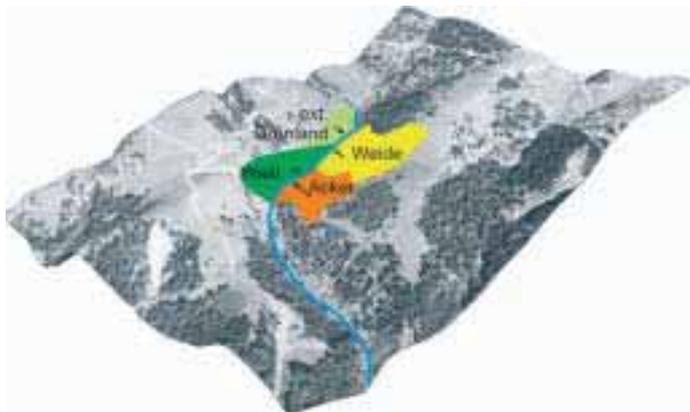


Abbildung 3

Signifikanter Zusammenhang zwischen der Anordnung der Landnutzungseinheiten und der Gewässergüte am Beispiel von Erosionserscheinungen. Die Länge der Pfeile spiegelt die potenzielle Austragsgefährdung wider

Die Forderung der WRR nach einer kompletten GIS-Aufnahme eines Einzugsgebietes einschließlich der Erstellung und Aktualisierung von Landschaftszuständen und deren Monitoring kann über Fernerkundungsmethoden und Überführung der klassifizierten Einheiten in ein GIS geleistet werden. Die temporale Dynamik wird über automatische oder semi-automatische Verfahren der Veränderungsdetektion (*change detection*) identifiziert und die Intensität der Änderung quantifiziert und/oder klassifiziert. Daraus können landschaftsökologische Modelle die Herkunft sowie die resultierenden Effekte und Auswirkungen der Veränderungen in der Zeit abgeschätzt werden. Während Veränderungen bisher meist über Pixel-zu-Pixel Vergleiche von Fernerkundungsdaten quantifiziert wurden, werden aktuell Verfahren entwickelt, über Einbeziehung vorhandener GIS-Daten und flächenhafte oder lineare Veränderungen über Regelwerke zu realisieren. Die Landnutzung/-bedeckung wird dabei über Einzelpixel hinaus als Objekte betrachtet und über *rule bases* in Fernerkundungsumgebungen wie eCognition (objektorientiert) oder Erdas Imagine (rasterbasiert) klassifiziert. Die Kombination mit GIS erlaubt daher auch externes, nicht direkt in den Fernerkundungsdaten „sichtbares“ Wissen einzubeziehen. Durch die Kombination und Integration neuer Auswertansätzen können semi-automatisch anthropogene Auswirkungen auf den Zustand der Landschaft und in der Folge auf den Zustand der WEG abgeschätzt werden. Damit wird die Entwicklung konkreter Managementpläne unterstützt. Über Risikokarten und Ausweisung von Optimalzuständen der Landnutzung/Landbedeckung in der Landschaft (vgl. KLUG 2002) sowie Szenarien können Handlungsoptionen aufgezeigt werden. Ferner sind Methoden der „guten fachlichen Praxis“ in der Landwirtschaft bekannt und helfen den Schadstoffaustrag zu minimieren.

Die Festlegung der Maßnahmenprogramme für die einzelnen Flussgebietseinheiten wird aus den Risikokarten und dem daraus abgeleiteten Handlungsbedarf deduziert. Die Maßnahmenprogramme orientieren sich an den akuten Gefährdungsflächen. Diese müssen auf Grundlage des zugrunde liegenden Potenzials der Fläche umgewidmet werden. Ob diese Umwidmung auch stattgefunden hat, lässt sich über Veränderungsindikatoren im geforderten sechsjährigen Monitoring ermitteln. Resultierend aus den Handlungsoptionen und

den sozioökonomischen Bedingungen der Region werden über partizipatorische und transdisziplinäre Vorgangsweisen Bewirtschaftungspläne aufgestellt, die wiederum über ein Monitoring aktualisiert werden müssen.

Wie zuvor dargestellt, sind die Aspekte von Wassereinzugsgebieten und die spezifischen Anforderungen an GIS, Fernerkundungsdaten sowie deren Auswertmethoden vielfältig; daran schließen sich Landschaftsanalyse und Monitoring an. Es wird festgehalten, dass die Kombination von GIS, Fernerkundung und Landschaftsökologie zur Bewältigung der genannten Aufgabenbereiche geeignet ist. Nachfolgend wird erläutert, welche Methoden seitens der Detektierung von Prozessen, Funktionen, Potenzialen und Risiken einer Fläche herangezogen werden können.

3.2 Einzugsgebiete als funktionale Einheiten vielfältiger Umweltprozesse

Wassereinzugsgebiete sind in der WRR die elementaren funktionalen Einheiten. Sie integrieren auf einer großen Fläche vielfältige Funktionen und diverse umweltbedingte Prozesse sowie – implizit – auch anthropogene Einflüsse (HASLAM und NEWSON 1995, WALKER und REUTER 1996, HAMBLIN 1998, COMMITTEE ON WATERSHED MANAGEMENT 1999). Wie kurz dargelegt, orientieren sich WEG weder an lokalen, regionalen oder administrativen Grenzen, sondern an Reliefbedingungen. Aus dieser Erkenntnis ergeben sich neue Herausforderungen an die landschaftsökologische Analyse. Grenzüberschreitende Betrachtungsweisen sind notwendig und relativ neu, ebenso wie die obligatorischen Reportpflichten an die EU. Schwierigkeiten ergeben sich u.a. durch die unterschiedliche Struktur der nationalen politischen Systeme und bei der Integration unterschiedlicher Daten. Wie bereits diskutiert, ist durch die räumlich explizite Betrachtungsweise die Fernerkundung im Zusammenspiel mit Methoden aus GIS und Landschaftsökologie prinzipiell dafür prädestiniert, wenngleich Fernerkundungsdaten auch Limitationen aufweisen, insbesondere bei zeitlich hochauflösend benötigten Daten oder zeitlichen Kontinua, bei sehr hohen räumlichen Auflösungen und z.B. bei der Einbeziehung vertikaler Strukturen. Eine ausgewählte Zusammenstellung von Potenzialen und Limitationen der Fernerkundung untergliedert nach Observationsschwerpunkten gibt Tabelle 1.

Tabelle 1
Potenzial und Limitationen der Fernerkundung

Potenzial	Limitationen
Meteorologie und Klimatologie	
<ul style="list-style-type: none"> • Temperaturverhalten verschiedener Oberflächen • Verlauf und Intensität von Wärmeströmungen • Bildung von Kaltluftseen 	<ul style="list-style-type: none"> • Grobe Auflösung der thermalen Sensoren • 3-Dimensionalität der Luftmassen

Tabelle 1 (Fortsetzung)

Potenzial und Limitationen der Fernerkundung

Land- und Forstwirtschaft	
<ul style="list-style-type: none"> • Kartenwerke und Planungsgrundlagen zur wirtschaftlichen Nutzung • Waldschadensforschung • Aufnahme der Landnutzung/ Landbedeckung • Abdeckung großer, grenzübergreifender Gebiete • Berechnung von Vegetationsindizes • Erkennung von Fruchtarten • Erfassung der Vitalität und der Ertragsaus-sicht der Pflanzenbestände • Nutzungskartierung, die Zustandserhebung und die Ertragsabschätzung • Kontrolle des Anbaus und von Subventionen 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitierte Möglichkeit der Aufnahme verti-kaler Strukturen • Momentaufnahmen der Landnutzung/ Landbedeckung, d.h. keine zeitlich kontinuierlichen Aufnahmen • Limitierte Möglichkeit der Aufnahme klein-teiliger Strukturen auf Grund der geometri-schen Auflösung (z.B. Einzelbäume, Hek-ken, schmale lineare Strukturen) • Meist nur mit hyperspektralen Daten möglich
Bodenkunde	
<ul style="list-style-type: none"> • Detektierung von Drainagerohren • Analyse der Bodenfeuchte 	<ul style="list-style-type: none"> • Nur oberste wenige Zentimeter analysierbar, Vegetation schirmt ab
Hydrologie	
<ul style="list-style-type: none"> • Kartierung von Wasserflächen im Küsten-bereich • Wasserverschmutzung, Umweltüberwachung • Schwebstoffverteilung • Uferrandstreifenkartierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Gewässerkartierung nur auf obere Wasser-schicht begrenzt. • Zeitliche Auflösung bzw. adhoc-Aufnahmen schwierig • 3-Dimensionalität des Wasserkörpers • Nur bei sehr hoch räumlich auflösenden Sensoren, evtl. zusätzlich hyperspektrale Daten notwendig
Relief	
<ul style="list-style-type: none"> • Extrahierung von DGM 	<ul style="list-style-type: none"> • Stark verkürzte bis verhinderte Aufnahme von steilen Flächen (z.B. Gebirge), Vegetati-on (Wald) muss korrigiert werden
Geologie und Mineralogie	
<ul style="list-style-type: none"> • Gesteinstypen und den tektonischen Aufbau einer Landschaft • Interpretation von Textur • Preiswerte Erstellung von Geodaten 	<ul style="list-style-type: none"> • Nur oberste Boden- bzw. Gesteinsschicht direkt analysierbar

Fernerkundungsdaten sind die Basis zur Klassifikation von Landbedeckungseinheiten und zur quantitativen Berechnung von Parametern und Indizes (z.B. Vegetationsindizes, Feuchtigkeitsindizes, etc.). Zu den GIS-Auswertefunktionalitäten kommen Möglichkeiten von Berechnungen auf den klassifizierten und/oder extrahierten räumlichen Einheiten mit Land-

schaftsstrukturmaßen hinzu. Diese Berechnungen auf Grundlage der Struktur (spezifische Anordnung, Größe, Gestalt, Art und Anzahl) haben zum Ziel, über die resultierenden Werte, Zusammenhänge von Prozessen (Beziehungen zwischen den einzelnen Kompartimenten eines Ökosystems durch Energieumsätze, Materie- und Stoffflüsse), Funktionen

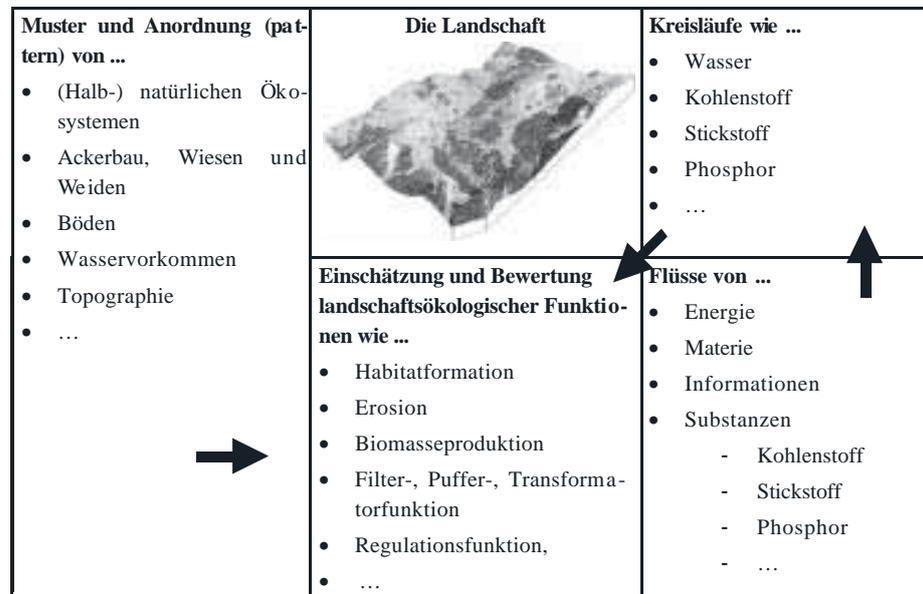


Abbildung 4

Zusammenhang von Pattern, Kreisläufen und Flüssen zur Einschätzung und Bewertung landschaftsökologischer Funktionen in der Landschaft

(Spezifische Interaktionen zwischen Subsystemen, Energie- und Materialflüsse) und Veränderungen (Zeitabhängige Änderung der Strukturen, Prozesse und Funktionen) zu indizieren und daraus Schlussfolgerungen für das Gesamtsystem abzuleiten (vgl. Abbildung 4).

Landschaftsstrukturmaße stellen zu einem spezifischen Zeitpunkt den Zustand und die Komponenten der Landschaft auf Basis der Landnutzung und seiner Strukturelemente dar. LSM ermitteln die Anzahl an Flächen und deren Verbreitungs- und Anordnungs-eigenschaften sowohl für eine einzelne Landnutzungs-klasse (z. B. Anzahl, Flächen, Verteilung, Entfernungen aller Einzelflächen der Klasse „Feuchtgebiete“ oder für die gesamte Landschaft. Die LSM oder *landscape metrics* sind zunächst rein deskriptiv und wertfrei. Interessant wird jedoch der Vergleich zwischen Landschaftsausschnitten und zwischen Zeitpunkten. Letztere Zeitreihen dienen der Dokumentation von Veränderungen der Elemente wie Bäume, Hecken, Gebüsch sowie der Landnutzungsflächen in deren Größe, Verbreitung und Anordnung. Diese Veränderungen haben nach dem „*pattern process relationships*“ nach FORMAN (1995) Bedeutung für den Zustand des WEG. Das treibende Veränderungspotenzial liegt in den zugrunde liegenden Prozessen, die wiederum durch äußere Einflüsse (anthropogen oder natürlich) gesteuert werden. Welche Landschaftsstrukturmaße potenziell zur Indikation von Veränderungen oder der Detektion von Prozessen herangezogen werden können, zeigt das folgende Kapitel.

3.3 Anwendungsgebiete von Landschaftsstrukturmaßen im Kontext der WRR

Eine Reihe von Autoren identifizieren Indikatoren zur Bewertung von Landschaften (FORMAN und GODRON 1986, FORMAN 1995, TURNER 1989, RIITERS et al. 1995, u.a.). Eine Vielzahl dieser ist in

diversen Softwarelösungen implementiert und in Geographischen Informationssystemen oder so genannten „stand alone“ Produkten leicht umzusetzen (LANG et al. 2003a). Nach ASPINALL und PEARSON (2002) haben nur wenige derzeit existierende LSM eine direkte Relevanz zur Bewertung von WEG. Die Aufgabe der LSM kann daher im Wesentlichen nur in einem zusätzlichen Beitrag zur Erfassung von (landschafts-)ökologischen Beziehungen bestehen (MALANSON 1993).

Zur Zustandsbeschreibung, Charakterisierung, Veränderungsindikation und -evaluierung wird ein multipler Indikatoransatz als zielführend erachtet. Im Folgenden wird ein in sieben Gruppen gegliedertes Set an Landschaftsstrukturmaßen vorgestellt, die potenziell zur Charakterisierung von WEG herangezogen werden können. Diese Gruppen reflektieren die Hauptaspekte der Strukturanalyse nach MCGARIGAL (2002), TURNER et al. (2001), und LANG et al. (2002) um entscheidende Zustandsparameter möglichst umfassend zu beschreiben. Eine Mehrzahl der Kategorien (Fläche, Form, Kantenanalyse, Kernanalyse, Proximityanalyse, Diversitätsanalyse und Subdivisionanalyse) beschreiben Form und Konfiguration des Landschaftsmusters. Ferner befinden sich unter den genannten Kategorien Diversitätsmaße, die die Komposition der Landschaft auf Landschaftsniveau (*landscape level*) beschreiben. Eine detaillierte Erläuterung der Kategorien geben LANG und KLUG (2003).

In der folgenden Tabelle erfolgt die Zuordnung der Landschaftsstrukturmaße auf Grundlage spezifischer Prozessschutzziele. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass Bewertungs- und Analyseverfahren auf Grundlage von konkreten ökologischen Fragestellungen zielführend sind. Dies stellten auch LANG et al. (2002) im Kontext des Natura 2000 Monitoring heraus.

Landschaftsstrukturmaße im Kontext von Fragestellungen zur Wasserrahmenrichtlinie.

F: Fließgewässer, W: Wald, A: Acker, IW: Intensivwiese, IWE: Extensivwiese, EW: Extensivweide

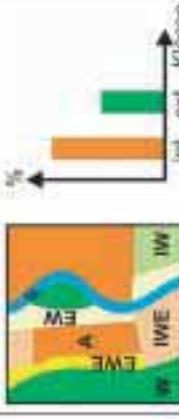
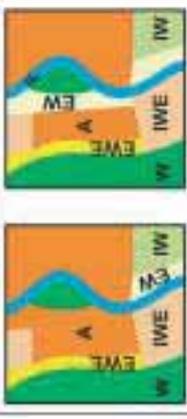
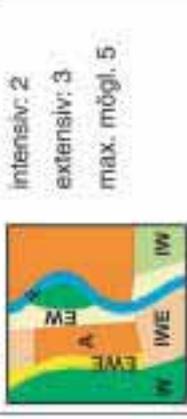
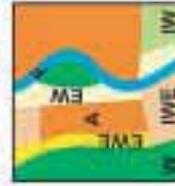
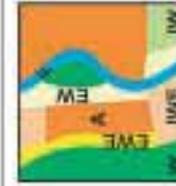
Fragestellung zur WRR	Ökologische Aussage	Metric, Maßerläuterung, Probleme	Visuelle Darstellung
Wie viel intensiv bzw. extensiv genutzte Fläche wird von einer Landnutzungs-kategorie im WEG eingenommen?	Je intensiver eine Fläche genutzt ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit des Austrages. Hinweise auf mögliche Gefahrenquellen bezüglich Stoffausträge aus der Landwirtschaft.	<p>Total Class Area (CA) PLAND gibt den Prozentanteil einer Fläche am Gesamtgebiet wider. CA die absolute Größe. Aufgrund des relativen Maßes ist PLAND besser zur Analyse geeignet als CA.</p>	
Hat die Veränderung einer Flächeneinheit im Vergleich zweier Aufnahmezeitpunkte durch Zunahme, Abnahme oder Verschwinden einen positiven Effekt auf die Wasserqualität?	Je extensiver die Fläche bewirtschaftet wird, desto geringer die Gefahr eines Stoffaustrages.	<p>Area Für eine objektive Analyse sind die Potenziale der Fläche mit in das Maß zu integrieren, da bei hohem Potenzial die Schadstoffpufferung hoch und damit die Austragsgefährdung gering ist.</p>	
Wie viele intensiv/intensiv genutzte Flächen grenzen direkt an Gewässer an? (auch standardisiert im Vergleich zur maximal möglichen Anzahl angrenzender Flächen)	Extensive Landnutzung wird als Pufferstreifen / Schutzgürtel um Wasserkörper gefordert, um den Sediment- und Nährstoffaustrag durch Erosion zu dezimieren. Die Anzahl der Flächen intensiver Landnutzung, die an ein Gewässer angrenzen, im Vergleich zu denjenigen extensiver Landnutzung geben einen Überblick über die mögliche Intensität des Nährstoffaustrages. Ein Bezug zur Kontaktlänge der Fläche mit dem Gewässer ist notwendig.	<p>Patch Density (PD) Number of patches (NP) PD drückt die Anzahl der Patches bezogen auf eine Flächeneinheit aus und ermöglicht damit als relatives Maß, im Gegensatz zu NP, eine Vergleichbarkeit verschiedener Analysen. Die Abgrenzung der Flächeneinheiten muss auf Basis ökologischer Fragestellungen erfolgen und ist kritisch für die ökologische Relevanz der Aussagen aus der Berechnung.</p>	 <p>neg. 10 pos. 11 intensiv: 2 extensiv: 3 max. mögl. 5</p>
Handelt es sich um eine agrarisch, forstlich oder urban geprägte, um eine insgesamt intensiv oder extensiv genutzte, um eine gegliederte oder um eine ausgeräumte Landschaft?	Charakterisierung der Intensität der Land-schaftsnutzung. Die Anzahl der Flächen intensiver Landnutzung im Vergleich zu extensiver Landnutzung als Grobmaß zur Intensität.	<p>Patch Density Number of Patches Die Interpretation kann durch wenige große Flächen fehlgeleitet werden, so dass eine Interpretation nur im Zusammenhang mit der Flächengröße eine gesicherte Aussage bietet.</p>	 <p>intensiv: 5 extensiv: 5</p>

Tabelle 2

Landschaftsstrukturmaße im Kontext von Fragestellungen zur Wasserrahmenrichtlinie.

F: Fließgewässer, W: Wald, A: Acker, IW: Intensivwiese, IWE: Extensivwiese, EW: Extensivweide

Fragestellung zur WRR	Ökologische Aussage	Metric, Maßberläuterung, Probleme	Visuelle Darstellung
<p>Wie groß ist die an ein Gewässer angrenzende Fläche bei hydrologischer Ausrichtung der Fläche auf das Gewässer?</p>	<p>Im Falle einer intensiv genutzten Parzelle können kumulative Effekte vor allem bei Reliefeinfluss zur starken Beeinträchtigung des Gewässers führen.</p>	<p>Area Die Interpretation ist schwierig, wenn die Fläche nur teilweise an das Gewässer angrenzt und Tiefenlinien keine Berücksichtigung finden.</p>	
<p>Wie lang ist die Kontaktlänge zwischen Gewässer und intensiver Landwirtschaft?</p>	<p>Maß zur Einschätzung der potenziellen direkten Austragsgefährdung von Schadstoffen entlang der angrenzenden Landnutzung. Um die mengenmäßige Bedeutung des Austrages abzuschätzen müssen auch Reliefaspekte und Größe der Fläche mit in das Maß einfließen.</p>	<p>Total Edge (TE) bezogen auf die gesamte Kontaktfläche (ähnlich Edge Density (ED)), angegeben in Meter Standardisierung: maximal mögliche Kontaktfläche des Gewässers mit seiner Umgebung.</p>	
<p>Inwiefern trägt der Vorfluter zur Retention von Wasser bei?</p>	<p>Die Verlängerung des Flusslaufes bedeutet mehr Wasservolumen auf kleinerer Fläche und damit höheres Retentionsvermögen. Daraus ergibt sich eine geringere Hochwassergefahr sowie durch die längere Kontaktzeit des Wassers im Gebiet ein höheres Filter-, Puffer- und Transformatorvermögen von Schadstoffen.</p>	<p>Kurvigkeit der Flüsse = Total Edge (TE) in Bezug zur euklidischen Fließlänge: Edge Density (ED) TE misst die absolute Kantlänge des Fließgewässerkörpers. Edge density (ED) standardisiert hingegen die Kantlänge auf ein Flächenmaß (m^2), was bei einem Vergleich von Landschaften unterschiedlicher Größe notwendig ist.</p>	
<p>Inwiefern ist die betrachtete Landschaft anitropogen überprägt?</p>	<p>Die Komplexität der Flächen nimmt in einer anitropogen überprägten Landschaft ab. Einfache Formen werden in agrarisch geprägten Kulturlandschaften erwartet. Natürliche Waldgebiete weisen eher komplexere, zerlappende Formen auf. Wenig komplexe ("geometrische") Strukturen und eine niedrige Fraktale Dimension spiegeln potenzielle Intensivgebiete wieder.</p>	<p>Shape Fraktale Dimension PAFRAC Die Fraktale Dimension zeigt die Komplexität der Flächenformen (patch shape), ebenso wie PAFRAC.</p>	

Landschaftsstrukturmaße im Kontext von Fragestellungen zur Wasserrahmenrichtlinie.

F: Fließgewässer, W: Wald, A: Acker, IW: Intensivweide, IWE: Intensivweide, EW: Extensivweide, EWE: Extensivweide

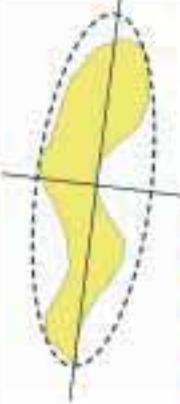
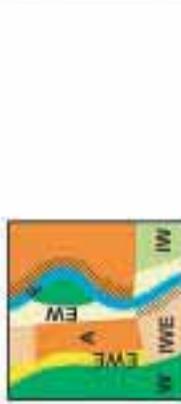
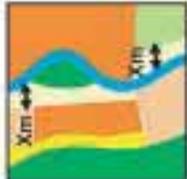
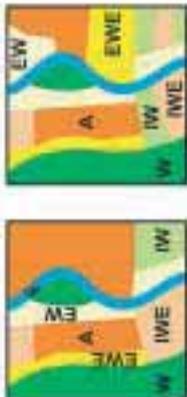
Fragestellung zur WRR	Ökologische Aussage	Metric, Maßerläuterung, Probleme	Visuelle Darstellung
<p>Wie stark ist der betrachtete Flusslauf anthropogen geprägt (kanalisiert bis mäandrierend)?</p>	<p>Die Komplexität bzw. Monotonie der Anordnung eines Flusssystemes deutet auf den anthropogenen Überprägungsgrad hin. Je komplexer und verzweigter das Flusssystem ist, desto natürlicher und höher der Wert. Einfache Strukturen widerspiegeln meist überprägte Formen wie Kanäle, Gräben, etc.</p>	<p>Linearity Index nach MAT (medial axis transformation) Das Maß basiert auf einem Flächenmaß. Aufgrund dessen ist es nur auf breiteren, als Polygon (nicht als Linie) dargestellten Flussläufen anwendbar.</p>	
<p>Wie viel potenzielle Retentionsfläche steht zur Wasserrückhaltung zur Verfügung?</p>	<p>Bei Retentionsflächen müssen Randeffekte durch Schadstoffe (Wind-, Partikel und Liquid-austausch) berücksichtigt werden. Dabei kann sich die Fläche der unbeeinflussten Retentionsfläche drastisch verkleinern. Der Randeffekt hängt maßgeblich von Art der Düngung / Insektizidabgabe und dem Gefälle ab.</p>	<p>Core Area (Kernflächenmaß bei Abzug von Randstreifen festgelegter Größe)</p>	
<p>Wie viel Fläche (in ha) muss von einer dem Fluss zugewandten intensiven Nutzfläche abgezogen werden, um über einen Pufferstreifen das Eintrittspotenzial von Schadstoffen zu verringern?</p>	<p>Zu verwendender Pufferstreifen gegenüber einer sich ausschließenden Nutzung (z.B. intensiver Acker direkt angrenzend an einen See). Ermittlung derjenigen Flächenausdehnungen, die innerhalb des Puffers liegen und potenzielle Gefahren bergen. Die Ermittlung des prozentualen Anteils an Schadflächen im WEG zeigt indirekt den Umfang des Handlungsbedarfs und gibt Aufschluss über gegebenenfalls umzuwidmende Teilflächen sowie über die Höhe der Ausgleichszahlungen.</p>	<p>Core Area Berechnung auf Basis selektierter Flächen Die Breite des Pufferstreifens zur Berechnung des Randeffekts und der verbleibenden Flächen (core areas) muss entsprechend der Problemstellung und des Betrachtungsmaßstabs gewählt und evtl. für einzelne Fragestellungen separat berechnet werden.</p>	
<p>Wie groß ist der Abstand zwischen dem Wasserkörper und der ihr reliefbedingt zugewandten landwirtschaftlichen Nutzfläche?</p>	<p>Je näher eine intensiv genutzte Fläche an einem Gewässer angrenzt, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit des Austrages von Nähr- und Schadstoffen. Je geringer die Distanz desto geringer die Pufferkapazität durch Schutzgürtel oder Pufferstreifen und desto größer die Gefahr der Stoffverlagerung. Die Qualität der Stoffverlagerung wird durch die Flächengröße und das Relief der angrenzenden Fläche beeinflusst.</p>	<p>Proximity („ökologische Nähe“) Distanz Im Gegensatz zu Habitatmodellen und Modellen zum Ausbreitungs- und Wanderverhalten von Tieren ist in diesem Fall eine lineare Ausbreitung der Stoffe dem Gefälle des Gradienten folgend zu vermuten.</p>	

Tabelle 2

Landchaftsstrukturmaße im Kontext von Fragestellungen zur Wasserrahmenrichtlinie.

F: Fließgewässer, W: Wald, A: Acker, IW: Intensivwiese, IWE: Extensivwiese, EWE: Extensivweide

Fragestellung zur WRR	Ökologische Aussage	Metric, Maßerläuterung, Probleme	Visuelle Darstellung
<p>Wie stark ist das Fluss- bzw. Seensystem vom Umland (intensiven Acker- und/oder Grünlandparzellen) isoliert oder eingebunden?</p>	<p>Filter- und Barriereeffekte beugen dem negativen Einfluss vor bzw. verhindern diesen. Je stärker ein Gewässer von diesen Flächen isoliert ist, desto geringere Auswirkungen auf die Wasserqualität sind zu erwarten. Distanzeffekte bewirken eine Ausbreitungsminimierung der Nähr- und Schadstoffe durch größere Filterstrukturen und geringere Permeabilitätskoeffizienten.</p>	<p>Kombination von Distanz- und Isolationsmaßen</p>	
<p>Sind die Landnutzungseinheiten geklumpt oder kleinteilig dispers verteilt?</p>	<p>Im Allgemeinen wird angenommen, dass in einer kleinteiligen, reich gegliederten Landschaft der Prozesshaushalt ausgeglichener ist, wohingegen große geklumpete Flächen auf große Schläge mit intensiver Nutzung schließen lassen. Viele kleine Flächen ergeben in Summe auch relativ gesehen mehr Grenzflächen zwischen unterschiedlichen Nutzungen.</p>	<p>Contagion („Klumpungsgrad“) PLADJ („Aggregationsgrad einer Klasse“) Contagion misst den Grad der Aggregation von Flächeneinheiten. PLADJ misst den Grad der Aggregation der betrachteten Klasse. PLADJ misst daher den klassenspezifischen Contagion.</p>	
<p>Wie stark ist das Gefährdungspotenzial einer an das Gewässer angrenzenden Landnutzung?</p>	<p>Je nach Intensität der an das Gewässer angrenzenden Landnutzungseinheit besteht eine unterschiedlich starke potenzielle Beeinträchtigung. So ist ein Übergang von Laub- zum Mischwald ökologisch wesentlich ausgeglichener als ein Übergang vom Acker zum See. Je geringer der Kontrast zweier aneinandergrenzender Flächeneinheiten, desto ausgeglichener sind die Stoffkreisläufe und desto geringer ist das Gefährdungspotenzial des Gewässers.</p>	<p>ECON ist ein relatives Maß für die Stärke des Kontrastes zweier angrenzender Flächen bezogen auf ihre gemeinsame Grenzlinie. CWED standardisiert ECON auf eine Flächeneinheit, sodass das Maß für unterschiedliche Landschaften vergleichbar wird. Der Grad des Kontrastes der Klassen wird in einem Klassifikationschema über eine Matrix definiert. Dabei gilt die Annahme, dass je höher der Kontrast einer Landschaft ist, desto höher ist auch das Gefährdungspotenzial.</p>	

Im Rahmen der Untersuchung von WEG liefern quantitative Maße standardisierter geometrischer Charakteristiken von Flächen, Umfängen und Distanzen Einblick in die hydraulischen Beziehungen (Fließrichtungen, Retentionsbecken, etc.) und das Zusammenwirken oberflächennaher Komponenten des Geoökosystems. ASPINALL und PEARSON (2000) heben Landschaftsstrukturmaße wie Flächengröße, Anzahl der Flächen, Klumpungs- und Streuungsmaße (Contagion) hervor, die die räumlich überzufällige Häufung („Zusammenballung“) von Flächen im Wassereinzugsgebiet widerspiegeln (vgl. auch O'NEILL et al. 1988, TURNER 1989, 1990). Ferner wird die Fraktale Dimension (*fractal dimension*) herangezogen, um die Komplexität der Landschaft zu erkunden (KRUMMEL et al. 1987, O'NEILL et al. 1988). Letztgenannte Maße werden in landschaftsökologischen Studien häufig verwendet und sind in diversen Softwarelösungen implementiert.

Das Maß der Kurvigkeit der Flüsse, Kanäle und Gräben gibt die Struktur der linearen Gewässer wieder und wird als Verhältnis der realen Flusslänge zur direkten flussabwärts gerichteten Länge verstanden (LEOPOLD et al. 1964). Das Verhältnis der Flusslänge zum direkten Flussgefälle ermöglicht eine Aussage über das Rückhaltevermögen bzw. die Wasserspeicherefähigkeit eines Einzugsgebietes.

Die meisten in Tabelle 2 dargestellten Landschaftsstrukturmaße beziehen sich auf Landnutzungs- und/oder Landbedeckungseinheiten. Ausnahme sind die o. g. Indizes von O'NEILL (1988) mit dem Dominanz-Index und Contagion-Index, die auf Basis von Bodeneigenschaften berechnet wurden. Aus den Landbedeckungseinheiten werden anthropogene Prozessstrukturen abgeleitet, die auf die Intensität der Landnutzung und damit der Wahrscheinlichkeit von Schadstoffausbreitungen schließen lassen. Ferner sind auch Bodenparameter wichtige Grundlagen zur Bestimmung des Ausbreitungs-, Transformator- und Pufferverhaltens von Schadelementen in der Landschaft. Folgenden Maßen kommt dabei eine besondere Bedeutung zu. Der Dominanz-Index wurde von O'NEILL (1988) zur Ermittlung der Verbreitung homogener Substratflächen auf Bodendaten angewendet. Der Index misst die Ausdehnung, inwieweit eine Substratklasse das WEG beherrscht. Diese kann in Verbindung mit Bewertungsverfahren des Filter-, Puffer- und Transformatorpotenzials Auskunft über den Gefährdungsgrad des WEG gegenüber der Auswaschung von Nitrat, Phosphor und Schwermetallen herangezogen werden (MARKS et al. 1992). Der Contagion Index hingegen zeigt, inwiefern diese Flächen geklumpt vorkommen, oder eher gleichmäßig verbreitet sind. Geklumpt bedeutet z. B., dass potenziell gute Bodeneigenschaften nicht überall im Gebiet vorkommen sondern nur in einem Teilausschnitt und damit evtl. ein Risiko auf den anderen Flächen besteht.

3.4 Von Landschaftsstrukturmaßen zu Indikatoren

Auf Grundlage wissenschaftlicher Methoden und Ansätze müssen Veränderungen qualitativ bewertet werden. Die wissenschaftliche Herausforderung liegt darin, die zuvor diskutierten, zunächst wertfreien Maßzahlen zur Analyse und Charakterisierung der Landschaftsstruktur zu Indikatoren aufzuwerten (LANG et al. 2002; KLUG et al. 2003). Um diesen Prozess zu konkretisieren bedarf es eines weiteren Schrittes; der Inwertsetzung dieser Maßzahlen.

Damit wird der Boden naturwissenschaftlicher Forschung verlassen und gesellschaftliche Werte, Normen sowie gegebene Planungskultur in das Gebietsmanagement einbezogen. Die dargestellten Strukturmaße müssen zunächst auf ökologische Relevanz, Sensitivität und Datenabhängigkeit geprüft werden. Dies bedeutet auch, dass eine gewisse Veränderungsspannbreite eines Maßes evtl. als nicht signifikant angesehen wird und Aussagen über die Qualität der Veränderung mit Toleranzbereichen angegeben werden müssen. Das setzt voraus, dass einerseits die zugrunde liegenden Prozesse der Veränderung verstanden sind und andererseits die Annahme getroffen wird, dass die Wertänderungen linear zu interpretieren sind. Aus dieser Prognose sollten folglich Richt-, Grenz- und Schwellenwerte abgeleitet werden, die einen Zustand als akzeptabel oder inakzeptabel deklarieren. Ohne hier die Debatte der Problematik von Richt-, Grenz- und Schwellenwerte aus den 80ern zu wiederholen, müssen diese Schwellenwerte sich am Potenzial der Selbsterhaltung von Funktionen und Prozessen in der Landschaft orientieren. Schwierig ist, den so genannten „turn over“ zu bestimmen, von dem an sich ein System irreversible verändert. Das Prinzip einer nachhaltigen Landnutzung muss daher sein, sich innerhalb eines akzeptablen Bereiches zu positionieren. Doch gerade die Wertfeststellung der Maßzahlen sowie deren Übertragbarkeit auf andere WEG bergen diverse Probleme.

Quantifizierungen sind zum Teil mit Definitionsproblemen, andererseits mit Interpretationsproblemen verbunden. Während zum Beispiel der Mittelwert einer Menge gut berechenbar und unumstritten ist, ist dessen Bewertung schwieriger oder auch kontextabhängig. Der Mittelwert der Körpergröße aller neu eingeschulten Schüler einer Klasse ist leicht zu messen. Ob ein Wert von 1,17 m „gut“ oder „schlecht“ bzw. „hoch“ oder „niedrig“ ist, ist nur im Vergleich mit anderen Daten oder durch Vorgabe gesellschaftlicher Werte möglich.

Die Interpretation von Maßzahlen zur Landschaftsstruktur ist daher nur kontextbezogen möglich (FORMAN 1995, Mc GARIGAL 2002, BLASCHKE 1999). Dies kann aus eigenen Erfahrungen nur gestützt werden und ist nur eins von vielen weiteren Problemreichen. Prinzipielle Probleme der bisher besprochenen Maße sind u. a.: „Bias“-Eigenschaften, Abhängigkeit

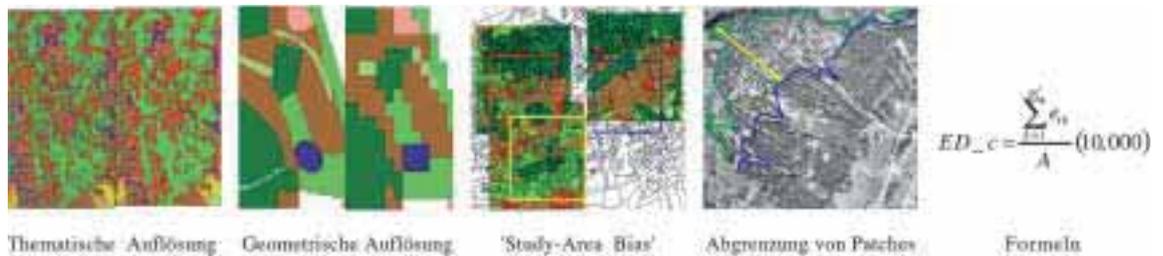


Abbildung 5

Darstellung von Problembereichen die im Zusammenhang mit der Verwendung von LSM auftreten können (Abgrenzung, Identifikation der Patches, Study-Area Bias, Thematische Auflösung, Geometrische Auflösung, Formeln)

von der räumlichen/geometrischen und thematischen Auflösung, Redundanzen, Korrelationen und Duplikationen von Informationen als auch Beeinflussungen in der Wahl des Untersuchungsgebietes und der mathematischen Formeln per se (vgl. Abbildung 5). Ferner bestehen Probleme in der ökologischen Aussagekraft der Maße im Sinne der Frage, was die *Metric*s eigentlich quantifizieren und damit welchen ökologischen Prozess sie widerspiegeln (HAINES-YOUNG und CHOPPING, 1996). Die Indizes geben häufig keine Auskunft über die zugrunde liegenden Prozesse und deren Interaktion mit dem Prozessgefüge, geschweige denn der Sensitivität der Maße gegenüber diesen. Dies bedeutet, dass die Veränderungen in der Landschaft nur mäßig bis gar nicht evaluiert werden können. Ferner bestehen massive Probleme in der räumlich/zeitlichen Übertragbarkeit von LSM, die in landschaftsökologische Methoden verwendet werden (HULSHOFF 1995).

Im Zusammenhang mit der europaweit geltenden WRR werden aber allgemein gültige, nachvollziehbare und übertragbare Maße und Verfahren benötigt. Um den zuletzt genannten Problemen begegnen zu können, wurde auf Grundlage einer umfassenden Literaturstudie von KLUG et al. (2003) eine Datenbank mit derzeit bekannten Landschaftsstrukturmaßen aufgebaut. Die erfassten Parameter geben einen Überblick über Anwendungsmöglichkeiten und Praxisanwendungen. Vorliegende Werte berechneter Maßzahlen sollen auf diese Weise vom jeweiligen Fachexperten analysiert und auf Grundlage der eigenen Erfahrungen und Gebietskenntnis interpretiert werden. Aus dieser Interpretation lässt sich dann gegebenenfalls eine Wertstufung zur Eingrenzung von optimalen bzw. suboptimalen Wertebereichen vornehmen. Die Autoren hoffen, über diese Anwendungsdokumentationen in Testgebieten Landschaftsstrukturmaße hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit beurteilen zu können um die zugrunde liegenden Prozesse zu beschreiben und zu verstehen. Dieser Schritt lehnt sich an jüngste Bestrebungen an, die Aussagekraft und Interpretierbarkeit der LSM zu forcieren (McGARIGAL et al. 2004).

Die zeitliche Dimension wirft neben der weithin bekannten Größe der zeitlichen Auflösung (Wiederholungsrate) weitere Fragen auf, z.B. hinsichtlich der

zeitlich punktgenauen Aufnahme, die ein Setting zu einem bestimmten, möglicherweise nicht repräsentativen Zeitpunkt bestimmt. Die Veränderlichkeit einer Qualitätskomponente sowie evtl. saisonale Veränderungen lassen teilweise keine zuverlässige typspezifische Referenzbedingungen bzw. Interpretation für die observierten Komponenten zu.

4. Schlussfolgerungen /Ausblick

Landschaftsstrukturmaße werden zur Charakterisierung eines Wassereinzugsgebietes als notwendig erachtet, sofern die zugrunde liegende These, dass die Landschaftsstruktur als eine Art Indikator stellvertretend für viele Funktionen und Prozesse steht, zutrifft. Dies haben auch LANG et al. (2002) für Natura 2000 Gebiete festgestellt. Landschaftsstrukturmaße können die Charakterisierung, Analyse und Bewertung von Landschaften unterstützen. Sie sind angesichts der geringen Kenntnisse über Verhalten und Transferierbarkeit der Indizes aber derzeit nur bedingt für unmittelbare Schlussfolgerungen geeignet. Es bietet sich jedoch das Potenzial, *landscape metrics* innerhalb eines Monitoringprogrammes einzusetzen (HERZOG et al. 2001).

Es wurden in diesem Beitrag einige Problembereiche der *landscape metrics* in Bezug auf Korrelationen und Redundanzen dargelegt. Aufgrund der derzeit noch limitierten Erfahrungen über die Verhaltensweisen der Maßzahlen in unterschiedlichen Landschaften ist die Interpretation der Werte sowie die Übertragbarkeit der Maße und der damit zusammenhängenden gebietsübergreifenden Bewertung erschwert. Für weitere Forschungsarbeiten wurde daher von KLUG et al. (2003) eine Indikatorendatenbank aufgebaut, die eine Anwendungsdokumentation integriert. Damit wird der Anwender unterstützt, das Verhalten der Maßzahl und deren Wertebereich abzuschätzen, um daraus entsprechende Interpretationen abzuleiten. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Charakterisierung, Quantifizierung und Interpretation der Landschaftsstruktur Zukunftsaufgaben und Gegenstand der derzeitigen Forschung sind, diese aber nicht trivial ist. Diese Auffassung teilen auch McGARIGAL (mdl. Mitt.) und FORMAN (1995). Es wird parallel zum Ansatz der Dokumentation von

Landschaftsstrukturmaßen in der Anwendung versucht, letztere direkt auf kontinuierliche, nicht vorprozessierte Rasterdaten (Satelliten- und Luftbilder) anzuwenden (McGARIGAL et al. 2004).

Es fehlen derzeit noch Methoden, die eine generelle ökologische Interpretation der Maße über den Einzelfall hinaus erlauben. Die Interpretation der direkt messbaren Strukturen muss auf das Verständnis von Prozessen gestützt analysiert werden. Die Indikatoren sollen aufgrund ihrer ökologischen Bedeutung die Zustände und die Entwicklungstrends der Landschaft und damit die Richtung einer nachhaltigen Landnutzung aufzeigen. Daher muss eindringlich darauf hingewiesen werden, dass eine Landschaftsstrukturanalyse kein Selbstzweck sein kann. Aussagen über Zusammenhänge, Funktionen und Prozesse sind dringend gefordert. Herausforderungen und Forschungsschwerpunkte liegen u.a.:

- im Einsatz von neutralen Modellen/Versuchen zum Indexverhalten (Steuerung der Veränderung künstlicher Landschaften und Testen des Verhaltens und der Nachvollziehbarkeit der Maße).
- in der Untersuchung der ökologischen Relevanz/Eignungsabschätzung bei Bewertungsfragen.
- in der Abschätzung der Einsatzmöglichkeiten der Strukturindizes in Fachplanungen (UIS, LIS, Monitoring).
- der Weiterentwicklung/Verbesserung der Maßzahlen.
- Bereitstellung semi-automatisierter Verfahren mit internationaler Bindung (z. B. EU-weit im Natura 2000 Kontext).

Abschließend wird betont, dass derzeit eine Diskrepanz zwischen der Vielzahl prinzipiell einzusetzender Maßzahlen und in der Praxis etablierten Maßen und Indikatoren besteht. Daher versteht sich die hier vorgestellte Auswahl als ein erster Schritt. Es erscheint bei Betrachtung der rechtlich verbindlichen Europäischen Wasserrahmenrichtlinie als unbedingt notwendig, diese Ergebnisse durch operationelle Anwendung in der Praxis zu untermauern.

5. Literatur

ALLEN, T. (1998):

The landscape „level“ is dead: persuading the family to take it off the respirator. In: Peterson, D.; Parker, V. (eds.): Ecological scale. Columbia University Press, New York, 35-54.

ASPINALL, R.J. & D.M. PEARSON (2000):

Integrated geographical assessment of environment condition in water catchments: linking landscape ecology, environmental modelling and GIS. In: Journal of Environmental Management, Vol. 59, pp. 299-319

BLASCHKE, T. (1997):

Landschaftsanalyse und -bewertung mit GIS. Methodische Untersuchungen zu Ökosystemforschung und Naturschutz am Beispiel der bayerischen Salzachauen. Forschungen zur deutschen Landeskunde, Bd. 243, Trier.

BLASCHKE, T. (1999):

Quantifizierung der Struktur einer Landschaft mit GIS: Potential und Probleme. In: Walz, U. (Hrsg.), Erfassung und Bewertung der Landschaftsstruktur für Umweltmonitoring und Raumplanung, IÖR-Schriften, Dresden, 9-24.

BLASCHKE, T. (2000):

Landscape metrics: Konzepte eines jungen Ansatzes der Landschaftsökologie im Naturschutz. – In: Archiv für Naturschutz & Landschaftsforschung, H. 9, S. 267-299.

BLASCHKE, T. & J. STROBL (2001):

What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS. In: GIS – Zeitschrift für Geoinformationssysteme, H. 6/01, S. 12-17

COMMITTEE ON WATERSHED MANAGEMENT (1999):

New Strategies for America's Watersheds, 311 pp. Washington DC: National Academy Press.

EU-KOMMISSION (2000):

Richtlinie 2000/60/EG Des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (Wasserrahmenrichtlinie).

FORMAN, R.T. (1995):

Land Mosaics: the ecology of landscapes and regions. Cambridge University Press.

FORMAN, R.T. & M. GODRON (1986):

Landscape Ecology, New York.

GUSTAFSON, E.J. (1998):

Quantifying landscape spatial pattern: What is the state of the art? In: Ecosystems, H. 1, pp 143-156

HAINES-YOUNG, R.H. & M. CHOPPING (1996):

Quantifying landscape structure: a review of landscape indices and their application to forested landscapes. Progress in Physical Geography 20, 418-445.

HAMBLIN, A. (1998):

Environmental indicators for national state of the environment reporting: The Land. Australia: State of the Environment (Environmental Indicator Reports).

HASLAM, M. and M. NEWSON (1995):

The potential role for NELUP in strategic land use planning. Journal of Environmental Planning and Management 38, 137-141.

HERZ, K. (1974):

Strukturprinzipien in der Landschaftssphäre. Ein Beitrag zur Methodologie der physischen Geographie. – Geogr. Ber. 71, S. 100-108.

HERZOG, F.; A. LAUSCH, E. MÜLLER, H. THULKE, U. STEINHARDT & S. LEHMANN (2001):

Landscape Metrics for Assessment of Landscape Destruction and Rehabilitation. Environmental Management Vol. 27, No. 1, 91-107

HULSHOFF, R.M. (1995):

Landscape indices describing a Dutch landscape. Landscape Ecology 10, 101-111.

JACSMAN, J.; SCHILTER, R.C. (1995):

Landschaftsplanung. Aufgaben, Grundsätze, Konzepte und Methoden für eine ökologisch orientierte Raumplanung. 254 S. Zürich

JESSEL, B. (1998):

Landschaft als Gegenstand von Planung: Theoretische Grundlagen ökologisch orientierter Raumplanung. 332 S.

KLUG, H. (2002):

Methodisch-konzeptuelle Landschaftsentwicklung über prozess-orientierte, funktional-haushaltliche landschaftsökologische Leitbilder. – In: SIR-Mitteilungen und Berichte, Band 30/2002, S. 43-52. Salzburg

- KLUG, H.; T. LANGANKE & S. LANG (2003): IDEFIX - Integration einer Indikatordatenbank für landscape metrics in ArcGIS 8.x. - In: S. Strobl, T. Blaschke, G. Griesebner (Hrsg.), *Angewandte Geografische Informationsverarbeitung XV*, S. 224-233. Salzburg
- KRUMMEL, J.R.; R.H. GARDNER, G. SUGIHARA, R.V. O'NEILL & P.R. COLEMAN (1987): Landscape patterns in a disturbed environment. *Oikos* 48, 321-324
- LANG, S. & H. KLUG (2003): Interactive Metrics Tool (IMT) – a didactical suite for teaching and applying landscape metrics, *Proceedings of the XIII. Symposium on Problems of Landscape Ecological Research Nitra* (submitted).
- LANG, S.; T. LANGANKE, T. BLASCHKE, U. KIAS; & W. DEMEL (2003b): Objektbasierte Ansätze zur halbautomatisierten Fortschreibung von CIR-Luftbild Kartierungen – ein Verfahrenvergleich. *GIS – Zeitschrift für Geoinformationssysteme* (9), S. 17-25.
- LANG, S.; T. LANGANKE, H. KLUG & T. BLASCHKE (2002): Schritte zu einer zielorientierten Strukturanalyse im Natura 2000-Kontext mit GIS. In: S. STROBL, T. BLASCHKE, G. GRIESEBNER (Hrsg.), *Angewandte Geografische Informationsverarbeitung XIV*, S. 302-307
- LANG, S.; H. KLUG & T. BLASCHKE (2003a, im Druck): Software zur Analyse der Landschaftsstruktur. In: Walz, U., Lutze, G., Schultz, A., Syrbe, R.-U. (Hrsg.): *Landschaftsstruktur im Kontext von naturräumlicher Vorprägung und Nutzung – Datengrundlagen, Methoden und Anwendungen*. IÖR Schriftenreihe. Dresden
- LAVERS, C. & R.H. HAINES-YOUNG (1993): Equilibrium landscapes and their aftermath: spatial heterogeneity and the role of new technology. In: Haines-Young, R., Green, D. and Cousins, S. (eds.), *Landscape ecology and Geographic Information System*, London, 57-74.
- LEOPOLD, L.B.; M.G. WOLMAN & J.P. MILLER (1964): *Fluvial Processes in Geomorphology*, 522 pp. San Francisco
- MALANSON, G.P. (1993): *Riparian Landscapes*, 296 pp. Cambridge: Cambridge University Press.
- MARKS, R.; M.J. MÜLLER, H. LESER & H.-J. KLINK (1992): Anleitung und Bewertung des Leistungsvermögens des Landschaftshaushaltes (BA LVL). In: *Forschungen zur deutschen Landeskunde*, Band 229. Trier
- McGARIGAL, K. (2002): Fragstats Documentation, part 3 (Fragstats Metrics). http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/documents/fragstats_documents.html
- McGARIGAL, K.; S.A. CUSHMAN & E. ENE (2004): *Landscape Metrics: A Comprehensive Guide to Their Use and Interpretation*, (<http://www.umass.edu/landeco/pubs/pubs.html>). In prep.
- MOORE, I.D. & J.C. GALLANT (1991): Overview of hydrological and water quality modelling. In: *Modelling the Fate of Chemicals in the Environment* (I. D. Moore, ed.), Canberra: Centre for Resource and Environmental Studies, Australian National University, 1-8..
- MOORE, I.D.; A.K. TURNER, J.P. WILSON, S.K. JENSON & L.E. BAND (1993): GIS and land surface-subsurface modelling. In: *Environmental Modelling with GIS* (M.F. Goodchild, B. O. Parks and L.T. Steyaert, eds), pp. 196-230. Oxford: Oxford University Press.
- O'NEILL, R.V.; J.R. KRUMMEL, R.H. GARDNER, G. SUGIHARA, B. JACKSON & D.L. DEANGELIS (1988): Indices of landscape pattern. *Landscape Ecology* 1, 153-162.
- RIITERS, K.; R. O'NEILL, C. HUNSAKER, J. WICKHAM, D. YANKEE, S. TIMMONS, K. JONES & B. JACKSON (1995): A factor analysis of landscape pattern and structure metrics. *Landscape Ecology*, 10, p. 23-39.
- STÜDEMANN, O. & S. ECKERT (1999): Das „Landschaftliche Axiom“ und die „Multiscale analysis“ als Grundlagen von Regionalisierung dimensionsspezifischer Prozessfaktoren. In: U. STEINHARDT und M. VOLK (Hrsg.): *Regionalisierung in der Landschaftsökologie*. Forschung – Planung – Praxis. Leipzig.
- TURNER, M.; R. GARDNER & R. O'NEILL (2001): *Landscape ecology. Theory and practice – pattern and process*. – New York.
- TURNER, M. (1989): Landscape ecology: The effect of pattern on process. *Annual Rev. of ecological systems* 20, 171-197.
- TURNER, M.G. (1990): Spatial and temporal analysis of landscape pattern. *Landscape Ecology* 3, 153-162.
- WALKER, J. & D.G. REUTER (1996): *Indicators of Catchment Health: A Technical Perspective*. CSIRO Publishing. Melbourne

Anschrift der Verfasser:

Hermann Klug,
 Thomas Blaschke
 Landscape Analysis and Resource Management
 Research Group (LARG)
 Institut für Geographie und Geoinformatik
 Universität Salzburg
 5020 Salzburg, Austria
hermann.klug@sbg.ac.at

Preise ⇐	Laufener Seminarbeiträge •	Laufener Forschungsberichte ⇐ Preise
----------	----------------------------	--------------------------------------

Laufener Seminarbeiträge (LSB)
(Tagungsberichte)

Zu ausgewählten Seminaren werden Tagungsberichte erstellt. In den jeweiligen Tagungsberichten sind die ungekürzten Vorträge eines Fach- bzw. wissenschaftlichen Seminars abgedruckt. Diese Tagungsberichte sind ab Heft 1/82 in „Laufener Seminarbeiträge“ umbenannt worden.

	€
2/81 Theologie und Naturschutz	2,50
3/82 Bodennutzung und Naturschutz	4,-
5/82 Feldhecken und Feldgehölze	12,50
6/82 Schutz von Trockenbiotopen – Buckelfluren	4,50
2/83 Naturschutz und Gesellschaft	4,-
6/83 Schutz von Trockenbiotopen – Trockenrasen, Triften und Hutungen	4,50
7/83 Ausgewählte Referate zum Artenschutz	7,-
2/84 Ökologie alpiner Seen	7,-
3/84 Die Region 8 - Westmittelfranken	7,50
7/84 Inselökologie – Anwendung in der Planung des ländlichen Raumes	8,-
2/85 Wasserbau – Entscheidung zwischen Natur und Korrektur	5,-
3/85 Die Zukunft der ostbayerischen Donaulandschaft	9,50
4/85 Naturschutz und Volksmusik	5,-
1/86 Seminarergebnisse der Jahre 81- 85	3,50
2/86 Elemente der Steuerung und der Regulation in der Pelagialbiozönose	8,-
3/86 Die Rolle der Landschaftsschutzgebiete	6,-
4/86 Integrierter Pflanzenbau	6,50
5/86 Der Neuntöter – Vogel des Jahres 1985 Die Saatkrähe – Vogel des Jahres 1986	5,-
6/86 Freileitungen und Naturschutz	8,50
7/86 Bodenökologie	8,50
9/86 Leistungen und Engagement von Privatpersonen im Naturschutz	2,50
10/86 Biotopverbund in der Landschaft	11,50
1/87 Die Rechtspflicht zur Wiedergutmachung ökologischer Schäden	6,-
2/87 Strategien einer erfolgreichen Naturschutzpolitik	6,-
3/87 Naturschutzpolitik und Landwirtschaft	7,50
4/87 Naturschutz braucht Wertmaßstäbe	5,-
5/87 Die Region 7 – Industrieregion Mittelfranken	5,50
1/88 Landschaftspflege als Aufgabe der Landwirte und Landschaftsgärtner	5,-
3/88 Wirkungen von UV-B-Strahlung auf Pflanzen und Tiere	6,50
1/89 Greifvogelschutz	6,50
2/89 Ringvorlesung Naturschutz	7,50
3/89 Das Braunkehlchen – Vogel des Jahres 1987 Der Wendehals – Vogel des Jahres 1988	5,-
4/89 Hat die Natur ein Eigenrecht auf Existenz?	5,-
1/90 Einsatzmöglichkeiten der Fernerkundung in der Landschaftsökologie	3,-
2/90 Sicherung und Schaffung von Arbeitsplätzen durch Naturschutz	6,-
3/90 Naturschutzorientierte ökologische Forschung in der BRD	5,50
4/90 Auswirkungen der Gewässerversauerung	6,50
5/90 Aufgaben und Umsetzung des landschaftspflegerischen Begleitplanes	3,-
6/90 Inhalte und Umsetzung der Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP)	3,-
1/91 Umwelt/Mitwelt/Schöpfung – Kirchen und Naturschutz	5,50
2/91 Dorfökologie: Bäume und Sträucher	6,-
3/91 Artenschutz im Alpenraum	11,50
4/91 Erhaltung und Entwicklung von Flussauen in Europa	10,50
5/91 Mosaik-Zyklus-Konzept der Ökosysteme und seine Bedeutung für den Naturschutz	4,50
6/91 Länderübergreifende Zusammenarbeit im Naturschutz (Begegnung von Naturschutzfachleuten aus Bayern und der Tschechischen Republik)	8,50
7/91 Ökologische Dauerbeobachtung im Naturschutz	7,-
1/92 Ökologische Bilanz von Stauräumen	7,50
3/92 Naturschonender Bildungs- und Erlebnistourismus	8,-
4/92 Beiträge zu Natur- und Heimatschutz	10,50
5/92 Freilandmuseen – Kulturlandschaft – Naturschutz	7,50

1/93 Hat der Naturschutz künftig eine Chance?	5,-
2/93 Umweltverträglichkeitsstudien – Grundlagen, Erfahrungen, Fallbeispiele	9,-
1/94 Dorfökologie – Gebäude – Friedhöfe – Dorfränder, sowie ein Vorschlag zur Dorfbiotopkartierung	12,50
2/94 Naturschutz in Ballungsräumen	8,-
3/94 Wasserkraft – mit oder gegen die Natur	9,50
4/94 Leitbilder Umweltqualitätsziele, Umweltstandards	11,-
1/95 Ökosponsoring – Werbestrategie oder Selbstverpflichtung?	7,50
2/95 Bestandsregulierung und Naturschutz	8,-
3/95 Dynamik als ökologischer Faktor	7,50
4/95 Vision Landschaft 2020	12,-
2/96 Naturschutzrechtliche Eingriffsregelung – Praxis und Perspektiven	11,-
3/96 Biologische Fachbeiträge in der Umweltplanung	12,-
4/96 GIS in Naturschutz und Landschaftspflege	7,50
6/96 Landschaftsplanung – Quo Vadis? Standortbestimmung und Perspektiven gemeindlicher Landschaftsplanung	9,-
1/97 Wildnis – ein neues Leitbild? Möglichkeiten ungestörter Naturentwicklung für Mitteleuropa	9,50
2/97 Die Kunst des Luxuriörens	9,50
3/97 3. Franz-Ruttner-Symposium: Unbeabsichtigte und gezielte Eingriffe in aquatische Lebensgemeinschaften	7,-
4/97 Die Isar – Problemfluss oder Lösungsmodell?	10,-
5/97 UVP auf dem Prüfstand	9,50
1/98 Umweltökonomische Gesamtrechnung	6,50
2/98 Schutz der Genetischen Vielfalt	7,50
3/98 Deutscher und Bayerischer Landschaftspflegeetag 1997	7,-
4/98 Naturschutz und Landwirtschaft – Quo vadis?	6,50
5/98 Schutzgut Boden	9,50
6/98 Neue Aspekte der Moornutzung	11,50
7/98 Lehr-, Lern- und Erlebnispfade im Naturschutz	8,50
8/98 Zielarten, Leitarten, Indikatorarten	14,-
9/98 Alpinismus und Naturschutz: Ursprung – Gegenwart – Zukunft	8,50
1/99 Ausgleich und Ersatz	9,50
2/99 Schön wild sollte es sein	9,-
3/99 Tourismus grenzüberschreitend: Naturschutzgebiete Ammergebirge – Außerfern – Lechtaler Alpen	6,-
4/99 Lebensraum Fließgewässer – Charakterisierung, Bewertung und Nutzung (4. Franz-Ruttner-Symposium)	9,50
5/99 Natur- und Kulturraum Inn/Salzach	7,50
6/99 Wintersport und Naturschutz	8,-
1/00 Natur – Welt der Sinnbilder	7,-
2/00 Zerschneidung als ökologischer Faktor	8,50
3/00 Aussterben als ökologisches Phänomen	8,-
4/00 Bukolien – Weidelandschaft als Natur- und Kulturerbe	9,50
1/01 Störungsökologie	7,50
2/01 Wassersport und Naturschutz	6,-
3/01 Flusslandschaften im Wandel: Veränderung und weitere Entwicklung von Wildflusslandschaften am Beispiel des alpenbürtigen Lechs und der Isar	6,-
1/02 Beweidung in Feuchtgebieten	7,-
2/02 Das Ende der Biodiversität? Grundlagen zum Verständnis der Artenvielfalt (5. Franz-Ruttner-Symposium)	8,-
1/03 Moornaturierung	8,50
2/03 Erfassung und Beurteilung von Seen und deren Einzugsgebiet mit Methoden der Fernerkundung	8,50

Laufener Forschungsberichte (LFB)

Forschungsbericht 1	€
JANSEN Antje: Nährstoffökologische Untersuchungen an Pflanzenarten und Pflanzengemeinschaften von voralpinen Kalkmagerrasen und Streuwiesen unter besonderer Berücksichtigung naturschutzrelevanter Vegetationsänderungen	10,-
Forschungsbericht 2	€
(versch. Autoren): Das Haarmos – Forschungsergebnisse zum Schutz eines Wiesenbrütergebietes	12,-

€	€ or-
schungsbericht 3	€ or-
HÖLZEL Norbert: Schneeheide-Kiefernwälder in den mittleren Nördlichen Kalkalpen	11,50
Forschungsbericht 4	€ or-
HAGEN Thomas: Vegetationsveränderungen in Kalkmagerrasen des Fränkischen Jura: Untersuchung langfristiger Bestandsveränderungen als Reaktion auf Nutzungsumstellung und Stickstoff-Deposition	10,50
Forschungsbericht 5	€ or-
LOHMANN Michael und Michael VOGEL: Die bayerischen Ramsargebiete – Eine kritische Bestandsaufnahme der Bayerischen Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege	7,-
Forschungsbericht 6	€ or-
WESSELY Helga und Rudi SCHNEEBERGER: Outdoorsport und Naturschutz (Motivationsanalyse von Outdoorsportlern)	8,50
Forschungsbericht 7	€ or-
BADURA Marianne und Georgia BUCHMEIER: Der Abtsee. Forschungsergebnisse der Jahre 1990-2000 zum Schutz und zur Entwicklung eines nordalpinen Stillgewässers	4,50
Forschungsbericht 8	€ or-
Die Ökologische Lehr- und Forschungsstation Straß. Forschungsergebnisse (auch als CD erhältlich)	10,-

>> Preisnachlass auf die genannten Preise für
- Berichte der ANL
- Beihefte zu den Berichten
- Laufener Seminarbeiträge LSB
- Laufener Forschungsberichte LFB
>> älter als 6 Jahre: 50%
>> älter als 10 Jahre: 75%

Bestellung:

Bitte hier und/oder auf der vorherigen Seite ankreuzen oder Bestellkarte verwenden!

Ihre Adresse:

.....

.....

.....

Datum, Unterschrift:

.....

Bayerische Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege
Postfach 1261
D-83406 Laufen/Salzach
Tel. 0 86 82/89 63-32
Fax 0 86 82/89 63-17
www.anl.bayern.de
e-mail: bestellung@anl.bayern.de

1. BESTELLUNGEN
Bitte den Bestellungen kein Bargeld, keine Schecks und keine Briefmarken beifügen; Rechnung liegt der Lieferung bei. Der Versand erfolgt auf Kosten und Gefahr des Bestellers. Beanstandungen wegen unrichtiger oder unvollständiger Lieferung können innerhalb von 14 Tagen nach Empfang der Sendung berücksichtigt werden.

2. PREISE UND ZAHLUNGSBEDINGUNGEN
Die Kosten für die Verpackung und Porto werden in Rechnung gestellt. Die Rechnungsbeträge sind spätestens zu dem in der Rechnung genannten Termin fällig. Die Zahlung kann nur anerkannt werden, wenn sie auf das in der Rechnung genannte Konto der Staatsoberkasse München unter Nennung des mitgeteilten Buchungskennzeichens erfolgt. Es wird empfohlen, die der Lieferung beigefügten und vorbereiteten Einzahlungsbelege zu verwenden. Bei Zahlungsverzug werden Mahnkosten erhoben und es können ggf. Verzugszinsen berechnet werden. Erfüllungsort und Gerichtsstand für beide Teile ist München. Bis zur endgültigen Vertragserfüllung behält sich die ANL das Eigentumsrecht an den gelieferten Veröffentlichungen vor.