

**Ableitung von Blattflächenindex und Bedeckungsgrad
aus Fernerkundungsdaten
für das Erosionsmodell EROSION 3D**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Naturwissenschaften
(Dr. rer. nat.)

in der Wissenschaftsdisziplin
Geofernerkundung, Geoinformatik, Kartographie

eingereicht an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Universität Potsdam

von

Anja Klisch

Potsdam, Dezember 2003

Zusammenfassung

In den letzten Jahren wurden relativ komplexe Erosionsmodelle entwickelt, deren Teilprozesse immer mehr auf physikalisch begründeten Ansätzen beruhen. Damit verbunden ist eine höhere Anzahl aktueller Eingangsparameter, deren Bestimmung im Feld arbeits- und kostenaufwendig ist. Zudem werden die Parameter punktuell, also an bestimmten Stellen und nicht flächenhaft wie bei der Fernerkundung, erfasst.

Im Rahmen dieser Arbeit wird gezeigt, wie Satellitendaten als relativ kostengünstige Ergänzung oder Alternative zur konventionellen Parametererhebung genutzt werden können. Dazu werden beispielhaft der Blattflächenindex (LAI) und der Bedeckungsgrad für das physikalisch begründete Erosionsmodell EROSION 3D abgeleitet. Im Mittelpunkt des Interesses steht dabei das Aufzeigen von existierenden Methoden, die die Basis für eine operationelle Bereitstellung solcher Größen nicht nur für Erosions- sondern allgemein für Prozessmodelle darstellen. Als Untersuchungsgebiet dient das primär landwirtschaftlich genutzte Einzugsgebiet des Mehltheuer Baches, das sich im Sächsischen Lößgefilde befindet und für das Simulationsrechnungen mit konventionell erhobenen Eingangsparametern für 29 Niederschlagsereignisse im Jahr 1999 vorliegen [MICHAEL et al. 2000].

Die Fernerkundungsdatengrundlage bilden Landsat-5-TM-Daten vom 13.03.1999, 30.04.1999 und 19.07.1999. Da die Vegetationsparameter für alle Niederschlagsereignisse vorliegen sollen, werden sie basierend auf der Entwicklung des LAI zeitlich interpoliert. Dazu erfolgt zunächst die Ableitung des LAI für alle vorhandenen Fruchtarten nach den semi-empirischen Modellen von CLEVERS [1986] und BARET & GUYOT [1991] mit aus der Literatur entnommenen Koeffizienten. Des Weiteren wird eine Methode untersucht, nach der die Koeffizienten für das Clevers-Modell aus den TM-Daten und einem vereinfachten Wachstumsmodell bestimmt werden. Der Bedeckungsgrad wird nach ROSS [1981] aus dem LAI ermittelt. Die zeitliche Interpolation des LAI wird durch die schlagbezogene Anpassung eines vereinfachten Wachstumsmodells umgesetzt, das dem hydrologischen Modell SWIM [KRYSANOVA et al. 1999] entstammt und in das durchschnittliche Tagestemperaturen eingehen. Mit den genannten Methoden bleiben abgestorbene Pflanzenteile unberücksichtigt. Im Vergleich zur konventionellen terrestrischen Parametererhebung ermöglichen sie eine differenziertere Abbildung räumlicher Variabilitäten und des zeitlichen Verlaufes der Vegetationsparameter.

Die Simulationsrechnungen werden sowohl mit den direkten Bedeckungsgraden aus den TM-Daten (pixelbezogen) als auch mit den zeitlich interpolierten Bedeckungsgraden für alle Ereignisse (schlagbezogen) durchgeführt. Bei beiden Vorgehensweisen wird im Vergleich zur bisherigen Abschätzung eine Verbesserung der räumlichen Verteilung der Parameter und somit eine räumliche Umverteilung von Erosions- und Depositionsflächen erreicht. Für die im Untersuchungsgebiet vorliegende räumliche Heterogenität (z. B. Schlaggröße) bieten Landsat-TM-Daten eine ausreichend genaue räumliche Auflösung. Damit wird nachgewiesen, dass die satellitengestützte Fernerkundung im Rahmen dieser Untersuchungen sinnvoll einsetzbar ist. Für eine operationelle Bereitstellung der Parameter mit einem vertretbaren Aufwand ist es erforderlich, die Methoden weiter zu validieren und möglichst weitestgehend zu automatisieren.

Abstract

Soil erosion models become increasingly more complex and contain physically based components, resulting in changing requirements for their input parameters. The spatial and temporal dynamics of erosions forcing parameters thus produce high requirements on data availability (costs and manpower). Due to this fact, the use of complex erosion models for extensive regions is strongly limited by the high in-situ expense. Moreover, conventional measurement procedures provide parameters at certain points, while remote sensing is a two-dimensional retrieval method.

This thesis demonstrates, how satellite data can be used as a cost-effective supplementation or alternative to conventional measurement procedures. Leaf area index (LAI) and soil cover percentage are exemplarily derived for the EROSION 3D physically based soil erosion model. The main objective of this study is to summarise existing retrieval methods in order to operationally provide such parameters for soil erosion models or for process models in general. The methods are applied to a catchment in the loess region in Saxony (Germany), that predominantly is agriculturally used. For comparison, simulations based on conventionally estimated parameters for 29 rainstorm events are available [MICHAEL et al. 2000].

The remote sensing parameters are derived from Landsat 5 TM data on the following dates: 13.03.1999, 30.04.1999, 19.07.1999. To get temporally continuous data for all events, they are interpolated between the acquisition dates based on the LAI development. Therefore, LAI is firstly calculated for all occurring crops by means of the semi-empirical models of CLEVERS [1986] and BARET & GUYOT [1991]. The coefficients appropriated to these models are taken from literature. Furthermore, a method is investigated that enables coefficient estimation for the Clevers model from Landsat data combined with a simplified growth model. Next, soil cover percentage is derived from LAI after ROSS [1981]. The LAI interpolation is performed by the simplified crop growth model from the SWIM hydrological model [Krysanova et al. 1999]. It has to be mentioned, that plant residue remains unconsidered by the used methods. In comparison to conventional measurement procedures, these methods supply a differentiated mapping of the spatial variability and temporal behaviour regarding the vegetation parameters.

The simulations with EROSION 3D are carried out for the remotely sensed soil cover percentages, that are retrieved in two ways. Soil cover is directly derived from the remote sensing data for each pixel at the acquisition dates as well as estimated by means of the interpolation for each field on all rainstorm events. In comparison to conventionally determined soil cover, both methods provide an improved spatial allocation of this parameter and thus, a spatial reallocation of erosion and deposition areas. The used Landsat Data provide an adequate spatial resolution suitable for the spatial heterogeneity given in the test area (e. g. field size). These results show that satellite based remote sensing can be reasonably used within the scope of these investigations. In the future, operational retrieval of such remotely sensed parameters necessitates the validation of the proposed methods and in general the automation of involved sub-processes to the greatest possible extent.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	v
Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole	vi
Danksagung	x
1 Einleitung	1
2 Zielstellung	2
3 Fernerkundung und die Modellierung von Wassererosion	3
3.1 Überblick über den Stand der Erosionsmodellierung	3
3.2 Fernerkundung in der Erosionsmodellierung	6
3.2.1 Überblick über Arbeiten zur fernerkundungsbasierten Parametererfassung für Erosionsmodelle	7
3.2.2 Fernerkundbare erosionsrelevante Parameter	8
3.3 Auswahl eines exemplarischen Erosionsmodells	9
3.4 Das Erosionsmodell EROSION 3D	11
3.4.1 Physikalische Modellgrundlagen	12
3.4.2 Ein- und Ausgabeparameter, Programmaufbau	14
3.4.3 Fernerkundbare Eingangsparameter	15
4 Grundlagen der Fernerkundung von Vegetation	17
4.1 Optische Fernerkundung	17
4.2 Spektralverhalten ausgewählter Oberflächen	18
4.2.1 Vegetation	19
4.2.2 Boden	20
4.3 Quantitative Ableitung von Vegetationsparametern	21
4.3.1 Theoretische Grundlagen der Vegetationsindizes	21
4.3.2 Der Blattflächenindex	23
4.3.3 Der Bedeckungsgrad	25
4.4 Interpolation von Vegetationsparametern	27
4.4.1 Möglichkeiten der zeitlichen Interpolation	28
4.4.2 Das vereinfachte Wachstumsmodell von SWIM	29
5 Untersuchungsgebiet und Datengrundlage	31
5.1 Einführung in das Untersuchungsgebiet	31
5.1.1 Lage	31
5.1.2 Geologie und Geomorphologie	32
5.1.3 Klima und Hydrologie	33
5.1.4 Bodenkundliche Aspekte	33
5.1.5 Aktuelle Landnutzung	34
5.2 Datengrundlage	34
5.2.1 Terrestrische Messungen und Simulationen	34
5.2.1.1 Parametererhebung	35

5.2.1.2	Simulationsergebnisse	36
5.2.2	Die multispektralen TM-Daten	37
5.2.2.1	Beschreibung des Aufnahmesystems	37
5.2.2.2	Beschreibung der multitemporalen Datensätze	37
5.2.2.3	Datenaufbereitung	38
5.2.3	Laborspektren	39
5.2.4	Temperaturdaten	40
6	Bereitstellung der Parameter und Simulationsrechnungen	41
6.1	Konzeption	41
6.2	Parameterbereitstellung	42
6.2.1	Vorbereitung der Landnutzungsdaten	42
6.2.2	Ableitung von Koeffizienten	43
6.2.2.1	Der bodenspezifische Faktor C	43
6.2.2.2	Der Extinktionskoeffizient k	43
6.2.2.3	Der Koeffizient $WDVI_{\infty}$	44
6.2.3	Ableitung und Anpassung der Parameter	46
6.2.4	Zeitliche Interpolation mittels Wachstumsmodell	47
6.3	Simulationsrechnungen	51
6.3.1	Anpassung der Eingangsdaten auf die veränderte Landnutzung	51
6.3.2	Durchführung der Simulationen	51
7	Ergebnisse und Diskussion	53
7.1	Untersuchung der Koeffizienten	53
7.1.1	Der bodenspezifische Faktor C	53
7.1.2	Die Koeffizienten k_{LAI} und $WDVI_{\infty}$ zur Berechnung des Blattflächenindex	60
7.1.3	Der Koeffizient k_B zur Berechnung des Bedeckungsgrades	63
7.2	Parameter aus TM-Daten	65
7.2.1	Der Blattflächenindex	65
7.2.2	Der Bedeckungsgrad	70
7.3	Zeitlich interpolierte Parameter	76
7.4	Vergleich der Parameter aus TM-Daten mit den zeitlich interpolierten Parametern	82
7.5	Simulationsrechnungen	83
8	Schlussfolgerungen und Ausblick	95
	Literaturverzeichnis	98
	Anhang	107
	Anhang I: Koeffizienten zur Berechnung von LAI und B	107
	Anhang II: Berechnung des Sonnenzenitwinkels	109
	Anhang III: Das vereinfachte Wachstumsmodell	110
	Anhang IV: Die Charakteristik des Untersuchungsgebietes	113
	Anhang V: Niederschlagsstatistik und Temperaturdaten	116
	Anhang VI: Ergebnisse der Berechnung von LAI und B	118
	Anhang VII: Ergebnisse der zeitlichen Interpolation von LAI und B	122
	Anhang VIII: Ergebnisse der Simulationsrechnungen mit EROSION 3D	125

Abbildungsverzeichnis

4.1	Typisches spektrales Reflexionsvermögen von Vegetation und Boden [nach SWAIN & DAVIS 1978].	19
4.2	Blattflächenindex (LAI) und Anteil am maximalen Blattflächenindex ($fr_{LAI_{max}}$) als Funktion des Anteils an der Wachstumsperiode (PHU potenziell bis zur Reife erreichte Wärmeeinheiten, $fr_{PHU, sen}$ Anteil an PHU zu Beginn der Seneszenz, Punkt 1 und Punkt 2 zur Berechnung der Formparameter I_1 und I_2).	30
5.1	Lage des Untersuchungsgebietes Mehltheuer Bach [VON WERNER 2000]: a) Lage des Einzugsgebietes der Jahna im Freistaat Sachsen (li.), b) Lage des Mehltheuer Baches im Einzugsgebiet der Jahna (re.).	31
5.2	Naturräume des Freistaates Sachsen und seiner Umgebung (Ausschnitt) [Entw.: BERNHARDT et al., RICHTER 1995].	32
5.3	Bodengesellschaften im Einzugsgebiet der Jahna (Ausschnitt aus der Übersichtskarte der Böden des Freistaates Sachsen 1:400.000) [VON WERNER 2000].	33
5.4	Landnutzung des Einzugsgebietes Mehltheuer Bach im Untersuchungsjahr 1999.	34
5.5	Erosionsprognosekarte im Untersuchungsgebiet Mehltheuer Bach für das Ereignis 10.07. [nach MICHAEL et al. 2000].	36
5.6	Spektrales Reflexionsvermögen a) der Bodenprobe 101 (li.) und b) der Bodenprobe 12 (re.).	40
6.1	Daten- und Informationsfluss.	41
6.2	Schematischer Ablaufplan zur Bestimmung des Bedeckungsgrades für alle Niederschlagsereignisse mittels vereinfachtem Wachstumsmodell.	49
6.3	Beispielhafte Anpassung der modellierten LAI-Kurve an einen LAI-Messwert aus Fernerkundungsdaten.	49
7.1	Scatterplot und Regressionsgerade des Reflexionsvermögens ausgewählter Bodenproben in den simulierten Kanälen TM-3 und TM-4.	53
7.2	Bodenspezifischer Faktor C aus Landsat-5-TM-Daten.	54
7.3	Ansammlung von Wasser am 04.04.2003 auf Schlägen nordwestlich (li.) und südlich (re.) von Mehltheuer.	56
7.4	Scatterplot und Regressionsgerade des Reflexionsvermögens in den Kanälen TM-3 und TM-4 für alle Aufnahmezeitpunkte.	57
7.5	Sensitivitätsanalyse für das CLAIR-Modell bezüglich des C-Wertes am Beispiel von Zuckerrüben, Wintergerste, Winterweizen.	59
7.6	Vorhandene und ermittelte LAI-Beziehungen nach dem CLAIR-Modell für Zuckerrüben.	62
7.7	Vorhandene und ermittelte LAI-Beziehungen nach dem CLAIR-Modell für Winterweizen und Wintergerste.	62
7.8	Sensitivitätsanalyse des CLAIR-Modells bezüglich der Koeffizienten α und β am Beispiel von Zuckerrüben, Wintergerste, Winterweizen.	63
7.9	a) Bedeckungsgrad für verschiedene Extinktionskoeffizienten k_B (li.) und b) Sensitivitätsanalyse bezüglich k_B (re.).	64
7.10	Mit verschiedenen Methoden berechneter Blattflächenindex für die Aufnahmezeitpunkte 13.03.1999, 30.04.1999, 19.07.1999.	67
7.11	Mit verschiedenen Methoden berechneter Bedeckungsgrad und Differenzen am 13.03.1999.	71
7.12	Mit verschiedenen Methoden berechneter Bedeckungsgrad und Differenzen am 30.04.1999.	72
7.13	Mit verschiedenen Methoden berechneter Bedeckungsgrad und Differenzen am 19.07.1999.	73
7.14	LAI und Bedeckungsgrad für die Wintergerstesläge 54 und 309 im Anbaujahr 1998/1999.	78
7.15	LAI und Bedeckungsgrad für den Winterroggenschlag 123 im Anbaujahr 1998/1999.	78
7.16	LAI und Bedeckungsgrad für die Winterweizensläge 206 und 308 im Anbaujahr 1998/1999.	78

7.17	Sensitivitätsanalyse zur Genauigkeit der Anpassung des Wachstumsmodells am Beispiel eines WW-Schlages [Veränderung von $fr_{LAI_{max,1}}$ (li.) und $fr_{LAI_{max,2}}$ (re.)].	81
7.18	Differenzen zwischen Bedeckungsgrad aus TM-Daten und zeitlich interpoliertem Bedeckungsgrad für Methode I.	82
7.19	Simulationsergebnisse bzw. -differenzen für die unterschiedlich berechneten Bedeckungsgrade am 05.05.	85
7.20	Simulationsergebnisse bzw. -differenzen für die unterschiedlich berechneten Bedeckungsgrade am 19.07.	88
7.21	Prozentuale Abweichungen des Bedeckungsgrades und der Erosion/Deposition am Beispiel eines Bohnenschlages für das Niederschlagsereignis am 19.07.	91
7.22	Geländehöhe, Hangneigung, Bedeckungsgrad und erodierte Sedimentmenge am 19.07. für das Profil in einem Bohnenschlag (Lage s. Abb. 7.21).	93

Tabellenverzeichnis

3.1	Grundlegende Einflussfaktoren der Bodenerosion durch Wasser [nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998, MORGAN 1999].	3
3.2	Beispiele für die Ableitung erosionsrelevanter Parameter aus Fernerkundungsdaten.	9
3.3	Übersicht zur Auswahl des in der Arbeit zu verwendenden Erosionsmodells.	11
3.4	Eingabeparameter des Modells EROSION 3D und ihre herkömmlichen Messmethoden [nach VON WERNER 1995, MICHAEL 2000].	14
3.5	Ausgabeparameter des Modells EROSION 3D [nach VON WERNER 1995].	15
3.6	Eingabeparameter von EROSION 3D und ihre satellitengestützte Bestimmbarkeit [verändert nach VON WERNER & BORG 1996, MAUSER et al. 1999, KLISCH et al. 2001].	16
4.1	Spektralbereiche der terrestrischen optischen Fernerkundung [nach LILLESAND & KIEFER 1994].	17
5.1	Kanäle des Sensors Thematic Mapper [nach KRAMER 1996].	37
5.2	Eingabeparameter für die Atmosphärenkorrektur mit ATCOR2.	38
6.1	Übersicht über angewendete Methoden zur LAI-Berechnung und maximale LAI.	46
6.2	Übersicht über angewendete Methoden zur Berechnung des Bedeckungsgrades.	47
7.1	C-Werte der Bodenspektren mit ihren Mittelwerten und Streuungsmaßen.	54
7.2	Statistische Kenngrößen zum Reflexionsvermögen (RV) in den Kanälen TM-3 und TM-4 sowie zum C-Wert für alle Aufnahmezeitpunkte.	55
7.3	Vergleich der C-Werte der Spektren und der TM-Daten (13.03.1999, 30.04.1999, 19.07.1999).	58
7.4	Geschätzte Koeffizienten (G_{LAI} , k_{LAI}) je Fruchtart und Aufnahmezeitpunkt für das CLAIR-Modell.	60
7.5	Geschätzte Koeffizienten (k_b) je Fruchtart und Aufnahmezeitpunkt für die Berechnung des Bedeckungsgrades.	64
7.6	Reflexionsvermögen und Vegetationsindizes für ausgewählte Pixel von WG-, WR-, R- und WW-Schlägen.	68
7.7	Eigenschaften der drei Niederschlagsereignisgruppen.	83

Abkürzungen

ABAG	Allgemeine Bodenabtragsgleichung
AGNPS	Agricultural Nonpoint Source Pollution Model
AnnAGNPS	Annualized Agricultural Nonpoint Source Pollution Model
ANSWERS	Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
AVIRIS	Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer
BO	Bohnen
BRDF	Bidirectional Reflectance Distribution Function
BÜK	Übersichtskarte der Böden
CLAIR	Clevers Leaf Area Index by Reflectance
CREAMS	Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems
DGM	Digitales Geländemodell
dUSLE	differentiated Universal Soil Loss Equation
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DFD	Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum
DWD	Deutscher Wetterdienst
E	Erbsen
EPIC	Erosion Productivity Impact Calculator
ERS	European Remote Sensing Satellite
ESTAR	Electronically Steered Thinned Array Radiometer
ETM	Enhanced Thematic Mapper
EUROSEM	European Soil Erosion Model
<i>FE I, FE II</i>	Abkürzung für verwendete Fernerkundungsmethoden zur Berechnung der Vegetationsparameter und für die hieraus ermittelten Ergebnisse
<i>FE I + WM, FE II + WM</i>	Abkürzung für verwendete Methoden, nach denen der Bedeckungsgrad aus Fernerkundungsdaten und Wachstumsmodell abgeleitet wird, und für die hieraus ermittelten Ergebnisse
GIS	Geoinformationssystem
GLEAMS	Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems
HFBA	Hierarchical Foreground and Background Analysis
HK	Heilkräuter
HRV	Haute Resolution Visible
IRS	Indian Remote Sensing Satellite
KINEROS	Kinematic Runoff and Erosion Model
KM	Körnermais
LAI	Leaf Area Index
LISEM	Limburg Soil Erosion Model
LISS	Linear Imaging Self-Scanning Sensor
MIR	Mittleres Infrarot
MOMS	Modular Optoelectronic Multispectral Scanner
MSS	Multispectral Scanner
MUSLE	Modified Universal Soil Loss Equation
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
<i>Neu</i>	Abkürzung für verwendete Fernerkundungsmethode zur LAI-Berechnung nach dem CLAIR-Modell mit abgeschätzten Koeffizienten
NIR	Nahes Infrarot
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NPP	Nonpoint Pollution Potential
ÖL	Öllein
OPUS	Integrated Simulation Model for Transport of Nonpoint-Source Pollutants at the Field Scale
<i>PAKA</i>	Abkürzung für verwendete Methode, nach der die AG Boden- und Gewässerschutz den Bedeckungsgrad aus dem Parameterkatalog bestimmt hat, und für die hieraus ermittelten Ergebnisse
PAR	Photosynthetic Active Radiation
PIK	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
PVI	Perpendicular Vegetation Index
R	Raps
RB	Rhabarber

RMK	Reihenmesskamera
Ross I, Ross II	Abkürzung für verwendete Fernerkundungsmethode zur Bedeckungsgradberechnung nach Ross aus den LAI nach Methode I und II
RUSLE	Revised Universal Soil Loss Equation
RV	Reflexionsvermögen
RVI	Ratio Vegetation Index
RZWQM	Root Zone Water Quality Model
SAR	Synthetic Aperture Radar
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index
SEMMED	Soil Erosion Model for Mediterranean Area
SM	Silomais
SMA	Spectral Mixture Analysis
SP	Spinat
SPOT	Système Pour l'Observation de la Terre
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
SWIM	Soil and Water Integrated Model
TIN	Triangulated Irregular Network
TIR	Thermales Infrarot
TM, TM-3, TM-4	Thematic Mapper, Kanäle 3 und 4 des Sensors
TOPLATS	Topmodel-based Land Atmosphere Transfer Scheme
USLE	Universal Soil Loss Equation
VI	Vegetationsindex
VIS	sichtbares Licht (Visible)
WDVI	Weighted Difference Vegetation Index
WEPP	Water Erosion Prediction Project
WG	Wintergerste
WiFS	Wide Field Sensor
WR	Winterroggen
WRS	Worldwide Reference System
WW	Winterweizen
ZR	Zuckerrübe

Symbole

a	Extinktionskoeffizient (= k_{VI})
a(z)	Dichtefunktion der Blattflächen in der Höhe z in m^2/m^3
A	Gebietsaustrag in t/ha
b	asymptotischer Wert des VI, wenn LAI unendlich groß wäre (= VI_{∞})
B	Bedeckungsgrad dimensionslos oder in %
dB	Änderung des Bedeckungsgrades dimensionslos oder in %
c	Konzentration der suspendierten Teilchen in der Flüssigkeit in m^3/m^3 , Vereinfachung für $VI_s - VI_{\infty}$
C	bodenspezifischer Faktor
dC	Änderung des bodenspezifischen Faktors
C_L	Bedeckungsgrad der Bodenoberfläche durch Pflanzen und Pflanzenrückstände
C_{max}	Konzentration der Partikel bei Transportkapazität in m^3/m^3
E	Erosionskennzahl
$fr_{LAI_{max}}$	Anteil am maximalen Blattflächenindex
$fr_{LAI_{max},1}$	Anteil am maximalen Blattflächenindex in Punkt 1 zur Beschreibung einer Kurve der optimalen LAI-Entwicklung (Berechnung von I_1 und I_2)
$fr_{LAI_{max},2}$	Anteil am maximalen Blattflächenindex in Punkt 2 zur Beschreibung einer Kurve der optimalen LAI-Entwicklung (Berechnung von I_1 und I_2)
$fr_{LAI_{max},d}$	Anteil des aktuellen LAI am maximalen LAI zum Tag d
$fr_{LAI_{max},i}$, $fr_{LAI_{max},i-1}$	Anteil des aktuellen LAI am maximalen LAI zum Tag i bzw. i-1
$fr_{PHU,1}$	Anteil an potentiellen Wärmeeinheiten in Punkt 1 zur Beschreibung einer Kurve der optimalen LAI-Entwicklung (Berechnung von I_1 und I_2)
$fr_{PHU,2}$	Anteil an potentiellen Wärmeeinheiten in Punkt 2 zur Beschreibung einer Kurve der optimalen LAI-Entwicklung (Berechnung von I_1 und I_2)
$fr_{PHU,i}$	Anteil der akkumulierten Wärmeeinheiten an potentiellen Wärmeeinheiten zum Tag i
$fr_{PHU,sen}$	Anteil an potentiellen Wärmeeinheiten zu Beginn der Seneszenz

$G(z, \theta, \phi)$	G-Funktion oder Geometriefaktor
G_1	effektive Blattflächenprojektion in horizontaler Richtung
G_2	effektive Blattflächenprojektion in vertikaler Richtung
G_{LAI}	Geometriefaktor zur Berechnung des Blattflächenindex nach dem CLAIR-Modell
GMT	Greenwich Mean Time in h
H	Hochwert in m
h_L	Höhe der Vegetationsschicht in m
HU_i	Wärmeeinheiten (<i>heat units</i>) zum Tag i in °C
i	Infiltrationsrate in m/s
J	Tag im Jahr (J = 1, 2, 3, ..., 365)
k	Extinktionskoeffizient zur Berechnung des Bedeckungsgrades
dk	Änderung des Extinktionskoeffizienten
k_B	Extinktionskoeffizient zur Berechnung des Bedeckungsgrades
k_{LAI}	Extinktionskoeffizient zur Berechnung des Blattflächenindex nach dem CLAIR-Modell
k_{VI}	Extinktionskoeffizient zur Berechnung des Blattflächenindex nach Baret & Guyot
L	Verschiebung des Schnittpunktes der Vegetationsgeraden mit der <i>Soil Line</i>
l_1, l_2	Formparameter zur Beschreibung des Blattflächenindex-Verlaufes
LAI	Blattflächenindex in m^2/m^2
dLAI	Änderung des Blattflächenindex in m^2/m^2
LAI_d	Blattflächenindex zum Tag d in m^2/m^2
ΔLAI_d	Differenz des Blattflächenindex zum Tag d in m^2/m^2
LAI_i, LAI_{i-1}	Blattflächenindex zum Tag i bzw. i-1 in m^2/m^2
ΔLAI_i	Zunahme des Blattflächenindex zum Tag i
LAI_{max}	maximaler Blattflächenindex in m^2/m^2
n	Anzahl der Messungen
$n(\theta, \phi)$	Einheitsvektor in eine gegebene Richtung (z. B. Sonnenrichtung)
PHU	potentielle bis zur Reife erreichte Wärmeeinheiten in °C
q, Q	Abfluss in $m^3/(m*s)$, Abfluss in m^3/m
q_{crit}	kritischer Abfluss $m^3/(m*s)$.
q_{in}	Zufluss aus dem oberhalb gelegenen Rasterelement in $m^3/(m*s)$
$q_{s,in}$	Sedimenteintrag aus dem oberhalb gelegenen Segment in $kg/(m*s)$
$q_{s,max}$	maximaler Feststoffmassenstrom (=Transportkapazität) in $kg/(m*s)$
$q_{s,out}$	Sedimentaustrag aus dem Segment in $kg/(m*s)$
$q_{s,pot}$	potentieller Feststoffmassenstrom in $kg/(m*s)$
r	Niederschlagsintensität in m/s
R	Rechtswert in m
r_α	Niederschlagsintensität bezogen auf die Hangneigung α in m/s
R^2	Bestimmtheitsmaß
S	Sensitivität
s_R^2	Restvarianz
tstress	Temperaturstressfaktor
T	Tonanteil im Sediment in %
T_{av}	durchschnittliche Tagestemperatur in °C
T_b	Basistemperatur der Pflanze in °C
T_o	optimale Temperatur in °C
U	Schluffanteil im Sediment in %
VI_s	Vegetationsindex des unbedeckten Bodens
VI_∞	asymptotischer Wert des VI, wenn LAI unendlich groß wäre
v_p	Sinkgeschwindigkeit der Teilchen in m/s
v_q	mittlere Fließgeschwindigkeit des Abflusses in m/s
v_r	mittlere Fallgeschwindigkeit der Tropfen in m/s
WDVI _d	Weighted Difference Vegetation Index am Tag d
WDVI _∞	asymptotischer Wert des Weighted Difference Vegetation Index in %
WOZ	wahre Ortszeit in h
w_p	Massenstrom in $kg/(m*s)$
Δx	Länge des Rasterelements in m
Δy	Breite des Rasterelements in m
z	vom Boden gemessene Höhe in m, Höhe im Bestand in m

ZG	Zeitgleichung in h
α	Hangneigungswinkel in $^{\circ}$, Kombination aus Extinktions- und Streuungskoeffizienten
$d\alpha$	Änderung des Extinktions- und Streuungskoeffizienten α
β	Reziprokwert des asymptotischen Wertes des Weighted Difference Vegetation Index in %
$d\beta$	Änderung des Reziprokwertes des asymptotischen Wertes des Weighted Difference Vegetation Index in %
γ	Feststoffaustrag ($\gamma < 0$) oder Feststoffeintrag ($\gamma > 0$) kumulativ in kg/m^2
γ_{stress}	Faktor zur Regulierung des Pflanzenwachstums
δ	Sonnendeklination in rad
θ	Zenitwinkel der Sonne in rad
κ	Depositionskoeffizient
λ	geographische Länge in $^{\circ}$
ξ	Stundenwinkel der Sonne in rad
τ_d	Tageswinkel der Sonne in rad
ϕ	Azimut der Sonne in rad
φ	geographische Breite des Untersuchungsgebietes in rad
φ_{crit}	kritischer Impulsstrom in N/m^2
$\varphi_{\text{p,crit}}$	kritischer Impulsstrom der in Suspension gehaltenen Partikel in N/m^2
φ_q	Impulsstrom der Strömung in N/m^2
$\varphi_{\text{q,vert}}$	vertikale Impulsstromkomponente der oberflächenparallelen Strömung in N/m^2
$\varphi_{\text{r},\alpha}$	Impulsstrom der aufprallenden Tropfen in N/m^2
χ_L	Blattflächeninklinationsindex
ρ	Reflexionsvermögen in %
ρ_{NIR}	Reflexionsvermögen im nahen Infrarot in %
ρ_p	Dichte der Partikel in kg/m^3
ρ_q	Flüssigkeitsdichte der oberflächenparallelen Strömung in kg/m^3
ρ_r	Flüssigkeitsdichte des Niederschlags in kg/m^3
ρ_{RED}	Reflexionsvermögen im Rot in %
$\rho_{\text{s,NIR}}$	Reflexionsvermögen des Bodens im nahen Infrarot in %
$\rho_{\text{s,RED}}$	Reflexionsvermögen des Bodens im Rot in %
$\rho_{\text{TM-3}}, \rho_{\text{TM-3}}$	Reflexionsvermögen in den Kanälen 3 und 4 des Thematic Mapper

Danksagung

An erster Stelle bedanke ich mich bei Prof. Dr. Hartmut Asche (Universität Potsdam) und Prof. Dr. Hermann Kaufmann (GFZ Potsdam) für die Betreuung der Arbeit, für die wertvollen Hinweise bei der Bearbeitung der Dissertation und für die Übernahme der Gutachten. Weiterhin bedanke ich mich bei Prof. Dr. Jürgen Schmidt (TU Bergakademie Freiberg) ebenfalls für die Übernahme des Gutachtens.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Betreuer am DLR Erik Borg, der mein Interesse an der vorliegenden Thematik weckte, mir die Bearbeitung der Arbeit am DLR in Neustrelitz ermöglichte und in zahlreichen Gesprächen konstruktiv und motivierend mit Rat und Tat zur Seite stand.

Des Weiteren bedanke ich mich bei den Kollegen der Arbeitsgruppe „Automatisierung und Kulturlandschaft“ des DLR in Neustrelitz Adolf Günther, Dr. Bernd Fichtelmann, Steffi Lehmann, Carolin Wloczyk und Dr. Rainer Ressler, von denen ich für meine Arbeit jede erdenkliche Unterstützung erhielt. Hervorzuheben ist die enge Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe „Abbildende Spektroskopie“ in Oberpfaffenhofen bei den Befliegungen in Demmin. Insbesondere danke ich Dr. Rudolf Richter für die Durchführung der Atmosphärenkorrektur der Landsat-Daten und Andrea Cihlar für die Durchführung der Spektromettermessungen, die maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beitrugen. Edgar Zabel (IG Demmin) sei gedankt für wertvolle Informationen und Hinweise in Fragen der Landwirtschaft.

Ein besonderes Dankeschön gilt Dr. Anne Michael, Dr. Michael von Werner und Prof. Dr. Jürgen Schmidt (AG Boden- und Gewässerschutz, TU Bergakademie Freiberg) für die Bereitstellung der Eingangsparameter und Simulationsrechnungen im Untersuchungsgebiet Mehltheuer Bach. Anne, Dir sei gedankt für das geduldige Beantworten unzähliger Fragen. Ich bedanke mich weiterhin bei Dr. Frank Wechsung und Dr. Valentina Krysanova (PIK Potsdam) für die Ermöglichung des Aufenthalts am PIK und für die Nutzung des Modells SWIM. Insbesondere bin ich Dr. Frank Wechsung, Fred Hattermann und Martin Wattenbach für viele fachliche Hinweise dankbar. Ich danke dem Staatlichen Amt für Landwirtschaft und Gartenbau Großenhain (Uwe Mildner) sowie den Landwirten Bernd Schwäbe (Schwäbe GbR), Wolfgang Grübler (Agrarunternehmen Lommatzscher Pflege) und Gert Harz für die Bereitstellung von Bewirtschaftungsdaten.

Ich bedanke mich bei allen Mitarbeitern des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums (DFD) des DLR insbesondere beim Institutsleiter Prof. Dr. Stefan Dech sowie beim Abteilungsleiter Dr. Harald Mehl und den Mitarbeitern der Außenstelle Neustrelitz, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Abschließend danke ich herzlichst meinem Freund Stefan Schlüter und meiner Schwester Sabine Klisch für ihre Geduld mit mir und bei der Durchsicht der Arbeit sowie meinen Eltern für ihre Unterstützung in jeglicher Hinsicht.

1 Einleitung

Die Erfassung der Bodenerosion durch Wasser ist primäre Aufgabe des Boden- und Gewässerschutzes. Um eine qualitative und quantitative Abschätzung der Wassererosion zu ermöglichen, werden schon seit längerem Erosionsmodelle entwickelt und eingesetzt.

Erste Ansätze basierten zunächst auf statistisch gesicherten Beziehungen in Form von empirischen Modellen (z. B. USLE, ABAG, RUSLE). Diese liefern i. d. R. keine räumlich und zeitlich differenzierten Aussagen, sondern Mittelwerte des langfristigen Bodenabtrags. Darüber hinaus entstand zunehmend ein Bedarf an Modellen, die neben dem Bodenabtrag auch die räumliche Verteilung des Abflusses, von Sedimenten und von partikelgebundenen Stoffeinträgen in Oberflächengewässer simulieren [MORGAN 1999, MICHAEL 2000].

Aus diesem Grund wurden physikalisch begründete Erosionsmodelle (z. B. CREAMS, WEPP, EUROSEM, EROSION 2/3D) entwickelt. Sie beruhen auf mathematischen Gleichungen zur Beschreibung der erosionsrelevanten Teilprozesse und sind daher meist besser übertragbar als empirische Modelle. Physikalisch begründete Modelle weisen eine höhere Komplexität und damit verbunden eine hohe Parameteranzahl sowie hohe Anforderungen an die Parametereigenschaften (z. B. Aktualität, hohe geometrische und zeitliche Auflösung) auf [BORG & KLISCH 2001]. Vor allem für Untersuchungen in größeren Gebieten ist die Datenbeschaffung, die meist durch punktuelle Messungen erfolgt, mit einem hohen Arbeits- und Kostenaufwand verbunden [VON WERNER 1995]. Die Erfassung von aktuellen, flächenhaften Parametern stellt somit eines der größten Probleme in der Erosionsmodellierung dar [BORK & SCHRÖDER 1996].

Die satellitengestützte Fernerkundung kann Daten flächenhaft und kostengünstig bereitstellen. Sie erlaubt die Erfassung räumlicher Variabilitäten mit unterschiedlichen geometrischen und zeitlichen Auflösungen. Dieses Potenzial wurde bisher vergleichsweise wenig für die physikalisch begründete Erosionsmodellierung genutzt. Gegenstand dieser Arbeit ist daher die semi-empirische Ableitung von Eingabeparametern aus satellitengestützten Fernerkundungsdaten für ein Erosionsmodell. Hiermit soll exemplarisch das Potenzial der Fernerkundung zur Bereitstellung von Eingangsparametern für physikalisch begründete Erosionsmodelle gezeigt werden.

Als Erosionsmodell wird EROSION 3D [SCHMIDT 1990, VON WERNER 1995] ausgewählt, das aufgrund seiner Modelleigenschaften (z. B. gegliedertes, rasterbasiertes Einzugsgebietsmodell) eine relativ einfache Verarbeitung von Fernerkundungsdaten ermöglicht. Für dieses Modell werden die Vegetationsparameter Blattflächenindex und Bedeckungsgrad abgeleitet, da deren Bestimmung aus Satellitendaten vielfach untersucht wurde und somit zufriedenstellend gelöst werden kann.

Als Testgebiet dient ein Teileinzugsgebiet des Flusses Jahna, dessen Verlauf sich durch Sachsen erstreckt und der bei Riesa in die Elbe mündet. Es handelt sich hierbei um das ca. 15 km² große Einzugsgebiet des Mehltheuer Baches. Das Untersuchungsgebiet befindet sich im Sächsischem Lößhügelland und wird überwiegend landwirtschaftlich genutzt.

2 Zielstellung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung und Bereitstellung von Methoden zur Ableitung und Integration von fernerkundlichen Parametern für die Erosionsmodellierung am Beispiel des Modells EROSION 3D. Hiermit soll das Potenzial der Fernerkundung als ergänzende oder alternative Methode zur Parametererhebung für die Erosionsmodellierung aufgezeigt werden. Gleichzeitig wird das Ziel verfolgt, bestehende bzw. neue Methoden in einem Einzugsgebiet anzuwenden und somit eine Region integrativ zu betrachten.

Die Nutzung von Fernerkundungsdaten erfolgt am Beispiel des Blattflächenindex und Bedeckungsgrades. Für die Ableitung dieser Parameter stehen drei Szenen des Satellitensensors Landsat-TM zur Verfügung. Da keine Methode existiert, die eine einheitliche Ableitung des Blattflächenindex und des Bedeckungsgrades mit furchtartenspezifischen Koeffizienten für alle vorhandenen Fruchtarten ermöglicht, werden zur flächendeckenden Berechnung dieser Größen verschiedene semi-empirische Ansätze z. B. CLEVERS 1988, BARET & GUYOT 1991, ROSS 1981] basierend auf dem spektralen Verhalten von Vegetation im roten und nahen infraroten Wellenlängenbereich genutzt und verglichen. Zusätzlich wird ein Verfahren zur Abschätzung solcher Koeffizienten für den Clevers-Ansatz untersucht.

Die aufgezeigten Methoden werden im Einzugsgebiet Mehlteuer Bach angewendet. Für dieses Gebiet wurden bereits Simulationsrechnungen mit EROSION 3D basierend auf terrestrisch erhobenen und abgeschätzten Parametern für die Landnutzung des Jahres 1999 für 29 Niederschlagsereignisse durchgeführt¹ [MICHAEL et al. 2000]. Im Rahmen der Arbeit werden die Ergebnisse der Simulationsrechnungen für ausgewählte Niederschlagsereignisse mit den aus Fernerkundungsdaten abgeleiteten Parametern vergleichend gegenübergestellt.

Die TM-Daten liegen häufig nicht zu den Zeitpunkten der Niederschlagsereignisse vor, da die zeitliche Auflösung dieses Sensors auf 16 Tage begrenzt ist und in Mitteleuropa ein hohes Wolkenvorkommen vorhanden ist. Um dennoch eine praktische Relevanz der vorliegenden Arbeit zu gewährleisten, werden Möglichkeiten zur Interpolation der Parameter zwischen den Aufnahmeterminen mit Hilfe eines Wachstumsmodells untersucht. Die zeitlich interpolierten Parameter werden ebenfalls für Simulationsrechnungen genutzt und mit den vorhandenen Ergebnissen verglichen.

Die genannten Parameter werden aus Fernerkundungsdaten für EROSION 3D nicht nur abgeleitet, sondern durch Methoden der Anpassung und Interpolation zugänglich gemacht. Da diese Arbeit auf den operationellen Einsatz der Fernerkundung zielt, geht sie weiter als bisherige Untersuchungen. Zudem wird ein interdisziplinärer Ansatz erarbeitet, bei dem ein methodischer Beitrag der Fernerkundung für Erosionsmodelle als ein Beispiel für ökologische Prozessmodelle geleistet wird.

¹ Die Parametererhebung und Simulationsrechnungen wurden durch A. Michael & M. von Werner (AG Boden- und Gewässerschutz, TU Bergakademie Freiberg) (2000) als Beitrag zum EXPO-Projekt „Entwicklung eines Informationssystems zur Erosionsminderung im Wassereinzugsgebiet der Jahna – einem Nebenfluss der Elbe“ durchgeführt.

3 Fernerkundung und die Modellierung von Wassererosion

Gegenstand der Arbeit sind Einsatzmöglichkeiten der satellitengestützten Fernerkundung für die Modellierung von Bodenerosion durch Wasser. Um einen Überblick über den derzeitigen Kenntnisstand zu geben, werden im folgenden Kapitel bisherige Arbeiten zur Erosionsmodellierung und -fernerkundung aufgezeigt. Des Weiteren wird ein Erosionsmodell identifiziert und vorgestellt, für das im Rahmen der Arbeit exemplarisch Parameter aus Fernerkundungsdaten bereitgestellt werden.

3.1 Überblick über den Stand der Erosionsmodellierung

Als *Erosion* werden nach RICHTER [1976] die Prozesse der Ablösung, des Transports und der Ablagerung von Bodenteilchen bezeichnet, die durch den anthropogenen Eingriff in die Landschaft ermöglicht und durch natürliche erosive Kräfte (Wasser, Wind) bewirkt werden. Der Begriff Erosion bezieht sich im Folgenden auf Bodenerosion durch Wasser.

Zur Simulation der Erosion wurde und wird eine Vielzahl von Modellen entwickelt. Generell berücksichtigen sie je nach Komplexitätsgrad verschiedene erosionsrelevante Faktoren. Einige der wichtigsten Einflussfaktoren werden in Tab. 3.1 aufgezeigt.

Tab. 3.1: Grundlegende Einflussfaktoren der Bodenerosion durch Wasser [nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998, MORGAN 1999].

Klima	Relief	Boden	Vegetation	Bewirtschaftung
Regenintensität Regendauer Regenhäufigkeit	Hanglänge Hangneigung Hangform Größe des Einzugsgebietes	Korngrößenverteilung Lagerungsdichte Bodengefüge Wassergehalt Gehalt an organischer Substanz Wasserdurchlässigkeit Kationenaustauschkapazität Scherfestigkeit Versiegelung Bedeckung durch Grobmaterial Rauhigkeit	Landnutzung Bedeckungsgrad Vegetationshöhe Durchwurzelungstiefe	Termin Bearbeitungsart Bearbeitungstiefe Schutzmaßnahmen

Die zahlreich verfügbaren Erosionsmodelle unterscheiden sich sehr stark. Daher werden im Folgenden beispielhafte Vertreter anhand der Modellklassifikation nach DYCK [1980b, S. 41 - 45] vorgestellt. Generell lassen sich Modelle in *Physikalische*, *Analogie-* und *Mathematische Modelle* einteilen. Bei den vorzustellenden Erosionsmodellen handelt es sich ausschließlich um *Mathematische Modelle*. Sie sind dadurch gekennzeichnet, dass alle problemrelevanten Teilprozesse des Systems in einer mathematischen Beschreibung abgebildet und miteinander verknüpft werden. Somit erreicht diese Modellgruppe den höchsten Abstraktionsgrad. *Mathematische Modelle* können wiederum u. a. nach folgenden Merkmalen gegliedert werden [DYCK 1980b]:

- **Modellkonzept** (empirisch und physikalisch begründete Modelle),
- **Räumliche Struktur** (gegliederte Modelle und Blockmodelle),
- **Zeitliche Struktur** (kontinuierliche und diskrete Modelle).

Wie diese Merkmale in einem Erosionsmodell umgesetzt werden, hängt von der Aufgabenstellung, dem Maßstab, dem Aufwand, dem Datenmaterial und dem Kenntnisstand über das zu modellierende System ab. Daraus resultieren verschiedene Anforderungen an die Art und den Umfang der Eingangs- und Ausgangsdaten sowie an die das System beschreibenden Größen [DYCK 1980b, MORGAN 1999]. Zudem ist die Erosion ein sehr komplexer Prozess und unterliegt einer Vielzahl von Teilprozessen (z. B. Interzeption, Infiltration, Ablösung durch Tropfenaufschlag, Ablösung durch Oberflächenabfluss, Abflussverteilung, Transport, Deposition usw.), die aus systemtheoretischer Sicht sehr unterschiedliche Charakteristika aufweisen. Die Erosionsmodelle setzen sich aus Modellen zusammen, die diese Teilprozesse abbilden, und können daher häufig nicht eindeutig den genannten Merkmalen zugeordnet werden.

Die in der Erosionsmodellierung verfolgten **Modellkonzepte** können im Wesentlichen in empirische und physikalisch begründete differenziert werden. **Empirische Erosionsmodelle** beruhen auf statistisch gesicherten Beziehungen zwischen den wichtigsten Einflussfaktoren und dem Bodenverlust. Sie setzen somit i. d. R. nur die Kenntnis einiger Details der Wirkungsweise eines Systems voraus. Das am meisten verbreitete Modell ist die Universal Soil Loss Equation (USLE) [WISCHMEIER & SMITH 1978]. Basierend auf umfangreichen Messungen auf verschiedenen Testflächen in den USA wurden die sechs wichtigsten Einflussfaktoren durch Multiplikation verbunden und mit dem langfristigen mittleren jährlichen Bodenabtrag an Hängen korreliert. Damit eignet sich die USLE nicht für eine Erosionsvorhersage einzelner Niederschlagsereignisse und kann nicht zuverlässig extrapoliert werden [MORGAN 1999]. Umfangreiche Adaptionen erfolgten z. B. für Westafrika [ROOSE 1975], für Indien [SINGH et al. 1981] oder für mitteleuropäische Verhältnisse in Form der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung (ABAG) [AUERSWALD & SCHMIDT 1986, KAINZ 1987, SCHWERTMANN et al. 1990]. Neben der eingeschränkten Übertragbarkeit besteht ein weiterer Nachteil der USLE darin, dass sie nicht die zeitliche und räumliche Variabilität der Einflussfaktoren auf den Abtrag erfasst. In den folgenden Jahren wurden zahlreiche Versuche unternommen, Schwachpunkte der USLE durch Modifikation zu minimieren. Hierzu gehören u. a. die Modified USLE 87 (MUSLE 87) [HENSEL & BORK 1988, HENSEL 1991], die differentiated USLE (dUSLE) [AUERSWALD et al. 1988, FLACKE et al. 1990] und die Revised USLE (RUSLE) [RENARD et al. 1991, RENARD 1993].

Mit zunehmendem Interesse an den Folgen der Erosion, die nicht nur unmittelbar auf dem Standort (on-site-Schäden) sondern auch außerhalb landwirtschaftlicher Flächen (off-site-Schäden) auftreten, resultierte ein Bedarf an Modellen, die neben dem Bodenverlust die räumliche Verteilung des Abflusses, von Sedimenten und somit partikelgebundenen Stoffeinträgen in Oberflächengewässer simulieren [MORGAN 1999, MICHAEL 2000]. Zu diesem Zweck werden **physikalisch begründete Modelle** entwickelt. Ihnen liegen mathematische Gleichungen zur Beschreibung der erosionsrelevanten Teilprozesse unter Berücksichtigung der Gesetze zur Erhaltung der Masse, der Energie oder des Impulses zugrunde [MORGAN 1999]. Generell weisen diese Modelle eine zeit- und ortsunabhängige Gültigkeit auf [BORK & SCHRÖDER 1996]. Jedoch werden aufgrund der Komplexität einzelner Teilprozesse empirische Ansätze zur Vereinfachung verwendet.

Eines der ersten Modelle dieser Art, das eine einfache, räumlich differenzierte Abschätzung der Bodenerosion ermöglicht, ist ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response System) [BEASLEY & HUGGINS 1982]. Wie AGNPS (Agricultural NonPoint Source Pollution Model) [YOUNG et al. 1987] baut es zwar auf der USLE auf,

dient aber der ereignisbezogenen Simulation von Wassererosion in kleinen landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebieten. Des Weiteren wurden in den USA sehr komplexe Erosionsmodelle entwickelt:

- für landwirtschaftliche Parzellen wie CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems) [KNISEL 1980] und EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) [SHARPLEY & WILLIAMS 1990a,b] sowie
- für kleine Einzugsgebiete wie OPUS (Integrated Simulation Model for Transport of Nonpoint-Source Pollutants at the Field Scale) [SMITH 1992, FERREIRA & SMITH 1992] und WEPP (Water Erosion Prediction Project) [FLANAGAN & LIVINGSTON 1995, FLANAGAN & NEARING 1995].

Durch die Einbindung zusätzlicher Komponenten [z. B. Nährstoff- und Pestizidaustrag, Pflanzenwachstum, Wasserhaushalt oder Klimadaten (Wettergenerator)] können diese Modelle wesentliche Zusammenhänge und Rückkopplungseffekte zwischen den erosionsrelevanten Teilprozessen berücksichtigen. Hierfür wird eine große Anzahl empirischer Funktionen und Parameter in die Modellierung integriert, was eine beschränkte Übertragbarkeit dieser Modelle mit sich bringt [BORK & SCHRÖDER 1996].

Eine dritte Gruppe stellen die ereignisbezogenen Erosionsmodelle dar. Diese Modelle bilden nur wenige Teilprozesse (z. B. Erosion, Infiltration, Deposition) auf möglichst hohem physikalischem Niveau ab und greifen nicht auf die USLE zurück. Hierzu gehören u. a. KINEROS (KINematic runoff and EROsion model) [WOOLHISER et al. 1990], EUROSEM (EUROpean Soil Erosion Model) [MORGAN et al. 1992, MORGAN et al. 1998], LISEM (Limburg Soil Erosion Model) [DE ROO et al. 1994] und EROSION 2D/3D [SCHMIDT 1996, VON WERNER 1995].

In der Erosionsmodellierung werden als Raumbezug i. d. R. Hänge, Parzellen oder Einzugsgebiete eingesetzt. Deren **räumliche Struktur** kann als einheitlicher Block (z. B. bei der USLE in Form eines Hanges) oder wie bei den meisten Erosionsmodellen gegliedert betrachtet werden. Die horizontale Gliederung kann in homogenen Gebietseinheiten (z. B. WEPP), in ein Triangulated Irregular Network (TIN) (z. B. dUSLE) oder in ein regelmäßiges Raster (z. B. EROSION 3D) erfolgen. Eine vertikale Differenzierung in bis zu 20 Kompartimente liegt vor allem bei sehr komplexen Erosionsmodellen vor, die zusätzlich den Wasserhaushalt simulieren (z. B. OPUS, WEPP, EPIC). In den meisten vorgestellten Modellen werden jedoch nur ein bis zwei Bodenschichten unterschieden (z. B. ANSWERS, AGNPS, EUROSEM, EROSION 2D/3D).

Nach ihrer **zeitlichen Struktur** können Modelle in kontinuierliche und diskrete Modelle eingeordnet werden. Kontinuierliche oder Langfristsimulationen dienen vor allem der Untersuchung unterschiedlicher Szenarien sowie der Planung von Erhaltungsstrategien oder Erfassung langjähriger on-site-Schäden. Sie bewegen sich in einer zeitlichen Auflösung von ca. einem Tag (z. B. WEPP, EPIC) oder einem Jahr (z. B. USLE, MUSLE 87, dUSLE, RUSLE). Bei diskreten Simulationen erfolgt eine Erosionsabschätzung bezogen auf Niederschlagsereignisse im Minuten- oder Stundenintervall (z. B. AGNPS, KINEROS, EUROSEM, EROSION 2D/3D). Sie ermöglichen die Erfassung von kurzfristigen off-site-Schäden wie Schadstoffausträge in Oberflächengewässern [MORGAN 1999].

Neben den hier vorgestellten Modellen existieren noch zahlreiche Ansätze, auf die im Rahmen dieser Arbeit nicht eingegangen werden kann. So wird auf eine Darstellung komplexer hydrologischer oder Stofftransportmodelle wie beispielsweise SWAT (Soil and Wa-

ter Assessment Tool) [ARNOLD et al. 1993] oder SWIM (Soil and Water Integrated Model) [KRYSANOVA et al. 1999] verzichtet, da deren Hauptaugenmerk nicht auf der Erosion liegt. Eine weiterführende Übersicht geben HATZFELD & WERNER [1989], DE ROO [1993], KLIK [1994], BORK & SCHRÖDER [1996] und MORGAN [1999].

Mit der Entwicklung von relativ einfachen empirischen zu komplexeren physikalisch begründeten Modellen werden zunehmend mehr Eingangsparameter erforderlich [VON WERNER 1995]. Diese werden mit einem hohen Arbeits- und Kostenaufwand punktuell erhoben, anhand von Richtwerten aus bereitgestellten Tabellen (z. B. maximaler Interzeptionsspeicher eines Vegetationstyps in EUROSEM) oder mit empirischen Gleichungen aus einfacher bestimmbaren Größen abgeschätzt (z. B. gesättigte hydraulische Leitfähigkeit in EROSION 2D/3D). Anschließend werden sie auf die Fläche übertragen sowie inter-/extrapoliert. Die Beschaffung von aktuellen, flächenhaften Parametern stellt somit eines der größten Probleme in der Erosionsmodellierung dar [BORK & SCHRÖDER 1996].

3.2 Fernerkundung in der Erosionsmodellierung

Der Begriff Fernerkundung bezieht sich im Folgenden auf die satellitengestützte Fernerkundung. Das Potenzial der Fernerkundung besteht generell in [verändert nach BORG & BACKHAUS 1993]:

- der flächenhaften Erfassung,
- der Abdeckung weiträumiger Flächen,
- der multitemporalen Messung und somit der Erfassung von Phänomenen in regelmäßigen Zeitabständen (täglich, wöchentlich, monatlich, jahreszeitlich usw.),
- der multistationären Erkundung, d. h. Beobachtung der Erdoberfläche mit einer unterschiedlichen Beobachtungsgeometrie (z. B. Bahnhöhe, geometrische Auflösung, Blickwinkel),
- der multispektralen Erkundung, d. h. Erfassung von Objekten in verschiedenen Spektralbereichen.

Die besondere Stärke der Fernerkundung gegenüber punktuellen Messungen zeigt sich vor allem in der Erfassung der räumlichen Variabilität der beobachteten Größen. Dabei wird das Spektralverhalten von Objekten in Form des Reflexions- oder Emissionsvermögens und nicht die gesuchte Größe selbst gemessen (s. Kap. 4).

Aus fernerkundlicher Sicht können Erosionsereignisse **direkt** oder **indirekt** quantifiziert werden [BACKHAUS et al. 1993]. Die **direkte** Erosionserfassung setzt sich die Kartierung einzelner Erosionsereignisse zum Ziel. Diese lässt sich nur durch eine hohe geometrische Auflösung des Fernerkundungssensors realisieren, die von der Form (z. B. Graben-, Rillen- oder Oberflächenabfluss) und dem Ausmaß der Erosion bestimmt wird. Zudem erfordert die direkte Abschätzung ein permanentes Monitoring mit einer hohen zeitlichen Auflösung, um kurzfristige Ereignisse zu erfassen [BORG 1994]. Zur Identifikation von erodierten Gebieten werden u. a. Bodeneigenschaften als Indikatoren herangezogen, die sich entlang der Abtrags-, Transport- und Ablagerungsgebiete verändern.

Gegenstand dieser Arbeit ist die **indirekte** Erosionserfassung. Hierbei steht die Abschätzung oder Prognose des Erosionsrisikos mit Hilfe von Erosionsmodellen im Mittelpunkt des Interesses. Ziel der indirekten Erfassung ist demzufolge die Beobachtung und Bereitstellung von erosionsrelevanten Parametern, die in den Modellen Eingang finden. Das erforderliche geometrische und zeitliche Auflösungsvermögen des Fernerkundungssens-

sors hängt hierbei von der räumlichen und zeitlichen Dynamik des entsprechenden Parameters sowie vom Anwendungsbereich des Modells (z. B. kontinuierliche oder ereignisbezogene Simulation, Hang oder Einzugsgebiet) ab. Zur Quantifizierung der Parameter aus Fernerkundungsdaten wird zudem ein hohes spektrales Auflösungsvermögen benötigt [BACKHAUS et al. 1993].

3.2.1 Überblick über Arbeiten zur fernerkundungsbasierten Parametererfassung für Erosionsmodelle

Bisherige Arbeiten zum Einsatz der Fernerkundung in der Erosionsmodellierung beschäftigen sich vor allem mit der Ableitung von Vegetations- und Landnutzungsparametern mittels optischer Sensoren. So berechnet z. B. CAMPBELL [1981] den empirischen Erosionsindex NPP (Nonpoint Pollution Potential), der die Landnutzung aus Landsat-MSS²-Daten einbezieht. SCHROEDER-LANZ et al. [1993] verwenden Landsat-MSS-Daten zur Klassifikation der Landnutzung, um daraus den Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor für ein empirisches Erosionsmodell (USLE) abzuschätzen. Des Weiteren werden multitemporale und multisensorielle Fernerkundungsdatensätze zur Erfassung des Einflusses von Landnutzungsveränderungen über längere Zeiträume auf den Abflussvorgang und die Bodenerosion mit Hilfe des Erosionsmodells ANSWERS untersucht [JÜRGENS 1999]. BRAUD et al. [2001] leiten neben der Landnutzung den Bedeckungsgrad der Vegetation aus multitemporalen Landsat-TM-Daten für ANSWERS ab. Das Erosionsmodell SEMMED (Soil Erosion Model for MEDITerranean areas) wurde speziell zur Assimilation von Satellitendaten und digitalen Geländemodellen (DGM) konzipiert [DE JONG et al. 1999]. Hierbei werden aus Landsat-TM-Daten die Landnutzung sowie Faktoren zur Beschreibung der Landbedeckung/Bearbeitung und der Niederschlagsinterzeption bereitgestellt.

Eine Anwendung der Fernerkundung zur Ableitung weiterer Parameter findet man vor allem bei hydrologischen Modellen. DE ROO et al. [2001] stellen den Blattflächenindex (LAI) aus IRS-WiFS³-Datensätzen für das Abflussmodell LISFLOOD bereit. Den Einsatz von digitalen Höhenmodellen aus SAR-Daten (Synthetic Aperture Radar) in der hydrologischen Modellierung beschreiben LUDWIG et al. [2000]. TASCHNER et al. [2001] untersuchen Anwendungsmöglichkeiten von Niederschlagsintensitäten, die aus Regenradar- und Regenschreiberdaten bestimmt werden, für das Modell TOPMODEL. HOUSER et al. [1998] verwenden Daten eines flugzeuggetragenen L-Band-Radiometers zur Bestimmung der Bodenfeuchte für TOPLATS (Topmodel-based Land Atmosphere Transfer Scheme).

Da bestehende hydrologische Modelle den Einsatz von Parametern, die aus verschiedenen Sensoren bestimmt werden, relativ schwer ermöglichen, wurde das Modell DPHM-RS (Distributed Physically Based Model) für eine Verarbeitung von unterschiedlichen Fernerkundungsdaten entwickelt [BIFTU & GAN 2001]. Folgende Parameter werden hierfür aus Satellitendaten abgeleitet:

- NOAA-AVHRR⁴: Blattflächenindex, Oberflächentemperatur,
- Landsat-TM: Landnutzung, Oberflächenalbedo, Oberflächentemperatur,
- Radarsat-SAR⁵: Bodenfeuchte.

² Landsat-Multispectral Scanner (MSS): optisch-mechanischer multispektraler Scanner [s. KRAMER 1996].

³ Indian Remote Sensing Satellite (IRS)-Wide Field Sensor (WiFS): opto-elektronischer multispektraler Scanner [s. KRAMER 1996].

⁴ National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)-Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR): multispektraler Zeilenscanner [s. KRAMER 1996].

In den aufgezeigten Arbeiten werden Fernerkundungsparameter vor allem für Erosionsmodelle mit einem hohen empirischen Anteil oder für hydrologische Modelle eingesetzt. Wie in 3.1 (S. 6) gezeigt wurde, besteht vor allem bei den komplexeren physikalisch begründeten Erosionsmodellen ein Bedarf nach alternativen Methoden zur Parametererhebung. Daher ist es Gegenstand dieser Arbeit, Parameter für die physikalisch begründete Erosionsmodellierung abzuleiten.

3.2.2 Fernerkundbare erosionsrelevante Parameter

Nachdem im voranstehenden Abschnitt Beispiele für den Einsatz von Fernerkundungsparametern in Erosions- bzw. hydrologischen Modellen aufgeführt wurden, wird im Folgenden gezeigt, für welche erosionsrelevanten Parameter (Tab. 3.1) Ableitungsmethoden entwickelt wurden und somit die Fernerkundung generell einen Beitrag leisten kann. Dieser hängt von der erforderlichen geometrischen und zeitlichen Auflösung ab, die durch die Dynamik des entsprechenden Parameters bestimmt wird. Des Weiteren existiert eine Vielzahl von Sensorsystemen (z. B. panchromatische, multi- und hyperspektrale, Mikrowellensensoren), für die verschiedene Methoden zur Bestimmung eines Parameters entwickelt wurden. Daher findet man in der Literatur eine große Anzahl von Arbeiten, von denen einige beispielhaft in Tab. 3.2 (S. 9) zusammengefasst werden.

Es lässt sich feststellen, dass die Erfassung von Bewirtschaftungsparametern durch die Fernerkundung i. d. R. nicht möglich ist. Die Bereitstellung von Reliefparametern aus fernerkundlich abgeleiteten digitalen Geländemodellen (DGM) lässt sich derzeit zufriedenstellend lösen [DECH 1997]. Ebenso verhält es sich mit Niederschlags- und Vegetationsparametern. Hingegen besteht bei der Ableitung von Bodenparametern ein hoher Forschungsbedarf. Sie stellt ein sehr komplexes Problem dar, da das Messsignal sowohl durch Bodenbestandteile (z. B. Minerale, organische Bodensubstanz, Wasser) als auch von Oberflächeneigenschaften (z. B. Bodenrauhigkeit und Bedeckung) beeinflusst wird [IRONS et al. 1989, BORG & KLISCH 2001].

⁵ Radarsat-Synthetic Aperture Radar (SAR): C-Band Radar [KRAMER 1996].

Tab. 3.2: Beispiele für die Ableitung erosionsrelevanter Parameter aus Fernerkundungsdaten.

	Parameter	Plattform/Sensor	Literatur
Klima	Regenintensität, -dauer und -häufigkeit	METEOSAT ⁶	BENDIX et al. 2001
		Regenradar ⁷	ROSENFELD et al. 1994
Relief	Hanglänge, -neigung, -form (DGM)	SPOT-HRV ⁸	TOUTIN 1995
		Priroda-MOMS-2P ⁹	DECH et al. 1999
		ERS-SAR ¹⁰	ROTH & KNÖPFLE 2000
	Größe des Einzugsgebietes	-	-
Boden	Korngrößenverteilung	-	-
	Lagerungsdichte	-	-
	Bodengefüge	-	-
	Wassergehalt	Flugzeug-SAR ERS-Scatterometer ¹¹	ULABY et al. 1996 WAGNER et al. 1999
	Gehalt an organischer Substanz	Flugzeug-AVIRIS ¹²	PALACIOS-ORUETA et al. 1999
	Wasserdurchlässigkeit	Flugzeug-ESTAR ¹³	MATTIKALLI et al. 1998
	Kationenaustauschkapazität	-	-
	Scherfestigkeit	-	-
	Versiegelung	Flugzeug-RMK Top 30/23 ¹⁴	PILZ & STROBL 2002
	Bedeckung durch Grobmaterial	-	-
	Rauhigkeit	ERS-Scatterometer	MAGAGI & KERR 2001
Vegetation	Landnutzung	IRS-PAN, Landsat-TM, ERS-SAR	MÜSCHEN et al. 2001
	Bedeckungsgrad	NOAA-AVHRR SPOT-HRV Landsat-TM	PUREVDORJ et al. 1998 CYR et al. 1995 NETELER 1999
	Vegetationshöhe	flugzeuggetragene Hyperspektral-sensoren, Feldspektrometer	BACH 1995
	Durchwurzelungstiefe	-	-

3.3 Auswahl eines exemplarischen Erosionsmodells

Die Abschnitte 3.1 und 3.2 geben einen Überblick über generelle Einsatzmöglichkeiten von Fernerkundungsdaten zur Ableitung erosionsrelevanter Parameter. Daraus lässt sich folgern, dass die Fernerkundung für jedes Erosionsmodell Parameter (Tab. 3.2) bereitstellen kann, sofern diese in dem jeweiligen Modell enthalten sind und aus Fernerkundungsdaten abgeleitet werden können. Gleichzeitig wird ersichtlich, dass sich die existierenden Erosionsmodelle in ihren Eigenschaften sehr stark voneinander unterscheiden können.

⁶ METEOSAT: multispektrales Radiometer [s. KRAMER 1996].

⁷ Regenradar: Messung und Bewertung der Streuung von elektromagnetischen Wellen (z. B. C-Band) an Wassertropfen im Raum z. B. zur Ortung von Niederschlagsgebieten und zur Ableitung von Regenintensitäten [JAGUSCH 1997].

⁸ Système Pour l'Observation de la Terre (SPOT)-Haute Resolution Visible (HRV): opto-elektronischer multispektraler Scanner [s. KRAMER 1996].

⁹ Priroda-Modular Optoelectronic Multispectral Scanner (MOMS-2P): opto-elektronischer multispektraler Scanner [KRAMER 1996, DLR 1997].

¹⁰ European Remote Sensing Satellite (ERS)-Synthetic Aperture Radar (SAR) : C-Band Radar (ERS-AMI Imaging Mode) [s. KRAMER 1996].

¹¹ ERS-Scatterometer: C-Band Radar (ERS-AMI-SCAT) [s. KRAMER 1996].

¹² Flugzeug- Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS): hyperspektraler Whiskbroom-Scanner [s. KRAMER 1996].

¹³ Flugzeug-Electronically Steered Thinned Array Radiometer (ESTAR): abbildendes L-Band Radar (SAR) [s. KRAMER 1996].

¹⁴ Flugzeug-Reihenmesskamera (RMK Top 30/23): Luftbildkamera [KRAMER 1996].

Sie berücksichtigen einerseits unterschiedliche Teilprozesse und andererseits werden Teilprozesse mit unterschiedlichen Ansätzen abgebildet (z. B. Partikelablösung in EUROSEM und EROSION 3D). Dies bedeutet wiederum, dass sich die Eingangsparameter in Anzahl und Eigenschaften stark unterscheiden. Um nun ein Modell zu identifizieren, bei dem die Fernerkundung den größten Beitrag leisten kann, wäre eine ausführliche Analyse der Modelle hinsichtlich ihrer Eingangsparameter erforderlich. Eine solche Analyse würde bei weitem den Rahmen der Arbeit sprengen.

Als Alternative werden die Eigenschaften der unter 3.1 vorgestellten Modelle aus fernerkundlicher Sicht untersucht. Dabei wird das Ziel verfolgt, eine Modellgruppe zu identifizieren, bei der das Potenzial der satellitengestützten Fernerkundung (s. 3.2) besonders optimal eingesetzt werden kann. Die hierfür angesetzten Kriterien werden im Folgenden näher erläutert und finden sich in den Spalten zwei bis fünf der Tab. 3.3 (S. 11) wieder.

Physikalisch begründete Modelle erlauben im Gegensatz zu empirischen Modellen die Abschätzung von on- sowie off-site-Schäden und sind besser übertragbar (s. 3.1). Die konventionelle Parameterbestimmung ist aufgrund der großen Parameteranzahl mit einem hohen Aufwand verbunden. Somit ist ihre Anwendung auf größere Gebietseinheiten nur begrenzt möglich [VON WERNER 2000]. Daher sind vor allem solche Modelle auf effiziente Methoden zur flächenhaften Bereitstellung von Parametern wie z. B. die Fernerkundung angewiesen. Zudem kann deren umfangreichere Parametervielfalt (z. B. Art und Dynamik) durch das breite Spektrum von fernerkundlichen Erfassungsmethoden (multistationär, multispektral, multitemporal) angesprochen werden. In einigen physikalisch begründeten Modellen werden **Teile der USLE oder ihrer Derivate** verwendet. Diese schränken die Übertragbarkeit des Modells ein. Ein weiterer Nachteil besteht in der Übertragung der aus langfristigen Erosionsmessungen gewonnenen Faktoren auf diskrete Simulationen [BORK & SCHRÖDER 1996]. Die Faktoren werden meist aus Tabellen, Nogrammomen oder empirischen Funktionen abgeleitet. Ihre aktuelle Quantifizierung ist somit nicht unbedingt erforderlich bzw. lässt sich durch die Fernerkundung nur über „Drittparameter“ bewerkstelligen.

Die satellitengestützte Fernerkundung deckt mit einem Datensatz relativ weiträumige Flächen ab (z. B. Landsat-TM ca. 185·185 km²). Deshalb steigt deren Effizienz mit zunehmender Größe des Untersuchungsgebietes. Es ist also sinnvoller, Fernerkundungsdaten für **Einzugsgebiete** zu nutzen als für kleinere Raumbezüge (z. B. Hang, Parzelle). Im Gegensatz zur Modellierung im einheitlichen Block kann bei horizontal **gegliederten Erosionsmodellen** die von der Fernerkundung erfasste räumliche Variabilität Eingang finden. Allerdings wird diese Fähigkeit von der geometrischen Auflösung des Sensors begrenzt.

In Tab. 3.3 werden beispielhaft ausgewählte Erosionsmodelle untersucht, von denen fünf Modelle (kursiv) die soeben vorgestellten Kriterien erfüllen. Im Rahmen der Arbeit soll weiterhin ein Modell gefunden werden, das einen relativ leichten Zugang für die exemplarische Anwendung von Fernerkundungsdaten gewährleistet. Deshalb werden zwei weitere Kriterien (Tab. 3.3, Spalten 6 und 7) eingeführt.

Modelle, die durch ein **regelmäßiges Raster** horizontal gegliedert werden, haben aus der Sicht des Modellierers gewisse Nachteile. Beispielsweise können Geländeunterschiede nicht spezifisch im Modell berücksichtigt werden [BORK & SCHRÖDER 1996]. Solche Modelle eignen sich jedoch besonders für Fernerkundungsdaten, da diese rasterbasiert aufge-

zeichnet werden. Vorhandene Schnittstellen zu Geoinformationssystemen (**GIS**) unterstützen die Aufnahme von Fernerkundungsdaten in Erosionsmodelle.

Tab. 3.3: Übersicht zur Auswahl des in der Arbeit zu verwendenden Erosionsmodells.

Modell	Physikalisch begründet?	USLE unabhängig?	Einzugsgebiet?	Gegliedert?	Rasterbasiert?	GIS? ⁺
USLE	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
MUSLE87	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein
DUSLE	Nein	Nein	Ja	Ja	Nein	Ja
RUSLE	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
ANSWERS	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja
AGNPS	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja
AnnAGNPS ¹⁾	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja
CREAMS*	Ja	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein
GLEAMS* ²⁾	Ja	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja
OPUS**	Ja	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein
EPIC	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja
WEPP***	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja
KINEROS ³⁾	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein
EUROSEM****	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja
LISEM	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
EROSION 2D	Ja	Ja	Nein	Ja	Nein	Ja
EROSION 3D	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja

* CREAMS und GLEAMS lassen eine diskrete und kontinuierliche Simulation zu [LEONARD et al. 1987].

** OPUS ist generell ein kontinuierliches Modell, bei dem jedoch die Zeitschritte an die Prozessdynamik angepasst werden können [SMITH 1992].

*** WEPP ermöglicht die diskrete oder kontinuierliche Simulation für einzelne Hangprofile oder Einzugsgebiete. In Tab. 3.3 sind die Versionen mit den entsprechenden Merkmalen gemeint [FLANAGAN & LIVINGSTON 1995].

**** Mit EUROSEM können die Prozesse für Parzellen oder Einzugsgebiete simuliert werden [MORGAN et al. 1998].

1) Annualized AGNPS [BOSCH et al. 1998].

2) Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems [LEONARD et al. 1987].

3) KINEROS2: [SMITH et al. 1995].

+ verändert nach [MICHAEL 2000].

Den letzteren Kriterien können zwei Erosionsmodelle (LISEM, EROSION 3D) standhalten. Für das Modell EROSION 3D wurde ein langjähriges Bodenmessprogramm durchgeführt [MICHAEL 1992-1996]. Es existieren umfangreiche Anwendungen im Raum Sachsen und ein dafür entwickelter Parameterkatalog [MICHAEL et al. 1996]. Auf dieser Grundlage kann für EROSION 3D im Raum Sachsen ein direkter Vergleich von Simulationsergebnissen mit terrestrisch erhobenen Daten und fernerkundlich erhobenen Daten erfolgen. Daher wird das Modell EROSION 3D im Rahmen der vorliegenden Arbeit Anwendung finden.

3.4 Das Erosionsmodell EROSION 3D

EROSION 3D ermöglicht die räumlich und zeitlich differenzierte Erfassung der Erosion sowie des Eintrags von Bodenmaterial und partikelgebundenen Schadstoffen in Oberflächengewässer in kleinen und mittleren Einzugsgebieten. Es wurde auf den physikalischen Modellgrundlagen des Hangmodells EROSION 2D [SCHMIDT 1988] von VON WERNER [1995] entwickelt. EROSION 3D wurde für eine Anwendung in der Planungspraxis und

Umweltberatung konzipiert. Daher beschränkt es sich auf wenige relevante Teilprozesse, um die Parameteranzahl zu minimieren [SCHMIDT 1996]. Das vorrangig für landwirtschaftliche Flächen entwickelte Modell ermöglicht eine Prognose der Auswirkungen für unterschiedliche Bewirtschaftungsszenarien (z. B. Bearbeitung, Nutzungsart usw.). Rillen- und Grabenerosion können mit diesem Modellansatz nicht erfasst werden [MICHAEL 2000]. Die zeitliche Auflösung zur Beschreibung eines Niederschlagsereignisses beträgt 1-15 Minuten. Das Programm lässt eine räumliche Auflösung von bis zu 1 m zu. Die optimale Rasterweite sollte einem günstigen Aufwand-Nutzen-Verhältnis Rechnung tragen (z. B. Mittelgebirgsrelief etwa 10 - 20 m) [VON WERNER 1995].

3.4.1 Physikalische Modellgrundlagen

In EROSION 3D werden generell **die Ablösung von Bodenpartikeln, der Transport und die Sedimentation von Partikeln** sowie die Infiltration berücksichtigt. Im Folgenden soll die mathematische Umsetzung der ersten zwei Teilprozesse im Modell kurz erläutert werden. Auf die Infiltration wird nicht genauer eingegangen, da sie im Rahmen der Arbeit eine untergeordnete Bedeutung hat. Es sei nur darauf hingewiesen, dass das Infiltrationsmodell auf dem Ansatz von GREEN & AMPT [1911] beruht. Eine ausführliche Beschreibung des gesamten Erosionsmodells findet man in SCHMIDT [1996], VON WERNER [1995] und MICHAEL [2000], worauf sich auch die folgenden Ausführungen stützen.

Ablösung der Bodenpartikel

Bodenpartikel können durch Tropfenaufschlag oder Oberflächenabfluss abgelöst werden. Im Modell wird deren erodierende Wirkung durch den Impulsstrom ausgedrückt ($\varphi_{r,\alpha}$ und φ_q). Diesen Kräften wirkt die Scherfestigkeit des Bodens entgegen, die sich aus Kohäsion, innerer Reibung und Erdanziehungskraft zusammensetzt. Die Scherfestigkeit wird durch den kritischen Impulsstrom (φ_{crit}) beschrieben. Die drei Impulsströme werden zu dem dimensionslosen Faktor E (Erosionskennzahl) vereinigt (Gl. 3.1).

$$E = \frac{\varphi_{r,\alpha} + \varphi_q}{\varphi_{crit}} \quad (3.1)$$

mit: φ Impulsstrom in N/m^2 .

Bei $E > 1$ beginnt der Prozess der Ablösung der Partikel, da die Ablösekräfte größer sind als der Erosionswiderstand des Bodens. Der umgekehrte Fall ($E \leq 1$) kennzeichnet einen erosionsfreien Zustand. Die Impulsströme werden nach den Gl. 3.2 - 3.4 definiert.

$$\varphi_q = \frac{q \cdot \rho_q \cdot v_q}{\Delta x} \quad (3.2)$$

mit: q Volumenstrom des Abflusses (Abflussrate) in $m^3/(m \cdot s)$,
 ρ_q Flüssigkeitsdichte in kg/m^3 ,
 v_q mittlere Fließgeschwindigkeit des Abflusses in m/s ,
 Δx Länge des Rasterelements in m .

$$\varphi_{r,\alpha} = r \cdot \cos \alpha \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \rho_r \cdot v_r \cdot \sin \alpha \cdot (1 - C_L) \quad (3.3)$$

mit: r Niederschlagsintensität in m/s ,
 α Hangneigungswinkel in 1° ,
 ρ_r Flüssigkeitsdichte des Niederschlags in kg/m^3 ,

- v_r mittlere Fallgeschwindigkeit der Tropfen in m/s,
 C_L Bedeckungsgrad der Bodenoberfläche durch Pflanzen und Pflanzenrückstände,
 Δy Breite des Rasterelements in m.

$$\varphi_{\text{crit}} = \frac{q_{\text{crit}} \cdot \rho_q \cdot V_q}{\Delta x} \quad (3.4)$$

- mit: q_{crit} im Strömungsversuch ermittelter kritischer Mindestabfluss, bei dem in Abhängigkeit von spezifischen Bodeneigenschaften Erosion einsetzt in $\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$.

Zur Quantifizierung der Ablösung von Partikeln wurde die Erosionskennzahl mit experimentell ermittelten Feststoffmassenströmen (q_s) korreliert und ergab Gl. 3.5 [SCHMIDT 1996]. Hierin beschreibt der potenzielle Feststoffmassenstrom bei ausreichender Transportkapazität die potenzielle Menge ablösbarer Partikel je Zeit- und Flächeneinheit.

$$q_{s,\text{pot}} = (1,75 \cdot E - 1,75) \cdot 10^{-4} \quad (3.5)$$

- mit: $q_{s,\text{pot}}$ potenzieller Feststoffmassenstrom in $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$.

Transport und Sedimentation der Bodenpartikel

Bei der Modellierung des Partikeltransportes werden zwei einander entgegengesetzt gerichtete Prozesse berücksichtigt. Aufgrund ihrer Schwerkraft sind die im Oberflächenabfluss suspendierten Teilchen bestrebt, nach unten zu sinken. Dies ist der Fall, wenn der kritische Impulsstrom der Partikel ($\varphi_{p,\text{crit}}$) nach Gl. 3.6 unterschritten wird.

$$\varphi_{p,\text{crit}} = c \cdot \rho_p \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot v_p^2 \quad (3.6)$$

- mit: v_p Sinkgeschwindigkeit der Teilchen in m/s,
 c Konzentration der suspendierten Teilchen in der Flüssigkeit in m^3/m^3 ,
 ρ_p Dichte der Partikel in kg/m^3 .

Der Sinkbewegung wirkt eine vertikale (aufwärtsgerichtete) Komponente des Impulsstromes des Abflusses ($\varphi_{q,\text{vert}}$) entgegen. Es wird angenommen, dass $\varphi_{q,\text{vert}}$ ein Teil des gesamten Impulsstromes ist, der sich aus Oberflächenabfluss und Tropfenaufschlag zusammensetzt (Gl. 3.7).

$$\varphi_{q,\text{vert}} = \frac{1}{\kappa} \cdot (\varphi_q + \varphi_{r,\alpha}) \quad (3.7)$$

- mit: κ Depositionskoeffizient.

Wenn die vertikale Impulsstromkomponente gleich dem kritischen Impulsstrom ist, hat der Oberflächenabfluss seine Transportkapazität erreicht. Die maximale Konzentration der Partikel (c_{max}) bei Transportkapazität lässt sich dann durch Gleichsetzen der Gl. 3.6 und 3.7 und durch Umstellung nach c_{max} berechnen [SCHMIDT 1996]. Die Transportkapazität ergibt sich nach Gl. 3.8 wie folgt:

$$q_{s,\text{max}} = c_{\text{max}} \cdot \rho_p \cdot q \quad (3.8)$$

Die Erosion (negativ) und Deposition (positiv) wird je Zeit- und Flächeneinheit nach Gl. 3.9 ermittelt:

$$\gamma = \frac{q_{s,in} - q_{s,out}}{\Delta x} \quad (3.9)$$

mit: $q_{s,in}$ Sedimenteintrag aus dem oberhalb gelegenen Segment in $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$,
 $q_{s,out}$ Sedimentaustag aus dem Segment in $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$.

3.4.2 Ein- und Ausgabeparameter, Programmaufbau

Eine Übersicht über die Eingabeparameter und deren Erhebung gibt Tab. 3.4. Des Weiteren werden Informationen über die Landnutzung, Schlaggrenzen, Fruchtarten und Bewirtschaftungsmethoden (z. B. Aussaat, Ernte, Bearbeitung) benötigt.

Tab. 3.4: Eingabeparameter des Modells EROSION 3D und ihre herkömmlichen Messmethoden [nach VON WERNER 1995, MICHAEL 2000].

Eingabeparameter	Messmethode
<i>Relief</i>	
DGM (x, y, Höhe) in m	Digitalisierung von Höhenlinien, Höhenaufnahme im Gelände
<i>Bodenparameter</i>	
Korngrößenverteilung (Feinton bis Grobsand in DIN-Einteilung) in %	Laboranalyse von Bodenproben
Lagerungsdichte in 15 - 20 cm Tiefe in kg/m^3	Laboranalyse von Bodenproben, Tabellen
Gehalt von organischen Kohlenstoff in Ah- bzw. Ap-Horizont in %	Laboranalyse von Bodenproben, Tabellen
Anfangswassergehalt in 15-20 cm Tiefe in Vol. %	Laboranalyse von Bodenproben, Tabellen
Erosionswiderstand in N/m^2	Berechnungsversuche, durch Regression aus anderen Parametern, Tabellen
Rauhigkeit (Mannings n) in $\text{s}/\text{m}^{1/3}$	Berechnungsversuche, Tabellen
Bedeckungsgrad in %	Abschätzung im Gelände oder aus Photos, Tabellen
Skinfaktor	Berechnungsversuche, durch Regression aus anderen Parametern, Tabellen
<i>Niederschlag</i>	
Niederschlagsdauer in min	Regenschreiber, Niederschlagsstatistik
Niederschlagsintensität in mm/min	Regenschreiber, Niederschlagsstatistik

Eine Sensitivitätsanalyse des Modells EROSION 2D gegenüber den Eingangsparametern führte SCHMIDT [1996] durch. Hiernach haben die Bodenparameter einen höheren Einfluss auf das Modell als die Reliefparameter. Auf eine Untersuchung der Korngrößenverteilung und des Bedeckungsgrades wurde verzichtet, da diese andere Parameter (Erosionswiderstand, Rauhigkeit) beeinflussen. Eine umfangreiche Sensitivitätsanalyse sowie Untersuchungen zur räumlichen und zeitlichen Variabilität der Parameter ist auch bei MICHAEL [2000] zu finden.

Das Programm gliedert sich in den Präprozessor (Version 1.62) und den Hauptprozessor (Version 1.68) [VON WERNER 1995]. Der Präprozessor wurde entwickelt, um zeitlich aufwendige Berechnungen zur Datenaufbereitung durchzuführen. Mit dem Präprozessor werden Parameterdateien für die Reliefparameter, die Bodenparameter und die Niederschlagsparameter im Binär-Format für den Hauptprozessor aufbereitet. Das DGM wird in

Form einer Rasterdatei (z. B. ASCII) eingelesen. Zur Erzeugung der Niederschlagsparameterdatei wird eine ASCII-Datei mit Angaben zur Zeit, Intensität, Station, zeitlichen Auflösung usw. benötigt. Für die Eingabe der Bodenparameter (Tab. 3.4) gibt es folgende Möglichkeiten:

- Laden eines Rasterbildes je Parameter in Größe des DGM,
- schlagbezogene Parametereingabe (Rasterbild mit Nutzungsgrenzen, Zuordnungstabelle, Tabelle mit Bodenparametern),
- interaktive Eingabe durch risterelementweises Editieren.

In Tab. 3.5 werden die Ausgabeparameter dargestellt. Sie können im Hauptprogramm als Graphik (2D/3D) oder als Rasterdatei (z. B. ASCII) ausgegeben werden.

Tab. 3.5: Ausgabeparameter des Modells EROSION 3D [nach VON WERNER 1995].

Punktbezogene Ausgabeparameter	Flächenbezogene Ausgabeparameter
Abfluss in m ³ /m	Austrag in t/ha
Transportierte Sedimentmenge in kg/m	Deposition in t/ha
Sedimentkonzentration in kg/m ³	Nettoaustrag in t/ha
Korngrößenverteilung in %	

3.4.3 Fernerkundbare Eingangsparameter

In Tab. 3.6 wird eine Übersicht darüber gegeben, welche der Eingangsparameter von EROSION 3D sich derzeit mit der satellitengestützten Fernerkundung bereitstellen lassen. Dazu wird ihnen in den ersten zwei Spalten der Bedarf des Modells und ihre Bestimmbarkeit aus Satellitendaten gegenübergestellt. In den folgenden Spalten werden beispielhaft Satelliten/Sensoren vorgeschlagen, deren räumliche und die damit verbundene zeitliche Auflösung in etwa den Anforderungen von EROSION 3D (10 - 20 m) gerecht werden.

Ähnlich wie in Abschnitt 3.2.2 spiegelt die Bestimmbarkeit wider, dass vor allem die Ableitung von Relief- und Vegetationsparametern (DGM, Bedeckungsgrad, Landnutzung) relativ gut möglich ist. Für diese Parameter existieren verschiedene Sensorsysteme, die den Anforderungen von EROSION 3D sehr gut entsprechen. Während das DGM nur einmalig für ein Untersuchungsgebiet erfasst wird, erfordert die Modellierung von über das Jahr verteilten Starkregenereignissen die Kenntnis des zeitlichen Verlaufs von Vegetations- und Bodenparametern. Hierfür sollte die zeitliche Auflösung eines Sensors in etwa der zeitlichen Dynamik eines Parameters entgegenkommen. Da sich die geometrische und zeitliche Auflösung sensorbedingt umgekehrt proportional verhalten, muss entsprechend der Aufgabenstellung ein Kompromiss gefunden werden [BORG & KLISCH 2001].

Die Bestimmung von Niederschlagsintensität und -dauer ist fernerkundlich zwar möglich, doch existiert derzeit kein satellitengestütztes Verfahren, das die Parameter mit einer zeitlichen Auflösung von 1 - 15 min operationell liefern könnte. Die Ableitung von Bodenparametern ist durch das bereits angesprochene Problem der Beeinflussung des Messsignals durch mehrere Bodeneigenschaften (s. 3.2.2) eingeschränkt. Durch die Verwendung von verschiedenen Polarisationsrichtungen und/oder Wellenlängen für bisher vorrangig flugzeug- oder shuttlegestützte Radarsensoren kann dieses Problem gelöst werden [z. B. ULABY et al. 1996, BINDLISH & BARROS 2001]. Solche Sensoren existieren derzeit noch nicht auf Satelliten, so dass eine zufriedenstellende operationelle Anwendung hoher geometrischer Auflösung bislang begrenzt ist.

Tab. 3.6: Eingabeparameter von EROSION 3D und ihre satellitengestützte Bestimmbarkeit [verändert nach VON WERNER & BORG 1996, MAUSER et al. 1999, KLISCH et al. 2001].

Parameter	Bedarf*	Bestimmbarkeit**	Satellit/Sensor	Räumliche Auflösung	Zeitliche Auflösung
DGM	mittel	+++	PRIRODA-MOMS SPOT-HRV	13,5 m 10 m	- 26 d
Korngrößenverteilung	-	-	-	-	-
Lagerungsdichte	-	-	-	-	-
Gehalt an organischem Kohlenstoff	-	-	-	-	-
Anfangswassergehalt	hoch	+	ERS-SAR	30 m	35 d
Erosionswiderstand	-	-	-	-	-
Rauhigkeit	hoch	+	ERS-SAR	30 m	35 d
Bedeckungsgrad	hoch	++	Landsat-TM/ETM+ IRS-LISS ¹⁵ III SPOT-HRV	30 m 23 m 20 m	16 d 24 d 26 d
Skinfaktor	-	-	-	-	-
Niederschlagsdauer	gering	+	-	-	-
Niederschlagsintensität	gering	+	-	-	-
Landnutzung	hoch	++	s. Bedeckungsgrad		

* MICHAEL 2002.

** +++ sehr gut, ++ gut, + befriedigend, - schwer oder gar nicht durch die satellitengestützte Fernerkundung bestimmbar.

Des Weiteren wird in Tab. 3.6 den Eingangsparametern der Bedarf an alternativen, flächenhaften Erfassungsmethoden wie z. B. der satellitengestützten Fernerkundung zugeordnet. Ein Bedarf ist generell für alle Parameter vorhanden. Insbesondere sind hierbei die Landnutzung und der Bedeckungsgrad hervorzuheben, da für diese ein erhöhter Bedarf und eine gute Bestimmbarkeit mit satellitengestützten Daten vorliegt. Deshalb werden im Rahmen der Arbeit Verfahren zusammengestellt, die eine Integration von Fernerkundungsdaten am Beispiel des Bedeckungsgrades in EROSION 3D ermöglichen. Hierfür werden Landsat-TM-Daten verwendet, da:

- sie eine ausreichende räumliche und zeitliche Auflösung für diese Anwendung bieten,
- am Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) langjährige Erfahrungen in der quantitativen Auswertung solcher Daten vorliegen und
- im Untersuchungszeitraum drei Szenen dieses Sensors zur Verfügung standen.

Es ist zu berücksichtigen, dass das Modell EROSION 3D vermutlich eine geringere Sensitivität gegenüber dem Bedeckungsgrad als gegenüber Bodenparametern wie dem Anfangswassergehalt und der Lagerungsdichte aufweisen wird, die nach der Sensitivitätsanalyse von SCHMIDT [1996] und MICHAEL [2000] den größten Einfluss haben. Somit ist zu erwarten, dass vor allem für weniger erosionswirksame Niederschlagsereignisse eher geringere Auswirkungen in den Simulationsergebnissen auf die Veränderungen des Bedeckungsgrades auftreten.

¹⁵ Indian Remote Sensing Satellite (IRS)-Linear Imaging Self-Scanning Sensor (LISS): opto-elektronischer multispektraler Scanner [s. KRAMER 1996].

4 Grundlagen der Fernerkundung von Vegetation

Fernerkundung bezeichnet die Wissenschaft, die über ein Objekt, Gebiet oder Phänomen - basierend auf den Eigenschaften der elektromagnetischen Strahlung - durch Aufzeichnung von Daten und deren qualitative oder quantitative Analyse Informationen gewinnt, ohne mit diesen in direktem Kontakt zu stehen [nach LILLESAND & KIEFER 1994]. Das vorliegende Kapitel basiert im Wesentlichen, sofern nicht anders angegeben, auf den Werken von COLWELL [1983], KRONBERG [1985], LILLESAND & KIEFER [1994] und ASRAR [1989].

4.1 Optische Fernerkundung

Die terrestrische optische Fernerkundung erfasst die von der Erdoberfläche reflektierte Sonnenstrahlung und die emittierte Thermalstrahlung in den sichtbaren und infraroten Wellenlängenbereichen. Eine weitere Unterteilung dieser Wellenlängen in Spektralbereiche erfolgt in Tab. 4.1.

Tab. 4.1: Spektralbereiche der terrestrischen optischen Fernerkundung [nach LILLESAND & KIEFER 1994].

Bezeichnung	Abkürzung	Wellenlänge in μm
Sichtbares Licht	VIS	0,4 – 0,7
Blau	-	0,4 – 0,5
Grün	-	0,5 – 0,6
Rot	-	0,6 – 0,7
Nahes Infrarot	NIR	0,7 – 1,3
Mittleres Infrarot	MIR	1,3 – 3,0
Thermales Infrarot	TIR	3,0 – 14,0

Strahlungsenergie entsteht durch Umwandlung von Wärmeenergie nach den Gesetzen eines Schwarzen Körpers. Nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz hängt die Höhe der Strahlungsenergie in starkem Maße von der Temperatur des emittierenden Körpers ab. Die Wellenlänge, bei der

das Spektrum eines Schwarzen Strahlers das Maximum erreicht, ergibt sich nach dem Wienschen Verschiebungsgesetz aus dessen Temperatur. Hiernach erreicht die Sonne als Hauptenergiequelle bei einer Temperatur von ca. 6.000 K ihr Strahlungsmaximum bei etwa 0,5 μm . Bei einer geringeren Temperatur von ca. 300 K verschiebt sich die Wellenlänge für die Erde auf 9,7 μm .

Die Sonnenstrahlung wird beim Durchqueren der Atmosphäre von darin eingelagerten Partikeln beeinflusst. Aufgrund der wellenlängenabhängigen Absorption durch Gase wie Ozon, Wasserdampf, Kohlendioxid und Sauerstoff kann die Strahlung die Atmosphäre nur in bestimmten Bereichen (atmosphärische Fenster) durchdringen. Ein weiterer Prozess, die Streuung, wird durch das Zusammenwirken von Teilchen eines bestimmten Durchmessers und bestimmten Wellenlängen verursacht. So streuen Gasmoleküle vorrangig kurzwellige Strahlung (Rayleigh-Streuung). Vor allem Wasserdampf und Staub (Aerosole) bewirken die Streuung der langwelligen Strahlung (Mie-Streuung). Insbesondere für die quantitative Analyse von Fernerkundungsdaten in Zeitreihen ist es erforderlich, diese Einflüsse durch Korrekturen zu minimieren [RICHTER 1996].

Beim Auftreffen der elektromagnetischen Strahlung auf die Erdoberfläche kann es zur Reflexion, Absorption und Transmission der Strahlung kommen. Das hemisphärische Reflexionsvermögen wird definiert als das dimensionslose Verhältnis von reflektierter und einfallender Strahlung an einer Oberfläche [SUITS 1983, S. 52].

Entsprechend der Oberflächenrauigkeit entsteht spiegelnde Reflexion für spiegelähnliche Oberflächen und diffuse oder Lambertsche Reflexion (isotrop) für raue Oberflächen. Natürliche Landoberflächen weisen aufgrund ihrer komplexen Struktur ein richtungsabhängiges oder anisotropes Reflexionsverhalten auf. Die innewohnende physikalische Eigenschaft, die das Reflexionsverhalten eines Oberflächenelementes bestimmt, wird nach NICODEMUS [1982] als *Bidirectional Reflectance Distribution Function* (BRDF) bezeichnet. Der Reflexionsfaktor ergibt sich aus der Integration dieser Größe für endlich große Winkel der einfallenden und reflektierten Strahlung. In Feld- und Labormessungen wird häufig das Verhältnis der reflektierten Strahlungsdichte an einem Objekt relativ zur Strahlungsdichte bestimmt, die an einem perfekt diffusen (Lambertschen) Strahler reflektiert wird [SMITH 1983]. Der spektrale Reflexionsfaktor, der sich auf bestimmte Wellenlängen bezieht, wird im Folgenden nur noch Reflexionsvermögen (RV) ρ genannt.

Da die Strahlung in der optischen Fernerkundung von natürlichen Energiequellen ausgeht, spricht man von passiven Sensoren. Weiterhin können optische Sensoren nach folgenden Kriterien unterschieden werden:

- Aufnahmeverfahren (z. B. photographische Verfahren, Scanner),
- abbildende und nicht abbildende Sensoren,
- Plattform (z. B. Flugzeug, Satellit),
- spektrale Auflösung (z. B. panchromatisch, multispektral, hyperspektral),
- radiometrische Auflösung,
- räumliche Auflösung (z. B. hochaufgelöst, mittelaufgelöst),
- zeitliche Auflösung.

Eine ausführliche Beschreibung der Eigenschaften verschiedener Sensorsysteme ist in COLWELL [1983] und eine Auflistung von bisher entwickelten sowie zukünftiger Sensoren in KRAMER [1996] zu finden. Die in der vorliegenden Arbeit zur Anwendung kommenden Verfahren werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Abbildende Multispektralscanner sind seit den 70er Jahren im operationellen Einsatz. Sie detektieren meist mit relativ breitbandigen Kanälen im sichtbaren und infraroten Bereich. Beispiele für solche satellitengestützten Sensoren sind Landsat-MSS, Landsat-TM, SPOT-HRV, IRS-LISS und MOMS [KAUFMANN et al. 1989]. Ihre spektrale Auflösung wird über die erforderliche Strahlungsmenge und die Empfindlichkeit der Detektoren von der geometrischen Auflösung begrenzt. Gleichzeitig beeinflusst die geometrische Auflösung und die Szenengröße die Abdeckung der Erdoberfläche und damit die zeitliche Auflösung. Die Wahl des Sensorsystems hängt somit von den Anforderungen der Anwendung ab.

Bei den nicht abbildenden Spektroradiometern wird die von einer Probe reflektierte Strahlung mit einer sehr hohen spektralen Auflösung detektiert. Sie ermöglichen die Erfassung des Reflexionsvermögens in einem kontinuierlichen Reflexionsspektrum meist im Wellenlängenbereich von 0,4 μm bis 2,5 μm .

4.2 Spektralverhalten ausgewählter Oberflächen

Im folgenden Abschnitt wird auf Eigenschaften und Ursachen des spektralen Verhaltens von Oberflächen eingegangen, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit relevant sind.

- 0,4 μm - 0,7 μm : Absorption der für die Photosynthese erforderlichen Energie (photosynthetisch aktive Strahlung PAR) durch Chlorophyll vor allem im Blau- und Rotspektrum; vorwiegend Reflexion im grünen Bereich (lokales Maximum bei 0,55 μm)
- 0,7 μm - 1,3 μm : steiler Anstieg der Reflexionskurve an einer Absorptionskante (*Red Edge*); starkes Streuungs- und Brechungsverhalten durch interne Gewebestruktur in Abhängigkeit von Zahl, Größe und Form der Zellen im Blattgewebe
- 1,3 μm - 2,5 μm : relativ hohe Reflexion mit Abnahme zum langwelligen Teil hin; Absorption durch das im Blattgewebe enthaltene Wasser mit Maxima bei 1,45 und 1,96 (sowie 2,70 μm)

In den stark absorbierten Wellenlängen neigen Blätter dazu, spiegelnd zu reflektieren. Im Bereich größer 0,75 μm tritt vor allem Lambertsche Reflexion auf; jedoch zeigen die langen infraroten Wellenlängen ein nicht-Lambertsches Verhalten [SMITH 1983].

Die Blattentwicklung und -alterung ist durch die Veränderung der dominierenden Größen geprägt. Mit steigendem Blattalter nehmen zunächst die interzellularen Lufträume und der Wassergehalt zu. Somit steigt der Reflexionsanteil im NIR und MIR, was mit einer Erhöhung der Intensität des *Red-Edge*-Effektes verbunden ist. Während des Blattwachstums sind zunehmende Chlorophyllgehalte durch geringere RV im VIS gekennzeichnet. Beim Einsetzen der Seneszenz fällt der Chlorophyllgehalt und somit die Rot-Absorption bzw. die Grün-Reflexion ab. Gleichzeitig wird das Blattpigment Karotinoid wirksam, das vor allem im blauen Bereich absorbiert. Diese Veränderungen bewirken die Verfärbung der Blätter im Herbst und eine Verschiebung der *Red Edge* zu den kürzeren Wellenlängen.

Erkrankte oder unter Stress stehende Pflanzen reagieren durch Veränderung des Pigmentgehaltes, der Mesophyllstruktur, des Wassergehaltes oder der Oberflächeneigenschaften des Blattes. Sie werden vor allem im NIR-Bereich durch Veränderung der Intensität und Lage der *Red Edge* sichtbar. Nach KNIPLING [1970] beeinflusst physiologischer Stress neben dem NIR- häufig den VIS-Bereich aufgrund der Sensitivität gegenüber dem Chlorophyllgehalt.

Die Reflexionseigenschaften von Blättern einer Spezies lassen sich nicht vollständig auf die einer Vegetationsdecke übertragen. Generell sind satellitengestützte Messungen von Vegetation durch eine Abschwächung der RV aufgrund der eingangs erwähnten Einflussfaktoren gekennzeichnet. Häufig wird jedoch die einfallende Strahlung im NIR von den obersten Blättern durchgelassen und erst darunter mehrfach reflektiert. Das RV im NIR nimmt mit der Anzahl der Schichten bis zu einem Reflexionsmaximum bei etwa acht Schichten zu [BAUER et al. 1986]. Diese Verstärkung der NIR-Reflexion vergrößert die Unterschiede im Reflexionsverhalten des VIS und NIR.

Das RV von Boden hat einen entscheidenden Einfluss auf die Reflexionseigenschaften von Vegetationsdecken vor allem mit geringem Bedeckungsgrad. Die Vermischung beider Reflexionsverhalten ist meist mit einer Zunahme im VIS und einer Abnahme im NIR gegenüber dem Reflexionsverhalten von Vegetation gekennzeichnet. Innerhalb eines Bodentyps beeinflusst besonders die Bodenfeuchte das RV [CLEVERS 1986].

4.2.2 Boden

Das spektrale Reflexionsverhalten des Bodens kann nach KRONBERG [1985] in folgende beeinflussende Faktoren differenziert werden:

- materialbezogene Parameter: Mineralbestand, Körnung, Gehalt an Eisenverbindungen, Gehalt an organischer Substanz, Oberflächenrauigkeit, Bodenfeuchte
- materialunabhängige Parameter: Geländere relief, topographische Position, Höhe über NN, Neigung der Oberfläche, Orientierung zur Sonne, Art und Dichte des Bewuchses, meteorologische Bedingungen (Sonneneinstrahlung, Wind, Niederschlag, ...)

Die Reflexionseigenschaften des Bodens kommen denen eines Lambertschen Reflektors näher als die der Vegetation. Unterschiede des RVs von Böden zeigen sich in der Form der Kurve und im Vorhandensein von Absorptionsbanden. In Abb. 4.1 (S. 19) wird beispielhaft die Reflexionskurve eines trockenen grau-braunen Bodens dargestellt.

Eine Abschwächung des RVs wird generell durch hohe Bodenfeuchte, organisches Material und Eisenoxide, hohe Oberflächenrauigkeit sowie eine zunehmende Korngröße verursacht. Der dargestellte Zusammenhang zwischen RV und Korngröße gilt für Labormessungen, bei denen feine Materialien eine glattere Oberfläche aufweisen. Im Gelände können jedoch geringere RV bei Böden mit hohem Ton- und Schluffanteil durch die Bildung von Klumpen nach Befeuchtung und Austrocknung vorliegen als bei sandigen Böden.

Absorptionsbanden, die aus Interaktionen der Sonnenstrahlung mit Böden resultieren, werden vorwiegend durch Veränderungen der Vibrationsbewegungen des Atomkerns oder des Energiestatus der Elektronen verursacht [KAUFMANN 1999]. Vibrationsübergänge treten im sichtbaren und infraroten Bereich auf. Innerhalb des Sonnenspektrums ist die Beobachtung von Vibrationsphänomenen auf Obertonbänder und Kombinationsbänder beschränkt (z. B. Wasser- und Hydroxylbanden) [HUNT 1980]. Elektronische Übergänge können auf Ladungs-, Kristallfeldübergänge und Übergänge im Leitungsband beruhen [SMITH 1983, S. 105]. Ihre Absorptionsbanden zeigen sich breitbandiger im ultravioletten und sichtbaren Bereich (z. B. Eisenbanden) [HUNT & SALISBURY 1970].

4.3 Quantitative Ableitung von Vegetationsparametern

Ziel der Arbeit ist es, beispielhaft Vegetationsparameter für EROSION 3D bereitzustellen. Im folgenden Abschnitt werden Methoden vorgestellt, die eine quantitative Ableitung solcher Parameter ermöglichen (Interpretationsmodelle). Diese Modelle versuchen, die physikalischen Zusammenhänge zwischen der Vegetationscharakteristik und dem spektralen Verhalten zu beschreiben. Die gesuchten Parameter werden durch Inversion bestimmt. In dieser Arbeit werden Vegetationsindizes aus folgenden Gründen eingesetzt:

- Mit den vorhandenen Datensätzen (s. 5.2.2, S. 37) liegen multispektrale, relativ breitbandige Informationen vor.
- Vegetationsindizes wurden in der Literatur vielfach untersucht und eingesetzt.
- Koeffizienten zur Parameterableitung für verschiedene Fruchtarten sind bekannt.
- Im Rahmen der Arbeit besteht keine Möglichkeit zur Modellvalidierung.

4.3.1 Theoretische Grundlagen der Vegetationsindizes

Da, wie in 4.1 und 4.2 gezeigt, viele Faktoren das Reflexionsverhalten einer natürlichen Landoberfläche beeinflussen und sich gegenseitig überlagern, werden an die Erfassung der Vegetationscharakteristik und somit Vegetationsindizes hohe Anforderungen gestellt. Diese lassen sich wie folgt zusammenfassen [HUETE 1989, S. 119, BARET & GUYOT 1991]:

- Minimierung des Einflusses des Bodens, der Aufnahmegeometrie, der Atmosphäre, abgestorbener Vegetation und der Geometrie der Vegetationsdecke (Blattwinkelverteilung, Reihenorientierung und -abstand),
- Maximierung der spektralen Empfindlichkeit gegenüber der grünen Vegetationsdecke,
- globale Anwendbarkeit (Unabhängigkeit von Ort und Zeit).

Mit diesen Prämissen wurden eine Reihe von Vegetationsindizes entwickelt. **Ratio-basierte Vegetationsindizes** werden aus dem Verhältnis zwischen zwei Kanälen oder der Kombination dieser Kanäle berechnet. Diese Indizes beruhen auf der Annahme, dass im NIR-Red-Raum Geraden, die sich aus Punkten gleicher optischer und struktureller Eigenschaften der Vegetationsdecke zusammensetzen, vom Ursprung ausgehend radial verlaufen. Ihre bekanntesten Vertreter werden in den Gl. 4.1 und 4.2 dargestellt [PEARSON & MILLER 1972, ROUSE et al. 1974].

$$RVI = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{RED}} \quad (4.1)$$

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (4.2)$$

mit: RVI Ratio Vegetation Index,
 NDVI Normalized Difference Vegetation Index,
 ρ_{RED} Reflexionsvermögen im Rot in %,
 ρ_{NIR} Reflexionsvermögen im nahen Infrarot in %.

Solche Indizes tendieren dazu, den Kontrast zwischen Boden und Vegetation zu verstärken sowie den Einfluss der Beleuchtung zu minimieren [BARET & GUYOT 1991]. Sie reagieren jedoch empfindlich auf die optischen Eigenschaften des Bodens [HUETE 1989, BARET & GUYOT 1991].

Bei den **orthogonalen Transformationen** wird davon ausgegangen, dass die erwähnten Geraden gleicher Vegetationseigenschaften nicht vom Ursprung ausgehend auseinanderlaufen, sondern sich parallel zu einer Art Kennlinie des Bodens (*Soil Line*) befinden. Solche Vegetationsindizes sind als lotrechter Abstand zur *Soil Line* zu verstehen. Beispiele hierfür sind der *Perpendicular Vegetation Index* (PVI) [RICHARDSON & WIEGAND 1977] und der *Weighted Difference Vegetation Index* (WDVI) [CLEVERS 1986, 1988]. Der WDVI wird wie folgt berechnet:

$$WDVI = \rho_{NIR} - C \cdot \rho_{RED} \quad (4.3)$$

$$C = \rho_{s,NIR} / \rho_{s,RED} \quad (4.4)$$

mit: C bodenspezifischer Faktor,
 $\rho_{s,RED}$ Reflexionsvermögen des Bodens im Rot in %,
 $\rho_{s,NIR}$ Reflexionsvermögen des Bodens im nahen Infrarot in %.

Der Faktor C beruht auf der Annahme, dass das Verhältnis zwischen den nahen infraroten und roten RV für unbedeckten Boden unabhängig von der Bodenfeuchte konstant ist. Im Gegensatz zum PVI wird dabei von einer *Soil line* ausgegangen, die durch den Ursprung verläuft ($y = ax + b$, $a = C$, $b = 0$). Auch bei dieser Gruppe von Vegetationsindizes können die optischen Bodeneigenschaften (z. B. Helligkeit) nicht vollständig eliminiert werden [HUETE 1989, BARET & GUYOT 1991].

Da keine der beiden vorgestellten Theorien die wirkliche Lage der Vegetations- und Bodengeraden zueinander ausreichend gut beschreibt, wurden eine Reihe von **hybriden Vegetationsindizes** entwickelt. Diese Indizes versuchen, die Einflüsse der Bodenhelligkeit zu reduzieren. Beim *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI) [HUETE 1988] wird dieses Ziel durch eine bessere Anpassung der Vegetationsgeraden umgesetzt. Dazu wird der Schnittpunkt der Geraden mit der *Soil Line* vom Ursprung weg verschoben (Gl. 4.5).

$$\text{SAVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{RED}} + L} \cdot (1 + L) \quad (4.5)$$

mit: L Verschiebung des Schnittpunktes der Vegetationsgeraden mit der *Soil Line*.

Die Grenzfälle des SAVI nähern sich für L gleich 0 dem NDVI und für L gleich unendlich dem PVI an. Das optimale L variiert mit der Vegetationsdichte (geringe Dichte L = 1, mittlere Dichte L = 0,5, hohe Dichte L = 0,25) [HUETE 1988]. Der Nachteil des SAVI besteht darin, dass eine exakte Lösung des SAVI für unbedeckten Boden nur für einen Spezialfall (a = 1, b = 0) gilt [BARET & GUYOT 1991].

Hyperspektrale Vegetationsindizes basieren auf der Auswertung mehrerer, schmaler Bänder (z. B. Parameterisierung der *Red Edge*), die aber aufgrund der gegebenen Landsat-Daten in dieser Arbeit nicht anwendbar sind. Neben den genannten Vegetationsindizes existieren eine Fülle weiterer Entwicklungen [BANNARI et al. 1995, ELVIDGE & CHEN 1995, BROGE & LEBLANC 2000].

4.3.2 Der Blattflächenindex

Der Blattflächenindex (*Leaf Area Index*, LAI) wird als die einseitige grüne Blattfläche (in m²) innerhalb eines vertikalen Zylinders der Höhe h_L bezogen auf eine horizontale Einheitsfläche (in m²) definiert [ROSS 1975]. Er ist eine dimensionslose Größe (Gl. 4.6).

$$\text{LAI} = \int_0^{h_L} a(z) dz \quad (4.6)$$

mit: LAI Blattflächenindex in m²/m²,
a(z) Dichtefunktion der Blattflächen in der Höhe z in m²/m³,
z vom Boden gemessene Höhe in m,
h_L Höhe der Vegetationsschicht in m.

Da die PAR-Interzeption vorwiegend über die Blattspreiten erfolgt, tragen diese am meisten zur Bestandesphotosynthese und somit zum Wachstum bei. Der LAI ist also ein Maß für die Stoffproduktion. Zudem stellt der LAI eine entscheidende Größe zur Quantifizierung des Gasaustausches zwischen Biosphäre und Atmosphäre dar [PREUßER 1998]. Entscheidende Prozesse sind hierbei die vorübergehende Aufnahme und Speicherung (Niederschlagsinterzeption) sowie die Verdunstung (Transpiration) von Wasser durch die Pflanzen. Hierdurch erfolgt eine Minderung bzw. Umverteilung der für die Erosion zur Verfügung stehenden Niederschlagsmenge.

Die Abschätzung des LAI kann mit direkten und indirekten Methoden erfolgen. Bei der ersten Gruppe handelt es sich u. a. um Methoden, bei denen die Blattfläche ausgemessen oder aus dem Trockengewicht der Proben bestimmt wird. Da zu diesem Zweck Pflan-

zenproben genommen werden müssen, werden sie als destruktive Methoden bezeichnet. Eine Alternative hierzu stellen indirekte Methoden dar, bei denen Parameter gemessen werden, aus denen eine Ableitung des LAI möglich wird. In diese Gruppe ist die Fernerkundung einzuordnen.

Die Fernerkundungsmethoden, die sich auf Vegetationsindizes stützen, sind rein empirische oder semi-empirische Modelle. Sie werden basierend auf umfangreichen Messkampagnen für bestimmte Pflanzen, Gebiete und Sensoren abgeleitet. Empirische Ansätze werden mittels Regression zwischen den Vegetationsindizes und dem LAI meist mit einer der folgenden Beziehungen aufgestellt:

$$\text{LAI} = a \cdot \text{VI}^n + b \cdot \text{VI}^{n-1} + c \cdot \text{VI}^{n-2} + d \quad n = 1, 2, 3 \quad (4.7)$$

$$\text{LAI} = a \cdot \text{VI}^b + c \quad (4.8)$$

mit: a, b, c, d empirische Parameter,
VI Vegetationsindex.

Solche Untersuchungen wurden u. a. für landwirtschaftliche Früchte [WIEGAND et al. 1990, WIEGAND et al. 1992, BACH 1995, 2001], Gras [ASRAR et al. 1986, FRIEDL et al. 1994, GOETZ 1997] und Wald [PETERSON et al. 1987, CHEN & CIHLAR 1996, TURNER et al. 1999] durchgeführt. Das Problem dieser Ansätze besteht darin, dass sie aufgrund ihrer empirischen Natur einen stark eingeschränkten Geltungsbereich haben und daher nur begrenzt übertragbar sind.

Semi-empirische Ansätze beruhen auf einer physikalischen Modellgrundlage. Ihre Parameter werden zwar teilweise empirisch bestimmt, lassen sich jedoch physikalisch erklären. Die Beziehung zwischen dem Reflexionsvermögen bzw. dem Vegetationsindex und dem LAI wird i. d. R. durch eine logarithmische Funktion beschrieben [ASRAR et al. 1984, CLEVERS 1986, BARET & GUYOT 1991, PRICE 1993, PRICE & BAUSCH 1995]. Eine häufig angewendete Methode ist die von BARET & GUYOT [1991] (Gl. 4.9).

$$\text{LAI} = -\frac{1}{a} \ln\left(\frac{\text{VI} - b}{c}\right) \quad (4.9)$$

mit: VI Vegetationsindex,
a Extinktionskoeffizient (k_{VI}),
b asymptotischer Wert des VI, wenn LAI gegen unendlich geht (VI_{∞}),
c $\text{VI}_s - \text{VI}_{\infty}$,
 VI_s Vegetationsindex des unbedeckten Bodens.

Diese Koeffizienten wurden für verschiedene Vegetations- und Fruchtarten wie beispielsweise Weizen [WIEGAND et al. 1992], Mais [WIEGAND et al. 1990, GILABERT et al. 1996], Sojabohnen [CHOUDHURY et al. 1994], Laubwald [CHEN et al. 2002] und Nadelwald [LEBLON et al. 1993, SPANNER et al. 1990] ermittelt.

Ein weiterer semi-empirischer Ansatz ist das CLAIR-Modell (*Clevers Leaf Area Index by Reflectance*) [CLEVERS 1986]. Die Berechnung des LAI erfolgt aus dem WDV mit Hilfe der Inversion eines Spezialfalles der Mitscherlich-Funktion¹⁶ nach Gl. 4.10 [CLEVERS 1988].

¹⁶ Mitscherlich-Funktion: Wachstumsfunktion der Form $y = A - b \cdot \text{EXP}(-k \cdot t)$ [MITSCHERLICH 1923].

$$LAI = -\frac{1}{\alpha} \cdot \ln \left(1 - \frac{WDVI}{WDVI_{\infty}} \right) \quad (4.10)$$

mit: LAI Blattflächenindex in m^2/m^2 ,
 α Kombination aus Extinktions- und Streuungskoeffizienten,
 $WDVI_{\infty}$ asymptotischer Wert des WDWI in %.

Die Parameter α und $WDVI_{\infty}$ müssen für das CLAIR-Modell wie bei den bereits vorgestellten Methoden empirisch aus Trainingsdaten bestimmt werden. Basierend auf langjährigen Messungen in verschiedenen Gebieten wurden sie von BOUMAN et al. [1992] für Kartoffeln, Rüben, Gerste, Weizen und Hafer ermittelt. Durch weitere Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass sich die in den Niederlanden abgeleiteten Parameter auf Gebiete innerhalb Europas wie z. B. Südfrankreich [CLEVERS et al. 2000] übertragen lassen. Bei der Verwendung des WDWI zur LAI-Berechnung wird im Vergleich zu anderen Vegetationsindizes (z. B. NDVI) erst bei einem höheren LAI ein Sättigungsbereich erreicht [CLEVERS 1989, VOGT 1997].

Zahlreiche Studien untersuchen das Verhalten der Beziehungen zwischen den verschiedenen Vegetationsindizes und dem LAI [z. B. BARET & GUYOT 1991, BANNARI et al. 1995, ELVIDGE & CHEN 1995, BROGE & LEBLANC 2000]. Hieraus lassen sich folgende Aussagen bzw. Nachteile der meisten Vegetationsindizes ableiten:

- Trotz Korrekturansätzen ist die LAI-Berechnung vor allem bei einer geringen Bodenbedeckung vom Bodensignal abhängig.
- Weitere Fehlereinflüsse sind die Atmosphärenbedingungen, die bidirektionale Natur der Oberfläche, Aufnahmegeometrie, Blattwinkelverteilung.
- Es wird ein Sättigungsbereich ab etwa LAI gleich 3 erreicht.
- Für einen operationellen Einsatz müssen für jede Frucht- und Vegetationsart Beziehungen der Form LAI(VI) ermittelt werden.
- Eine weitere Einschränkung der Allgemeingültigkeit der Beziehungen LAI(VI) ist durch die unterschiedliche Zusammensetzung der Vegetationsschichten gegeben (z. B. Unkräuter bei Fruchtarten, verschiedene Schichten bei natürlicher Vegetation).

Aufgrund des Mangels eines Ansatzes, der eine LAI-Berechnung für verschiedene Fruchtarten und Landbedeckungstypen ermöglicht, werden im Rahmen der Arbeit verschiedene Methoden untersucht, deren Parameter in Anhang I (Tab. I.1-3) aufgelistet sind.

4.3.3 Bedeckungsgrad

In der Fernerkundung entspricht der Bedeckungsgrad meist dem Anteil der vertikalen Projektion aller grünen, photosynthetisch aktiven Pflanzenelemente bezogen auf die Bodenfläche [BOUMAN et al. 1992, ELVIDGE & CHEN 1995]. Er ist wie der LAI eine dimensionslose Größe, die aus einem Flächenverhältnis berechnet wird. Der Bedeckungsgrad stellt eine entscheidende Größe in der Erosionsmodellierung dar, die den Schutz des Bodens gegenüber dem Tropfenaufprall und dem Oberflächenabfluss regelt [SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998]. Hier beschreibt er im Gegensatz zur Fernerkundung häufig den projizierten Anteil aller Pflanzenteile und -rückstände (z. B. Mulch) [MICHAEL 2000].

Der Bedeckungsgrad wird in situ meist visuell abgeschätzt oder durch Klassifikation des bedeckten Bodens aus Photos bestimmt. In der Fernerkundung wird er empirisch oder

semi-empirisch aus Vegetationsindizes oder aus dem Blattflächenindex abgeleitet. Ein physikalisch basiertes Verfahren, das in den letzten Jahren bedeutender geworden ist, ist die *Spectral Mixture Analysis* [ADAMS & SMITH 1986, USTIN et al. 1996]. Es wurde vor allem für heterogene Vegetationsdecken in semi-ariden Gebieten [GILBERT et al. 2000, ELMORE et al. 2000] aber auch in Deutschland [NETELER 1999] angewendet. Voraussetzung für die *Spectral Mixture Analysis* sind Referenzspektren der beteiligten Bedeckungstypen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde aufgrund des hohen Aufwands und des Mangels an spektralen Referenzdaten aus dem Untersuchungsjahr auf dessen Einsatz verzichtet.

Empirische Verfahren zur Abschätzung des Bedeckungsgrades aus Vegetationsindizes beruhen auf linearen Regressionen z. B. für landwirtschaftliche Fruchtarten [BOUMAN et al. 1992] (Anhang I Tab. I.4), Sträucher und Nadelbäume [ELVIDGE & CHEN 1995] oder auf polynomialen Regressionen z. B. für Grünland [PUREVDORJ et al. 1998].

Nach den Ausführungen von MONSI & SAEKI [1953] lässt sich der Bedeckungsgrad unter Annahme einer homogenen Vegetationsdecke mit zufällig verteilten Blättern aus dem LAI wie in Gl. 4.11 abschätzen.

$$B = 1 - e^{-k \cdot \text{LAI}} \quad (4.11)$$

mit: B Bedeckungsgrad
k Extinktionskoeffizient

Hierbei beschreibt der Term $e^{-k \cdot \text{LAI}}$ die Wahrscheinlichkeit, dass ein Lichtstrahl, der von oberhalb in die Pflanzendecke eindringt, den Boden trifft (*gap frequency*) [BARET et al. 1993]. Der Extinktionskoeffizient k wird häufig wie folgt dargestellt [WARREN WILSON 1965, ROSS 1975, CHOUDHURY 1987].

$$k = G(z, \theta, \phi) / \cos \theta \quad (4.12)$$

mit: $G(z, \theta, \phi)$ G-Funktion oder Geometriefaktor,
 θ Zenitwinkel der Sonne in rad,
 ϕ Azimut der Sonne in rad,
z Höhe im Bestand in m.

Die G-Funktion oder der Geometriefaktor wird interpretiert als durchschnittliche Projektion einer Einheitsblattfläche in der Richtung $n(\theta, \phi)$, die im vorliegenden Fall der Sonnenrichtung entspricht [ROSS 1981]. Die G-Funktion beinhaltet die Blattwinkelverteilungsfunktion $g(z, \theta_L, \phi_L)$. Diese beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass der Normalenvektor von Blattflächen in die Richtung $n_L(\theta_L, \phi_L)$ innerhalb einer Pflanze orientiert ist. Die Blattflächenorientierung im Bestand wird im Wesentlichen beeinflusst durch [ROSS 1981]:

- Faktoren während der Wachstumszeit: spezifische und Sortenunterschiede der Fruchtarten, Veränderungen während der Ontogenese, adaptive Veränderungen durch Umwelteinflüsse,
- kurzzeitige Tagesveränderungen: Heliotropismus, Effekte des Windes, Blattwelken.

Untersuchungen der G-Funktion für landwirtschaftliche Früchte ergaben, dass ihre Abhängigkeit von der Bestandeshöhe und dem Sonnenazimut mit einem geschätzten Fehler von 10 - 30 % vernachlässigt werden kann [ROSS 1981]. Aus experimentellen Daten leite-

ten ROSS & ROSS [1969] eine empirische Beziehung für Sonnenzenitwinkel kleiner 75° ab (Gl. 4.13).

$$G(\theta) = G_1 + (G_2 - G_1) \cdot \cos \theta \quad (4.13)$$

mit: $G_1 = G(\pi/2)$ effektive Blattflächenprojektion in horizontaler Richtung,
 $G_2 = G(0)$ effektive Blattflächenprojektion in vertikaler Richtung.

Eine empirische Beziehung zwischen den Parametern G_1 und $(G_2 - G_1)$ zur Blattflächenorientierung wurde aus Daten von ROSS [1981] durch CHOUDHURY [1987] bestimmt (Gl. 4.14, 4.15).

$$G_1 = 0,50 - 0,58\chi_L - 0,42\chi_L^2 \quad (4.14)$$

$$(G_2 - G_1) = 1,13\chi_L + 0,63\chi_L^2 \quad (4.15)$$

mit: χ_L Blattflächeninklinationsindex ($-0,3 \leq \chi_L \leq 0,6$).

Hierbei wird die Blattflächenorientierung anstelle der Blattwinkelverteilungsfunktion durch den Inklinationsindex dargestellt. Dieser beschreibt die Abweichung der Blattflächennormalen von einer uniformen Verteilung ($\chi_L = +1$ nur horizontale Blätter, $\chi_L = -1$ nur vertikale Blätter). Die im Rahmen der Arbeit verwendeten Werte von χ_L sind in Anhang I Tab. I.6 zu finden. Die Berechnung des Sonnenzenitwinkels ist in Anhang II aufgeführt.

Setzt man Gl. 4.9 in Gl. 4.11 ein, ergibt sich Gl. 4.16 [BARET et al. 1995].

$$B = 1 - \left(\frac{VI - b}{c} \right)^{k/a} \quad (4.16)$$

BARET et al. [1995] untersuchten diese Beziehung für verschiedene Vegetationsindizes und in verschiedenen Gebieten für Zuckerrüben (Anhang I, Tab. I.5).

Die Ableitung des Bedeckungsgrades aus Vegetationsindizes ist mit ähnlichen Nachteilen verbunden wie die LAI-Ableitung (S. 25). Zusätzlich sind vor allem in Hinblick auf die Erosionsmodellierung folgende Probleme damit verbunden:

- Die Annahme einer homogenen Vegetationsdecke ist vor allem in der frühen Vegetationsperiode nicht gegeben (z. B. Reihenanbau). Zu diesem Zeitpunkt können jedoch erosionswirksame Niederschlagsereignisse auftreten.
- Die Blattwinkelverteilung unterliegt starken Veränderungen. Mit der Bestimmung eines einheitlichen Extinktionskoeffizienten für die gesamte Vegetationszeit liegt eine starke Vereinfachung vor.
- Bei einigen Fruchtarten ist eine Unterscheidung des Bedeckungsgrades (oder des LAI) zwischen den Phasen der Vegetationsperioden erforderlich (vegetative, generative) [CLEVERS 1986, CYR et al. 1995].
- Abgestorbene Pflanzenteile können nicht erfasst werden.

4.4 Interpolation von Vegetationsparametern

Mit den unter 4.3 vorgestellten quantitativen Methoden können aus Fernerkundungsdaten zum Zeitpunkt der Aufnahme erosionsrelevante Parameter abgeleitet werden. In Abhängigkeit von der zeitlichen und räumlichen Auflösung sowie den atmosphärischen Bedin-

gungen stehen diese Parameter zu bestimmten Terminen zur Verfügung, die mit den Erosionsereignissen i. d. R. nicht zusammenfallen. Zur Integration dieser Parameter in die Prozessmodelle ist es daher erforderlich, sie zeitlich zu interpolieren. Im folgenden Abschnitt werden hierfür Möglichkeiten aufgezeigt und die verwendete Methode vorgestellt.

4.4.1 Möglichkeiten der zeitlichen Interpolation

Die Wahl der Interpolationsmethode für einen Parameter hängt von der geforderten zeitlichen Auflösung des Modells und den vorliegenden Fernerkundungsdatensätzen ab. Vegetationsparameter werden bei kontinuierlichen Prozessmodellen täglich (z. B. WEPP, EPIC) und bei diskreten bezüglich ausgewählter Tage (z. B. EROSION 3D, EUROSEM) erfasst. Somit ist es erforderlich, tägliche Werte im Modellierungszeitraum bereitzustellen. Dies kann wie folgt realisiert werden:

- Interpolation durch eine **Wachstumsfunktion**,
- Interpolation durch ein empirisches **Evolutionsmodell**,
- Interpolation durch ein **Wachstumsmodell**.

Bei einer **Wachstumsfunktion** werden die Parameter einer mathematischen Funktion bestimmt, die den Verlauf der Vegetationsgröße möglichst genau beschreibt. Hierfür werden keine Zusatzinformationen benötigt. Jedoch wird in Abhängigkeit von der mathematischen Funktion bzw. deren Parameteranzahl eine verhältnismäßig hohe Anzahl von Messwerten erforderlich [GÜNTHER 2003].

Empirische Evolutionsmodelle beschreiben das Wachstum in Form einer Messgröße in Abhängigkeit von der täglich akkumulierten Temperatur mit Hilfe von vier oder mehr Parametern [BARET 1986, WERKER & JAGGARD 1997]. Sie setzen sich aus den relativen Raten des Wachstums und der Seneszenz zusammen. Die Bestimmung der Parameter bedarf einer geringeren Messwertanzahl.

Wachstumsmodelle simulieren relevante, an der Pflanzenentwicklung beteiligte Prozesse. Hierbei kann zwischen detaillierten Modellen für spezielle Fruchtarten (z. B. CERES-WHEAT [RITCHIE & OTTER 1985], ROTASK [JONGSCHAAP 1997], ORYZA2000 [BOUMAN et al. 2001]) und schlagbezogenen oder regionalen Anwendungen als Bestandteil in Modellen zur Beschreibung von Wasser- und Stoffkreisläufen (z. B. EPIC, SWIM) unterschieden werden. Je nach Detaillierungsgrad können sie eine hohe Anzahl von Eingangsparametern erfordern. Die täglichen Werte des gesuchten Vegetationsparameters werden in diesem Fall durch Kalibration des Modells an den Fernerkundungsdaten ermittelt. Von Vorteil ist hierbei, dass der gesuchte Parameter auch bei wenigen Fernerkundungsmesswerten bereitgestellt werden kann.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit stehen je nach Fruchtart bis zu 3 Messwerte aus Fernerkundungsdaten zur Verfügung. Damit kann eine Wachstumsfunktion oder ein empirisches Evolutionsmodell nicht verwendet werden, da deren Parameter nicht bestimmbar sind. Wachstumsmodelle sind jedoch mit einem zusätzlichen Modellierungsaufwand und Eingangsparametern verbunden. Zur Reduzierung dieses Aufwands wird das im Soil and Water Integrated Model (SWIM) implementierte Wachstumsmodell [KRYSAKOVA et al. 1999, KRYSAKOVA et al. 2000] verwendet. Es bietet die Vorteile, dass es für möglichst viele Fruchtarten nutzbar ist und innerhalb Deutschlands schon eingesetzt wurde.

4.4.2 Das vereinfachte Wachstumsmodell von SWIM

SWIM ermöglicht eine kontinuierliche Modellierung von hydrologischen Prozessen, Vegetation, Erosion sowie des Stickstoff- und Phosphorkreislaufes in meso- bis makroskaligen Flusseinzugsgebieten (100 – 10.000 km²) in Europa [KRYSANOVA et al. 2000]. Es basiert größtenteils auf dem Modell Soil and Water Assessment Tool (SWAT), das zur Vorhersage des Einflusses von Landnutzungspraktiken auf den Wasser- und Stoffkreislauf in Flusseinzugsgebieten entwickelt wurde [NEITSCH et al. 2001].

Das Pflanzenwachstum wird in SWIM wie bei SWAT nach einem vereinfachten Ansatz von EPIC modelliert. Dieses Wachstumsmodell lässt sich für natürliche Vegetation und landwirtschaftliche Früchte einsetzen. Die phänologische Entwicklung wird auf der Basis von täglich akkumulierten Wärmeeinheiten (*heat units*) simuliert. Wie bei den meisten Wachstumsmodellen wird der LAI als Maß für die Vegetationsmenge verwendet. Aus den *heat units* bzw. ihrem Anteil an den potenziell bis zur Reife erreichbaren *heat units* wird der Anteil am maximalen LAI berechnet. Daraus wird wiederum der tägliche LAI bestimmt. Die limitierenden Faktoren der Pflanzenentwicklung werden durch Anpassung des aktuellen LAI auf Temperatur-, Wasser- und Nährstoffstress umgesetzt. Die Berechnung der potenziellen Biomasseproduktion erfolgt nach einem Ansatz von MONTEITH [1977], für den die interzeptierte, photosynthetisch aktive Strahlung nach dem Gesetz von Beer [MONSI & SAEKI 1953] ermittelt wird. Des Weiteren werden die Wurzelentwicklung und der Ernteertrag modelliert. Mit dem Modell wird eine pflanzenspezifische Parameterdatei bereitgestellt, die auf langjähriger Modellierungserfahrung basiert.

Da in der vorliegenden Arbeit der Bedeckungsgrad interpoliert werden soll, wird von dem Wachstumsmodell nur der Teil benötigt, der den täglichen LAI berechnet. Zudem wird die Anpassung mit Hilfe der Stressfaktoren auf den Temperaturstress reduziert. Dadurch wird erreicht, dass sich der zusätzliche Eingangsparameternaufwand auf die tägliche, durchschnittliche Tagestemperatur beschränkt und eine Modellierung des Wasser- und Nährstoffkreislaufes (N, P) nicht erforderlich wird. Die resultierende LAI-Kurve ist als potenzielle Entwicklung zu verstehen, die durch Fernerkundungsdaten kalibriert wird. Daher ist eine Anwendung des reduzierten Modells für sich selbst nur bedingt möglich. Dieser Ansatz stellt somit eine Übergangsform zwischen empirischem Evolutionsmodell und Wachstumsmodell dar. Er wird im Weiteren als vereinfachtes Wachstumsmodell bezeichnet.

Eine Beschreibung der mathematischen Beziehungen erfolgt in Anhang III. Der Verlauf der modellierten LAI-Kurve wird durch fünf Parameter definiert, die in Abb. 4.2 (S. 30) dargestellt werden. Weiterhin fließen die Basistemperatur und die optimale Temperatur in die Modellierung ein. Diese Größen beschreiben die für das Wachstum erforderliche minimale Temperatur und die Temperatur für ein maximales Wachstum. In Anhang III Tab. III.1 werden die in der Arbeit verwendeten Parameter aufgelistet.

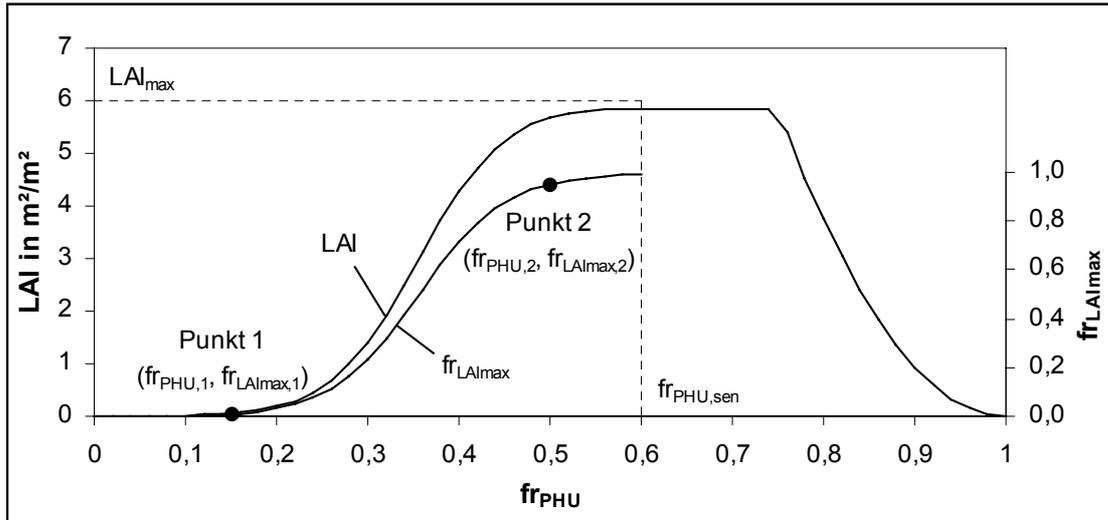


Abb. 4.2: Blattflächenindex (LAI) und Anteil am maximalen Blattflächenindex ($fr_{LAI_{max}}$) als Funktion des Anteils an der Wachstumsperiode (PHU potenziell bis zur Reife erreichte Wärmeeinheiten, $fr_{PHU, sen}$ Anteil an PHU zu Beginn der Seneszenz, Punkt 1 und Punkt 2 zur Berechnung der Formparameter l_1 und l_2).

5 Untersuchungsgebiet und Datengrundlage

5.1 Einführung in das Untersuchungsgebiet

In der folgenden Beschreibung des Untersuchungsgebietes wird auf die wesentlichen Züge der naturräumlichen Ausstattung eingegangen, die in engem Zusammenhang mit der Arbeit stehen. Der Inhalt dieses Abschnitts basiert auf Ausführungen von BERNHARDT et al. [1986], RUCHHOLZ [1991], VON BUDER & STEINERT [2000], MICHAEL et al. [2000] und VON WERNER [2000].

5.1.1 Lage

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im Freistaat Sachsen. Es ist Bestandteil des Flusseinzugsgebietes der Jahna, die bei Riesa in die Elbe mündet (Abb. 5.1a,b). Das Untersuchungsgebiet umfasst die ca. 15 km² große Fläche des Einzugsgebietes des Mehltheuer Baches.

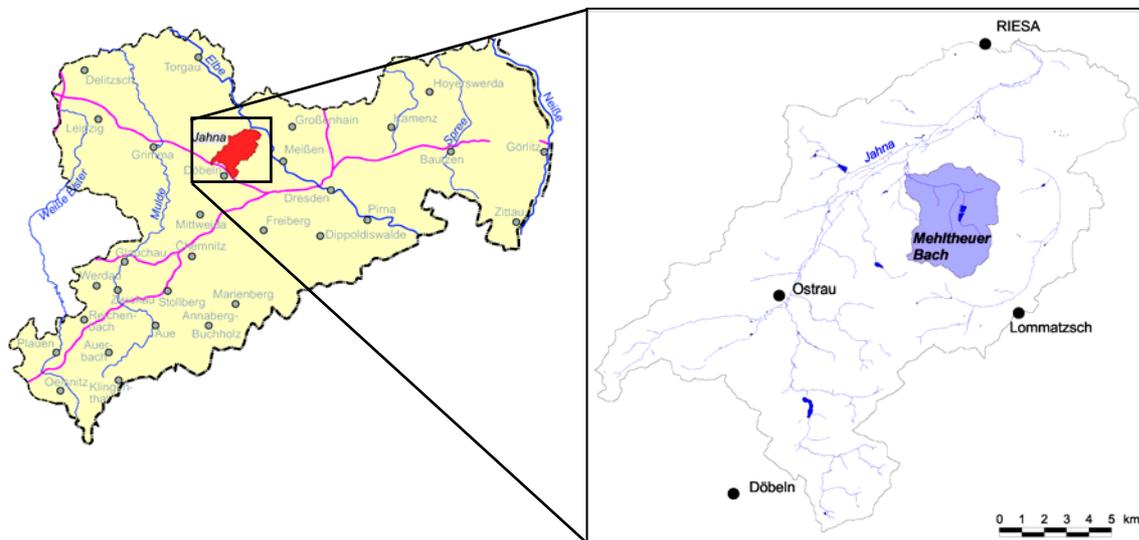


Abb. 5.1: Lage des Untersuchungsgebietes Mehltheuer Bach [VON WERNER 2000]:
 a) Lage des Einzugsgebietes der Jahna im Freistaat Sachsen (li.),
 b) Lage des Mehltheuer Baches im Einzugsgebiet der Jahna (re.).

Nach der naturräumlichen Gliederung [BERNHARDT et al. 1986] gehört das Gebiet dem *Mittelsächsischen Lößhügelland* und dem *Nordsächsischen Platten- und Hügelland* an (Abb. 5.2), die ihrerseits Bestandteil des *Sächsischen Lößgefildes*¹⁷ sind. Deren Abgrenzung erfolgt durch eine 30 - 50 m hohe Landstufe, die in West-Ost-Richtung im Bereich des Untersuchungsgebietes in der Nähe der Orte Gleina, Striegnitz und Lautzschen verläuft. Sie wird als *Lößrandstufe* oder *Nordsächsische Hügellandstufe* bezeichnet [HAASE 1995].

Die mittleren Höhen des Untersuchungsgebietes liegen bei etwa 160-200 m ü. NN.

¹⁷ Der Begriff Gefilde bezeichnet das vor allem lößbeeinflusste, in den Kernbereichen auch lößbestimmte Land. Gleichzeitig steht Gefilde auch für Altsiedelland, das durch weites Vorherrschen des Ackerbaus und starkes Zurücktreten von Waldarealen geprägt ist [HAASE 1995, S. 70].



Abb. 5.2: Naturräume des Freistaates Sachsen und seiner Umgebung (Ausschnitt) [nach BERNHARDT et al. 1986, RICHTER 1995].

Südlich der *Lößbrandstufe* zeigen sich zahlreiche kleine Kerbtäler mit steilen Flanken. Die stärksten Hangneigungen treten hier bei der Ortschaft Trogen (bis über 11°) auf. Während der mittlere Teil des Einzugsgebietes relativ flach ist, findet man im Nordteil wiederum stärkere Hangneigungen (bis zu 12°) (Anhang IV Abb. IV.1-8).

5.1.2 Geologie und Geomorphologie

Morphogenetisch gehört das Untersuchungsgebiet zum *Altmoränenland*. Die Prägung des glazialen Formenschatzes erfolgte durch die älteren (präweichselzeitlichen) Inlandeisddecken in der Elster- und Saaleeiszeit. In den späteren Eiszeiten unterlag das nun eisfrei gebliebene Altmoränenland einer altersbedingt unterschiedlich intensiven Überformung, die teilweise bis zur völligen Zerstörung des glazialen Reliefs führte.

Der Bereich des *Sächsischen Lößgefildes* ist durch eine periglazial geprägte Oberfläche gekennzeichnet. Diese wird in der Weichseleiszeit vor allem durch die jüngste äolische Sedimentdecke der Löße und Sandlöße charakterisiert. Das *Nordsächsische Platten- und Hügelland* gehört dem *Sandlößgürtel* an, der eine geringmächtige, sandig-kiesige Lößdecke (Kryoturbatlöß) aufweist. Diese befindet sich auf einer Verzahnung von flachwelligen Moränenplatten und hügeligen Grundgebirgsdurchragungen (vornehmlich Porphyrvarietäten). Die Moränenplatten werden von glazialen Sedimenten wie Geschiebemergel, -lehme, Schmelzwassersedimente und fluvialen Schotterkörpern aufgebaut [HAASE 1995]. An der Randstufe grenzt das *Sächsische Lößhügelland* mit einer unvermittelt starken Mächtigkeitszunahme der Löße an, das zum Kernbereich des Sächsischen Lößgefildes gehört. Seine Lößdecke ist nahezu durchgängig mehrere Meter mächtig. In der *Lommatzsch-Pflege*¹⁸ erreicht sie bis über 10 m. Dieses Gebiet ist reliefschwach und durch Flachhänge und Platten gekennzeichnet.

Während des Holozäns nimmt der Mensch zunehmend Einfluss auf die pedologische, geologische und geomorphologische Entwicklung. So wird die Ausbildung des Auenlehms neben der natürlichen Entwicklung durch warmzeitliche Flüsse vorrangig durch erosionsfördernde Maßnahmen wie die Vernichtung von Vegetation durch Rodungen verursacht.

¹⁸ Die *Lommatzsch-Pflege* bezeichnet die Region um die Stadt Lommatzsch, die aufgrund der hohen Ertragsfähigkeit der Böden und der günstigen klimatischen Verhältnisse stark ackerbaulich geprägt ist [URL: <http://www.lra-meissen.de/uallianz.php>].

5.1.3 Klima und Hydrologie

Der das Untersuchungsgebiet einschließende Bereich des *Sächsischen Lößfeldes* unterliegt vor allem kleinräumigen Luv- und Lee-Wirkungen, die zu beachtlichen Unterschieden in der Jahresniederschlagssumme führen können. Speziell das Elbe-Jahna-Gebiet um Riesa und Lommatzsch wird von HAASE [1995] als eine „Trockeninsel“ mit Werten um 550 - 600 mm dargestellt. Die Jahresmitteltemperatur des Bearbeitungsgebietes liegt bei etwa 8,2 - 8,9 °C. Charakteristisch ist die Windoffenheit, die vor allem im Winter verstärkt Deflation von Bodenteilchen und Schneeverwehungen begünstigt. Dies führt lokal zu einer ungleichen Feuchteanreicherung im Boden und zur Verstärkung der Bodenerosion in der Auftauphase im Frühjahr. Das Abflussverhalten der Jahna, in die der Mehlftheuer Bach im Mittellauf bei Plotitz mündet, ist durch ein Maximum im Februar und März sowie ein Minimum im September und Oktober gekennzeichnet. Bedingt durch Starkregenereignisse treten häufig im Hochsommer erhöhte Abflussmengen auf.

5.1.4 Bodenkundliche Aspekte

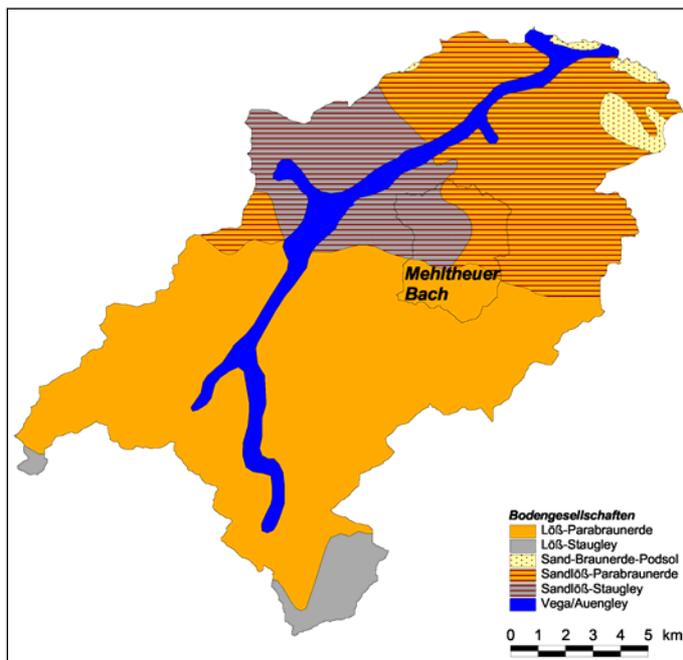


Abb. 5.3: Bodengesellschaften im Einzugsgebiet der Jahna (Ausschnitt aus Übersichtskarte der Böden des Freistaates Sachsen 1:400.000) [VON WERNER

Der nördliche Teil des Mehlftheuer-Bach-Gebietes ist durch geringmächtige Deckschichten aus Sandlöss gekennzeichnet. Er gliedert sich laut ÜBERSICHTSKARTE DER BÖDEN DES FREISTAATES SACHSEN 1:400.000 (BÜK) [1993] in einen westlichen Teil mit Merkmalen der Stauvernässung (Staugley) und in einen östlichen Teil mit Tonverlagerungen (Parabraunerden) (Abb. 5.3). Im Süden entwickelten sich auf der mächtigen Lössdecke Parabraunerden.

Im Untersuchungsgebiet wurden Bodenproben zur Korngrößenanalyse entnommen (s. 5.2.1). Hiernach findet man im Nordwesten mittel bis stark schluffige Sande (Su3, Su4) [Bodenarten nach KA 4 1994]. Dem schließt sich ein Übergangsbereich mit schluffig-lehmigen Sand (Slu) und sandigen Schluffen (Us) in östlicher Richtung an. Hieran grenzen im nordöstlichen Teil des Gebietes schwach tonigen Schluffe (Ut2), obwohl nach der BÜK Sandlössparabraunerden vorliegen. Im Süden dominieren schwach bis stark tonige Schluffe (Ut2, Ut3, Ut4). Nach den Analysen von MICHAEL et al. [2000] liegt deren Nordgrenze etwas nördlicher als in der BÜK.

5.1.5 Aktuelle Landnutzung

Die Landnutzung für den Untersuchungszeitraum im Jahr 1999 ist in Abb. 5.4 dargestellt. Seit der Inkulturnahme waren die Löße im *Gefilde* in erhöhtem Maße der Erosion ausgesetzt. Diese Prozesse nahmen mit der Intensivierung des Ackerbaus zu, die durch Überackerung von Grünlandstreifen, Entfernung von Gehölzgruppen und Vergrößerung der Schläge eine stark ausgeräumte Landschaft hinterließ (s. Anhang IV, Abb. IV.5). Die heutige Landnutzung besteht nahezu ausschließlich, besonders in der *Lommatzscher Pflege*, in einem intensiven Acker- und Feldgemüseanbau. Es dominieren Weizen, Gerste, Zuckerrüben und Feldfutterkulturen in den Fruchtfolgen. Nach Abb. 5.4 werden ca. 89 % der Flächen ackerbaulich genutzt. Sichtbar gering ist der Anteil von Waldflächen und Gehölzstreifen mit weniger als 2 % [VON WERNER 2000].

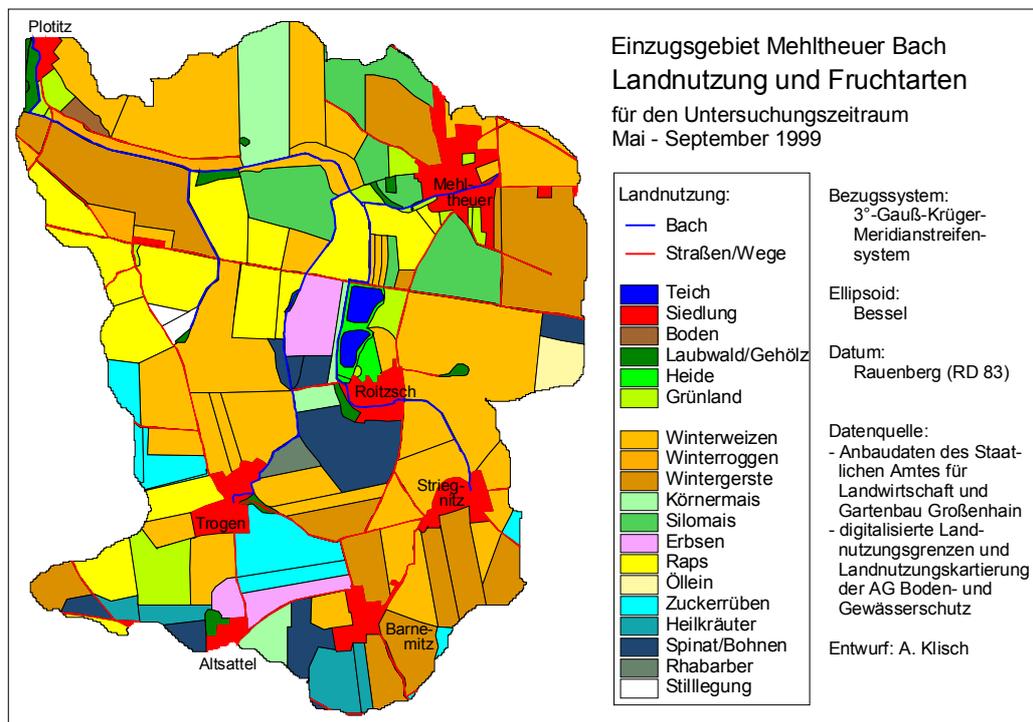


Abb. 5.4: Landnutzung des Einzugsgebietes Mehltheuer Bach im Untersuchungsjahr 1999.

5.2 Datengrundlage

5.2.1 Terrestrische Messungen und Simulationen

Die terrestrischen Parametererhebungen und Simulationsrechnungen wurden durch die AG Boden- und Gewässerschutz (A. Michael, M. von Werner, J. Schmidt) als Beitrag zum Expo-Projekt „Entwicklung eines Informationssystems zur Erosionsminderung im Wassereinzugsgebiet der Jahna – einem Nebenfluss der Elbe“ durchgeführt. Deren Ergebnisse wurden freundlicherweise für die vorliegende Arbeit zur Verfügung gestellt. Die Ausführungen der folgenden Abschnitte stützen sich auf die in diesem Zusammenhang angefertigten Berichte [MICHAEL et al. 2000, VON WERNER 2000].

5.2.1.1 Parametererhebung

Kartengrundlagen

Das DGM (Rasterdaten) wurde aus digitalisierten Höhenlinien der Topographischen Karte 1:10.000 (N) des Landesvermessungsamtes Sachsen und nach anschließender Interpolation erstellt [NESTLER 2000]. Die Ableitung der Landnutzungsgrenzen (Vektor- und Rasterdaten) erfolgte auf Grundlage von Orthophotos im Maßstab 1:10.000 des Landesvermessungsamtes Sachsen durch NESTLER [2000]. Das Lage-Bezugssystem beider Karten ist das 3°-Gauß-Krüger-Meridianstreifensystem bezogen auf das Bessel-Ellipsoid mit dem Datum Rauenberg (RD 83). Alle weiteren Eingangsdaten und Simulationsrechnungen liegen diesem Koordinatensystem zu Grunde. Die Rasterbilder und die Simulationen weisen eine räumliche Auflösung von 10 m·10 m auf. Der Ausschnitt umfasst den Bereich folgender Koordinaten:

- Rechtswert: Y = 4.586.520 m - 4.590.880 m (436 Spalten) und
- Hochwert: X = 5.675.720 m - 5.681.040 m (532 Reihen).

Bewirtschaftungsdaten

Die Bewirtschaftungsdaten wurden durch das Staatliche Amt für Landwirtschaft und Gartenbau Großenhain für die Jahre 1998, 1999, 2000 bereitgestellt. Sie enthalten Angaben zur Bodenbearbeitung und Mulchung, zu Fruchtarten sowie Aussaat- und Ernteterminen. Diese Daten wurden durch eine Kartierung der Landnutzung zum 03.04.1999 untersetzt. Des Weiteren standen zusätzliche Informationen zum Anbau und zur Düngung sowie für einige Schläge (Winterweizen, Wintergerste, Raps, Zuckerrüben, Bohnen) Ertragsangaben von Landwirten zur Verfügung [GRÜBLER 2002, SCHWÄBE 2002, HARZ 2002].

Bodenparameter

Zur Bestimmung der Korngrößenverteilung und des Gehaltes an organischem Kohlenstoff wurden 17 Bodenproben im Einzugsgebiet Mehlteuer Bach entnommen [s. MICHAEL et al. 2000], deren Lage basierend auf der BÜK und den Geländebeziehungen vor Ort festgelegt wurde. Die sich daraus ergebenden Bodenarten nach KA 4 [1994] wurden bereits unter 5.1.4 aufgeführt. Die übrigen Bodenparameter (s. 3.4.2) wurden aus dem Parameterkatalog Sachsen¹⁹ [MICHAEL et al. 1996] nach den Kriterien Termin, Korngrößenverteilung und organischer Kohlenstoffgehalt am nächstgelegenen Punkt sowie Fruchtart und Bearbeitungsweise bestimmt. Diese Parameter wurden schlagbezogen in den Präprozessor eingegeben (s. 3.4.2).

Niederschlagsdaten

Als Niederschlagsparameter (Intensität und Dauer) wurde ein natürliches Referenzjahr mit einem durchschnittlichen Starkregengeschehen von Intensitäten²⁰ ab 0,1 mm/min des Sommerhalbjahres (Mai - September) in einer zeitlichen Auflösung von 10 min verwendet. Das Referenzjahr wurde durch ein Gutachten des DWD [DWD 1994] in Anlehnung an die naturräumliche Gliederung für acht Subregionen in Sachsen ausgewiesen, deren Lage in Anhang V Abb. V.1 dargestellt ist. Das Einzugsgebiet des Mehlteuer Baches befindet

¹⁹ Parameterkatalog Sachsen: Auf der Basis von Beregnungsversuchen wurden Leitwerte für die Eingangsparemeter im Raum Sachsen für verschiedene Böden zusammengestellt.

²⁰ Die Grenze von 0,1 mm/min für die Niederschlagsintensität wurde durch die Infiltrationsrate bestimmt. Bei der Durchführung von 126 Beregnungsversuchen und zahlreicher Infiltrationsversuchen wurden 0,1 mm/min als die geringste Infiltrationsrate ermittelt. Hiernach können Starkregen ab dieser Intensität Bodenerosion auslösen [MICHAEL 2000].

sich in der Subregion 3 *Dresdener Elbtalgebiet*. Hierfür wurden 29 Niederschlagsereignisse angegeben. Ihre Eigenschaften sind in Tab. V.1 zusammengefasst. Detaillierte Informationen zur Ableitung des Referenzjahres sind in MICHAEL [2000] und MICHAEL et al. [1996] zu finden.

5.2.1.2 Simulationsergebnisse

Die Erosionssimulationen wurden für das definierte Referenzjahr mit 29 Niederschlagsereignissen für die Bewirtschaftung 1999 bei einer Rasterauflösung von 10 m durchgeführt. In Abb. 5.5 wird exemplarisch für ein Ereignis eine daraus erstellte Erosionskarte gezeigt.

Erosionsflächen werden in gelben bis roten Farben und Depositionsflächen in hell- bis dunkelgrünen Farben dargestellt. Weiße Flächen sind dadurch gekennzeichnet, dass gleichviel Erosion und Deposition oder keines von beidem stattfand. Unterschiede ergeben sich insbes. durch die Verteilung der Bodenarten und der Landnutzung/Bewirtschaftung. Im Gegensatz zu dem nordwestlich gelegenen Sandlößgebiet wird vor allem auf den Lößböden mit höheren Schluffgehalten eine verstärkte Erosion sichtbar. Insgesamt liegen aufgrund der starken Ackerdominanz wenige Depositionsflächen vor, da diese durch eine geringere Rauigkeit und eine nur zeitweise Vegetationsbedeckung charakterisiert sind. Depositionsflächen beschränken sich auf Grünstreifen oder Randgebiete von Siedlungen und Waldflächen [MICHAEL et al. 2000].

Der Gebietsaustrag für das simulierte Referenzjahr beträgt als Summenwert aller Ereignisse 3,68 t/ha. Die Gebietsausträge und die punktbezogenen Ausgabegrößen für fünf beispielhafte Punkte (Abb. 5.5) stehen zur Verfügung. Sie werden zum späteren Vergleich herangezogen. Die Punkte wurden im Rahmen des Expo-Projektes als Messstellen festgelegt und befinden sich entlang des Gerinneabflusses.

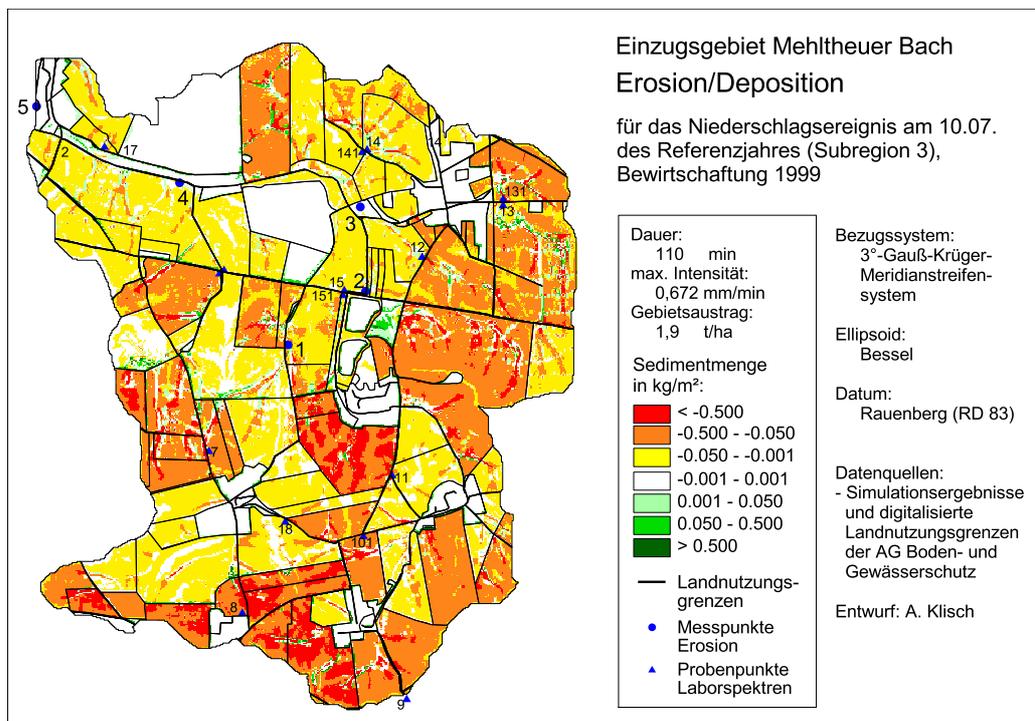


Abb. 5.5: Erosionsprognose im Untersuchungsgebiet Mehltheuer Bach für das Ereignis 10.07. [nach MICHAEL et al. 2000].

5.2.2 Die multispektralen TM-Daten

In der vorliegenden Arbeit werden Datensätze des Sensors Thematic Mapper (TM) verwendet, die vom 1984 gestarteten, amerikanischen Satelliten Landsat-5 stammen. Dieser Satellit bewegt sich auf einer polaren, sonnensynchronen Bahn mit einer Umlaufzeit von 99 Minuten und einer Wiederholrate von 16 Tagen [KRAMER 1996]. Die Lageindizierung der Satellitenszenen erfolgt durch Umlaufbahnen (paths) und Reihen (rows) im *Worldwide Reference System*²¹ (WRS). Detaillierte Angaben zu Landsat-5 sind u. a. in FREDEN & GORDON [1983], KRONBERG [1985] und LILLESAND & KIEFER [1994] zu entnehmen. Auf deren Ausführungen basieren gleichzeitig die folgenden Abschnitte.

5.2.2.1 Beschreibung des Aufnahmesystems

Der Sensor TM ist ein optisch-mechanischer Multispektral-Scanner, der die Aufnahme von sieben Kanälen mit einer räumlichen Auflösung von 30 m bzw. 120 m (Kanal 6), einer Schwadbreite von 185 km und einer radiometrischen Auflösung von 8 bit ermöglicht (Tab. 5.1). Die vorliegenden Daten sind systematisch radiometrisch und geometrisch korrigiert. Die radiometrische Korrektur beinhaltet z. B. die Verbesserung von Streifen oder Zeilensprüngen und die Korrektur des Detektorverhaltens. Bei der geometrischen Korrektur werden durch folgende Größen verursachte Verzerrungen berücksichtigt [EURIMAGE 2002]:

Tab. 5.1: Kanäle der Sensors Thematic Mapper [nach KRAMER 1996].

Kanal	Spektraler Bereich in μm	
1	0,45 - 0,52	Blau
2	0,52 - 0,60	Grün
3	0,63 - 0,69	Rot
4	0,76 - 0,90	NIR
5	1,55 - 1,75	MIR
7	2,08 - 2,35	MIR
6	10,4 - 12,5	TIR

• Sensor (z. B. Schwankungen, Panoramaverzerrung),
 • Satellit (z. B. Höhenabweichungen) und
 • Erde (z. B. Rotation, Krümmung).

Nach der systematischen Korrektur fand ein Resampling der Datensätze mit dem Nearest-Neighbour-Verfahren statt.

5.2.2.2 Beschreibung der multitemporalen Datensätze

In dieser Arbeit werden Ausschnitte aus drei Subszenen (50 km·50 km) bearbeitet. Die Aufnahmen erfolgten am 13.03.1999 (Szene 1), am 30.04.1999 (Szene 2) und am 19.07.1999 (Szene 3). Nach dem WRS gehören sie der Umlaufbahn 193 und der Reihe 24 an.

Die Szenen wurden so gewählt, dass zwei von ihnen nahe zum oder direkt in den Zeitraum der Niederschlagsereignisse des Referenzjahres fallen und somit das Reflexionsvermögen der Fruchtarten hierfür erfassen. Gleichzeitig wird für die Berechnung des LAI nach dem CLAIR-Modell (s. 4.3.2, S. 25) das Reflexionsvermögen des unbedeckten Bodens vor der Saat oder nach der Ernte benötigt. Dazu sollte zu den drei Zeitpunkten ein möglichst großer Teil der Flächen in unbedecktem Zustand erfasst werden. Die vorliegenden Szenen sind bis auf Szene 1 nahezu wolkenfrei. In dieser treten vereinzelt Wolken

²¹ *Worldwide Reference System*: Es besteht aus 233 Umlaufbahnen, die von Ost (001) nach West (233) nummeriert sind, wobei die Umlaufbahn 001 den Äquator bei 64° 36' w. L. kreuzt. Die 246 Reihen sind so angelegt, dass Reihe 60 mit dem Äquator bei der absteigenden Bahn übereinstimmt [LILLESAND & KIEFER 1994].

außerhalb des Untersuchungsgebietes und leichter Dunst auf. In Kanal 4 der Szene 2 befindet sich im Ausschnitt des Untersuchungsgebietes ein fehlerhafter Streifenabschnitt.

5.2.2.3 Datenaufbereitung

Vorverarbeitung

Die fehlerhaften Pixel in Szene 2 wurden durch Bildung des gleitenden Mittelwertes korrigiert [PAVLIDIS 1990]. Da sie entlang einer Zeile verlaufen, wurden ihre Grauwerte in Kanal 4 aus dem Mittelwert der ober- und unterhalb gelegenen Nachbarn berechnet.

Atmosphärenkorrektur

Eine multitemporale, quantitative Auswertung von Satellitendaten eines Sensors setzt voraus [RICHTER 1996], dass:

- die zu unterschiedlichen Jahreszeiten aufgenommenen Datensätze vergleichbar gemacht werden, in dem der Einfluss der Atmosphäre und des Sonnenstandes reduziert wird,
- die vorliegenden Grauwerte (Digital Numbers [DN]) in physikalische Größen (z. B. Reflexionsvermögen) umgerechnet werden, was gleichzeitig den Vergleich mit am Boden gemessenen Daten ermöglicht.

Die Atmosphärenkorrektur der Szenen führte R. Richter (DLR Oberpfaffenhofen) mit dem Programm ATCOR2 durch, das von ihm für hochauflösende Sensoren mit kleinen Schwadwinkeln entwickelt wurde [RICHTER 1996]. Es basiert auf einem Atmosphärenkatalog, der atmosphärische Korrekturfunktionen enthält, die mit den Modellen MODTRAN-2 [BERK et al. 1989] und SENSAT-5 (Sensor-Atmosphere-Target) [RICHTER 1994] erstellt wurden. ATCOR2 geht davon aus, dass sich das Gelände aus horizontalen Flächen von Lambertreflektoren zusammensetzt. Es werden Überstrahlungseffekte der Umgebung berücksichtigt.

In einem interaktiven Teil werden Referenzflächen, Dunst und Wolken in der Szene ausgewiesen sowie eine der verfügbaren Atmosphären festgelegt. Der anschließende automatisierte Teil erstellt ein Sichtweitenbild, entfernt Dunst und berechnet das Reflexionsvermögen bzw. die Oberflächenstrahlungstemperatur (Kanal 6). Die für die drei Szenen verwendeten Parameter sind in Tab. 5.2 zusammengefasst.

Tab. 5.2: Eingabeparameter für die Atmosphärenkorrektur mit ATCOR2.

Datum	Standardatmosphäre	Aerosoltyp	Sichtweite/km	Sonnenzenitwinkel/1°
13.03.1999	Herbst (Frühjahr)	ländlich	30	59
30.04.1999	Herbst (Frühjahr)	ländlich	60	41
19.07.1999	Sommer für mittlere Breiten	ländlich	55	36

Geometrische Korrektur

Die geometrische Korrektur und das anschließende Resampling erfolgte mit der Software ERDAS Imagine (Leica Geosystems). Hierbei wurden zwei Vorgehensweisen untersucht. Die Szenen wurden zunächst auf die im Internet erhältlichen DOI-10M²²-Daten mittels eines Polynoms zweiten Grades und ca. 40 Passpunkten entzerrt. Es zeigen sich nach

²² DOI-10M (Digital Orthorectified Imagery 10 m): Diese Daten sind orthorektifizierte SPOT-Bilder ((C) CNES/SPOT Image 1992-1994) in einer Auflösung von 10 m. Sie werden von der National Imagery and Mapping Agency (NIMA) bereitgestellt [URL: <http://geoengine.nima.mil>].

der Projektion in das Koordinatensystem der digitalen Landnutzungskarte und dem anschließenden Resampling Abweichungen zu den Grenzen von bis zu über zwei Pixel á 30 m. Diese treten ungerichtet im gesamten Untersuchungsgebiet verschieden stark auf.

Um die vorhandenen Parameter und Simulationsergebnisse (vgl. 5.2.1) verwenden zu können, müssen die Satellitendaten auf diese geometrisch angepasst sein. Deshalb wurden die Szenen schließlich im Bereich des Untersuchungsgebietes auf die digitalen Landnutzungsgrenzen entzerrt. Aufgrund von mangelnden Passpunkten, der kleinen Gebietsgröße und der unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkte erfolgte die Entzerrung mit einem Polynom ersten Grades und acht einheitlichen Passpunkten für die drei Szenen. Die Genauigkeit lag für alle Datensätze bei einem Root Mean Square Error (RMS) von unter 0,5 Pixel. Das Resampling wurde mit der Methode Nearest Neighbour durchgeführt, um die Werte in Hinblick auf die quantitative Auswertung möglichst wenig zu verändern [LILLSAND & KIEFER 1994]. Die Pixel wurden auf das Raster des DGM und der Landnutzungsgrenzen angepasst (s. 5.2.1.1). Trotz dieser Vorgehensweise zeigen sich Restdifferenzen zwischen den Szenen und den Landnutzungsgrenzen, die sich bei der Berechnung des LAI am Grenzverlauf von verschiedenen Landnutzungen als störend erweisen.

5.2.3 Laborspektren

Um eine Referenzgrundlage zur Abschätzung des Bodeneinflusses auf die LAI-Bestimmung zu haben, wurden am 20./21.02.2002 17 Geländeprobe (s. Abb. 5.5, S. 36) in der Nähe der bereits erwähnten Bodenprobenpunkte entnommen und deren Spektralverhalten im Labor bestimmt. Mit Hilfe dieser Messungen sollen für verschiedene Bodenarten und -feuchten die Kanäle TM-3 und TM-4 zur Berechnung des C-Wertes (vgl. 4.3.1, S. 22) simuliert werden. Für das Jahr 1999 liegen im Untersuchungszeitraum zeitgleich zu den Fernerkundungsdaten keine aktuellen in-situ-Messungen bezüglich des Bestandes (LAI, Bedeckungsgrad) oder spektrale Bodenmessungen vor.

Die spektralen Messungen wurden durch A. Cihlar (DLR Oberpfaffenhofen) mit dem GER 3700 Spektroradiometer (Geophysical Environmental Research Corp.) durchgeführt. Das GER 3700 deckt den Wellenlängenbereich vom VIS bis zum MIR (0,4-2,5 μm) mit 704 Kanälen ab [SCHAEPMAN 1998]. Die Proben wurden mit einer Halogenlampe (1.000 Watt) unter einem Zenitwinkel von 60° angeleuchtet²³. Die Messungen erfolgten aus einer Höhe von ca. 0,80 m mit der Standardoptik (Öffnungswinkel 2°). Als Weißstandard wurde Spektralón®²⁴ verwendet. Die Bodenproben wurden im Zustand der Entnahme (*org*), in luftgetrocknetem Zustand nach 11 Tagen (*lutro*), in luftgetrocknetem Zustand nach 14 Tagen (*lutro1*) und in angefeuchtetem Zustand (*feucht*) spektral erfasst. An jeder Probe wurden im jeweiligen Zustand meist zwei bis drei Messungen aus verschiedenen Richtungen bzw. eine Messung bei *lutro1* vorgenommen. Die Mehrfachmessungen wurden gemittelt. In Abb. 5.6a,b werden exemplarisch die Spektren der Bodenproben 101 und 12 dargestellt.

²³ Der Zenitwinkel von 60° entspricht einem Sonnenzenitwinkel, der typisch für europäische Breiten für diese Jahreszeit ist [CIHLAR 2002].

²⁴ Spektralón ist ein Reflexionsstandard aus thermoplastischem Material, der im VIS- und NIR-Bereich mit einem hohen Reflexionsvermögen (> 99 %) diffus reflektiert [Firma labsphere, USA, URL: <http://www.labsphere.com/products/products.asp?CID=37&PID=1.125>].

Da Boden mit abnehmendem Feuchtegehalt meist stärker reflektiert bzw. heller erscheint [IRONS et al. 1989], müsste sich je Probe entsprechend der Zustände die Reihenfolge *feucht, org, lutro, lutro1* einstellen. Da sich bei einigen Proben diese Reihenfolge nicht zeigt, wurden diese Spektren einer eingehenden Untersuchung unterzogen. Dabei konnte die erhöhte Abweichung auf einen Defekt am Gerät zurückgeführt werden. Aus diesem Grund wurden die fehlerhaften Spektren aus der weiteren Bearbeitung ausgeschlossen (z. B. Abb. 5.6b). Die auftretenden Detektorsprünge bei 1,0 μm konnten vernachlässigt werden (Abb. 5.6b), da die Spektren im Bereich 0,63 - 0,9 μm ausgewertet werden. Um das Reflexionsvermögen des Bodens auf Grundlage der Spektren analog zu den Satellitendaten simulieren zu können, wurden diese in der Software ENVI (Research Systems Inc.) auf die Kanäle TM-3 und TM-4 umgerechnet (Spektrales Resampling).

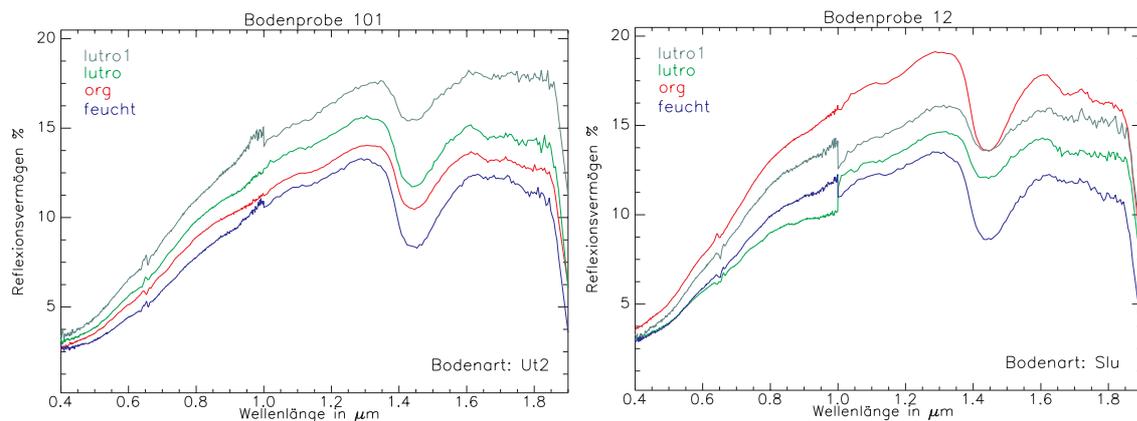


Abb. 5.6: Spektrales Reflexionsvermögen a) der Bodenprobe 101 (li.) und b) der Bodenprobe 12 (re.).

5.2.4 Temperaturdaten

Die Simulation des LAI mit Hilfe des Wachstumsmodells (s. 6.2.4) benötigt als Eingangsgrößen die täglichen durchschnittlichen Temperaturen im Untersuchungsgebiet. Ein solcher Datensatz der Station Oschatz wurde für die Jahre 1998/1999 vom DWD verwendet. Die Temperaturen sind in Anhang V Tab. V.2 aufgelistet.

6 Bereitstellung der Parameter und Simulationsrechnungen

6.1 Konzeption

Im folgenden Abschnitt wird ein Überblick über das Konzept zur Durchführung der vorliegenden Arbeit gegeben. Zu dessen Veranschaulichung wird der vereinfachte Daten- und Informationsfluss in Abb. 6.1 gezeigt.

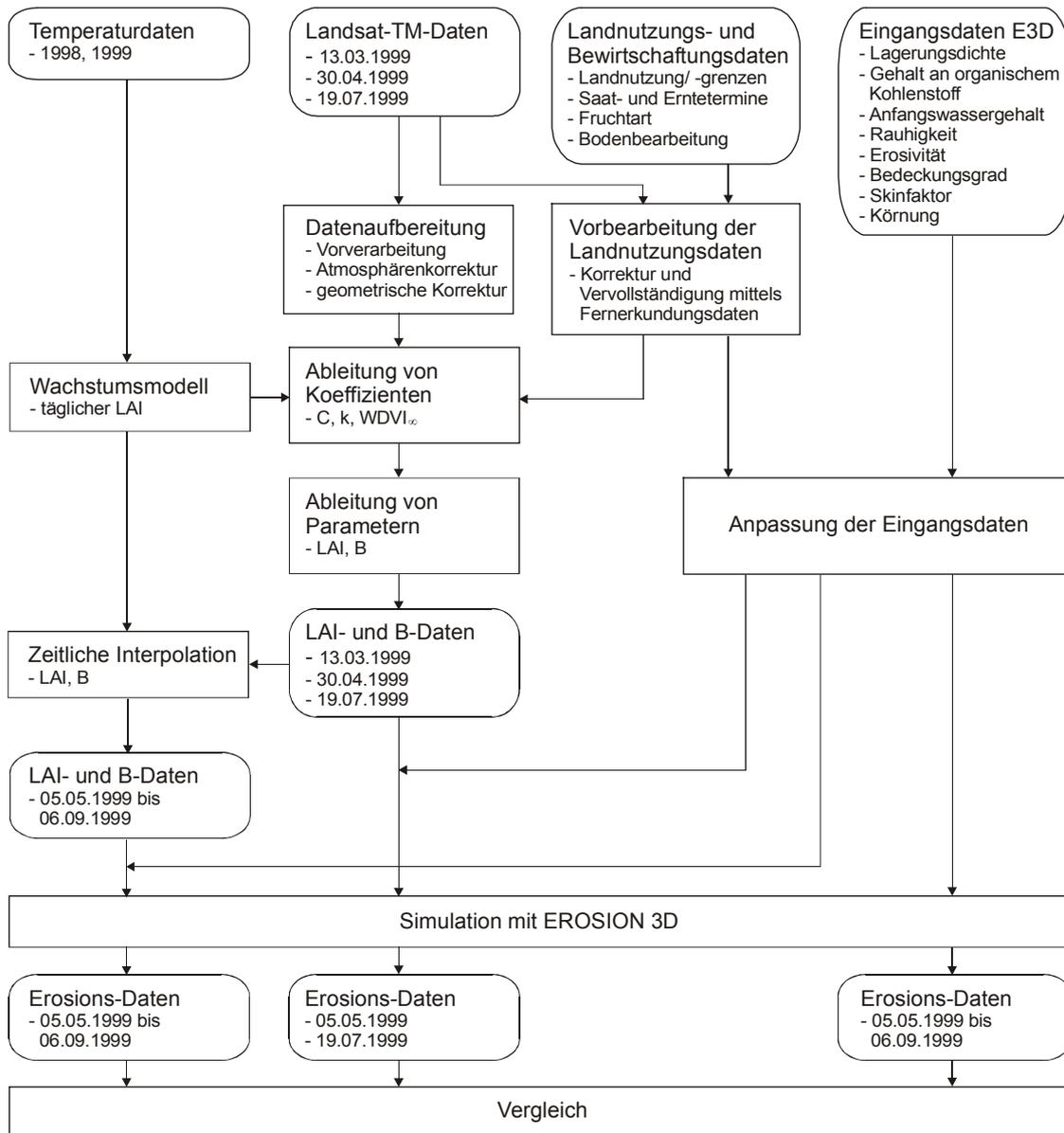


Abb. 6.1: Daten- und Informationsfluss.

Ausgangspunkt sind hierbei die TM-Daten. Durch Methoden der Datenaufbereitung werden die Voraussetzungen für eine quantitative Analyse dieser Daten geschaffen (s. 5.2.2.3). Gleichzeitig werden die Satellitendaten für den Vergleich und die Kontrolle der gegebenen Landnutzungs- und Bewirtschaftungsdaten genutzt. Aufgrund von Differenzen erfolgt eine Anpassung der Fernerkundungs- und Landnutzungsdaten (6.2.1). Diese erfordert wiederum eine Anpassung der ursprünglichen Eingangsdaten des Modells EROSION 3D.

Den Hauptbestandteil der Arbeit macht die quantitative Analyse der Satellitendaten in Form der Parameterbereitstellung aus. Sie beinhaltet zunächst die Berechnung von gebiets- und fruchtartenspezifischen Koeffizienten (6.2.2). Dabei stützt sich die Bestimmung des WDWI₀ auf das vereinfachte Wachstumsmodell. Die Koeffizienten sind zur anschließenden Ableitung des LAI und des Bedeckungsgrades erforderlich (6.2.3), sofern sie nicht aus der Literatur übernommen werden. Im Ergebnis liegen diese Größen zu den drei Aufnahmezeitpunkten vor. Da diese Parameter für alle Niederschlagsereignisse benötigt werden, wird der LAI mit Hilfe des Wachstumsmodells zeitlich interpoliert und daraus der tägliche Bedeckungsgrad berechnet (6.2.4). Eingangsgrößen für das Wachstumsmodell sind tägliche Temperaturdaten der Wachstumsperiode 1998/1999. Die Wachstumskurve wird an den aus Fernerkundungsdaten abgeleiteten LAI angepasst.

Für die Simulationsrechnungen (6.3) stehen somit drei Datensätze zur Verfügung, deren Ergebnisse anschließend verglichen werden:

- angepasste E3D-Eingangsdaten der AG Boden- und Gewässerschutz für alle Niederschlagsereignisse,
- E3D-Eingangsdaten und Bedeckungsgrad aus Landsat-TM-Daten für die Niederschlagsereignisse 05.05.1999 und 19.07.1999,
- E3D-Eingangsdaten und zeitlich interpolierter Bedeckungsgrad aus Landsat-TM-Daten für alle Niederschlagsereignisse.

Die quantitative Ableitung der Koeffizienten und Parameter sowie die zeitliche Interpolation wird durch Routinen in der Programmiersprache Interactive Data Language (IDL) (RSI) umgesetzt. Die Anpassung der Landnutzungsdaten sowie die Darstellung der Daten erfolgt mit dem Geoinformationssystem ArcView (ESRI) und der Software ERDAS Imagine (Leica Geosystems).

6.2 Parameterbereitstellung

6.2.1 Vorbereitung der Landnutzungsdaten

Voraussetzung für die fruchtarten- und vegetationsartenspezifische Ableitung von quantitativen Parametern ist eine zuverlässige Landnutzungsclassifikation. Zudem erfordert die Wachstumsmodellierung die Kenntnis von Saat- und Ernteterminen.

Im Rahmen der Arbeit liegen ausführliche Informationen zur Bewirtschaftung für einen Großteil der vorwiegend landwirtschaftlich genutzten Flächen im Untersuchungsgebiet vor. Bei einigen Schlägen werden Fruchtarten durch die AG Boden- und Gewässerschutz angenommen, da zum Termin der Begehung (03.04.1999) Brache vorlag und keine weiteren Informationen zur Verfügung stehen. In einigen Fällen sind die Saat- und Erntetermine nicht taggenau bekannt.

Zur Vervollständigung und Kontrolle dieser Angaben werden die Landnutzungs- und Bewirtschaftungsdaten mit den drei Landsat-TM-Szenen visuell verglichen. Es zeigt sich bei der Überlagerung der Landnutzungsgrenzen mit den Szenen, dass in einzelnen Schlägen ein unterschiedlicher Anbau vorliegt oder die Schlaggrenzen über Entzerrungsungenauigkeiten hinaus anders verlaufen. In diesen Fällen werden die Flächen geteilt bzw. die Grenzen an die Satellitendaten angepasst. Aufgrund des Verhaltens der Grauwerte bzw. RV in Flächen bekannter Fruchtarten im Verlauf der drei Szenen werden für einige Schlä-

ge neue Fruchtarten zugewiesen. Die Abschätzung von taggenauen Saat- und Ernteterminen erfolgt ebenfalls basierend auf Schlägen ähnlicher Eigenschaften. Somit können bestehende Restfehler nicht ausgeschlossen werden.

6.2.2 Ableitung von Koeffizienten

6.2.2.1 Der bodenspezifische Faktor C

Der Faktor C wird für die Berechnung des Vegetationsindex WDVI (Gl. 4.3 und 4.4, S. 22) nach CLEVERS [1988] benötigt. Er beschreibt den Anstieg einer durch den Ursprung gehenden *Soil Line* im Nir-Red-Raum. Die Werte von C variieren für verschiedene Bodentypen und liegen häufig zwischen 1,0 und 2,0 [CLEVERS 1989]. Für die Berechnung des C-Wertes schlagen CLEVERS et al. [2000] Aufnahmezeitpunkte vor oder nach der Vegetationsperiode vor.

Die C-Werte werden aus den umgerechneten Reflexionsvermögen der Geländeproben und aus jeder der drei Landsat-TM-Szenen bestimmt und vergleichend gegenübergestellt. Die Auswahl der Pixel für die Berechnung wird wie folgt vorgenommen:

- Saat- und Erntetermin des Schlages,
- $1,0 < C < 2,0$,
- $0,0 < NDVI \leq 0,2$.

Eine Selektion der Pixel allein nach den Anbauterminen ist nicht ausreichend, da innerhalb der Schläge Bewuchs (z. B. Unkraut) auftreten kann und Pixel anderer Landbedeckungstypen in die Randbereiche aufgrund der erwähnten Restdifferenzen zu den Landnutzungsgrenzen nach der geometrischen Korrektur fallen können.

Als Grenzwerte für C werden die Angaben von CLEVERS [1989] verwendet. Die untere Grenze von 1,0 kann für die vorliegenden Bodentypen mit den Laborspektren bestätigt werden, da die Reflexionskurven einen leichten Anstieg vom roten zum nahen infraroten Bereich beschreiben (z. B. Abb. 5.6, S. 40). Die obere Grenze wird vor allem durch den Übergang zur Bedeckung mit Vegetation beeinflusst. Für eine Unterscheidung wird aufgrund seiner einfachen Berechenbarkeit und häufigen Verwendung der NDVI als zusätzliches Kriterium herangezogen. Eine Berechnung der C-Werte mit verschiedenen NDVI-Maxima und anschließendem visuellen Vergleich ergab, dass im vorliegenden Fall ein NDVI von 0,2 eine realistische Abgrenzung ermöglicht. Nach den vorgegebenen Grenzbedingungen setzen sich die C-Werte folgendermaßen zusammen:

- Pixel aus Schlägen der Szene 1 (13.03.1999) mit noch nicht angebauten Sommerfrüchten (z. B. Silomais, Körnermais, Zuckerrübe, Gemüse),
- Pixel aus Schlägen der Szene 2 (30.04.1999) mit bereits angebauten Früchten, die noch nicht oder kaum aufgelaufen sind (siehe Szene 1) und
- Pixel aus Schlägen der Szene 3 (19.07.1999) mit abgeernteten Winterfrüchten (Wintergerste, Raps) oder Gemüse.

6.2.2.2 Der Extinktionskoeffizient k

Der Extinktionskoeffizient k ermöglicht die Abschätzung des Bedeckungsgrades aus dem Blattflächenindex (s. 4.3.3) und umgekehrt in Abhängigkeit von der Blattorientierung und dem Sonnenzenitwinkel. Da der Bedeckungsgrad als vertikale Projektion aus einem be-

kannten Blattflächenindex bestimmt wird, entspricht der Sonnenzenitwinkel in diesem Fall 0° . Der Extinktionskoeffizient wird nach dem unter 4.3.3 aufgeführten Verfahren für die vorhandenen Fruchtarten aus dem Inklinationsindex berechnet.

Wie bereits angedeutet, existiert keine einheitliche Beziehung zwischen einem Vegetationsindex und dem LAI mit zugehörigen Koeffizienten, die eine Berechnung des Blattflächenindex für alle im Untersuchungsgebiet vorkommenden Fruchtarten zulässt. Im Rahmen der Arbeit werden daher verschiedene in der Literatur zu findende Beziehungen verwendet. Gleichzeitig wird ein vereinfachtes Verfahren gesucht, dass für diese Fruchtarten einsetzbar bzw. übertragbar ist und mit den bekannten Beziehungen verglichen werden soll. Als Grundlage hierfür wird das CLAIR-Modell aus folgenden Gründen gewählt:

- Es ist ein semi-empirisches Modell, dessen Parameter sich physikalisch erklären lassen.
- Es wurde schon in verschiedenen Gebieten Europas getestet [BOUMAN et al 1992, CLEVERS et al. 2000].
- Durch eine Verwendung des WdVI wird erst bei höheren Werten der Sättigungsbereich erreicht.
- Es liegen Parameter für die das Untersuchungsgebiet dominierenden Fruchtarten (Getreide) vor, die einen Vergleich ermöglichen.
- Der WdVI beinhaltet einen bodenspezifischen Korrekturfaktor.
- Die Koeffizienten α und $WDVI_\infty$ können abgeschätzt werden.

Der Parameter α hat laut Definition des Modells eine ähnliche Funktion wie der Extinktionskoeffizient bei der Berechnung des Bedeckungsgrades [CLEVERS 1986, BOUMAN et al. 1992]. Letzterer setzt sich bei einer Off-Nadirmessung (nicht senkrecht) aus einem k jeweils für die Beobachtungs- und Sonnenrichtung zusammen [CLEVERS 1986]. Im Rahmen der Arbeit wird das Berechnungsverfahren von k nach Gl. 4.13 - 4.16 zur Abschätzung von α verwendet. Da mit den Landsat-Daten weitgehend Nadirmessungen vorliegen, wird α nur aus dem k in Sonnenrichtung geschätzt. Zur besseren Unterscheidung wird im Folgenden der Extinktionskoeffizient für die Berechnung des Bedeckungsgrades mit k_B und der zur LAI-Berechnung nach dem CLAIR-Modell mit k_{LAI} bezeichnet.

6.2.2.3 Der Koeffizient $WDVI_\infty$

Für eine Anwendung des CLAIR-Modells wird neben dem k_{LAI} der Parameter $WDVI_\infty$ benötigt. Er beschreibt den asymptotischen Wert des WdVI, wenn der LAI unendlich groß wäre. Für eine fruchtartenspezifische Abschätzung ist es somit erforderlich, dass zu einem der drei Aufnahmezeitpunkte je Fruchtart eine unendlich dichte Vegetation gegeben ist. Da dies nicht der Fall ist, wird eine alternative Vorgehensweise untersucht, die im Folgenden vorgestellt wird.

Dieser Ansatz geht davon aus, dass an einem Tag d in der Wachstumsperiode ein $WDVI_d$ mit einem LAI_d vorliegt. Um den maximalen Blattflächenindex einer Fruchtart zu erreichen, wird ein ΔLAI_d benötigt. Bei Kenntnis dieser Größen kann ein standortbezogener $WDVI_\infty$ für das entsprechende Vegetationsjahr abgeschätzt werden [BORG 2002]. Der Vegetationsindex am Tag d ($WDVI_d$) wird hierbei aus einer Landsat-TM-Szene bestimmt. Für die Abschätzung der Parameter LAI_d und ΔLAI_d wird das vereinfachte Wachstumsmodell nach SWIM verwendet, das basierend auf der täglichen Durchschnittstemperatur während

der Wachstumsperiode den täglichen LAI berechnet (s. 4.4.2 und Anhang III). Für das ΔLAI_d gilt allgemein:

$$\Delta\text{LAI}_d = \text{LAI}_{\max} - \text{LAI}_d \quad (6.1)$$

mit: ΔLAI_d Differenz des Blattflächenindex zum Tag d in m^2/m^2 ,
 LAI_{\max} maximaler Blattflächenindex in m^2/m^2 ,
 LAI_d Blattflächenindex zum Tag d in m^2/m^2 .

Gleichzeitig gilt nach dem Wachstumsmodell unter der Voraussetzung, dass vom Zeitpunkt d an keine Stressfaktoren das Pflanzenwachstum beeinflussen, folgender Zusammenhang:

$$\Delta\text{LAI}_d = (1 - \text{fr}_{\text{LAI}_{\max},d}) \cdot \text{LAI}_{\max} \quad (6.2)$$

mit: $\text{fr}_{\text{LAI}_{\max},d}$ Anteil des aktuellen LAI zum Tag d am maximalen LAI.

Setzt man Gl. 6.1 in Gl. 6.2 ein, substituiert LAI_d nach dem CLAIR-Modell (Gl. 4.10) und stellt nach WDVI_∞ um, ergibt sich die folgende Gleichung:

$$\text{WDVI}_\infty = \frac{\text{WDVI}_d}{1 - e^{k_{\text{LAI}}(-\text{fr}_{\text{LAI}_{\max},d} \cdot \text{LAI}_{\max})}} \quad (6.3)$$

mit: WDVI_d *Weighted Difference Vegetation Index* am Tag d in %.

Der WDVI_d wird je Fruchtart und Schlag berechnet. Die Auswahl der Szene, aus der WDVI_d bestimmt wird und somit des Tages d, erfolgt so, dass schon ein möglichst hoher LAI vorhanden ist. Es wird unterschieden in:

- Winterfrüchte (WW, WR, WG, R): Szene 2,
- Sommerfrüchte (ZR, KM, SM, ...): Szene 2 oder Szene 3,
- zwei nacheinander angebaute Früchte (SP/BO): Szene 1, Szene 2 oder Szene 3.

Innerhalb jedes Schläges wird ein Rand von sechs Pixeln (á 10 m) ausmaskiert und nicht in die Berechnungen einbezogen, um Restfehler nach der geometrischen Korrektur auszuschließen. Bei besonders kleinen Objekten (z. B. Wald, Spinat/Bohnen) wird der Rand auf drei Pixel gesetzt. Hierfür werden zunächst nach einer von BORG [2000] entwickelten Routine die Objektgrenzen im Rasterbild gesucht (Skelettierung). Ausgehend von diesem Rand werden dann die angrenzenden drei bzw. sechs Pixel zum Objektinneren hin bestimmt. Aus den WDVI_d -Werten eines Schläges wird der Mittelwert gebildet und daraus nach Gl. 6.3 der WDVI_∞ berechnet. Aus den Mittelwerten aller Schläge einer Fruchtart wird der maximale WDVI_∞ als Koeffizient für die Berechnungen mit dem CLAIR-Modell verwendet. Es werden nur die Schläge berücksichtigt, deren WDVI_d -Mittelwert größer als 5 % ist, da sonst keine oder nur sehr wenig Vegetation vorliegt und deshalb extrem hohe WDVI_∞ entstehen.

6.2.3 Ableitung und Anpassung der Fernerkundungsparameter

Ableitung des Blattflächenindex (LAI)

Die Berechnung des LAI erfolgt nach drei Methoden, die unter 4.3.2 vorgestellt wurden. Hierzu gehören das CLAIR-Modell, das semi-empirische Modell nach BARET & GUYOT [1991] und der empirische Ansatz nach BACH [2001]. In Tab. 6.1 werden den im Untersuchungsgebiet vorkommenden Fruchtarten die jeweiligen Berechnungsmethoden und die aus der Literatur entnommenen zugehörigen Koeffizienten (s. 1 bis 8) gegenübergestellt. Bei Fruchtarten, für die keine Koeffizienten vorliegen, werden Koeffizienten ähnlicher Fruchtarten herangezogen (z. B. SP, RB von ZR). Eine Ausnahme stellen hierbei die Koeffizienten nach CHEN dar, da diese allgemein für landwirtschaftliche Fruchtarten angegeben werden. Sie werden deshalb als grober Vergleich für alle Fruchtarten bis auf Mais verwendet, für den ausreichend Vergleichswerte vorhanden sind.

Tab. 6.1: Übersicht über angewendete Methoden zur LAI-Berechnung und maximale LAI.

Fruchtart	CLAIR			Baret & Guyot				Bach	LAI in m ² /m ²	Literatur
	1	2	3	4	5	6	7	8		
Körnermais (KM)	x	-	-	x	x	x	-	x	8,0	GEISLER 1983
Zuckerrüben (ZR)	x	-	x	-	-	-	x	-	6,0	BOUMAN et al. 1992
Silomais (SM)	x	-	-	x	x	x	-	x	10,0	GEISLER 1983
Spinat (SP)	x	-	x	-	-	-	x	-	6,0	s. ZR
Rhabarber (RB)	x	-	x	-	-	-	x	-	6,0	s. ZR
Öllein (ÖL)	x	-	-	-	-	-	x	-	6,0	s. Raps
Heilkräuter (HK)	x	-	x	-	-	-	x	-	6,0	s. ZR
Wintergerste (WG)	x	x	x	x	-	-	x	x	10,0	BOUMAN et al. 1992
Raps (R)	x	-	-	-	-	-	x	-	6,0	GEISLER 1983
Winterroggen (WR)	x	x	x	x	-	-	x	x	7,0	s. WW
Winterweizen (WW)	x	-	x	x	-	-	x	x	7,0	BOUMAN et al. 1992
Bohnen (BO)	x	-	-	-	-	x	x	-	7,0	GEISLER 1983
Erbsen (E)	x	-	-	-	-	x	x	-	7,0	GEISLER 1983

1 Neu, 2 Clevers, 3 Bouman, 4 Wiegand, 5 Gilabert, 6 Choudhury, 7 Chen, 8 Bach

Da die vorgestellten Methoden eine Berechnung des grünen LAI ermöglichen, können sie für die Erosionsmodellierung nur in der vegetativen Wachstumsphase oder bis zum Erreichen des maximalen LAI eingesetzt werden. Bei Winterfrüchten wie Getreide und Raps werden daher die Szenen 1 und 2 verwendet. Für Sommerfrüchte kommen je nach Aussaat die Szenen 2 und 3 in Frage. Werden mehrere Früchte in einem Vegetationsjahr angebaut (SP/BO), können Berechnungen in allen Szenen möglich sein.

Die im Untersuchungsgebiet vorkommenden Stilllegungsflächen verhalten sich in den drei Szenen sehr ähnlich den benachbarten Rapsschlägen. Sie werden daher bei der Berechnung des Blattflächenindex und Bedeckungsgrades wie Raps behandelt.

Die eingesetzten Methoden lassen sich innerhalb eines bestimmten Wertebereichs für die Vegetationsindizes anwenden. Übersteigen die Vegetationsindizes einen Grenzwert, ist eine mathematische Lösung nicht möglich (z. B. bei BARET & GUYOT $VI \geq b$). Für Vegetationsindizes, die sich ihrem asymptotischen Wert nähern (z. B. $WDVI_{\infty}$ und b), entstehen unendlich große LAI aufgrund der logarithmischen Funktion. Für diese Fälle ist es erforderlich, den LAI auf einen maximalen Wert zu setzen. In den letzten beiden Spalten der

Tab. 6.1 werden diese maximalen LAI je Fruchtart und die zugehörige Literatur aufgelistet. Für einige Fruchtarten werden die Werte von ähnlichen Pflanzen übernommen.

Ableitung und Anpassung des Bedeckungsgrades (B)

Die Berechnung des Bedeckungsgrades kann aus dem Blattflächenindex oder direkt aus Vegetationsindizes erfolgen (4.3.3). Für die Erosionsmodellierung wird im Rahmen der Arbeit die erste Verfahrensweise genutzt, da das Wachstumsmodell die Entwicklung des Blattflächenindex modelliert. Die Methoden, die sich auf Vegetationsindizes stützen, werden zum Vergleich der berechneten Bedeckungsgrade eingesetzt. Analog zu Tab. 6.1 werden die Methoden und Koeffizienten für die Fruchtarten in Tab. 6.2 zusammengefasst.

Tab. 6.2: Übersicht über angewendete Methoden zur Berechnung des Bedeckungsgrades.

Fruchtart	LAI-basiert	VI-basiert	
	Ross	Bouman	Baret
Körnermais (KM)	x	-	-
Zuckerrüben (ZR)	x	x	x
Silomais (SM)	x	-	-
Spinat (SP)	x	x	x
Rhabarber (RB)	x	x	x
Öllein (ÖL)	x	-	-
Heilkräuter (HK)	x	-	-
Wintergerste (WG)	x	x	-
Raps (R)	x	-	-
Winterroggen (WR)	x	x	-
Winterweizen (WW)	x	x	-
Bohnen (BO)	x	-	-
Erbsen (E)	x	-	-

Da nicht für alle Fruchtarten zu jedem Aufnahmeterrain der Bedeckungsgrad bestimmt werden kann, müssen die Daten vor ihrer Nutzung in EROSION 3D angepasst werden. Das betrifft den Bedeckungsgrad von Winterfrüchten in Szene 3, da nur der grüne LAI durch die eingesetzten Methoden abgedeckt wird. Der Bedeckungsgrad wird für diesen Zeitpunkt, sofern noch nicht geerntet wurde, aus den Ergebnissen der zeitlichen Interpolation übernommen.

Da für Heide, Grünland und Laubwald keine Extinktionskoeffizienten ermittelt werden können

und diese Flächen nur einen geringen Teil der Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes ausmachen, wird der Bedeckungsgrad von den Angaben der AG Boden- und Gewässerschutz übernommen. Für die Landnutzungsarten Siedlung und Straße wird der Bedeckungsgrad auf 100 % gesetzt. Wasserflächen erhalten den Wert 0 %. Die Klasse unbedeckter Boden setzt sich aus unbefestigtem Weg und Kiesgruben zusammen. Für diese Flächen werden ebenfalls die Angaben der AG Boden- und Gewässerschutz zum zugehörigen Niederschlagsereignis übertragen (0 % bis 30 %).

Ebenso wie abgestorbene Pflanzenteile kann eine Mulchung durch die vorgeschlagenen Methoden nicht erfasst werden. Dies betrifft vorwiegend WW-, R- und ZR-Schläge. Hierfür wird keine Anpassung vorgenommen, da die Abbaurate nicht bekannt ist und mit den vorhandenen Werten Schätzungen vorliegen.

6.2.4 Zeitliche Interpolation mittels Wachstumsmodell

Anpassung der fruchtartenspezifischen Parameter

Die Berechnung des täglichen LAI mit dem vereinfachten Wachstumsmodell (s. 4.4.2 u. Anhang III) basiert neben der durchschnittlichen Tagestemperatur, dem Saat- und Erntezeitpunkt auf sieben fruchtartenspezifischen Parametern, die standardmäßig in einer Pa-

parameterdatei in SWIM zur Verfügung stehen. Diese Werte werden, sofern es möglich ist, für die vorliegenden landwirtschaftlichen Fruchtarten angepasst.

Da die Fruchtarten Rhabarber (RB), Öllein (ÖL) und Heilkräuter (HK) im Parameterkatalog nicht enthalten sind, werden die Werte von Pflanzen ähnlicher Eigenschaften übernommen. Die Parameter für ÖL werden von Raps übertragen. Da unzureichende Informationen über die meist mehrfach geernteten Früchte RB und HK vorhanden sind, werden sie wie Gras behandelt.

Für jede Fruchtart werden bezogen auf die Wachstumsperiode 1998/1999 die potenziellen Wärmeeinheiten (PHU), die zur Reife erforderlich sind, aus dem aufgerundeten Maximum aller jeweils zugehörigen Schläge bestimmt. Basierend auf Angaben zu typischen LAI-Entwicklungen [GEISLER 1983, PETR et al. 1983, BACH 2001] und den Kurven, die sich mit den vorhandenen Tagestemperaturen einstellen, werden die Werte des $fr_{PHU,sen}$, LAI_{max} sowie I_1 und I_2 für einige Fruchtarten angepasst. Die angepassten Parameter sind in Tab. III.1 Anhang III zusammengestellt.

Vorgehensweise bei der zeitlichen Interpolation

Einen Überblick über die Vorgehensweise bei der Umsetzung der kombinierten Bestimmung des Bedeckungsgrades aus den Fernerkundungsdaten und dem vereinfachten Wachstumsmodell gibt Abb. 6.2.

Voraussetzung für die vollständige Bestimmung des Bedeckungsgrades sind Informationen über das Untersuchungsgebiet, die darin enthaltenen Objekte (z. B. Schläge), daraus abgeleitete Informationen sowie der berechnete Blattflächenindex. Da der Bedeckungsgrad nur für Objekte mit Ackerfrüchten bestimmt werden soll, werden, wie unter 6.2.3 bereits erwähnt, die übrigen Objekte aus den Angaben der AG Boden- und Gewässerschutz übernommen. Die Interpolation mit dem Wachstumsmodell wird objektweise durchgeführt. Es wird auf eine pixelweise Modellierung aus folgenden Gründen verzichtet:

- Aufgrund der Restdifferenzen nach der geometrischen Korrektur kann keine pixelgenaue Zuordnung erreicht werden, was sich an den Objekträndern und bei der Betrachtung zu mehreren Zeitpunkten („Zeitserie“) problematisch auswirkt.
- Da die Methoden zur LAI-Berechnung im Untersuchungsgebiet nicht validiert werden können, ist es sinnvoller, objektweise Mittelwerte zu verwenden.

Die Anpassung des Wachstumsmodells erfolgt mit drei Parametern. Die Kurvenform bis zum Erreichen des maximalen LAI wird durch die Parameter I_1 und I_2 bestimmt. Diese werden aus zwei Punkten berechnet (Anhang III Gl. III.7 - 8, Abb. 4.2 S. 30), deren Koordinaten sich aus dem Anteil an potenziellen Wärmeeinheiten ($fr_{PHU,i}$) und dem Anteil am maximalen LAI ($fr_{LAI_{max},i}$) zum Tag i zusammensetzen.

Da aus den Fernerkundungsdaten der LAI abgeleitet wird, muss dieser folglich in den $fr_{LAI_{max}}$ umgerechnet werden. Der aktuelle tägliche LAI wird mit dem Modell nicht durch einfaches Multiplizieren von $fr_{LAI_{max}}$ mit LAI_{max} ermittelt, sondern schließt neben dem Stressfaktor noch eine Art zusätzlichen Korrekturfaktor (Gl. V.4 - 5) ein, der u. a. den LAI vom Vortag enthält. Um diesen Zusammenhang zu vereinfachen, wurde nach einer alternativen Methode gesucht. Die Annäherung der Beziehung beispielweise durch ein Polynom ist aufgrund der Schwankungen, die durch den täglichen Stressfaktor verursacht werden, mit nicht vernachlässigbaren Ungenauigkeiten verbunden. Gleichzeitig soll das Verfahren relativ unaufwendig sein und die ermittelte Funktion auf relativ wenige Punkte

angewendet werden. Deshalb wird für jeden gesuchten Punkt eine solche Funktion bestimmt. In Abb. 6.3 wird die Vorgehensweise schematisch veranschaulicht.

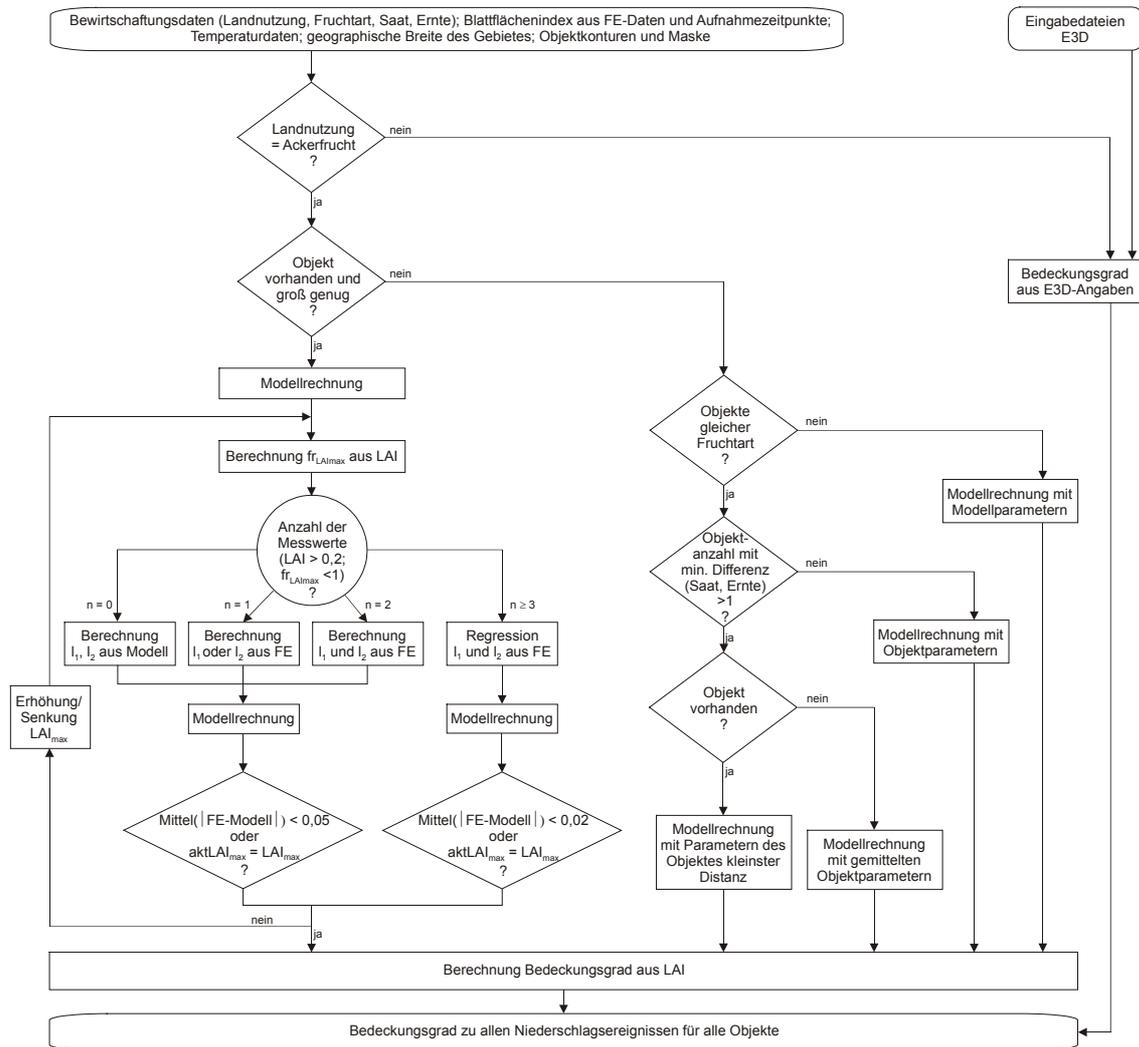


Abb. 6.2: Schematischer Ablaufplan zur Bestimmung des Bedeckungsgrades für alle Niederschlagsereignisse mittels vereinfachtem Wachstumsmodell.

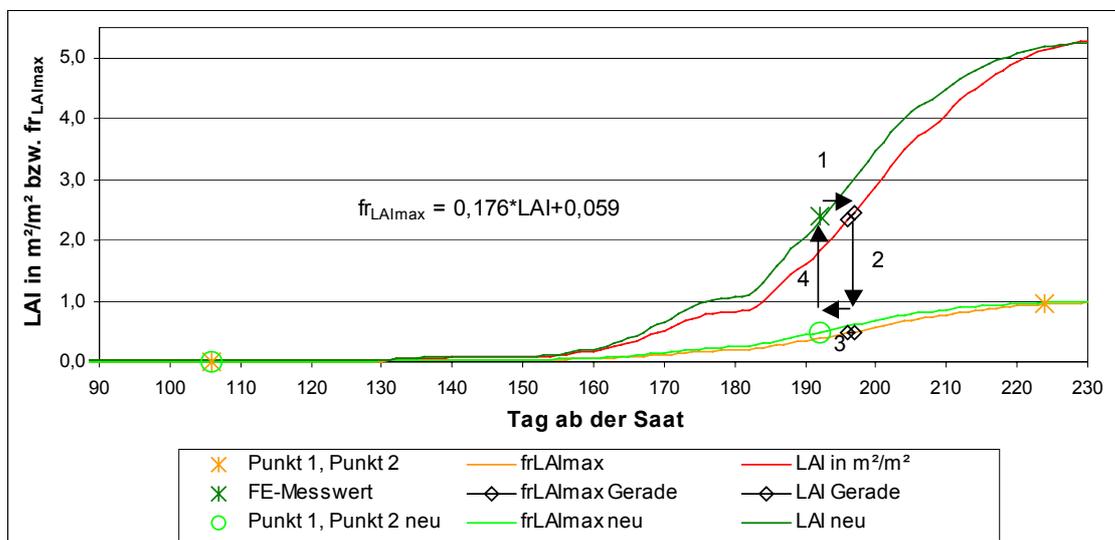


Abb. 6.3: Beispielhafte Anpassung der modellierten LAI-Kurve an einen LAI-Messwert aus Fernerkundungsdaten.

Prinzipiell erfolgt die Anpassung von l_1 und l_2 in vier Schritten (s. Abb. 6.3):

- 1) Es werden für den jeweiligen LAI aus Fernerkundungsdaten (FE-Messwert) die zwei nächstgelegenen LAI-Werte und ihre zugehörigen $fr_{LAI_{max}}$ in der modellierten LAI-Kurve (rot/orange) gesucht.
- 2) Aus den LAI und $fr_{LAI_{max}}$ wird als Näherung eine Gerade ermittelt.
- 3) Mit Hilfe der Geradengleichung wird dann der gesuchte $fr_{LAI_{max}}$ aus dem FE-Messwert berechnet (hier: $fr_{LAI_{max}} = fr_{LAI_{max,2}}$, also wird Punkt 2 neu bestimmt).
- 4) Schließlich werden hiermit l_1 und l_2 neu ermittelt. Mit einer neuen Modellrechnung wird der Verlauf des $fr_{LAI_{max}}$ und des LAI (hell-/dunkelgrüne Kurven) modelliert, der nun an den FE-Messwert angepasst ist.

Für den Fall, dass mehr als ein Messwert vorliegt, werden in Schritt 4 l_1 und l_2 aus mehreren $fr_{LAI_{max}}$ ermittelt. Als dritter Parameter wird der LAI_{max} je Objekt angepasst, da durch ihn die Höhe der LAI-Kurve bestimmt wird.

Bei der zeitlichen Interpolation werden zwei Gruppen von Objekten unterschieden. Zu der **ersten Gruppe** gehören Objekte, die auch nach der Randbehandlung, wie unter 6.2.2.3 erläutert, eine genügend große Anzahl von Pixeln aufweisen, um einen objektweisen Mittelwert für den LAI aus den TM-Daten ableiten zu können. Für diese Objekte erfolgt zunächst eine Berechnung des täglichen LAI mit dem Wachstumsmodell basierend auf den gegebenen Modellparametern. Aus den Modellergebnissen werden die Parameter der Geraden ermittelt. Hiermit erfolgt die Berechnung der $fr_{LAI_{max,i}}$.

Alle LAI-Ergebnisse aus der Fernerkundung, die größer als 0,2 und für die die $fr_{LAI_{max,i}}$ kleiner als 1,0 sind, werden in die Berechnung von l_1 und l_2 einbezogen. Der Betrag 0,2 wird gewählt, um einerseits den Bodeneinfluss auszuschließen (entspricht je nach CLAIR-Parametern einem WDVI von 5 - 10 % bzw. NDVI > 0,2) und um andererseits genügend Messwerte im Rahmen der Arbeit zu haben. Von der Anzahl der vorhandenen $fr_{LAI_{max,i}}$ aus Fernerkundungsdaten hängt die Art und Weise der Anpassung von l_1 und l_2 ab (Abb. 6.2). Bei null bis zwei Messwerten liegt eine eindeutige Lösung vor, nach der die Formparameter aus Modell und/oder Fernerkundung direkt berechnet werden. Für drei und mehr Messwerte sind die Formparameter überbestimmt. Sie werden dann nach der Methode der kleinsten Quadrate ermittelt. Mit den Formparametern wird eine neue Modellrechnung durchgeführt, aus der wiederum die Funktion der $fr_{LAI_{max}}$ von LAI bestimmt wird.

Die Berechnung für $fr_{LAI_{max,i}}$ erfolgt iterativ, d. h. sie wird solange durchgeführt, bis die Differenz zwischen dem LAI der Fernerkundung und des Modells kleiner als 0,05 ($n = 0$ oder 1), durchschnittlich 0,05 ($n = 2$) bzw. 0,02 ($n \geq 3$) ist. In Abhängigkeit vom Vorzeichen dieser Differenz wird der LAI_{max} mit jedem Durchlauf um 0,1 erhöht oder gesenkt. Dabei darf der jeweils aktuelle maximale LAI ($aktLAI_{max}$) der modellierten Kurve den LAI_{max} , der für die Fernerkundungsdaten gilt, nicht übersteigen. Wird mehr als ein Fernerkundungsmesswert verwendet, werden zusätzlich ab Differenzen kleiner 0,3 in jedem Durchlauf die zu l_1 und l_2 gehörenden $fr_{LAI_{max,1}}$ und $fr_{LAI_{max,2}}$ angepasst (nicht in Abb. 6.2 enthalten). Hierfür werden beide Werte nacheinander schrittweise um 0,001 erhöht oder gesenkt bis die geforderten Differenzen unterschritten werden. Diese Vorgehensweise ist erforderlich, da mit der Abschätzung der $fr_{LAI_{max,i}}$ durch Geraden Ungenauigkeiten verbunden sind, mit denen die genannten Differenzen nicht erreicht werden können.

Der Differenzbetrag von 0,05 oder geringer wurde bei den vorliegenden Daten und bei einer Veränderung des LAI_{max} um 0,1 als sinnvoller Wert ermittelt. Bei mehreren Messwer-

ten wurde aufgrund der Mittelbildung ein geringerer Wert gewählt. Diese Genauigkeit wird im Rahmen der Arbeit als ausreichend erachtet, da schon die Fernerkundungsergebnisse mit höchstens einer Nachkommastelle darstellbar sind.

Zur Kontrolle wird abschließend ein weiterer Durchlauf gerechnet, bei dem der LAI_{\max} nicht verändert wird. Ist die ermittelte Differenz kleiner als die vorhergehende, werden die neuen Ergebnisse übernommen.

Für die **zweite Gruppe** der Objekte liegt kein LAI aus Fernerkundungsdaten vor. Sind im Untersuchungsgebiet keine Objekte mit gleicher Fruchtart vorhanden, muss die Modellrechnung mit den gegebenen Parametern durchgeführt werden. Dieser Fall tritt im vorliegenden Gebiet nicht ein.

Von den existierenden Objekten gleicher Fruchtart werden diejenigen gesucht, von denen eine minimale zeitliche Differenz von Saat und Ernte zum betrachteten Objekt besteht. Wird ein Objekt gefunden, werden dessen Parameter I_1 , I_2 , LAI_{\max} für die Modellrechnung verwendet. Treten mehrere ähnliche Objekte auf und ist das Objekt in der Rasterdarstellung nicht vorhanden, werden die Objektparameter gemittelt. Wenn das Objekt vorhanden ist, wird von den ähnlichen Objekten dasjenige gesucht, das am geringsten entfernt ist.

Aus den täglichen LAI aller landwirtschaftlichen Objekte wird schließlich der Bedeckungsgrad berechnet. Da die Fernerkundungsmethoden und auch das Wachstumsmodell nur eine Modellierung des LAI und des Bedeckungsgrades von grüner Vegetation realisieren, kann der Bedeckungsgrad mit Einsetzen der Seneszenz nicht bestimmt werden. Als Näherung wird angenommen, dass der Bedeckungsgrad bis zur Ernte gleich bleibt.

6.3 Simulationsrechnungen

6.3.1 Anpassung der Eingangsdaten auf die veränderte Landnutzung

Wie unter 6.2.1 beschrieben, wurde basierend auf einer visuellen Überprüfung mit den TM-Szenen eine Überarbeitung der Landnutzungsdaten vorgenommen. Da die Landnutzung/Fruchtart eines Schlags entscheidend für die Zuordnung der Bodenparameter aus dem Parameterkatalog ist, muss folglich eine Anpassung dieser Parameter an die Veränderungen erfolgen. Bei der Anpassung wird weitestgehend versucht, bekannte Angaben der AG Boden- und Gewässerschutz für Schläge gleicher Fruchtart, Bodenart und ähnlichem Gehalt an organischem Kohlenstoff zu übernehmen.

6.3.2 Durchführung der Simulationen

Die Durchführung der Simulationsrechnungen beinhaltet zum einen die Bereitstellung der Parameterdateien (Niederschlag, Relief, Boden) mit Hilfe des Präprozessors (Version 1.62) und zum anderen die Berechnungen mit dem Hauptprogramm (Version 1.68). Die Relief- und Niederschlagsparameter werden direkt von der AG Boden- und Gewässerschutz übernommen. Daher können ihre mit dem Präprozessor von EROSION 3D erstellten Parameterdateien im Hauptprogramm verwendet werden.

Für die veränderten Bodenparameter müssen die entsprechenden Parameterdateien mit dem Präprozessor neu erstellt werden. Dabei werden für jedes Niederschlagsereignis drei solcher Dateien für die mit verschiedenen Methoden abgeleiteten Bedeckungsgrade er-

zeugt. Die erste Datei enthält jeweils den geschätzten Bedeckungsgrad nach dem Parameterkatalog (Methode *E3D*). Die anderen beiden ergeben sich aus den Bedeckungsgraden, die aus den TM-Daten nach den unter 7.2.1 bzw. 7.2.2 ausgewählten Methoden abgeleitet und anschließend zeitlich interpoliert werden (Methoden *FE I + WM* und *FE II + WM*). Da die Bodenparameter für diese Methoden als einheitlicher Wert im Schlag vorliegen, kann im Präprozessor das relationale Eingabeverfahren verwendet werden.

Zu den Zeitpunkten der TM-Aufnahmen bzw. der nächstgelegenen Niederschlagsereignisse werden zusätzlich zwei Parameterdateien mit Bedeckungsgraden bereitgestellt, die aus den TM-Daten nach den ausgewählten Methoden berechnet wurden (Methoden *FE I* und *FE II*). Da hier eine pixelweise Berechnung erfolgte, wird jeder Bodenparameter aus einem Rasterbild eingelesen.

Die eigentlichen Simulationsrechnungen werden anschließend für jedes Niederschlagsereignis durchgeführt. Dabei wird der voreingestellte Depositionskoeffizient von 1.000 übernommen (Gl. 3.7, S. 13).

7 Ergebnisse und Diskussion

7.1 Untersuchung der Koeffizienten

7.1.1 Der bodenspezifische Faktor C

Untersuchung der aus den Spektren abgeleiteten C-Werte

CLEVERS setzt für den Einsatz des C-Wertes zur Berechnung des WDVl voraus, dass das Reflexionsvermögen des vorliegenden Bodens in zwei Kanälen linear zusammenhängt [CLEVERS 1986]. Um diese Voraussetzung zu überprüfen, wurde eine lineare Regression zwischen den simulierten Reflexionsvermögen im roten und nahen infraroten Bereich durchgeführt, die aus den ausgewählten Spektren der Bodenproben abgeleitet wurden. Unter der Bedingung, dass das Absolutglied a gleich 0 ist, korrelieren die Reflexionsvermögen der beiden Kanäle linear relativ gut (Abb. 7.1).

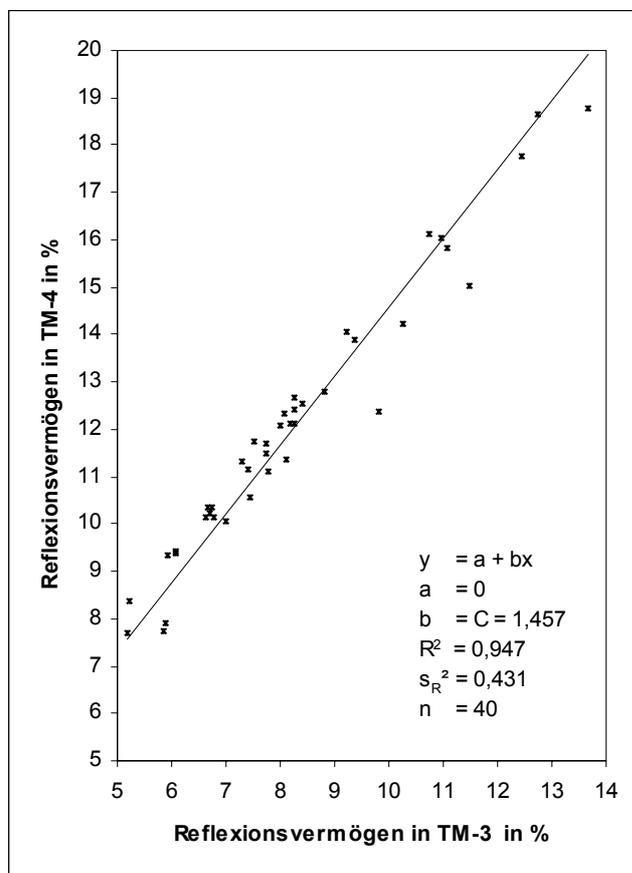


Abb. 7.1: Scatterplot und Regressionsgerade des Reflexionsvermögens ausgewählter Bodenproben in den simulierten Kanälen TM-3 und TM-4.

mögen der beiden Kanäle linear relativ gut (Abb. 7.1).

In Tab. 7.1 (S. 54) werden die C-Werte zusammengefasst, die aus den ausgewählten Spektren berechnet wurden. Die letzten drei Spalten zeigen die Mittelwerte, die Varianz und die Spannweite der C-Werte für die variierten Feuchtegehalte je Probe. Vor allem die Spannweiten verdeutlichen, dass relativ geringe Unterschiede im C-Wert durch simulierte große Feuchtedifferenzen hervorgerufen werden. Ähnliche Ergebnisse stellten sich auch bei den Untersuchungen von CLEVERS [1986] ein (max. Spannweite 0,16).

Die letzten drei Zeilen listen die genannten statistischen Größen für die Proben je Feuchtegehalt auf. Da dieser nicht bestimmt wurde, ist davon auszugehen, dass sie untereinander verschiedene Werte aufweisen. Die aufgeführten Bodenarten wurden von der AG Boden- und Gewässerschutz übernommen.

Durch das Hinzukommen von variierenden Bodeneigenschaften (z. B. Textur, Rauigkeit, organische Bodensubstanz) zeigen sich erwartungsgemäß in den Varianzen und Spannweiten der Zeilen größere Unterschiede als in den entsprechenden Spalten. Obwohl die Probenpunkte über das ganze Untersuchungsgebiet verteilt liegen, stellen sich relativ homogene C-Werte ein. So beträgt die prozentuale max. Abweichung aller C-Werte bezogen auf deren Mittelwert (Tab. 7.1 grau hinterlegt) ca. 23 %.

Tab. 7.1: C-Werte der Bodenspektren mit ihren Mittelwerten und Streuungsmaßen.

Probe	Bodenart nach KA4	C _{org}	C _{lutro}	C _{lutro1}	C _{feucht}	Mittel	Varianz	Spannweite
2	Su3	1,497	1,471	1,483	1,530	1,495	0,001	0,059
7	Ut3	1,488	1,386	1,371	1,549	1,448	0,007	0,178
8	Ut3	1,513	1,562	1,494	1,569	1,534	0,001	0,075
9	Ut2	1,418	1,479	1,506	1,487	1,472	0,001	0,088
101	Ut2	1,545	1,557	1,511	1,598	1,553	0,001	0,088
14	Us	1,317	1,259	1,311	1,339	1,307	0,001	0,080
15	Slu	1,439	1,461	1,429	1,547	1,469	0,003	0,118
151	Uls	1,399	1,455	1,524	1,530	1,477	0,004	0,131
16	Ut2	1,430	1,429	1,465	1,503	1,457	0,001	0,074
17	Su4	1,526	1,526	1,501	1,537	1,522	0,000	0,036
	Mittel	1,457	1,458	1,459	1,519	1,474		0,093
	Varianz	0,005	0,008	0,005	0,005			
	Spannweite	0,228	0,302	0,213	0,259	0,251		

Die Regressionsanalyse und die Untersuchung der C-Werte der Bodenspektren zeigen, dass die Differenzen innerhalb des Untersuchungsgebietes relativ gering sind und eine Anwendbarkeit eines einheitlichen C-Wertes vermuten lassen. Es ist jedoch im Weiteren zu überprüfen, wie stark sich die vorhandenen Differenzen des C-Wertes auf die LAI-Berechnung auswirken können.

Untersuchung der aus den TM-Daten abgeleiteten C-Werte

In Abb. 7.2 werden die aus den TM-Daten berechneten C-Werte für das gesamte Untersuchungsgebiet dargestellt. Es wird ersichtlich, dass zu allen drei Aufnahmezeitpunkten eine relativ gute Verteilung der C-Werte über das Untersuchungsgebiet vorliegt.

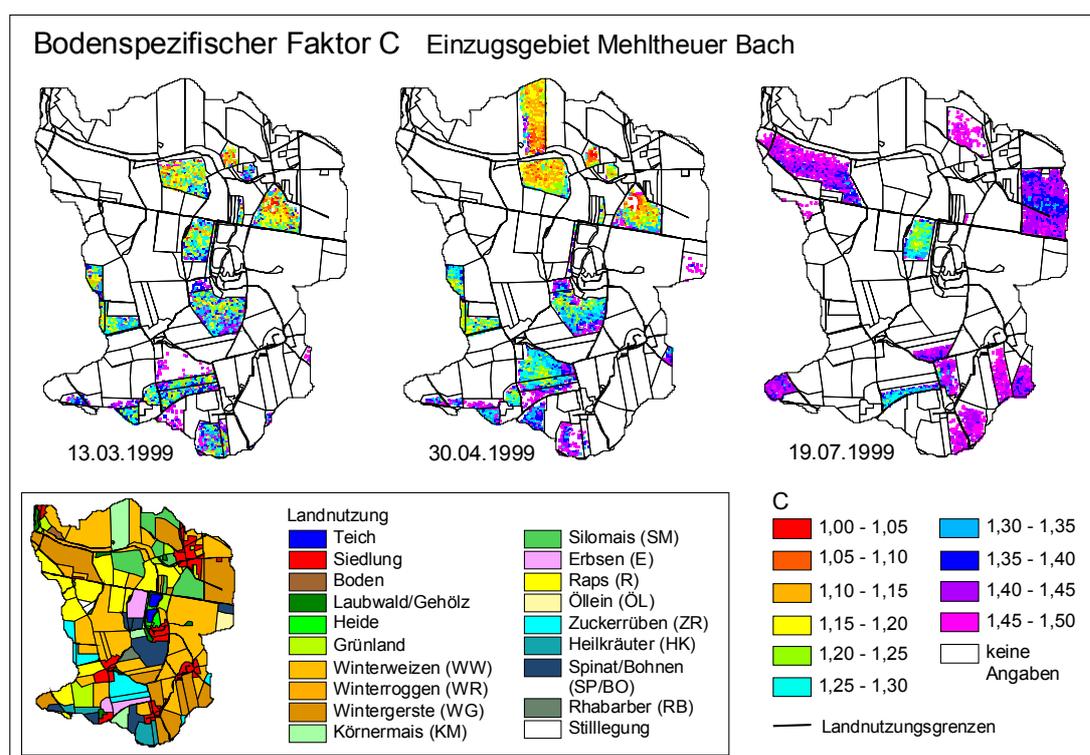


Abb. 7.2: Bodenspezifischer Faktor C aus Landsat-5-TM-Daten.

Szene 1 und 2 weisen ähnliche räumliche Verteilungen und Beträge auf, da beide vor dem vollständigen Auflaufen der Sommerfrüchte und somit unter annähernd gleichen Bedingungen entstanden sind. Gemeinsam mit Szene 3 können etwas mehr als ein Viertel der Gesamtfläche abgedeckt werden. Im Vergleich zu den Spektren wird eine höhere Spannweite zwischen den Messwerten ermittelt.

In Tab. 7.2 werden einige statistische Kenngrößen zu den C-Werten und den zugrunde liegenden Reflexionsvermögen (RV) der verwendeten Szenen aufgelistet.

Tab 7.2: Statistische Kenngrößen zum Reflexionsvermögen (RV) in den Kanälen TM-3 und TM-4 sowie zum C-Wert für alle Aufnahmezeitpunkte.

Parameter	13.03.1999	30.04.1999	19.07.1999	Gesamt
Anzahl der Pixel	18.882	20.574	19.517	58.973
min./max. RV in TM-3 in %	4,75/14,75	6,00/20,50	10,50/31,25	4,75/31,25
Mittelwert des RV in TM-3 in %	9,41	14,27	22,99	15,60
min./max. RV in TM-4 in %	5,00/20,50	8,50/27,50	15,75/45,50	5,00/45,50
Mittelwert des RV in TM-4 in %	12,04	18,07	32,62	20,95
min./max. C	1,02/1,50	1,02/1,50	1,17/1,50	1,02/1,50
Mittelwert des C	1,28	1,27	1,42	1,32
Median des C	1,27	1,27	1,43	1,33
Varianz des C	0,11	0,12	0,06	0,12

Die statistischen Kenngrößen von C bestätigen ein ähnliches Verhalten der Szenen 1 und 2. Ein Vergleich einiger schlagweise berechneter C-Mittelwerte zeigt nur minimale Abweichungen zwischen den zwei Terminen (max. 0,05). Die RV in den Kanälen 3 und 4 sind für Szene 2 höher und streuen etwas mehr als in Szene 1. Das Verhalten resultiert aus veränderten Bodenverhältnissen (z. B. geringere Bodenfeuchte und Rauigkeit in Szene 2), die sich jedoch nicht auf den C-Wert auswirken. In beiden Szenen findet man im oberen Teil des Gebietes niedrigere C-Werte, die durch geringere RV in TM-4 verursacht werden. Diese liegen in Schlägen, die mit Mais bebaut sind und deshalb auf andere Bodeneigenschaften schließen lassen (z. B. Unterschiede in der Bodenbearbeitung/Saatbettbereitung gegenüber anderen Fruchtarten).

Die C-Werte der Szene 3 liegen bei einer geringeren Varianz höher als die der anderen Szenen. Für zwei Gemüseschläge, die in der Mitte und im südlichen Teil des Untersuchungsgebietes liegen, zeigt der Vergleich der C-Werte von Szene 3 und Szene 1, dass die C-Werte sowohl optisch in Abb. 7.2 als auch ihre Mittelwerte bei einer Differenz von 0,02 sehr gut übereinstimmen. Alle anderen C-Werte der Szene 3 entfallen auf Wintergersteschläge und heben sich durch deutlich höhere Beträge ab. Dieses Verhalten wird durch eine stärkere Zunahme des RV im Kanal 4 als im Kanal 3 gegenüber den Szenen 1 und 2 bewirkt. Zudem streuen die höheren RV in beiden Kanälen am 19.07.1999 stärker. Ursache hierfür könnte der Verbleib von Stoppeln oder eine deutlich geringere Rauigkeit nach der Ernte gegenüber den anderen Aufnahmezeitpunkten sein.

Neben den bisher angesprochenen veränderlichen Bodeneigenschaften (z. B. Rauigkeit, Feuchte, Gehalt an organischer Bodensubstanz, Pflanzenrückstände) können trotz Korrektur Resteinflüsse der atmosphärischen Bedingungen zu Variationen des RV in den drei Szenen führen. Beispielsweise wird in ATCOR durch die vereinfachte Annahme von Lambertreflektoren ohne Berücksichtigung der Geländeform die gerichtete Reflexion vernach-

lässigt. Des Weiteren werden für verschiedene Gebiete und Jahreszeiten Standardatmosphären angenommen (Tab. 5.2, S. 38). Diese Resteinflüsse überlagern sich mit den Bodeneigenschaften. Deren jeweiliger Anteil am berechneten RV ist im Nachhinein nicht mehr nachvollziehbar.

Ein Test auf Plausibilität der RV kann durch einen Vergleich von Flächen gleicher Landbedeckung in den drei Szenen erfolgen. Der Vergleich für unbedeckten Boden ist aufgrund der landwirtschaftlichen Nutzung nur für die Szenen 1 und 2 möglich. Im Gegensatz zu Szene 1 fällt der Atmosphäreinfluss und damit die Korrektur in Szene 2 deutlich geringer aus. Da in den Kanälen 3 und 4 unterschiedlich stark korrigiert wird und dennoch in beiden Szenen ähnliche C-Werte berechnet werden, ist zu vermuten, dass der Resteinfluss der Atmosphäre relativ gering ist. Ein Vergleich der RV von Wasser, Nadelwald und geteerten Flächen ergab ein ähnliches Verhalten zu allen drei Aufnahmezeitpunkten, was diese Vermutung unterstützt [RICHTER 2002].

Bei einigen Schlägen fallen C-Werte in Szene 1 und 2 unterhalb der gesetzten Grenze von C größer 1. Da hierfür das RV im Kanal 3 größer oder gleich dem im Kanal 4 sein muss, kann es sich bei diesen Flächen theoretisch nur um Wasser, Schnee oder Dunst handeln. Aufgrund der vorhandenen Temperaturdaten (Tab. V.2) kann ausgeschlossen werden, dass an beiden Terminen Schnee vorlag. Allein auf Dunsteinfluss können die Werte auch nicht zurückzuführen sein, da in Szene 2 mehr Pixel mit dieser Eigenschaft auftreten, diese Szene deutlich geringer atmosphärisch beeinflusst ist und die Atmosphärenkorrektur sich als zuverlässig erwiesen hat. Um zu überprüfen, ob ein verstärkter Wassereinfluss vorhanden ist, wurden die entsprechenden Stellen mit dem Geländemodell und Photos aus Feldbegehungen verglichen. In Abb. 7.3 werden Photos solcher Stellen vom relativ trockenen Frühjahr 2003 gezeigt.



Abb. 7.3: Ansammlung von Wasser am 04.04.2003 auf Schlägen nordwestlich (li.) und südlich (re.) von Mehltheuer.

In nahezu allen Fällen handelt es sich um Senken oder Hänge, an denen sich reliefbedingt verstärkt Wasser ansammeln kann. Da aber die Situation im Untersuchungs-jahr nicht bekannt ist und das vorliegende Verhalten extrem hohe Wasserstände voraussetzt, ist anzunehmen, dass diese C-Werte auf eine Kombination von Wasser- und atmosphärischen Resteinflüssen zurückzuführen sind.

Analog zu den Spektren werden in Abb. 7.4 die Regressionsgeraden der RV von Boden in TM-3 und TM-4 für die drei Szenen dargestellt. Auch hier liegen relativ gute Bestimm-

heitsmaße (R^2) vor. Die etwas geringeren Werte für R^2 am 13.03.1999 und 30.04.1999 resultieren aus der größeren Varianz der C-Werte (Tab. 7.2, S. 55), die auch innerhalb der Schläge sichtbar ist (Abb. 7.2, S.54). Die Regressionsgeraden zu diesen Zeitpunkten unterscheiden sich kaum. Der Teil der Punktwolke vom 19.07.1999, der sich aus den

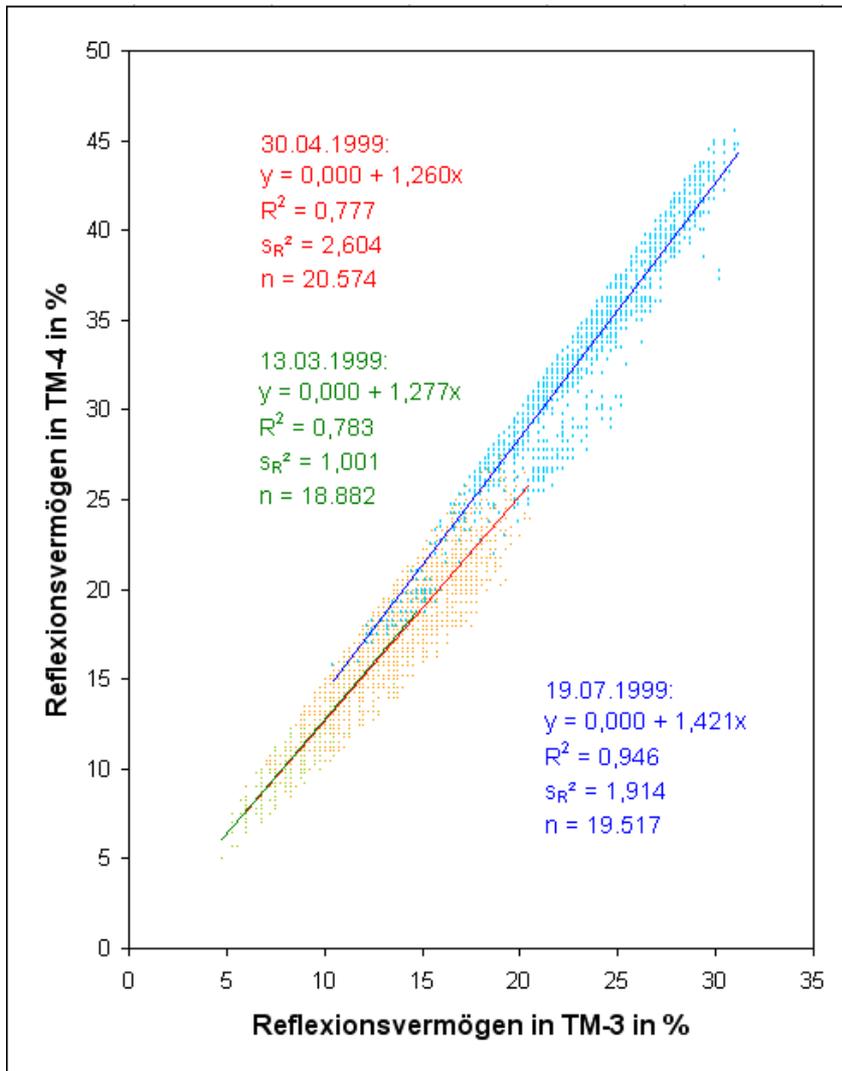


Abb. 7.4: Scatterplot und Regressiongerade des Reflexionsvermögens in den Kanälen TM-3 und TM-4 für alle Aufnahmezeitpunkte.

Gemüseschlägen zusammensetzt, liegt in Verlängerung der Punktwolken der ersten beiden Szenen.

Die Lage der Regressionsgerade des 19.07.1999 wird jedoch vor allem durch die Pixel der Wintergersteschläge beeinflusst. Da diese Schläge höhere RV in Kanal 4 aufweisen, befindet sich die Regressionsgerade oberhalb der anderen beiden Geraden.

Die Lage der Punktwolken und der Regressionsgeraden verdeutlicht das bereits angedeutete Verhalten der C-Werte in den drei Szenen.

Vergleich der C-Werte der Spektren und TM-Daten

In Tab. 7.3 werden die Ergebnisse der C-Werte für beide Datenquellen gegenüber gestellt. Da bei den meisten Schlägen die Randpixel die Kriterien zur C-Berechnung nicht erfüllen und die Proben meist in diese Bereiche fallen, wurde zur Berechnung des C-Wertes aus den TM-Daten das nächstgelegene Pixel bzw. die 3-3-Nachbarschaft herangezogen (\bar{C}_{Pixel}). Zusätzlich wurde der Mittelwert der C-Werte im Schlag berechnet (\bar{C}_{Schlag}). Diese Werte wurden mit den Mittelwerten der verschiedenen Feuchtezustände pro Probe verglichen ($\bar{C}_{\text{Spektren}}$).

Die C-Werte passen relativ gut zusammen. Jedoch zeigen sich für die Beträge vom 13.03.1999 und 30.04.1999 in der letzten Spalte höhere Abweichungen. Demgegenüber sind die C-Werte vom 19.07.1999 etwas höher und die Differenzen geringer, da sie zu

Wintergersteschlägen gehören. Aufgrund der genannten Einschränkungen kann dieser Vergleich nur als Trend angesehen werden.

Tab. 7.3: Vergleich der C-Werte der Spektren und der TM-Daten (13.03.1999, 30.04.1999, 19.07.1999).

Schlag	Probe	$\bar{C}_{\text{Spektren}}$	\bar{C}_{Pixel}	\bar{C}_{Schlag}	$\bar{C}_{\text{Spektren}} - \bar{C}_{\text{Pixel}}$	$\bar{C}_{\text{Spektren}} - \bar{C}_{\text{Schlag}}$
54	2	1,495	1,489	1,434	0,006	0,061
26	14	1,310	1,458	1,473	-0,148	-0,163
354	9	1,472	1,461	1,459	0,011	0,013
309	101	1,553	1,489	1,415	0,064	0,138
326	8	1,534	1,343	1,286	0,191	0,248
			1,294	1,299	0,240	0,235
182	151	1,477	1,436	1,260	0,041	0,217

Insgesamt sind die durchschnittlichen Ergebnisse der TM-Daten etwas niedriger als die der Spektren, was auf:

- unterschiedliche Aufnahmezeitpunkte,
- unterschiedliche Messverfahren (punktuell, flächenhaft) und
- unterschiedliche Messbedingungen (Labor, Feld)

zurückzuführen ist.

Mit den bisherigen Ausführungen wurde gezeigt, dass die ermittelten C-Werte plausibel sind. Im Folgenden soll geklärt werden, wie im Untersuchungsgebiet möglichst repräsentative C-Werte für die LAI-Berechnungen abgeleitet werden können. Generell lassen sich folgende Möglichkeiten identifizieren:

- 1) pixelweise oder schlagbezogene Ableitung der C-Werte aus allen Szenen,
- 2) bodenartenbezogene Ableitung des C-Werte aus allen Szenen,
- 3) Ableitung eines einheitlichen C-Wertes:
 - a) getrennt für jede Szene, b) aus allen Szenen.

Die Methoden (1) und (2) können im vorliegenden Fall nicht angewendet werden, da mit den drei Szenen nicht ausreichend Messwerte vorliegen. Zudem variieren die C-Werte innerhalb der Schläge fast so stark wie im gesamten Untersuchungsgebiet, so dass vor allem ein Vorgehen nach Methode (2) unpraktikabel ist. Daher ist eine der Varianten von Methode (3) bei der vorliegenden Sachlage sinnvoll. Aufgrund des ähnlichen Verhaltens der C-Werte in den Szenen 1 und 2 sowie in den Gemüseschlägen der Szene 3 kann davon ausgegangen werden, dass jahreszeitlich bedingte Unterschiede in der Bodenfeuchte einen relativ geringen Einfluss auf den C-Wert haben. Daher wird im Rahmen der Arbeit angenommen, dass für das vorliegende Untersuchungsgebiet ein einheitlicher C-Wert durch Mittelung dieser Messwerte abgeleitet werden kann. Da die erhöhten C-Werte der Wintergersteschläge mit hoher Wahrscheinlichkeit durch Stoppeln verursacht werden und deshalb den Mittelwert des Untersuchungsgebietes verfälschen, werden sie in die Berechnung nicht einbezogen.

Mit der Festlegung eines Mittelwertes für alle Szenen wird ein Fehler in den darauf aufbauenden Berechnungen verursacht. Wie in Abb. 7.2 und Tab. 7.2 (S. 54, 55) ersichtlich ist, bewegen sich die C-Werte in den Szenen zwischen 1,02 und 1,50. Zur Abschätzung des Einflusses dieser C-Wert-Differenzen auf die LAI-Berechnung nach dem CLAIR-Modell wird eine Sensitivitätsanalyse herangezogen. Durch partielles Ableiten des LAI

nach dem C-Wert kann die Veränderung des LAI bezüglich der Veränderung von C wie folgt berechnet werden:

$$dLAI = - \frac{\beta \cdot \rho_{TM-3}}{\alpha \cdot (1 - \beta \cdot (\rho_{TM-4} - C \cdot \rho_{TM-3}))} \cdot dC \quad (7.1)$$

mit: dLAI Änderung des Blattflächenindex in m^2/m^2 ,
 α Kombination aus Extinktions- und Streuungskoeffizienten,
 β $1/W DVI_{\infty}$ in 1/%,
 C bodenspezifischer Faktor,
 dC Änderung des bodenspezifischen Faktors,
 ρ_{TM-3} Reflexionsvermögen in Kanal TM-3 in %,
 ρ_{TM-4} Reflexionsvermögen in Kanal TM-4 in %.

Die Eingangsgrößen und Ergebnisse der Analyse werden in Abb. 7.5 dargestellt. Zur Berechnung des LAI werden Beispielwerte des RV verschiedener Fruchtarten aus den drei Szenen verwendet. Um die maximalen Differenzen in C zu simulieren, werden die Veränderungen dC bezüglich der C-Werte 1,0 und 1,5 betrachtet. Die maximale Veränderung wird bei einem Mittelwert von 1,28 auf ein dC von 0,3 gesetzt.

	C	ρ_{TM-3} in %	ρ_{TM-4} in %	LAI in m^2/m^2
ZR 1	1,00	2,5	50,0	7,74
ZR 2	1,50	2,5	50,0	6,21
WG 1	1,00	7,5	27,0	1,33
WG 2	1,50	7,5	27,0	1,04
WG 3	1,00	1,8	49,5	4,73
WG 4	1,50	1,8	49,5	4,57
WW 1	1,00	9,0	23,8	0,94
WW 2	1,50	9,0	23,8	0,62
WW 3	1,00	1,5	47,3	9,08
WW 4	1,50	1,5	47,3	7,90

ZR Zuckerrübe
 WG Wintergerste
 WW Winterweizen
 (α und β nach Anhang I Tab. I.3)

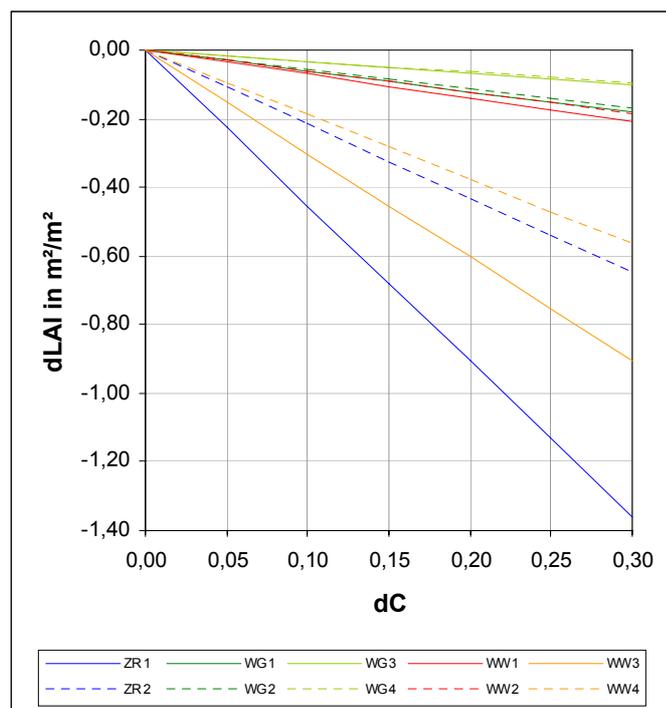


Abb. 7.5: Sensitivitätsanalyse für das CLAIR-Modell bezüglich des C-Wertes am Beispiel von Zuckerrüben, Wintergerste und Winterweizen.

Aus der Analyse (Abb. 7.5) lassen sich folgende Aussagen ableiten:

- Mit zunehmendem C wird der LAI kleiner; ebenso bewirkt eine positive Änderung dC ein negatives dLAI bzw. eine Verkleinerung des LAI und umgekehrt (α , β , ρ_{TM-3} , ρ_{TM-4} = const).
- Mit zunehmendem C wirkt sich die Änderung dC auf die Änderung dLAI weniger aus, d. h. dLAI sind kleiner (α , β , ρ_{TM-3} , ρ_{TM-4} = const).
- Analog zieht die Änderung dC eine geringere Änderung dLAI mit zunehmendem α oder ρ_{TM-4} sowie mit abnehmendem β oder ρ_{TM-3} nach sich (die übrigen Größen sind jeweils konstant).

- Aus den Parametern α , β , ρ_{TM-3} , ρ_{TM-4} , C folgt der Anstieg der Geraden; für die vorliegenden Fälle resultieren aus diesen Parametern der größte Anstiegsbetrag und damit die größten Beträge des dLAI für ZR 1.
- Bezüglich des jeweiligen LAI bewegen sich die prozentualen dLAI bei $dC = 0,3$ für die vorliegenden Beispiele zwischen 2,1 % (WG 4) und 22,2 % (WW 2).
- Die dLAI zeigen, dass die Sensitivität des CLAIR-Modells gegenüber dem C-Wert nicht vernachlässigbar klein ist.

Die Untersuchungen dieses Abschnittes zeigen, dass die Differenzen des C-Wertes für verschiedene Bodenfeuchten im Untersuchungsgebiet relativ gering sind und bestätigen somit die Ergebnisse von CLEVERS [1986]. Um jedoch sicherere Aussagen über das Verhalten des C-Wertes in einem Gebiet treffen zu können, ist es sinnvoll, eine größere Anzahl von Datensätzen zu verschiedenen Zeitpunkten in mehreren landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsjahren zu analysieren.

7.1.2 Die Koeffizienten k_{LAI} und $WDVI_{\infty}$ zur Berechnung des Blattflächenindex

Die ermittelten Koeffizienten des CLAIR-Modells werden in Tab. 7.4 zusammengefasst. Die Koeffizienten, für die auch Vergleichswerte aus der Literatur vorliegen, sind grau hinterlegt. Des Weiteren werden die zu den drei Aufnahmezeitpunkten berechneten Geometriefaktoren und Sonnenzenitwinkel aufgeführt, aus denen die k_{LAI} berechnet werden (s. 4.3.3, S. 26). Die Werte G_{LAI} und k_{LAI} werden nur ermittelt, wenn entsprechend der Wachstumsperiode eine Abschätzung des Blattflächenindex bzw. des Bedeckungsgrades möglich ist.

Tab. 7.4: Geschätzte Koeffizienten (G_{LAI} , k_{LAI}) je Fruchtart und Aufnahmezeitpunkt für das CLAIR-Modell.

Datum Sonnenzenitwinkel in 1°		13.03.1999 58,168		30.04.1999 40,275		19.07.1999 35,055		WDVI _∞ in %
Fruchtart	Abkürzung	G_{LAI}	k_{LAI}	G_{LAI}	k_{LAI}	G_{LAI}	k_{LAI}	
Körnermais	KM	-	-	0,544	0,713	0,554	0,677	45,70
Zuckerrüben	ZR	-	-	0,574	0,753	0,592	0,723	52,96
Silomais	SM	-	-	0,544	0,713	0,554	0,677	42,77
Spinat	SP	0,499	0,945	0,574	0,753	-	-	44,22
Rhabarber	RB	0,499	0,945	0,574	0,753	0,592	0,723	53,66
Öllein	ÖL	-	-	0,609	0,799	0,637	0,778	37,01
Heilkräuter	HK	-	-	0,574	0,753	0,592	0,723	47,30
Wintergerste	WG	0,500	0,949	0,526	0,689	-	-	49,72
Raps	R	0,494	0,937	0,609	0,799	-	-	52,93
Winterroggen	WR	0,500	0,949	0,506	0,663	-	-	53,01
Winterweizen	WW	0,500	0,947	0,494	0,648	-	-	50,60
Bohnen	BO	-	-	-	-	0,632	0,773	29,22
Erbsen	E	-	-	0,606	0,795	0,632	0,773	32,81

Die Geometriefaktoren G_{LAI} werden durch die Inklinationsindizes χ_L (s. Anhang I, Tab. I.6) und die Sonnenzenitwinkel geprägt. Nach den χ_L ist die Blattwinkelverteilung der Getreide nahezu uniform. Während Weizen eine leichte erektophile Tendenz aufweist, zeigen die an Zuckerrüben angelehnten Werte (ZR, SP, RB) eine größere planophile Tendenz. Bei Sonnenzenitwinkeln von ca. 58° liegen die Geometriefaktoren dieser Verteilungen

definitionsbedingt bei etwa 0,5. Sie steigen (horizontale Blätter) bzw. fallen (vertikale Blätter) mit abnehmendem Sonnenzenitwinkel. Die Koeffizienten k_{LAI} sind im Vergleich zu den Werten von CLEVERS [1991] und BOUMAN et al. [1992] relativ hoch. Diese Differenzen folgen aus den unterschiedlichen Messansätzen (Regression mit Boden- oder Flugzeugmessungen bzw. empirische Berechnung aus Inklinationsindex) und der Beobachtungsgeometrie. Zudem wird bei den genannten Autoren ein k_{LAI} unabhängig von verschiedenen Sonnenständen und Änderungen der Pflanzengeometrie in der Vegetationsperiode bestimmt.

Für die Berechnung des $WDVI_{\infty}$ wird, wie unter 6.2.2.3 (S. 45) angedeutet, der durchschnittliche $WDVI_d$ für den Schlag einer Fruchtart zum Tag d verwendet. Aus den $WDVI_{\infty}$ aller Schläge für eine Fruchtart wird anschließend der maximale Wert gewählt. Gleichzeitig wurde untersucht, ob alternativ der maximale $WDVI_d$ eines Schlages verwendet werden kann. Es zeigt sich, dass besonders hohe $WDVI_d$ relativ hohe $WDVI_{\infty}$ verursachen (z. B. BO 40,94), da der $WDVI_d$ nach Gl. 6.3 (S. 45) im Zähler steht. Diese bewirken einen flacheren Verlauf der LAI-Kurve nach dem CLAIR-Modell und somit geringere LAI. Um solche Ausreißer auszuschließen, wird der durchschnittliche $WDVI_d$ gewählt.

Weitere Extremwerte entstehen bei spät gesäten WW-Schlägen. Zum Tag d wird ein relativ geringer Anteil am LAI_{max} ($fr_{LAI_{max},d}$) modelliert und somit ein unrealistisch hoher $WDVI_{\infty}$ berechnet (z. B. 78,52 % bei einer Aussaat Mitte November). Da bei den meisten WW-Schlägen im Oktober ausgesät wurde, werden die hohen $WDVI_{\infty}$ durch eine Aussaat Ende Oktober/Anfang November nicht berücksichtigt.

Neben dem Aussaattermin wird der $WDVI_{\infty}$ beim Verwenden des Wachstumsmodells durch dessen interne Parameter beeinflusst. Hierzu gehören die potenziell erreichbaren Wärmeeinheiten PHU, der maximale Blattflächenindex LAI_{max} , der Anteil am PHU, an dem der LAI abfällt, $fr_{PHU,sen}$ und die Formparameter l_1 , l_2 (s. Anhang III). Diese Parameter werden, soweit nicht unter 6.2.4 anders angegeben, von den Voreinstellungen aus SWIM übernommen. Für eine Optimierung der $WDVI_{\infty}$ -Abschätzung müssten diese im Feld für die verschiedenen Fruchtarten überprüft werden. Des Weiteren wirkt sich ein erhöhter k_{LAI} analog dem $fr_{LAI_{max},d}$ auf den $WDVI_{\infty}$ mit einer Verringerung aus.

Der asymptotische Wert $WDVI_{\infty}$ für die Fruchtarten ZR, WW, WG (in Tab. 7.4 grau hinterlegt) ist im Vergleich zu den Ergebnissen von BOUMAN et al. [1992] trotz eines höheren k_{LAI} etwas höher. Verursacht wird dieses Verhalten vor allem durch relativ hohe $WDVI_d$ im Vergleich zu den empirisch ermittelten $WDVI_{\infty}$. Hingegen ist der von CLEVERS [1991] ermittelte $WDVI_{\infty}$ um einiges größer, was größtenteils mit dem geringeren k_{LAI} zusammenhängt. Diese Differenzen lassen sich neben der Art der Ermittlung (Regression mit Boden- oder Flugzeugmessungen bzw. aus TM-Daten und Wachstumsmodell) durch Sortenunterschiede oder standort- und bearbeitungsbedingte Unterschiede begründen. Der für Erbsen ermittelte $WDVI_{\infty}$ stellt eine grobe Näherung dar, da der verwendete Aufnahmezeitpunkt nach dem Erreichen des maximalen LAI liegt.

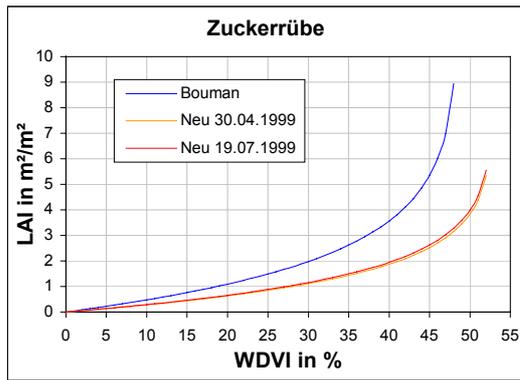


Abb. 7.6: Vorhandene und ermittelte LAI-Beziehungen nach dem CLAIR-Modell für Zuckerrüben.

Für einen direkten Vergleich der Beziehungen wird in den Abb. 7.6 und 7.7 der LAI über dem WDV für ZR, WW und WG aufgetragen. Die in der Arbeit ermittelten Kurven werden als *Neu* bezeichnet. Bedingt durch die geringeren k_{LAI} und $WDVI_{\infty}$ verlaufen die von BOUMAN et al. [1992] ermittelten Kurven steiler als die nach dem neuen Verfahren. Für die Kurve nach CLEVERS [1991] gilt genau das Gegenteil. Es entstehen relativ große Unterschiede im LAI mit zunehmendem WDV.

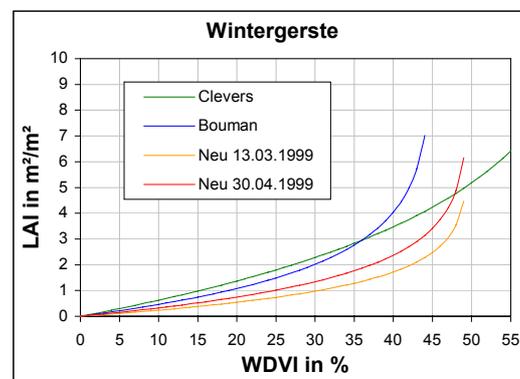
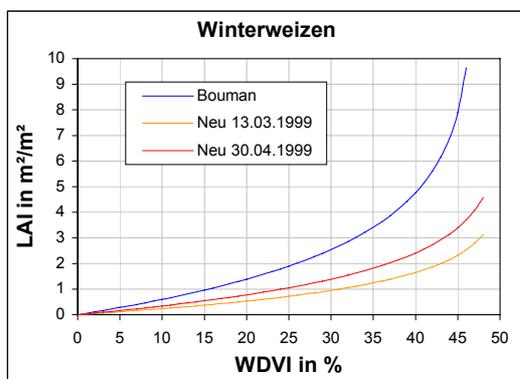


Abb. 7.7: Vorhandene und ermittelte LAI-Beziehungen nach dem CLAIR-Modell für Winterweizen und Wintergerste.

Im Folgenden wird der Einfluss von Fehlern bei der Koeffizientenabschätzung auf die LAI-Berechnung aufgezeigt. Dazu wird analog zum C-Wert Gl. 4.10 (S. 25) nach der jeweiligen Größe partiell abgeleitet. Es ergeben sich die Gl. 7.2 und 7.3.

$$dLAI = \frac{1}{\alpha^2} \ln(1 - \beta \cdot WDV) \cdot d\alpha \quad (7.2)$$

$$dLAI = \frac{WDV}{\alpha(1 - \beta \cdot WDV)} \cdot d\beta \quad (7.3)$$

mit:

- dLAI Änderung des Blattflächenindex in m^2/m^2 ,
- α Kombination aus Extinktions- und Streukoeffizienten,
- β $1/WDVI_{\infty}$ in 1/%,
- $d\alpha$ Änderung des Koeffizienten α ,
- $d\beta$ Änderung des Koeffizienten β in 1/%,
- WDVI Weighted Difference Vegetation Index in %.

Die Untersuchung wird für die Koeffizienten nach BOUMAN et al. [1992] und CLEVERS [1991] bei WDV-Werten von 10 % und 40 % durchgeführt. Als maximale Änderungen der Koeffizienten werden die größten auftretenden Unterschiede zwischen den Methoden bei einer Fruchtart eingesetzt ($d\alpha = 0,7$ und $d\beta = 0,008$). Die Ergebnisse werden in Abb. 7.8 dargestellt. Die Abb. 7.8 zeigt für α und β eine größere Sensitivität des CLAIR-Modells als

gegenüber dem C-Wert. Während α indirekt zum LAI proportional ist, verhält sich β direkt proportional. Die Anstiege der Kurven werden durch α , β und WDWI bestimmt. Besonders ein hoher WDWI bewirkt in beiden Fällen hohe dLAI-Beträge aufgrund des asymptotischen Verhaltens.

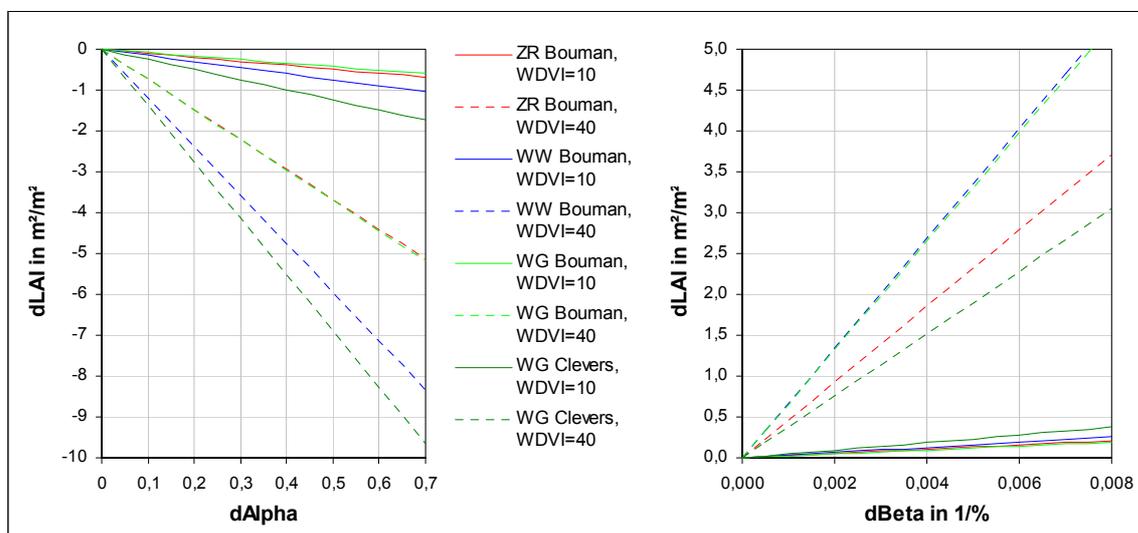


Abb. 7.8: Sensitivitätsanalyse des CLAIR-Modells bezüglich der Koeffizienten α und β am Beispiel von Zuckerrüben, Winterweizen und Wintergerste.

Die Reihenfolge zwischen den Kurven für gleiche WDWI wird bei der Ableitung nach α besonders durch das α der Fruchtart beeinflusst, da diese Größe quadratisch eingeht (s. Gl. 7.3). Demzufolge zeigt *WG Clevers* die größten dLAI, da α mit 0,252 am kleinsten ist.

Bei der Ableitung nach β hat das Verhalten des WDWI bezüglich β den größten Einfluss auf die Reihenfolge. Je näher der WDWI dem $WDVI_{\infty}$ kommt, desto steiler verläuft die Kurve. Mit einem WDWI von 40 liegen für *WG Bouman* und *WW Bouman* die $WDVI_{\infty}$ am nächsten (44,98 % und 46,99 %).

Die Ergebnisse dieses Abschnitts zeigen, dass sich die ermittelten Koeffizienten und somit LAI-Kurven deutlich von bestehenden unterscheiden. Nach der Sensitivitätsanalyse sind diese Unterschiede für die LAI-Berechnung ausschlaggebend. Die höchste Sensitivität weist das CLAIR-Modell gegenüber dem β -Wert auf, da für große WDWI aufgrund der asymptotischen Eigenschaften große Unterschiede im LAI entstehen. Die ermittelten Kurven werden in Abschnitt 7.2 angewendet und auf Plausibilität für das vorliegende Untersuchungsgebiet getestet.

7.1.3 Der Koeffizient k_B zur Berechnung des Bedeckungsgrades

Die Koeffizienten k_B für jede Fruchtart werden in Tab. 7.5 (S. 64) aufgelistet. Analog Tab. 7.4 werden die k_B nur für Termine dargestellt, für die der Bedeckungsgrad aus den Satellitendaten berechnet werden kann. Da der Sonnenzenitwinkel im vorliegenden Fall null ist, sind die G_B -Werte gleich den k_B -Werten. Aus dem selben Grund sind die G_B größer (horizontale Blätter) bzw. kleiner (vertikale Blätter) als die G_{LAI} . Der Einfluss des k_B auf die Genauigkeiten der Ergebnisse wird in einer weiteren Sensitivitätsanalyse untersucht. Hierfür wird der Bedeckungsgrad partiell nach k abgeleitet (Gl. 7.4):

$$dB = LAI \cdot e^{-k \cdot LAI} \cdot dk \quad (7.4)$$

mit: dB Änderung des Bedeckungsgrades,
 k Extinktionskoeffizient,
 LAI Blattflächenindex in m^2/m^2 ,
 dk Änderung des Koeffizienten k.

Tab. 7.5: Geschätzte Koeffizienten (k_{LAI}) je Fruchtart und Aufnahmezeitpunkt für die Berechnung des Bedeckungsgrades.

Datum	13.03.1999	30.04.1999	19.07.1999
Fruchtart	k_B	k_B	k_B
Körnermais (KM)	-	0,587	0,587
Zuckerrüben (ZR)	-	0,651	0,651
Silomais (SM)	-	0,587	0,587
Spinat (SP)	0,651	0,651	-
Rhabarber (RB)	0,651	0,651	0,651
Öllein (ÖL)	-	0,725	0,725
Heilkräuter (HK)	-	0,651	0,651
Wintergerste (WG)	0,551	0,551	-
Raps (R)	0,725	0,725	-
Winterroggen (WR)	0,511	0,511	-
Winterweizen (WW)	0,489	0,489	-
Bohnen (BO)	-	-	0,718
Erbsen (E)	-	0,718	0,718

In Abb. 7.9 werden der Bedeckungsgrad für verschiedene k und die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse dargestellt. Letztere wird für ein k von 0,5 und verschiedene LAI-Werte durchgeführt.

Der Extinktionskoeffizient k verhält sich direkt proportional zum Bedeckungsgrad. Der Zunahmebetrag des Bedeckungsgrades ist vom LAI abhängig. Die größten Unterschiede

treten bei mittleren LAI auf (Abb. 7.9b bei LAI = 2). Zu kleineren und größeren Werten hin wird die Differenz kleiner. Dieses Verhalten bedeutet, dass gerade in den für die Erosionsmodellierung relevanten Bedeckungsgraden eine höhere Empfindlichkeit gegenüber k vorhanden ist. Allerdings sind die Differenzbeträge für mögliche dk im vertretbaren Rahmen (z. B. $dk = 0,2$, $dB = 15\%$).

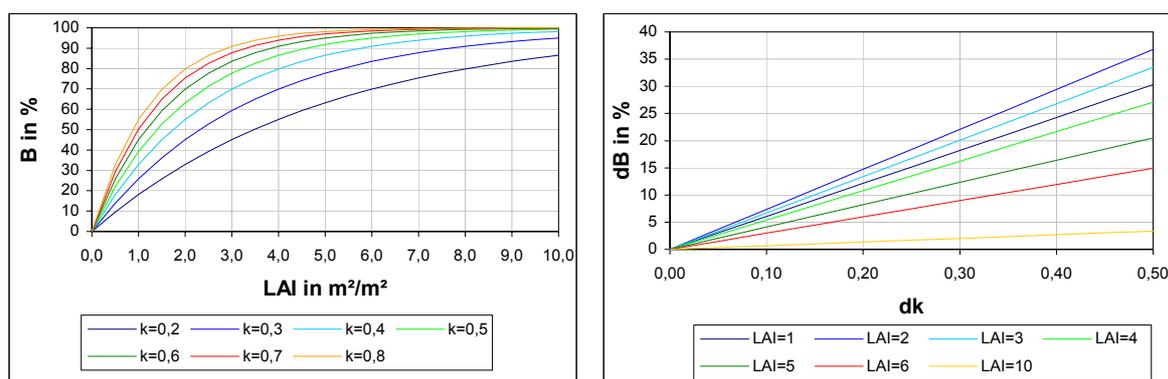


Abb. 7.9: a) Bedeckungsgrad für verschiedene Extinktionskoeffizienten k_B (li.) und b) Sensitivitätsanalyse bezüglich k_B (re.).

7.2 Parameter aus TM-Daten

7.2.1 Der Blattflächenindex

Der Blattflächenindex wird aus den drei Szenen mit acht Methoden entsprechend 6.2.3 (S. 46) berechnet. Methodennamen werden im Folgenden immer kursiv geschrieben. Eine Darstellung des LAI für ausgesuchte Methoden erfolgt in Abb. 7.10 (S.67). Neben der Methode *Neu* (I) wird je Fruchtart eine weitere Methode gewählt (II). Beide werden jeweils in die spätere Berechnung des Bedeckungsgrades einbezogen. In der Tab. VI.1 (Anhang VI) werden die zugehörigen minimalen, durchschnittlichen und maximalen LAI-Werte je Fruchtart und Aufnahmetermin aufgelistet. Ebenso werden die Differenzbeträge zwischen diesen Methoden dargestellt, die je Fruchtart aus den Bildern berechnet werden. Im Folgenden werden die Ergebnisse für jede Fruchtart diskutiert und auf Plausibilität geprüft.

Körnermais (KM), Silomais (SM)

Körner- und Silomais werden Mitte bis Ende April gesät. Daher sind aus Szene 2 nur sehr geringe LAI an den Rändern für den etwas früher eingebrachten SM erkennbar. Diese resultieren aus bewachsenen Randstreifen und aus Pixeln benachbarter Schläge, die durch Restdifferenzen nach der geometrischen Korrektur falsch zugeordnet sind. Eine eigentliche LAI-Berechnung ist in Szene 3 möglich. Sie liegt kurz vor der Maisblüte (ca. Ende Juli) und somit kurz vor dem Erreichen des maximalen LAI [GEISLER 1983].

Während nach *Wiegand* ein Großteil der Pixel den maximalen LAI erreicht, erfolgt mit *Gilabert* eher eine Unterschätzung (2,0 - 3,0). Realistischere Ergebnisse liefern *Bach*, *Choudhury* und *Neu*. Hierbei zeigt *Bach* relativ homogene Werte um ca. 4,0 bis 5,0. Die Werte von *Choudhury* und *Neu* sind stärker gestreut. Sie liegen zwischen 2,0 und 10,0, wobei *Choudhury* im Durchschnitt höhere Werte aufweist.

Neben *Neu* wird für eine weitere Untersuchung *Bach* gewählt. Bei *Bach* ist davon auszugehen, dass sich diese Beziehung am ehesten auf das vorliegende Untersuchungsgebiet übertragen lässt, da die Beziehung im Raum Deutschland abgeleitet wurde (s. Anhang I, Tab. I.1). Die Differenzen zwischen *Bach* und *Neu* liegen durchschnittlich bei 1,2 (KM) und 1,7 (SM). Einige Schläge weisen nach *Neu* besonders hohe LAI-Werte auf (z. B. südlich von Mehltheuer), wodurch besonders hohe Differenzen von über 5,0 entstehen. Es ist davon auszugehen, dass *Bach* bei einer leichten Unterschätzung die besten Ergebnisse liefert.

Zuckerrüben (ZR)

Bei einer Saat Anfang April sind für Zuckerrüben ebenfalls sehr geringe LAI-Werte in Szene 2 zu finden. Szene 3 liegt zeitlich noch deutlich vor Erreichen des maximalen LAI, das etwa auf Ende August datiert wird [GEISLER 1983, PETR et al. 1983]. Bei *Chen* und *Bouman* wird zum 19.07.1999 für einen Großteil der Pixel der definierte maximale LAI (6, s. Tab. 6.1, S. 46) erreicht, da zu diesem Zeitpunkt verhältnismäßig hohe Vegetationsindizes auftreten. Die geringeren Werte nach *Neu* von durchschnittlich 2,0 bis 4,0 lassen sich mit den Literaturangaben besser vereinbaren. Für weitere Untersuchungen werden *Neu* und *Bouman* verwendet, da sich beide auf das CLAIR-Modell stützen. Die Differenzen zwischen diesen Methoden betragen im Durchschnitt 2,0.

Spinat (SP)

Spinat wird im Untersuchungsgebiet als Winter- und Frühjahrsfrucht Mitte September bzw. Mitte April angebaut. Der Winterspinat erreicht in Szene 1 im Durchschnitt einen LAI unter 1,0. Für die Methoden *Bouman* und *Neu* übersteigt er stellenweise 3,0 mit relativ geringen Differenzen ($dLAI = 0,3$). Bei *Chen* sind die LAI-Werte deutlich geringer. In Szene 2 steigt der LAI des Winterspinats auf Werte zwischen 1,0 und 3,0 für *Bouman* und *Neu*, während die Methode *Chen* wiederum geringere LAI aufweist. Die im April gesäten Schläge zeigen sehr kleine Werte unter 1,0. In Szene 3 liegt auf keinem der Schläge Spinat vor. In die folgenden Berechnungen werden *Neu* und *Bouman* aufgrund ihrer realistischeren Ergebnisse einbezogen.

Rhabarber (RB)

Rhabarber ist auf einem Schlag zu finden und wurde im Oktober gepflanzt. Er wird aufgrund seiner Verwandtschaft wie auch der Spinat als Zuckerrübe behandelt. In Szene 1 zeigt sich ein LAI unter 1,0 für alle Methoden. Deutliche Unterschiede sind in Szene 2 zu erkennen. Hier nimmt der LAI zwischen den Methoden *Neu*, *Chen* und *Bouman* zu. Die höchsten LAI werden in Szene 3 bei *Bouman* und *Chen* für nahezu alle Pixel mit einem maximalen LAI von 6,0 erreicht. Nach *Neu* beträgt der Durchschnitt in Szene 3 den Wert 3,4. Es werden die Methoden *Bouman* und *Neu* ausgewählt. Deren Differenzen sind in den Szenen 2 (2,2) und 3 (1,4) am größten.

Öllein (Öl)

Bei Öllein handelt es sich um eine weitere Sommerfrucht, die zum Zeitpunkt der Szene 1 noch nicht angebaut ist und in Szene 2 zu geringe Werte zeigt. Aufgrund der kurzen Vegetationsdauer [GEISLER 1983] wird Öl vermutlich zum dritten Aufnahmetermin das LAI-Maximum erreicht haben oder kurz dahinter liegen. In Abb. 7.10 ist ersichtlich, dass sich auf dem Öl-Schlag Gebiete mit unterschiedlichen Anbaueigenschaften abgrenzen lassen, die im Nachhinein nicht mehr nachvollziehbar sind. Nach *Chen* liegt der LAI durchschnittlich bei 1,4 mit einem Maximum von 3,3. *Neu* liefert hier sichtbar höhere Werte mit einem Durchschnitt von 3,5, die entsprechend den Angaben nach GEISLER realistischer sind. Die Differenz beträgt im Mittel 2,2.

Heilkräuter (HK)

Die Heilkräuter wurden im Untersuchungsgebiet im April angebaut. In Szene 2 findet man somit sehr geringe LAI. Da nicht bekannt ist, um welche speziellen Pflanzen es sich handelt, ist es schwierig, den LAI einzuschätzen. *Bouman* und *Neu* zeigen ähnliche LAI, wobei letztere mit durchschnittlich 3,4 etwas niedriger sind. Ein entgegengerichtetes Einstufen der Schläge ist nach *Chen* zu erkennen. Die kleinen, links gelegenen Schläge haben einen höheren LAI als die größere, rechtsgelegene Fläche (s. Abb. 7.10). Dieses Verhalten ergibt sich durch die unterschiedlichen Konzepte, die den Vegetationsindizes zugrunde liegen. Bei der Methode *Chen* wird der RVI und im CLAIR-Modell der WdVI eingesetzt. Das Reflexionsvermögen (RV) der rechtsgelegenen Schläge im NIR (z. B. 52 %) ist deutlich höher als das der linksgelegenen (z. B. 47 %). Folgerichtig ist auch der WdVI höher. Da aber das RV im roten Kanal geringfügig höher ist (z. B. rechts 5,8 %, links 2,8 %), nimmt der RVI eine verfälschte Einstufung vor. Um die Auswirkungen dieser Differenzen im Bedeckungsgrad zu überprüfen, werden die Methoden *Neu* und *Chen* weiterverfolgt.

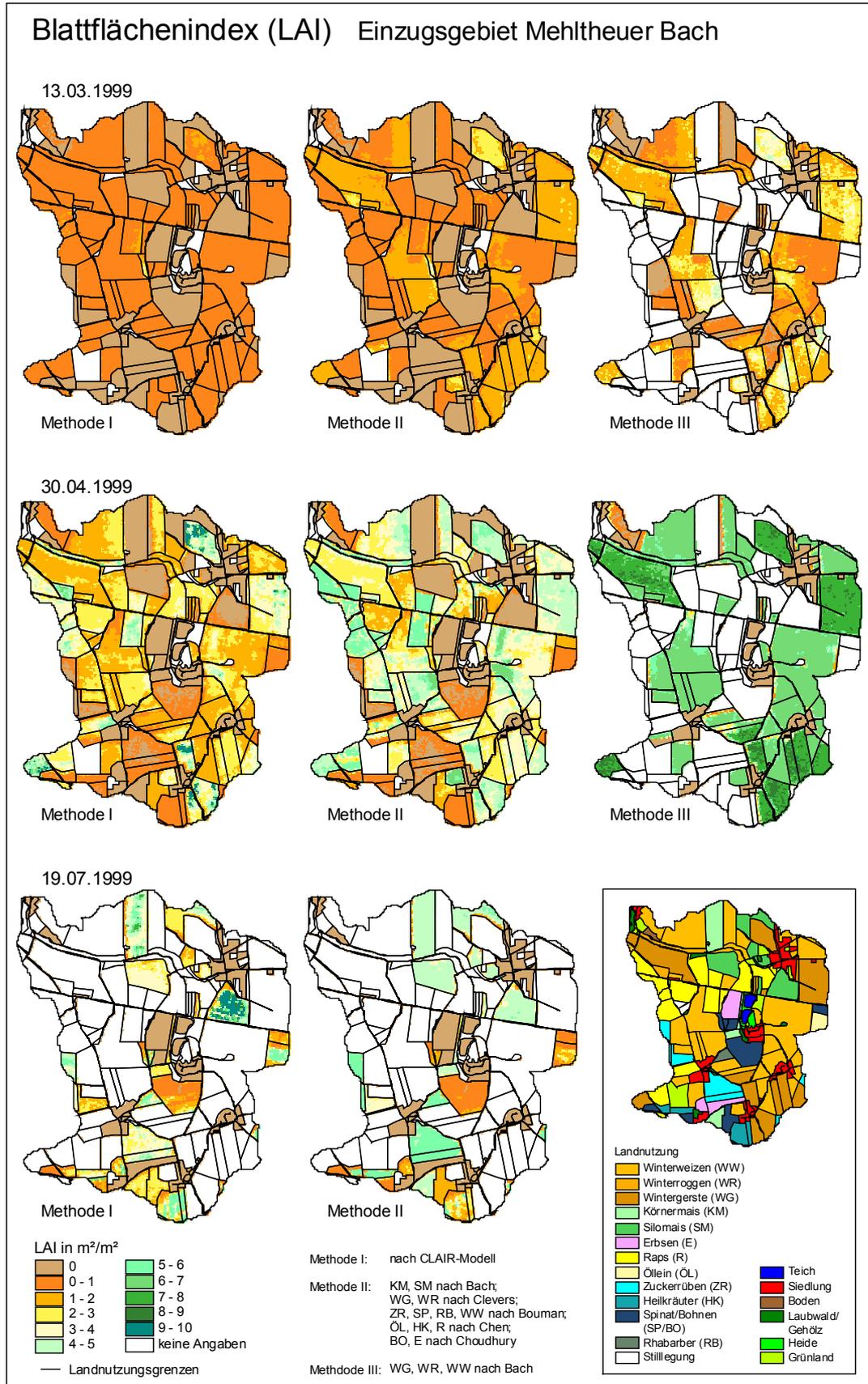


Abb. 7.10: Mit verschiedenen Methoden berechneter Blattflächenindex für die Aufnahmezeitpunkte 13.03.1999, 30.04.1999, 19.07.1999.

Wintergerste (WG), Winterroggen (WR), Winterweizen (WW)

Getreide wurde im gesamten Untersuchungsgebiet als Winterfrucht angebaut. Die ersten zwei Aufnahmezeitpunkte fallen somit in die Bestockung bzw. an das Ende des Bestockungszeitraums. Szene 3 liegt zeitlich im Reifeprozess. Folglich ist eine LAI-Berechnung nur in den Szenen 1 und 2 möglich. Unterschiede zwischen diesen Fruchtarten bestehen in einer früheren und stärkeren Bestockung der WG gegenüber dem WW und einem besonders starken Bestockungspotenzial bei WR [GEISLER 1983, PETR et al. 1983].

In Szene 1 ergeben sich die niedrigsten LAI für die Methoden *Neu*, *Chen* und *Wiegand*, bei denen nur in wenigen Fällen der Wert 1,0 überstiegen wird. Bei *Neu* werden diese durch das vergleichsweise hohe k_{LAI} verursacht, das mit einer Dämpfung der LAI-Funktion verbunden ist. Durchschnittliche Werte über 1,0 liefern dagegen *Bouman* und *Clevers*. Die höchsten Werte zeigen sich bei *Bach* mit LAI-Werten bis über 4,0. Bei allen Verfahren wird der LAI für WW bis auf einige Schläge im Süden, die vergleichsweise früh gesät wurden, niedriger eingestuft als für WG. Der nordwestlich gelegene WR-Schlag verhält sich ähnlich wie WG.

In Szene 2 liefert *Neu* die niedrigsten Werte. Für hohe WDWI steigt der LAI aufgrund der ermittelten Koeffizienten sprunghaft auf die zugelassenen Maximalwerte an. Bei *Clevers* stellen sich weniger stark gestreute LAI bei einem höheren Durchschnitt ein. *Bouman* errechnet für viele WG-Pixel den maximalen LAI, da der WDWI_∞ an diesen Stellen überschritten wird. Bei *Wiegand* und *Chen* werden ebenfalls für die meisten WG- und WW-Pixel die Maximalwerte erreicht. Der LAI von WG beträgt nach *Bach* durchschnittlich über 7,0. Der LAI von WW erlangt in den meisten Fällen sein Maximum. Die hohen Werte sind unrealistisch, da zu diesem Zeitpunkt besonders für WW noch ein weiterer Anstieg des LAI zu erwarten ist.

Auch am 30.04.1999 (Szene) stufen die Verfahren die meisten WG-Pixel höher als WW ein. Als problematisch erweist sich der WR, da wie bei den Heilkräutern die ratio-basierten Vegetationsindizes RVI und NDVI (*Chen*, *Wiegand*, *Bach*) den WR kleiner einschätzen als WG oder WW. Der WDWI (*Clevers*, *Bouman*, *Neu*) ergibt hingegen eine umgekehrte Reihenfolge. In Tab. 7.6 wird der Sachverhalt am Beispiel einiger Pixel dargestellt. Hierin wird sichtbar, dass die ratio-basierten Indizes auf eine Erhöhung im roten Kanal gegenüber einer Erhöhung im NIR empfindlich reagieren und eine Unterbewertung vornehmen. So werden trotz höherer NIR-Werte WR und R niedriger eingestuft als WG und WW.

Tab. 7.6: Reflexionsvermögen und Vegetationsindizes für ausgewählte Pixel von WG-, WR-, R- und WW-Schlägen.

Fruchtart	WG (54)	WG (54)	WG (109)	WR (123)	WR (123)	R (138)	WW (163)
Grün in %	2,5	1,8	4,0	5,5	5,0	5,5	1,8
Rot in %	1,5	0,8	1,5	4,3	3,8	3,8	1,5
NIR in %	36,0	40,0	45,3	56,5	55,3	55,5	31,8
RVI	24,0	53,3	30,2	13,3	14,6	14,8	21,2
NDVI	0,92	0,96	0,94	0,86	0,87	0,87	0,91
WDVI in %	34,1	39,0	43,3	51,1	50,4	50,7	29,8

Aufgrund der besseren Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse werden *Clevers* für WG und WR sowie *Bouman* für WW in die weiteren Untersuchungen einbezogen. Neben der Berechnung nach *Neu* wird zusätzlich die Methode von *Bach* in Abb. 7.10 berücksichtigt, da

sie unter den Funktionen, die sich auf ratio-basierte Vegetationsindizes stützen, die sinnvollsten Ergebnisse liefert. Am 13.03.1999 zeigen sich geringere Differenzen von *Clevers/Bouman* zu *Bach* als zu *Neu*. Hingegen am 30.04.1999 stellen sich geringere Differenzen zwischen *Clevers/Bouman* und *Neu* mit Mittelwerten je Fruchtart von unter 1,6 ein. Für WG übersteigt der Mittelwert der Differenzen zwischen *Clevers/Bouman* und *Bach* 3,0.

Raps (R)

Analog zum Getreide wird Raps als im Einzugsgebiet des Mehltheuer Baches vorkommende Winterfrucht mit den Szenen 1 und 2 beobachtet. Das LAI-Maximum wird in etwa Ende April bis Anfang Mai erreicht. Bereits mit Beginn der Blüte ist der LAI schon stark rückläufig [GEISLER 1983]. Die verwendeten Methoden *Chen* und *Neu* zeigen in Szene 1 durchschnittliche Werte unter 1,0 mit mittleren Differenzen von unter 0,2. Deutlich höhere Durchschnittswerte entstehen am 30.04.1999 bei *Chen* (3,6) gegenüber *Neu* (2,9). Dabei erreicht *Chen* sehr häufig den Maximalwert, während *Neu* den LAI leicht zu unterschätzen scheint. Im Vergleich zu WG und WW wird der Raps wie WR innerhalb der ratio-basierten Vegetationsindizes unterschätzt (s. Tab. 7.6).

Bohnen (BO)

Bei den vorliegenden Schlägen wurden Bohnen in Folge zum Spinat angebaut. Der maximale LAI wird zum Ende der Blüte etwa Mitte Juli erreicht [GEISLER 1983]. Die ermittelten LAI in Szene 3 nach *Chen* und *Choudhury* überschreiten kaum 1,0 und in nur wenigen Fällen 2,0. Hingegen *Neu* liegt etwas höher mit Werten bis über 3,0. Der Bedeckungsgrad wird neben *Neu* nach *Choudhury* berechnet, da hier eine direkte Bestimmung der Parameter für Bohnen vorgenommen wurde. Die Differenzen zwischen diesen Methoden betragen durchschnittlich 0,8.

Erbsen (E)

Erbsen werden als Sommerfrucht im April angebaut und besitzen eine relativ kurze Vegetationszeit. Von den drei im Untersuchungsgebiet vorkommenden Schlägen ist zum Zeitpunkt der Szene 3 nur noch einer bedeckt. Dieser Termin liegt eindeutig nach dem LAI-Maximum, so dass die Ergebnisse nur mit Einschränkungen zu betrachten sind. Analog zu den Bohnen wird der LAI mit *Choudhury*, *Chen* und *Neu* ermittelt. Der mittlere LAI bei *Choudhury* beträgt 1,3. Die Methode *Neu* liefert wieder deutlich höhere LAI mit einem Mittelwert von 2,8. Insgesamt sind die LAI-Werte von Erbsen höher als die von Bohnen, was durchaus plausibel ist.

Zusammenfassung

Aufgrund des Mangels an in situ gemessenen LAI im Untersuchungsgebiet können im Rahmen der Arbeit nur verschiedene fernerkundliche Methoden zur Berechnung des LAI aus den vorhandenen Landsat-TM-Daten untersucht und verglichen werden. Im vorliegenden Abschnitt wird gezeigt, dass bekannte Methoden sehr starke Differenzen aufweisen können, da sie sich in ihrem zugrunde liegenden Ansatz unterscheiden und nicht ohne weiteres übertragbar sind.

Derzeit existiert keine einheitliche, vegetationsindexbasierte Methode, die eine Ableitung des LAI für häufig auftretende Fruchtarten ermöglicht. Deshalb wird als Alternative ein Verfahren vorgeschlagen, mit dem Beziehungen für die meisten im Untersuchungsgebiet vorkommenden Fruchtarten abschätzbar sind. Eine genaue Validierung dieses Verfahrens

ist in der Arbeit nicht möglich. Es zeigt sich, dass vor allem für kleine LAI eine Unterschätzung vorliegt. Jedoch wird eine bessere Anpassung an die vorhandenen Daten mit dem $WDVI_{\infty}$ erreicht. Für eine Anwendung bedarf es ausführlicher Untersuchungen.

Ein weiteres Problem bei der quantitativen Ableitung von Vegetationsparametern aus Fernerkundungsdaten besteht darin, dass ein integrales Signal der vorhandenen Vegetation erfasst wird. Demnach können verschiedene Schichten oder Zusammensetzungen von Pflanzen nicht unterschieden werden. Bei natürlicher Vegetation ist eine Beobachtung von Wald beispielweise gleichzeitig mit der darunter gelegenen Strauch- und Krautschicht verbunden. Bei landwirtschaftlichen Flächen können Unkräuter oder aufgelaufene Früchte vom Vorjahr Bestandteil sein. Fruchtarten- oder vegetationspezifische Beziehungen können daher streng genommen nur für Versuchsbedingungen aufgestellt werden.

Im Rahmen der Arbeit wird aufgrund der erläuterten Unzulänglichkeiten keine Untersuchung der absoluten Genauigkeit bei der Anwendung von Fernerkundungsdaten in einem Erosionsmodell vorgenommen. Vielmehr werden methodische Vorschläge für den Einsatz solcher Daten aufgezeigt und Auswirkungen von Unterschieden untersucht.

7.2.2 Der Bedeckungsgrad

Der Bedeckungsgrad wird nach den unter 6.2.3 (S. 47) vorgestellten Methoden aus dem Blattflächenindex (*Ross*) bzw. den Vegetationsindizes (*Bouman*, *Baret*) für die drei Szenen ermittelt. Die Berechnung aus dem LAI nach *Ross* wird auf Grundlage der LAI-Methoden I und II (*Ross I*, *Ross II*) durchgeführt. Die Ergebnisse und Differenzbilder werden in den Abb. 7.11 – 7.13 (S. 71, 72, 73) dargestellt. In Anhang VI Tab. VI.2 werden die schlagweisen Differenzen der vier Methoden zu den geschätzten Bedeckungsgraden aus dem Parameterkatalog (*PAKA*) für die nächstgelegenen Niederschlagsereignisse (05.05. und 19.07.) aufgelistet. Durch den zeitlichen Abstand von Szene 2 zum ersten betrachteten Niederschlagsereignis kann sich von vornherein eine leichte Differenz zwischen den Methoden einstellen. Diese wird entsprechend des Entwicklungsverlaufes vermutlich bei Winterfrüchten ausgeprägter sein als bei den zu diesem Zeitpunkt gerade erst angebauten Sommerfrüchten. Des Weiteren ergeben sich Unterschiede durch die Überarbeitung der Landnutzung mit den Fernerkundungsdaten. Analog dem LAI werden die Ergebnisse im Folgenden fruchtartenspezifisch diskutiert.

Körnermais (KM), Silomais (SM)

Zum Zeitpunkt der Szene 2 resultieren aus den niedrigen LAI für *Ross I* und *II* geringe durchschnittliche Bedeckungsgrade (B), die bis auf die bereits erwähnten Effekte selten 20 % für SM übersteigen und für KM 0 % betragen. Damit liegen sie unter den Werten von *PAKA*, die auf 30 % bzw. 0 % gesetzt wurden. In Szene 3 bewegen sich die mittleren B nach *Ross I* zwischen 70 % und 90 %. Bei *Ross II* werden durchschnittlich 10 % höhere B bei etwa 90 % berechnet. Besonders die Ergebnisse von *Ross II* sind zu diesem Zeitpunkt realistischer einzuschätzen als die bei nahezu allen Maisschlägen angenommenen 100 % nach *PAKA*. Insgesamt sind die Differenzen zwischen den Fernerkundungsmethoden geringer als die zu den Werten von *PAKA*.

Zuckerrüben (ZR)

In Szene 2 hebt sich *Ross II* mit leicht höheren Werten von *Baret*, *Ross I* und *Bouman* ab. Für die meisten Schläge liegen alle Methoden unter den mit *PAKA* gegebenen Werten. Auffallend hoch ist der Bedeckungsgrad von zwei Schlägen (Tab. VI.2). Dies lässt sich mit

der falschen Zuordnung der Pixel aufgrund der geringen Größe und mit den erwähnten geometrischen Restfehlern (Schlag 363) oder einer falsch zugeordneten Landnutzung (Schlag 398) erklären. Die Berechnungen der Szene 3 passen für *Ross II* und *Bouman* relativ gut mit Mittelwerten um 85 % bis 95 % zusammen. Das lässt sich vermutlich auf die Tatsache zurückführen, dass die zugrunde liegende LAI-Beziehung von *Ross II* aus den selben Daten abgeleitet wurde, aus denen die Beziehung *Bouman* ermittelt wurde. Bei den anderen Methoden stellen sich etwas niedrigere B von durchschnittlich 86 % (*Baret*) bzw. 82 % (*Ross I*) ein. Es ergeben sich größere Differenzen zwischen *Ross I* und *Ross II* als jeweils zu *Bouman* (s. Abb. 7.13). Auch bei ZR überschätzt die Methode *PAKA* (alle 100 %) den Bedeckungsgrad im Vergleich zu den Fernerkundungsergebnissen.

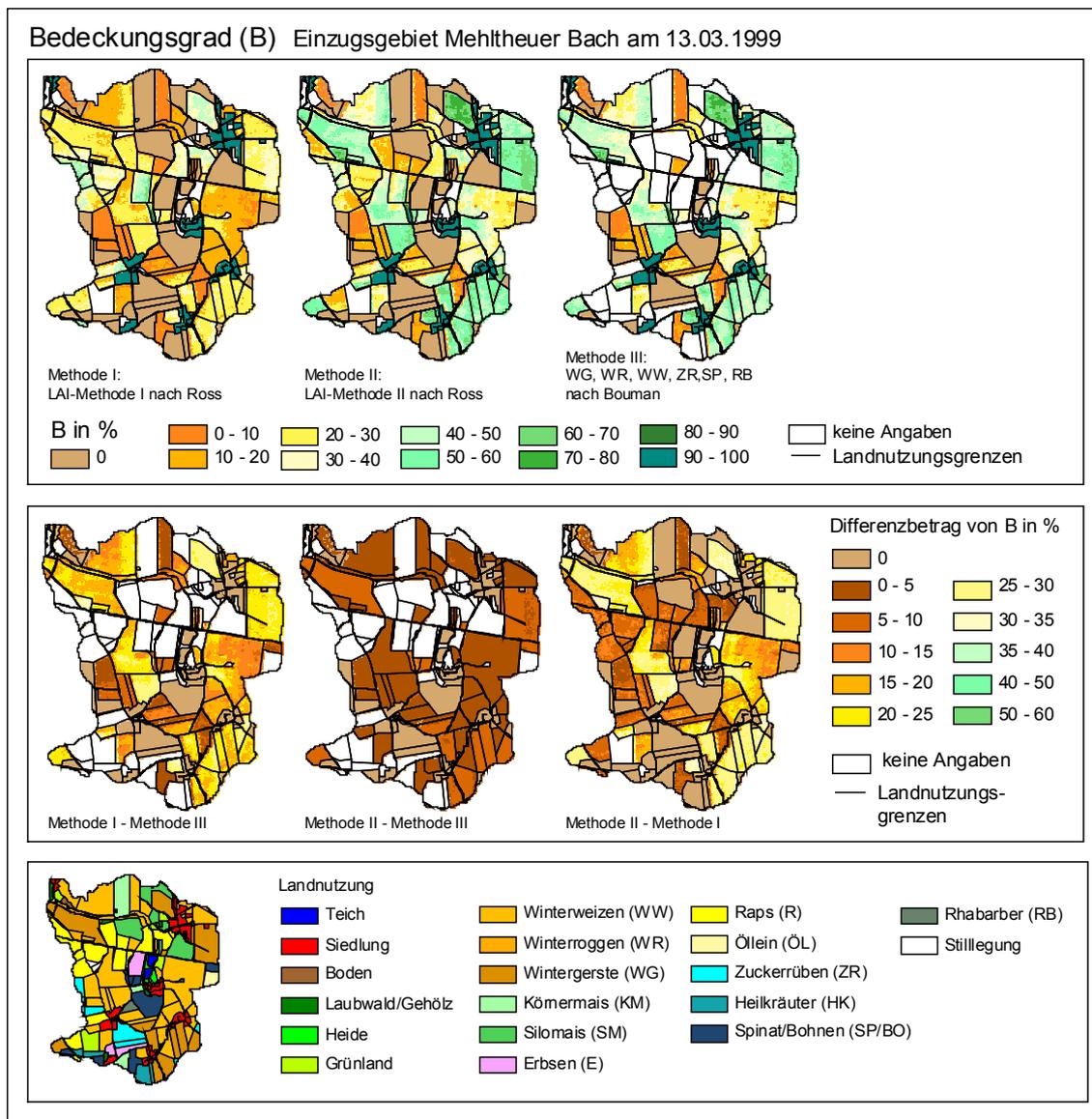


Abb. 7.11: Mit verschiedenen Methoden berechneter Bedeckungsgrad und Differenzen am 13.03.1999.

Spinat (SP)

Die Spinatflächen, die als Winterfrüchte angebaut wurden, zeigen zum 13.03.1999 eine durchschnittliche Einstufung in *Baret* (20 %), *Ross I* (20 %), *Bouman* (24 %) und *Ross II* (30 %). Vor allem die Schläge südwestlich der Teiche erreichen B von über 60 %. Die

Differenzen sind zwischen *Ross I* und *Ross II* mit einem Mittelwert von 10 % am größten. In Szene 2 hat der Winterspinat Bedeckungsgrade von 50 % bis zu 90 %. Die größten Differenzen treten mit durchschnittlich 10 % zwischen *Bouman* und *Ross II* auf, was im Widerspruch zum Ergebnis der Zuckerrüben steht. Ursache dafür könnte sein, dass die Beziehungen nach *Bouman* ursprünglich für ZR abgeleitet und im Rahmen der Arbeit aufgrund des erwähnten Mangels an Parametern auf Spinat übertragen wurden.

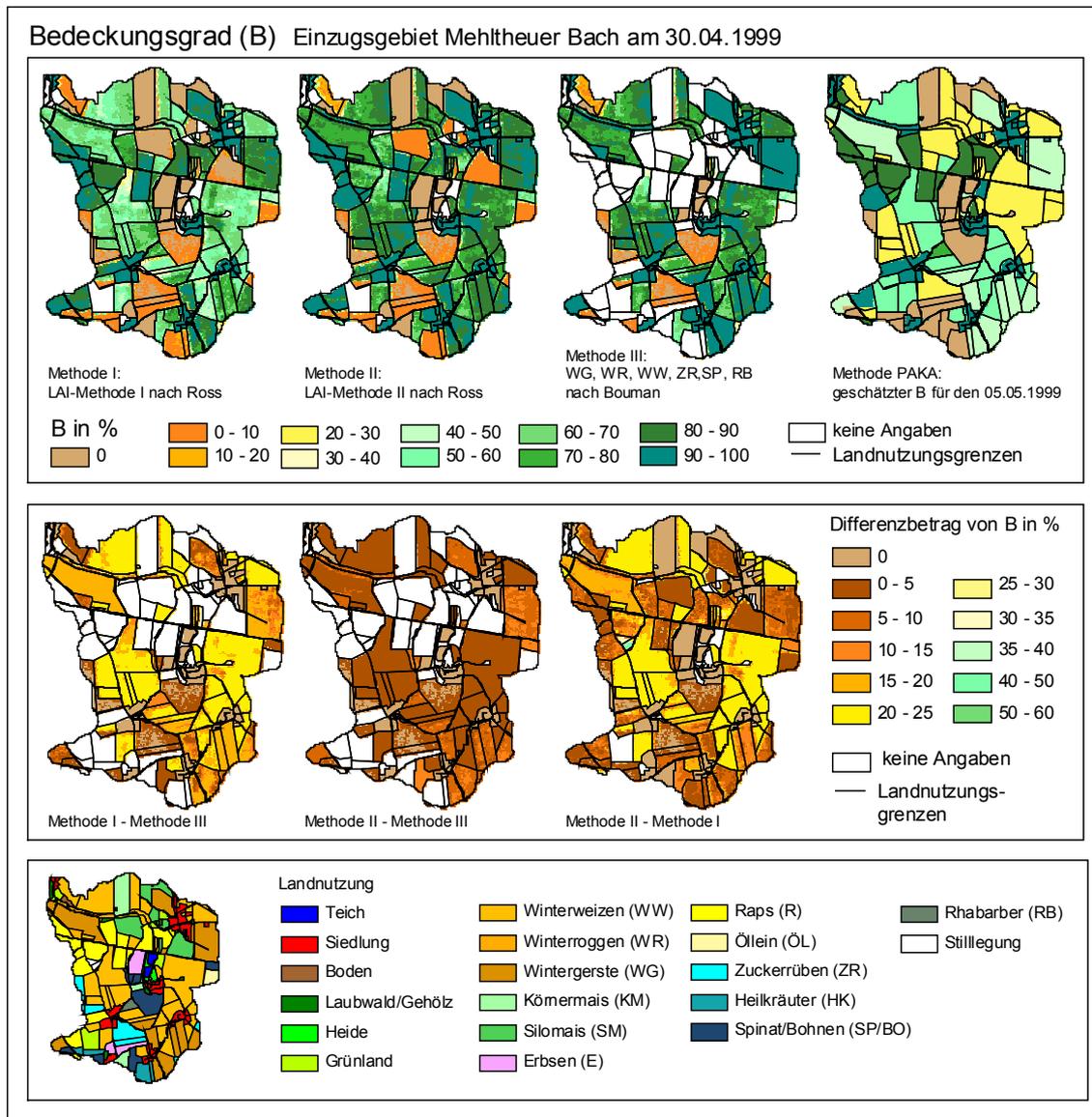


Abb. 7.12: Mit verschiedenen Methoden berechneter Bedeckungsgrad und Differenzen am 30.04.1999.

Die Werte des im Frühjahr angebauten Spinats bewegen sich für alle Methoden am häufigsten zwischen 5 % und 15 %. Dabei stellen sich die größten Werte für *Ross II* und die kleinsten für *Baret* ein. Zwischen *Ross I* und *Bouman* sind kaum Unterschiede vorhanden. Ein direkter Vergleich mit *PAKA* ist für Spinat nur eingeschränkt möglich, da die meisten Spinatflächen erst durch die Fernerkundungsdaten von anderen Schlägen abgeteilt wurden und die genauen Saat- und Erntetermine teilweise nur geschätzt werden konnten. Es ist jedoch in Tab. VI.2 sichtbar, dass mit den Fernerkundungsdaten i. d. R. höhere Bedeckungsgrade ermittelt werden.

Rhabarber (RB)

Der Bedeckungsgrad von Rhabarber liegt in Szene 1 mit der Reihenfolge *Baret*, *Ross I*, *Bouman* und *Ross II* im Durchschnitt zwischen 4 % und 15 %. Hierbei sind die Differenzen zwischen den Methoden teilweise größer als der ermittelte Bedeckungsgrad (z. B. *Ross I* und *Ross II*). In Szene 2 verändert sich die Reihenfolge nur geringfügig bei Mittelwerten zwischen 72 % (*Ross I*) und 90 % (*Ross II*). Damit liegen sie recht nah bei dem von *PAKA* angegebenen Wert von 80 %. Zur Szene 3 steigt *B* weiter an. *Bouman* und *Ross II* erreichen an vielen Stellen fast den Wert 100 % von *PAKA*. *Baret* und *Ross I* zeigen meist Werte von 80 % bis leicht über 90 %.

Öllein (Öl)

Analog dem LAI fällt auch *B* in Szene 2 sehr gering aus. Die Werte liegen nahezu alle unter 10 %, wobei *Ross I* etwas höher ist als *Ross II*. Sowohl in Szene 2 als auch in Szene 3 schätzt *PAKA* *B* mit 30 % und 100 % höher ein. Aufgrund der bereits erwähnten unterschiedlichen Anbaueigenschaften im Schlag treten in Szene 3 innerhalb der Flächen große Differenzen auf. Es entstehen relativ niedrige Mittelwerte von 82 % (*Ross I*) und 58 % (*Ross II*).

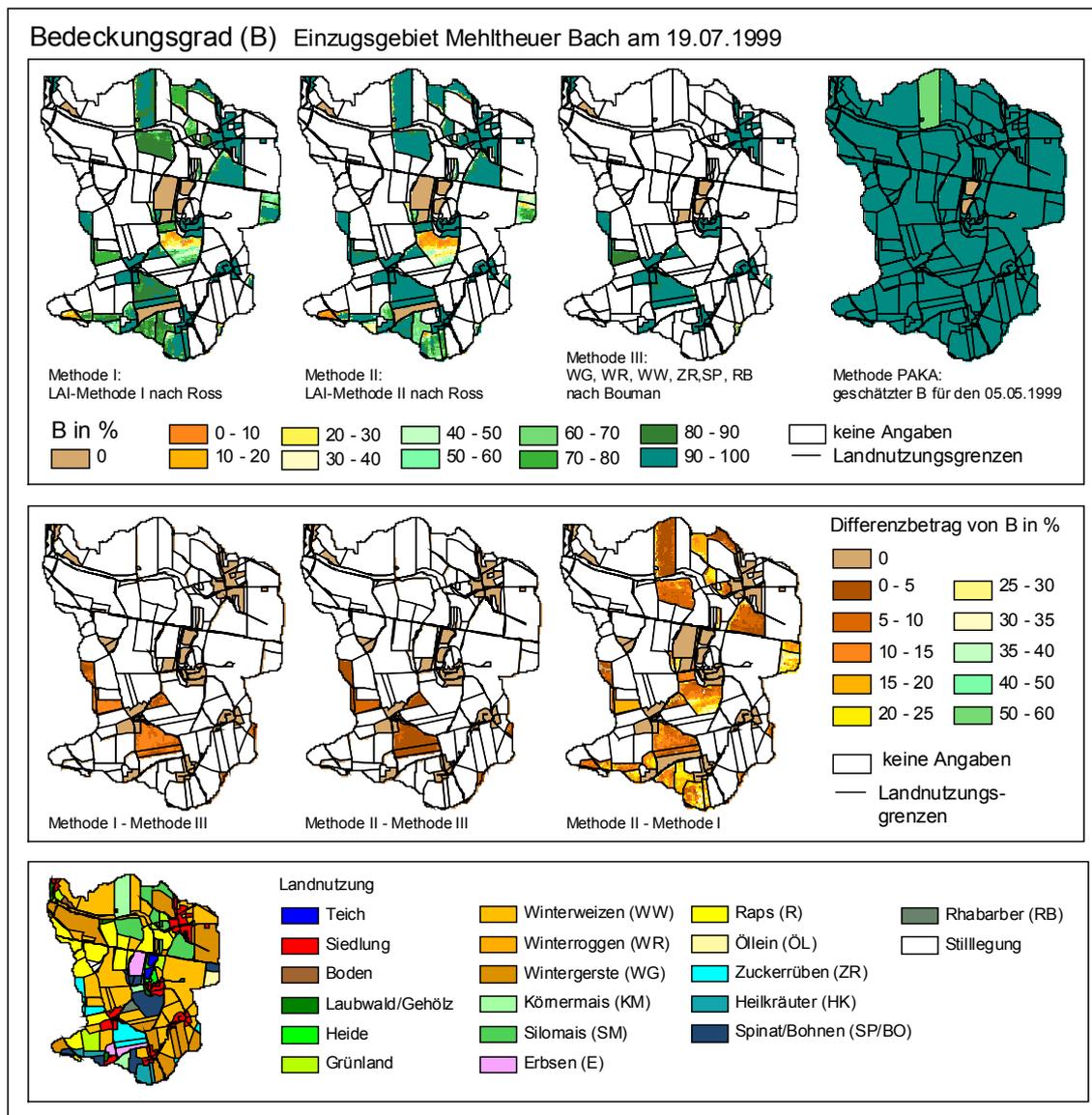


Abb. 7.13: Mit verschiedenen Methoden berechneter Bedeckungsgrad und Differenzen am 19.07.1999.

Heilkräuter (HK)

Auch für Heilkräuter erreicht der Bedeckungsgrad nach *Ross I* und *Ross II* zum 30.04. größtenteils kaum 10 %. Der einzige Schlag (336), der von den vorliegenden ursprünglich als HK definiert war, wird nach *PAKA* mit 0 % angegeben. Für die anderen Schläge werden die B von den alten Fruchtarten in Tab. VI.2 gezeigt, für die sehr starke Abweichungen auftreten können (z. B. 393). In Szene 3 wird die unterschiedliche Einstufung der Schläge durch die Methoden *Neu (Ross I)* und *Chen (Ross II)* aufbauend auf dem LAI sichtbar. Es entstehen mittlere Differenzen je Schlag von bis zu 20 % (393) bei Bedeckungsgraden von 70 % bis fast 100 %. Die Durchschnittswerte unter den 100 % von *PAKA* werden bei den kleineren Schlägen durch Randpixel von Nachbarschlägen mit niedrigeren B bewirkt.

Wintergerste (WG), Winterroggen (WR), Winterweizen (WW)

In Szene 1 wird der B von WW durch die Methoden *Ross I*, *Ross II* und *Bouman* bei den meisten Schlägen kleiner eingestuft als der von WG und WR. Nach *Ross II* und *Bouman* bewegen sich die meisten Werte zwischen 20 % und 50 % für WW sowie zwischen 40 % und 70 % für WG, WR. Es ergeben sich aus dem selben Grund wie bei den Zuckerrüben nur geringfügige Differenzen zwischen diesen Methoden vor allem für WW. *Ross I* liegt meist mit durchschnittlich über 20 % unter diesen Werten.

Die höchsten Bedeckungsgrade werden auch in Szene 2 für WG und WR berechnet. Bei zunehmendem B ergibt sich die Reihenfolge *Ross I*, *Ross II*, *Bouman*. Dabei erreicht *Bouman* relativ schnell maximale Werte, da wie bei der LAI-Beziehung die zugrunde liegenden RV geringer waren als im vorliegenden Fall (Überschreitung des $WDVI_{\infty}$). Hingegen für WW passen *Bouman* und *Ross II* mit geringen Differenzen (0 % bis 3 %) wieder sehr gut zusammen. Die plausibelsten Ergebnisse liefert somit *Ross II* mit durchschnittlich 75 % für WW, 85 % für WG und 88 % für WR.

Innerhalb einiger WW-Schläge sind im LAI und B relativ starke Unterschiede erkennbar. Diese sind einerseits auf unbekannte Anbauunterschiede und andererseits auf Reliefeinflüsse zurückzuführen. Letztere werden besonders bei dem WW-Schlag sichtbar, der links der Teiche gelegen ist. Hier fällt das Gelände zu dem nördlich der Teiche, quer durch das Untersuchungsgebiet verlaufenden Weg hin ab. An den tieferen Stellen am Weg erreicht der Bedeckungsgrad nur 30 % bis 40 % (*Ross II*) vermutlich aufgrund höherer Bodenfeuchtigkeit. Im südlichen Teil, in dem das Gelände um ca. 10 m ansteigt, werden Werte über 90 % (*Ross II*) erreicht.

Nach *PAKA* wird der Bedeckungsgrad zum 05.05. für WG mit 50 %, WR mit 65 % bzw. 100 % bei Mulch und WW mit 30 % bzw. 60 % angegeben. Bis auf wenige Ausnahmen bei WW liegt *PAKA* meist um 20 % bis 40 % unter den Fernerkundungsergebnissen (s. Tab. VI.2). Da Mulch, wie bereits angedeutet, durch die Fernerkundung nicht erfasst werden kann, erfolgt bei dem gemulchten WR-Schlag (42) eine Unterschätzung durch *Ross I*, *Ross II* und *Bouman*.

Raps (R)

In Szene 1 ist B nach *Ross I* größer als bei WW, WG, WR mit einem Mittelwert von 32 %. Zu gering ist vermutlich der Wert von *Ross II* (26 %) gegenüber *Ross I* und den anderen Winterfrüchten bei *Ross II*, dessen LAI-Berechnung nicht auf dem CLAIR-Modell beruht. In Szene 2 übersteigt *Ross II* mit 5 % bis 20 % *Ross I*. Die meisten Werte liegen bei bei-

den Methoden zwischen 80 % und 90 % bzw. bei *Ross II* häufiger über 90 %. Bei *PAKA* wird B auf 85 % bzw. 100 % bei Mulchung gesetzt. Mit Ausnahme der gemulchten Schläge weicht *Ross I* in geringerem Maße von *PAKA* als *Ross II* ab.

Bohnen (BO)

Bei Bohnen treten sowohl starke Schwankungen zwischen den Schlägen (z. B. 330, 394, 400 kleine Schläge im Süden) als auch innerhalb eines Schlages (z. B. 250 großer Schlag südlich der Teiche) auf. Diese resultieren vermutlich aus unterschiedlichen Anbauermitteln, die für einige Schläge abgeschätzt wurden und im Schlag einheitlich sind. Die Werte bewegen sich je Schlag durchschnittlich zwischen 11 % und 99 %. Auch zwischen den Methoden *Ross I* und *Ross II* zeigen sich verhältnismäßig große Differenzen von durchschnittlich bis zu 28 % bedingt durch den LAI. Aus diesem Verhalten entstehen sehr differenzierte Abstände zu dem geschätzten B nach *PAKA* von 100 %.

Erbsen (E)

In Szene 2 liegt nur einer der Schläge bebaut mit sehr geringen Durchschnittswerten von 10 % (*Ross I*) und 4 % (*Ross II*) vor. Der einzige in Szene 3 bebaute Schlag erreicht im Mittel 75 % (*Ross I*) und 59 % (*Ross II*). Die Unterschiede zwischen den Methoden *Neu* und *Choudhury* beim LAI wirken sich wie bei den Bohnen stark auf den Bedeckungsgrad aus. Im Vergleich zur Fernerkundung wird B mit 100 % durch *PAKA* eindeutig überschätzt.

Zusammenfassung

Das Zusammenspiel der Funktion des Bedeckungsgrades nach *Ross* und der Differenzen bei der LAI-Berechnung verursacht ein charakteristisches Verhalten der Differenzen zwischen den Methoden zur Berechnung des Bedeckungsgrades. Da es sich um eine Exponentialfunktion handelt, wirken sich vor allem Differenzen bei kleinen und mittleren LAI stärker auf den Bedeckungsgrad aus. So entstehen bei Winterfrüchten in Szene 1 und bei Sommerfrüchten in Szene 2 im Verhältnis zum B die größten Differenzen. Bei Fruchtarten, für die neben *Ross* weitere Beziehungen verglichen werden, bewegen sich die Bedeckungsgrade bis auf wenige Ausnahmen (WR, WG) zwischen *Ross I* und *Ross II*. Dies wird in den Differenzbildern (Abb. 7.1 - 7.13) sichtbar.

Betrachtet man die geringen Differenzen zwischen *Ross II* und *Bouman* für WW, bei denen für die Bestimmung der LAI- und B-Beziehung die gleichen Daten zugrunde lagen [BOUMAN et al. 1992], lässt sich daraus ableiten, dass die vorgeschlagene Methode zur Berechnung des Bedeckungsgrades aus dem LAI plausible Ergebnisse liefert.

Beim Vergleich der Fernerkundungsergebnisse und der *PAKA*-Angaben sind generelle Trends für Winter- und Sommerfrüchte zu erkennen. Der Bedeckungsgrad von Winterfrüchten (WW, WG, WR, SP), mit Ausnahme von gemulchten Schlägen und Raps, wird durch die Fernerkundung am 30.04.1999 höher eingeschätzt als nach *PAKA* am 05.05.1999. Für Sommerfrüchte, außer bei Erbsen und Heilkräutern, tritt zu diesen Zeitpunkten genau der umgekehrte Fall ein. Am 19.07.1999 sind die Fernerkundungsergebnisse ebenso kleiner, da für nahezu alle Flächen ein B von 100 % durch *PAKA* vorgegeben wird.

Probleme bei der Abschätzung sowohl des LAI als auch des B entstehen, wenn nicht ausreichend Informationen über den Anbau vorhanden sind. Im vorliegenden Gebiet ist dies vor allem für Gemüse und Heilkräuter zutreffend.

7.3 Zeitlich interpolierte Parameter

Der aus den TM-Daten ermittelte LAI wird mit Hilfe des Wachstumsmodells zeitlich interpoliert und darauf aufbauend der tägliche Bedeckungsgrad berechnet (s. 6.2.4). In den Abb. 7.14 - 7.16 (S. 78) wird der ermittelte Verlauf dieser Größen für Wintergerste, -roggen und -weizen anhand beispielhafter Schläge dargestellt. Für alle weiteren Fruchtarten sind die zugehörigen Abbildungen in Anhang VII (Abb. VII.1 - VII.9) zu finden.

Da sich die Wachstumsperiode von Winterfrüchten über den Zeitraum von zwei Jahren erstreckt, werden die Tage für alle Fruchtarten einheitlich vom 1. Januar 1998 gezählt. Für jeden Schlag werden für den LAI folgende Größen veranschaulicht:

- *WM*: LAI-Verlauf auf Grundlage des Wachstumsmodells,
- *FE I/II*: aus TM-Daten berechneter LAI nach *Methode I/II* (Schlagmittel),
- *FE I/II + WM*: LAI-Verlauf nach Anpassung des Wachstumsmodells an die Ergebnisse der *Methode I/II*.

Analog hierzu erfolgt die Darstellung des Bedeckungsgrades. Den Ergebnissen werden die geschätzten Werte nach den Angaben aus dem Parameterkatalog gegenübergestellt (*PAKA*). Diese wurden in einigen Fällen aufgrund der veränderten Landnutzung analog zu Schlägen mit ähnlichen Eigenschaften und mit Hilfe des Parameterkatalogs angepasst. Obwohl es sich um diskrete Zeitpunkte handelt, werden die Bedeckungsgrade zur besseren Übersicht als Kurve gezeigt.

Körnermais (KM), Silomais (SM)

Basierend auf den LAI aus den TM-Daten sind die LAI-Kurven von SM im Durchschnitt höher als die von KM (Abb. VII.1 – VII.2). Die Methode *FE II + WM* (LAI nach *Bach*) zeigt aufgrund der homogenen LAI relativ geringe Unterschiede zwischen den Schlägen. Aufgrund der stärkeren Streuung der LAI nach *FE I + WM* entstehen Kurven mit unrealistisch großen Abständen zwischen den Schlägen (z. B. Abb. VII.2 Schlag 67 und 132). Niedrigere LAI zum Aufnahmezeitpunkt sind mit geringeren LAI_{max} im Modell verbunden. Zudem wird das jeweilige Kurvenmaximum langsamer erreicht. Im Vergleich zu den Angaben nach GEISLER [1983] liegt dieses bei KM und SM generell relativ spät bei Mitte August. Die geringen LAI-Differenzen nach *FE II + WM* bewirken auch im Bedeckungsgrad geringfügige Unterschiede. Im Vergleich mit *PAKA* liegen für KM tendenziell niedrigere Werte vor. Bei SM entstehen Unterschiede im Bedeckungsgrad zwischen den Schlägen von über 45 %. Die geschätzten Bedeckungsgrade nach der Methode *PAKA* bewegen sich zwischen den Fernerkundungsergebnissen.

Zuckerrüben (ZR)

Die Methode *FE II + WM* zeigt deutlich höhere LAI als *FE I + WM*, was aus der Sättigung der LAI nach *Bouman* in Szene 3 resultiert (Abb. VII.3). Die Zunahme des LAI vom Zeitpunkt der Szene 3 bis zum Maximum im August ist deshalb für *FE I + WM* realistisch. Da der LAI in Szene 2 kleiner als 0,2 ist, wird er bei der Modellierung, wie auch bei KM und SM, nicht berücksichtigt. Die dadurch entstehende leichte Differenz im LAI bewirkt einen Unterschied im Bedeckungsgrad von unter 5 %. Die ermittelten Bedeckungsgrade bewegen sich im Bereich der Schätzung nach *PAKA*.

Spinat (SP)

Aufgrund der geringen Größe einiger Spinatschläge sowie der Anbau- und Aufnahmetermine können in die zeitliche Modellierung nur Schläge mit Winterspinat einbezogen wer-

den. In Abb. VII.4 werden Beispiele für Schläge mit einem oder zwei Stützpunkten aus den TM-Daten (222, 397) dargestellt, die gleichzeitig die maximale bzw. minimale LAI-Entwicklung aufweisen. Entsprechend den Ergebnissen aus den TM-Daten findet ein starker Anstieg des LAI zwischen Szene 1 und Szene 2 statt. Der etwas höhere LAI des Schlages 222 nach *FE II* bewirkt bei der Anpassung des Wachstumsmodells einen zu starken Anstieg auf einen LAI von über 4,5. Hingegen liefert *FE I + WM* beim selben Schlag zu niedrige maximale LAI unter 1. Der Schlag 397 wird demgegenüber besser mit relativ geringen Unterschieden zwischen den Methoden erfasst. Die Differenzen zwischen den Fernerkundungspunkten und dem angepassten WM, die aus den gesetzten Tolleranzen bei der Modellierung resultieren, betragen bei den vorliegenden Kurven unter 2 %. Da die Simulationen mit dem Erosionsmodell erst mit dem 05.05.1999 beginnen, liegen nach *PAKA* keine Schätzungen für den Winterspinat vor.

Rhabarber (RB)

Für RB stehen als einzige Frucht drei Aufnahmezeitpunkte zur Verfügung. Die Differenzen zwischen *FE I* und *FE II* aus den Szenen 2 und 3 werden in den LAI-Kurven deutlich sichtbar (Abb. VII.5). Sie wirken sich nur im Mittelteil entscheidend auf den Verlauf des Bedeckungsgrades mit Differenzen von über 30 % aus. Die Angaben nach *PAKA* liegen im ersten Teil unter den Modellergebnissen und übersteigen sie dann leicht mit 100 %.

Öllein (ÖL)

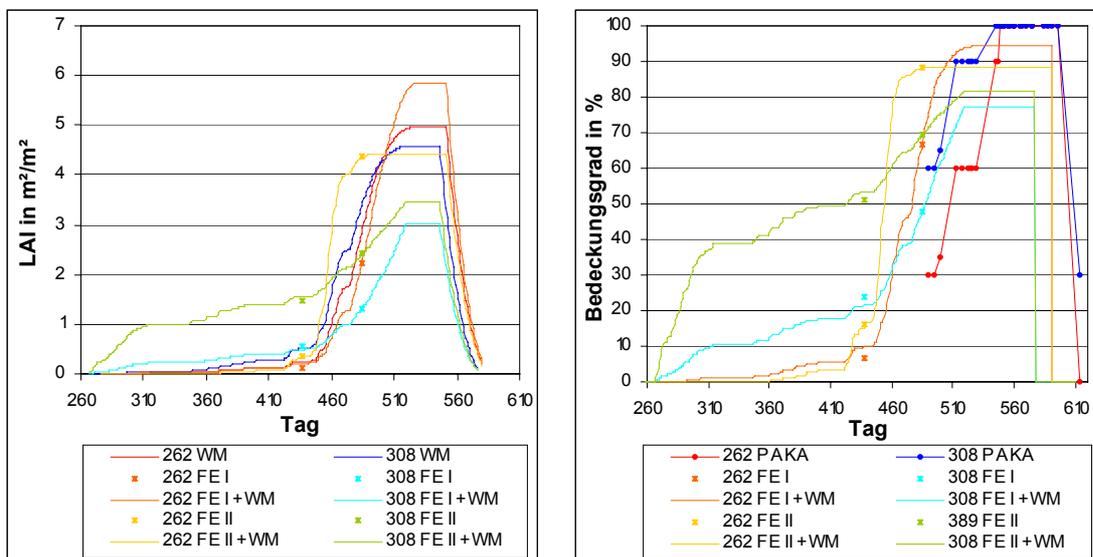
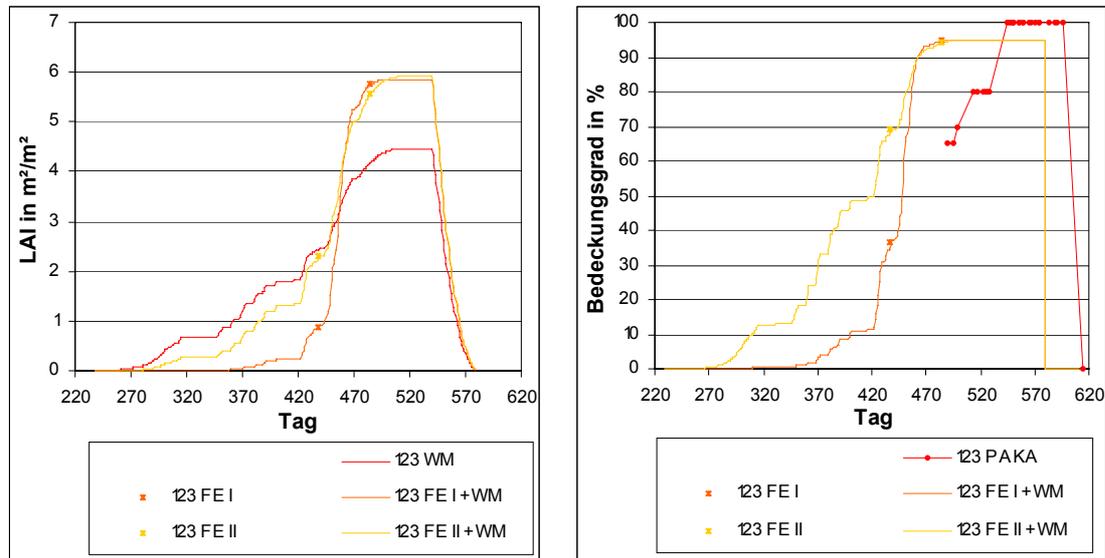
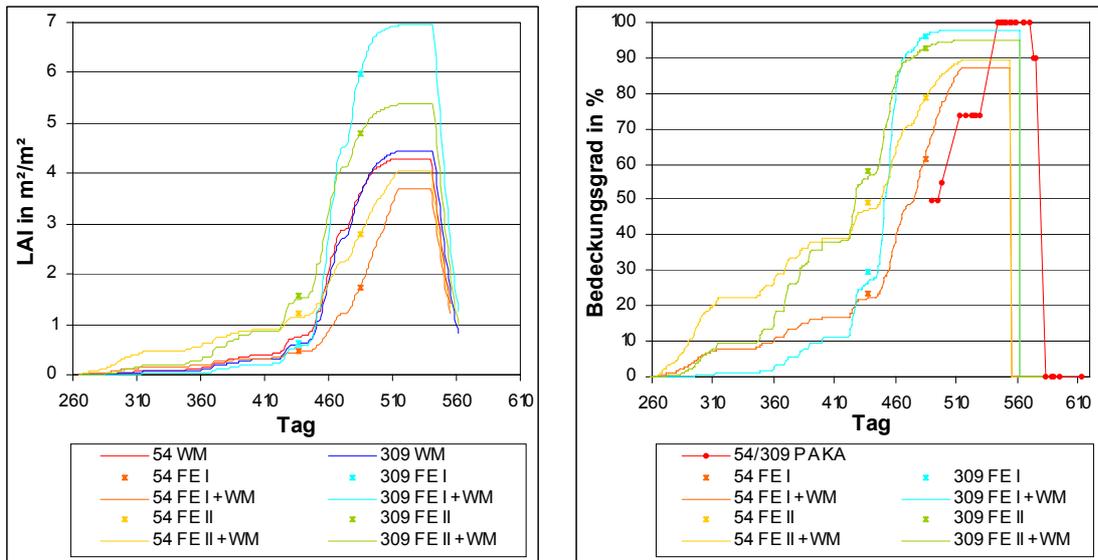
Die Methode *FE I + WM* ergibt einen plausiblen Kurvenverlauf, bei dem die LAI der Szene 3 nahe beim Maximum liegen (Abb. VII.5). Eindeutig zu niedrige LAI werden bei *FE II + WM* erreicht. Der Bedeckungsgrad nach *FE I + WM* passt im hinteren Teil sehr gut zu *PAKA*. Da auf dem ÖL-Schlag Mulch vorhanden war, wird nach *PAKA* bis zum Erreichen des Bedeckungsgrades von 100 % ein Aufschlag von 30 % vorgenommen, weshalb er durch Fernerkundungsdaten unterschätzt wird.

Heilkräuter (HK)

Die unterschiedliche LAI-Einstufung der HK-Schläge nach *FE I (Neu)* und *FE II (Chen)* verursacht eine entgegengerichtete Reihenfolge der Kurven nach der Wachstumsmodellierung (Abb. VII.6). Da nicht bekannt ist, welche Kräuter genau angebaut wurden, wird angenommen, dass sie vor Eintreten der Seneszenz geerntet werden. Die aus Szene 2 berechneten Bedeckungsgrade zeigen wie bei ZR und ÖL Differenzen, da sie in die Wachstumsmodellierung nicht einfließen. Die Abschätzung nach *PAKA* ist etwas nach links verschoben und liefert eine ansonsten gut zur Fernerkundung passende Kurve.

Raps (R)

In Abb. VII.7 werden beispielhaft die Ergebnisse für Schläge mit besonders großen und kleinen LAI dargestellt. Schlag 167 wurde zeitiger bestellt und weist daher höhere Werte auf. Generell liefert *FE I + WM* leicht flachere Kurven als *FE II + WM*. Die Differenzen zu den LAI aus Szene 1 (unter 0,1) rufen Differenzen im Bedeckungsgrad von unter 5 % hervor. Die Werte nach *PAKA* passen relativ gut zu den Fernerkundungsergebnissen von Schlag 155. Bei einigen Schlägen, die gemulcht wurden, wird der Bedeckungsgrad nach Addition der 30 % schon bei den ersten Niederschlagsereignissen mit 100 % angegeben. Hier liegt durch die Fernerkundung wiederum eine Unterschätzung vor.



Wintergerste (WG), Winterroggen (WR), Winterweizen (WW)

In Abb. 7.14 und 7.16 werden für WG und WW jeweils die Ergebnisse für relativ große bzw. kleine LAI-Verläufe aufgeführt. Für WR stehen nur für einen Schlag Ergebnisse zur Verfügung (Abb. 7.15). Bis auf einen WG-Schlag im Norden des Gebietes hat WR in Szene 1 die höchsten LAI für beide Methoden. Nach einem steilen Anstieg des LAI wird mit dem Wert aus Szene 2 fast das Maximum erreicht, was mit den Angaben von PETR et al. [1983] konform geht. Aufgrund des schnelleren Anstiegs der LAI-Funktion von *FE I* für große WDWI übersteigt dessen LAI den Wert von *FE II* in Szene 2. Nach WR zeigt WG im Durchschnitt zu beiden Aufnahmezeitpunkten die höheren LAI gegenüber WW. Generell werden durch *FE I* flacher verlaufende Kurven ermittelt mit Ausnahme von Schlägen (z. B. 309), bei denen wegen der logarithmischen LAI-Funktion das definierte LAI-Maximum gesetzt wird. Für WR und WG werden plausible Ergebnisse durch *FE I + WM* erzielt. Bei WW berechnet *FE II* zwar die größten LAI in beiden Szenen, jedoch wird mit einem geringeren LAI-Unterschied ein niedriger liegendes Maximum erreicht (z. B. 262). Da sich Szene 2 zeitlich deutlich vor dem Maximum bewegt, liefert *FE I* plausiblere Ergebnisse. Bei Schlag 308 wird wegen des unverhältnismäßig hohen LAI aus Szene 1 nach *FE II* eine relativ flache Kurve zum Ende hin modelliert.

Die Differenzen des Bedeckungsgrades zwischen Fernerkundung und zeitlicher Interpolation, die aus den gesetzten Toleranzen resultieren, betragen unter 5 %. Für die Einstufung der Fruchtarten untereinander gilt dieselbe Aussage wie beim LAI. Die Früchte WG und WR erreichen nach *PAKA* später ihr Maximum. Ebenso verhält sich *PAKA* des WW-Schlages 262 zur fernerkundungsbasierten Kurve. Der Schlag 308 hat einen geringeren Bedeckungsgrad als 262. Zudem liegt nach *PAKA* eine höhere Schätzung vor, da gemulcht wurde.

Bohnen (BO)

Bohnen wurden zu verschiedenen Zeitpunkten angebaut und weisen dementsprechend stark versetzte Kurven auf. Die Methode *FE I + WM* zeigt deutlich höhere, jedoch nicht un plausible LAI-Kurven. Obwohl der LAI 397 *FE I + WM* höher als bei Schlag 250 ist, verursacht die Unterschätzung durch *FE II* einen flacheren Kurvenverlauf bis zum Maximum und damit insgesamt geringere LAI-Werte als bei 250 (Abb. VII.8). Ähnliches gilt für den Bedeckungsgrad. Die geschätzten Werte von *PAKA* übersteigen generell die Fernerkundungsergebnisse.

Erbsen (E)

Aufgrund der Anbauermine kann der LAI-Verlauf mit den TM-Daten nur zu einem Termin angepasst werden. Dieser liegt kurz vor der Ernte und somit nach dem Einsetzen der Seneszenz. Durch die Fernerkundungsmethoden erfolgt eine deutliche Überschätzung. Das vereinfachte Wachstumsmodell wird solange angepasst, bis der maximale LAI erreicht ist. Selbst bei diesem unrealistisch hohen LAI-Verlauf betragen die Abstände beim LAI 1,3 und 3,5. Demzufolge wird relativ schnell ein Bedeckungsgrad von 100 % erreicht. Die Fernerkundungspunkte liegen unterhalb der Kurve, da der Bedeckungsgrad ab Erreichen des Maximums nicht verändert wird. Nach *PAKA* entsteht eine zeitlich versetzte Kurve.

Plausibilitätstest mit Ertragsinformationen

Für einige Schläge der Fruchtarten WW (8), WG (4), R (5), ZR (2) und BO (2) stehen Ertragsangaben im Untersuchungs-jahr zur Verfügung [GRÜBLER 2002, SCHWÄBE 2002]. Für die meisten Früchte ist grundsätzlich eine positive Korrelation zwischen Ertragsleistung

und LAI anzunehmen [GEISLER 1983, PETR et al. 1983]. Diese Beziehung soll als Anhaltspunkt für eine Überprüfung auf Plausibilität der ermittelten LAI-Kurven verwendet werden. Hierzu wird der maximale LAI der Kurven den bekannten Erträgen gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass für die R-, ZR- und Bo-Schläge ein höherer Ertrag mit einem höheren, maximalen LAI verbunden ist. Für WG und WW stellt sich dieser Trend nicht ein. Dies lässt sich möglicherweise damit begründen, dass die genannte Beziehung bei Getreide eher schwach ist. Das Maximum des LAI wird schon zum Ährenschieben erreicht. Die eigentliche Entwicklung des Korns erfolgt erst nach der Blüte. Zu diesem Zeitpunkt ist der LAI des Getreidebestandes stark reduziert (regelmäßig um 50 %) [GEISLER 1983, S. 45].

Zusammenfassung

Die Ableitung von zeitlich interpolierten LAI- und Bedeckungsgradkurven aus den vorhandenen TM-Daten mit Hilfe des vereinfachten Wachstumsmodells liefert plausible Ergebnisse. Die Differenzen zwischen den Fernerkundungsergebnissen rufen relativ große Unterschiede zwischen den Kurven hervor, die jedoch auf die Unzulänglichkeiten der verwendeten Methoden zurückzuführen sind. Die bei den Bedeckungsgraden festgestellten Trends gegenüber den Angaben von *PAKA* (s. 7.2.2) werden mit den dargestellten Kurven bestätigt mit Ausnahme von Schlägen, deren Landnutzung angepasst wurde.

Wie unter 4.4.2 (S. 29) bereits angedeutet, werden der Nährstoff- und Wasserstress bei der Modellierung des LAI im Rahmen der Arbeit vernachlässigt. Für den Nährstoffstress ist diese Vereinfachung akzeptabel, da mit den heutigen landwirtschaftlichen Produktionsverfahren eine ausreichende Versorgung der Schläge mit Stickstoff und Phosphor gewährleistet ist [WECHSUNG 2003]. Der nicht berücksichtigte Wasserstress wird vermutlich eher Ungenauigkeiten im LAI-Verlauf hervorrufen. An Tagen, bei denen der Wasserstress größer als der Temperaturstress ist, würde eine geringere LAI-Zunahme erfolgen. Die gesamte LAI-Kurve würde ab diesem Zeitpunkt flacher verlaufen. Tritt dieser Fall zu mehreren Zeitpunkten in der Wachstumsperiode ein, verändert sich gleichzeitig die Form der Kurve. Aus dem Vernachlässigen des Wasserstress resultiert also eine Überschätzung der modellierten LAI und somit des maximal erreichten LAI der jeweiligen Kurve. Der Fehler, der sich in einer vertikalen Verschiebung der LAI-Kurve äußert, wird durch die Abgleichung des LAI_{max} mit den TM-Daten kompensiert. Die Veränderung der Kurvenform kann nur zu einem gewissen Grad durch die Anpassung von I_1 und/oder I_2 gewährleistet werden.

Mit den genutzten Fernerkundungsmethoden und -daten wird der LAI nur für grüne Vegetation erfasst. Es steht somit keine Information zur Beobachtung des LAI mit Einsetzen des Seneszenz zur Verfügung. Um eine bessere Anpassung des Modells in diesem Abschnitt der Kurven zu erreichen, wären solche Informationen erforderlich. In der Arbeit wird als Näherung der Bedeckungsgrad ab seinem Maximum nicht mehr verändert, was eine Überschätzung hervorruft. Bei einigen Früchten (z. B. Getreide) verbleiben nach der Ernte Stoppeln auf den Feldern. Wie Mulch lassen sich diese durch die Fernerkundung bisher nicht erfassen und werden mit dem vereinfachten Wachstumsmodell nicht berücksichtigt.

Die Anpassung des Wachstumsmodells wird im Rahmen der Arbeit mit Differenzen des LAI zwischen TM-Daten und Wachstumsmodellierung von unter 0,1 gewährleistet. Zur Veranschaulichung der Auswirkung dieser Ungenauigkeiten auf den Bedeckungsgrad wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. In Abb. 7.17 wird beispielhaft für einen WW-

Schlag (308) der Verlauf der Größen $fr_{LAI_{max}}$, LAI und B dargestellt. Neben den ermittelten Ergebnissen wird links eine Veränderung des $fr_{LAI_{max,1}}$ und rechts des $fr_{LAI_{max,2}}$ bei der Kurvenanpassung so vorgenommen, dass die Differenz des LAI zum Original jeweils $-0,1$ bzw. $+0,1$ beträgt.

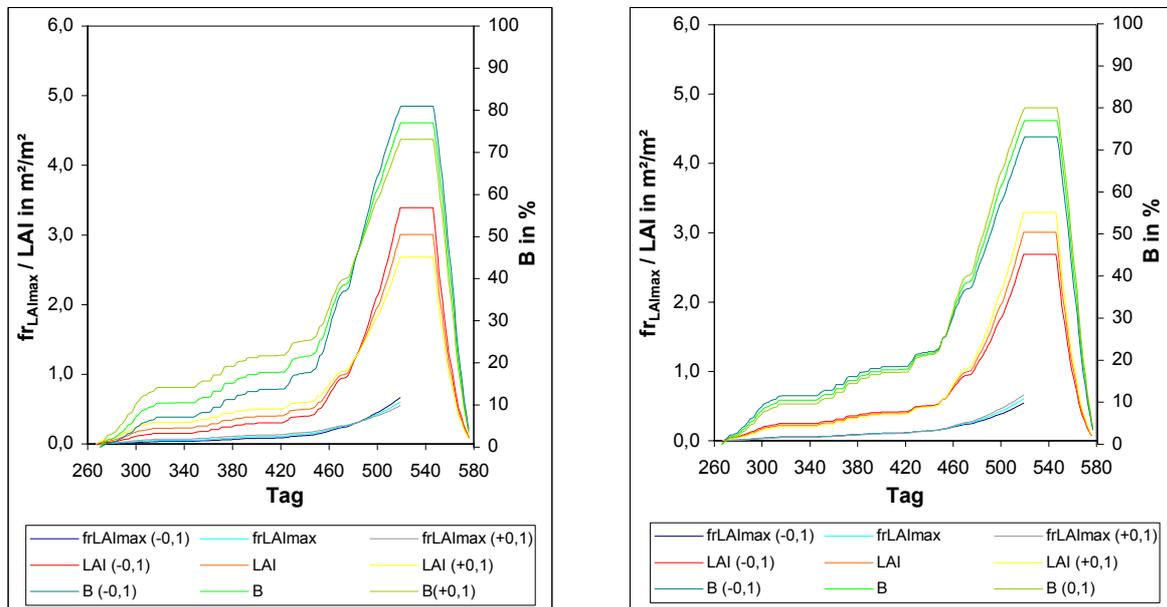


Abb. 7.17: Sensitivitätsanalyse zur Genauigkeit der Anpassung des Wachstumsmodells am Beispiel eines WW-Schlages [Veränderung von $fr_{LAI_{max,1}}$ (li.) und $fr_{LAI_{max,2}}$ (re.)].

Es ist ersichtlich, dass sich Ungenauigkeiten von $fr_{LAI_{max,1}}$ verstärkt in der ersten Hälfte der Kurven und in der Größe des Maximums äußern. Eine Erhöhung des $fr_{LAI_{max,1}}$ bewirkt zunächst einen stärkeren Anstieg der LAI- und B-Kurve und im zweiten Teil (ab Tag 483) einen flacheren Verlauf. Die Senkung von $fr_{LAI_{max,1}}$ führt ein entgegengesetztes Verhalten herbei. Bei Veränderungen des $fr_{LAI_{max,2}}$ treten genau umgekehrte Verhältnisse wie bei $fr_{LAI_{max,1}}$ ein. Eine Erhöhung zieht geringere LAI(+0,1)- und B(+0,1)-Werte im ersten Teil (bis Tag 450) nach sich, die aber deutlich geringere Differenzen zu den LAI und B aufweisen. Bis zum Maximum nimmt der Anstieg zu und fällt bis zur Ernte wieder. Des Weiteren ist zu erkennen, dass kleinere Differenzen bei kleinen LAI gegenüber den größeren beim Maximum höhere Unterschiede im Bedeckungsgrad verursachen. Dieses erwartungsgemäße Verhalten ist auf die Empfindlichkeit des Bedeckungsgrades gegenüber kleinen und mittleren LAI zurückzuführen (s. 7.1.3, S. 64). Demzufolge wirkt sich eine Differenz zum Zeitpunkt der Szene 1 für Wintergetreide mehr aus, je höher der LAI ist.

Der hier vorgeschlagene Ansatz ermöglicht die Ableitung schlagspezifischer Parameter. Da nach der Methode *PAKA* innerhalb eines Untersuchungsgebietes für eine Fruchtart gleiche Bedeckungsgrade angegeben werden, stellt dieser Ansatz somit eine Verbesserung der ortsbezogenen Variabilität dar. Mit einer besseren Entzerrung und einer Anwendung auf ähnlich große Schläge, wie sie im Untersuchungsgebiet vorliegen, kann eine pixelgenaue Angabe von Variabilitäten im Schlag erfolgen.

7.4 Vergleich der Parameter aus TM-Daten mit den zeitlich interpolierten Parametern

Die Berechnung des Bedeckungsgrades aus den TM-Daten wird pixelweise durchgeführt. Die Anpassung des Blattflächenindex aus dem vereinfachten Wachstumsmodell und somit des Bedeckungsgrades an die Fernerkundungsergebnisse erfolgt schlagweise (s. 6.2.4, S. 48). Da die Simulationsergebnisse mit EROSION 3D aus den abgeschätzten Bedeckungsgraden mit denen aus den TM-Daten und aus der zeitlichen Interpolation vergleichend gegenübergestellt werden, wird in diesem Abschnitt gezeigt, welche Differenzen zwischen den unterschiedlich ermittelten Bedeckungsgraden vorliegen. Hierzu werden in Abb. 7.18 die Differenzbeträge des Bedeckungsgrades zwischen den zeitlich interpolierten Ergebnissen (*FE I + WM*) und den Ergebnissen aus den TM-Daten (*FE I*) für Szene 2 (30.04.) und 3 (19.07.) dargestellt. Zusätzlich wird der Differenzbetrag zwischen dem zeitlich interpolierten Ergebnis für das erste Niederschlagsereignis (05.05.) und den TM-Daten vom 30.04. bestimmt, da deren Simulationsergebnisse verglichen werden. Die Differenzen werden beispielhaft für Fernerkundungsmethode I aufgeführt, da hier im Durchschnitt höhere Abweichungen als bei Methode II vorhanden sind.

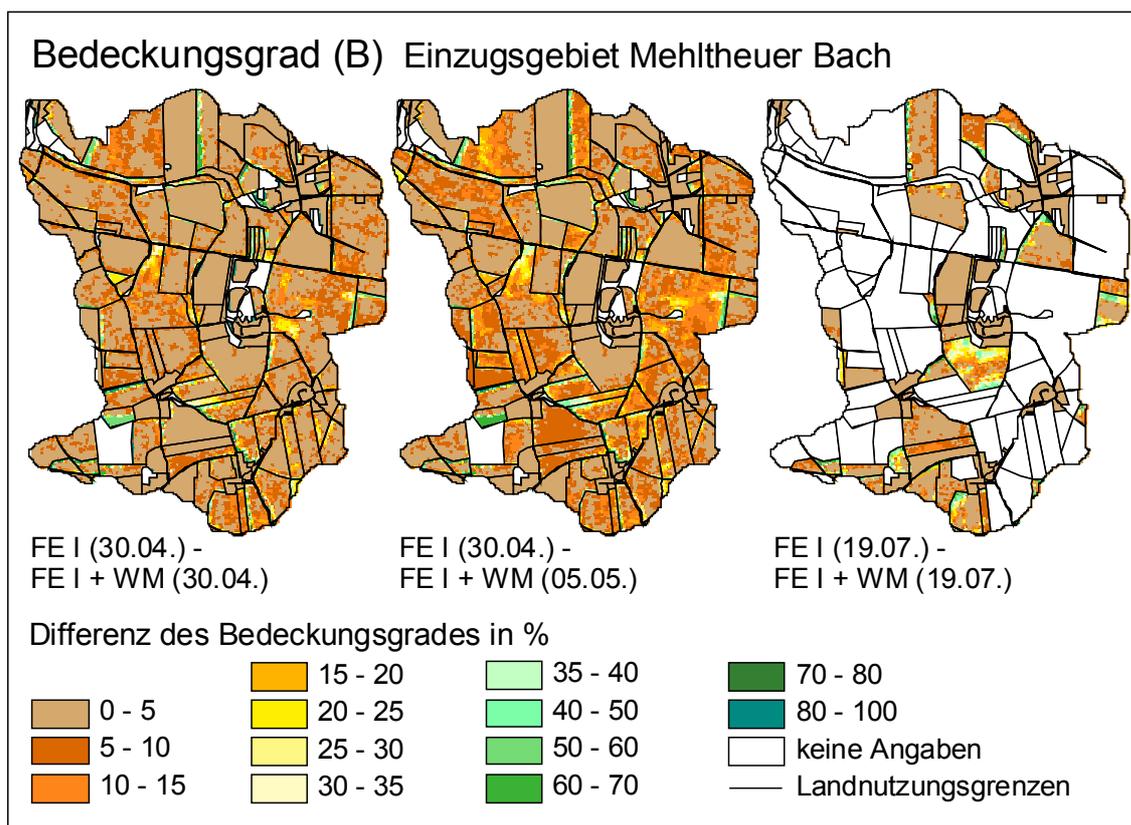


Abb. 7.18: Differenzen zwischen Bedeckungsgrad aus TM-Daten und zeitlich interpoliertem Bedeckungsgrad für Methode FE I.

Die Differenzbeträge für den 30.04. bewegen sich durchschnittlich zwischen 0 % und 10 %. Mathematisch entsprechen sie der Abweichung der TM-Daten von ihrem Schlagmittel (*FE I + WM*). Die Differenzbeträge werden weiterhin durch die gesetzten Toleranzen bei der Anpassung der LAI-Kurve an den LAI aus TM-Daten beeinflusst. Diese können eine vergleichsweise geringe Verschiebung der Beträge vom Mittelwert im Schlag weg

bewirken. Variabilitäten innerhalb der Schläge haben einen weitaus höheren Einfluss. Sie verursachen Differenzen bis zu über 30 % am 30.04. Da ein Rand von sechs bzw. drei Pixeln aus den Schlagmitteln wegen geometrischer Ungenauigkeiten maskiert wurde, können in diesen Bereichen besonders große Differenzen bis über 80 % (hell- bis dunkelgrüne Flächen) auftreten. Bei geometrisch exakt zugeordneten Flächen würden diese nicht vorhanden sein.

Im mittleren Differenzbild der Abb. 7.18 wird den Fernerkundungsergebnissen vom 30.04. der zeitlich interpolierte Bedeckungsgrad vom 05.05. gegenübergestellt. Zu den oben genannten Beträgen kommt hier die Zunahme des Bedeckungsgrades vom 30.04. zum 05.05. nach dem Wachstumsmodell hinzu. Sie beträgt bei den meisten Schlägen zwischen 0 % und 5 %. Nur für WW-Schläge erfolgt ein stärkeres Wachstum und folglich eine größere B-Zunahme um Differenzen bis über 10 %. Da die Zunahme in einem ähnlichen Größenbereich wie die durchschnittliche Schlagvariabilität liegt, kann geschlussfolgert werden, dass diese bei Berücksichtigung der Schlagvariabilität in den Simulationsrechnungen mit EROSION 3D nicht vernachlässigt werden sollte. Da aber die TM-Daten neben dem 30.04. nur zu einem weiteren Zeitpunkt (19.07.) für die Simulationsrechnungen zur Verfügung stehen, wird der Bedeckungsgrad vom 30.04. für das Ereignis vom 05.05. als Näherung verwendet. Zudem wird im folgenden Abschnitt gezeigt, wie stark sich Differenzen des Bedeckungsgrades auf das Erosionsmodell auswirken.

Am 19.07. befinden sich die Winterfrüchte in der Seneszenz. Aus den TM-Daten allein werden ihre Bedeckungsgrade nicht ermittelt. Die Differenzen werden für die Sommerfrüchte dargestellt. Auch hier liegt der Durchschnitt bei etwa 0 % bis 10 %. Es treten wiederum die Randeffekte mit deutlich höheren Beträgen auf. Etwa in der Mitte des Untersuchungsgebietes hebt sich ein Bohnenschlag durch seine besonders große Schlagvariabilität bis über 40 % hervor. Speziell solche Schläge demonstrieren, dass ein Schlagmittel oder einheitlicher Bedeckungsgrad für alle Schläge einer Fruchtart nur eine grobe Näherung darstellen kann.

7.5 Simulationsrechnungen

Die simulierten 29 Niederschlagsereignisse lassen sich nach ihrem berechneten Erosionsverhalten in drei Gruppen einstufen, die in Tab. 7.7 charakterisiert werden.

Tab. 7.7: Eigenschaften der drei Niederschlagsereignisgruppen.

Gruppe	Beschreibung	Ereignisse	Erläutertes Beispiel
1	Erosion < 0,08 kg/m ² , Deposition < 0,22 kg/m ² , gar keine oder sehr geringfügige Differenzen* der FE-Methoden zu <i>PAKA</i>	2, 4, 9, 11, 20, 24, 27, 28	-
2	Erosion < 1,60 kg/m ² , Deposition < 1,30 kg/m ² , nur einzelne Flächen im Gebiet betroffen, sichtbare Differenzen* der FE-Methoden zu <i>PAKA</i>	0,1, 5, 6, 8, 13, 14, 15, 17, 18, 21, 23, 26	0 (05.05.)
3	Höchste Erosion/Deposition häufig über 0,50 kg/m ² , Großteil der Flächen im Gebiet betroffen und/oder sehr hohe Differenzen* der FE-Methoden zu <i>PAKA</i>	3, 7, 10, 12, 16, 19, 22, 25	19 (19.07.)

* Differenzen der transportierten Sedimentmenge, des Gebietsaustrages und der Korngrößenverteilung an den fünf untersuchten Messpunkten (s. 5.2.1.2, S. 36).

Die geringe Erosion/Deposition der **ersten Gruppe** lässt sich auf eine verhältnismäßig geringe Dauer und/oder max. Intensität oder geringe Unterschiede zwischen den Bedeckungsgraden auf einem Großteil der Flächen (z. B. 28) zurückführen. Diese Ereignisse werden deshalb aus den weiteren Betrachtungen ausgeschlossen.

In Abb. 7.19 wird beispielhaft für **Gruppe 2** das Erosionsverhalten des Ereignisses vom 05.05. veranschaulicht. Die Simulationsergebnisse mit dem Bedeckungsgrad der AG Boden- und Gewässerschutz (Methode *PAKA*) werden direkt als erodierte (negativ) und abgelagerte (positiv) Sedimentmenge gezeigt. Für die vier Fernerkundungsmethoden werden jeweils die Differenzen zur Methode *PAKA* dargestellt (*FE - PAKA*). Aufgrund der verschiedenen Vorzeichen wird bei der Darstellung der Differenzen farblich zwischen Erosion (rot bis gelb) und Deposition (grün bis blau) unterschieden. Demzufolge bedeutet eine negative Erosionsdifferenz eine höhere Erosion und eine negative Depositionsdifferenz eine geringere Deposition bei der jeweiligen Fernerkundungsmethode. Des Weiteren wird für jede Methode der Gebietsausstrag angegeben. Die Ergebnisse an den fünf Messpunkten werden in Tab. VIII.1 (Anhang VIII) aufgeführt. Auch hier werden die Differenzen zwischen Fernerkundung und der Methode *PAKA* veranschaulicht, wobei sie als prozentuale Abweichung bezogen auf *PAKA* berechnet werden. Da der Abfluss durch den Bedeckungsgrad unbeeinflusst bleibt, wird er nur für *PAKA* aufgelistet.

Bei einer relativ geringen Erosionswirksamkeit dieser Niederschlagsereignisse tritt Erosion zunächst nur bei besonders starken Hangneigungen, sehr geringen Bedeckungsgraden (z. B. Kiesgrube linke obere Ecke) und auf Schlägen mit schluffreicheren Böden südwestlich von Mehltheuer (Bodenart *Slu*) auf. An der Kiesgrube stellen sich keine Veränderungen in den fünf Darstellungen ein, da deren Bedeckungsgrad in allen Methoden gleich ist.

Die Erosionsdifferenzen zur Methode *PAKA* liegen bei allen vier Fernerkundungsmethoden meist zwischen $-0,01$ und $0,01$ kg/m^2 . Dies sind zwar relativ geringe Werte, sie wirken sich jedoch bei Erosionswerten nach *PAKA* von unter $0,05$ kg/m^2 (Max.: $0,14$ kg/m^2) prozentual stark aus. Depositionsflächen sind aufgrund der starken Ackerdominanz nur an wenigen Stellen wie z. B. Gehölz- oder Grünlandstreifen, Wald, Gärten und unbedeckte Schläge [MICHAEL et al. 2000] zu finden. Für ihre Differenzen gilt ähnliches wie bei der Erosion.

Zum 05.05. wird der Bedeckungsgrad von Winterfrüchten bis auf einige Rapsschläge durch die Fernerkundungsmethoden höher als bei *PAKA* eingeschätzt. Ein höherer Bedeckungsgrad ist mit einem höheren Schutz des Bodens und somit mit geringerer Erosion verbunden. An den Depositionsflächen stellt sich gleichzeitig eine schnellere Ablagerung von Sediment ein. Im Umkehrschluss tritt für Schläge mit Sommerfrüchten, die meist einen niedrigeren Bedeckungsgrad als bei *PAKA* aufweisen, stärkere Erosion und weniger Deposition auf.

Speziell auf den von Erosion betroffenen Flächen befinden sich zum 05.05. die Fruchtarten R, WW, SM und WG (Abb. 7.19). Bis auf den SM-Schlag liegen nach den Methoden *FE I/II + WM* (entspricht im Weiteren immer *FE I + WM* und *FE II + WM*) für dieses Gebiet höhere Bedeckungsgrade als bei *PAKA* vor. Die Methoden *FE I/III* (entspricht im Weiteren immer *FE I* und *FE II*) liefern im Durchschnitt niedrigere Werte im Vergleich zu den zeitlich interpolierten Bedeckungsgraden (s. 7.4), die teilweise unter die Werte von *PAKA* fallen.

Da nach *FE I/II* der Bedeckungsgrad pixelweise bestimmt wurde, liegt eine räumlich differenziertere Verteilung der Erosion für diese Methoden vor. Entsprechend den Bedeckungsgraden treten für die Methoden *FE I/II + WM* die größten Erosionsdifferenzen (geringste Erosion) auf (z. B. hellgelbe Pixel in R-Schlägen). Innerhalb der Rapsschläge ruft die Methode *FE II + WM* mehr Erosion hervor als die Methode *FE I + WM*. Da jedoch bei allen anderen beteiligten Schlägen eine umgekehrte Reihenfolge vorliegt und diese aufgrund ihrer insgesamt geringeren Bedeckungsgrade erosionsanfälliger sind, ergibt sich mit zunehmender Erosion die Einstufung $FE II + WM < FE I + WM < PAKA < FE I < FE II$.

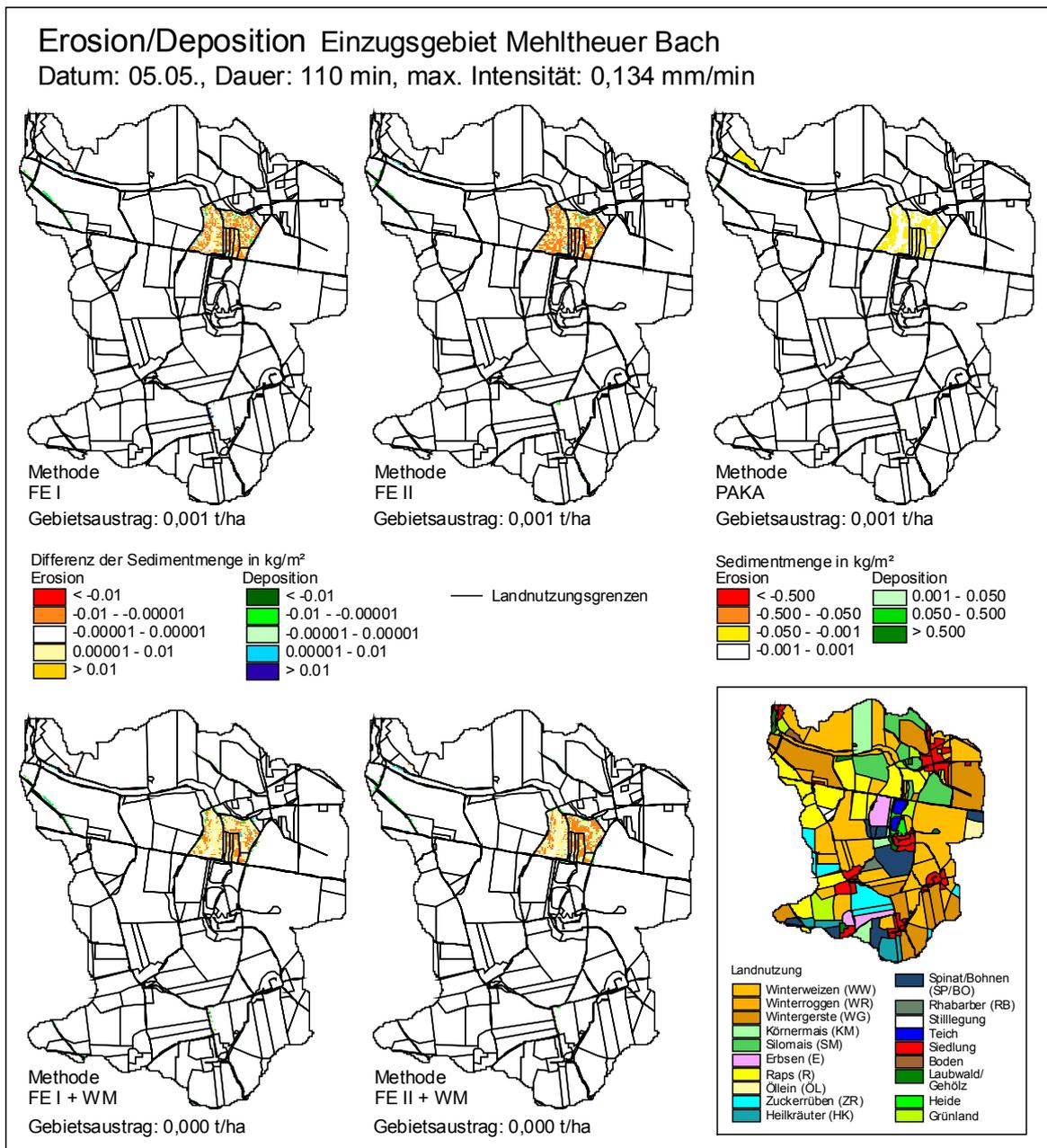


Abb. 7.19: Simulationsergebnisse bzw. –differenzen für die unterschiedlich berechneten Bedeckungsgrade am 05.05.

Dieses Ergebnis wird durch die punktbezogenen Angaben in Tab. VIII.1 verdeutlicht. Erst ab Messpunkt 3, in dessen Einzugsgebiet die erwähnten Erosionsflächen liegen, stellt sich bei einem ausreichend großen Abfluss eine signifikante, transportierte Sediment-

menge ein. Hierbei hängen die transportierte Sedimentmenge und der Gebietsaustrag in Analogie zur Erosion indirekt mit dem Bedeckungsgrad zusammen. Auffallend sind die erhöhten prozentualen Abweichungen der Sedimentmenge bei *FE I/II + WM* in Messpunkt 2 (-36 %, -42%). Diese resultieren aus einem geringeren Abtrag einzelner Pixel im südlichen Teil des Gebietes, bei denen besonders hohe Bedeckungsgrade im Vergleich zu den anderen Methoden auftreten. Der Gebietsaustrag ist bei Gruppe 2 minimal und ändert sich am 05.05. nur für die Methoden *FE I/II + WM*, die die höchsten Bedeckungsgrade zeigen. Gleichzeitig wird die Korngrößenverteilung der transportierten Partikel bei geringerer Erosion zunehmend durch die Korngröße des Ausgangssubstrates und weniger durch die Transportkapazität bestimmt [SCHMIDT 1996, S.45 - 47]. Damit erklärt sich die Abnahme des Tonanteils und die Zunahme des Schluffanteils in Messpunkt 2.

Die Erosionsdifferenzen zwischen den Methoden *FE I/II* bzw. *FE I/II + WM* sind verfahrensbedingt geringer als zwischen den Methoden *FE I/FE I + WM* (entspricht im Weiteren immer *FE I* und *FE I + WM*) bzw. *FE II/FE II + WM* oder zu *PAKA*, was auch in den prozentualen Abweichungen der Sedimentmengen (Tab. VIII.1) sichtbar wird. Zwischen *FE I* und *FE II* zeigen sich generell aufgrund der räumlich differenzierten Bedeckungsgrade größere Differenzen als zwischen *FE I/II + WM*. So unterscheiden sich die Bedeckungsgrade der oben erwähnten Rapsschläge in *FE I* und *FE II* bis über 20 % (Abb. 7.12, S. 72), was zu größeren Differenzen der Sedimentmenge zwischen diesen Methoden bei den Messpunkten 3 bis 5 führt.

Depositionsflächen findet man auf den betrachteten Schlägen nur entlang des Gerinneabflusses oder an Rändern benachbarter Schläge mit höherem Erosionswiderstand (z. B. andere Fruchtart, Bedeckungsgrad, Bodenart). Die Deposition nimmt zwischen den Methoden für höhere Bedeckungsgrade und/oder mit zunehmender Erosion der hangaufwärts gelegenen Flächen zu. So zeigt sich bei dem rechten der beiden Rapsschläge für *FE I + WM* mehr und für *FE II + WM* weniger Deposition gegenüber *PAKA*, da deren Bedeckungsgrade darüber bzw. darunter liegen. Bei den Methoden *FE I/II* erfolgt die Veränderung wiederum räumlich differenzierter und in stärkerem Maße.

Variationen innerhalb der Gruppe dieser Niederschlagsereignisse entstehen durch die Anzahl und Lage der betroffenen Flächen und die Stärke der Erosion. In Abhängigkeit von den betroffenen Flächen kann bei einer gleich bleibenden Einstufung der Bedeckungsgrade durch die Methoden die resultierende Erosion und Sedimentmenge nach *FE I* größer bzw. kleiner als nach *FE II* sein. Zu diesen Veränderungen kommen Variationen der Einstufung der Bedeckungsgradverhältnisse zwischen den Methoden im Laufe der Wachstumsperiode hinzu. So liefern die Fernerkundungsmethoden für die ersten Niederschlagsereignisse bei den Winterfrüchten häufig höhere Bedeckungsgrade und somit weniger Erosion. Etwa ab den Ereignissen 9 bis 11 (29.06. - 02.07.) bis zur Ernte zeigt *PAKA* höhere Werte meist mit 100 %. Bei vielen Schlägen wird der Bedeckungsgrad bei *PAKA* nicht direkt nach dem Erntetermin heruntergesetzt, so dass besonders große Differenzen zur Fernerkundung entstehen. Bei den meisten Schlägen mit Sommerfrüchten liegt der Bedeckungsgrad von *PAKA* für die ersten ein bis drei Niederschlagsereignisse (05.05. - 28.05.) über dem der Fernerkundung. Danach steigen die Fernerkundungsergebnisse an und in einer Art Übergangsbereich befinden sich die *PAKA*-Werte zwischen diesen. Da bei den letzten Niederschlagsereignissen durch *PAKA* meist ein Bedeckungsgrad von 100 % geschätzt wird, liegt die Fernerkundung außer bei KM, HK und E darunter.

Aus diesem Verhalten folgt, dass etwa bis zum Niederschlagsereignis 8 (13.06.) geringere Erosionsbeträge an den betroffenen Flächen sowie geringere transportierte Sedimentmengen und Gebietsausträge an den fünf Messpunkten im Gerinneabfluss für die Methoden *FE I/II + WM* gegenüber *PAKA* auftreten. Spätestens ab dem Ereignis 10 (30.06.) übersteigen die genannten Ausgabegrößen die Werte von *PAKA*.

Unter den Fernerkundungsmethoden liegt für die ersten zwei Ereignisse im Durchschnitt ein höherer Bedeckungsgrad für *Fe II + WM* und somit weniger Erosion als bei *FE I + WM* vor. Dieses Verhalten wird durch die geringeren LAI nach der Methode *Neu* (entspricht *FE I + WM*) für Wintergetreide (Abb. 7.7, S. 62) verursacht. Mit zunehmendem LAI zeigen sich aufgrund des schnelleren Erreichens des $WDVI_{\infty}$ nach *Neu* (z. B. *WG*) und des Verlaufs der Wachstumskurve (z. B. *WW*) höhere LAI für *FE I + WM*. Für einen Großteil der beteiligten Schläge übersteigt deshalb der Bedeckungsgrad von *FE I + WM* den von *FE II + WM* etwa ab dem Niederschlagsereignis 3 (28.05.), so dass *FE II + WM* die stärkere Erosion aufweist. Vor allem im Einzugsgebiet von Messpunkt 2, in dem nur einzelne Pixel von Erosion für diese Ereignisgruppe betroffen sind, kann eine umgekehrte Reihenfolge entstehen. Besonders geringe Unterschiede stellen sich mit fortschreitender Ernte der Winterfrüchte ein, da dann ein Großteil der Flächen in beiden Verfahren mit einem Bedeckungsgrad von 0 % angegeben wird und nur noch die flächenmäßig gering vorliegenden Sommerfrüchte Einfluss haben (z. B. Ereignis 26, 14.08.).

Stellvertretend für die **dritte Gruppe** (s. Tab. 7.7) wird in Abb. 7.20 das Erosionsverhalten des Ereignisses vom 19.07. (19) gezeigt. Die Darstellung erfolgt in Analogie zur Abb. 7.19. Die zugehörigen Ergebnisse an den fünf Messpunkten des Gerinneabflusses sind in Tab. VIII.2 (Anhang VIII) zu finden. Zusätzlich werden diese Ergebnisse für das Ereignis vom 10.07. (16) in Tab. VIII.3 zusammengestellt, da es sich hierbei um das Ereignis mit den stärksten Erosionsauswirkungen handelt.

In Abb. 7.20 ist ersichtlich, dass bei dieser Gruppe ein Großteil der Flächen von Erosion und Deposition betroffen ist. Erosion tritt besonders stark auf den schluffreichen Böden im südlichen und östlichen Teil des Gebietes auf. Entlang der kleinen Täler erfolgt eine zusätzliche Konzentration des Oberflächenabflusses. Somit entstehen erhöhte Bodenabträge von mehr als $0,50 \text{ kg/m}^2$ (z. B. Schläge an der Südspitze) [MICHAEL et al. 2000]. Besonders geringe oder gar keine Erosion wird auf Schlägen mit konservierender Bearbeitung (z. B. pfluglos, Mulchsaat) [MICHAEL 2000, S. 4] simuliert, da hier veränderte Parameter (z. B. Rauigkeit, Erosionswiderstand, Skinfaktor) gegenüber konventionell bearbeiteten Schlägen eingehen.

Die Beträge der Erosionsdifferenzen aller Fernerkundungsmethoden liegen häufig über $0,01 \text{ kg/m}^2$ und können $2,00 \text{ kg/m}^2$ überschreiten. Da die absoluten Erosionsbeträge nach *PAKA* insgesamt höher sind, wirken sich diese Differenzen prozentual weniger stark aus als beim Ereignis vom 05.05. Die Depositionsdifferenzen liefern noch höhere Maximalbeträge im Vergleich zu den Erosionsdifferenzen mit fast $3,40 \text{ kg/m}^2$.

Da am 19.07. durch *PAKA* nahezu allen Schlägen bis auf Sommerfrüchte wie z. B. *KM* und *ZR* ein Bedeckungsgrad von 100 % zugewiesen wird, fallen die Fernerkundungsergebnisse niedriger und somit die simulierte Erosion größer aus (orange und rote Flächen Abb. 7.20). Besonders große Erosionsunterschiede entstehen an Schlägen, bei denen die Fernerkundung insbes. für Sommerfrüchte wie *BO* oder *HK* niedrige Werte berechnet

(z. B. BO-Schlag südlich Roitzsch) und bei denen der Bedeckungsgrad nach der Fernerkundung aufgrund der Ernte auf 0 % gesetzt wird, während er bei *PAKA* noch mit 100 % angegeben wird (z. B. WG-Schlag südöstlich Mehltheuer).

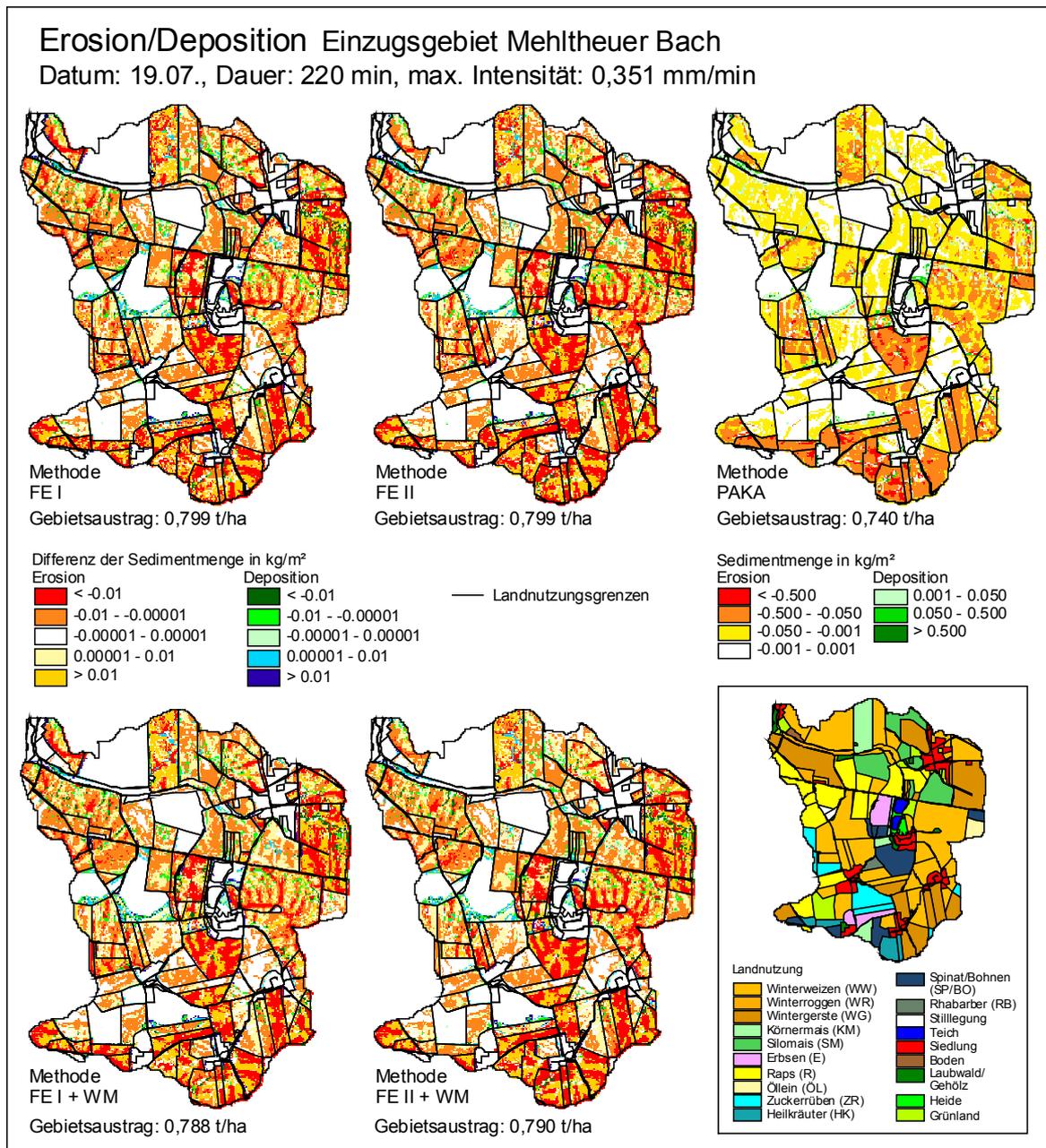


Abb. 7.20: Simulationsergebnisse bzw. –differenzen für die unterschiedlich berechneten Bedeckungsgrade am 19.07.

Wie beim Ereignis vom 05.05. fallen für Sommerfrüchte die Bedeckungsgrade von *FE III* im Durchschnitt geringer aus als die von *FE III + WM*, bedingt durch die Vorgehensweise bei der zeitlichen Interpolation. Für Winterfrüchte ist das nicht zutreffend, da deren Bedeckungsgrade für *FE III* aus der zeitlichen Interpolation übernommen werden. Die größten Erosionsdifferenzen treten jetzt bei *FE III* auf, da hier die größte Erosion vorhanden ist. Dies wird durch den Gesamtgebietsaustrag, der unter den Bildern in Abb. 7.20 aufgelistet wird, verdeutlicht. Da ein Großteil der Schläge für die Methode *FE I* größere Bedeckungsgrade als für *FE II* bzw. *FE I + WM* größer als *FE II + WM* liefert, verursacht das für

FE II/FE II + WM eine stärkere Erosion als für *FE I/FE I + WM*. Dies ist in Abb. 7.20 kaum sichtbar, zeigt sich jedoch beim Gesamtgebietsaustrag der Methoden *FE I/II + WM*. Daraus resultiert bei zunehmender Erosion die Einstufung $PAKA < FE I + WM < FE II + WM < FE I < FE II$. Eine auffällige Ausnahme erkennt man in dem ZR-Schlag nordwestlich von Grauswitz. Hier liefern *FE II* und *FE II + WM* deutlich geringere Differenzen, da vor allem der Bedeckungsgrad von *FE II + WM* sehr dicht bei *PAKA* liegt.

Die punktbezogenen Ergebnisse in Tab. VIII.2 bestätigen die angegebene Reihenfolge. Entsprechend der Stärke des Ereignisses ist in Messpunkt 1 schon eine sehr hohe transportierte Sedimentmenge vorhanden. Auffallend sind die nahezu gleichgroßen prozentualen Abweichungen zu *PAKA* für die transportierte Sedimentmenge und den Gebietsaustrag je Messpunkt, die auch für Ereignis 16 (Tab. VIII.3) erkennbar sind. Diese Eigenschaft ist darauf zurückzuführen, dass der Gebietsaustrag aus der Sedimentmenge berechnet wird. Bei schwach erosiven Ereignissen (z. B. 05.05.) entstehen so kleine Gebietsausträge, dass sich Differenzen unverhältnismäßig groß auswirken können. Hingegen für zunehmende Gebietsausträge nähern sich deren Differenzen der prozentualen Abweichung der Sedimentmenge an. Des Weiteren werden, entgegen der obigen Einstufung, für Messpunkt 1 nach *FE II + WM* kleinere prozentuale Abweichungen als nach *FE I + WM* ersichtlich. Dieses Verhalten wird dadurch verursacht, dass sich im Einzugsgebiet von Messpunkt 1 Schläge mit höherem Bedeckungsgrad nach *FE II + WM* befinden (z. B. WW und R), die einen höheren flächenmäßigen Beitrag leisten als bei den anderen Messpunkten und die aufgrund des Verhaltens der anderen Schläge einen größeren Einfluss haben als bei *FE II* (z. B. rundlicher E-Schlag oberhalb von Altsattel). Da die Korngrößenverteilung wegen der Stärke des Ereignisses vermutlich mehr durch die Transportkapazität beeinflusst wird, entstehen bei einer weiteren Erosionszunahme geringere prozentuale Abweichungen als bei dem Ereignis vom 05.05. (Tab. VIII.1).

Es gelten zwischen den Fernerkundungsergebnissen dieselben Beziehungen wie bei dem Ereignis vom 05.05. Allerdings lassen sich nicht für alle Messpunkte zwischen *FE I/II* größere Differenzen als zwischen *FE I/II + WM* erkennen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass den Schlägen mit Winterfrüchten jeweils für *FE I/FE I + WM* bzw. *FE II/FE II + WM* dieselben Bedeckungsgrade zugeordnet werden. Aufgrund der stärkeren Erosion im Vergleich zum Niederschlagsereignis vom 05.05. treten am 19.07. mehr Depositionsflächen auf, die sich z. T. vom Schlagrand weiter ins Schlaginnere ausdehnen (z. B. R- und WW-Schlag westlich der Teiche).

Die Variationen in der dritten Gruppe können sehr groß sein. So sind zwar bei Niederschlagsereignis 3 (28.05.) relativ wenige Flächen betroffen. Da sich aber in den relevanten Schlägen *PAKA* im Verhältnis zu den vorhergehenden Ereignissen stark ändert, entstehen relativ große Erosionsunterschiede. Zwischen den Ereignissen 7 (10.06.) und 10 (30.06.) liegen deutliche Unterschiede in der räumlichen Verteilung für alle drei Methoden vor, die neben dem zunehmenden Bedeckungsgrad auf veränderte Bodeneigenschaften wie z. B. der Rauigkeit zurückzuführen sind. Ab dem Niederschlagsereignis 10 werden höhere Erosionsergebnisse durch die Fernerkundung simuliert. Lokale Ausnahmen entstehen, wenn der Bedeckungsgrad der Fernerkundung höher liegt als bei *PAKA*. Wenn solche Flächen maßgeblich das Einzugsgebiet einer der Messpunkte beeinflussen (z. B. Messpunkt 1 Ereignis 22), ist dies vor allem durch eine geringere Sedimentmenge sichtbar.

Zwischen den Fernerkundungsergebnissen zeigt Methode *FE I + WM* für die dritte Ereignisgruppe den höheren Bedeckungsgrad und somit die geringere Erosion sowie geringere transportierte Sedimentmengen und Gebietsausträge. In Messpunkt 1 ändert sich dieses Verhalten für einige Ereignisse wie z. B. 12 und 16 (Tab. VIII.3), an denen Winterfrüchte mit größeren Bedeckungsgraden bei *FE II + WM* noch nicht abgeerntet wurden. Hingegen dominieren im Einzugsgebiet von Messpunkt 3 und in den nachfolgenden Messpunkten 4 und 5 bei dem weniger starken Ereignis 25 die WW-Schläge. Hier wird ein höherer Bedeckungsgrad und somit eine geringere Sedimentmenge für *FE II + WM* berechnet.

Um die Auswirkungen des Bedeckungsgrades auf die erodierte und akkumulierte Sedimentmenge genauer zu verdeutlichen, werden in Abb. 7.21 die Abweichungen zu *PAKA* am Beispiel eines relativ stark von Erosion betroffenen BO-Schlages zum Niederschlagsereignis 19 vergrößert dargestellt. Der Schlag ist südlich der Teiche gelegen (s. Abb. 7.20) und weist starke Schwankungen des Bedeckungsgrades auf. In den obersten linken und rechten Bildern werden die absoluten Bedeckungsgrade und Erosions-/Depositionsmengen des Schlages gezeigt, für die die Legenden aus Abb. 7.20 gelten. Des Weiteren wird der flächenbezogene Gebietsaustrag durch Mittelung der Erosion/Deposition berechnet [MICHAEL et al. 2000]. Bei den darunter gelegenen Bildern werden jeweils für die vier Fernerkundungsmethoden die prozentualen Abweichungen zu *PAKA* abgebildet. Zusätzlich wird in Klammern die prozentuale Abweichung des flächenbezogenen Gebietsaustrags angegeben.

Der Bedeckungsgrad ist für Methode *PAKA* am größten. Die niedrigsten Absolutwerte bzw. größten prozentualen Abweichungen entstehen für die Methoden *FE II* und *FE II + WM*. Für die Methoden mit einheitlichen Werten im Schlag sind diese explizit aufgeführt. Bei den Methoden *FE I/II* wird ersichtlich, dass im Nordteil des Schlages deutlich geringere Bedeckungsgrade bzw. größere Differenzen (bis zu 100 %) vorhanden sind, die nach Süden hin tendenziell zunehmen bzw. abnehmen. Bei der Sedimentmenge werden die Ergebnisse nach *PAKA* von denen der Fernerkundungsmethoden abgezogen. Eine verfeinerte Auffächerung der Abweichungen erfolgt nur für die Erosion, da diese vorrangig im Schlag sowie im Untersuchungsgebiet auftritt und für die Deposition umgekehrte Zusammenhänge gelten. Dabei werden die Erosionsabweichungen in Werte unterschieden, die kleiner gleich *PAKA* (gelb - rot) und größer als *PAKA* (hellgrün - dunkelgrün) sind. Treten Beträge größer 100 % auf, ist die berechnete Differenz höher als der Wert von *PAKA*.

Generell ist, wie oben bereits erläutert, mit abnehmendem Bedeckungsgrad eine Zunahme der Erosion (grüne Flächen) und des flächenbezogenen Gebietsaustrages verbunden. Weiterhin gilt, dass eine zunehmende Abweichung des Bedeckungsgrades eine zunehmende Abweichung der Erosion nach sich zieht (vgl. *FE I + WM* und *FE II + WM* bzw. *FE I* und *FE II*). Die Methoden *FE I/II* liefern wiederum sichtbar räumlich differenziertere Werte. Bei den flächenbezogenen Gebietsausträgen zeigen sich jedoch zur jeweils dazugehörenden zeitlich interpolierten Version relativ geringe Unterschiede (0,01 kg/m²).

Im Unterschied zu *FE I* und *FE I + WM* zeigt *FE II* einen geringeren Gebietsaustrag als *FE II + WM*. Das resultiert größtenteils aus der Verteilung des Bedeckungsgrades, der für *FE II* im Schlaginneren gleichmäßiger verteilt und niedriger als bei *FE I* ist. Bei der Mittelung für *FE II + WM* werden vorrangig höhere, am südlichen Rand gelegene Werte ausgeschlossen, so dass ein geringeres Mittel und somit höhere Erosion entsteht.

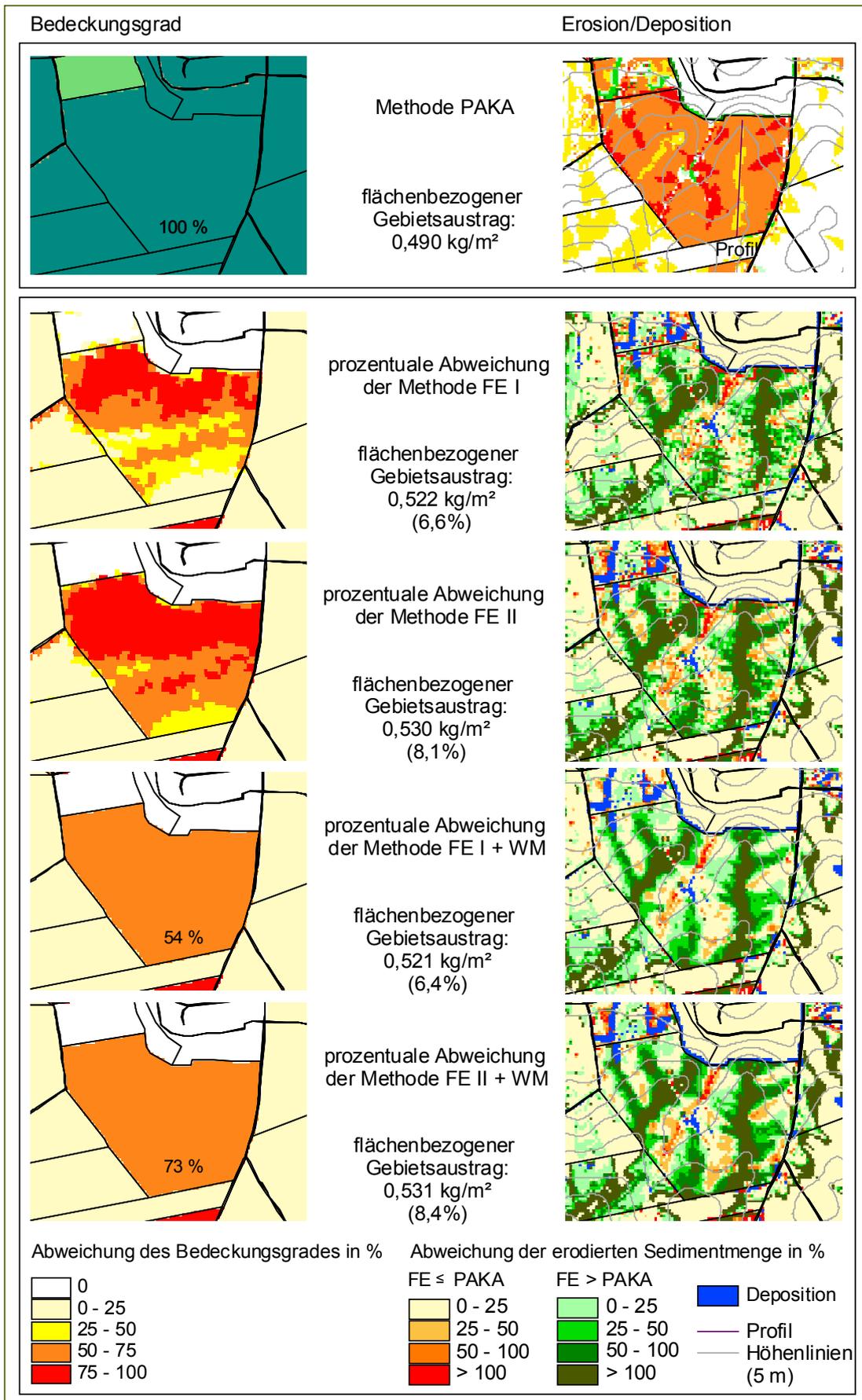


Abb. 7.21: Prozentuale Abweichungen des Bedeckungsgrades und der Erosion/Deposition am Beispiel eines Bohnenschlages für das Niederschlagsereignis am 19.07.

Innerhalb des Schlags variieren von den Eingangsparametern nur das Relief und bei *FE I* und *FE II* der Bedeckungsgrad. Demzufolge resultiert bei den Methoden die Variation im Schlag *PAKA* und *FE III + WM* primär aus den Geländeeigenschaften. Da der Bedeckungsgrad als Faktor in den Impulsstrom der aufprallenden Tropfen (Gl. 3.3, S. 18) eingeht, wird dessen Veränderung in Form einer Verstärkung bzw. Abschwächung des Geländeeinflusses wirksam. Bei den Methoden *Fe I/Fe II* ist der Einfluss des Geländes insgesamt größer als der Einfluss der Änderung des Bedeckungsgrades. Es ist nur ein leichter Trend bemerkbar, wonach im Norden bei *Fe III* größere Abweichungen als im Süden festzustellen sind. Hierbei sind die Erosionsabweichungen von *FE II* am südlichen Rand infolge des niedrigeren Bedeckungsgrades etwas größer als bei *FE I*.

Betrachtet man die Höhenlinien, sind im Schlag drei größere, etwa in N-S-Richtung verlaufende Rücken erkennbar. Von den Rücken hin zu den Tälern wird die Zunahme der Erosion gegenüber *PAKA* immer kleiner (grüne Flächen), da der Anteil des Impulsstromes der aufprallenden Regentropfen ($\varphi_{r,\alpha}$) an der Gesamterosion bei abnehmendem Bedeckungsgrad zunimmt und $\varphi_{r,\alpha}$ selbst für größere Hangneigungen weniger zunimmt.

Mit Abb. 7.22 wird dieses Verhalten genauer veranschaulicht. Hierin werden entlang einer Strecke von Nord nach Süd bei steigendem Gelände (Profil Abb. 7.21) die verschiedenen Bedeckungsgrade und erodierten Sedimentmengen sowie das Verhalten des Geländes abgebildet. Bei einem Bedeckungsgrad von 100 % (*PAKA* blau) verursachen geringe Hangneigungen geringe Erosionsbeträge (z. B. bei 15, 28, 38), da die Erosion ausschließlich durch den Impulsstrom des Oberflächenabflusses (φ_q) bestimmt wird. Mit abnehmendem Bedeckungsgrad steigt $\varphi_{r,\alpha}$ und somit kehrt sich zunehmend das Verhältnis um (s. *FE III + WM*). Mit geringerem Bedeckungsgrad nimmt auch die Amplitude der Ausschläge zu, was z. B. zwischen den Pixeln 16 und 28 bei *FE III + WM* deutlich wird.

Auffallend ist weiterhin, dass an den beiden Profilenden besonders hohe Hangneigungen auftreten, die aber nur rechts (im Süden) zu erhöhten Sedimentmengenbeiträgen führen. Ursache hierfür ist, dass die Pixel am südlichen Profilende größere Einzugsgebiete aufweisen und sich folglich ein höherer Abfluss und Abtrag bilden. Da der Anteil des φ_q an der Gesamterosion somit viel höher ist, reicht der Einfluss von $\varphi_{r,\alpha}$ nicht aus, um geringere Erosion als bei kleineren Hangneigungen hervorzurufen, sondern macht sich nur in einer prozentual geringeren Differenz zu *PAKA* im Vergleich zu den anderen Profilverpunkten bemerkbar.

Bei den Methoden *Fe III* ist zusätzlich der Einfluss der Veränderungen des Bedeckungsgrades entlang des Profils sichtbar. Entsprechend des Verlaufs in Abb. 7.22 ist der Bedeckungsgrad selbst, resultierend aus dem Pflanzenwachstum, durch die Geländeverhältnisse und möglicherweise durch unterschiedliche Bewirtschaftung im Schlag beeinflusst. So werden bei *FE III* die geländebedingten Kurvencharakteristika zusätzlich hervorgehoben. Die etwa drei Pixel breiten Plateaus lassen sich auf die ursprüngliche Pixelgröße der TM-Daten von 30 m zurückführen.

Ein weiteres Phänomen ist entlang der Täler und Fließwege auf den vorhandenen Erosionsflächen aller Niederschlagsereignisse mehr oder weniger stark ausgeprägt zu finden. Hier tritt im Vergleich zu *PAKA* bei geringeren Bedeckungsgraden in den Fernerkundungsergebnissen weniger Erosion auf (Abb. 7.21 gelblich bis rote Flächen). Dies lässt sich darauf zurückführen, dass aufgrund der erhöhten Erosion entlang der Rücken mehr

Sediment hangabwärts transportiert wird. Am Unterhang kann zwar durch den geringeren Bedeckungsgrad potenziell mehr erodiert werden, jedoch ist die Menge schneller durch die Transportkapazität begrenzt als bei *PAKA*. Nach der Bilanzierung der zu- und abtransportierten Sedimentmenge für ein Pixel kann effektiv weniger Material erodiert werden [BORG 2003]. Umgekehrt zeigt sich bei Erhöhung des Bedeckungsgrades weniger Erosion auf den Rücken. Da die Transportkapazität später erreicht wird, kann in den Tälern mehr Sediment aufgenommen werden, weshalb die Erosion steigt.

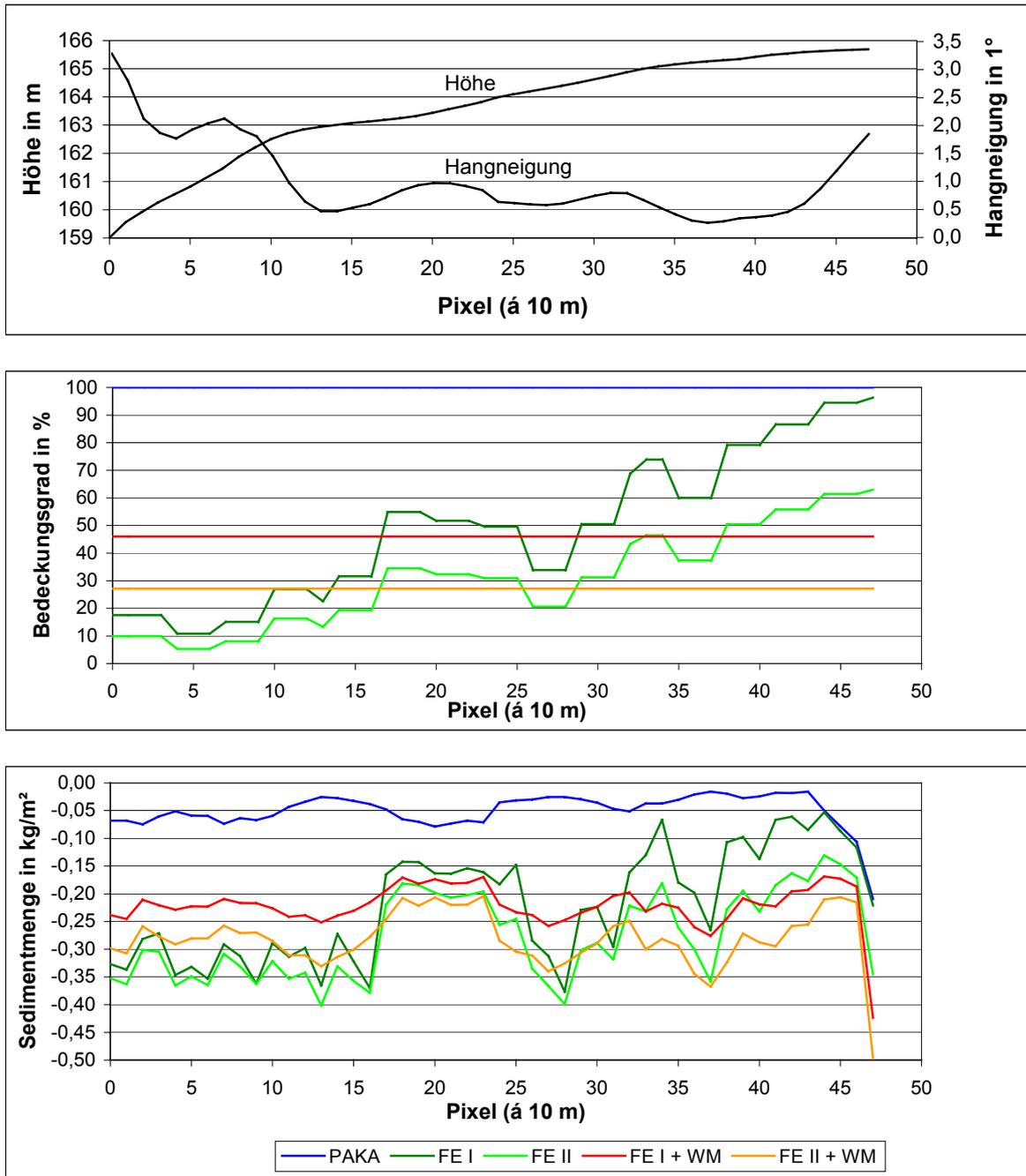


Abb. 7.22: Geländehöhe, Hangneigung, Bedeckungsgrad und erodierte Sedimentmenge am 19.07 für das Profil in einem Bohnenschlag (Lage s. Abb. 7.21).

Der genauer betrachtete BO-Schlag stellt mit dem simulierten Niederschlagsereignis und den Bedeckungsgraden ein sehr extremes Beispiel dar. Zu diesem Zeitpunkt und vor al-

lem für den Großteil der Ereignisse fallen diese Auswirkungen in den meisten Schlägen deutlich geringer aus. Auch zwischen den Gesamtgebietsausträgen der drei Varianten für alle Niederschlagsereignisse bestehen relativ geringfügige Differenzen, die innerhalb der Fernerkundungsmethoden am geringsten sind. Es wurden folgende Werte ermittelt: 3,25 t/ha (PAKA), 3,40 t/ha (FE I + WM), 3,41 t/ha (FE II + WM).

Dennoch ist aufgrund des räumlich variablen Bedeckungsgrades im Schlag auch bei gering erosiv wirksamen Ereignissen eine räumliche Umverteilung in den Erosions- und Depositionsflächen sichtbar. Zudem werden hier nur die Veränderungen des Parameters Bedeckungsgrad an sich, nicht aber dessen Auswirkungen auf andere Parameter (z. B. Rauigkeit) betrachtet. Gleichzeitig soll noch einmal darauf hingewiesen werden, dass bei einigen Schlägen der Bedeckungsgrad mit den Fernerkundungsdaten von vornherein unterschätzt wird, da der Anteil von toten Pflanzenteilen (z. B. Mulch) nicht adäquat abgeleitet werden kann. Des Weiteren ist zu bemerken, dass die räumliche Verteilung nur eines Parameters durch die Fernerkundung eingeflossen ist. Ein nächster Schritt für zukünftige Arbeiten wäre die Bereitstellung der räumlichen Verteilung weiterer Eingangsparameter im Schlag (Bodenparameter) oder im Gebiet (Niederschlag), was zu signifikanteren Änderungen führen würde.

8 **Schlussfolgerungen und Ausblick**

Die multispektrale satellitengestützte Fernerkundung ermöglicht eine räumlich verteilte, multitemporale Ableitung erosionsrelevanter Parameter. Da vor allem für die Bestimmung von Vegetationsparametern eine Vielzahl von Methoden existiert, wurden in der vorliegenden Arbeit beispielhaft der Blattflächenindex und der Bedeckungsgrad für das physikalisch begründete Erosionsmodell EROSION 3D in einem kleinen Einzugsgebiet im Sächsischen Lößgefilde bereitgestellt. Aus deren Ergebnissen lassen sich folgende Aussagen ableiten:

- 1) Mangels einer einheitlichen Methode wurde der grüne Blattflächenindex für alle Fruchtarten im Untersuchungsgebiet mit verschiedenen Ansätzen bestimmt. Aufgrund seines physikalischen Charakters und seines mehrfachen Einsatzes für wichtige Fruchtarten in Europa wird in der Arbeit das CLAIR-Modell präferiert.
- 2) Für das CLAIR-Modell wurde der bodenspezifische Faktor C aus den TM-Daten abgeleitet. Gemeinsam mit Laborspektren von Bodenproben wurde gezeigt, dass ein einheitlicher C-Wert für das Untersuchungsgebiet zufriedenstellende Ergebnisse liefert. Somit konnten die Ergebnisse von CLEVERS [1986] bestätigt werden.
- 3) Es wurde eine Methode entwickelt und getestet, die die Koeffizienten des CLAIR-Modells (α , $WDVI_{\infty}$) für alle vorhandenen Fruchtarten bereitstellt. Hiermit wird eine Anpassung des $WDVI_{\infty}$ an das vorliegende Gebiet erreicht. Aufgrund des Mangels an in-situ-LAI-Messungen kann diese Methode nicht validiert werden.
- 4) Der Vergleich der ermittelten LAI nach den verschiedenen Ansätzen ergab wegen der unterschiedlichen zugrunde liegenden mathematischen Funktionen und Vegetationsindizes teilweise sehr große Differenzen. In einigen Fällen wurde eine unterschiedliche Einstufung der Vegetationsmenge und somit des LAI durch ratiobasierte Vegetationsindizes (z. B. NDVI) und den $WDVI$ festgestellt.
- 5) Der Bedeckungsgrad wurde für alle Fruchtarten aus dem LAI berechnet. Der Vergleich der Ergebnisse mit denen aus bekannten empirischen Beziehungen zeigt die Plausibilität der Ergebnisse. Ungenauigkeiten des LAI wirken sich vor allem für kleine und mittlere Werte am stärksten auf den Bedeckungsgrad aus.
- 6) Mit den verwendeten Methoden und Daten werden abgestorbene Pflanzenteile nicht erfasst. Die vorgeschlagenen Näherungen wurden als zulässig erachtet, da nicht die exakte Bestimmung der Vegetationsparameter aus Fernerkundungsdaten im Mittelpunkt des Interesses steht, sondern die Untersuchung von derzeitigen Möglichkeiten und Auswirkungen von Differenzen zwischen den Methoden auf das Erosionsmodell.
- 7) Die vorgeschlagene Methode zur schlagbezogenen zeitlichen Interpolation des LAI/Bedeckungsgrades liefert plausible Ergebnisse. Im Vergleich zu der herkömmlichen Vorgehensweise ermöglicht sie eine differenziertere Abbildung räumlicher Variabilitäten und des zeitlichen Verlaufes der Vegetationsparameter.
- 8) Mit der Assimilation von Fernerkundungsdaten in verschiedene Umweltmodelle (z. B. zeitliche Modellierung) werden gleichzeitig solche Daten aufgewertet.
- 9) Simulationsrechnungen mit EROSION 3D wurden für zwei Niederschlagsereignisse mit den direkt aus den TM-Daten abgeleiteten Bedeckungsgraden (pixelbezogen) und für alle Ereignisse mit den zeitlich interpolierten Bedeckungsgraden (schlagbezogen) durchgeführt. Die Ergebnisse wurden mit denen bei Nutzung herkömmlich ermittelter Bedeckungsgrade verglichen.
- 10) Die Differenzen zwischen den unterschiedlich ermittelten Bedeckungsgraden machen sich vor allem je nach Stärke des Niederschlagsereignisses und Erosionsanfälligkeit

des Schlages in den pixelbezogenen Erosions- und Depositionsbeträgen bemerkbar. Eher geringfügige Änderungen entstehen bei den Gebietsausträgen.

- 11) Der Einsatz der vorgeschlagenen Fernerkundungsmethoden führte zu einer besseren räumlichen Differenzierung bei der Erosionsmodellierung. Für die im Untersuchungsgebiet vorliegende räumliche Heterogenität (z. B. Schlaggröße) bieten TM-Daten eine ausreichend genaue räumliche Auflösung. Damit kann die eingangs gestellte Frage nach einem sinnvollen Einsatz der Fernerkundung im Rahmen dieser Untersuchungen positiv beantwortet werden.
- 12) Bei Betrachtung des Verhältnisses von Aufwand und Nutzen bewirken vergleichsweise aufwendig ermittelte Bedeckungsgrade aus den TM-Daten relativ geringe Veränderungen in den Erosionsergebnissen. Jedoch wurden im vorliegenden Fall die Auswirkungen der besseren räumlichen Differenzierung für nur einen Eingangsparameter betrachtet und zudem die Einflüsse auf andere Parameter außer Acht gelassen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit führen zu folgenden möglichen Verbesserungen und zukünftigen Aufgabenstellungen:

- 1) Die Böden in dem relativ kleinen Mehltheuer-Bach-Gebiet verhalten sich spektral sehr ähnlich. Für eine Anwendung in größeren, heterogenen Gebieten ist es empfehlenswert, den Bedarf eines gebietsspezifischen C-Wertes zu überprüfen und eine höhere Anzahl von über mehrere Bewirtschaftungsjahre verteilten Aufnahmen zugrunde zu legen.
- 2) Da nicht für alle Fruchtarten die erforderlichen empirischen Parameter zur Berechnung des Koeffizienten α für das CLAIR-Modell vorhanden sind und deshalb von ähnlichen Fruchtarten übertragen werden mussten, sind weitere Untersuchungen notwendig.
- 3) Da eine Erfassung von abgestorbenen Pflanzenteilen in den Wellenlängenbereichen des mittleren Infrarot (z. B. $1,1 \mu\text{m} - 2,5 \mu\text{m}$) vielversprechender als im sichtbaren und nahen Infrarotbereich erscheint [ELVIDGE 1990], ist vor allem mit einem zukünftigen operationellen Einsatz von hyperspektralen Sensoren auf Satelliten Abhilfe zu erwarten.
- 4) Der Einfluss des Bodensignals kann trotz des Versuchs der Minimierung bei konventionellen spektralen Vegetationsindizes nicht ganz ausgeschaltet werden. Alternativ könnten hier zukünftig hyperspektrale Vegetationsindizes oder die Inversion komplexer Reflexionsmodelle genutzt werden.
- 5) Die Ableitung der Vegetationsparameter wurde auf die vorliegenden landwirtschaftlichen Fruchtarten beschränkt. Eine flächendeckende Anwendung auch in anderen Gebieten erfordert weiterhin Methoden, die eine Bestimmung für mehr Fruchtarten und schwerer erfassbare Landbedeckungstypen wie z. B. Wald und Grünland ermöglichen.
- 6) Das vereinfachte Wachstumsmodell stützt sich auf fruchtartenspezifische Eingangsparameter. Durch Kalibrierung dieser Parameter mit in-situ-Messungen kann das Modell verbessert bzw. validiert werden, was in der Arbeit nicht möglich war.
- 7) Mit einer optimalen geometrischen Korrektur vor allem in Hinblick auf Zeitreihen und sehr gut passenden Landnutzungsgrenzen ist eine pixelweise zeitliche Interpolation anstrebbbar.
- 8) Die Anpassung der Wachstumskurve an die TM-Ergebnisse wird mit einer Genauigkeit vorgenommen, die für den vorliegenden Zweck ausreichend ist. Für eine operationelle Ableitung des täglichen Bedeckungsgrades mit kalibrierten und validierten Methoden muss überprüft werden, ob eine mathematisch exaktere Anpassung erforderlich ist.

- 9) Der mit den Fernerkundungsdaten angepasste Wachstumsverlauf könnte genutzt werden, um den WDV_∞ iterativ besser zu bestimmen.
- 10) Im Bereich der Fernerkundung ist zunehmend ein Trend zu erkennen, operationell Parameter bzw. Produkte bereitzustellen. Deshalb wurden unter diesem Aspekt Methoden untersucht. Zudem ist man bestrebt, bestimmte Teilprozesse oder gesamte Verarbeitungsketten zu automatisieren. So wird schon seit mehreren Jahren in der Abteilung „Umwelt und Geoinformation“ des DFD in Neustrelitz das Ziel verfolgt, Prozessoren für Vorverarbeitungsschritte (z. B. Atmosphärenkorrektur, Georeferenzierung) [BORG et al. 1999, FICHELTMANN et al. 2001] oder für thematische Produkte (z. B. Evapotranspiration, Blattflächenindex) [WLOCZYK 2002] zu entwickeln. Nur unter dieser Voraussetzung können dem Nutzer zukünftig in vertretbaren Zeiträumen kostengünstig objektive Produkte angeboten werden [FICHELTMANN et al. 2001].
- 11) Die hier vorgestellten Methoden wurden für ein relativ kleines Gebiet angewendet. Mit der Anwendung auf mittlere und große oder schwer begehbare Untersuchungsgebiete steigt die Effizienz der satellitengestützten Fernerkundung.
- 12) Die im Rahmen der Arbeit abgeleiteten Parameter lassen sich über die hier vorgestellte direkte Eingabe in das Modell EROSION 3D hinaus weiterhin nutzen. So kann der Blattflächenindex und der Bedeckungsgrad im Modell selbst eingesetzt werden, um den Interzeptionsspeicher der Pflanzen bei der Modellierung zu berücksichtigen. Die aufgenommene und gespeicherte Wassermenge des Interzeptionsspeichers geht von der für den Oberflächenabfluss und die Infiltration zur Verfügung stehenden Wassermenge ab.
- 13) Darüber hinaus sind beide Parameter wesentliche Größen bei der Modellierung des Stoff- und Wasserkreislaufes sowie des Strahlungstransportes in der Vegetation [ROSS 1981, S. 12 - 35, GILABERT et al. 1996]. Spezielle Anwendungen, die in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen haben, sind die Modellierung von Wachstumsprozessen, die Ertragsmodellierung und der Katastrophenschutz [BARET & GUYOT 1991, BOUMAN et al. 1992].
- 14) Seitens der Prozessmodellierung besteht ein genereller Bedarf an flächenhaften Parametern, einerseits um sie als Eingangsparameter in Modellen und andererseits um sie zur flächenhaften Validierung von Teilprozessen und Zwischenprodukten zu nutzen [MICHAEL 2002, WECHSUNG 2003].

Literaturverzeichnis

- ADAMS, J. B. & M. O. SMITH (1986): Spectral mixture modelling: A new analysis of rock and soil types at the Viking Lander 1 site. *Journal Geophysical Research* 91: 8098-8112.
- ARNOLD, J. G.; ALLEN, P. M. & G. BERNHARDT (1993): A comprehensive surface-groundwater flow model. *Journal of Hydrology* 142: 47-69.
- ASRAR, G. (Hrsg.) (1989): *Theory and applications of optical remote sensing*. John Wiley & Sons, New York.
- ASRAR, G.; FUCHS, M.; KANEMASU, E. T. & J. L. HATFIELD (1984): Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agron. J.* 76: 300-306.
- ASRAR, G.; KANEMASU, E. T.; MILLER, G. P. & R. L. WEISER (1986): Light interception and leaf area estimates from measurements of grass canopy reflectance. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing GE-24* (1): 76-81.
- AUERSWALD, K. & F. SCHMIDT (1986): *Atlas der Erosionsgefährdung in Bayern – Karten zum flächenhaften Bodenabtrag durch Regen*. GLA-Fachberichte 1, Geologisches Landesamt, München.
- AUERSWALD, K.; FLACKE, W. & L. NEUFANG (1988): Räumlich differenzierende Berechnung großmaßstäblicher Erosionsprognosekarten – Modellgrundlagen der dABAG. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 151: 369-373.
- BACH, H. (1995): Die Bestimmung hydrologischer und landwirtschaftlicher Oberflächenparameter aus hyperspektralen Fernerkundungsdaten. *Münchner Geographische Abhandlungen Reihe B*, Band B 21, Geobuch-Verlag, München, 175 S.
- BACH, H. (2001): Ertragsermittlung durch gekoppelte Anwendung von Fernerkundung und Pflanzenwachstumsmodellen. In: Bettac, H.-D. & S. Dech: *Tagungsband: 17. Nutzerseminar des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums des DLR*. DLR-Mitteilung 2001-02: 59-68.
- BACKHAUS, R.; BAUER, P.; BORG, E.; BRAUN, G.; GRUNWALD, A.; MCGLADE, J. M. & S. GAITO (1993): *Analyse raumgestützter Erkundungssysteme unter umweltstrategischen Aspekten*. Technischer Bericht DLR – TB 318 – 93/4.
- BANNARI, A.; MORIN, D.; BONN, F. & A. R. HUETE (1995): A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews* 13: 95-120.
- BARET, F. & G. GUYOT (1991): Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Rem. Sens. Environ.* 35: 161-173.
- BARET, F. (1986): *Contribution au suivi radiométrique de cultures de céréales*. Thèse d'Université, Université de Paris-Sud Orsay (France), 182 pp.
- BARET, F.; ANDRIEU, B. & M. D. STEVEN (1993): Gap frequency and canopy architecture of sugar beet and wheat crops. *Agricultural and Forest Meteorology* 65: 261-279.
- BARET, F.; CLEVERS, J. P. G. W. & M. D. STEVEN (1995): The robustness of canopy gap fraction estimates from red and near-infrared reflectances: A comparison of approaches. *Rem. Sens. Environ.* 54: 141-151.
- BAUER, M. E.; DAUGHTRY, C. S. T.; BIEHL, L. L.; KANEMASU, E. T. & F. G. HALL (1986): Field spectroscopy of agricultural crops. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing GE-24* (1): 65-75.
- BEASLEY, D. B. & L. F. HUGGINS (1982): *ANSWERS – User's manual*. Dept. Of Agr. Eng., Purdue University, West Lafayette, In.
- BENDIX, J.; REUDENBACH, C.; TASCHNER, S.; LUDWIG, R. & W. MAUSER (2001): Retrieval konvektiver Niederschläge in Mitteleuropa mit Fernerkundungsdaten und Modellen. In: Bettac, H.-D. & S. Dech: *17. Nutzerseminar des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums des DLR*. DLR-Mitteilung 2001-02: 69-78.
- BERK, A.; BERNSTEIN, L. S. & D. C. ROBERTSON (1989): *MODTRAN: A moderate resolution model for LOWTRAN 7*. GL-TR-89-0122, Geophysical Laboratories, Bedford, MA.
- BERNHARDT, A.; HAASE, G.; MANNSFELD, K.; RICHTER, H. & R. SCHMIDT (1986): *Naturräume der sächsischen Bezirke*. Sächsische Heimatblätter 4/5 (Sonderdruck): 16-22.
- BIFTU, G. F. & T. Y. GAN (2001): Semi-distributed, physically based, hydrologic modeling of the Paddle River Basin, Alberta, using remotely sensed data. *Journal of Hydrology* 244: 137-156.

- BINDLISH, R. & A. P. BARROS (2001): Parameterization of vegetation backscatter in radar-based, soil moisture estimation. *Rem. Sens. Environ.* 76: 130-137.
- BORG, E.; HOLZER-POPP, T.; BITTNER, M.; DECH, S.; EBERTSEDER, T.; FICHELTMANN, B. & M. SCHROEDTER (1999): Verfahren zur automatischen Atmosphärenkorrektur multispektraler Fernerkundungsdaten. In: Mehl, H. & S. Dech: Tagungsband: 16. Nutzerseminar des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums des DLR. DLR-Mitteilung 1999-03: 145-156.
- BORG, E. & A. KLISCH (2001): Bereitstellung von Eingangsparametern für die Erosionsmodellierung mit Hilfe der Fernerkundung. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, Band 95: 113-116.
- BORG, E. & R. BACKHAUS (1993): Technikfolgenabschätzung zum technologischen Potential der Fernerkundung am Beispiel der Bodenschutzproblematik in den neuen Bundesländern. VDI Technologiezentrum Physikalische Technologien, Düsseldorf.
- BORG, E. (1994): A concept for the integration of remote sensing data in erosion simulation. Unveröffentlicht.
- BORG, E. (2000): IDL-Routine zur Ermittlung der Kontur von Objekten in Rasterbildern. unveröffentlicht.
- BORG, E. (2002): Persönliche Mitteilung.
- BORG, E. (2003): Persönliche Mitteilung.
- BORK, H.-R. (1988): Bodenerosion und Umwelt. *Landschaftsgenese und Landschaftsökologie*, Heft 13, Selbstverlag Abteilungen für Physische Geographie und Landschaftsökologie und für Physische Geographie und Hydrologie der TU Braunschweig.
- BORK, H.-R. & A. SCHRÖDER (1996): Quantifizierung des Bodenabtrags anhand von Modellen. In: Blume et al. (Hrsg.): *Handbuch der Bodenkunde*. Ecomed, Landsberg, 1. Erg. Lfg. 12/96.
- BOSCH, D.; THEURER, F.; BINGNER, R.; FELTON, G. & I. CHAUBEY (1998): Evaluation of the AnnAGNPS water quality model. American Society of Agricultural Engineers, Annual Meeting, Orlando, Florida. Paper No. 982195.
- BOUMAN, B. A. M.; VAN KASTEREN, H. W. J. & D. UENK (1992): Standard relations to estimate ground cover and LAI of agricultural crops from reflectance measurements. *Eur. J. Agron.* 1 (4): 249-262.
- BOUMAN, B. A. M.; KROPFF, M. J.; TUONG, T. P.; WOPEREIS, M. C. S.; TEN BERGE, H. F.M. & H. H. VAN LAR (2001): ORYZA2000: Modeling lowland rice. International Rice Research Institute/Wageningen University and Research Centre, Los Baños (Philippines)/Wageningen: pp 235.
- BRAUD, I.; VICH, A. I. J.; ZULUAGA, J.; FORNERO, L. & A. PEDRANI (2001): Vegetation influence on runoff and sediment yield in the Andes region: observation and modelling. *Journal of Hydrology* 254: 124-144.
- BROGE, N. H. & E. LEBLANC (2000): Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Rem. Sens. Environ.* 76: 156-172.
- CAMPBELL, W. J. (1981): An application of Landsat and computer technology to potential water pollution from soil erosion. In: *Satellite Hydrology, Proc. of the 5th Annual William T. Pecora Memorial Symp. on Remote Sensing*, Sioux Falls, SD, June 10-15, 1979: 616-621.
- CHEN, J. M. & J. CIHLAR (1996): Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images. *Rem. Sens. Environ.* 55: 153-162.
- CHEN, J. M.; PAVLIC, G.; BROWN, L.; CIHLAR, J.; LEBLANC, S. G.; WHITE, H. P.; HALL, R. J.; PEDDLE, D. R.; KIN, D. J.; TROFYMOW, J. A.; SWIFT, E.; VAN DER SANDEN, J. & P. K. E. PELLIKKA (2002): Derivation and validation of Canada-wide coarse-resolution leaf area index maps using high resolution satellite imagery and ground measurements. *Rem. Sens. Environ.* 80: 165-184.
- CHOUDHURY, B. J. (1987): Relationships between vegetation indices, radiation absorption, and net photosynthesis evaluated by a sensitivity analysis. *Rem. Sens. Environ.* 22: 209-233.
- CHOUDHURY, B. J.; AHMED, N. U.; IDSO, S. B.; REGINATO, R. J. & C. S. T. DAUGHTRY (1994): Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. *Rem. Sens. Environ.* 50: 1-17.
- CIHLAR, A. (2002): Persönliche Mitteilung.
- CLEVERS, J. G. P. W. (1986): Application of remote sensing to agricultural field trials. Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.

- CLEVERS, J. P. G. W. (1988): The derivation of a simplified reflectance model for the estimation of leaf area index. *Rem. Sens. Environ.* 25: 53-69.
- CLEVERS, J. P. G. W. (1989): The application of a weighted infrared-red vegetation index for estimating leaf area index by correcting for soil moisture. *Rem. Sens. Environ.* 29: 25-37.
- CLEVERS, J. G. P. W. (1991): Application of the WDV in estimating LAI at the generative stage of barley. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 46: 37-47.
- CLEVERS, J. P. G. W.; VONDER, O. W.; JONGSCHAAP, R. E. E.; DESPRATS, J. F.; KING, C.; PRÉVOT, L. & N. BRUGUIER (2000): A semi-empirical approach for estimating plant parameters within the RESEDA-project. *IAPRS, Vol. XXXIII, Amsterdam.*
- COLWELL, J. E. (1974): Vegetation canopy reflectance. *Rem. Sens. Environ.* 3: 175-183.
- COLWELL, R. N. (Hrsg.) (1983): *Manual of remote sensing. Vol. 1, Theory, instruments and techniques; Vol. 2, Interpretation and applications.* American Society of Photogrammetry, The Sheridan Press, 2. Auflage.
- CYR, L.; BONN, F. & A. PESANT (1995): Vegetation indices derived from remote sensing for an estimation of soil protection against water erosion. *Ecological Modelling* 79: 277-285.
- DE JONG, S. M.; PARACCHINI, M. L.; BERTOLO, F.; FOLVING, S.; MEGIER, J. & A. P. J. DE ROO (1999): Regional assessment of soil erosion using the distributed model SEMMED and remotely sensed data. *Catena* 37: 291-308.
- DE ROO, A.; ODIJK, M.; SCHMUCK, G.; KOSTER, E. & A. LUCIEER (2001): Assessing the effects of land use changes on floods in the Meuse and Oder catchment. *Phys. Chem. Earth (B)* 26 (7-8): 593-599.
- DE ROO, A. P. J. (1993): *Modelling surface runoff and soil erosion in catchments using Geographical Information Systems.* Dissertation, Universität Utrecht.
- DE ROO, A. P. J.; WESSELING, C. G.; CREMERS, N. H. D. T.; OFFERMANN, R. J. E.; RITSEMA, C. J. & K. VAN OOSTINDIE (1994): LISEM: a new physically-based hydrological and soil erosion model in a GIS-environment, theory and implementation. In: Olive, L. J.; Loughran, R. J. & J. A. Kesbys (Hrsg.), *Variability in stream erosion and sediment transport*, IAHS Publication 224, IAHS Science Press, Wallingford: 439-448.
- DECH, S. W. (1997): *Anwendung der Fernerkundung. – Von der geowissenschaftlichen Forschung zum operationellen Einsatz.* DLR-Forschungsbericht 97-52, Köln.
- DECH, S. W.; BITTNER, M.; LEHNER, M.; MEISNER, R. & G. STRUNZ (1999): *Ausgewählte Beispiele der Satellitenfernerkundung am Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum. Rundgespräche der Kommission für Ökologie, Bd. 17 „ Fernerkundung und Ökosystem-Analyse“:* 145-163.
- DLR (1997): *Data user handbook. Modular optoelectronic multispectral stereo scanner MOMS-2P.* German Aerospace Research Establishment (DLR), German Remote Sensing Data Center (DFD), Neustrelitz.
- DWD (1994): *Gutachten des DWD. Zentralamt, Abt. Klimatologie, Zentralstelle für Hydrometeorologische Entwicklungen und Anwendungen, Reg.-Nr. 322-93.*
- DYCK, S. (Hrsg.) (1980a): *Angewandte Hydrologie - Teil 1: Berechnung und Regelung des Durchflusses der Flüsse.* VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 2., völlig überarbeitete Auflage.
- DYCK, S. (Hrsg.) (1980b): *Angewandte Hydrologie - Teil 2: Der Wasserhaushalt der Flußgebiete.* VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 2., überarbeitete Auflage.
- ELMORE, A. J.; MUSTARD, J. F.; MANNING, S. J. & D. B. LOBELL (2000): Quantifying vegetation changes in semiarid environments: Precision and accuracy of spectral mixture analysis and the normalized difference vegetation index. *Rem. Sens. Environ.* 73: 87-102.
- ELVIDGE, C. D. & Z. CHEN (1995): Comparison of broad-band and narrow-band red and near-infrared vegetation indices. *Rem. Sens. Environ.* 54: 38-48.
- ELVIDGE, C. D. (1990): Visible and near infrared reflectance characteristics of dry plant materials. *Int. J. Remote Sensing* 11 (10): 1775-1795.
- EURIMAGE (2002): *Products & Services – Landsat.* URL: http://www.eurimage.com/Products/product_pdf/landsat.pdf
- FERREIRA, V. A. & R. E. SMITH (1992): *OPUS – An integrated simulation model for transport of non-point-source pollutants at the field scale.* User Manual, Vol. 90. USDA-ARS, Washington, D.C.
- FICHTELMANN, B.; BORG, E.; GÜNTHER, A.; BARUTH, B.; WOLFF, E. & R. REIMER (2001): *Produkte der Satelliten-Fernerkundung für Biologie und Ökologie von Küstengewässern – Teil B: Operati-*

- onelles Chlorophyllmonitoring für die Ostsee seit 1998. In: Bettac, H.-D. & S. Dech: Tagungsband: 17. Nutzerseminar des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums des DLR. DLR-Mitteilung 2001-02: 155-165.
- FLACKE, W.; AUERSWALD, K. & L. NEUFANG (1990): Combining a modified soil loss equation with a digital terrain model for computing high resolution maps of soil loss resulting from rain wash. *Catena* 17: 383-397.
- FLANAGAN, D. C. & M. A. NEARING (Hrsg.) (1995): US Department of Agriculture Water Erosion Prediction Project. WEPP hillslope profile and watershed model documentation (Version 95.7). National Soil Erosion Research Laboratory Report 10, USDA-ARS, West Lafayette.
- FLANAGAN, D. C. & S. J. LIVINGSTON (Hrsg.) (1995): US Department of Agriculture Water Erosion Prediction Project. WEPP user summary (Version 95.7). National Soil Erosion Research Laboratory Report 11, USDA-ARS, West Lafayette.
- FREDEN, S. C. & F. GORDON, JR. (1983): Landsat satellites. In: Colwell, R. N (Hrsg.): Manual of remote sensing- Vol. I: Theory, instruments and techniques. The Sheridan Press, 2. Auflage: 517-570.
- FRIEDL, M. A.; MICHAELSEN, J.; DAVIS, F. W. WALKER, H. & D. S. SCHIMEL (1994): Estimating grassland biomass and leaf area index using ground and satellite data. *Int. J. Remote Sensing* 15 (7): 1401-1420.
- GEISLER, G. (1983): Ertragsphysiologie von Kulturarten des gemäßigten Klimas. Verlag Paul Parey, Berlin und Hamburg.
- GILABERT, M. A.; GARCÍA-HARO, F. J. & J. MELIÁ (2000): A mixture modeling approach to estimate vegetation parameters for heterogeneous canopies in remote sensing. *Rem. Sens. Environ.* 72: 328-345.
- GILABERT, M. A.; GANDÍA, S. & J. MELIÁ (1996): Analyses of spectral-biophysical relationships for a corn canopy. *Rem. Sens. Environ.* 55: 11-20.
- GOETZ, S. J. (1997): Multi-sensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site. *Int. J. Remote Sensing* 18 (1): 71-94.
- GREEN, W. H. & G. A. AMPT (1911): Studies on soil physics. I: The flow of air and water through soils. *J. Agr. Sci.* 4: 1-24.
- GRÜBLER, W. (2002): Anbauinformationen und Ertragsdaten für ausgewählte Schläge des Agrarunternehmens „Lommatzcher Pflege“ e. G., Lommatzsch OT Barmenitz, unveröffentlicht.
- GÜNTHER, A. (2003): Persönliche Mitteilung.
- HAASE, G. (1995): Sächsische Lößgefilde. In: Mannsfeld, K. & H. Richter (Hrsg.): Naturräume in Sachsen. Forschungen zur deutschen Landeskunde 238, Zentralausschuss für deutsche Landeskunde, Selbstverlag, Trier: 70-150.
- HARZ, G. (2002): Anbauinformationen für ausgewählte Schläge des Agrarunternehmens Gert Harz, Lommatzsch OT Trogen, unveröffentlicht.
- HATZFELD, F. & H. WERNER (1989): Untersuchung über Ansätze und Modelle zur Langfristsimulation von Erosionsprozessen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen. Spezielle Berichte der KFA Jülich 546, Jülich.
- HENSEL, H. (1991): Verfahren zur EDV-gestützten Abschätzung der Erosionsgefährdung von Hängen und Einzugsgebieten. *Bodenökologie und Bodengenese* 2, TU, Berlin.
- HENSEL, H. & H.-R. BORK (1988): EDV-gestützte Bilanzierung von Erosion und Akkumulation in kleinen Einzugsgebieten unter Verwendung der modifizierten Universal Soil Loss Equation. In: *Landschaftökologisches Messen und Auswerten* 2: 107-136.
- HOUSER, P. R.; SHUTTLEWORTH, W. J.; FAMIGLIETTI, J. S.; GUPTA, H. V.; SYED, K. H. & D. C. GOODRICH (1998): Integration of soil moisture remote sensing and hydrologic modeling using data assimilation. *Water Resources Research* 34 (12): 3405-3420.
- HUETE, A. R. (1988): A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Rem. Sens. Environ.* 25: 295-309.
- HUETE, A. R. (1989): Soil influences in remotely sensed vegetation-canopy spectra. In: Asrar, G. (Hrsg.): *Theory and applications of optical remote sensing*. John Wiley & Sons, New York: 107-141.
- HUNT, G. R. & J. W. SALISBURY (1970): Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks. I. Silicate Minerals. *Modern Geology* 1: 283-300.

- HUNT, G. R. (1980): Electromagnetic radiation: The communications link in remote sensing. In: Siegal, B. S. & A. R. Gillespie (Hrsg.): Remote sensing in geology. John Wiley & Sons, New York: 5-45.
- IES Calculation Procedures Committee (1984): Recommended practice for the calculation of daylight availability. *Journal of the Illuminating Engineering Society of North America* 13(4): 381-392.
- IRONS, J. R.; WEISMILLER, R. A. & G. W. PETERSEN (1989): Soil reflectance. In: Asrar, G.: Theory and applications of optical remote sensing. Wiley Series in Remote sensing, New York.
- JAGUSCH, M. (1997): Aneicherung von Radarniederschlagsdaten des Deutschen Wetterdienstes an Regenschreibermeßwerte. Diplomarbeit, Ruhr-Universität Bochum.
- JONGSCHAAP, R. E. E. (1997): ROTASK 1.0. In: Plentinger, M. C. & F. W. T. Penning de Vries (Hrsg): Rotation models for ecological farming. Quantitative approaches in systems analysis no. 10. C.T. de Wit Graduate School for Production Ecology and and Resource Conservation, Wageningen University.
- JÜRGENS, C. (1999): Anwendung des hydrologischen Einzugsgebietsmodells „ANSWERS“ unter Einbeziehung von Fernerkundungs- und GIS-Techniken zur Analyse des Effekts von Landnutzungsveränderungen auf das Abflußverhalten. In: Strobl, J. & T. Blaschke (Hrsg.): Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XI: Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 1999. Wichmann, Heidelberg.
- KA 4 (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung. AG Bodenkunde. Hannover, 4., verb. und erw. Auflage.
- KAINZ, M. (1987): Oberflächenabfluß, Nährstoffabflüsse und Bodenabtrag unter Mais und Zuckerrüben – Bestimmung von Faktorenwerten der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung mit einem Regensimulator. Dissertation TU München (Weißenstephan).
- KAUFMANN, H. (1999): Imaging spectroscopy in geology. In: Mehl, H. & S. Dech: Tagungsband: 16. Nutzerseminar des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums des DLR. DLR-Mitteilung 1999-03: 73-83.
- KAUFMANN, H.; MEIßNER, D.; BODECHTEL, J. & F. J. BEHR (1989): Design of spectral and panchromatic band for the German MOMS-02 sensor. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 55 (6): 875-881.
- KLIK, A. (1994): Vergleich verschiedener Bodenerosionsmodelle – eine Hilfestellung zur Auswahl des optimalen Verfahrens. *Wiener Mitteilungen* 119.
- KLISCH, A.; BORG, E. & S. DECH (2001): Remote sensing as an important source for physically based soil erosion modelling. In: Helming, K. (Hrsg.): Multidisciplinary approaches to soil conservation strategies. *ZALF-Bericht* 47: 33-40.
- KNIPLING, E. B. (1970): Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Rem. Sens. Environ.* 1: 155-159.
- KNISEL, W. G. (Hrsg.) (1980): CREAMS: A field-scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. USDA Conservation Research Report 26. USDA/Science and Education Administration, Washington, D.C.
- KRAMER, H. J. (Hrsg.) (1996): Observation of the earth and its environment: survey of missions and sensors. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 3. erweiterte Auflage.
- KRONBERG, P. (1985): Fernerkundung der Erde. Grundlagen und Methoden des Remote Sensing in der Geologie. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- KRYSANOVA, V.; WECHSUNG, F. & J. ARNOLD (2000): SWIM (Soil and Water Integrated Model) – User Manual (Version: SWIM-8). Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam, Germany.
- KRYSANOVA, V.; WECHSUNG, F.; BECKER, A.; POSCHENRIEDER, W. & J. GRÄFE (1999): Mesoscale ecohydrological modelling to analyse regional effects of climate change. *Environmental Modeling & Assessment* 4: 259-271.
- LEBLON, B. ; GRANBERG, H.; ANSSEAU, C. & A. ROYER (1993): A semi-empirical model to estimate the biomass production of forest canopies from spectral variables. Part 1: relationship between spectral variables and light interception efficiency. *Remote sensing Reviews.* 7: 109-125.
- LEONARD, R. A.; KNISEL, W. G. & D. A. STILL (1987): GLEAMS: Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 30:1403-1418.

- LILLESAND, T. M. & R. W. KIEFER (1994): Remote sensing and image interpretation. John Wiley & Sons, New York, 3. Auflage.
- LUDWIG, R.; HELLWICH, O.; STRUNZ, G.; ROTH, A. & K. EDER (2000): Applications of digital elevation models from SAR interferometry for hydrologic modelling. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation* 2/2000: 81-94.
- MAGAGI, R. D. & Y. H. KERR (2001): Estimating surface soil moisture and soil roughness over semiarid areas from the use of the copolarization ratio. *Rem. Sens. Environ.* 75: 432-445.
- MATTIKALLI, N. M.; ENGMAN, E. T.; AHUJA, L. R. & T. J. JACKSON (1998): Microwave remote sensing of soil moisture for estimation of profile soil property. *Int. J. Remote Sensing* 19 (9): 1751-1767.
- MAUSER, W.; RAST, M. & H. BACH (1999): Remote sensing – What will we get? In: Tenhunen, J. D. & P. Kabat (Hrsg.): Integrating hydrology, ecosystem dynamics, and biogeochemistry in complex landscapes. Wiley, Chichester: 61-87.
- MICHAEL, A. (1992-1996): Bodenerosionsmeßprogramm Sachsen. Zwischenbericht 1-12 im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie und der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Freiberg und Leipzig, unveröffentlicht.
- MICHAEL, A. (2000): Anwendung des physikalisch begründeten Erosionsprognosemodells EROSION 2D/3D – Empirische Ansätze zur Ableitung der Modellparameter. Dissertation TU Bergakademie Freiberg.
- MICHAEL, A. (2002): Persönliche Mitteilung.
- MICHAEL, A.; SCHMIDT, J. & W. SCHMIDT (1996): Handbuch EROSION 2D/3D, Band 2, Parameterkatalog Sachsen. Im Auftrag der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft und des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, Leipzig und Freiberg, unveröffentlicht.
- MICHAEL, A.; VON WERNER, M. & J. SCHMIDT (2000): Abschätzung des Sediment- und Nährstoffeintrages in Oberflächengewässer mit dem Erosionsprognosemodell EROSION 3D. In: Abschlussbericht zum Projekt: „Entwicklung eines Informationssystems zur Erosionsminderung im Wassereinzugsgebiet der Jahna – einem Nebenfluss der Elbe“. URL: http://www.smul.sachsen.de/de/wu/aktuelles_und_spezielles/berichte_und_statistik/erosionsmodell/.
- MITSCHERLICH, E. A. (1923): Bodenkunde für Land- und Forstwirte. Verlag Paul Parey, Berlin, 4., Neubearb. Auflage.
- MONSI, M. & T. SAEKI (1953): Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Jpn. J. Bot.* 14: 22-52.
- MONTEITH, J. L. (1977): Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Phil. Trans. Res. Soc. London Ser. B* 281: 277-329.
- MORGAN, R. P. C. (1999): Bodenerosion und Bodenerhaltung. ENKE im Thieme Verlag, Stuttgart.
- MORGAN, R. P. C.; QUINTON, J. N. & R. J. RICKSON (1992): EUROSEM Documentation manual (Version 1). Silsoe College, Silsoe.
- MORGAN, R. P. C.; QUINTON, J. N.; SMITH, R. E.; GOVERS, G.; POESEN, J. W. A.; AUERSWALD, K.; CHISCI, G.; TORRI, D.; STYCZEN, M. E. & A. J. V. FOLLY (1998): The European soil erosion model (EUROSEM): documentation and user guide (Version 3.6). Silsoe College, Cranfield University.
- MÜSCHEN, B.; FLÜGEL, W. A.; HOCHSCHILD, V.; STEINNOCHER, K. & F. QUIEL (2001): Spectral and spatial classification methods in the ARSGISIP project. *Phys. Chem. Earth (B)* 26 (7-8): 613-616.
- NEARING, M. A.; DEER-ASCOUGH, L. J. M. LAFLÉN (1990): Sensitivity analysis of the WEPP hillslope profile erosion model. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 33 (3).
- NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R. & J. R. WILLIAMS (2001): Soil and Water Assessment Tool – Theoretical documentation Version 2000. URL: <http://www.brc.tamus.edu/swat/>.
- NESTLER, J. (2000): Aufbau eines Digitalen Geländemodells DGM auf der Grundlage von Luftbildern und topographischen Karten bei der Anwendung des Geoinformationssystems Arc/Info. Diplomarbeit TU Bergakademie Freiberg. unveröffentlicht.
- NETELER, M. (1999): Spectral Mixture Analysis von Satellitendaten zur Bestimmung von Bodenbedeckungsgraden im Hinblick auf die Erosionsmodellierung – dargestellt am Beispiel des Innerste-Berglands zwischen Bad Salzdetfurth und Brockenem. Diplomarbeit am Geographi-

- schen Institut der Universität Hannover, URL:
<http://hgeo02.geog.uni-hannover.de/users/neteler/kurzzusammenfassung.html>.
- NICODEMUS, F. E. (1982): Reflectance nomenclature and directional reflectance emissivity. *Appl. Opt.* 9 (6): 1474-1475.
- NITZ, B. (1991): Das Altmoränenland. In: Liedke, H. & J. Marcinek: *Physische Geographie Deutschlands*. Haack, Gotha, 1. Auflage.
- PALACIOS-ORUETA, A.; PINZÓN, J. E.; USTIN, S. L. & D. A. ROBERTS (1999): Remote sensing of soils in the Santa Monica Mountains: II. Hierarchical foreground and background analysis. *Rem. Sens. Environ.* 68: 138-151.
- PAVLIDIS, T. (1990): *Algorithmen zur Grafik und Bildverarbeitung*. Heise, Hannover.
- PEARSON, R. L. & L. D. MILLER (1972): Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of short-grass prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado. In: *Proc. 8th Int. Symp. on Rem. Sens. of Environ.*, ERIM, Ann Arbor, MI: 1357-1381.
- PETERSON, D. L.; SPANNER, M. A.; RUNNING, STEVEN, W. & K. B. TEUBER (1987): Relationship of Thematic Mapper simulator data to leaf area index of temperate coniferous forests. *Rem. Sens. Environ.* 22: 323-341.
- PETR, J.; ČERNÝ, V.; HRUŠKA, L. & KOLLEKTIV (1983): *Ertragsbildung bei landwirtschaftlichen Kulturpflanzen*. VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag Berlin, Berlin, 1. Auflage.
- PILZ, H. & J. STROBL (2002): Versiegelungsanalyse auf Basis digitaler Farborthofotos mittels objektorientierter Bildverarbeitung. In: Blaschke, T. (Hrsg.): *Fernerkundung und GIS: Neue Sensoren – innovative Methoden*. Wichmann Verlag, Heidelberg.
- PREUßER, C. (1998): Ermittlung des Blattflächenindex aus AVHRR-NDVI-Zeitreihen. Ein Beitrag zur Entwicklung eines biogenen Emissionskatasters. Diplomarbeit an der Mathematisch-Geographischen Fakultät der Katholischen Universität Eichstätt.
- PRICE, J. C. & W. C. BAUSCH (1995): Leaf area index estimation from visible and near-infrared reflectance data. *Rem. Sens. Environ.* 52: 55-65.
- PRICE, J. C. (1993): Estimating leaf area index from satellite data. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing* 31 (3): 727-734.
- PUREVDORJ, T.; TATEISHI, R.; ISHIYAMA, T. & Y. HONDA (1998): Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices. *Int. J. Remote Sensing* 19 (18): 3519-3535.
- RENARD, K. G. (1993): *Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). User's guide (Version 1.02)*. US Soil and Water Conservation Society, Ankeny.
- RENARD, K. G.; FOSTER, G. R.; WEESIES, G. A. & J. P. PORTER (1991): RUSLE – Revised Universal Soil Loss Equation. In: *Journal of Soil and Water Conservation* 46 (1): 30-33.
- RICHARDSON, A. J. & C. L. WIEGAND (1977): Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 43: 1541-1552.
- RICHTER, G. (1976): Was ist Bodenerosion? - In: Richter, G. unter Mitarbeit von W. Sperling (Hrsg.): *Bodenerosion in Mitteleuropa. Wege der Forschung* Bd. 430, Darmstadt: 75-105.
- RICHTER, H. (1995): Natur und Landschaftskomponenten in Sachsen. In: Mannsfeld, K. & H. Richter (Hrsg.): *Naturräume in Sachsen. Forschungen zur deutschen Landeskunde* 238, Zentralausschuss für deutsche Landeskunde, Selbstverlag, Trier: 70-150.
- RICHTER, R. (1994): Model SENSAT-5: Sensor-Atmosphere-Target. DLR-IB 552-01/94, DLR, Wessling.
- RICHTER, R. (1996): A spatially adaptive fast atmospheric correction algorithm. *Int. J. Remote Sensing* 17 (6): 1201-1214.
- RICHTER, R. (2002): Persönliche Mitteilung.
- RITCHIE, J. T. & S. OTTER (1985): Description and performance of CERES-Wheat a user-orientated wheat yield model. In: Willis, W. O. (Hrsg.): *ARS wheat yield project*. USDA-ARS, ARS-38, Washington, DC.: 159-175.
- ROOSE, E. J. (1975): Erosion et ruissellement en Afrique de l'ouest: vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. Cyclo. ORSTOM, Adiopodoumé, Ivory Coast.
- ROSENFELD, D.; WOLFF, D. B. & E. AMITAI (1994): The Window Probability Matching Method for rainfall measurements with radar. *J. Appl. Meteor.* 33: 682-693.
- ROSS, J. (1975): Radiation transfer in plant communities. In: Monteith, J. L. (Hrsg.): *Vegetation and the atmosphere*. Vol. 1 Principles. Academic Press, London: 13-55.

- ROSS, J. (1981): The radiation regime and architecture in plant stands. Dr W. Junk Publishers, The Hague.
- ROSS, J. & V. ROSS (1969): Прострастенная ориентация листьев в посевах. In: Autorenkollektiv: Фотосинтетическая продуктивность растительного покрова (Photosynthetic productivity of plant stand). Estonian Academy of Sciences, IPA, Tartu: 60-82.
- ROTH, A. & W. KNÖPFLE (2000): Digitale Höhenmodelle aus Radarinterferometrie. Petermanns Geographische Mitteilungen 144, 3: 4-5.
- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. & J. C. HARLAN (1974): Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD, 371 S.
- RUCHHOLZ, K. (1991): Grundzüge der geologischen Entwicklung – Präquartär. In: Liedke, H. & J. Marcinek: Physische Geographie Deutschlands. Haack, Gotha, 1. Auflage.
- SCHAEPMAN, M. E. (1998): Calibration of a field spectroradiometer. Dissertation Universität Zürich, Remote Sensing Series Vol. 31, RSL.
- SCHEFFER, F. & P. SCHACHTSCHABEL (1998): Lehrbuch der Bodenkunde. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 14., neu bearbeitete und erweiterte Auflage.
- SCHMIDT, J. (1988): Wasserhaushalt und Feststofftransport an geneigten, landwirtschaftlich bearbeiteten Hängen. Dissertation A, FU Berlin.
- SCHMIDT, J. (1990): A mathematical model to simulate rainfall erosion. Catena Suppl. 19.
- SCHMIDT, J. (1996): Entwicklung und Anwendung eines physikalisch begründeten Simulationsmodells für die Erosion geneigter landwirtschaftlicher Nutzflächen. Berliner Geogr. Abh., Heft 61.
- SCHRÖDER-LANZ, H.; JÜRGENS, C., & A. HUTH (1993): Abschätzung des Boden-, Nährstoff- und ggf. Schadstoffeintrags in Vorfluter unter Einsatz von Fernerkundungsdaten und digitalen Zusatzdaten. 3. Zwischenbericht zum Umweltforschungsprojekt, Universität Trier.
- SCHWÄBE, B. (2002): Anbauinformationen und Ertragsdaten für ausgewählte Schläge des Agrarunternehmens Schwäbe GbR, Lommatzsch OT Trogen, unveröffentlicht.
- SCHWERTMANN, U.; VOGL, W. & M. KAINZ (1990): Bodenerosion durch Wasser: Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. Ulmer Verlag, Stuttgart, 2. Aufl.
- SHARPLEY, A. N. & J. R. WILLIAMS (Hrsg.) (1990a): EPIC – Erosion/Productivity Impact Calculator. 1: model documentation. USDA Technical Bulletin 1768, USDA-ARS, Washington, D.C.
- SHARPLEY, A. N. & J. R. WILLIAMS (Hrsg.) (1990b): EPIC – Erosion/Productivity Impact Calculator. 1: user manual. USDA Technical Bulletin 1769, USDA-ARS, Washington, D.C.
- SINGH, G.; BABU, R. & S. CHANDRA (1981): Soil loss prediction research in India. Central Soil and Water Conservation Research and Training Institute Bulletin No. T 12/D9, Dehra Dun.
- SMITH, J. A. (1983): Matter-energy interaction in the optical region. In: Colwell, R. N. (Hrsg.): Manual of remote sensing. Volume 1. American Society of Photogrammetry, The Sheridan Press, 2. Auflage: 61-113.
- SMITH, R. E. (1992): OPUS – an integrated simulation model for transport of nonpoint-source pollutants at the field scale. I: documentation. USDA-SCS 98, Washington, D.C.
- SMITH, R. E.; GOODRICH, D. C. & J. N. QUINTON (1995): Dynamic, distributed simulation of watershed erosion: The KINEROS2 and EUROSEM models. Journal of Soil and Water Conservation 50 (5): 517-520.
- SPANNER, M. A. ; PIERCE, L. L.; PETERSON, D. L. & S. W. RUNNING (1990): Remote Sensing of temperate coniferous forest leaf area index. The influence of canopy closure, understory vegetation and background reflectance. Int. J. Remote Sensing 11: 95-111.
- SPENCER, J. W. (1971): Fourier series presentation of the position of the sun. Search 2 (5): 172.
- SUITS, G. H. (1983): The nature of electromagnetic radiation. In: Colwell, R. N. (Hrsg.): Manual of remote sensing. Volume 1. American Society of Photogrammetry, The Sheridan Press, 2. Auflage, S. 37-60.
- SWAIN, P. H. & S. M. DAVIS (Hrsg.) (1978): Remote Sensing: The quantitative approach. McGraw-Hill, New York.
- TASCHNER, S.; LUDWIG, R. & W. MAUSER (2001): Multi-scenario flood modeling in a mountain watershed using data from a NWP model, rain radar and rain gauges. Phys. Chem. Earth (B) 26 (7-8): 509-515.

- TOUTIN, TH. (1995): Generating DEM from stereo-images with a photogrammetric approach. *EARSEL Advances in Remote Sensing* 4 (2): 110-117.
- TURNER, D. P.; COHEN, W. B.; KENNEDY, R. E.; FASSNACHT, K. S. J. M. BRIGGS (1999): Relationships between leaf area index and Landsat TM spectral vegetation indices across three temperate zone sites. *Rem. Sens. Environ.* 70 (1): 52-68.
- ÜBERSICHTSKARTEN DER BÖDEN DES FREISTAATES SACHSEN 1:400.000 (1993): Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie.
- ULABY, F.; DUBOIS, P.C. & J. VAN Zyl (1996): Radar mapping of surface soil moisture. *Journal of Hydrology* 184: 57-84.
- USTIN, S. L.; HART, Q. J.; DUAN, L. & G. SCHEER (1996): Vegetation mapping on hardwood rangelands in California. *Int. J. Remote Sensing* 17: 3015-3036.
- VOGT, P. (1997): Bestimmung des Blattflächenindex und der absorbierten, photosynthetisch aktiven Strahlung der Vegetation aus bidirektionalen Reflexionsfaktoren am Oberrand der Pflanzendecke. Dissertation, DLR-Forschungsbericht 97-25, Köln.
- VON BUDER, W. & S. STEINERT (2000): Charakterisierung des Naturraumpotentials im Einzugsgebiet der Jahna. In: Abschlussbericht zum Projekt: „Entwicklung eines Informationssystems zur Erosionsminderung im Wassereinzugsgebiet der Jahna – einem Nebenfluss der Elbe“. URL: http://www.smul.sachsen.de/de/wu/aktuelles_und_spezielles/berichte_und_statistik/erosionsmodell/.
- VON WERNER, M. & E. BORG (1996): Hochauflösende Modellierung von Bodenerosion mit EROSION-3D unter Einsatz von Fernerkundungsdaten. In: Markwitz, W. R. & H.-D. Bettac (wiss. Seminarleitung): Tagungsband: 12. Nutzerseminar des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums der DLR. DLR-Mitteilung 96-03.
- VON WERNER, M. (1995): GIS-orientierte Methoden der digitalen Reliefanalyse zur Modellierung von Bodenerosion in kleinen Einzugsgebieten. Dissertation, Freie Universität Berlin.
- VON WERNER, M. (2000): Modellgestützte Ableitung hochauflösender digitaler Bodenerosionsprognosekarten für das Einzugsgebiet der Jahna (Ist-Stands-Analyse und Variantenvergleich). Im Auftrag des Staatlichen Amtes für Landwirtschaft Großenhain, unveröffentlicht.
- WAGNER, W.; LEMOINE, G.; BORGEAUD, M. & H. ROTT (1999): A study of vegetation cover effects on ERS scatterometer data. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing* 37 (2): 938-948.
- WARREN WILSON, J. (1965): Stand structure and light penetration. 1 – Analysis by points quadrats. *J. Appl. Ecol.* 2: 383-390.
- WECHSUNG, F. (2003): Persönliche Mitteilung.
- WEISS, M.; BARET, F.; LEROY, M.; HAUTECOEUR, O.; PRÉVOT, L. & N. BRUGUIER (2000): Validation of neural network techniques for the estimation of canopy biophysical variables from vegetation data. *Proceedings of VEGETATION 2000*, Lake Maggiore, Italy.
- WERKER, A. R. & K. W. JAGGARD (1997): Modelling asymmetrical growth curves that rise and then fall: Applications to foliage dynamics of sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Annals of Botany* 79: 657-665.
- WIEGAND, C. L.; GERBERMANN, A. H.; GALLO, K. P.; BLAD, B. L. D. DUSEK (1990): Multisite analysis of spectral-biophysical data for corn. *Rem. Sens. Environ.* 33: 1-16.
- WIEGAND, C. L.; MAAS, S. J.; AASE, J. K.; HATFIELD, J. L.; PINTER, P.J. ,JR.; JACKSON, R. D.; KANEMASU, E. T. & R. L. LAPITAN (1992): Multisite analysis of spectral-biophysical data for wheat. *Rem. Sens. Environ.* 42: 1-21.
- WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D. D. (1978): Predicting rainfall-erosion losses from cropland – a guide to conservation planning. *Agricultural handbook*, Vol. 537 USDA, Washington, D.C.
- WLOCZYK, C. (2002): Entwicklung einer Methodik zur Ermittlung der realen Evapotranspiration anhand von Fernerkundungsdaten in Mecklenburg-Vorpommern. Diplomarbeit, Universität Rostock, unveröffentlicht.
- WOOLHISER, D. A.; SMITH, R. E. & D. C. GOODRICH (1990): KINEROS, a kinematic runoff and erosion model, Documentation and user manual. USDA-ARS.
- YOUNG, R. A.; ONSTAD, C. A.; BOSCH, D. D. & W. P. ANDERSON (1987): AGNPS, Agricultural Non-point-source Pollution Model. A watershed analysis tool. USDA-ARS, Conservation Research Report 35, Washington, D. C.

Anhang I: Koeffizienten zur Berechnung von LAI und BTab. I.1: Regressionskoeffizienten für das Modell der Form $LAI = a \cdot VI^b + c$.

Quelle	Fruchtart	Vegetationsindex	Parameter a/b/c	Gebiet	Sensor
BACH 2001	Mais	NDVI	6,1/1,97/-0,28	Deutschland, Oberrheinebene	TM
	Getreide	NDVI	9,5/3,06/-0,16		

Tab. I.2: Regressionskoeffizienten für das Modell der Form $LAI = -1/a \cdot \ln((VI-b)/c)$.

Quelle	Fruchtart	Vegetationsindex	Parameter a/b/c	Gebiet	Sensor
CHEN et al. 2002	Acker, Grünland	RVI	0,625/14,5/-13,5	Kanada	AVHRR/TM
CHOUDHURY et al. 1994	Mais Sojabohnen	SAVI	0,55/0,68/-0,50	USA, Arizona	-
		SAVI	0,65/0,72/-0,61		
GILABERT et al. 1996	Mais	NDVI	1,13/0,96/-0,82	Spanien, Bar-rax	Simulation TM
WIEGAND et al. 1990	Mais	NDVI	0,816/0,860/-0,717* 0,492/0,901/-0,733**	USA, Arizona, Kansas, Montana, Texas	Simulation TM
WIEGAND et al. 1992	Weizen	NDVI	1,225/0,91/-0,703* 1,201/0,90/-0,514**	USA, Arizona, Kansas, Montana, Texas	Simulation TM

(* vor Erreichen des maximalen LAI, ** nach Erreichen des maximalen LAI)

Tab. I.3: Regressionskoeffizienten α und β zur Bestimmung des LAI aus dem WdVI nach dem CLAIR-Modell.

Quelle	Fruchtart	α	$\beta = 1/WdVI_{\infty}$ in 1/%	Gebiet	Sensor
BOUMAN et al. 1992	Kartoffel	0,588	$1,940 \cdot 10^{-2}$	Niederlande	Radiometer (Kanäle ähnlich TM)
	Rübe	0,485	$2,056 \cdot 10^{-2}$		
	Gerste	0,545	$2,223 \cdot 10^{-2}$		
	Weizen, Hafer	0,400	$2,128 \cdot 10^{-2}$		
Clevens 1991	Gerste	0,252*	1/68,6*	Niederlande	Radiometer (Kanäle ähnlich TM)
		0,530**	1/57,9**		

(* vegetative Phase, ** generative Phase)

Tab. I.4: Regressionskoeffizienten für das Modell der Form $B = a+b \cdot VI$.

Quelle	Fruchtart	Vegetations-index	Parameter a/b	Gebiet	Sensor
BOUMAN et al. 1992	Kartoffel	WDVI	0/1,966*	Niederlande	Radiometer (Kanäle ähnlich TM)
	Rübe	WDVI	8,050/2,285**		
	Gerste, Weizen, Hafer	WDVI	0/2,052 0/2,308***		

(* frühe Phase, ** späte Phase, *** vegetative Phase)

Tab. I.5: Regressionskoeffizienten für das Modell der Form $B = 1 - ((VI-b)/c)^{k/a}$.

Quelle	Fruchtart	Vegetations-index	Parameter d*/b/c	Gebiet	Sensor
BARET et al. 1995	Zuckerrübe	SAVI	1,1399/ 0,7762/ -0,6375	Frankreich, England, Niederlande	Radiometer (Kanäle wie Spot-XS)

(* $d = k/a$)

Tab. I.6: Geschätzte Blattflächeninklinationsindizes χ_L zu den drei Aufnahmezeitpunkten nach den Angaben von ROSS [1981].

Fruchtart	13.03.1999	30.04.1999	19.07.1999	Gebiet
Mais	-	0,15	0,15	Estland, Moldawien, Tadschikistan
Zuckerrübe	-	0,25	0,25	Holland
Spinat*	0,25	0,25	-	-
Rhabarber*	0,25	0,25	0,25	-
Öllein*	-	0,36	0,36	-
Heilkräuter*	-	0,25	0,25	-
Gerste	0,09	0,09	-	Estland
Raps	0,36	0,36	-	Holland
Roggen	0,02	0,02	-	Holland
Weizen	-0,02	-0,02	-	Region Moskau
Bohnen	-	-	0,35	Estland
Erbsen*	-	0,35	0,35	-

(* Da für diese Fruchtarten keine Daten vorlagen, wurden die χ_L von anderen Fruchtarten übernommen.)

Anhang II: Berechnung des Sonnenzenitwinkels

Der Sonnenzenitwinkel berechnet sich nach Gl. II.1.

$$\theta = a \cos(\sin \varphi \sin \delta - \cos \varphi \cos \delta \cos \xi) \quad (\text{II.1})$$

mit: θ Sonnenzenitwinkel in rad,
 φ geographische Breite des Untersuchungsgebietes in rad,
 δ Sonnendeklination in rad,
 ξ Stundenwinkel der Sonne in rad.

Die Sonnendeklination kann nach SPENCER [1971] wie folgt aus dem Tageswinkel abgeschätzt werden:

$$\delta = 0,006918 - 0,399912 \cos \tau_d + 0,070257 \sin \tau_d - 0,006758 \cos(2\tau_d) + 0,000907 \sin(2\tau_d) - 0,002697 \cos(3\tau_d) + 0,001480 \sin(3\tau_d) \quad (\text{II.2})$$

$$\tau_d = \frac{2\pi(J-1)}{365} \quad (\text{II.3})$$

mit: τ_d Tageswinkel der Sonne in rad,
 J Tag im Jahr ($J = 1, 2, 3, \dots, 365$).

Der Stundenwinkel wird aus der wahren Ortszeit unter Berücksichtigung der Zeitgleichung [IES 1984] nach den Gl. II.4 - II.6 berechnet.

$$\xi = \pi(1 - \text{WOZ} / 12) \quad (\text{II.4})$$

$$\text{WOZ} = \text{GMT} + \lambda / 15 + \text{ZG} \quad (\text{II.5})$$

$$\text{ZG} = 0,170 \sin[4\pi(J-80)/373] - 0,129 \sin[2\pi(J-8)/355] \quad (\text{II.6})$$

mit: WOZ wahre Ortszeit in h,
 GMT Greenwich Mean Time in h,
 λ geographische Länge in °,
 ZG Zeitgleichung in h.

Weitere Hinweise sind unter der URL <http://eande.lbl.gov/Task21/C2/contents.html> zu finden.

Anhang III: Das vereinfachte Wachstumsmodell

Die folgende Beschreibung zur Berechnung des täglichen LAI für landwirtschaftliche Fruchtarten stützt sich auf KRYSANOVA et al. [2000] und NEITSCH et al. [2001]. Hiernach basiert die phänologische Entwicklung der Feldfrüchte auf der Akkumulation von Wärmeeinheiten (HU), die nach Gl. III.1 berechnet werden:

$$HU_i = T_{av} - T_b \quad \text{für } T_{av} > T_b \quad (III.1)$$

mit: HU_i Wärmeeinheiten (*heat units*) zum Tag i in °C,
 T_{av} durchschnittliche Tagestemperatur in °C,
 T_b Basistemperatur der Pflanze in °C.

Aus den Wärmeeinheiten zum Tag i wird deren Anteil an den potenziell erreichbaren Wärmeeinheiten (fr_{PHU}) ermittelt, die bis zur Reife erforderlich sind.

$$fr_{PHU,i} = \frac{\sum_{i=1}^d HU_i}{PHU} \quad (III.2)$$

mit: $fr_{PHU,i}$ Anteil der akkumulierten Wärmeeinheiten am PHU zum Tag i,
 PHU potenzielle Wärmeeinheiten, die eine Pflanze im Optimalfall bis zur Reife braucht in °C.

Die Berechnung des täglichen LAI aus den fr_{PHU} wird in zwei Phasen unterteilt. Bis zum Einsetzen der LAI-Abnahme (Seneszenz) wird er nach den Gl. III.3 - III.5 modelliert ($fr_{PHU,i} \leq fr_{PHU,sen}$).

$$fr_{LAI_{max},i} = \frac{fr_{PHU,i}}{fr_{PHU,i} + \exp(l_1 - l_2 \cdot fr_{PHU,i})} \quad (III.3)$$

mit: $fr_{LAI_{max},i}$ Anteil des Blattflächenindex am LAI_{max} zum Tag i,
 LAI_{max} potenzieller maximaler Blattflächenindex einer Fruchtart in m^2/m^2 ,
 l_1, l_2 Formparameter,
 $fr_{PHU,sen}$ Anteil am PHU zum Zeitpunkt des Einsetzens der Seneszenz.

$$\Delta LAI_i = (fr_{LAI_{max},i} - fr_{LAI_{max},i-1}) \cdot LAI_{max} \cdot (1 - \exp(5 \cdot (LAI_{i-1} - LAI_{max}))) \cdot \sqrt{\gamma_{stress}} \quad (III.4)$$

$$LAI_i = LAI_{i-1} + \Delta LAI_i \quad (III.5)$$

mit: ΔLAI_i Zunahme des Blattflächenindex zum Tag i in m^2/m^2 ,
 LAI_i, LAI_{i-1} Blattflächenindex zum Tag i bzw. i-1 in m^2/m^2 ,
 γ_{stress} Faktor zur Regulierung des Pflanzenwachstums.

Nach dem Einsetzen der Seneszenz wird der tägliche LAI wie folgt ermittelt ($fr_{PHU,i} > fr_{PHU,sen}$).

$$LAI_i = 16 \cdot LAI_{max} \cdot (1 - fr_{PHU,i})^2 \quad (III.6)$$

mit: LAI_{max} aktueller maximal erreichter LAI bis zu $fr_{PHU,sen}$.

Die Formparameter l_1 , l_2 beschreiben die Kurve der LAI-Entwicklung in der ersten Phase. Sie werden aus zwei auf der Kurve liegenden Punkten berechnet, die in der Parameterdatei vorliegen oder durch Messungen für einen optimalen LAI-Verlauf bestimmt werden.

$$l_1 = \ln\left(\frac{fr_{PHU,1}}{fr_{LAImax,1}} - fr_{PHU,1}\right) + l_2 \cdot fr_{PHU,1} \quad (III.7)$$

$$l_2 = \frac{\ln\left(\frac{fr_{PHU,1}}{fr_{LAImax,1}} - fr_{PHU,1}\right) - \ln\left(\frac{fr_{PHU,2}}{fr_{LAImax,2}} - fr_{PHU,2}\right)}{fr_{PHU,2} - fr_{PHU,1}} \quad (III.8)$$

mit: $fr_{PHU,1}, fr_{LAImax,1}$ erster Punkt auf einer Kurve der optimalen LAI-Entwicklung,
 $fr_{PHU,2}, fr_{LAImax,2}$ zweiter Punkt auf einer Kurve der optimalen LAI-Entwicklung.

Der Faktor zur Regulierung des Pflanzenwachstums kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. In SWIM wird er aus dem kleinsten Wert der folgenden Stressfaktoren bestimmt:

$$\gamma_{stress} = \min(tstress, wstress, nstress, pstress) \quad (III.9)$$

mit: $tstress$ durch Temperaturstress verursachter Faktor,
 $wstress$ durch Wasserstress verursachter Faktor,
 $nstress$ durch Stickstoffstress verursachter Faktor,
 $pstress$ durch Phosphorstress verursachter Faktor.

In der vorliegenden Arbeit wird vereinfachend nur der Temperaturstress berücksichtigt. Bei Temperaturen nahe dem Optimum (T_o) tritt wenig Stress ($tstress \approx 1$) ein. Mit zunehmender Differenz zu T_o nimmt der Stresseinfluss zu, wobei $tstress$ bis auf 0 fällt.

$$tstress = \exp\left(\ln(0,9) \cdot \frac{(T_o + T_b) \cdot (T_o - T_{av})^2}{(T_o - T_b) \cdot (T_{av} + 10^{-6})}\right) \quad \text{für } T_b < T_{av} \leq T_o \quad (III.10)$$

$$tstress = \exp\left(\ln(0,9) \cdot \left(\frac{T_o - T_{av}}{2T_o - T_{av} - T_b + 10^{-6}}\right)^2\right) \quad \text{für } T_o < T_{av} \leq 2T_o - T_b \quad (III.11)$$

mit: T_o optimale Temperatur in °C.

In Tab. III.1 werden die Parameter zusammengestellt, die im Rahmen der Arbeit Anwendung finden.

Tabelle III.1: Verwendete Parameter zur Modellierung des täglichen Blattflächenindex [verändert nach KRYSAKOVA et al. 2000].

Frucht	T_o °C	T_b °C	LAI_{max} m ² /m ²	$fr_{PHU,SEN}$	$fr_{PHU,1}$	$fr_{LAI_{max},1}$	$fr_{PHU,2}$	$fr_{LAI_{max},2}$	$\frac{PHU}{°C}$
KM	25,0	8,0	5,0	0,70	0,15	0,05	0,50	0,95	1500
ZR	18,0	4,0	5,0	0,70	0,10	0,05	0,50	0,95	2200
SM	20,0	5,0	8,0	0,70	0,15	0,05	0,50	0,95	1900
SP	24,0	4,0	4,2	0,95	0,50	0,20	0,80	0,95	900
RB	25,0	8,0	4,5	1,00	0,15	0,05	0,50	0,95	1500
ÖL	14,0	0	4,5	0,70	0,15	0,01	0,50	0,95	2400
HK	25,0	8,0	5,0	1,00	0,15	0,01	0,50	0,95	1450
WG	15,0	0,0	6,0	0,60	0,15	0,01	0,50	0,95	2700
R	14,0	0,0	4,5	0,6	0,15	0,01	0,50	0,95	3400
WR	12,5	0,0	6,0	0,6	0,15	0,01	0,50	0,95	3200
WW	15,0	0,0	6,0	0,6	0,15	0,01	0,50	0,95	2800
BO	27,0	10,0	3,0	0,9	0,10	0,05	0,80	0,95	770
E	27,0	7,0	3,0	0,6	0,20	0,01	0,70	0,95	780

Anhang IV: Die Charakteristik des Untersuchungsgebietes



Abb. IV.2: Relativ flache Schläge im mittleren Teil (li. Mehltheuer Bach).



Abb. IV.3: Der Mehltheuer Bach Mehltheuer.



geräumte Landschaft mit
Mittelteil.



Abb. VI.6: Stärker geneigte
Hänge bei Trogen im Süden
des Untersuchungsgebietes.

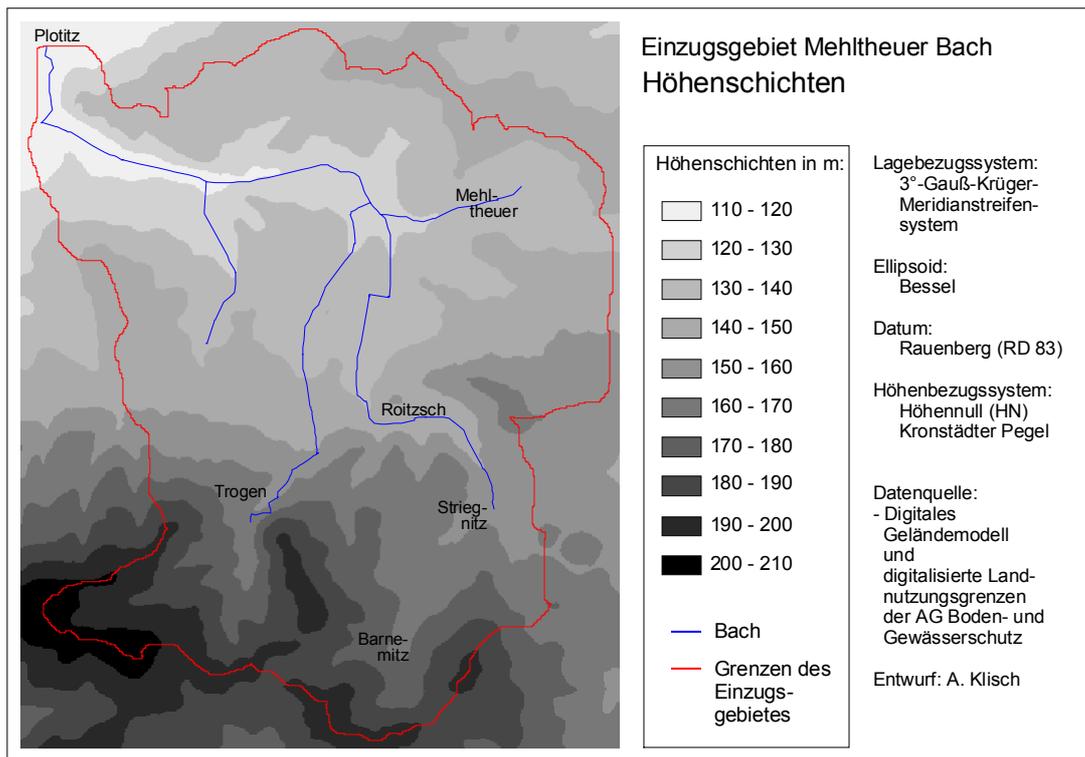


Abb. IV.7: Höhenschichten des Einzugsgebietes Mehtheuer Bach.

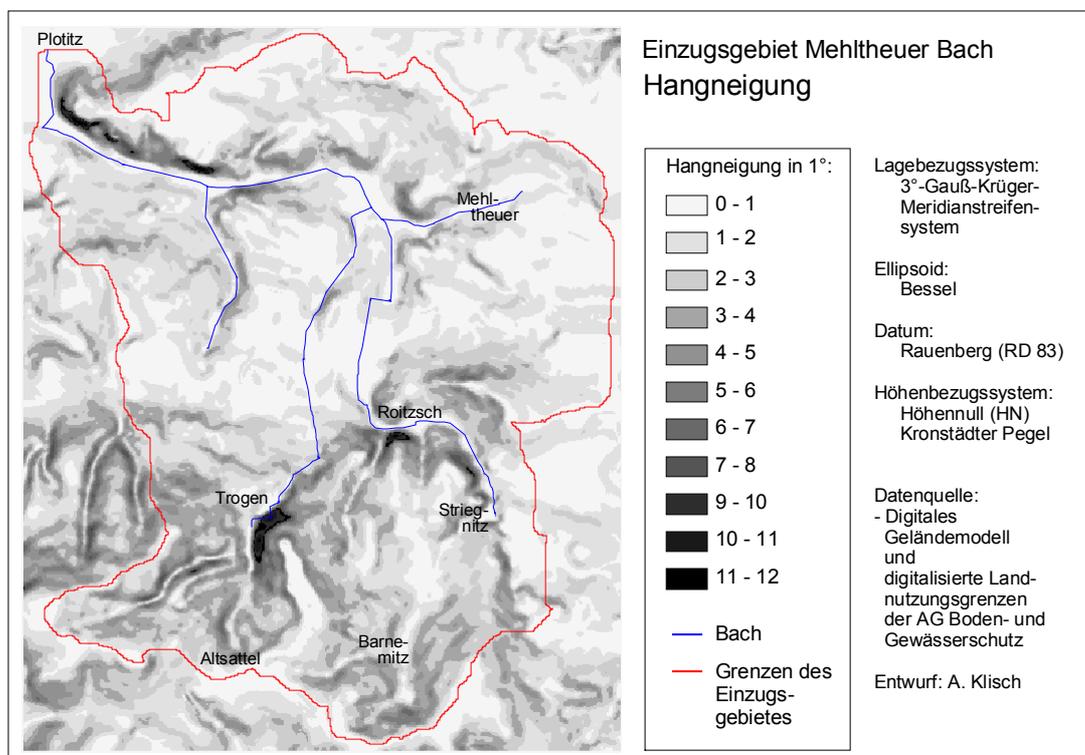
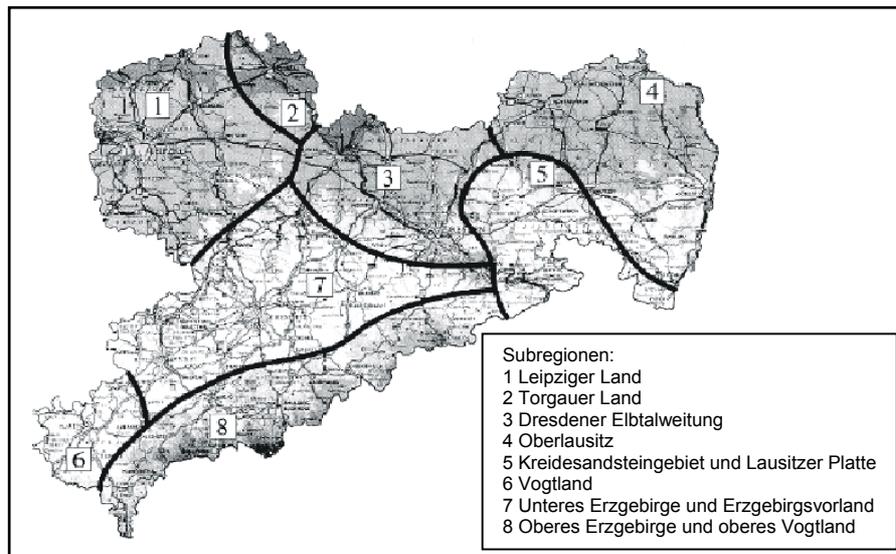


Abb. IV.8: Hangneigung des Einzugsgebietes Mehtheuer Bach.

Anhang V: Niederschlagsstatistik und Temperaturdaten



Tab. V.1: Referenzjahr Subregion 3: Dresdener Elbtalgebiet [MICHAEL 2000].

Dateiname	Datum	Dauer/min	Maximale Intensität/mm·min ⁻¹
0_3.reg	05.05.	110	0,134
1_3.reg	10.05.	40	0,192
2_3.reg	14.05.	20	0,134
3_3.reg	28.05.	170	0,197
4_3.reg	02.06.	40	0,187
5_3.reg	07.06.	60	0,246
6_3.reg	08.06.	90	0,171
7_3.reg	10.06.	70	0,136
8_3.reg	13.06.	50	0,161
9_3.reg	29.06.	80	0,114
10_3.reg	30.06.	70	0,477
11_3.reg	02.07.	30	0,116
12_3.reg	04.07.	50	0,662
13_3.reg	05.07.	160	0,117
14_3.reg	08.07.	30	0,158
15_3.reg	09.07.	70	0,115
16_3.reg	10.07.	110	0,672
17_3.reg	14.07.	110	0,104
18_3.reg	14.07.	60	0,156
19_3.reg	19.07.	220	0,351
20_3.reg	20.07.	30	0,131
21_3.reg	24.07.	30	0,354
22_3.reg	28.07.	60	0,750
23_3.reg	29.07.	90	0,152
24_3.reg	07.08.	50	0,126
25_3.reg	11.08.	50	0,463
26_3.reg	14.08.	130	0,365
27_3.reg	19.08.	20	0,143
28_3.reg	06.09.	50	0,198

Tab. V.2: Temperaturdaten des DWD der Station Oschatz (3811).

Jahr	Tag	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
1998	1	6,7	-11	2,3	13,6	16	13,6	16,4	21,4	14,4	8,4	5,3	-3,8
	2	8,5	-6,4	6,6	11,2	13,5	17,9	15,6	17,6	15,9	3,5	5,2	-5,5
	3	8,8	-1,2	9,5	13,1	12,0	18,2	16,4	16	17,4	4,4	7,9	-3,8
	4	7,0	-2,2	14,4	10,6	8,6	18,7	13,6	18,9	16,6	8,7	7,0	-1,5
	5	7,1	1,2	4,8	11,3	9,6	23,0	16,0	17,4	15,6	7,1	4,3	-0,6
	6	4,5	3,2	4,4	10,2	11,5	25,5	16,6	18,4	15,4	6,2	5,5	-2,4
	7	7,7	2,1	9,2	9,8	13,2	21,4	12,6	21,1	16,2	9,1	3,8	-3,9
	8	9,0	2,6	3,9	6,8	16,4	17,4	12,0	24,1	15,6	11,7	5,9	-5,8
	9	10,9	4,8	-1,5	7,4	18,0	21,4	13,5	18,7	20,5	10,3	8,3	-6,2
	10	7,7	5,7	0,2	10,4	19,7	17,3	16,3	20,7	19,0	11,1	9,0	-7,1
	11	6,1	7,5	0,0	7,0	20,2	16,8	16,2	25,4	16,6	10,8	5,2	-11,3
	12	7,1	11,3	-0,1	5,8	22,1	12,1	16,0	23,5	13,6	8,3	2,3	3,2
	13	2,2	10,9	2,4	4,8	14,3	10,0	18,0	17,6	10,4	8,2	3,4	6,6
	14	7,5	12,3	4,7	5,5	14,8	14,6	16,2	15,7	9,8	12,7	2,5	6,4
	15	6,3	11,9	3,3	8,2	12,0	14,6	15,4	20,7	10,9	11,4	1,3	9,2
	16	7,2	10,6	6,5	6,0	14,2	14,9	14,0	19,3	11,9	9,9	1,7	6,0
	17	4,2	3,9	7,9	7,6	13,8	13,5	17,4	20,2	11,2	17,5	0,2	6,1
	18	5,8	5,3	7,0	6,0	15,9	13,1	19,0	20,1	12,1	7,1	-1,7	5,5
	19	4,7	7,1	4,0	5,6	16,8	17,3	18,0	15,6	12,5	6,6	-1,8	5,8
	20	1,9	4,2	1,3	9,4	14,1	19,0	24,9	20,1	12,5	5,1	-1,1	1,9
	21	-0,6	10,4	2,3	8,1	9,1	22,4	28,7	16,6	11,8	10,2	-5,2	0,3
	22	0,4	8,6	0,8	11,1	9,2	18,0	21,9	13,6	11,7	13,8	-6,3	0,3
	23	-1,2	4,5	1,1	13,5	9,5	15,5	22,1	15	10,4	15,6	-4,3	0,0
	24	-1,4	8,0	1,0	13,4	11,7	16,0	19,4	13,2	11,5	11,0	-2,9	1,1
	25	-5,1	8,0	0,3	14,8	12,5	20,5	16,4	13,1	11,2	10,0	-0,4	3,2
	26	-7,6	9,1	3,7	15,5	13,3	19,6	20,3	12,1	14,5	7,2	0,0	7,3
	27	-10,0	8,7	7,8	18,2	17,1	21,8	19,3	11,1	14,8	8,2	2,0	11,1
	28	-1,9	2,9	9,1	12,8	20,1	17,3	18,0	10,9	14,4	11	2,2	10,2
	29	-1,4		10,4	16,6	21,2	17,3	18,0	13	13,7	8,6	0	2,8
	30	0,2		9,7	14,8	19,0	17,7	19,6	12,7	12,7	5,7	-0,8	1,0
	31	-7,6		12,6	18,2			18,5	12		6,0		-0,7
Monatsmittel:		3,05	5,14	4,83	10,30	14,76	17,55	17,62	17,28	13,83	9,21	1,95	1,14
1999	1	0,0	-0,3	7,9	11,4	12,9	17,0	18,8	19,8	13,9	13,9	10,2	7,4
	2	1,4	1,4	7,9	10,6	10,8	20,2	18,8	19,5	16,2	15,7	11,7	4,7
	3	3,7	4,0	10,5	11,0	12,2	18,2	23,4	19,2	17,4	11,1	6,2	7,0
	4	8,7	7,7	8,3	11,1	12,2	16,2	21,4	20,3	18,3	11	5,3	3,1
	5	11,7	3,5	5,6	10,8	11,5	17,0	24,3	18,6	18,1	9,9	6,1	1,2
	6	10,9	1,4	5,0	14,1	11,8	14,1	19,2	20,8	18,2	9,0	8,9	2,6
	7	5,9	-0,1	2,0	9,7	13,1	15,9	16,5	19,7	17,6	8,8	6,5	6,4
	8	4,3	-0,9	3,0	8,4	13,8	13,1	18,4	21	18,5	10,6	7,4	6,8
	9	2,2	-4,3	5,0	9,0	14,1	13,2	20,0	22	19,0	12,0	6,5	8,6
	10	-0,2	-7,0	5,0	11,4	16,0	17,1	22,1	20,6	20,0	13,4	4,8	5,8
	11	0,0	-9,7	2,1	9,7	14,1	12,2	21,6	15,8	20,3	12,7	2,2	6,3
	12	-2,0	-4,4	2,9	9,2	12,9	13,0	21,6	14,5	19,6	9,3	1,0	9,1
	13	0,2	-1,2	3,4	7,8	13,0	16,6	21,5	13,8	20,0	9,2	0,7	3,4
	14	2,7	-3,6	4,2	7,3	11,5	17,1	17,2	18,6	19,5	9,6	2,1	3,6
	15	5,9	-1,7	4,8	5,8	8,8	16,9	15,3	17,7	18,4	6,8	-0,9	-0,2
	16	9,0	1,0	1,5	5,4	9,4	18,1	16,2	16,2	16,2	5,3	-0,3	-1,3
	17	8,1	-0,6	1,7	3,2	11,6	18,7	19,1	14,9	16,7	4,7	1,5	1,0
	18	3,3	0,3	3,1	4,4	13,9	11,7	23,1	17,6	18,1	3,7	0,6	1,8
	19	4,7	3,1	3,6	5,4	16,8	15,1	23,8	17,2	18,6	3,1	-0,3	-0,2
	20	3,3	3,7	3,8	5,5	16,9	17,3	22,6	17,6	20,4	2,3	-0,6	0,1
	21	3,8	3,7	5,9	9,0	16,4	12,8	21,4	15,4	15,4	6,0	-0,8	-3,2
	22	3,9	2,2	6,1	11,2	12,1	11,3	16,3	13,5	17,9	8,5	-0,8	-4,8
	23	4,2	0,7	4,3	12,7	13,0	13,5	14,8	13,6	19,5	9,0	-2,6	-1,4
	24	4,6	0,5	7	12,5	17,1	13,3	15,7	16,4	16,7	9,9	1,3	2,0
	25	9,0	0,8	9,9	12,0	16,2	13,1	21,4	19,4	15,8	12,0	5,3	5,6
	26	4,9	4,3	12	12,3	14,5	17,3	19,2	19,2	15,2	12,9	5,4	3,0
	27	2,8	8,6	10,8	10,2	17,9	18,8	17,8	20,5	16,2	12,4	6,2	1,3
	28	1,2	6,4	5,2	9,6	20,2	16,8	18,6	17,2	16,1	11,3	5,7	0,2
	29	-4,2		5,2	9,8	19,5	19,5	20,0	15,4	15,7	8,2	6,0	1,2
	30	-4,6		8,2	11,4	20,5	19,6	19,4	16,3	16,4	9,9	6,2	1,5
	31	-10,6		10,9	15,1			20,8	15,0		11,0		1,4
Monatsmittel:		3,19	0,70	5,70	9,40	14,19	15,82	19,69	17,65	17,66	9,46	3,72	2,71

Tab. VI.2: Bedeckungsgrade nach PAKA (B in %) und Differenzen zu PAKA (dB in %) für die Methoden I/II (Ross I/II), III (Bouman) und IV (Baret) am 30.04.1999 und 19.07.1999.

ID	Fruchtart		05.05. B _{PAKA}	30.04.				19.07. B _{PAKA}	19.07.			
	1	2		dB _I	dB _{II}	dB _{III}	dB _{IV}		dB _I	dB _{II}	dB _{III}	dB _{IV}
2	KM	-	0,0	0,0	0,0			70,0	15,4	19,8		
186	KM	-	30,0	-30,0	-30,0			100,0	-38,6	-16,1		
237	KM	-	0,0	0,0	0,0			100,0	-26,5	-13,1		
338	KM	-	0,0	0,0	0,0			100,0	-29,0	-11,1		
224	ZR	-	0,0	1,3	2,1	1,6	0,5	100,0	-8,4	-3,3	-2,2	-8,0
254	ZR	-	30,0	-29,1	-28,5	-28,8	-29,4	100,0	-15,3	-4,5	-5,8	-11,3
260	ZR	-	30,0	-25,4	-23,0	-24,4	-25,1	100,0	-30,8	-12,5	-20,8	-21,8
275	ZR	-	30,0	-26,9	-25,1	-26,2	-27,5	100,0	-36,0	-17,1	-26,3	-26,8
294	ZR	-	30,0	-26,3	-24,3	-25,5	-26,6	100,0	-15,0	-4,6	-5,5	-11,3
297	ZR	-	30,0	-23,6	-20,0	-22,2	-25,4	100,0	-21,9	-14,0	-15,9	-20,4
320	ZR	-	0,0	1,7	2,9	2,2	0,2	100,0	-13,8	-5,7	-5,9	-11,7
363	ZR	-	30,0	16,6	35,7	25,8	27,4	100,0	-82,5	-73,2	-79,1	-84,4
398	ZR	-	50,0	-20,3	-5,0	-13,8	-13,2	100,0	-45,6	-34,7	-39,3	-47,2
14	SM	-	0,0	0,0	0,0			100,0	-26,0	-15,3		
23	SM	-	0,0	0,0	0,0			100,0	-27,5	-7,2		
67	SM	-	30,0	-13,6	-5,8			100,0	-38,8	-19,4		
91	SM	-	30,0	-26,2	-23,8			95,0	-13,9	-4,3		
98	SM	-	30,0	-5,6	3,8			100,0	-22,8	-10,9		
132	SM	-	30,0	-26,1	-24,5			100,0	-11,8	-11,3		
148	SM	-	30,0	-8,4	1,3			100,0	-35,1	-20,6		
222	SP	SP	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	-100,0	-100,0	-100,0	-100,0
250	SP	BO	0,0	3,7	5,0	3,8	1,7	100,0	-57,9	-73,6		
330	SP	BO	0,0	21,5	25,2	21,4	18,5	100,0	-80,7	-88,8		
366	SP	BO	20,0	-18,9	-15,0	-18,5	-13,6	100,0	-2,8	-13,4		
371	SP	BO	30,0	-15,3	-10,2	-14,8	-18,9	100,0	-0,7	-9,4		
391	SP	BO	30,0	19,3	29,8	19,3	21,4	100,0	-40,5	-57,6		
394	SP	BO	0,0	57,6	67,4	57,0	60,3	100,0	-22,8	-42,1		
396	SP	BO	60,0	4,0	12,7	2,6	1,9	100,0	-35,8	-56,0		
397	SP	BO	0,0	83,3	87,5	79,7	76,3	100,0	-7,9	-35,5		
400	SP	BO	0,0	1,9	2,7	2,0	0,2	100,0	-41,6	-59,8		
265	RB	-	80,0	-8,4	10,1	4,0	-0,5	100,0	-20,3	-11,2	-13,0	-17,3
210	ÖL	-	30,0	-16,9	-22,1			100,0	-17,8	-42,3		
334	HK	-	30,0	-0,6	-6,0			100,0	-46,9	-47,1		
336	HK	-	0,0	8,8	5,4			100,0	-16,3	-30,7		
339	HK	-	0,0	15,8	10,9			100,0	-18,3	-10,1		
393	HK	-	50,0	-36,5	-42,5			100,0	-10,7	-31,1		
26	WG	-	50,0	40,1	41,5	48,6		100,0				
43	WG	-	50,0	9,3	26,4	27,3		100,0				
51	WG	-	30,0	21,4	40,8	38,2		100,0				
54	WG	-	50,0	13,5	29,5	31,7		100,0				
109	WG	-	50,0	33,1	39,4	48,5		100,0				
112	WG	-	50,0	24,5	34,9	42,7		100,0				
290	WG	-	50,0	15,6	28,6	32,9		100,0				
296	WG	-	50,0	22,1	34,3	41,0		100,0				
309	WG	-	50,0	27,7	33,4	38,4		100,0				
311	WG	-	50,0	31,3	38,2	46,6		100,0				
321	WG	-	50,0	43,1	42,6	49,8		100,0				
341	WG	-	50,0	34,6	39,4	47,0		100,0				
354	WG	-	50,0	30,3	36,7	43,8		100,0				
392	WG	-	50,0	21,0	33,5	39,6		100,0				
401	WG	-	30,0	28,9	43,4	45,7		100,0				

Fortsetzung Tab. VI.2.

ID	Fruchtart		05.05.	30.04.				19.07.	19.07.			
	1	2	B _{PAKA}	dB _I	dB _{II}	dB _{III}	dB _{IV}	B _{PAKA}	dB _I	dB _{II}	dB _{III}	dB _{IV}
88	R	-	85,0	3,7	11,3			100,0				
95	R	-	85,0	-10,1	-11,7			100,0				
115	R	-	85,0	-0,6	-2,4			100,0				
120	R	-	85,0	-8,9	13,7			100,0				
121	R	-	85,0	-4,7	-11,6			100,0				
124	R	-	30,0	36,7	45,0			100,0				
134	R	-	30,0	53,8	61,9			100,0				
138	R	-	85,0	5,8	7,9			100,0				
155	R	-	85,0	-0,6	-10,9			100,0				
167	R	-	85,0	7,7	9,2			100,0				
172	R	-	85,0	5,8	8,3			100,0				
174	R	-	85,0	-19,6	-13,9			100,0				
202	R	-	100,0	-12,8	-7,8			100,0				
206	R	-	80,0	-21,6	13,6			100,0				
280	R	-	100,0	-20,0	-26,2			100,0				
314	R	-	100,0	-12,1	-6,5			100,0				
344	R	-	90,0	-12,4	-29,7			100,0				
399	R	-	85,0	-12,8	11,1			100,0				
42	WR	-	100,0	-24,2	-14,1	-7,6		100,0				
62	WR	-	30,0	9,5	30,5	28,4		100,0				
123	WR	-	65,0	24,3	27,1	33,4		100,0				
3	WW	-	30,0	22,3	40,7	41,0		100,0				
12	WW	-	30,0	-19,1	-12,3	-13,7		100,0				
13	WW	-	60,0	-2,5	18,9	18,7		100,0				
34	WW	-	30,0	25,4	46,6	46,1		100,0				
37	WW	-	30,0	26,6	48,9	48,1		100,0				
49	WW	-	30,0	27,9	50,1	49,6		100,0				
56	WW	-	30,0	30,4	52,2	52,3		100,0				
58	WW	-	30,0	29,9	51,9	51,9		100,0				
65	WW	-	30,0	23,4	44,9	43,9		100,0				
68	WW	-	30,0	18,9	40,7	38,7		100,0				
72	WW	-	30,0	22,2	42,9	42,1		100,0				
81	WW	-	30,0	15,1	34,3	32,9		100,0				
85	WW	-	30,0	16,6	36,8	35,2		100,0				
137	WW	-	30,0	30,9	52,4	52,6		100,0				
140	WW	-	60,0	-4,6	16,6	16,0		100,0				
143	WW	-	30,0	18,3	35,6	34,5		100,0				
144	WW	-	30,0	2,4	18,3	16,2		100,0				
145	WW	-	30,0	17,7	37,9	36,6		100,0				
163	WW	-	60,0	-6,9	14,2	13,3		100,0				
200	WW	-	30,0	30,3	51,0	51,3		100,0				
214	WW	-	30,0	21,7	42,5	41,6		100,0				
220	WW	-	30,0	29,8	51,1	51,4		100,0				
240	WW	-	60,0	8,3	29,1	30,8		100,0				
241	WW	-	30,0	28,5	50,8	50,3		100,0				
242	WW	-	30,0	29,2	51,2	51,0		100,0				
244	WW	-	30,0	33,6	55,5	56,2		100,0				
247	WW	-	60,0	-1,0	19,9	20,1		100,0				
262	WW	-	30,0	30,8	52,3	52,6		100,0				
266	WW	-	60,0	-3,4	18,6	18,0		100,0				
267	WW	-	30,0	25,3	47,2	46,3		100,0				
274	WW	-	60,0	-15,3	4,5	2,7		100,0				
278	WW	-	60,0	-9,9	11,8	10,1		100,0				
284	WW	-	60,0	-13,2	7,2	5,6		100,0				

Fortsetzung Tab. VI.2.

ID	Fruchtart		05.05.	30.04.				19.07.	19.07.			
	1	2	B _{PAKA}	dB _I	dB _{II}	dB _{III}	dB _{IV}	B _{PAKA}	dB _I	dB _{II}	dB _{III}	dB _{IV}
286	WW	-	60,0	-9,8	12,0	10,3		100,0				
298	WW	-	60,0	-30,0	-18,5	-18,9		100,0				
303	WW	-	60,0	-10,7	10,5	8,8		100,0				
304	WW	-	60,0	0,1	21,3	21,5		100,0				
308	WW	-	60,0	-10,4	11,1	9,3		100,0				
310	WW	-	60,0	-7,4	14,3	13,1		100,0				
331	WW	-	60,0	12,4	30,9	33,5		100,0				
182	E	-	0,0	0,0	0,0			100,0	-100,0	-100,0		
325	E	-	0,0	10,2	4,1			100,0	-100,0	-100,0		
326	E	-	0,0	0,0	0,0			100,0	-25,5	-41,2		

Anhang VII: Ergebnisse der zeitlichen Interpolation von LAI und B

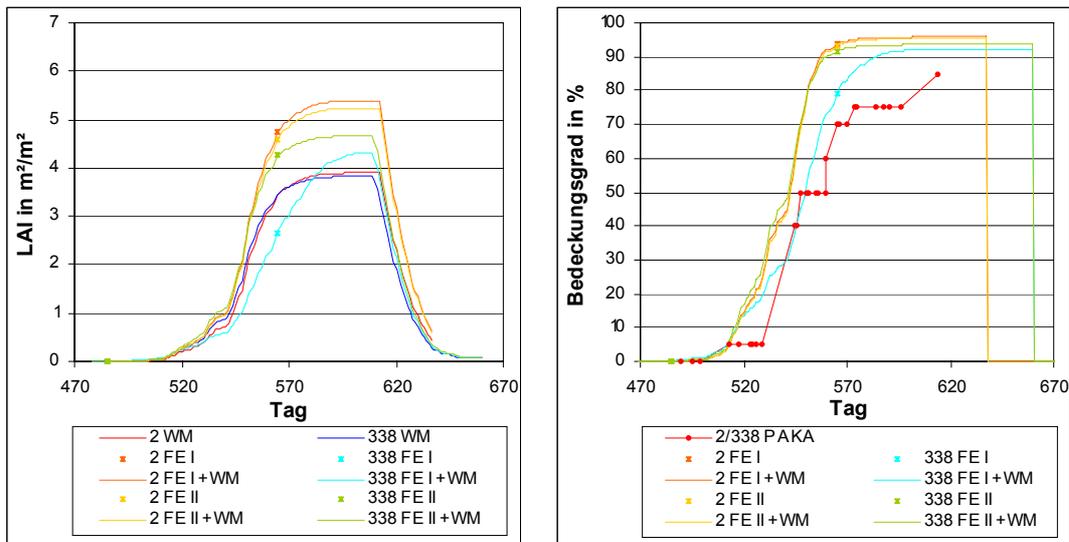


Abb. VII.1: LAI und Bedeckungsgrad für die Körnermaisschläge 2 und 338 im Anbaujahr 1999.

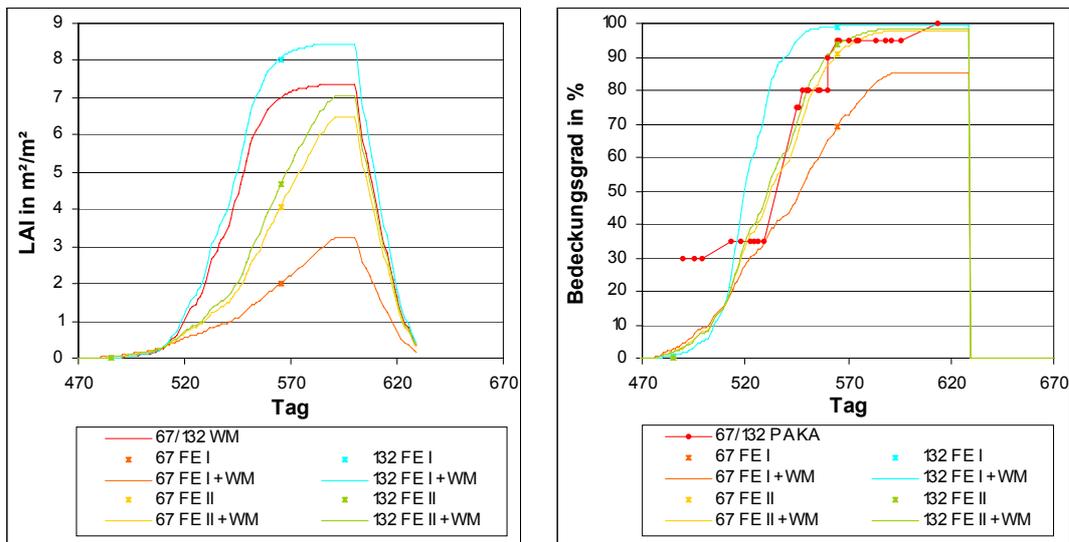


Abb. VII.2: LAI und Bedeckungsgrad für die Silomaisschläge 67 und 132 im Anbaujahr 1999.

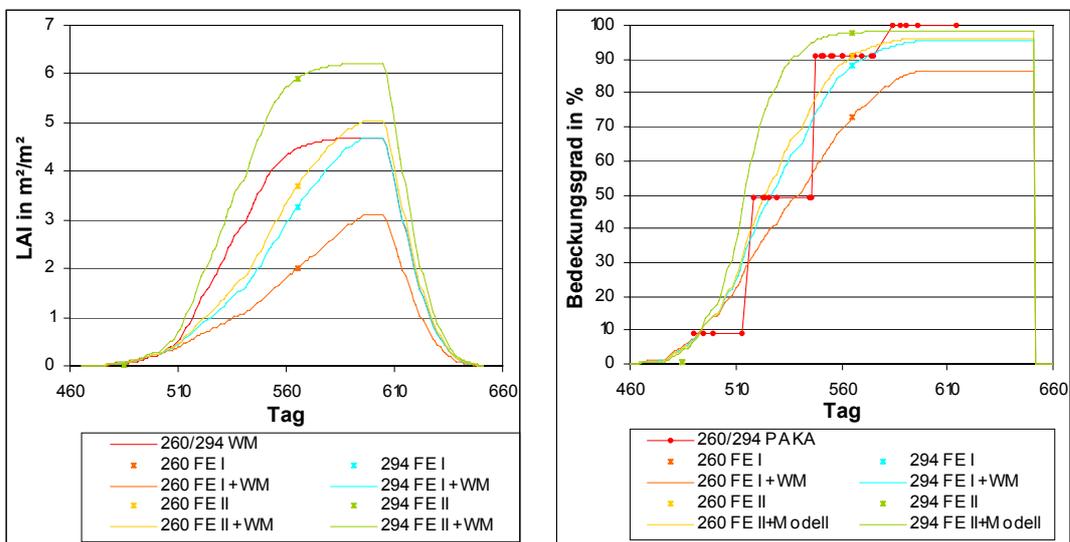


Abb. VII.3: LAI und Bedeckungsgrad für die Zuckerrübenschläge 260 und 294 im Anbaujahr 1999.

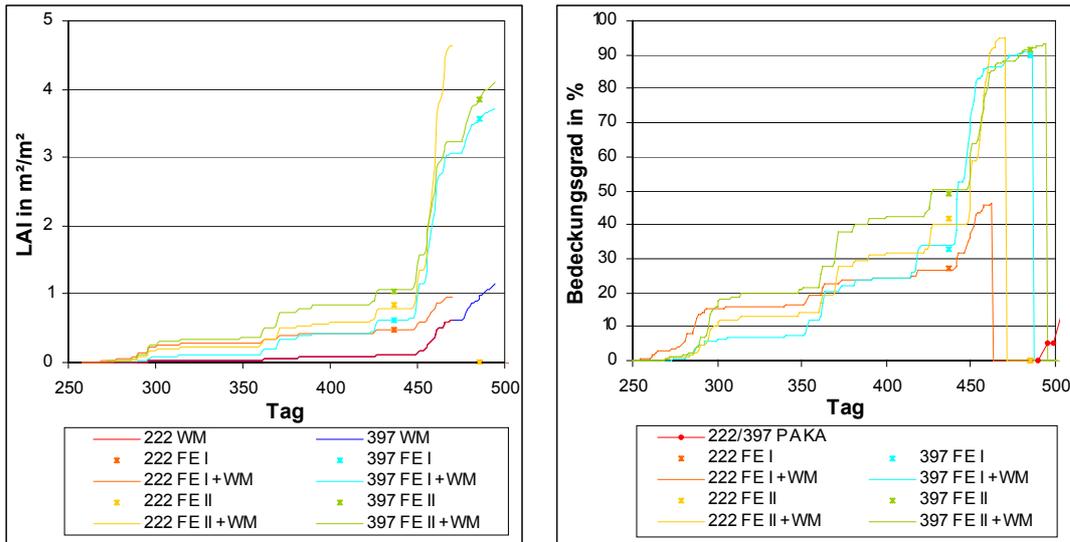


Abb. VII.4: LAI und Bedeckungsgrad für die Spinatschläge 222 und 397 im Anbaujahr 1998/1999.

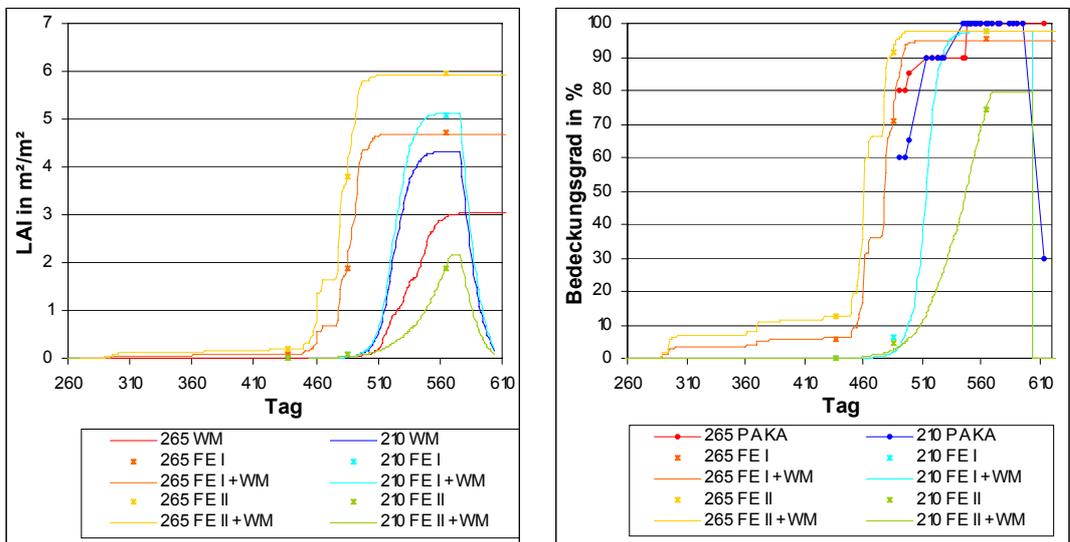


Abb. VII.5: LAI und Bedeckungsgrad für die Schläge 265 (Rhabarber) und 210 (Öllein) im Anbaujahr 1989/1999.

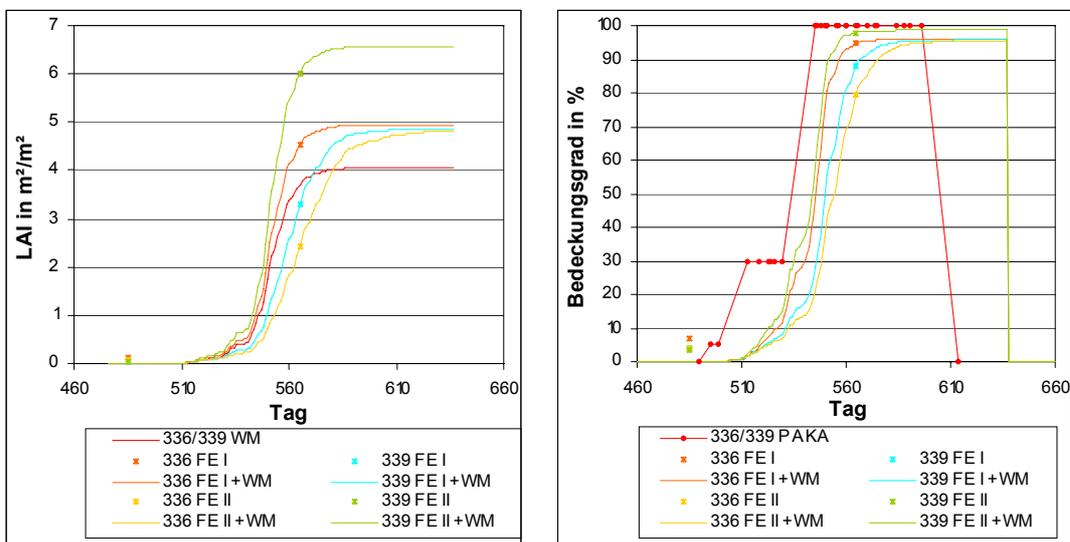


Abb. VII.6: LAI und Bedeckungsgrad für die Heilkräuterschläge 336 und 339 im Anbaujahr 1999.

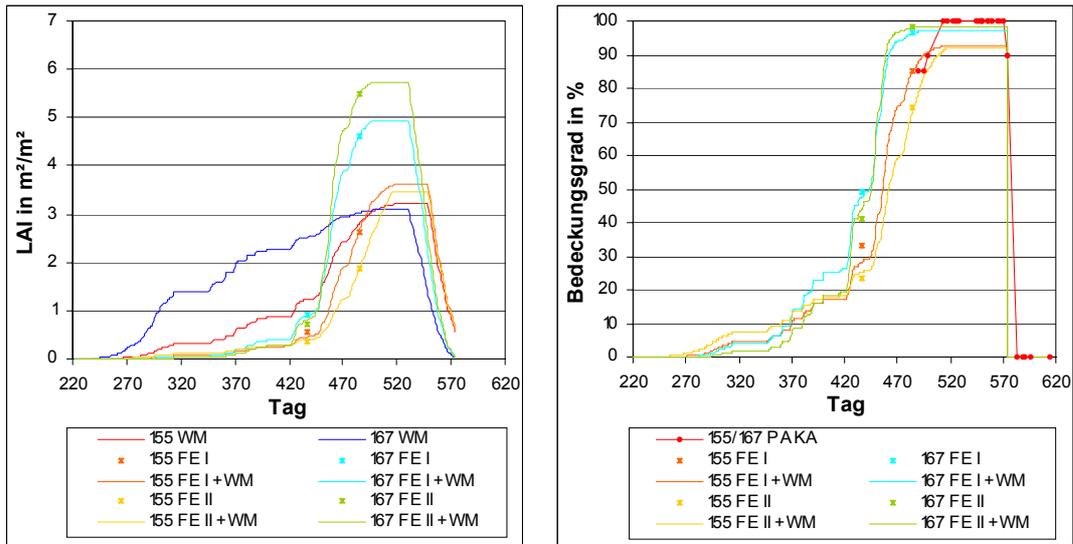


Abb. VII.7: LAI und Bedeckungsgrad für die Rapsschläge 155 und 167 im Anbaujahr 1998/1999.

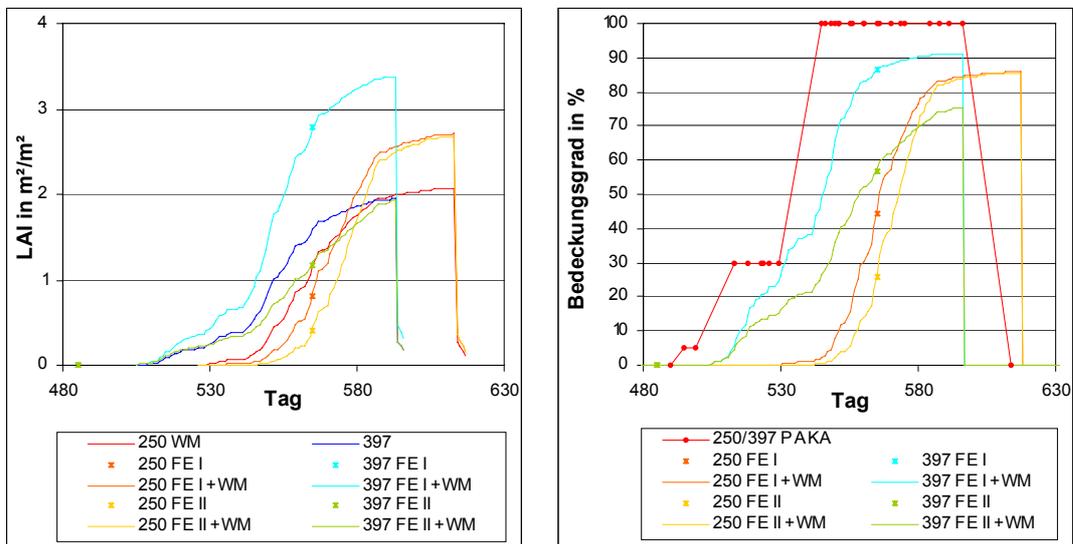


Abb. VII.8: LAI und Bedeckungsgrad für die Bohnenschläge 250 und 397 im Anbaujahr 1999.

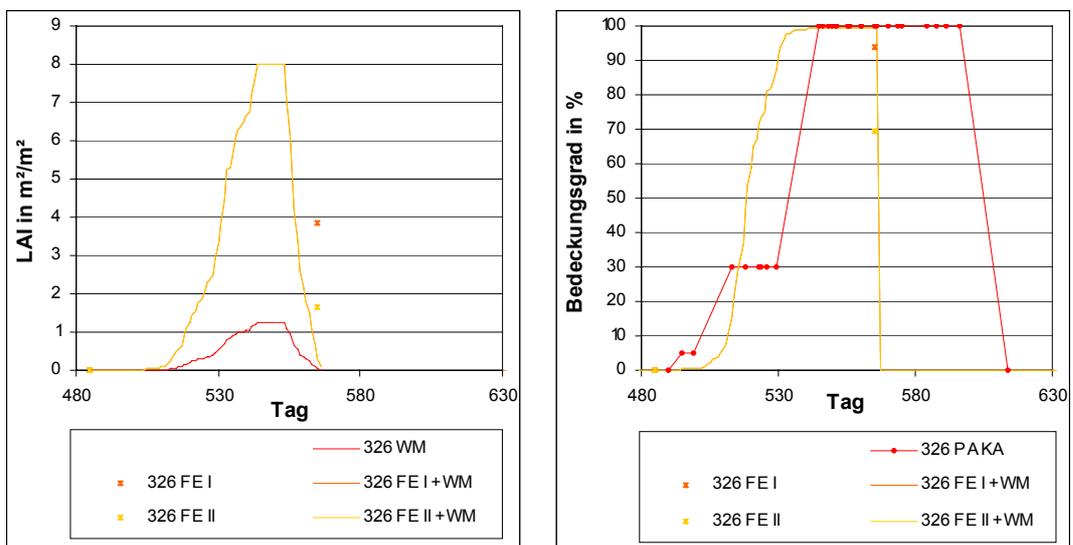


Abb. VII.9: LAI und Bedeckungsgrad für den Erbsenschlag 326 im Anbaujahr 1999.

Anhang VIII: Ergebnisse der Simulationsrechnungen mit EROSION 3D

Tab. VIII.1: Punktbezogene Simulationsergebnisse nach der Methode PAKA und Differenzen zu den Fernerkundungsmethoden für das Niederschlagsereignis am 05.05. (0).

Methode	Messgröße	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 3	Punkt 4	Punkt 5
	R/m H/m	4588595 5678625	4589195 5679045	4589155 5679705	4587755 5679895	4586645 5680495
PAKA	$Q/m^3 \cdot m^{-1}$	0,276	0,816	16,355	18,706	18,706
	$q_s/kg \cdot m^{-1}$	0,199	1,750	70,746	75,643	75,643
	$A/t \cdot ha^{-1}$	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001
	T/%	13	24	21	21	21
	U/%	81	73	75	75	75
(FE I - PAKA)/ PAKA*100	$\Delta q_s/\%$	0,0	10,1	11,7	11,8	11,8
	$\Delta A/\%$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	$\Delta T/\%$	0,0	-4,2	0,0	0,0	0,0
	$\Delta U/\%$	0,0	-2,7	0,0	0,0	0,0
(FE II - PAKA)/ PAKA *100	$\Delta q_s/\%$	0,0	-12,8	19,4	20,1	20,1
	$\Delta A/\%$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	$\Delta T/\%$	0,0	-8,3	0,0	0,0	0,0
	$\Delta U/\%$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
(FE I + WM - PAKA)/ PAKA *100	$\Delta q_s/\%$	0,0	-36,0	-8,7	-8,4	-8,4
	$\Delta A/\%$	0,0	0,0	0,0	-100,0	-100,0
	$\Delta T/\%$	0,0	-20,8	0,0	0	0
	$\Delta U/\%$	0,0	4,1	0,0	0	0
(FE II + WM - PAKA) / PAKA *100	$\Delta q_s/\%$	0,0	-42,3	-9,4	-8,9	-8,9
	$\Delta A/\%$	0,0	0,0	0,0	-100,0	-100,0
	$\Delta T/\%$	0,0	-20,8	0,0	0,0	0,0
	$\Delta U/\%$	0,0	2,7	0,0	0,0	0,0

R Rechtswert, H Hochwert, Q Abfluss, q_s Sedimentmenge, A Gebietsaustrag, T Ton im Sediment, U Schluff im Sediment.

Tab. VIII.2: Punktbezogene Simulationsergebnisse nach der Methode PAKA und Differenzen zu den Fernerkundungsmethoden für das Niederschlagsereignis am 19.07. (19).

Methode	Messgröße	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 3	Punkt 4	Punkt 5
	R/m H/m	4588595 5678625	4589195 5679045	4589155 5679705	4587755 5679895	4586645 5680495
PAKA	$Q/m^3 \cdot m^{-1}$	484,711	1176,667	2087,786	3475,815	3704,519
	$q_s/kg \cdot m^{-1}$	22593,354	57995,406	71828,461	110812,891	111472,969
	$A/t \cdot ha^{-1}$	0,997	1,333	1,038	0,797	0,740
	T/%	14	14	14	14	14
	U/%	82	80	80	80	80
(FE I - PAKA)/ PAKA*100	$\Delta q_s/\%$	5,7	6,4	9,2	7,8	8,0
	$\Delta A/\%$	5,7	6,5	9,2	7,8	8,0
	$\Delta T/\%$	7,1	0,0	0,0	0,0	0,0
	$\Delta U/\%$	-2,4	0,0	-1,3	-1,3	-1,3
(FE II - PAKA)/ PAKA *100	$\Delta q_s/\%$	6,3	6,7	9,4	7,9	8,1
	$\Delta A/\%$	6,2	6,7	9,4	7,9	8,0
	$\Delta T/\%$	7,1	0,0	0,0	0,0	0,0
	$\Delta U/\%$	-2,4	-1,3	-1,3	-1,3	-1,3
(FE I + WM - PAKA)/ PAKA *100	$\Delta q_s/\%$	3,6	5,7	8,4	6,4	6,6
	$\Delta A/\%$	3,6	5,7	8,4	6,4	6,5
	$\Delta T/\%$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	$\Delta U/\%$	-1,2	-1,3	-1,3	0,0	-1,3
(FE II + WM - PAKA) / PAKA *100	$\Delta q_s/\%$	3,3	6,2	9,0	6,6	6,8
	$\Delta A/\%$	3,3	6,2	9,0	6,6	6,8
	$\Delta T/\%$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	$\Delta U/\%$	-1,2	-1,3	-1,3	-1,3	-1,3

Tab. VIII.3: Punktbezogene Simulationsergebnisse nach der Methode PAKA und Differenzen zu den Fernerkundungsmethoden für das Niederschlagsereignis am 10.07. (16).

Methode	Messgröße	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 3	Punkt 4	Punkt 5
		4588595 5678625	4589195 5679045	4589155 5679705	4587755 5679895	4586645 5680495
PAKA	$Q/m^3 \cdot m^{-1}$	806,643	1952,394	3423,111	5982,254	6337,265
	$q_s/kg \cdot m^{-1}$	4580,598	120998,172	163605,219	248667,078	250164,047
	$A/t \cdot ha^{-1}$	2,011	2,781	2,364	1,789	1,660
	T/%	13	14	14	14	14
	U/%	82	80	80	80	80
(FE I + WM - PAKA)/ PAKA *100	$\Delta q_s/\%$	2,9	2,3	3,5	2,9	2,9
	$\Delta A/\%$	2,9	2,2	3,6	2,9	3,0
	$\Delta T/\%$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	$\Delta U/\%$	0,0	0,0	-1,3	0,0	0,0
(FE II + WM - PAKA) / PAKA *100	$\Delta q_s/\%$	2,1	2,9	4,1	3,0	3,0
	$\Delta A/\%$	2,1	2,9	4,1	3,0	3,0
	$\Delta T/\%$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	$\Delta U/\%$	0,0	0,0	-1,3	0,0	0,0

Selbständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig
und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln angefertigt habe
und an keiner anderen Hochschule eingereicht habe.

Potsdam, 05.12.2003