

Patrick Hostert

Vom Fachbereich VI  
(Geographie/Geowissenschaften)  
der Universität Trier  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)  
genehmigte Dissertation

Monitoring von Degradationserscheinungen im  
europäisch-mediterranen Raum mit Methoden der  
Fernerkundung und GIS  
Untersuchungen am Beispiel der Weidegebiete Zentralkretas

Betreuer:  
Univ.-Prof. Dr. Joachim Hill  
Berichterstatter:  
Univ.-Prof. Dr. Joachim Hill  
Univ.-Prof. Dr. Willy Werner

Datum der wissenschaftlichen Aussprache: 23. April 2001

Trier, 2001

„... überhaupt mußte ich dadurch ganz anderen Sinnes und Blickes für diese Insel werden, an deren Bildnis mir soviel lag. Denn aufgefaltet wie sie ist, wird sie immer größer und größer, je länger man auf ihr wandert, und schließlich wird sie ganz vielfältig und groß. So aber würde ich sie ein für allemal sozusagen in der Tasche haben und im Kopfe besitzen. Alles einzelne würde sich mir zum Ganzen ordnen, und ich war, wenn ich lief, nicht mehr geneckt und geirrt von der Proteusgestalt der Gebirge, die sich, solange man in ihnen steckt, seltsam unablässig verändern.“

Erhard Kästner, Kreta, Flug über die Insel

# Vorwort

Als ich im März 1996 als Mitarbeiter in der Abteilung Fernerkundung des Fachbereichs VI, Geographie/Geowissenschaften, an der Universität Trier die Projektarbeiten für DeMon-II übernahm, waren mir viele der in der vorliegenden Arbeit dargestellten Inhalte noch fremd. Im Laufe der Jahre wuchs mein Verständnis der methodischen Grundlagen wie auch der inhaltlichen Zusammenhänge durch die fortschreitenden Forschungsarbeiten im Rahmen des Projektes und in der Diskussion mit zahlreichen Kolleginnen und Kollegen. Diese Promotionsschrift wäre ohne deren Beiträge so nicht möglich gewesen und ich möchte all denen meinen tiefen Dank aussprechen, deren fachliche und moralische Unterstützung mir während der Zeit meiner Promotion zuteil wurde.

Initiiert und maßgeblich gefördert wurde diese Arbeit von meinem Mentor und Erstbetreuer Prof. Dr. Joachim Hill, Leiter der Abteilung Fernerkundung und Koordinator von DeMon-II. Seiner Expertise verdanke ich nicht nur den Einstieg in die fernerkundlich gestützte Degradationsforschung, sondern auch einen Großteil meiner Kenntnisse über die eingesetzten Methoden. Er unterstützte die Arbeit darüber hinaus substantiell durch die von ihm entwickelte Software zur radiometrischen Korrektur und zur Spektralen Mischungsanalyse.

Als zweiten Gutachter konnte ich Prof. Dr. Willy Werner gewinnen. Seine Unterstützung und konstruktive Kritik bereicherten vor allen Dingen die Diskussion um die Bewertung der Analyseergebnisse. Mit seinem Fachwissen auf den Gebieten der Botanik und Ökologie leistete er weiterhin einen wichtigen Beitrag zur Einordnung fernerkundlich gewonnener Information in den Gesamtkontext.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Freund und Kollegen Achim Röder – einen besseren Nachfolger für die Arbeiten in DeMon-II hätte ich mir nicht wünschen können. Mit seiner Hilfe bei der Datenauswertung und durch seine professionelle Unterstützung der Projektarbeiten leistete er einen maßgeblichen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit. Auch Dr. Thomas Udelhoven war eine unschätzbare Hilfe in zahlreichen Diskussionen. Die Umsetzung seiner IDL-Kenntnisse in lauffähige Software machten einige der Untersuchungen der vorliegenden Arbeit erst möglich. Für die gründliche Überarbeitung der Kapitel zur Datenverarbeitung danke ich zudem Dr. Clement Atzberger, dessen Kritik eine sehr wertvolle Hilfestellung war.

Darüber hinaus geht mein Dank an alle Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Abteilung Fernerkundung. Insbesondere Rebecca Retzlaff, Martin Schlerf und Thomas Jarmer waren mir immer eine große Hilfe. Die studentischen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter – namentlich Claudius Diemer, Ole Seidel und Claudia Künzer – leisteten hervorragende Arbeit bei der Datenaufbereitung. Und was wäre die Fernerkundung an der Universität Trier ohne ihre

Sekretärin und ihr Herz, Hermine Marx? Ein ganz besonders herzliches „Dankeschön“ geht an sie.

Den Rahmen dieser Arbeit bildete das Projekt DeMon-II, in dessen Verlauf ich von der Erfahrung einer Reihe europäischer Wissenschaftler profitieren durfte. Ihre gesammelte Expertise stand mir in Form von Projektberichten bei der Auswertung und Interpretation der Daten zur Verfügung. Insbesondere das Team der JRC-SAI Environment and Geo-Information Unit (EGEO) in Ispra (Italien) um Stefan Sommer steuerte durch die Teilnahme an allen Geländekampagnen und die durchgeführten Datenerhebungen wichtige Erkenntnisse zum Projekt bei. Zudem stammen Teile der zur radiometrischen Korrektur eingesetzten Software aus der Programmschmiede von Wolfgang Mehl.

Mein griechischer Ansprechpartner vor Ort, Prof. Dr. Georgios Tsiourlis, war für mich nicht nur ein kooperativer Fachwissenschaftler mit exzellenten Kenntnissen der kretischen Flora und Fauna, sondern auch ein freundschaftlicher Berater in allen Belangen. Die Daten seiner Arbeitsgruppe ermöglichten erst die Erschließung vieler inhaltlicher Zusammenhänge mit Fernerkundungsdaten.

Neben der fachlichen Unterstützung erfuhr ich auch vielfach Hilfe bei der Umsetzung dieser Promotionsschrift in ein druckfähiges Dokument. Sonja Weiler und Nicole Post übernahmen freundlicherweise die Korrektur großer Teile des Manuskriptes. Vor allem möchte ich jedoch Anja Brassel meinen Dank aussprechen, für ihre Unterstützung und die unzähligen Korrekturarbeiten im Laufe der letzten Monate. Ihre Ausdauer war unerschöpflich.

Und schließlich darf ich auch meinen Eltern, Heidi und Klaus Hostert, danken, die vor allem in den letzten Monaten vor Fertigstellung der Promotionsschrift klaglos meine Abwesenheit akzeptierten und mich dennoch immer unterstützten.

Mein größter Dank aber gilt Viola Neukam, meiner Lebensgefährtin, die eine schier unendliche Geduld gegenüber den großen und kleinen Problemen eines Promovierenden an den Tag legte. Sie durchlebte mit mir alle Phasen dieser Arbeit und war immer zur Stelle, wenn ich moralische Unterstützung benötigte.

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	I
Abbildungsverzeichnis .....	V
Tabellenverzeichnis.....	X

## Teil I

### THEORETISCHER ANSATZ: RAHMEN UND ZIEL DER ARBEIT

<b>1 Einleitung</b> .....	2
<b>2 Desertifikation und Degradation</b> .....	4
2.1 Ursachen.....	6
2.2 Indikatoren.....	9
2.3 Die Rolle der Fernerkundung.....	10
<b>3 Forschungsansatz und Ziel der vorliegenden Arbeit</b> .....	15
<b>4 Natur- und Kulturräumgefüge Kretas</b> .....	19
4.1 Naturräumlich bedingte Degradationsgefährdung Kretas .....	20
4.1.1 Klima.....	20
4.1.2 Geologie und Geomorphologie .....	24
4.1.3 Hydrologie.....	26
4.1.4 Böden .....	27
4.1.5 Vegetation .....	29
4.1.6 Fauna .....	34
4.2 Sozio-ökonomische und politische Rahmenbedingungen.....	35
4.2.1 Bevölkerungsentwicklung und Ökonomie Kretas.....	35
4.2.2 Die Rolle der EU .....	38

## Teil II

### DATENVERARBEITUNG

<b>5 Datengrundlage</b> .....	42
5.1 Satellitendaten .....	42
5.2 Spektrometermessungen.....	47

5.3	GIS-Ebenen .....	49
5.4	Luftbildkartierung .....	51
5.5	Deskriptive Daten.....	56
<b>6</b>	<b>Geometrische Vorverarbeitung der Satellitendaten .....</b>	<b>57</b>
6.1	GCP-Bestimmung, Polynomauswahl und Restfehlerbewertung.....	59
6.2	Reliefkorrektur und Resampling .....	62
6.3	Validierung der geometrischen Korrektur.....	63
<b>7</b>	<b>Radiometrische Korrektur .....</b>	<b>66</b>
7.1	Parametrische Korrektur.....	67
7.1.1	Sensorkalibrierung.....	67
7.1.2	Strahlungstransfer.....	70
7.1.2.1	Vereinfachende Annahmen .....	71
7.1.2.2	Berechnung des Strahlungstransfers.....	72
7.1.2.3	Schätzung der aerosoloptischen Dicke .....	78
7.1.3	Topographiekorrektur.....	82
7.2	Empirische Korrektur .....	84
7.2.1	Definition der Kalibrierflächen .....	86
7.2.2	Interkalibrierung von Landsat-TM und -MSS.....	86
7.2.3	Anpassung der MSS-Zeitreihe an eine MSS-Masterszene.....	89
7.3	Validierung und Sensitivitätsanalyse .....	91
7.3.1	Güte der radiometrischen Korrektur mit DHM.....	92
7.3.2	Radiometrische Qualität der TM-Zeitreihe.....	95
7.3.3	Radiometrische Qualität der MSS-Zeitreihe.....	96
7.3.4	Evaluierung der Interkalibrierung von Landsat-TM und Landsat-MSS.....	98
<b>8</b>	<b>Ableitung von Oberflächenparametern aus multispektralen Fernerkundungsdaten.....</b>	<b>100</b>
8.1	Problematik spektraler Mischsignaturen.....	101
8.2	Theoretischer Hintergrund der Linearen Spektralen Mischungsanalyse.....	102
8.3	Stratifizierte Endmembermodellierung.....	106
8.3.1	Bild-Endmember .....	108
8.3.1.1	Pixel Purity Index .....	109
8.3.1.2	Selektion potentieller Bild-Endmember .....	110
8.3.2	Referenz-Endmember.....	111
8.3.2.1	Spectral Angle Mapping.....	112
8.3.2.2	Selektion der Referenz-Endmember.....	113
8.4	Ergebnisse .....	116
8.5	Validierung.....	120

8.5.1	Restfehleranalyse.....	121
8.5.2	Vergleich der SMA für TM und MSS.....	124
<b>9</b>	<b>Ableitung statistischer Parameter zur Interpretation der Zeitreihe</b> .....	<b>127</b>
9.1	Berechnung relevanter Parameter zur Zeitreihenanalyse .....	127
9.1.1	Parameter zur Trendanalyse .....	128
9.1.2	Parameter zur Beschreibung von Einzelereignissen.....	129
9.1.3	Ergebnisse der Trendanalyse.....	130
9.2	Kreuzvalidierung.....	132

### **Teil III**

#### **ANALYSE UND INTERPRETATION**

<b>10</b>	<b>Raum-zeitliche Modellierung</b> .....	<b>137</b>
10.1	Analysen zur zeitlichen Dynamik und zu mittlerer Vegetationsbedeckung mit Satellitendaten .....	138
10.1.1	Integration der Ergebnisse mit Geländeerhebungen.....	140
10.1.2	Ableitung eines vegetationsbasierten Degradationsindex .....	145
10.2	Analyse der Vegetationsstruktur .....	147
10.3	Zusätzliche Informationsebenen aus der Satellitendateninterpretation.....	151
10.3.1	Analyse von Einzelereignissen: Feuer und Flächenerschließung.....	151
10.3.2	Fernerkundliche Bestimmung der Biomasse.....	155
10.3.3	Ableitung einer Bodenzustandskarte.....	156
<b>11</b>	<b>Naturräumliche Einflussgrößen und Vegetationsentwicklung</b> .....	<b>161</b>
11.1	Geologie .....	162
11.2	Exposition .....	167
11.3	Hangneigung .....	170
11.4	Geländehöhe.....	172
11.5	Synthese zur Betrachtung der naturräumlichen Einflussfaktoren .....	175
<b>12</b>	<b>Kulturräumliche Einflussgrößen und Vegetationsentwicklung</b> .....	<b>178</b>
12.1	Erweiterung des Straßennetzes.....	178
12.2	Bestand an Weidetieren.....	183

## **Teil IV**

### RESÜMEE

**13 Abschließende Bemerkung und Ausblick** ..... 193

**14 Zusammenfassung**..... 198

LITERATUR.....200

### ANHANG

A Kartenmaterial

B Nomenklatur zu Flora und Fauna

C Weidetierpopulation im Psiloritis

Lebenslauf



# Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Abhängigkeiten raum-zeitlich wirksamer Phänomene und Möglichkeiten ihrer Erfassung .....	11
Abb. 4.1:	Arbeitsgebiete auf Zentralkreta, dargestellt über Höheninformation und Relief.....	19
Abb. 4.2:	Jährliche Niederschlagsverteilung Kretas .....	21
Abb. 4.3:	Starkregen am Südabhang des Psiloritis .....	22
Abb. 4.4:	Abweichungen der Niederschläge vom 10-jährigen Mittel .....	23
Abb. 4.5:	Übersicht zur Geologie Kretas .....	24
Abb. 4.6:	Schneebedeckter Höhenzug des Psiloritis (Mai 1997).....	26
Abb. 4.7:	Verbreitete Böden Zentralkretas .....	28
Abb. 4.8:	Anteil endemischer Arten an der Flora Kretas.....	30
Abb. 4.9:	Kermeseichenwald von Rouvas im Psiloritis.....	32
Abb. 4.10:	<i>Sarcopoterium spinosum</i> .....	33
Abb. 4.11:	Bestockung mit Schafen und Ziegen im Psiloritis .....	37
Abb. 4.12:	Anzahl der Olivenbäume ( <i>Olea europaea</i> ) in den Nomoi Iraklion und Rethymnon .....	39
Abb. 4.13:	Denudation an Gebirgsstraßen .....	40
Abb. 5.1:	SPOT-DHM, Exposition und Hangneigung .....	46
Abb. 5.2:	Verwaltung von Spektraldaten und Zusatzinformationen im GIS .....	49
Abb. 5.3:	Verschiedene Datenebenen im GIS einschließlich Probenahmepunkte .....	50
Abb. 5.4:	Luftbildkartierung von Pflanzenformationen im Psiloritis .....	52
Abb. 5.5:	Flächenstatistik für die Jahre 1945, 1968 und 1989 aus Befliegungsdaten für Psiloritis.....	53
Abb. 5.6:	Luftbildkartierung von Pflanzenformationen in Asterousia .....	54
Abb. 5.7:	Flächenstatistik für die Jahre 1945, 1968 und 1989 aus Befliegungsdaten für Asterousia.....	55
Abb. 6.1:	Landsat-MSS-Szene des Jahres 1984 vor und nach der Deconvolution.....	59
Abb. 6.2:	Lage der Passpunkte im Orthophoto .....	60
Abb. 6.3:	Topographiebedingter Pixelversatz.....	62
Abb. 6.4:	Restfehlervektoren und Zusammenhang zwischen Geländehöhe und Kontrollpunktversatz vor und nach DHM-gestützter geometrischer Korrektur.....	64
Abb. 6.5:	Überlagerung linearer Elemente aus der topographischen Karte mit geometrisch korrigierten Satellitendaten .....	65
Abb. 7.1:	Zeitabhängige, phasenweise Kalibrierfunktion für Landsat-5 TM .....	69

Abb. 7.2:	Typisierung der Reflexion.....	71
Abb. 7.3:	Strahlungsflüsse zwischen Sonne, Erde und Sensor.....	73
Abb. 7.4:	Atmosphärische Fenster zwischen 0,3 und 2,6 $\mu\text{m}$ und Landsat-TM-Kanäle .....	74
Abb. 7.5:	Phasenfunktionen der Rayleigh- und Mie-Streuung.....	76
Abb. 7.6:	Schema einer bildbasierten Schätzung der aerosoloptischen Dicke .....	79
Abb. 7.7:	Mittlere jahreszeitenabhängige Schwebstoffbelastung um Kreta aus Daten des Coastal Zone Color Scanner (CZCS) für die Jahre 1979 bis 1985.....	80
Abb. 7.8:	Minimale Wassersignaturen aller Satellitendaten der TM-Zeitserie.....	81
Abb. 7.9:	Schema zur Interkalibrierung von Landsat-MSS mit Landsat-TM.....	88
Abb. 7.10:	Ausschnitt der reliefierten Südküste Kretas; a: radiometrisch unkorrigierte Daten, b: zugehöriger Ausschnitt des DHM, c: nach radiometrischer Korrektur ohne DHM, d: nach radiometrischer Korrektur einschließlich DHM .....	92
Abb. 7.11:	Reflexionssignaturen an sonnenzu- und -abgewandten Hängen nach radiometrischer Korrektur ohne und mit DHM.....	93
Abb. 7.12:	Höhenunabhängigkeit invarianter Reflexionssignaturen nach radiometrischer Korrektur für Szenen mit hoher und niedriger aerosoloptischer Dicke.....	94
Abb. 7.13:	Potentielle Fehlerquellen der radiometrischen Korrektur aufgrund von Fehlern im DHM.....	94
Abb. 7.14:	Relative Abweichungen in der Reflexion weitgehend vegetationsfreier Oberflächen der TM-Datenreihe (1984 bis 1996).....	96
Abb. 7.15:	Relative Abweichungen in der Reflexion weitgehend vegetationsfreier Oberflächen der MSS-Datenreihe .....	97
Abb. 7.16:	Synthetische Spektralsignaturen aus interkalibrierten TM- und MSS-Daten des Jahres 1988.....	99
Abb. 8.1:	Schema zur stratifizierten Endmemberselktion aus Referenz- und Bild-Endmembers .....	107
Abb. 8.2:	Beispiel einer PPI-Ausgabe für Zentralkreta.....	109
Abb. 8.3:	In die Ebene projizierter, 6-dimensionaler Datenraum mit vier potentiellen Endmembers .....	111
Abb. 8.4:	Aus Geländemessungen interpolierte Vegetationsspektren für Landsat-MSS und Landsat-TM.....	112
Abb. 8.5:	Modell mit vier Endmembers zur SMA des Stratum Psiloritis .....	114
Abb. 8.6:	Spektraler Vergleich zwischen Bodenaufgabe und Ausgangsmaterial im Flysch.....	115
Abb. 8.7:	Modell mit drei Endmembers zur SMA der Flyschzone im Stratum Asterousia.....	116

Abb. 8.8:	Schattenanteile des Stratums Psiloritis im Jahr 1996 .....	117
Abb. 8.9:	Ergebnisse der SMA für das Jahr 1996 im Stratum Psiloritis; a: Vegetation, b: Kalk, c: Boden, d: 3-Kanal-Komposit aus Vegetation, Kalk und Boden .....	118
Abb. 8.10:	Root Mean Squared Error und kanalweise Residuen für TM-3, TM-4 und TM-5 mit überlagerten geologischen Einheiten .....	122
Abb. 8.11:	Residualanalyse für Flächen außerhalb und innerhalb der untersuchten Arbeitsgebiete .....	124
Abb. 8.12:	Vergleich der Entmischungsergebnisse von MSS und TM für die Matorralgebiete auf Plattenkalk des Psiloritis (1988) .....	125
Abb. 8.13:	Vergleich der Entmischungsergebnisse von MSS und TM für die Phryganagebiete auf Flysch im Asterousiagebirge (1988) .....	126
Abb. 9.1:	Zeitliche Dynamik und mittlere Vegetationsbedeckung im Psiloritis aus einer Zeitserie mit 14 Aufnahmezeitpunkten .....	131
Abb. 9.2:	Zeitliche Dynamik und mittlere Vegetationsbedeckung in Asterousia aus einer Zeitserie mit 14 Aufnahmezeitpunkten .....	131
Abb. 9.3:	Ausgangsdaten und Trendfunktionen für Pflanzenformationen im Psiloritis und in Asterousia .....	132
Abb. 9.4:	Verteilung positiver und negativer Trendrichtungen mit und ohne Berücksichtigung des Datensatzes von 1972 .....	133
Abb. 9.5:	Kreuzvalidierung des mittleren Regressionskoeffizienten aller Bildpixel für Psiloritis und Asterousia .....	135
Abb. 10.1:	Entwicklungsstufen der Pflanzengesellschaften Kretas .....	137
Abb. 10.2:	Mittelwert der Vegetationsbedeckung und zeitliche Dynamik aus 13 Aufnahmezeitpunkten (Psiloritis) .....	139
Abb. 10.3:	Mittelwert der Vegetationsbedeckung und zeitliche Dynamik aus 12 Aufnahmezeitpunkten (Asterousia) .....	140
Abb. 10.4:	Typische Wuchsformen von <i>Acer creticum</i> unter Beweidung .....	141
Abb. 10.5:	Mittlere Vegetationsbedeckung aus Zeitreihenanalyse und Arten- verteilung im Psiloritis .....	142
Abb. 10.6:	Mittlere Vegetationsbedeckung aus Zeitreihenanalyse und Arten- verteilung in Asterousia .....	143
Abb. 10.7:	Artenreiche Phrygana nördlich von Miamou .....	144
Abb. 10.8:	Vegetationsbedeckung der Hochebene von Nida im Frühjahr 1997 und im Sommer 1998 .....	148
Abb. 10.9:	Variabilität der Vegetationsschätzungen um die Trendfunktion am Beispiel gras- und waldbedeckter Flächen .....	149
Abb. 10.10:	Räumlicher Zusammenhang von Vegetationsbedeckung und Variabilität der Vegetationsentwicklung .....	150

Abb. 10.11: Zusammenhang zwischen Variabilität der Vegetationsentwicklung, mittlerer Vegetationsbedeckung und unterschiedlich strukturierten Pflanzenbeständen.....	151
Abb. 10.12: Detektion von Feuerereignissen anhand abrupter Veränderungen der Vegetationsschätzungen aus Satellitendaten.....	152
Abb. 10.13: Vegetationsanteile für die Schlucht von Zaros in den Satellitendaten von 1994 und 1996; betroffener Bestand an <i>Pinus brutia</i> im Herbst 1996 .....	153
Abb. 10.14: Neuanlage von Kulturen mit <i>Olea europaea sylvestris</i> um Miamou.....	155
Abb. 10.15: Zusammenhang zwischen Vegetationsbedeckung und Biomasse in Asterousia .....	156
Abb. 10.16: Tief wurzelnder <i>Sarcopoterium spinosum</i> auf Luvisol (Psiloritis).....	158
Abb. 10.17: Nahezu vegetationslose Hochgebirgslagen am Psiloritis und am Kouloukonas .....	160
Abb. 11.1: Geologische Struktur Asterousias aus geologischer Karte und Satellitenbildkartierung .....	162
Abb. 11.2: Absolute und relative Verteilung von Flächen verschiedener Vegetationsbedeckung in Abhängigkeit von verschiedenen geologischen Substraten in Asterousia.....	163
Abb. 11.3: Kalkrippen im Flysch am Nordhang der zentralen Asterousiaberge; Grenze zwischen Flysch- und Kalkstratum am Gipfel des Kofinas mit Angaben zur Artenverteilung.....	164
Abb. 11.4: Vegetationsbedeckung mit holzigen Arten auf Kalk im Vergleich zu anderen geologischen Substraten in Asterousia .....	165
Abb. 11.5: Absolute und relative Verteilung von Flächen verschiedener zeitlicher Dynamik auf verschiedenen geologischen Substraten in Asterousia.....	166
Abb. 11.6: Abhängigkeit der mittleren Vegetationsbedeckung und der zeitlichen Dynamik der Vegetation von der Exposition im Psiloritis .....	168
Abb. 11.7: Abhängigkeit der mittleren Vegetationsbedeckung und der zeitlichen Dynamik der Vegetation von der Exposition in Asterousia.....	169
Abb. 11.8: Abhängigkeit der mittleren Vegetationsbedeckung und der zeitlichen Dynamik der Vegetation von der Hangneigung im Psiloritis .....	171
Abb. 11.9: Abhängigkeit der mittleren Vegetationsbedeckung und der zeitlichen Dynamik der Vegetation von der Hangneigung in Asterousia.....	172
Abb. 11.10: Abhängigkeit der mittleren Vegetationsbedeckung und der zeitlichen Dynamik der Vegetation von der Geländehöhe im Psiloritis.....	173
Abb. 11.11: Abhängigkeit der mittleren Vegetationsbedeckung und der zeitlichen Dynamik der Vegetation von der Geländehöhe in Asterousia .....	174
Abb. 12.1: Straßenausbau im Psiloritis nach Luftbildkartierung; 1945, 1968, 1989; Auffahrt zu den Weidegebieten von Rouvas bei Gergeri .....	180
Abb. 12.2: Straßenausbau in Asterousia nach Luftbildkartierung; 1945, 1968, 1989 .....	182
Abb. 12.3: Entwicklung der Bestockungszahlen im Psiloritis .....	185

Abb. 12.4:	Entwicklung der Bestockungsdichte im Psiloritis .....	186
Abb. 12.5:	Gruppen von Trajektorien der Bestockungsdichte und der Vegetationsbedeckung .....	188
Abb. 12.6:	Zusammenhang zwischen Vegetations- und Bestandsentwicklung; Veränderung der Bestandszahlen; Entwicklung des Straßennetzes; Veränderung der Vegetationsbedeckung .....	190

# Tabellenverzeichnis

Tab. 5.1:	Beschreibung der Landsat-5 TM-Zeitreihe.....	44
Tab. 5.2:	Beschreibung der Landsat-MSS-Zeitreihe .....	45
Tab. 6.1:	Polynome und Restfehler .....	61
Tab. 7.1:	Szenenbasierte Parameter zur absoluten radiometrischen Korrektur.....	82
Tab. 7.2:	Spektrale Charakteristika der Landsat-TM- und -MSS-Sensoren.....	85
Tab. 7.3:	Kalibrierkonstanten für Landsat-5 MSS aus Strahldichtevergleich zwischen Landsat-TM und Landsat-MSS.....	89
Tab. 7.4:	Regressionsparameter der relativen Anpassung zur MSS-Szene vom 29.05.1988 .....	90
Tab. 7.5:	Kanalweise, zentrale Wellenlänge der zusammengesetzten Signaturen .....	99
Tab. 8.1:	RMSE aller prozessierten Datensätze für das Stratum Psiloritis .....	121
Tab. 8.2:	Wichtige Inhaltsstoffe der NPV und deren Absorptionsbanden .....	123
Tab. 10.1:	Statistik der Degradationsgefährdung für die Weideflächen im Psiloritisgebirge .....	146
Tab. 10.2:	Statistik der Degradationsgefährdung für die Weideflächen im Asterousiagebirge .....	147
Tab. 12.1:	Länge des Straßennetzes im Psiloritis .....	181
Tab. 12.2:	Länge des Straßennetzes in Asterousia .....	182
Tab. 12.3:	Prozentuale Verteilung der Weidesysteme im Psiloritis für das Jahr 1992 .....	183

*Teil I:*

*Theoretischer Ansatz:*

*Rahmen und Ziel der Arbeit*

# 1 Einleitung

Unter dem Schlagwort der „Globalisierung“ werden heute viele, wenn nicht die meisten wirtschaftlichen Entscheidungen und daraus folgende Entwicklungen zusammengefasst. Auch ihre Auswirkungen auf die weltweite Agrarpolitik und -landschaft, mit einem Wandel des primären Sektors zum Agro-Business oder der tiefgreifenden Veränderung und Marktanpassung ehemals traditioneller, landwirtschaftlicher Zweige, sind sicherlich unstrittig. Damit gehen fühl- und sichtbare Veränderungen unserer Umwelt auf globaler, europäischer und regionaler Ebene einher. Nach der weltweiten Erschließung von Kulturland, vor allem während der letzten beiden Jahrhunderte, folgt nun die weitere Konzentration und Intensivierung der Landwirtschaft als Triebfeder des fortwährenden Landnutzungswandels (Houghton 1994).

Allmählich setzen sich in diesem Kontext aber auch Ansätze zur integrierten Beurteilung des Wandels durch, die versuchen neben Ertragszahlen auch Umweltschäden und Umweltsanierung in die Kosten-Nutzen-Rechnung einzubeziehen. Bewertungsgrundlagen bieten beispielsweise die Ergebnisse einer Reihe von Umweltprogrammen, welche eine Analyse der Umweltsituation und -veränderungen zum Ziel haben. Dazu zählen sowohl der Landnutzungswandel, wie auch die damit einhergehenden Wechselwirkungen der Stoffkreisläufe (z.B. Stickstoff, Kohlenstoff), die Veränderungen des regionalen Klimas und der Atmosphärenzusammensetzung und der vegetationsökologische Wandel hinsichtlich Biomassenverteilung und Artenzusammensetzung (Walker und Steffen 1999; Pimentel et al. 1999).

In der gesellschaftlichen und wissenschaftlichen Diskussion spielen vor allem die Verluste an Flora und Fauna sowie damit zusammenhängender natürlicher Ressourcen eine immer wichtigere Rolle. Die Detektion, Beschreibung und Bewertung dieser Veränderungen stellt einen schwierigen und sensiblen Themenkomplex dar, von dessen qualitativer und quantitativer Bewertung meist weitreichende Maßnahmen auf allen politischen Ebenen abhängen. Letztendlich geht die Tragweite der zu treffenden Entscheidungen weit über den Landschafts- und Umweltaspekt hinaus und induziert vielfach tiefgreifende gesellschaftliche und soziale Veränderungen in den betroffenen Gebieten. Im Mittelpunkt damit zusammenhängender Planungsszenarien muss daher immer der Gedanke der Nachhaltigkeit stehen. In einem holistischen Ansatz sollten die Auswirkungen möglicher Gestaltungsalternativen auf die künftige naturräumliche, wie auch auf die davon nicht trennbare kulturräumliche Entwicklung gegeneinander abgewogen werden. Dementsprechend können Entscheidungen, die spürbar in das Management lokaler Umweltressourcen eingreifen, nur auf Basis fundierter Umweltinformationen getroffen werden, welche immer im lokalen und regionalen Kontext interpretiert werden müssen. (Johnson und Lewis 1994; Dubost 1998; Folke et al. 1998).

Mit Blick auf die intensiv vom wirtschaftenden Menschen geprägten Ökosysteme des Mittelmeerraumes hat die Europäische Union daher zur Untersuchung von Desertifikation



und Degradation seit Mitte der 80er Jahre eine gezielte Forschungsförderung betrieben. Mit dem Ziel, einen Überblick über die Umweltsituation der Mittelmeeranrainerstaaten zu schaffen, die Ursachen von Umweltproblemen zu ergründen und Möglichkeiten präventiver Ursachenbekämpfung festzulegen, wurden im Rahmen der „Environment“ bzw. „Environment and Climate“ Programme eine Vielzahl angewandter Forschungsprojekte unterstützt. Eingebettet in diesen Kontext wurde 1992 das DeMon-I Projekt (*Integrated Approaches to Desertification Mapping and Monitoring in the Mediterranean Basin*) ins Leben gerufen. In der Kombination angewandter Fernerkundungsmethoden mit Geographischen Informationssystemen (GIS) wurden innovative Konzepte zur quantitativen Erfassung degradationsbestimmender Oberflächenparameter erarbeitet und mit Modellierungsansätzen zur Abschätzung der Degradationsgefährdung verknüpft (Hill 1996).

Die vorliegende Arbeit entstand im Zusammenhang mit dem von der Abteilung Fernerkundung an der Universität Trier (FEUT) initiierten Nachfolgeprojekt DeMon-II: *An Integrated Approach to Assess and Monitor Desertification Processes in the Mediterranean Basin*. Aufbauend auf den Erkenntnissen zur fernerkundungsgestützten Ableitung degradationsbestimmender Faktoren standen die Operationalisierung der Datenverarbeitungsmethodik und die weitergehende Analyse abgeleiteter Informationen sowie eine Bewertung der gewonnenen Erkenntnisse im Vordergrund. Darüber hinaus integrierte eine Pilotstudie zu den Weidegebieten Zentralkretas die Ergebnisse der Arbeiten des interdisziplinär ausgerichteten DeMon-II Forschungsteams zur Ableitung eines nachhaltigen Nutzungskonzeptes (Hill et al. 2000).

Im Rahmen dieser Studie soll die vorliegende Arbeit Möglichkeiten zur Bewertung raumzeitlicher Veränderungen mittels der Analyse und Interpretation von Fernerkundungsdaten und darauf basierender Modelle darstellen. Thematisch fokussiert werden vor allem die Veränderungen der Vegetation, aber auch weiterer Landschaftselemente, wie beispielsweise der Böden. Die damit einhergehende Gefährdung sensibler Ökosysteme aufgrund veränderter Rahmenbedingungen stellt eine Herausforderung an die planerische Umsetzung nachhaltiger Konzepte dar, deren konkrete Ausformulierung nur auf der Basis vergleichbarer, raumübergreifender und langzeitlicher Analysen sinnvoll erfolgen kann.

## 2 Desertifikation und Degradation

Phänomene der Desertifikation und Degradation sind nicht neu. Von den frühen Kulturen Mesopotamiens und Zentralasiens sind Beispiele bekannt, die beispielsweise die Versalzung von Böden aufgrund von Bewässerungsmaßnahmen dokumentieren (Mainguet 1999). Schon die Griechen und Römer verwendeten die Bezeichnung „agri deserti“, um ehemals als Weideland oder ackerbaulich genutzte und anschließend wüstgefallene Flächen zu beschreiben (Rubio 1995). Der Begriff „Desertifikation“<sup>1</sup> wurde schließlich durch die bodenkundlich orientierten Forschungsarbeiten der 30er und 40er Jahre des letzten Jahrhunderts geprägt (Bennett 1939; Laws 1940; Ellison 1944) und von Aubreville (1949) zur Beschreibung degradierter Böden und Pflanzengesellschaften eingeführt. Bis in die heutige Zeit wurde „Desertifikation“ immer wieder als Begriff mit wechselndem Sinngehalt eingesetzt. Weltweite Aufmerksamkeit erlangte der Terminus erst mit der United Nations Conference on Desertification (UNCOD) 1977 in Nairobi, deren Motivation ursprünglich aus der zwischen 1969 und 1973 eingetretenen Sahel-Krise erwuchs.

Es dauerte allerdings noch weitere 15 Jahre, bis sich eine heute allgemein gültige Definition des Desertifikationsbegriffs nach der United Nations Conference on Environment and Development 1992 durchsetzte und 1994 in der sogenannten „Wüstenkonvention“ übernommen wurde. In Artikel 1 des Übereinkommens der Vereinten Nationen zur Bekämpfung der Wüstenbildung wird Desertifikation als „die Landverödung in ariden, semiariden und trockenen subhumiden Gebieten infolge verschiedener Faktoren einschließlich Klimaschwankungen und menschlicher Tätigkeiten“ definiert. Unter Annex IV des Übereinkommens werden explizit die „Besonderen Bedingungen der Region Nördliches Mittelmeer“ herausgestellt und als Kernpunkte die negativen Einflüsse nicht nachhaltiger Wassernutzung, unkontrollierter Waldbrände und inadäquater Landnutzungsformen genannt. Die im Annex IV aufgeführten Staaten an der Südperipherie Europas umfassen die EU-Mitgliedsländer Portugal, Spanien, Italien und Griechenland sowie die Türkei (UNCCD 1994).

Diese Liste stellt eine aufschlussreiche Zusammenstellung dar. So fehlen die Balkanländer des Mittelmeergebietes und auch Frankreich findet keine Erwähnung. Nach vorläufigen Gesprächen zur Erarbeitung eines regionalen Aktionsplans im Jahre 1995 zog sich Frankreich aus den Verhandlungen um Annex IV zurück und fungiert heute als nicht betroffenes Land mit Beraterstatus (Sciortino und Svalduz 2000). Ebenso finden die Mittelmeerländer Nordafrikas keinen Eingang in einen ihnen gerecht werdenden Kontext innerhalb der UNCCD, sondern werden vielmehr in Annex I den restlichen Ländern des afrikanischen Kontinents zugeordnet – wenn auch innerhalb der Subregion „Nördliches Afrika“ mit der konkreten Aufforderung zur Zusammenarbeit mit Staaten des nördlichen Mittelmeerraumes

---

<sup>1</sup> desertus facere (lat.): wüstmachen, verwüsten; gelegentlich auch als „Desertization“ bezeichnet

(UNCCD 1994). Die Teilnahme verschiedener Länder am Annex IV der UNCCD reflektiert somit gleichermaßen die Einstellung der jeweiligen Staaten zur Desertifikationsproblematik, strategische Aspekte der Finanzierung, wie auch die politische Grundhaltung der UNCCD.

In der Tat gewann in den vergangenen Jahrzehnten der Terminus „Desertifikation“ aufgrund der häufig polarisierenden Erörterung damit verbundener Problemkreise einen immer deutlicher politisch geprägten Charakter. Die durch die UNCOD im Jahre 1977 entfachte Diskussion trug zwar maßgeblich zur Klärung, aber auch zur Politisierung des Begriffs bei. Im gleichen Zusammenhang immer wieder benutzte Schlagworte wie „desert encroachment“ oder „time bomb of desertification“ erschweren einen wissenschaftlich fundierten und wertfreien Umgang mit der Thematik (Mabbutt 1985; Binns 1990; Thomas und Middleton 1994).

Auch unzureichend hinterfragte und mäßig unterbaute wissenschaftliche Erkenntnisse der Desertifikationsforschung sind verantwortlich für den sorglosen Umgang mit weitreichenden Aussagen zum Ausmaß und zur Problematik der Desertifikation. Häufig fehlt eine detaillierte Analyse der räumlich sehr variablen Rahmenbedingungen; zu allgemein formulierte Hypothesen sowie die Anwendung unangemessener Untersuchungsmethoden können zu fragwürdigen Aussagen hinsichtlich der Evaluierung unterschiedlicher Ökosysteme führen.

So wurde aus Vergleichen von Vegetationskartierungen am Rande des Sahel aus den 50er Jahren mit Orthophotos Ende der 60er Jahre auf eine jährliche Ausbreitung wüstenhafter Bedingungen um 17 Kilometer geschlossen (Lamprey 1975). Die Tatsache, dass unterschiedliche Definitionen der Vegetationsbedeckung und phänologische Schwankungen diese Rate verursachten, wurde in diesem Zusammenhang nicht berücksichtigt. Neuere, satellitengestützte Untersuchungen ergaben für die 80er Jahre keine nennenswerten Trends zum "Vorrücken der Wüsten", auch nicht verglichen mit den frühen Vegetationskartierungen. Vielmehr zeigten sich in Abhängigkeit von klimatischen Rahmenbedingungen verschiedener Jahre lediglich Oszillationen der Vegetationsbedeckung (Hellden 1991).

Mainguet (1994) bemerkt dementsprechend: „After the discussion ... of the existence or nonexistence of desertification, I have great difficulty in accepting the use of the word *desertification* at all, because it so often implies an irreversible condition. I prefer the term *land degradation*...“. Diese Aussage trifft die Ambivalenz der Diskussion in ihrem Kern: Die in der Vergangenheit oft mit publikumswirksamen Schlagworten aber wenig fundierten Zahlen geführte Debatte zur Ausbreitung der Wüsten lässt den Terminus „Desertifikation“ zur Worthülse werden.

Im Folgenden soll daher stattdessen der Begriff der „Degradation“ im Vordergrund stehen, der unabhängig vom ursächlichen Hintergrund der beobachteten Phänomene greift und keine Diskussion über die räumliche Abgrenzung von Desertifikation betroffener oder nicht betroffener Gebiete forciert. Eine Reihe sehr unterschiedlicher Phänomene sind als Degradationserscheinungen einzustufen, wobei der ökosystemare und regionale Kontext entscheidend

für deren Interpretation als Negativentwicklung im Sinne fehlender Nachhaltigkeit ist (Barrow 1991; Johnson und Lewis 1995).

Prinzipiell sind all solche Erscheinungen als Degradation zu werten, die das natürliche Potential eines Ökosystems auf Dauer negativ beeinflussen. Dies zeitigt in der Regel eine verringerte biologische Produktivität, welche auf Veränderungen in der Pedosphäre und der Vegetation beruht. Darüber hinaus können auch Modifikationen des Landschaftsgefüges, der Energie- und Stoffflüsse oder auch der Umbruch sozialer, kultureller oder ökonomischer Strukturen als Degradationserscheinungen gewertet werden (Johnson und Lewis 1995; Thomas und Middleton 1994; van der Leeuw et al. 1998, 1999).

## 2.1 Ursachen

Interessanter als die oft irreführende und politisch motivierte Kontroverse um das Thema der Desertifikation sind im Zusammenhang mit der vorliegenden Untersuchung die damit zusammenhängenden wissenschaftlichen Grundlagen und Erkenntnisse. Wie erklären sich Degradationserscheinungen, wie stellt sich die Situation im europäisch-mediterranen Raum dar und in welchem Ausmaß bzw. innerhalb welcher regionaler Zusammenhänge und Ausprägungen treten Degradationsphänomene in Erscheinung?

Degradationsprozesse finden nicht irgendwo oder irgendwann statt. Werden gewisse Rahmenbedingungen erfüllt oder kombinieren sich Ungunstoffaktoren räumlich und zeitlich zu einer kritischen Konstellation, so steigt die Eintrittswahrscheinlichkeit degradationsinduzierter Prozessketten. Die UNCCD beschränkt die betrachteten Regionen auf Landflächen der ariden, semiariden und trocken subhumiden Gebiete außerhalb der polaren oder subpolaren Zone mit einem Verhältnis von jährlichem Niederschlag zu potentieller Evapotranspiration zwischen 0,05 und 0,65. Aufgrund dieser Eingrenzung wird klar, dass die Rahmenbedingungen für die Degradation durch klimatische Determinanten abgesteckt werden (UNCCD 1994).

Es muss allerdings ebenso deutlich herausgestellt werden, dass für das mediterrane Europa damit nicht die Kausalität der Problematik gemeint sein kann, sondern eine entscheidende Grenzbedingung (Perez-Trejo 1992; Thomas und Middleton 1994; van der Leeuw 1999). Es ist inzwischen unstrittig, dass globale Veränderungen in der Erdatmosphäre stattfinden und auch ihren Ausdruck in der Veränderung klimatologischer und anderer Kenngrößen finden (Walker et al. 1999). Ob und inwiefern der Klimawandel im Rahmen der Global-Change-Problematik künftig zu veränderten Degradationsprozessen im mediterranen Raum beiträgt, muss zunächst offen bleiben. Aufgrund der Kürze ausgewerteter Datenreihen und hoher Schwankungsbreiten der betrachteten Parameter, sind bisherige Modellierungen potentieller Klimaveränderungen im östlichen Mittelmeerraum mit großen Unsicherheiten behaftet; entsprechend vage gestaltet sich die Interpretation hinsichtlich des Einflusses solcher

Änderungen auf verschiedene Degradationsprozesse (van der Leeuw 1998; Palutikof et al. 1999; Thornes 1999).

Für die im Folgenden im Mittelpunkt der Betrachtungen stehende Insel Kreta lässt die Analyse klimatologischer Aufzeichnungen über den Zeitraum der letzten 100 Jahre zumindest keine Rückschlüsse auf einen rezenten Klimawandel zu. Weder Niederschlagsdaten, noch Temperaturverläufe oder Wasserbilanzen indizieren einen als Trend zu interpretierenden Verlauf in den Messreihen. Ebenso lassen sich keine signifikanten Veränderungen in der Häufigkeit oder Ausprägung der jeweiligen Extrema ableiten (Allen und Katsikis 1990; Arseni-Papadimitriou et al. 1990; Metaxas 1990; Rackham 1990; Grove et al. 1993).

Die Anfälligkeit für Degradationsprozesse ruft das Zusammenspiel des Klimas – unabhängig von einem manifestierten Wandel – mit typisch mediterranen Landschaftselementen hervor. Dazu zählen neben den ausgeprägten Reliefunterschieden auch die vielerorts dominierenden, erosionsanfälligen Mergel oder die zur Verkarstung neigenden Kalke (Yassoglou 1995). Bei reliefbedingt mäßiger Tiefgründigkeit oder nur stellenweise vorhandener Bodendecke bildet sich ebenfalls eine häufig nur schütterere Vegetationsbedeckung aus. Von den Substrat- und Klimafaktoren abhängig ist schließlich auch die lokale und regionale Wasserversorgung, die aufgrund der zeitlich variablen und unterschiedlich ergiebigen Niederschläge einen weiteren Problemfaktor darstellen kann (Thornes 1999; Wagner 2001). Zunächst sollen daher die entscheidenden natur- und kulturräumlichen Elemente des mediterranen Europa mit Bezug zu Degradationsphänomenen näher betrachtet werden.

An erster Stelle sind das typisch mediterrane Klima und damit verbundene meteorologische Phänomene als wichtige Rahmenbedingungen zu nennen. Nicht ohne Grund wurden schon seit den frühen Klimaklassifikationen Mittelmeerkimate ausgeschieden, welche die Küstenregionen Kaliforniens, Chiles, Südafrikas, Südaustraliens und des Mittelmeerraumes umfassen. Primär kennzeichnend für all diese Kimate sind die trockenen, warmen Sommer und feucht-milde Winter, verursacht durch die Lage der Regionen an den Westseiten der Kontinente und im Übergangsbereich von Westwind- und Passatzzone. Das Einsetzen der Winter- oder Sommerperiode unterliegt jährlichen Schwankungen, welche die genaue Vorhersage des Niederschlags- und Temperaturregimes im Jahresverlauf erschweren. Gleichzeitig können während der Übergangsjahreszeiten, aber vor allem auch in der sommerlichen Trockenzeit, einzelne Gewitter und Starkniederschläge solche Niederschlagsmengen bringen, wie sie im Winter über mehrere Wochen und Monate verteilt fallen. Im Mittelmeerraum entstehen weiterhin über die höhen- und expositionsabhängige Variation an den in fast allen Regionen das Landschaftsbild prägenden Gebirgsstöcken verschiedene Spielarten des mediterranen Klimas (Nahal 1981; Rother 1993).

In enger Wechselwirkung mit Geologie, Topographie, Vegetationsbedeckung und klimatischen Rahmenbedingungen stehen die Böden einer Region. Deren Eigenschaften werden durch Ausgangssubstrat, Verwitterungsformen, Hangneigung und -position, vor allen Dingen

aber auch durch die intensiven wechselseitigen Beziehungen zwischen Vegetation und Boden geprägt. Die Mächtigkeit der Bodenaufgabe, ihre Erodibilität, die Wasser- und die Nährstoffversorgung bestimmen maßgeblich die Anfälligkeit eines Raumes für Degradationserscheinungen. Die Vegetationsbedeckung ist als Ausprägung und gestaltender Faktor des Regionalklimas davon nicht strikt trennbar und stellt zugleich eine Abhängige vom Bodenzustand und wichtige Größe zur Bodenbildung dar. Dabei ist die Vegetation ein entscheidender Schutzfaktor gegen Wind- und Wassererosion, erhöht aber auch die Verdunstung über gesteigerte Evapotranspirationsraten (Francis und Thornes 1990; Mainguet 1994).

Die bisher genannten natürlichen Randbedingungen bilden gleichsam den Hintergrund vor dessen Kulisse der variierende Einfluss des wirtschaftenden Menschen wirkt. Der mehrtausendjährigen Besiedlungsgeschichte fällt die entscheidende Rolle für die Entwicklung des mediterranen Landschaftsgefüges Südeuropas zu, welches sich im Laufe dieser Zeit etabliert, aber auch deutlich gewandelt hat. Seit dem Neolithikum wurde der europäische Mittelmeerraum landwirtschaftlich intensiv genutzt. Für weite Teile dieses Gebietes kann davon ausgegangen werden, dass aufgrund der schon seit dieser Zeit einwirkenden, anthropogen induzierten Prozesse potentielle Klimaxstadien mediterraner Ökosysteme nur noch reliktsch anzutreffen sind (Le Houérou 1981; Grove et al. 1993; Perez-Trejo 1994; Rackham und Moody 1996).

In der Regel führt die Übernutzung von Ressourcen zu Degradationserscheinungen verschiedener Ausprägung und Intensität. Vernachlässigung oder Ignoranz gegenüber dem Aspekt der Nachhaltigkeit kann der Ausdruck von Bevölkerungsdruck, Siedlungsverteilung und Strukturwandel, unsachgemäßer Nutzungsformen und -techniken oder auch unangemessener politischer Strukturförderung und Subvention sein. Häufig sind Degradationsprozesse auch durch damit einhergehende Wissens- oder Technologiedefizite begründet. Daraus erwachsende Ausprägungen von Degradation können in Abhängigkeit der zu Grunde liegenden Prozesse vielfältig sein: Ackerbauliche Übernutzung oder unangemessene Anbautechniken, wie unsachgemäße Bewässerung oder Bodenbearbeitung, führen zur Versalzung des Oberbodens oder beschleunigter Bodenerosion. Überweidung bedingt Vegetationszerstörung und verringerte Vegetationsbedeckung, während die erhöhte Trittbelastung einen negativen Einfluss auf die Bodenstruktur hat (Perez-Trejo 1994; Thomas und Middleton 1994).

Vor allem auf globaler Ebene spielt die fortschreitende Entwaldung eine grundlegende Rolle. Aber auch im regionalen und lokalen Maßstab des europäischen Mittelmeergebietes sind die Wechselbeziehungen zwischen Waldbedeckung, Klima, Bodenentwicklung und Wasserhaushalt maßgeblich für die Funktion einer Reihe von Ökosystemen. Ebenso ist die weltweit erhöhte Feuerfrequenz der letzten Jahrzehnte in diesem Zusammenhang bedenklich. Wenn auch Feuerereignisse heute als inhärente Prozesse vieler Ökosysteme betrachtet werden, so ist eine anthropogen induzierte, angestiegene Feuerhäufigkeit nicht wünschenswert und

potentieller Auslöser von Degradationsprozessen (Lambin 1994; Moreno 1999; Camperio-Ciani und Castillo 2000).

Schließlich kommt es zu offensichtlicher Landschaftsdegradation bei übermäßiger Wasserentnahme aus Grundwasser oder Oberflächengewässern. Das weltweit bekannte und viel diskutierte Beispiel des verlandenden Aralsees findet in seiner Dramatik glücklicherweise kein Pendant im mediterranen Klimaregime. Dennoch spielt die übermäßige Entnahme von Grund- und Oberflächenwasser in vielen Regionen des Mittelmeergebietes eine entscheidende Rolle. Auslöser zur Übernutzung des Wasserangebots können gleichermaßen Landwirtschaft, Industrie, die Versorgung von Ballungsräumen oder der häufig rasant zunehmende Tourismus und damit verbundene infrastrukturelle Entwicklungen sein (Perez-Trejo 1994; Mainguet 1999; Bromley et al. 2000).

## 2.2 Indikatoren

Indikatoren der Degradation werden meist zu Kategorien zusammengefasst. Gängige Einteilungen unterscheiden den pedologisch/geomorphodynamischen Komplex, den Vegetationskomplex und den hydrologischen Komplex; je nach Autor variiert die weitere Strukturierung innerhalb dieser Kategorien (Mensching 1990; Mainguet 1994; Thornes 1999).

Hinsichtlich pedologischer und geomorphodynamischer Indikatoren lassen sich zunächst die zahlreichen Formen beschleunigter Bodenerosion nennen. Durch das Zusammentreffen von Bodenverkrustungen mit extremen Niederschlagsereignissen können fluvial-erosive Prozesse vor allem im mediterranen Raum oft noch verstärkt werden. In Abhängigkeit von der wirkenden Kraft (Wind, Wasser, Gravitation) gehen andererseits verschiedene Formen der Akkumulation mit Erosionsphänomenen einher (Morgan und Davidson 1986; Mainguet 1994; Poesen 1995). Häufig kommt es auch zu weniger evidenten Effekten, wie der Zerstörung von Bodenaggregaten, der Auswaschung von Nährstoffen, dem Eintrag chemischer oder biologischer Schadstoffe oder der Bodenverdichtung (Imeson 1995; Poesen 1995).

Im Zusammenspiel mit hydrologischen Indikatoren lassen sich darüber hinaus Modifikationen im Bodenwasserhaushalt nennen, die ihren Ausdruck in einer Wasserunterversorgung, dem Austrocknen oder einer Versalzung der Böden aufgrund veränderter Wasserspannungsverhältnisse, z.B. bei Bewässerungsfeldbau, finden können. Letztgenannte Phänomene treten häufig in Zusammenhang mit Veränderungen hydrologischer Indikatoren auf, wie der übermäßigen Grundwasserspiegelabsenkung oder dem periodischen bis permanenten Austrocknen stehender und fließender Gewässer (Collin 1995; Mainguet 1999).

Die Degradation der Vegetation ist eng verknüpft mit der Bodenentwicklung und beide Prozesse beeinflussen sich wechselseitig. Veränderungen der Biozönose können dementsprechend vielschichtig sein und Modifikationen in der Vegetationsstruktur, in der Artenzusammen-

setzung oder -vielfalt (Flora wie Fauna) sowie der Vegetationsbedeckung umfassen. (Le Houérou 1990). Meist bedeutet eine solche Veränderung eine Netto-Abnahme der Vegetationsbedeckung, allerdings nicht zwingend. Die Überweidung eines Pflanzenbestandes kann auch zu einer vermehrten Einwanderung von Weideunkräutern führen und somit eine abnehmende Weideaktivität, verbunden mit einer Netto-Zunahme der Vegetation durch Verbuschung, nach sich ziehen. Damit gehen weitreichende Implikationen zur Interpretation von Veränderungen in der Vegetation einher, da die Bestimmung von Indikatoren ohne die Einbindung detaillierter Kenntnisse des regionalen Kontext nicht möglich ist. Daraus resultiert auch eine unterschiedliche Bewertung von Entwicklungen in landwirtschaftlich intensiv genutzten gegenüber naturnahen oder extensiv genutzten Gebieten (Seligmann und Perevolotsky 1994; Tsiourlis et al. 1998a).

Wichtig ist darüber hinaus der Aspekt der Landschaftsstrukturveränderungen. Insbesondere im heterogenen Gefüge des europäischen Mittelmeerraumes mit der engen Verknüpfung von Natur- und Kulturräum spielt die Entwicklung des Landschaftsmosaiks für die Biozönose eine vielfältige Rolle. Die Zerschneidung ursprünglich zusammenhängender Habitate, Veränderungen in der Verzahnung verschiedener Lebensräume und die Ausbildung von Korridoren sind nur einige der damit zusammenhängenden Problemkreise (O'Neill et al. 1988; Turner 1987, 1989, 1990; Forman 1995).

Auf Kreta treten die genannten, potentiellen Indikatoren für Degradationserscheinungen vielerorts offensichtlich in Erscheinung (Angelakis et al. 1996; Lyrantzis 1996). So bedingen beispielsweise die rezente Rodung phryganischer Vegetation und der häufig zeitgleich vorangetriebene Straßenausbau eine beschleunigte Bodenerosion (vgl. Kap. 4). Andererseits entbehren viele der in der Literatur dargestellten Degradationsszenarien einer wissenschaftlichen Grundlage und halten einer kritischen Analyse nicht stand (Grove 1990; Rackham und Moody 1996). In Bezug auf die Weidegebiete Zentralkretas stellt sich die Frage nach den räumlich expliziten Auswirkungen des Strukturwandels und deren Nachweis anhand messbarer Kenngrößen. Der Einsatz fernerkundlicher Methoden eröffnet in diesem Zusammenhang neue Möglichkeiten des Monitorings degradationspezifischer Indikatoren.

### 2.3 Die Rolle der Fernerkundung

Die Degradation von Böden und Vegetation stellt einen raumübergreifenden Prozess dar, dessen punktuelle Ausprägungen zwar offensichtlich sein können, der allerdings in seiner raum-zeitlichen Dimension schwierig zu fassen und zu beschreiben ist. Notwendigerweise sollten in diesem Kontext Raumeinheiten, Landschaften oder gar ganze Landschaftsräume betrachtet werden, die erst in ihrem räumlichen Gefüge einen Eindruck des Gesamtsystems vermitteln. Räumlich ausgedehnt auftretende Phänomene spielen sich in der Regel jedoch auch innerhalb ausgedehnter Zeiträume ab, so dass die Beobachtung solcher Prozesse zu



einem Problem der raum-zeitlichen Integration führt (Abbildung 2.1): Erforderlich sind flächendeckende Informationen über möglichst lange Zeiträume (Graetz 1996).

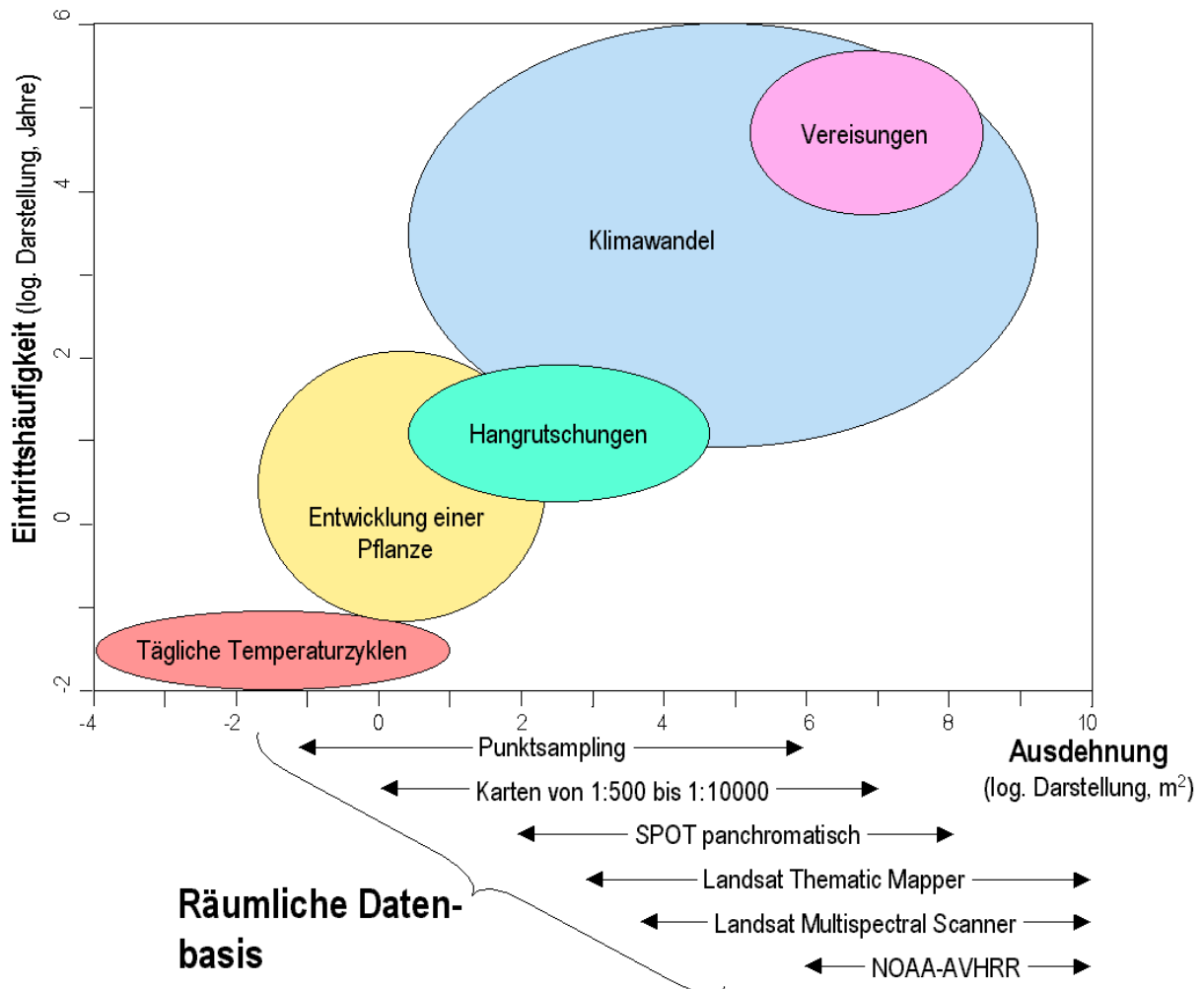


Abbildung 2.1: Abhängigkeiten raum-zeitlich wirksamer Phänomene und Möglichkeiten ihrer Erfassung (nach Duguay und Walker 1996, verändert)

Zur Erfassung, Beschreibung und Bewertung räumlicher Zusammenhänge und Prozesse bieten sich verschiedene Betrachtungsweisen und damit verbundene Ansätze an. Für wechselnde zeitliche und räumliche Skalenniveaus müssen unterschiedliche Methoden und Techniken in die Analyse eingebracht werden. Als wichtige Themenkreise, die zugleich ein Surrogat für verschiedene raum-zeitliche Maßstabsebenen darstellen, gelten (Hill 1993b; Rackham und Moody 1996; Boer 1999):

- Möglichkeiten zur Erfassung der historischen Dimension,
- Feldmethoden zur Erfassung der rezenten, lokalen Dimension,
- Modellierungsansätze zur Ableitung nicht direkt erfassbarer Größen und Verteilungen oder zur retrospektiven bzw. prospektiven Analyse,
- fernerkundungsgestützte Modellierungsansätze, einschließlich GIS.

Andere Schemata zur Einteilung der Methoden sind selbstverständlich denkbar, allerdings ist die hier gewählte Aufschlüsselung im Rahmen der vorliegenden Arbeit geeignet zur Erklärung der zugrunde liegenden Analysestrategie. Bei der weiteren Betrachtung gilt zudem, dass die jeweiligen Methoden nicht als strikt getrennt angesehen werden dürfen, da erst eine Kopplung verschiedener Vorgehensweisen detaillierte Aussagen zu Degradationsprozessen und -effekten ermöglicht.

Die Aufarbeitung der historischen Dimension ist eine wichtige Voraussetzung für die Einordnung der rezenten Problematik in die heutige Umweltdiskussion, insbesondere hinsichtlich der Degradationserscheinungen im seit Jahrtausenden anthropogen geprägten europäischen Mittelmeerraum. Je nach zeitlicher Dimension der Betrachtung sind eine Reihe von Informationsquellen in diesem Zusammenhang zu nutzen: die Interpretation historischer Dokumente (Zeichnungen, Schriftstücke), die Datierung archäologischer Funde (Nahrungsmittel, Werkzeuge), Analysen von Pollendiagrammen, dendro-chronologische Untersuchungen oder Bohrkern- und Sedimentanalysen (Grove 1990; Rackham 1990).

Einigen dieser Methoden ist eine gewisse Unsicherheit oder auch eine vielfältige Interpretierbarkeit der Ergebnisse gemein. Dies mindert nicht im geringsten die Notwendigkeit und den Wert damit zusammenhängender Analysen, bilden diese doch das Fenster zur Vergangenheit, welches die Einordnung rezenter Degradationserscheinungen erst ermöglicht. Vor allem Literaturstudien belegen jedoch, dass eine unkritische Übernahme teilweise weit verbreiteter Lehrmeinungen hinsichtlich der naturräumlichen Entwicklung des europäisch-mediterranen Raumes zu erheblichen Fehleinschätzungen des natürlichen Ausgangspotentials einer Region führen kann. Neuere Interpretationen zur Vegetationsbedeckung Kretas stützen beispielsweise nicht mehr das Bild einer stetigen Abnahme der Bewaldung seit der Besiedlung durch den Menschen. Eine weiterführende Diskussion dieser Problematik findet in Kapitel 4 statt (Hall et al. 1990; Rackham 1990).

Weitere Informationen lassen sich häufig aus Bohrkern- oder Pollenanalysen ableiten, die für Kreta allerdings nur vereinzelt vorgenommen worden sind und in ihrer Interpretation viel Raum für Spekulationen bieten. In der Summe stimmen die meisten Autoren in ihrer Meinung überein, dass die rezenten Entwicklungen auf Kreta, nicht vor dem Hintergrund einer akut zunehmenden Degradationsgefährdung aufgrund veränderter Klimabedingungen zu sehen sind. Vielmehr sind sie Ausdruck der massiven und noch immer voranschreitenden anthropogenen Einflussnahme (Grove 1990; Rackham und Moody 1996; Papanastasis 1998; Grove et al. 1999).

In der Prozessanalyse hinsichtlich verschiedener Degradationsphänomene stehen meist geländebasierte, punktuelle oder auf Testparzellen basierende Aufnahmemethoden und die Auswertung der so erhobenen Daten im Vordergrund. Eine Knüpfung zum Gesamttraum unterbleibt jedoch häufig bzw. erfolgt interpretatorisch oder mittels Extrapolation, um eine räumlich explizite Informationsebene zu schaffen. In der Regel verbietet sich diese

Vorgehensweise jedoch aufgrund der Heterogenität der betrachteten Untersuchungsgebiete. Eine Alternative und Ergänzung bietet ein durch Modelle erweiterter Ansatz. Das Ziel einer Modellierung besteht darin, allgemeingültige Gesetzmäßigkeiten zu definieren und so umzusetzen, dass eine Erklärung bisher nicht zu fassender Zusammenhänge durch das Modell möglich ist. Im Zusammenhang ökologisch relevanter Fragestellungen heißt dies in der Regel, die Erweiterung um eine räumliche oder zeitliche Dimension, die ohne die Modellbildung so nicht möglich gewesen wäre (Duguay und Walker 1996).

Daher bieten Methoden der Fernerkundung im Zusammenhang mit rechnergestützter Modellierung eine einzigartige Möglichkeit, Daten verschiedener Maßstabsebenen miteinander zu kombinieren – Upscaling-Ansätze zu entwickeln – und damit zur Gewinnung von Erkenntnissen jenseits der lokalen Maßstabsebene beizutragen. Multitemporale Interpretationsverfahren erschließen neue Möglichkeiten des Monitoring und der Bewertung von Entwicklungen über längere Zeiträume bei zugleich flächendeckender Erfassung der zu bewertenden Phänomene (Hobbs 1990; Roughgarden et al. 1991; Hill 1993b).

Boden- und Vegetationsveränderungen zählen zu den wichtigsten Indikatoren von Degradationserscheinungen und können anhand von Satellitendatenauswertungen zur Beurteilung der raum-zeitlichen Entwicklung eines Untersuchungsraumes flächendeckend herangezogen werden. Dazu ist die Überführung der Daten in interpretierbare Information sowie die Einbettung dieser Informationen in einen konzeptionellen Ansatz notwendig. Anhand der Quantifizierung von Primärparametern (Reflexion, Strahldichte) und daraus abgeleiteter Information sowie deren Einordnung in den räumlichen und zeitlichen Kontext lassen sich neue Erkenntnisse zur Dynamik eines Gebietes ableiten (Graetz 1996; Hill et al. 1996).

Hinsichtlich der Vegetation sind die Biomasse und die Vegetationsbedeckung zwei aus Fernerkundungsdaten ableitbare Maßzahlen. Allerdings ist die Vegetation ein dynamisches Landschaftselement dessen Phänologie bei der Interpretation der Daten berücksichtigt werden muss. Im mediterranen Raum variiert die phänologische Entwicklung der Vegetation im Laufe eines Jahres primär in Abhängigkeit von der Wasserverfügbarkeit, in höher gelegenen Regionen oft auch in Abhängigkeit von Minimumtemperaturen. Aber auch interannuelle Schwankungen können selbst bei der Betrachtung gleicher Zeitpunkte in verschiedenen Jahren beträchtlich sein. Zur Beurteilung von Degradationserscheinungen sind die jenseits dieser Schwankungen auftretenden Trends in der Vegetationsentwicklung entscheidend. Anhand einer standardisierten Erhebung fernerkundlich bestimmbarer Parameter zur Vegetation lassen sich auch derartige Trendfunktionen aus Satellitendaten ableiten (Hobbs 1990; Graetz 1996).

Für die Interpretation der Bodenerosion aus Fernerkundungsdaten lassen sich aus Kenngrößen, wie der Entwicklung des Bodenbedeckungsgrades, mit der Zeit Angaben über eine regressive oder progressive Bodenentwicklung treffen. Da zur Erkennung einer regressiven Bodenentwicklung aus Spektraldaten ein hinreichend ausgeprägter Kontrast zwischen geo-

logischem Untergrund und Bodensubstrat ausgeprägt sein muss, hängen die zu gewinnenden Erkenntnisse vom jeweiligen regionalen Kontext ab. Auch hinsichtlich der fernerkundlichen Beurteilung der Bodenentwicklung ist daher eine an die naturräumlichen Rahmenbedingungen geknüpfte Interpretation der Ergebnisse zwingend notwendig (Birkeland 1990; Hill et al. 1994).

Zu diesem Zweck sollten aus Fernerkundungsdaten abgeleitete Informationen wo immer möglich im Zusammenhang mit schon vorhandenen oder gegebenenfalls zu erhebenden weiteren Informationsebenen interpretiert werden. Bei Integration in ein übergreifendes Geographisches Informationssystem (GIS) können zum einen fernerkundliche Analysen durch Zusatzinformationen gestützt, zum anderen aber auch GIS-Datenbestände mittels fernerkundlich gewonnener, multitemporaler Information aktualisiert werden. Liegen entsprechende Modellansätze vor, kann ein strukturierter Datenbestand zur Modellierung verschiedener Szenarien herangezogen werden (Graetz 1996; Wilkinson 1996; Legg et al. 1998).

Allerdings verbietet sich die ungeprüfte Übertragung vorhandener Interpretationsschemata oder Modelle, da ökosystemare Prozessketten, wie beispielsweise der Zusammenhang zwischen Beweidung, Vegetation und Böden mit anderen Regionen nur bedingt vergleichbar sind. Als Beispiel sei die fast ausschließliche Abhängigkeit des Weidepotentials vom Wasserangebot im Süden Australiens genannt, welche in den hier zu betrachtenden Arbeitsgebieten und unter Berücksichtigung der dort vorkommenden Beweidungsformen so nicht gegeben ist (Perez-Trejo 1994; Pulina et al. 1998).

### 3 Forschungsansatz und Ziel der vorliegenden Arbeit

Der Einfluss der europäischen Union ist heute ein prägender Faktor im Wirtschaftsgefüge aller Mitgliedsstaaten, insbesondere in den Ländern mit geringer Ertragskraft entlang der europäischen Südperipherie. Mit der EU-Erweiterung um Griechenland im Jahre 1981 wurden auch für den südöstlichsten Staat der Gemeinschaft neue politische Rahmenbedingungen wirksam, die vor allem hinsichtlich der europäischen Förderpolitik eine entscheidende Rolle in der Entwicklung des Landes spielen. Besonders deutlich stellt sich dies in der Agrar- und Regionalförderung dar: Die Randlage und die im Vergleich zu anderen Staaten rückständigen Agrarstrukturen machen Griechenland zu einem der größten Empfänger für Subventionen der EU. Vor allem die vielerorts traditionell auf Weidewirtschaft ausgerichtete Agrarlandschaft Griechenlands ist in ihrer heutigen Form ohne Subventionszahlungen im europäischen Kontext nicht mehr vorstellbar.

Ein herausragendes Beispiel für die Anpassung an diese Förderpolitik stellt die Insel Kreta dar. Vor allem die Gebirgsregionen der Insel werden nahezu ausschließlich weidewirtschaftlich genutzt und kamen so während der letzten beiden Jahrzehnte in den Genuss hoher Förderprämien für Schaf- und Ziegenhaltung. Darüber hinaus erhielt die Region gezielte Strukturförderung aus dem „Regional Development Fund and Cohesion Fund“ mit Schwerpunkten im Straßenbau und dem Ausbau der Bewässerungsnetze. Als Konsequenz dieser Förderprämien und der Erschließung ehemals schwer zugänglicher Gebiete stiegen die durchschnittlichen Besatzzahlen im hier betrachteten Zeitraum deutlich an (Strid et al. 1995; Papanastasis und Kazaklis 1998).

Bei der Analyse dieser Entwicklung kommt den naturräumlichen Rahmenbedingungen der Insel besondere Bedeutung zu. Das Bild Zentralkretas wird durch eine weite Spanne verschiedener Klimate auf kleinstem Raum geprägt, die durch das von hohen Gebirgszügen modifizierte ost-mediterrane Klima bedingt sind. Gepaart mit einer außergewöhnlichen und endemitenreichen Flora und Fauna entsteht so ein einzigartiger Landschafts- und Kulturraum. Kreta ist daher prädestiniert für die exemplarische Beobachtung und Bewertung eines sozio-ökonomisch determinierten Strukturwandels und dessen Auswirkungen auf den Naturraum. Die Vielfalt an neben- und miteinander existierenden Ökosystemen und deren Veränderungen im Laufe der letzten Jahrzehnte bilden daher den Rahmen für die im Kontext dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen (Kap. 4).

Die Heterogenität der Landschaft Kretas, stellvertretend für eine Vielzahl mediterraner Standorte, erschwert Aussagen zu Degradationserscheinungen ohne eine räumlich und zeitlich hochauflösende Datenbasis. Bezugnehmend auf die in den Kapiteln 2.2 und 2.3 getroffenen Aussagen zu Degradationserscheinungen, stellen fernerkundungs- und GIS-gestützte Verfahren eine Möglichkeit zum raumübergreifenden Monitoring verschiedener Indikatoren dar. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen daher fernerkundlich erfassbare Prozesse, wie

Veränderungen hinsichtlich der Böden und vor allem der Vegetation, untersucht und in ihrem räumlichen Zusammenhang analysiert und bewertet werden.

Der häufig gewählte Ansatz zur Analyse von Degradationsphänomenen mit meteorologischen Systemen erscheint in diesem Kontext nicht sinnvoll. Zwar liegen für meteorologische Daten lange Zeitreihen mit täglichem Aufnahmezyklus vor, deren Spektralcharakteristika sind jedoch in erster Linie für die Atmosphärenbeobachtung ausgelegt und ihre geometrische Auflösung liegt im Bereich von einem bis mehreren Kilometern. Deshalb können solche Systeme den Erfordernissen eines fernerkundlichen Monitoring-Ansatzes für den Mittelmeerraum nicht gerecht werden, dessen Ziel die Ableitung quantitativer Parameter zur Dynamik der Boden- und Vegetationsentwicklung heterogener Landschaftsmosaik sein muss.

Demgegenüber ist als eine wichtige Säule zur Ableitung von Indikatoren im Rahmen eines Monitoringkonzeptes das seit 1972 operationelle Landsat-Programm hervorzuheben: Mit inzwischen nahezu 29-jähriger Kontinuität wurden die Daten von Satelliten der Landsat-Serie zum Auslöser ganzer Wissenschaftsprogramme (Lauer et al. 1997). Umweltrelevante Prozesse aufgrund anthropogener Einflussnahme durch Beweidung, Brandrodung oder Landnutzungsänderungen erschließen sich meist erst durch die Betrachtung jahrzehntelanger Zeiträume. Die Systeme des Landsat Multispectral Scanner (MSS), Landsat Thematic Mapper (TM) und seit 1999 auch des Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper (ETM+) liefern Datenreihen, die aufgrund ihrer Gemeinsamkeiten in der Aufzeichnung und Prozessierung optimal aufeinander abgestimmt werden können (Goward und Williams 1997; Mika 1997). Die Kombination aus geometrisch und spektral hinreichend hochauflösenden Daten bietet daher in der Verbindung mit einer fast globalen und regelmäßigen Abdeckung der Landoberfläche die idealen Voraussetzungen, um langfristig wirksame Prozessketten anhand ausgewählter Indikatoren zu erfassen. Außerdem wird ein erster Vergleich in Hinblick auf die längerfristige Entwicklung der Vegetation seit dem Zweiten Weltkrieg anhand einer Luftbildanalyse durchgeführt (Kap. 5).

In einem ersten Schritt steht die exakte Ableitung von Primärparametern, beispielsweise der Reflexion an der Erdoberfläche, im Vordergrund. Die Vorverarbeitung der Satellitendaten umfasst daher die geometrische und radiometrische Korrektur der Daten (Kap. 6 und 7). Erstere ermöglicht die präzise Verortung beobachteter Phänomene auf der Erdoberfläche, während anhand der radiometrischen Korrektur die gewünschten Parameter auf der Basis des am Sensor aufgezeichneten Signals modelliert werden können. Wichtig ist in diesem Zusammenhang die genaue Abstimmung (Interkalibrierung) von Landsat-TM- und Landsat-MSS-Daten, um eine vergleichbare Datenbasis über den gesamten Beobachtungszeitraum zu gewährleisten. Die Güte der Vorverarbeitung ist somit der qualitätsbestimmende Faktor für alle nachfolgenden Analysen aus primären Messgrößen.

Auf Basis der modellierten Reflexionswerte lassen sich verschiedene Sekundärparameter ableiten. Bisherige fernerkundliche Ansätze zum Monitoring von Weidegebieten bezogen sich vor allem auf die weitläufigen ariden, semi-ariden bis subhumiden Regionen Australiens, Südafrikas oder Nordamerikas (Pech et al. 1986; Pickup 1996; Pickup et al. 1998; Tueller 1991). Aufgrund der verschiedenen Landschaftsstrukturen in den mediterranen Regionen Europas ist eine Übertragung üblicherweise eingesetzter Methoden, wie die Berechnung von Vegetationsindizes oder der Einsatz multispektraler Klassifikatoren, nicht ohne weiteres möglich oder sinnvoll (Hill 1993, 1998).

Eine Alternative bietet die Analyse spektraler Mischsignaturen, die auf Basis von Referenzspektren jedes Bildelement in seine spektralen Bestandteile zerlegt und derart die Anteile der zu bestimmenden Oberflächenmaterialien an einem Reflexionsspektrum modelliert (Hill 1998). Im vorliegenden Fall liegt das Ziel in der Bestimmung der jeweiligen Anteile an Boden, Vegetation und gegebenenfalls auch an anstehendem Gestein. Gelingt eine zuverlässige Quantifizierung dieser Einzelkomponenten, so kann im Vergleich der Anteile über den Beobachtungszeitraum eine raumübergreifende und pixelgenaue Kartierung der Veränderungen anhand einer Zeitreihenanalyse erfolgen (Kap. 8 und 9).

Die zeitliche Dynamik und die mittlere Vegetationsbedeckung lassen im Zusammenhang mit weiteren Informationsebenen Rückschlüsse auf die anthropogene Einflussnahme zu. Darüber hinaus ist auch zu prüfen, inwiefern die phänologische Variabilität der Vegetation mit Strukturparametern von Pflanzengesellschaften korreliert werden kann. Gegebenenfalls können nicht nur Aussagen zu Veränderungen, sondern auch über die im Wesentlichen betroffenen Pflanzengesellschaften getroffen werden. Neben der Analyse des Trends und der damit assoziierten Bestandeseigenschaften bieten die Kartierung des Bodenzustands, der Biomasse oder von Feuerereignissen weitere Ansatzpunkte zur Interpretation aus Satellitendaten (Kap. 10).

Die Kartierung von Stabilität und Veränderungen stellt nur den ersten Schritt zur Analyse der Daten dar. Nach Möglichkeit sollte das Verständnis für Zusammenhänge zwischen Entwicklungsszenarien und natürlichen Rahmenbedingungen, wie beispielsweise Substrat, Topographie oder auch klimatischen Gegebenheiten, gestärkt werden. Dies ermöglicht eine räumlich differenzierte Betrachtung der Auswirkungen von Beweidung in besonders sensiblen Regionen. Die Untersuchung dieser Zusammenhänge erfolgt auf der Basis GIS-gestützter Analysen durch die Einbindung von Höhenmodellderivaten und geologischen Kartierungen (Kap. 11).

Vielfach wurde der Einfluss der sozio-ökonomischen Entwicklung auf den Naturraum Kretas beschrieben (Grove 1993; Strid 1995; Lyrantzis 1996; Papanastasis und Kazaklis 1998; Tsiourlis et al. 1998). Insbesondere dem Ausbau der Infrastruktur und der Zunahme an Weideaktivitäten werden negative Auswirkungen auf die Entwicklung der Vegetation, wie auch anderer naturräumlicher Grundlagen zugeschrieben. In Kapitel 12 soll daher der Versuch einer Zusammenschau möglicher anthropogener Einflussgrößen vorgenommen werden. Dies

geschieht vor allem anhand von Weidetierstatistiken im Zusammenhang mit den aus Satellitendaten gewonnenen Erkenntnissen über die Vegetationsentwicklung.

Aus den aufgeführten Teilaspekten ergeben sich die folgenden Fragestellungen zur näheren Definition des Forschungsansatzes:

- Wie kann eine Prozessierungskette aufgebaut werden, mit deren Hilfe eine fernerkundliche Erfassung relevanter Oberflächenparameter erfolgen kann?
- Besteht ein quantifizierbarer Zusammenhang zwischen Veränderungen in der Reflexion von Oberflächen und deren Entwicklung im raum-zeitlichen Kontext?
- Können potentiell festgestellte Veränderungen in einen kausalen Zusammenhang mit naturräumlichen Rahmenbedingungen gestellt werden?
- Ist dies darüber hinaus auch für ausgewählte Indikatoren der sozio-ökonomischen Entwicklung möglich?
- Wie stellt sich die Entwicklung der Weidegebiete Kretas in Bezug auf die dargestellte Degradationsproblematik dar?

Diese auch als Hypothesen aufzufassenden Fragen sind zu erörtern und sollen zu einer abschließenden Bewertung im Rahmen der vorliegenden Arbeit führen. Darauf basierend wird ein Ausblick auf künftige Szenarien und in diesem Zusammenhang zu definierende Forschungsaufgaben gegeben.



## 4 Natur- und Kulturräumgefüge Kretas

Die im östlichen Mittelmeer zwischen  $34^{\circ}55'$  und  $35^{\circ}42'$  nördlicher Breite und  $23^{\circ}10'$  und  $26^{\circ}19'$  östlicher Länge gelegene Insel Kreta besitzt eine Ost-West-Ausdehnung von über 260 Kilometern gegenüber einer maximalen Breite von 60 Kilometern in Nord-Süd-Richtung. Kreta bildet somit gleichsam einen Riegel zwischen dem Ägäischen und Libyschen Meer. Das Arbeitsgebiet der vorliegenden Studie umfasst innerhalb dieser über  $8000 \text{ km}^2$  großen Region den Bereich Zentralkretas, mit Schwerpunkten in den naturräumlichen Einheiten der Gebirgszüge von Psiloritis und Asterousia<sup>2</sup>.

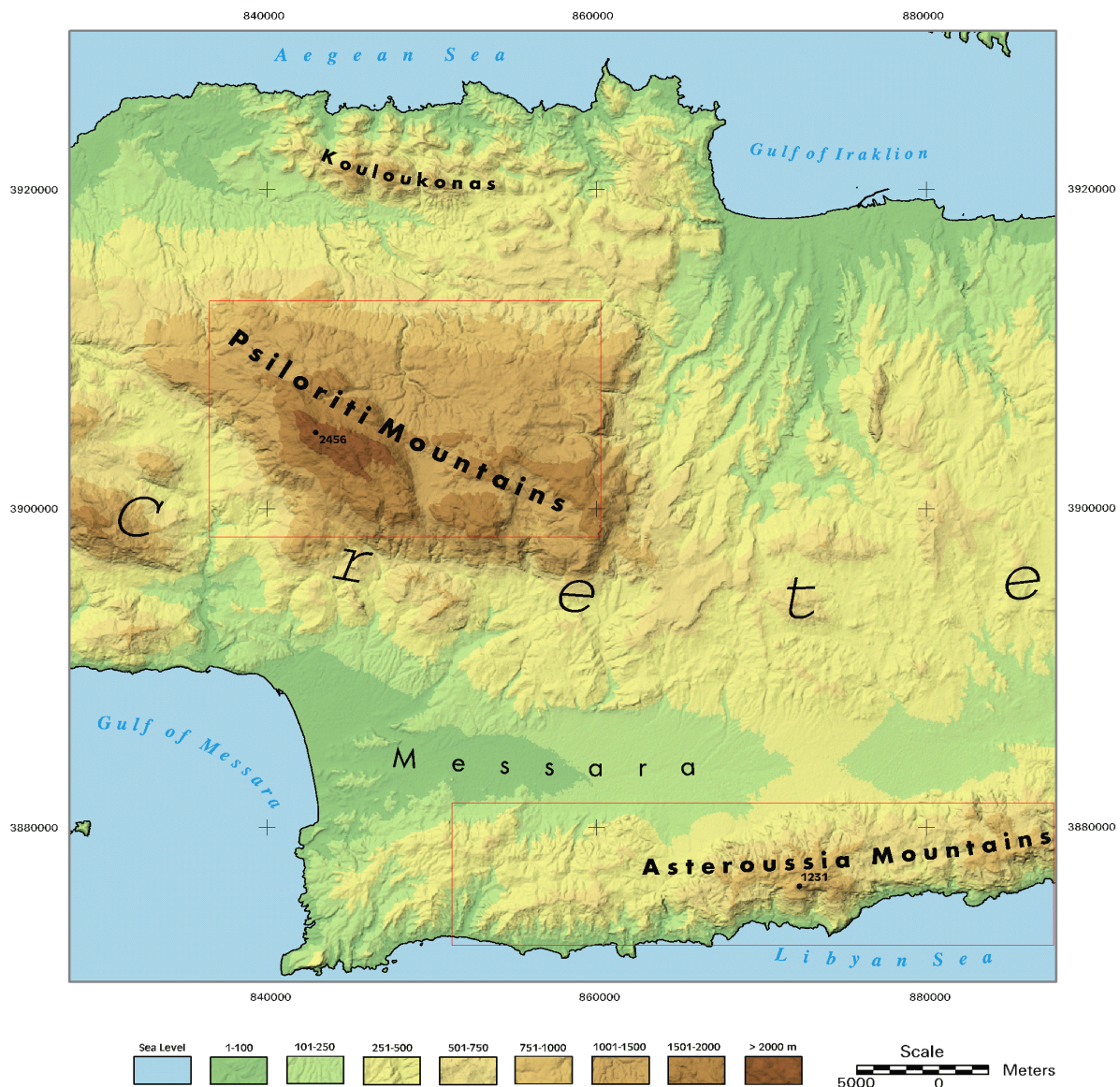


Abbildung 4.1: Arbeitsgebiete auf Zentralkreta, dargestellt über Höheninformation und Relief (abgeleitet aus SPOT-DHM; Koordinaten: UTM 34N, WGS 84)

<sup>2</sup> Karten der häufig verwendeten Namen von Ortschaften und Gebirgen finden sich am Ende von Anhang A (Abbildung A.12 und A.13).

Die Insellage an der Südostperipherie Europas, im Übergangsbereich der Kulturbereiche Europas und Nordafrikas, und die besonderen naturräumlichen Rahmenbedingungen führen zu einer anschaulichen Konstellation degradationsbestimmender Einflussfaktoren. Insbesondere die weit verbreitete, nahezu monokulturelle Nutzung der Gebirgräume als Weidegebiete zeugt von der engen wechselseitigen Beziehung zwischen Natur- und Kulturraum.

## 4.1 Naturräumlich bedingte Degradationsgefährdung Kretas

Die vielfältigen Kombinationen der im Folgenden darzustellenden Ökofaktoren unterwerfen den Kulturraum Kretas einer deutlichen naturräumlichen Gliederung. Insbesondere der Einfluss der Topographie auf das Lokalklima, mit trockenen, sub-humiden bis humiden Standorten über eine Distanz weniger Kilometer ist bemerkenswert. Gekoppelt ist diese extreme klimatische Variation auf kleinstem Raum mit der entsprechenden Vielfalt von Flora und Fauna, die vor allem über die pedologischen, geomorphologischen und hydrologischen Gegebenheiten weiter variiert wird.

### 4.1.1 Klima

Dem Klima kommt als lenkendem Moment der naturräumlichen wie auch der agrar- und forstwirtschaftlichen Nutzung eines Raumes eine ganz besondere Bedeutung zu. Da zum Klimawandel der Region schon in Kapitel 2 Stellung genommen wurde, beschränkt sich die Darstellung des Klima Kretas hier auf die rezent wirksamen Prozesse und deren potentiellen Zusammenhang mit Degradationserscheinungen.

Bei allgemeiner Betrachtungsweise ist Kreta den winterfeuchten Subtropen oder Mittelmeerklimaten zuzuordnen: Trocken-heiße Sommer wechseln mit milden Wintern, die im Mittel recht hohe Niederschlagswerte bringen. Die Gründe hierfür liegen in der Lage der Insel im Übergangsbereich von winterlicher Westwinddrift und sommerlicher Passatzone (Rother 1993). Letztere findet ihren Ausdruck auch in den sogenannten Etesien bzw. Meltémi, relativ kühlen sommerlichen Nordwinden, die aufgrund der durchschnittlich in 1500 m Höhe anzutreffenden Passatinversion trocken ausgeprägt sind. Vor allem in den Nord-Süd ausgerichteten Tälern Zentralkretas ist ein weites Vordringen ins Inselinnere möglich, während die massiven Gebirgszüge der Lefka Ori, des Psiloritis und des Dikti als massive Blockade wirken<sup>3</sup>. Dennoch bewirken die von Mazedonien über die Ägäis strömenden

---

<sup>3</sup> Daher rührt beispielsweise die häufig auftretende Gipfelbewölkung insbesondere des Ida-Gipfels im Psiloritis, die beim erzwungenen Aufstieg der Luftmassen über die trockenadiabatische Zone hinaus entsteht und eine kontinuierliche Auswertung von Satellitendaten in dieser Zone auch im Sommer erschwert.

Etesien keine dauerhafte Abkühlung, da im Sommer das aufgewärmte Libysche Meer im Süden und der Einstrahlungsüberschuss bei weitem überwiegen. Ihre Bedeutung für Kreta ist vielmehr im trockenen Charakter der damit verbundenen Luftmassen und deren Auswirkung auf Bodenwasserversorgung und Vegetation zu suchen (Lienau 1989).

Im Winter dominieren die zyklonalen Niederschläge der Westwindzone, initiiert durch Tiefdruckgebiete im Nordatlantik und Hochdruck über Nordafrika und Südwestasien. Zyklonen bilden sich teilweise westlich von Kreta oder werden bei der Durchdringung kalter mitteleuropäischer Luftmassen mit humider Mittelmeerluft reaktiviert. Diese erreichen Kreta von Westen und bringen regelmäßige und anhaltende Niederschläge. So stellen das Ende der winterlichen Regenzeit im Frühjahr und deren Einsetzen im Herbst auch die wichtigsten klimatologischen Kenngrößen im Jahresgang für Vegetationsentwicklung und Landwirtschaft dar (Greuter 1975; Rackham und Moody 1996).

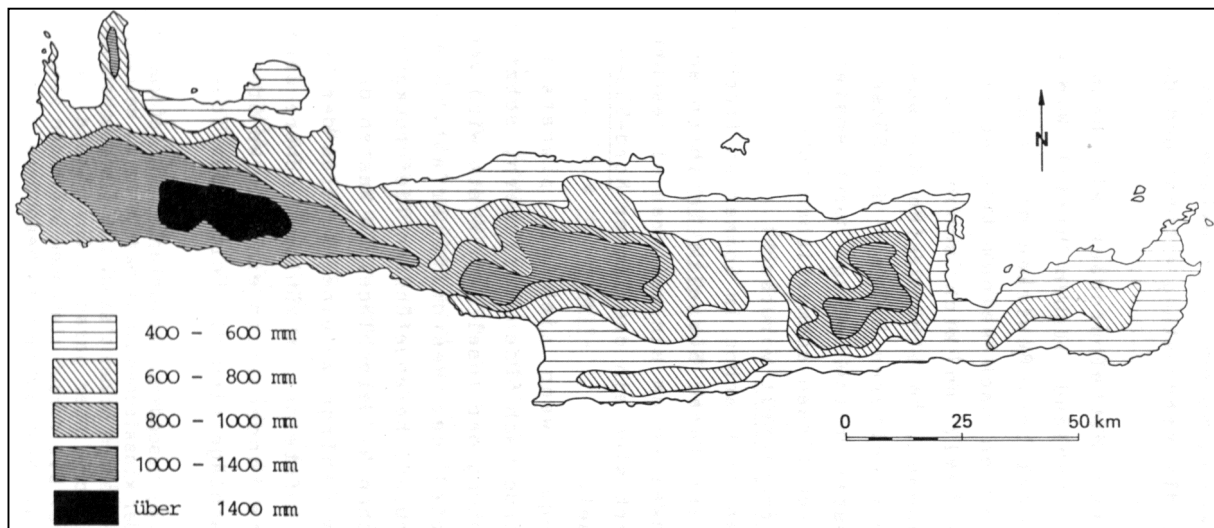


Abbildung 4.2: Jährliche Niederschlagsverteilung Kretas (Fröhlich 1987, verändert)

Allerdings hält diese pauschale Aussage einer genaueren Betrachtung nur bedingt stand. Die Variation der Niederschlags- und Temperaturverteilungen in Abhängigkeit von der Ausprägung regionaler und lokaler Windsysteme (Luv-/Lee-Effekte, allochtoner Luftmasseneintrag), der Höhenzonierung und Exposition kann beträchtlich sein. Vor allem die drei Hochgebirgszüge variieren daher das Inselklima: Zwischen den Temperaturen in der Ebene und den Gipfelregionen der Gebirge sind Unterschiede von über 20°C keine Seltenheit, welche durch Windeinfluss und Exposition nochmals weiter differenziert werden (HNMS 1996).

Vielleicht noch entscheidender sind die höhen- und expositionsbedingten Variationen in der winterlichen Niederschlagsperiode. Die von Westen herangeführten Zyklonen stoßen, entsprechend der zonalen Ausrichtung der Insel, zunächst auf die Lefka Ori, dann auf den Psiloritis und schließlich auf das Diktigebirge. Die Massive empfangen einen erhöhten, staubedingten Niederschlag, der entsprechend ihrer Anordnung von Westen nach Osten abnimmt (Abbildung 4.2). Die Niederschlagsverteilung weist bezüglich der einzelnen

Gebirgsstöcke die typische Asymmetrie der Luv-/Leeverteilung bei Stauniederschlägen auf. Darüber hinaus fällt in Abhängigkeit von der Temperatur der niederschlagsbringenden Luftmassen im Hochgebirge der Niederschlag in Form von Schnee, so dass beispielsweise am Ida bis in den Juli hinein Schneereste in geschützten Lagen auftreten können.

Während sommerliche zyklonale Niederschläge bedeutungslos sind, muss während dieser Zeit den thermisch oder auch reliefbedingt initiierten Starkniederschlägen bezüglich ihres landschaftsbestimmenden Einflusses verstärkt Relevanz beigemessen werden (Abbildung 4.3). Bei solchen Extremereignissen führen die mangelnde Speicherkapazität der meisten Böden und die geringe Infiltrationsraten (vgl. 4.1.4) zu einem erhöhten Oberflächenabfluss und somit zu einer relativ geringen Speicherung des Wasserangebots im Boden. Daher können derartige Starkregen eine enorme Erosivität entwickeln und trotz ihres sporadischen Auftretens für Boden und Vegetation entscheidende Bedeutung haben. Dies geht einher mit der Tatsache, dass die jährliche Variabilität der Niederschläge als sehr hoch einzustufen ist (Di Castri et al. 1981).



*Abbildung 4.3: Starkregen am Südabhang des Psiloritis*

Kreta befindet sich hinsichtlich klimainduzierter Degradationsgefährdung – wie die meisten mediterranen Gebiete Europas – im Spannungsfeld von sommerlicher Trockenheit und unregelmäßig, aber meist heftig auftretenden Starkniederschlägen. Erstere führt zu massiven Wasserversorgungsproblemen in trockenen Jahren. Dies betrifft vor allem die vom Tourismus geprägten Küstengebiete der Nordküste und die intensiv landwirtschaftlich genutzten Gebiete im Inselinnern und in der Messara. In beiden Fällen decken sich zudem die Zeiten höchsten Bedarfs mit denen niedrigsten Angebots. Demgegenüber führen die oben dargestellten

Effekte, im Zusammenhang mit sommerlichen Starkniederschlägen, vor allem in steilen und mäßig geschützten Lagen zu Erosionsproblemen bei gleichzeitig nur marginalen Vorteilen für die lokale Wasserversorgung (vgl. 4.1.3 und 4.1.4).

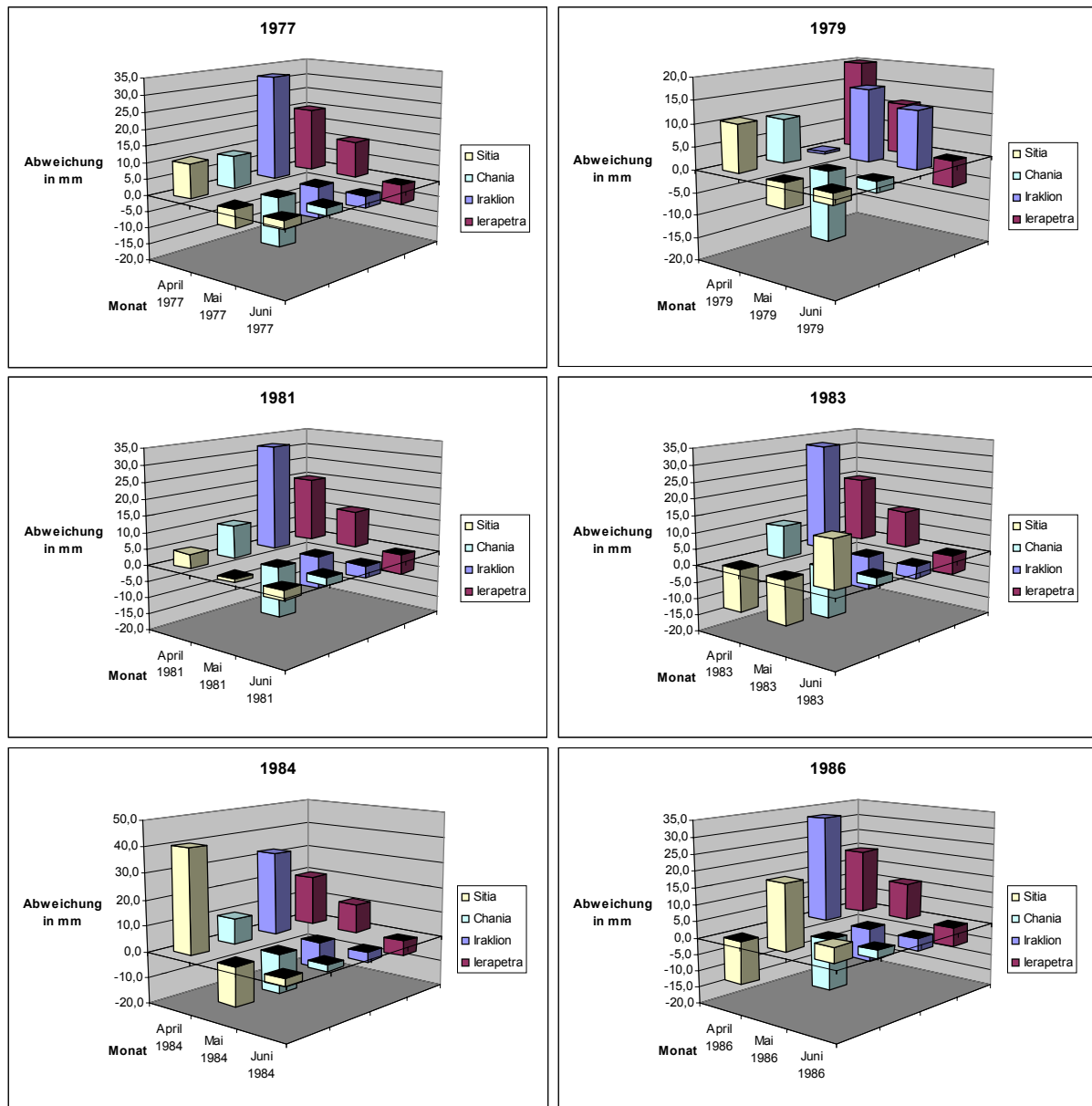


Abbildung 4.4: Abweichungen der Niederschläge vom 10-jährigen Mittel

Die ausgesprochen hohe räumliche und zeitliche Variabilität der Niederschläge verdeutlicht Abbildung 4.4. Für den Zeitraum von 1977 bis 1986 standen Niederschlagsdaten des National Meteorological Service für die hinsichtlich der Aufnahme von Satellitendaten relevanten Frühjahrsmonate April, Mai und Juni zur Verfügung (vgl. Kap. 5). Die monatsbezogene Abweichung vom Mittelwert dieses 10-jährigen Zeitraums für Sitia, Chania, Iraklion und Ierapetra belegt nicht nur die zeitliche Variabilität der Niederschlagssummen, sondern vor allem auch die räumlich bedingte Varianz zwischen vier weit entfernten Standorten auf Kreta.

### 4.1.2 Geologie und Geomorphologie

Ähnlich dem Klima kommen Geologie und Geomorphologie eine entscheidende Bedeutung bei der Erklärung bodenbildender und damit auch vegetationsbestimmender Prozesse zu. Darüber hinaus spielt vor allem der lithologische Teilkomplex bei der Interpretation spektraler Eigenschaften ganzer naturräumlicher Einheiten eine wichtige Rolle. Dementsprechend sollen hier die grundlegenden und für das Verständnis des Gesamtzusammenhangs maßgeblichen Aspekte dargelegt werden.

Abgesehen von wenigen Ausnahmen besteht Kreta als alpidisch gebildete Restscholle des Dinariden-Helleniden-Tauriden Orogens aus Sedimentgesteinen und unterschiedlich stark überprägten Metamorphiten (Abbildung 4.5). Nach dem Zeitpunkt ihrer Genese werden präneogene, neogene und quartäre Formationen unterschieden (Creutzberg und Papastamatiou 1966; Jacobshagen 1986).

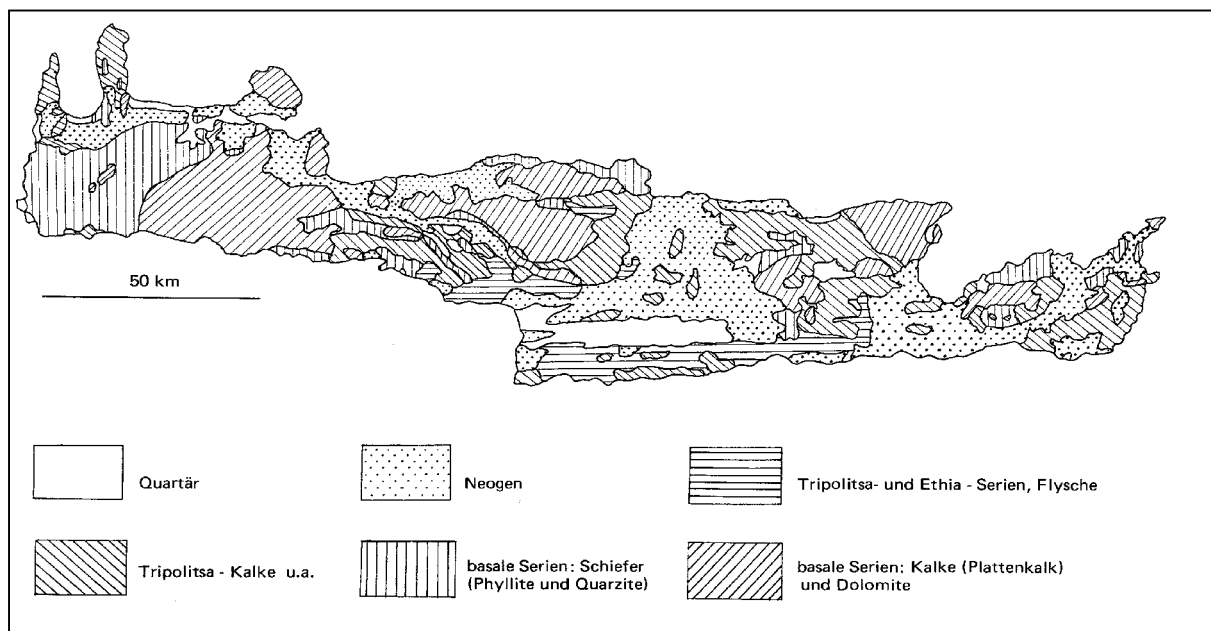


Abbildung 4.5: Übersicht zur Geologie Kretas (Creutzberg 1966, verändert)

Präneogene Einheiten lassen sich in die paläozoischen, basalen Serien und die jüngeren Oberflächenformationen einteilen. Erstere umfassen unter anderem die Plattenkalke und Dolomite des zentralen Psiloritismassivs, während jüngere basale Fazies aus phyllitischen und quarzitischen Schiefen im Untersuchungsgebiet nur eine untergeordnete Rolle spielen. Die Plattenkalke verwittern meist spaltig und können enorme Wandsysteme aufbauen, wie die Hochgebirgszüge und tief eingeschnittenen Schluchten der Insel eindrucksvoll verdeutlichen. Die Ursache ist in der geringen Neigung der grobkristallinen und metamorphisierten Plattenkalke zur Verkarstung und entsprechender Anfälligkeit zur Fluvialerosion zu sehen (Egli 1993).

Als Oberflächenformationen gelten die deckenden Tripolitsa- und Ethiakalke. Massiv geschichteter Tripolitsakalk bildet große Teile des östlichen Psiloritis und den zentralen Bereich des südlichen Asterousiagebirges. Er neigt zu starken Verkarstungserscheinungen und bildet scharfkantige Formationen mit sämtlichen Ausprägungen des Karstformenschatzes, insbesondere Dolinen und Poljen. Die Poljen von Omalos, Nida und Lassithi stellen die bekanntesten Einbruchsformen innerhalb der Tripolitsakalke dar. Häufig wurden die obersten Schichten dieser Kalkdeckschichten zu Flysch aus Mergeln, schiefrigen Tonen und Kalk umgewandelt. Aufgrund seiner geringen Härte und mehr oder minder deutlich eingeschalteter Tonlagen verwittert dieser plattig bis bröckelig. Flysch findet sich im gesamten Asterousiagebirge, aber auch lokal auf Restschollen innerhalb der jüngeren Schichten des Neogen. Eine Reihe weidewirtschaftlich genutzter Standorte des Untersuchungsgebietes befindet sich innerhalb der Flyschareale der Insel. Die flyschoiden Ablagerungen heben sich aufgrund der mit ihnen assoziierten, gerundeten Landschaftsformen meist deutlich vom kantigen Bild der basalen und der Tripolitsakalke ab (Egli 1993).

Abweichend von den Flysch- und Kalkgebieten des restlichen Asterousiagebirges, sind im weiter westlich gelegenen Teil dieses Höhenzuges teilweise stark metamorphisierte Gneise oder vereinzelt auch Ophiolite eingeschaltet (Creutzburg und Papastamatiou 1969). Flächenbezogen spielen sie zwar nur eine untergeordnete Rolle, aber vor allem auf Ophiolit bilden sich deutlich andere Böden, welche eine sich ebenso eindeutig vom restlichen Gebiet abhebende Flora nach sich ziehen (vgl. 4.1.4 und 4.1.5).

Die neogenen Ablagerungen Zentralkretas entstanden in der Zeit von Miozän bis Pliozän und bestehen aus heterogenen, marinen oder limnischen Sedimenten mit wechselnden Anteilen von Tonen, Mergeln und Sandsteinen, wobei die mergeligen Ausprägungen überwiegen. Fast alle Tieflagen und die den Gebirgen vorgelagerten Gebiete der Insel sind mit neogenen Sedimenten bedeckt oder weisen zumindest lokale Vorkommen auf. Beispielsweise bauen diese nahezu die gesamte Region südlich Iraklions, zwischen Psiloritis, Dikti und der Messara auf. Die aus neogenen Ablagerungen hervorgegangenen Mergel und Kalke können aufgrund ihrer geringen Härte keine allzu hohen Skulpturformen erzeugen. Die lokale Ausprägung des Reliefs hängt somit ganz wesentlich von der Vegetationsbedeckung ab, da freigelegte, mergelige Substrate zu erhöhter Erodibilität neigen (Rackham und Moody 1996).

Quartäre Ablagerungen konzentrieren sich in den Tiefebenen und entlang der Küsten. Lokal finden sich quartäre Sedimente auch als Dolinen- und Poljenfüllungen in den Gebirgen. Die alluvialen Bodenbildungen der Messara stellen die großflächigsten, quartären Sedimente auf Kreta dar (Bonfont 1972).

### 4.1.3 Hydrologie

Als Resultierende aus Geologie, Geomorphologie und klimatischen Verhältnissen bilden die hydrologischen Randbedingungen Zentralkretas einen wichtigen Aspekt zur Bewertung des Arbeitsgebietes. Das potentielle Wasserangebot der Region wird in erster Linie von der zeitlichen und räumlichen Verteilung des Niederschlags bestimmt, dessen Variabilität schon in Kapitel 4.1.1 näher erläutert wurde.

Als Folge des minimierten Niederschlagsaufkommens in der trockenen Sommerzeit sind fast alle Flüsse Kretas perennierend und die wenigen ganzjährig wasserführenden weisen eine kurze Laufstrecke auf. Dementsprechend spielen stehende Binnengewässer auf Kreta keine bedeutende Rolle und Lake Kournas ist der einzige erwähnenswerte Süßwassersee der Insel. Variierend auf das saisonale Wasserangebot wirken die als Schnee zwischengespeicherten Niederschlagsvorräte der Hochgebirgszüge in Kreta. Insbesondere in geschützten Lagen der Lefka Ori, des Psiloritis und der Dikti Ori finden sich Schneereste bis im Sommer (Abbildung 4.6). Damit geht ein verzögertes Abflussregime einher, das zumindest entlang der Wasserleitbahnen oder an korrespondierenden Quellhorizonten eine ausreichende Wasserversorgung bis Mitte des Sommers mit sich bringt (Rackham und Moody 1996).



*Abbildung 4.6: Schneebedeckter Höhenzug des Psiloritis (Mai 1997)*

Die Menge des tatsächlich in der Pedosphäre für Flora und Fauna zur Verfügung stehenden Wassers hängt darüber hinaus wesentlich vom geologischen Untergrund ab, der je nach Wasserführung und Wassergängigkeit die lokale Verteilung erheblich beeinflussen kann. Insbesondere die weit verbreiteten Kalke des Psiloritis zeugen mit ihrer ausgedehnten Karstmorphologie von einer teilweise sehr hohen Versickerungsrate. Von Stauwasser in Poljen und Dolinen abgesehen, steht Oberflächenwasser in solchen Gebieten nur begrenzt zur Verfügung. Andererseits speisen Karstquellen dort ergiebige Wasserläufe wo wasserstauende Schichten zum Austritt von Karstwasser führt oder unterirdische Karststrukturen an die Erdoberfläche münden (Knithakis 1990; Egli 1993).



Im zentralen Süden der Insel und den ackerbaulich genutzten Poljen spielen auch die Grundwasservorräte eine bedeutende Rolle. In der Messara stehen beispielsweise kurz unter der Erdoberfläche Süßwasserreserven an, die über Brunnen für Bewässerungswirtschaft, private Haushalte und die Versorgung der touristischen Infrastruktur nutzbar gemacht werden. Ähnliche Bedeutung hat die Grundwasserabschöpfung auch in einigen Poljen, wo auf Basis mit Pumpen geförderter Grundwasservorräte intensive Landwirtschaft betrieben wird (D'Assiras 1990; Grove et al. 1993).

#### 4.1.4 Böden

Die hier entwickelte Darstellung der Böden Kretas soll vor allem den Zusammenhang zur lithologischen Situation und damit die spektral bedeutsamen Bodentypen des Untersuchungsgebietes erläutern. Zu den Böden der Insel existieren nur wenige erschöpfende Arbeiten, unter denen die detaillierteste von Nevros und Zvorykin (1939) stammt, während Übersichten aus Egli (1993) und Hager (1985) entnommen werden können<sup>4</sup>.

Die Böden im Mittel- und Hochgebirge Zentralkretas lassen sich entsprechend der geologischen und morphologischen Gegebenheiten des Arbeitsgebietes in wenige, deutlich zonierte Teilgebiete aufgliedern, die entsprechend des meist karbonathaltigen Ausgangsgesteins überwiegend als basenreich einzustufen sind. Der Gebirgsstock des Psiloritis besteht flächendeckend aus verschiedenen Kalksteinvarietäten (vgl. 4.1.2). Damit verbunden ist die Ausbildung von Luvisolen in flacheren Bereichen und Karstdepressionen, aber auch lokal in den Mikrobiotopen einzelner Standorte, falls ausreichende Vegetationsbedeckung eine kontinuierliche und geschützte Bodenentwicklung zulässt. Die zahlreichen Hang- und Steillagen sind jedoch überwiegend durch skelettreiche Böden gekennzeichnet, bis hin zu lithic Leptosols (Nevros und Zvorykin 1939; Greuter 1975; Egli 1993; Rackham und Moody 1996).

Ähnliche Verhältnisse finden sich auf den Südhängen im mittleren Abschnitt der Asterousiaberge. Auf massiven Kalken finden sich rötliche Böden, die in den meisten Fällen jedoch nur eine geringe Profilmächtigkeit aufweisen und bestenfalls als rendzic Leptosol eingestuft werden können. Der überwiegende Teil Asterousias wird allerdings von mehr oder weniger stark metamorphisiertem Flysch eingenommen. Stärker chemisch verwitterte Böden treten in diesen Gebieten kaum auf, so dass das bröckelig zerfallende Ausgangsmaterial als lediglich in Korngröße und Gefüge verändertes Produkt dem geologischen Substrat aufliegt.

---

<sup>4</sup> Im Folgenden orientieren sich sämtliche Bodenbeschreibungen zur besseren Vergleichbarkeit an den Vorgaben der FAO Bodentaxonomie. Einige etablierte Bezeichnungen anderer Klassifikationsschemata fallen daher in Übergangsbereiche der auf diagnostische Eigenschaften der Bodenhorizonte bezogenen FAO-Einteilung. Beispielsweise werden „Terra rossa“ und „Terra fusca“ in Abhängigkeit von Eisengehalt und Lessivierungsgrad den Klassen „chromic/rhodo-chromic Luvisol/Cambisol“ zugeordnet (Kuntze et al. 1994). Der Einfachheit halber wird nachfolgend die übergreifende Bezeichnung „Luvisol“ für beide Bodentypen angenommen.

Fehlende Kohäsion und grobe Textur sind deutliche Merkmale des überwiegenden Teils dieser eutric Regosols. Diese Böden sind durchweg als nährstoffarm einzustufen, verbunden mit einer meist artenarmen, phryganischen Vegetation (Brouwer et al. 1998; Tsiourlis und Kasapidis 1997, 1999).

Als dritte pedologische Einheit Asterousias können die südexponierten Hänge des westlichen Gebirgsteils eingestuft werden. Auf Gneis haben sich hier eher basenarme Böden entwickelt, die überwiegend als Leptosol ausgeprägt sind. Wenn auch nur lokal vorkommend, sollten die innerhalb dieser Region auftretenden Ophiolitdome erwähnt werden, da die dort ausgebildeten Substrate nährstoffreicher und mächtiger sind als in ihrer Umgebung und entsprechend eine vielfältigere Flora und Fauna aufweisen. Jenseits davon schließt sich bis zum südwestlichen Ausläufer Asterousias eine Zone mergeliger Böden auf neogenem Kalkstein an. Die geringere Härte des bodenbildenden Materials führt zu einem abgeflachten Relief mit deutlichen Taleinschnitten, so dass sich auf den weniger ondulierten Geländeeinheiten die Böden meist als rendzic Leptosol entwickelt haben (Brouwer et al. 1998).

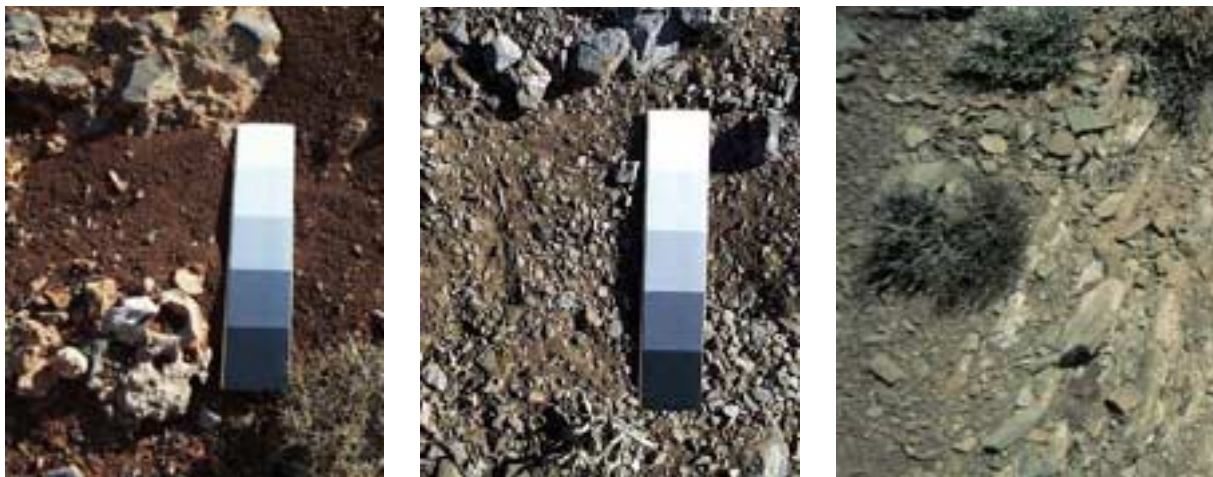


Abbildung 4.7: Verbreitete Böden Zentralkretas; links Luvisol auf Kalk (Psiloritis), Mitte Leptosol auf Kalk (Psiloritis), rechts Leptosol auf Flysch (Asterousia)

Diese Böden sind mit jenen vergleichbar, die im Neogen südlich Iraklions anzutreffen sind. Die auf tertiären bis pleistozänen Mergeln aufliegenden Substrate sind häufig allerdings weniger kompakt und insbesondere auf terrassierten Hängen stark erosionsgefährdet. Die hier gebildeten Regosols sind entsprechend dem jeweils korrespondierenden geologischen Untergrund als sandige bis tonige Böden ausgeprägt. Flächen- wie Rillenerosion sind im Gelände vor allem in solchen Gebieten zu beobachten, in denen – häufig mit schwerem Gerät – Terrassierungen durchgeführt wurden. In der Regel gehen damit Bodenverdichtung, Gefügezerstörung und Wasserhaushaltsveränderungen einher.

Die südlich anschließende Ebene der Messara hebt sich pedologisch deutlich vom Neogen und den südlich anschließenden Asterousiabergen ab. Abgesehen von wenigen Regosols auf

eingeschalteten Mergeln, finden sich hier die besten und agrarisch am intensivsten genutzten Böden des gesamten Untersuchungsraumes. Meist handelt es sich um chromic oder rhodochromic Luvisols von bis zu einigen Metern Mächtigkeit in flachen Lagen (Bonnet 1972; Greuter 1975).

Wichtige Kennzahlen, insbesondere in Hinblick auf die potentielle Vegetation, sind die Nährstoff-, Basen- und Wasserversorgung der Böden. Da die zu diesem Thema existierende Literatur nur bestimmte Raumeinheiten oder Bodentypen behandelt (Nevros und Zvorykin 1939; Hager 1985; Egli 1993), wurden im Rahmen von DeMon-II einige Untersuchungen zu den im Psiloritis und in Asterousia hauptsächlich auftretenden Böden durchgeführt (De Jong et al. 1997; Brouwer 1998).

Generell weisen alle untersuchten Böden ihren maximalen Wassergehalt im Zeitraum von Februar bis März auf, um je nach Lage und Gründigkeit zwischen Mai und Juni recht schnell auszutrocknen. Vor allem Bodentiefe und Textur bestimmen die Geschwindigkeit dieses Austrocknungsvorgangs und somit die Dauer der Wachstumsperiode. Der größte Wasserstress tritt auf den strahlungsexponierten Südhängen der Gebirge auf. Weiterhin weisen die Rohböden auf Flysch mit ihren höheren Anteilen an sandiger Bodenfraktion eine geringere nutzbare Feldkapazität als die aus Kalkstein hervorgehenden Böden auf und trocknen daher am schnellsten aus (Brouwer 1998).

Auch aufgrund des pH-Wertes, der Kationenaustauschkapazität und des Anteils an organischem Material sind die Böden auf Kalkstein gegenüber jenen auf Flysch in der Regel im Vorteil. Allerdings führen Variationen in Abhängigkeit von der jeweils vorherrschenden Pflanzengesellschaft und der Topographie zu entsprechenden Abweichungen hinsichtlich der ansonsten von der Lithologie geprägten Bodeneigenschaften (De Jong et al. 1997).

#### 4.1.5 Vegetation

Der Vegetation des mediterranen Raumes kommt hinsichtlich der Beurteilung von Degradationserscheinungen eine besondere Bedeutung zu. Der Wandel sozio-ökonomischer wie auch natürlicher Rahmenbedingungen wird häufig zuerst an den damit einhergehenden Veränderungen der biotischen Umwelt offensichtlich. Die Erfassung dieses Wandels auf Kreta ist ein umso wichtigeres Anliegen, da ungefähr ein Zehntel der dort existierenden Spezies endemische Arten sind (Abbildung 4.8) (De Montmollin 1991; Bergmeier 1998).

Die Vegetation der ackerbaulich genutzten oder als Kulturen angelegten Flächen ermöglicht weiterführende Aussagen über den Strukturwandel der Landschaft Kretas. Auf Grund der wesentlich stärker sozio-ökonomischen Determinierung der Landwirtschaft soll der Schwerpunkt damit zusammenhängender Ausführungen allerdings in Kapitel 4.2 liegen. Dennoch müssen anthropogen induzierte Veränderungen Teil der hier vorgenommenen

Betrachtung sein, da sich der Wandel der Flora in den Weidegebieten von Psiloritis und Asterousia nicht vom Einfluss des wirtschaftenden Menschen trennen lässt.

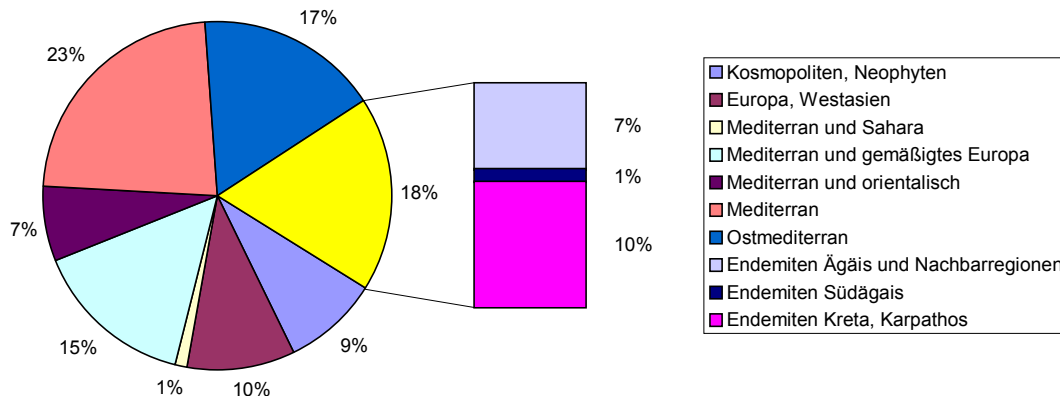


Abbildung 4.8: Anteil endemischer Arten an der Flora Kretas (Jahn und Schönfelder 1995, verändert)

Zur Vegetation Kretas existieren zahlreiche Untersuchungen mit verschiedenen Schwerpunkten. Übersichten können Greuter (1975) oder Rackham und Moody (1996) entnommen werden, die zugleich auch eine Zusammenschau der wichtigsten ökologisch wirksamen Faktoren für die Vegetation präsentieren. Ergänzend dazu bieten Jahn und Schönfelder (1995) eine ausführliche Grundlage zur Einordnung einzelner Spezies hinsichtlich ihrer Verbreitung und ihrer Bedeutung als Indikatorpflanzen. Darüber hinaus existieren Detailstudien zu den Dornpolsterfluren Kretas (Hager 1985), zu den Flaumeichenwäldern (Matthäs 1988) und vergleichende Vegetationsstudien, die den Inselcharakter Kretas in den Mittelpunkt stellen (Mayer 1995). Tsiourlis et al. (1998a) liefern mit Studien zur Auswirkung der Überweidung auf phryganische Systeme wichtige Aussagen zur Untersuchung der Vegetationsdynamik der hier betrachteten Weidegebiete.

In Zentralkreta ist eine Zonierung der Vegetation entlang von Höhen- und damit Klimagradienten nachvollziehbar, deren lithologisch, expositionsbedingt und anthropogen verursachte Variation später noch ausführlich diskutiert wird (vgl. Kap. 11). Drei wesentliche Sukzessionsstadien und deren Übergangszustände lassen sich ausgliedern: Wald, Matorral und Phrygana<sup>5</sup>, wobei letztere höhenabhängig als Oro-Phrygana (Dornpolsterfluren) ausgeprägt sein kann, die im Zusammenhang mit der Beweidungsproblematik eine nur untergeordnete Rolle spielt. Die größte Ausdehnung erreicht heute die Phrygana, die in

<sup>5</sup> Im Folgenden werden die für Griechenland gebräuchlichen Begriffe „Matorral“ und „Phrygana“ verwendet, die nicht als unmittelbar synonym mit „Macchie“ und „Garigue“ aufzufassen sind. Vielmehr stellt der Matorral Kretas eine Mischform zwischen Macchie als ursprünglicher Hartlaubformation des westlichen Mittelmeerraumes und der Garigue dar, die am ehesten als „Pseudo-Macchie“ bezeichnet werden kann. Dies gilt um so mehr, als der häufig sub-montane Charakter der kretischen Macchie dadurch unterstrichen wird. Phrygana hingegen kann als Pendant zur west-mediterranen Garigue angesehen werden, die auf den trockenen Standorten Kretas aus überwiegend dorniger und stacheliger Buschvegetation besteht (Quézel 1981; Tomaselli 1981; Jahn und Schönfelder 1995; Strid et al. 1995; Tsiourlis et al. 1998b).

unterschiedlichen Vegetationsdichten und mit stark variabler Artenzahl nahezu ganz Asterousia und Teile des Psiloritis bedeckt. (Rackham und Moody 1996; Tsiourlis et al. 1998a, b).

Die unterschiedlichen Standorte lassen sich auf Kreta höhenabhängig in folgende Zonen einteilen (Jahn und Schönfelder 1995; Tsiourlis und Kasapidis 1997; Tsiourlis et al. 1998a, b):

- thermo-mediterrane Stufe (0 bis 300 m ü.NN): küstennahe Zone mit wärmeliebenden Arten, wie beispielsweise *Ceratonia siliqua*, *Pistacia lentiscus*, *Olea europaea* oder *Juniperus phoenicea*;
- meso-mediterrane Stufe (200 bis 900 m ü.NN): typisch mediterrane Vegetation mit *Quercus coccifera*, *Quercus ilex*, *Calicotome villosa* und *Sarcopoterium spinosum*;
- supra-mediterrane Stufe (800 bis 1.500 m ü.NN): Wälder mit *Cupressus sempervirens*, *Acer sempervirens* (*Acer creticum*) und *Quercus coccifera*; in den Höhenlagen *Berberis cretica*;
- oro-mediterrane Stufe (1.300 bis 1.700 m ü.NN): auf Kreta schwach ausgeprägte Stufe unterhalb der Baumgrenze; viele Arten aus supra-mediterraner und alti-mediterraner Stufe;
- alti-mediterrane Stufe (1.500 bis 2.450 m ü.NN): subalpine Dornpolsterfluren oberhalb der Baumgrenze.

Dabei ist die Vegetation der Gebirge Zentralkretas stark abhängig von den klimatischen Gegebenheiten in Winter und Frühjahr. Es ist im Wesentlichen der Niederschlag, der ab dem Spätherbst an Bedeutung gewinnt und die phänologische Entwicklung der Vegetation bestimmt. Je nach Lage der betrachteten Ökotope können auch die als Schnee im Gebirge zwischengespeicherten Wasservorräte ab Mitte des Frühjahrs eine wichtige Rolle bei der Wasserversorgung spielen. Insbesondere Therophyten und Geophyten nutzen die feuchte Jahreszeit zu Wachstum und Ausbreitung und lassen die Landschaft in der Regel bis ins späte Frühjahr hinein in einem völlig anderen Bild erscheinen, als während der heißen und trockenen Sommer- und Herbstmonate (Greuter 1975; Jahn und Schönfelder 1995).

Eine feste Terminierung einzelner phänologischer Phasen im Jahresverlauf ist allerdings schwierig. Während die Austriebzeiten relativ gut vorhersagbar sind, trifft dies für das Absterben der Vegetation nicht zu. Die Niederschlagsverteilung und vor allem das Ende der frühjährlichen Niederschläge schwanken von Jahr zu Jahr ganz erheblich, so dass sich beispielsweise das Absterben der photosynthetisch aktiven Vegetation bei Therophyten und Geophyten um mehrere Wochen verschieben kann. Dieser Punkt soll bei der Auswahl und Interpretation der Satellitendaten noch eine wichtige Rolle spielen (vgl. Kap. 5).

Neben der Vegetationsverteilung und ihrer Abhängigkeit von natur- und kulturräumlichen Faktoren, sind die Entwicklung der Vegetation und das Auftreten verschiedener Sukzessionsstadien wichtige Faktoren zur Bewertung von Veränderungen in den Weidegebieten Kretas. Ob und inwieweit eine andauernde und flächenhafte Degradation der

Phrygana bis hin zum unbedeckten Boden verlaufen kann, ist allerdings nicht gesichert. In der Regel findet innerhalb weniger Jahre eine Rekolonisation unbedeckter Flächen durch Geophyten und Arten der Phrygana statt (Strid et al. 1995; Tsiourlis 1998).

Zugleich muss in diesem Zusammenhang vor einer allzu unbedarften Interpretation der Literatur gewarnt werden, da beispielsweise die Übersetzung des Begriffes „Wald“ aus historischen Quellen häufig eine dichte Bewaldung Kretas suggeriert. Auch heute werden jedoch unter „Wald“ vor allem im südostmediterranen Raum häufig Bestände verstanden, die lediglich durch den Bewuchs mit baumartigen Spezies charakterisiert sind (Abbildung 4.9). Liegen die meisten Individuen eines Bestandes in ihrer Wuchshöhe unter fünf Meter, so zählt dieser in Griechenland zum baumartigen Matorral, bei größeren durchschnittlichen Wuchshöhen zum Wald. Damit wird keine Aussage hinsichtlich der für mitteleuropäische Verhältnisse entscheidenden Bestandsdichte impliziert (Tomaselli 1981; Rackham und Moody 1996; Egli 1998).



*Abbildung 4.9: Kermeseichenwald von Rouvas im Psiloritis*

Weiterhin scheint auch schon vor der Ankunft des Menschen auf Kreta die Vegetation einem erhöhten Weidedruck ausgesetzt gewesen zu sein, die eine Variation potentieller Waldstandorte nach sich gezogen haben dürfte. Fossilienfunde aus den Gebirgsregionen Kretas lassen auf eine ausgeprägte Population an Herbivoren schließen, während eine entgegengewirkende Population größerer Fleischfresser nicht rekonstruiert werden konnte. Eine weitere Verbreitung von Wäldern gegenüber heute wird für das Neolithikum aufgrund von Pollenanalysen angenommen. So bietet sich ein Szenario von ursprünglich stark beweideter Vegetation durch wildlebende Herbivore vor Ankunft der ersten Menschen auf Kreta und eine zunehmende Verbreitung von Wäldern nach Aussterben der natürlichen Großfauna (vgl. 4.1.6). Das heutige Niveau der Vegetationsbedeckung bei ähnlichen Pflanzengesellschaften wurde vielleicht schon nach dem Ende der Bronzezeit mit dem Einsetzen arideren Klimas und zunehmender anthropogener Einflussnahme erreicht (vgl. 4.2.1) (Bottema 1980; Rackham 1990; Grove et al. 1993; Lyrantzis und Papanastasis 1995).

Im Hinblick auf die rezente Entwicklung wird davon ausgegangen, dass in den meisten der immergrünen Hartlaubvegetationsbeständen in den Gebirgen Kretas bei derzeitiger Nutzung kaum noch eine Bestandsverjüngung stattfindet. Auch zeugen die an vielen Standorten des Psiloritis und Asterousias als kugelige Strauchform auftretenden Olivenbäume (*Olea europaea sylvestris*) und Kermeseichen (*Quercus coccifera*) von starker Beweidung, im Fall des überwiegenden oder ausschließlichen Auftretens als Krüppelform auch von deutlicher Überweidung. Schutzmechanismen zur Anpassung an permanenten Weidedruck, wie die Ausbildung von Dornen und photosynthetisch aktiver Organe im Innern der Büsche, verhindern allerdings den Verbiss bis hin zum Absterben. So zeigen auch eine Reihe von Untersuchungen, dass bei nachlassender Beweidung eine schnelle Regeneration der Vegetation erfolgen kann (Koutsidou und Magaris 1990; Menjli 1995; Strid et al. 1995; Tsiourlis 1998).



Abbildung 4.10:  
*Sarcopoterium spinosum*

Eine ökologische Nische finden insbesondere solche Spezies, die eine deutliche Resistenz gegen häufig wiederkehrende Fraßereignisse entwickeln, sei es in Form schützender Dornen, giftiger Sekrete oder nicht schmackhafter Pflanzenteile. Zu den Vertretern dieser Spezialisten zählen beispielsweise *Calicotome villosa* oder *Sarcopoterium spinosum*, die häufig dominierende Spezies in den Bergen von Asterousia (Abbildung 4.10). Demgegenüber werden bevorzugte Futterpflanzen bei zu starker Beweidung zurückgedrängt. Nicht ohne Grund sind es häufig die Hirten selbst, die in den Weidegebieten durch Brandlegung für die Öffnung jener Flächen sorgen, die für die Beweidung unproduktiv sind.

Vieldiskutiert ist in diesem Zusammenhang die Frage, inwiefern der eingetretene sozio-ökonomische Wandel rezente Veränderungen in der Entwicklung der Flora Kretas nach sich zieht, welche in ihrer räumlichen Dynamik und Ausprägung sehr divers sein können. Setzt sich der im letzten Jahrhundert einsetzende Trend zu dichter Vegetation bis hin zum Aufkommen neuer Waldstandorte in einigen Regionen Kretas fort (Rackham 1990), überwiegt die Vegetationsdegradation (Papanastasis et al. 1990) oder laufen diese Entwicklungen heute räumlich und zeitlich nebeneinander ab?

#### 4.1.6 Fauna

Die Tierwelt spielt im Kontext des Monitoring von Degradationserscheinungen eine Doppelrolle – als Indikator für Veränderungen der speziestypischen Habitate, wie auch als einflussnehmender Faktor auf die Umwelt. Letzteres geschieht auf Kreta nahezu ausschließlich durch die frei umherziehenden, domestizierten Ziegen und Schafe und soll daher Thema innerhalb der Diskussion zum sozio-ökonomischen Kontext sein (vgl. 4.2). Die Darstellung der Fauna beschränkt sich hier auf die Säugetiere und Vögel der Region.

Die ursprüngliche Tierwelt Kretas war reich an verschiedenen Pflanzenfressern, wie Flusspferden, Elefanten, Rehwild und einer Reihe von Nagetieren. Der größte anhand von Fossilien nachweisbare Fleischfresser der Insel war ein dachsartiges Tier. Im Fehlen großer Carnivore sehen einige Autoren die Ursache für einen auch in historischer Zeit eher lückenhaften Pflanzenbestand (Kuss 1965; Rackham 1990; Grove 1993; Bergmeier 1996).

Die Agrimi (*Capra aegagrus* Erxleben spp. *cretica* Schinz), wahrscheinlich verwilderte Ziegen neolithischer Siedler, sind heute die größten, wildlebenden Tiere der Insel. Allerdings gilt die Agrimi aufgrund der starken Bejagung bis in die 50er Jahre des letzten Jahrhunderts im Psiloritis bereits als ausgestorben. Andere wildlebende, herbivore Säugetiere sind verschiedene Nager, wie das Kaninchen und die endemische Kretastachelmaus (*Acomys minous*). Ihre natürlichen Feinde sind einige Marderartige, wie beispielsweise der Kretische Steinmarder (*Martes foina bunitus*) und das Kretische Mauswiesel (*Mustela nivalis galinthias*). Inwiefern ein Restbestand an Wildkatzen (*Felis sylvestris*) in den Gebirgen Kretas überlebt hat, ist noch nicht mit Sicherheit belegt. (Grove et al. 1993; Lyrintzis und Papanastasis 1995).

Eine wichtige Rolle spielen die ökosystemaren Veränderungen für die Habitate einer Reihe von Vogelarten, die entweder auf Kreta heimisch sind oder aber die Insel als Winter- bzw. Zwischenquartier auf ihren Zugwegen nutzen. Zu den auffälligsten Vertretern zählen große Greifvögel, wie der Lämmer- oder Bartgeier (*Gypaetus barbatus*) und der Gänsegeier (*Gyps fulvus*). Weiterhin sind eine Vielzahl auf Kreta brütender Lerchen-, Finken-, Drossel- und Grasmückenarten verbreitet, unter denen die Samtkopfgrasmücke (*Sylvia melanocephala*), die Haubenlerche (*Galerida cristata*), der Buchfink (*Fringilla coelebs*) und der Mittelmeersteinschmätzer (*Oenanthe hispanica*) wichtige Leitarten darstellen (Blondel 1981; Grove 1993; Dretakis und Tsiourlis 1998).

Dretakis und Tsiourlis (1998) haben einen Zusammenhang zwischen der Bruthäufigkeit einiger Singvögel und Vegetationsparametern in verschiedenen Habitaten der Asterousiaberger Südkretas hergestellt. Bruthäufigkeit und Diversität der brütenden Spezies stehen demnach in Zusammenhang mit Vegetationsdichte und -höhe sowie der Anzahl der Arten innerhalb phryganischer Bestände. Unter dem Aspekt der intensiven Beweidung dieser Gebiete und damit einhergehenden Veränderungen der genannten Vegetationsparameter, kann von einem



deutlichen Einfluss der Weidewirtschaft auf die Habitate der dort heimischen und brütenden Vogelarten ausgegangen werden.

## 4.2 Sozio-ökonomische und politische Rahmenbedingungen

Die Entwicklung des seit dem frühen Neolithikum vom Menschen besiedelten Kreta ist geprägt von der permanenten, aber unterschiedlich starken Einflussnahme der Inselbewohner auf ihre Umwelt. Die wichtigsten Epochen der kretischen Menschheitsgeschichte umfassen dabei die Kultur der Minoer (ab ca. 3000 v.Chr.), die Zeit als römische Provinz (ab 67 v.Chr.), die Herrschaft der Araber (ab 825 n.Chr.), Venedigs (ab 1204) und der Osmanen (ab 1669)<sup>6</sup> und schließlich, seit 1913, die Zugehörigkeit zu Griechenland. Auf die rezente Entwicklung Kretas hatte insbesondere die Vollmitgliedschaft Griechenlands in der Europäischen Union seit 1981 einen entscheidenden Einfluss und resultierte für die Insel, der südlichsten Provinz des Landes, in einer Vielzahl weitreichender Veränderungen (Lyrintzis 1996; Rackham und Moody 1996).

Die sozio-ökonomische Entwicklung, die natürlichen Rahmenbedingungen und die aus deren Kontext hervorgehenden ökologischen Konsequenzen machen Kreta zu einem geeigneten Standort für die Untersuchung landwirtschaftlich geprägter Veränderungen und deren Auswirkungen auf die Umwelt. Es stellt sich somit zunächst die Frage: Welche wirtschaftlichen Entwicklungen liegen den derzeitigen Verhältnissen zugrunde und wie lassen sich Veränderungen vor dem Hintergrund dieser Entwicklungen einordnen?

### 4.2.1 Bevölkerungsentwicklung und Ökonomie Kretas

Die Erläuterung sozio-ökonomischer Zusammenhänge beschränkt sich hier auf für das Verständnis zur Landschaftsentwicklung Kretas notwendige Elemente der Bevölkerungsentwicklung und damit einhergehender wirtschaftlicher Gegebenheiten, insbesondere des primären Sektors. Die Darstellungen beziehen sich für die Frühzeit der Besiedlung auf indirekte Hinweise, wie beispielsweise Pollenanalysen, Bauholzreste oder die Interpretation von Zeichnungen; für spätere Zeiträume im Wesentlichen auf Statistiken der EU, Griechenlands oder der Regionalverwaltungen Kretas sowie der Auswertung solcher Quellen in der Literatur (Lyrintzis und Papanastasis 1995; Lyrintzis 1996; Rackham und Moody 1996; NSSG 1991, 1996). Dementsprechend liegen statistische Daten für verschiedene Verwaltungseinheiten Kretas vor (Fröhlich 1987): Die höchste Ebene stellt der Nomos dar, vergleichbar dem deutschen Regierungsbezirk, der sich wiederum in Eparchien (Kreise)

---

<sup>6</sup> Die kurze Zeit der ägyptischen Herrschaft von 1830 bis 1841 spielt in diesem Kontext keine bedeutende Rolle und wird in den folgenden Betrachtungen vernachlässigt.

gliedert. Die unterste Ebene bilden die Dimoi und Koinotis, Städte und Gemeinden, die insbesondere für die Beweidung in den Gebirgsregionen die zentrale Rolle spielen. Die hier behandelten Arbeitsgebiete liegen vollständig in den Nomoi Rethymnon und Iraklion.

Die bekannte Entwicklungsgeschichte Kretas als anthropogener Siedlungsraum reicht zurück bis zur vor-minoischen Zeit, als erste Siedler bescheidene Anbau- und Weidewirtschaft betrieben. Eine dramatische Steigerung der Bevölkerungszahl und der agrarischen Produktivität erfuhr die Insel erst mit der minoischen Hochkultur. Einhergehend mit einsetzender Urbanisierung stieg die Bevölkerungszahl auf schätzungsweise 260.000 Einwohner, verbunden mit einer entsprechend entwickelten Weidewirtschaft (Rackham 1990; Lyrintzis 1996).

Dieses relativ hohe Bevölkerungsniveau hielt sich scheinbar auch während der römischen Herrschaftszeit auf Kreta, um mit Beginn der arabischen Besetzung und bis in die venezianische Periode hinein kontinuierlich abzunehmen. Nach einer Zwischenblüte brachte die ottomanische Herrschaft ein abruptes Ende der aufstrebenden Entwicklung. Die Entvölkerung der Insel führte zu einer Gesamteinwohnerzahl von nur noch rund 80.000 Menschen, davon ca. 40 % türkischer Abstammung. Zu- und Abwanderungswellen der folgenden Jahrhunderte lassen keine eindeutige Entwicklungstendenz erkennen und erst mit der Zugehörigkeit zu Griechenland Anfang des letzten Jahrhunderts beginnt der deutliche Anstieg der Bevölkerungszahlen, unter anderem beschleunigt durch die Vertreibung und Umsiedlung der Griechen aus Kleinasien (Lyrintzis 1996; Rackham und Moody 1996).

Verlässliche Einwohnerzahlen existieren erst seit den nach dem Zweiten Weltkrieg eingeführten 10-jährigen Volkszählungen. Sie belegen ein Bevölkerungswachstum zumindest bis Anfang der 90er Jahre, mit einer Einwohnerzahl von knapp 570.000 in 1991. Gleichzeitig geht der Trend in den ländlichen und abgelegenen Regionen der Gebirge in die andere Richtung, so dass sich beispielsweise die Bevölkerung in den zum Psiloritisgebirge zählenden Gemeinden vor allem zwischen dem Zweiten Weltkrieg und den 70er Jahren um knapp 10 % verringert hat (Lyrintzis und Papanastasis 1995; Rackham und Moody 1996; Lyrintzis et al. 1998).

Über die mit der Bevölkerungsentwicklung verbundenen wirtschaftlichen Entwicklungsphasen der Insel sind die Meinungen geteilt. Sicher ist, dass seit den Minoern die Weidewirtschaft und die damit verbundenen wirtschaftlichen und landschaftsstrukturierenden Vorgänge eine große Rolle gespielt haben. Über die zur Subsistenz notwendigen agrarischen Güter hinaus wurde wahrscheinlich auch seit frühester Zeit lokal Olivenanbau für den Export von Öl betrieben. Zitrusfrüchte, Wein und Getreide haben darüber hinaus in wechselnden Quantitäten eine Rolle für den Handel gespielt, obwohl zuverlässige Angaben über Anbauflächen oder Exportzahlen fehlen (Detoraki 1990; Vasilakis 1994; Rackham und Moody 1996).

Seit Anfang der 50er Jahre existieren genauere Angaben zur Entwicklung Griechenlands und Kretas, so dass verlässliche Aussagen über die wirtschaftliche Entfaltung der Insel möglich

werden. In Kombination mit dem oben skizzierten Bevölkerungswachstum spielen vor allem zwei Tendenzen bei der Betrachtung der Landschaftsentwicklung eine entscheidende Rolle: Die zunehmende Bedeutung des tertiären Sektors mit dem Schwerpunkt auf Tourismus und die aufkommende Intensivierung der Landwirtschaft. Die Konsequenzen des Tourismus sind für die betrachteten Gebiete überwiegend indirekt, da sich der auf Kreta entwickelte Bade- und Kulturtourismus auf die Küstenabschnitte und auf die Kulturstätten beschränkt<sup>7</sup>. Allerdings führt die Massierung der Touristenströme zu einem deutlich erhöhten Bedarf an Verbrauchsgütern. Neben den stark zugenommenen Importen vom Festland wirkt dies auch als Motor für die kretische Agrarproduktion. Erzeugnisse wie beispielsweise Schaf- und Ziegenfleisch, Milchprodukte, Wein oder Raki werden verstärkt nachgefragt (Grove et al. 1993, 1999; Ispikoudis et al. 1993).

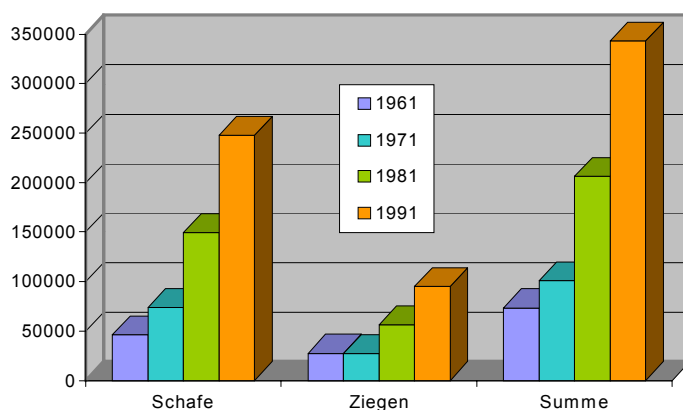


Abbildung 4.11: Bestockung mit Schafen und Ziegen im Psiloritis (nach Lyrantzis et al. 1998; Zioganas et al. 1998)

Bezüglich des Landschaftswandels in den Gebirgsregionen muss die Entwicklung im Bereich der Weidewirtschaft als der determinierende Faktor herangezogen werden. Dauersiedlungen existieren nicht in den unwirtlichen Gebieten oberhalb von 800 m ü.NN und abgesehen von der unmittelbaren Umgebung der wenigen Ortschaften sind Acker- und Gartenanbau die Ausnahme. Allerdings findet eine fast flächendeckende Nutzung dieser Regionen durch weidewirtschaftliche Aktivitäten statt, wobei Schafe und Ziegen die Tierpopulation bilden. Innerhalb gegebener Grenzen, meist entsprechend den Gemarkungen der Koinotis, bewegen sich die Tiere frei, so dass im Wesentlichen das Futterangebot die räumliche Verteilung der Weideaktivitäten steuert. Die Entwicklung kann vergleichsweise gut anhand der Zahlen für die Weidewirtschaft im Psiloritis nachvollzogen werden, wie sie im 10-jährigen Rhythmus durch die statistische Landesaufnahme erfasst werden (Abbildung 4.11). Die Entwicklung dieser Zusammenhänge wird – wie im folgenden Kapitel beschrieben – seit Beitritt Griechenlands zur Europäischen Gemeinschaft jedoch deutlich durch die Politik Europas überprägt (Papanastasis et al. 1990; Grove et al. 1999).

<sup>7</sup> Darüber hinaus konzentrieren sich die meisten touristischen Aktivitäten auf die gut zugängliche Nordküste, an der sich die kulturhistorisch interessanten Hauptorte der Insel, Iraklion, Chania und Rethymnon, befinden.

#### 4.2.2 Die Rolle der EU

Im Jahre 1981 erfolgte die Vollmitgliedschaft Griechenlands zur EU. Die Lage an der Südperipherie Europas, räumlich isoliert vom Rest der Staatengemeinschaft, und die starke agrarische Prägung ließen Griechenland am unteren Ende der Entwicklungsskala der europäischen Staaten stehen. Daraus resultiert Griechenlands Rolle als „Nehmerland“ der EU, verbunden mit einem beträchtlichen Kapitalfluss nach Griechenland. Insbesondere die Struktur der europäischen Agrarlandschaft und die damit einhergehenden politischen Rahmenbedingungen nahmen fortan einen entscheidenden Einfluss auf die Entwicklung des Landes.

Für nahezu sämtliche landwirtschaftlichen Produkte – pflanzliche wie tierische – werden in der EU Subventionen ausgeschüttet, die entweder eine direkte Stützung des Produktverkaufspreises oder die Förderung der Anbau- oder Zuchtbedingungen bewirken sollen. Beides spielt für Griechenland und in besonderem Maße für Kreta eine entscheidende Rolle. Wie in allen agrarisch geprägten Räumen Europas ist die Anlehnung an die Förderstrukturen der EU besonders deutlich zu beobachten. In Zentralkreta betrifft diese Tatsache vor allem zwei agrarische Produktionszweige: die Weidewirtschaft und den Olivenanbau (Papanastasis und Kazaklis 1998; Zioganas 1998).

Letzterer nimmt beeindruckende Ausmaße in den Mergelgebieten des Neogens (vgl. Kap. 4.1) an und profitiert sowohl von den direkten Subventionen, vor allem für Olivenöl, aber auch von Maßnahmen zur Stützung der Infrastruktur, wie beispielsweise der finanziellen Förderung von Bewässerungsanlagen. In weiten Teilen des Neogens wurden ehemals mit Phrygana bestandene Hänge komplett von ihrer ursprünglichen Vegetationsdecke befreit und terrassiert (Grove et al. 1999). Die nutzbare Feldkapazität der Mergelböden liegt meist unterhalb der für die Olivenkulturen benötigten Grenzwerte, so dass zur Ertragssteigerung und -erhaltung Bewässerungsmaßnahmen notwendig werden. Oft geschieht dies durch eine Zuleitung für jeden einzelnen Baum. Entsprechend hat sich die Anzahl der Olivenbäume im Beobachtungszeitraum von 1972 bis 1996 für die Nomoi Iraklion und Rethymnon nahezu verdoppelt (Abbildung 4.12).

In den Gebirgsregionen von Asterousia und Psiloritis hingegen werden die ausgedehnten Phrygana- und Matorralbestände fast ausschließlich für die Weidewirtschaft genutzt (vgl. Kap. 4.2.1). Die Nutztiere, im Wesentlichen Schafe und Ziegen, unterliegen den Förderquoten der EU, so dass die Angebots- und Nachfragerregelung nicht mehr über den zu erzielenden unsubventionierten Marktpreis erfolgt. Der Marktpreis wird so massiv gestützt, dass auch marginale Ertragszahlen noch eine ansprechende Gewinnerwartung mit sich bringen und daher einen Anreiz zur Erhöhung der Besatzdichten darstellen (Papanastasis et al. 1990, 1993; Grove et al. 1993).

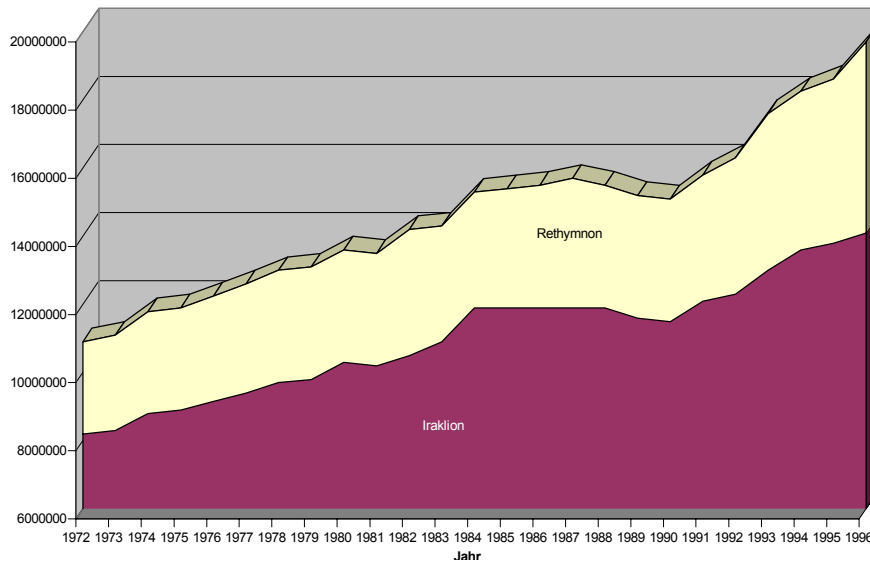


Abbildung 4.12:  
Anzahl der Oliven-  
bäume (*Olea euro-  
paea*) in den Nomoi  
Iraklion und Rethym-  
non (NSSG 1996)

Die Folgen dieser Marktveränderung sind offensichtlich: Trotz des hohen Flächenbedarfs pro Weidetier in großen Teilen der Weidegebiete – Papanastasis et al. (1990) beziffern langfristig haltbare Bestockungsraten in den Gebirgen Zentralkretas mit weniger als einem Schafäquivalent pro ha und Jahr – nimmt die Bestockungsdichte im Mittel der letzten Jahrzehnte kontinuierlich zu (Ziogas et al. 1998). Dieses andauernde Wachstum der Herden ist nur durch den Transport von Tieren, wie auch von zusätzlichem Futter in die Gebirgsregionen möglich (Grove et al. 1999). Auch diese Entwicklung wird durch eine weitere Fördermaßnahme der EU indirekt begünstigt: Der „Regional Development Fund and Cohesion Fund“ unterstützt den Ausbau der Infrastruktur in entlegenen Gebieten der EU, so auch den Straßenausbau in den Gebirgen Zentralkretas (Strid et al. 1995; Papanastasis und Kazaklis 1998). Der Straßenneubau und die Erweiterung ehemaliger Schotterpisten zu breit asphaltierten Anfahrtswegen in die Gebirgsregionen führen fast immer zu beschleunigter Erosion entlang der neuen Fahrbahnen (Abbildung 4.13).

Einschränkend muss allerdings hinzugefügt werden, dass die aus offiziellen Statistiken zu entnehmenden Zahlen für die Weidetierpopulationen nicht notwendigerweise exakt sein müssen, da letztendlich nur der Hirte vor Ort die genaue Größe seiner Herde kennt. Der Anreiz erhöhter EU-Förderung führt naturgemäß eher zu einer Über- als Unterschätzung der Bestandsdichten. So weisen daher auch die Statistiken der regionalen Behörden gegenüber den Zahlen der landesweit erhobenen Zensusdaten deutliche Unterschiede hinsichtlich der Bestockung mit Schafen und Ziegen auf. Auch finden sich in den Statistiken häufig gerundete und gelegentlich gleiche Zahlenangaben für verschiedene Gemeinden (Menjli 1994). Fallen diese Werte zudem mit unerklärlichen Schwankungen zwischen verschiedenen Erhebungszeitpunkten zusammen, so sind berechnete Zweifel an ihrer Zuverlässigkeit angebracht.



*Abbildung 4.13: Denudation an Gebirgsstraßen*

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Förderpolitik der EU zu einer verstärkten Nutzung marginaler Räume geführt hat, die einerseits die Entwicklung der Infrastruktur und sicherlich auch den damit einhergehenden Wohlstand gesichert hat. Auf der anderen Seite kam es gleichzeitig zu einer Überbewirtschaftung in diesen Gebieten, die sich in monokulturellem Anbau, beispielsweise von Oliven, oder in weit überhöhten Bestockungsdichten bei der Schaf- und Ziegenhaltung im Gebirge niederschlägt. Es stellt sich somit die Frage, inwiefern der Naturraum aufgrund dieser Entwicklung spürbare und dauerhafte Veränderungen erfährt. Die vorliegende Arbeit soll dieser Fragestellung mit Möglichkeiten fernerkundlicher und GIS-gestützter Ansätze zur Erfassung und Bewertung der Veränderungen nachgehen.

*Teil II:*

*Datenverarbeitung*

## 5 Datengrundlage

Die vorliegende Arbeit beruht auf einer Vielzahl digitaler wie auch analoger Datensätze, wobei die damit eingeführte Trennung in manchen Fällen nicht als kategorisch betrachtet werden kann. Häufig wurden Primärdaten zunächst analog erhoben und eine Umwandlung in ein rechner- oder GIS-taugliches Format erfolgte erst später. Die Unterteilung der digitalen Daten in Satellitendaten und GIS-Ebenen ist hier entsprechend der fernerkundlichen Ausrichtung gewählt worden. Satellitengestützte Spektraldaten durchlaufen – im Gegensatz zu "konventionellen" GIS-Daten – in der Regel zunächst eine Reihe von Verarbeitungsschritten innerhalb eines digitalen Bildverarbeitungssystems. Aufgrund dessen sollen zunächst die wichtigsten Charakteristika der einbezogenen Satellitenaufnahmen beschrieben werden.

### 5.1 Satellitendaten

Um der zeitlichen und räumlichen Komponente des Monitoring-Ansatzes gerecht zu werden, wurde auf multitemporale Daten des Landsat-5 Thematic Mapper (TM) und des Multispectral Scanner (MSS) der Landsat-Plattformen 1, 2, 4 und 5 zurückgegriffen. Ergänzt wurde diese Zeitserie durch eine orthophotographisch aufbereitete, panchromatische Szene des Système Probatoire d'Observation de la Terre (SPOT) und ein digitales Höhenmodell (DHM) aus SPOT-Daten.

Eine detaillierte Beschreibung der jeweiligen Plattform, der Sensoren sowie der zugehörigen Bodensegmente und Verarbeitungsketten finden sich in den Nutzerhandbüchern der verantwortlichen Betreiber (USGS 1979; USGS und NOAA 1984; CNES und SPOT Image 1989a, b). Weiterführende Auswertungen hinsichtlich der Systemeigenschaften im Anwendungsbetrieb liefern beispielsweise Brockmann (1992), Ehlers und Welch (1988a, b) oder Kramer (1996). Detailliertere Ausführungen zu geometrischer und radiometrischer Datenqualität und -verarbeitung sind in Kapitel 6 und 7 zusammengestellt.

**LANDSAT-TM.** Im Jahre 1982 wurde in Zusammenarbeit von United States Geological Survey (USGS) und National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) der Thematic Mapper auf Basis der erprobten Landsat-Plattform in ihrer vierten Version (Landsat-4 TM) in Betrieb genommen. Der frühzeitige Ausfall des Systems wurde durch die kurzfristig verfügbare Plattform Landsat-5 ersetzt, so dass fast seit Anfang der 80er Jahre ein kontinuierlicher Fluss an TM-Daten gewährleistet ist. 1993 scheiterte die Implementierung des Nachfolgers Landsat-6. Allerdings arbeitete Landsat-5 weit über seine prognostizierte Betriebsdauer hinaus, so dass für den hier betrachteten Zeitraum eine homogene Reihe aus Landsat-5 TM-Daten eingesetzt werden konnte. Mit dem Landsat-7 Enhanced Thematic



Mapper (ETM+) wurde im Frühjahr 1999 eine verbesserte Nachfolgerversion der bewährten Technik im Orbit platziert (Lauer et al. 1997; Mika 1997).

Die Auswahl der hier verwendeten Szenen erfolgte nach einer Reihe von Kriterien, innerhalb derer die phänologische Vergleichbarkeit der für die Weideflächen dominierenden Pflanzengesellschaften die primäre Maßgabe war. Da zum Zeitpunkt der Datenbeschaffung noch keine adäquaten klimatologischen und meteorologischen Hilfsdaten zur Verfügung standen, wurde das zu erwartende Optimum der photosynthetischen Produktion im Zeitraum von Mai bis Juni als anzustrebendes Aufnahmezeitfenster gewählt. So wurde ein maximaler Kontrast zwischen Vegetation und Hintergrundmaterial gewährleistet, um eine möglichst zuverlässige Erfassung auch niedriger Vegetationsanteile und eine Vergleichbarkeit innerhalb der zu prozessierenden Zeitreihe sicherzustellen (vgl. Kap. 8).

Die ideale Monitoring-Konstellation stellt sicherlich eine multitemporale Datenbasis (zwei bis drei Datensätze) innerhalb jeder Vegetationsperiode des gesamten Bearbeitungszeitraums dar. Neben der damit verbundenen Kostenproblematik<sup>8</sup>, werden die letztendlich eingesetzten Satellitenszenen auch durch die Verfügbarkeit der Daten eingeschränkt. Für das Untersuchungsgebiet lagen für das avisierte Mai/Juni-Zeitfenster keine jährlichen Daten vor, obwohl die Repetitionsrate des Sensors von 16 Tagen und die Lage des Arbeitsgebietes im sommertrockenen südöstlichen Mittelmeerraum eine bessere Verfügbarkeit vermuten lassen. Die Gründe für diesen Engpass können vielfältig sein und umfassen externe, wie auch systembedingte Probleme:

- Bewölkung zum Überflugszeitpunkt<sup>9</sup>
- Datenausfälle wegen mangelhafter Aufzeichnungs- oder Empfangsqualität
- zeitweiser Ausfall einzelner Systemkomponenten (Sensor, Energieversorgung, Datenübertragung, Empfangsstationen, etc.) aus Wartungs-, Kalibrierungs- oder Kapazitätsgründen
- Datenverluste der Speichermedien im Laufe des Archivierungszeitraums

Aufgrund der oben genannten Einschränkungen wurden schließlich neun TM-Datensätze innerhalb des Beobachtungszeitraums zwischen Mai 1984 und Juni 1996 mittels Datenbankrecherchen der deutschen Distributoren ausgewählt. Die Daten wurden als Viertelszenen prozessiert, um eine optimale Abdeckung der Arbeitsgebiete zu gewährleisten. Trotz sorgfältiger Recherche mittels Quicklook und Datenbankangaben zeigten sich häufig Abweichungen hinsichtlich des tatsächlichen Wolkenbedeckungsgrades, die mit den Aufnahmekennzahlen in Tabelle 5.1 zusammengefasst sind.

---

<sup>8</sup> Zum Zeitpunkt der Datenbeschaffung betrug der Preis für eine TM-Viertelszene bei multitemporaler Akquisition 1400 Euro. Bei angenommenen 35 bis 40 Datensätzen für den Zeitraum 1984 bis 1996 beliefen sich damit die Datenkosten für die TM-Datenbasis auf 35.000 bis 40.000 Euro. Seit Start des Landsat-7 ETM+ im Jahre 1999 werden neu erhobene Daten zum Preis von rund 300 Euro zur Verfügung gestellt.

<sup>9</sup> Auf einer Reihe von Satellitenszenen findet sich beispielsweise die für den Psiloritis typische "Wolkenkappe" über dem Hauptgipfelzug des kretischen Zentralgebirges.

Tabelle 5.1: Beschreibung der Landsat-5 TM-Zeitserie

WRS-Kennung (path/row)	Größe (Zeilen x Spalten)	Zentral-koordinate (lat/lon)	Distributions-format	Provider	Aufnahmezeitpunkt	Bewölkung (nominell, Vollszene)	tatsächliche Bewölkung (Viertelszene)	Wolkentyp <sup>10</sup>
181/35	2944 x 3600	35,20° N 25,03° E	einschl. TM-6, BSQ, system- korrigiert	Eurimage	03.06.1984	0/0/0/0	1/1/7/0	Cu / S
					24.05.1986	0/0/0/0	1/0/1/0	Ci / Cu
					12.06.1987	0/0/0/0	0/0/0/0	-
					29.05.1988	1/0/0/0	0/0/0/0	-
					17.06.1989	1/0/0/0	0/0/1/0	Cu
					22.05.1991	0/0/0/0	0/0/0/0	-
					27.05.1993	1/0/0/0	0/0/1/0	Cu
					30.05.1994	0/0/0/0	0/0/0/0	-
					04.06.1996	0/0/0/0	0/0/0/0	-

**LANDSAT-MSS.** Im Jahre 1972 startete die NASA mit dem ERTS-1 den ersten operationellen Erdbeobachtungssatelliten der Landsat-Serie<sup>11</sup>. Entscheidend für die Entwicklung der satellitengestützten Landbeobachtung sollte der auf dieser Plattform eingerichtete Multispectral Scanner werden, der auch auf den folgenden Landsat-Systemen bis einschließlich Landsat-5 in fast unveränderter Form implementiert wurde (Mika 1997). Die einmalige Konstellation zweier optischer Sensorgenerationen auf der gleichen Plattform bei Landsat-4 und Landsat-5 bietet daher weitreichende Möglichkeiten der Interkalibrierung zwischen Thematic Mapper und Multispectral Scanner. Die Möglichkeit, auf diese Art und Weise eine Zeitreihe von TM-Daten mittels MSS-Aufzeichnungen zurück in die frühen 80er und 70er Jahre zu verlängern, führte zu dem hier entwickelten Ansatz der Integration von TM- und MSS-Daten.

Mehr noch als bei der Akquisition von TM-Szenen spielt bei MSS die Datenverfügbarkeit eine entscheidende Rolle. In der Anfangszeit des Landsat-Programms konzentrierten sich die Aufzeichnungen zunächst auf den nordamerikanischen Kontinent und später auf ausgewählte außeramerikanische Gebiete. Aufnahmen Europas bildeten die Ausnahme und hatten zunächst eher Testcharakter. Erst ab 1975 wurden die europäischen Empfangsstationen operationell in Betrieb genommen und eine systematische Aufzeichnung Europas und des mediterranen Raumes eingeleitet.

Weiterhin bedingt das Alter dieser Daten von inzwischen bis zu über 25 Jahren in Zusammenhang mit dem damals gebräuchlichen Speichermedium des Magnetbands ein erhöhtes Risiko des Datenverlustes. So waren von den ursprünglich in der Datenbank des

<sup>10</sup> Cu: Cumulus, Ci: Cirrus, S: Stratus

<sup>11</sup> Mit der erfolgreichen Implementierung des Nachfolgesatelliten ERTS-2 im Jahre 1975 wurde das Programm in „Landsat“ umbenannt, so dass sich auch die Bezeichnung „Landsat-1“ statt „ERTS-1“ durchgesetzt hat.

europäischen Distributors Eurimage aufgeführten Landsat-MSS-Daten der Plattformen Landsat-1 bis Landsat-4 weniger als 50 % tatsächlich verfügbar. Hinzu kommen eine hohe Fehlerrate bei der Klassifizierung des Wolkenbedeckungsgrades im alten Datenbestand und eine Reihe von Datensätzen mit mangelhafter Übertragungsqualität (Eurimage 1996).

Aufgrund dieser Restriktionen bei der Selektion möglicher Datensätze entstand die in Tabelle 5.2 aufgeführte Auswahl. Dabei stellen die beiden MSS-Szenen von 1984 und 1988 zeitgleiche Aufnahmen mit den korrespondierenden TM-Szenen dar, so dass hier von synoptischen Datenaufnahmen ausgegangen werden kann.

*Tabelle 5.2: Beschreibung der Landsat-MSS-Zeitreihe*

Plattform	Zentral- koordinate (lat/lon)	WRS-Kennung (path/row)	Distributions- format	Aufnahme- zeitpunkt	Provider	Bewölkung (nominell)	tatsächliche Bewölkung	Wolken- typ	
Landsat-1	35,57° N 25,27° E	195/36	BIL, system- korrigiert, deconvoluted	05.09.1972	USGS	1/1/1/1	1/2/0/0	Cu	
Landsat-2				21.05.1977	Eurimage	0/0/0/0	0/1/0/0	Ci / S	
Landsat-2				04.07.1979	Eurimage	0/0/0/0	0/0/0/0	-	
Landsat-2				18.05.1981	Eurimage	0/0/0/0	0/0/0/1	Cu	
Landsat-4		181/36	BIL, system- korrigiert, nicht deconvoluted		08.05.1983	Eurimage	0/0/0/0	1/1/6/1	Cu / Ci
Landsat-5					03.06.1984	Eurimage	0/0/0/0	2/1/0/0	Cu
Landsat-5					29.05.1988	Eurimage	0/0/0/0	0/0/0/0	-
Landsat-5									

**SPOT-ORTHOGRAPHO, DHM UND DERIVATE.** Die beschränkte Verfügbarkeit von Kartenwerken und Höhendaten in Griechenland<sup>12</sup> machen satellitengestützte Orthophotographien und Höhenmodelle zu einer unverzichtbaren Quelle geometrischer Zusatzinformation. Während Landsat-TM und Landsat-MSS die Grundlage für die spektrale Auswertung bildeten, wurden Bilddaten von SPOT für Verifizierungszwecke und zur geometrischen Korrektur der Landsat-Daten gewählt (Abbildung 5.1). Auch hinsichtlich der topographieabhängigen, radiometrischen Korrektur wurde auf das vorhandene SPOT-DHM zurückgegriffen.

Schrägsichtaufnahmen des panchromatischen SPOT-Sensors (SPOT-PAN) ermöglichen die Ableitung von Orthosatellitenbildern und digitalen Höhendaten. Für die vorliegende Arbeit standen ein mit 10 Meter aufgelöstes SPOT-PAN-Orthophoto und das korrespondierende Höhenmodell in 20 Meter horizontaler und 1 Meter vertikaler Auflösung zur Verfügung. Die reduzierte horizontale Auflösung der Höhendaten liegt an der homogeneren Abbildung der

<sup>12</sup> Die topographische Landesvermessung Griechenlands liegt in den Händen des Hellenic Military Geographical Service (HMGS). Die Freigabe topographischer Karten aller Maßstäbe größer 1:100.000 bedarf einer expliziten Genehmigung des HMGS. Karten liegen generell analog vor und digitale Höhenmodelle stehen über den HMGS nicht zur Verfügung.

Geländeformen in geglätteten Ausgangsdaten (ISTAR 1996). Deren Präzision kann sowohl bezüglich der horizontalen Lagegenauigkeit als auch hinsichtlich der Höhenabschätzung als hervorragend angenommen werden (Rodriguez et al. 1988; Theodossiou und Dowman 1990). Trotz der generell hohen Datenqualität werden im Rahmen der radiometrischen Korrektur lokale Fehler im Höhenmodell nochmals kritisch zu beleuchten sein.

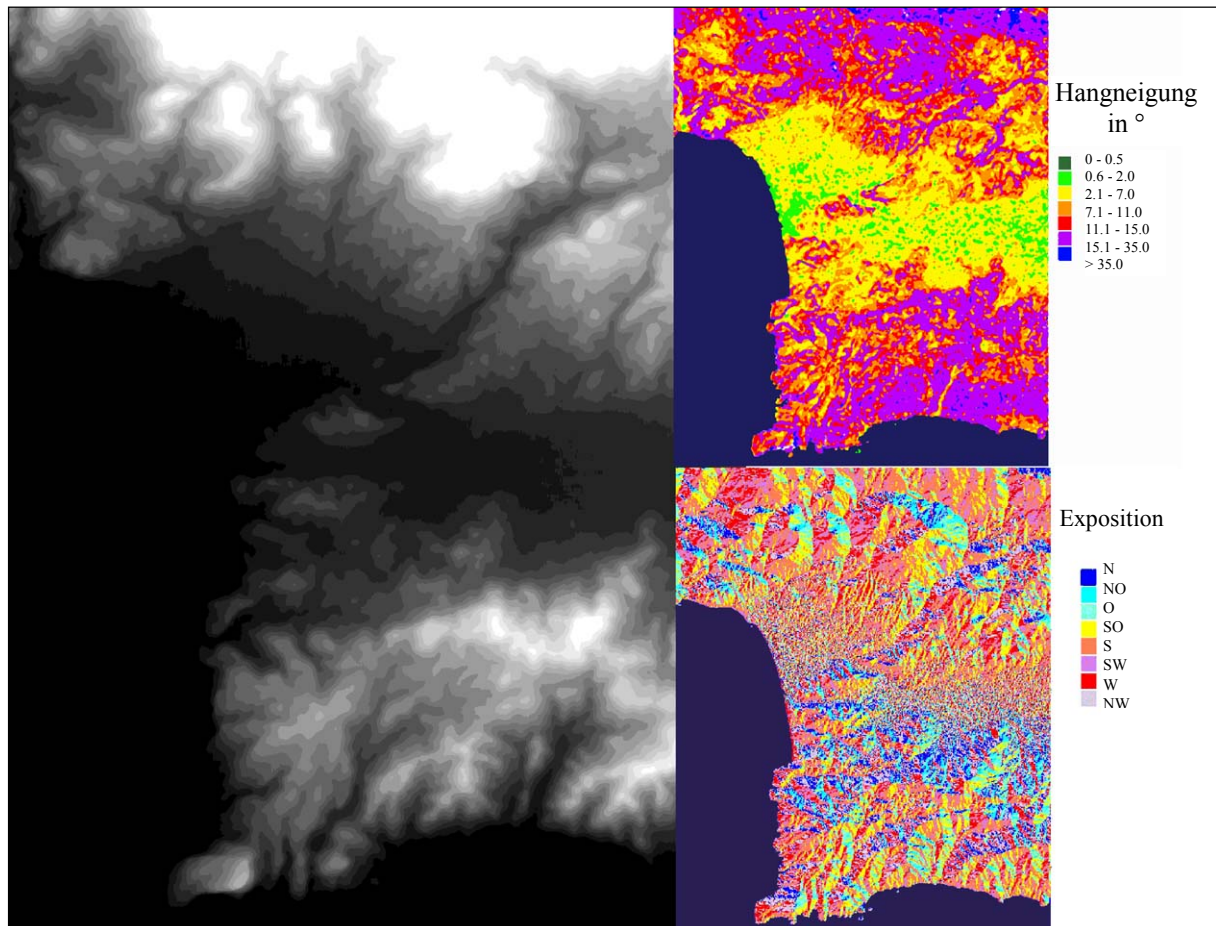


Abbildung 5.1: SPOT-DHM (oben), Exposition (oben, rechts) und Hangneigung (rechts)

Die abgedeckte Fläche entsprach mit  $60 \times 60 \text{ km}^2$  einer SPOT-Vollszene. Die Daten lagen auf UTM-Koordinaten vor, mit einem Szenenmittelpunkt bei  $858.000/3.900.000$  in UTM 34 (Ellipsoid WGS 84). Die identische Datengrundlage für die Erstellung von Orthophoto und DHM bedingen eine akkurate Übereinstimmung der zugrunde liegenden Koordinaten, so dass eine Übertragung von Positionen aus dem Orthophoto auf das DHM problemlos möglich ist (vgl. Kap. 6). Aus den digitalen Höhendaten wurden anschließend elementare Geländeparameter zur Weiterverarbeitung im GIS abgeleitet, wie beispielsweise Hangneigung und Exposition, oder Hilfsparameter zur radiometrischen Korrektur, wie der Anteil der sichtbaren Himmelskalotte.

## 5.2 Spektrometermessungen

Die spektrale Beschreibung relevanter Geländeoberflächen zur anschließenden spektralen Mischungsanalyse von Multispektral- oder Hyperspektraldaten kann prinzipiell direkt aus den Bilddaten erfolgen. Erfolg versprechender ist häufig jedoch der Einsatz von Referenzspektren, die entweder aus schon vorhandenen Datenbanken extrahiert oder für spezifische Fragestellungen im Gelände oder durch Labormessungen erhoben werden müssen (Smith et al. 1990a, b). Dementsprechend spricht man im ersten Fall von „Bild-Endmembers“, ansonsten von „Referenz-Endmembers“ (vgl. Kap. 8).

Zur Ableitung von Referenz-Endmembers wurden im Laufe dreier Geländekampagnen, während Oktober 1996, Mai 1997 und August 1998, ungefähr 500 Geländespektren erhoben. Die Messungen erfolgten mit einem GER S-IRIS und einem ASD FieldSpec-II<sup>13</sup>, die bei ungünstigen Geländebedingungen auch zum Einsatz im Labor herangezogen wurden. Bei beiden Spektrometern handelt es sich um spektral hochauflösende Geräte, die eine Rekonstruktion beliebiger Sensorkonfigurationen im Wellenlängenbereich von 400 bis 2.500 nm erlauben.

Bei den Untersuchungen auf Kreta standen Degradationserscheinungen in den Weidegebieten der zentralen Gebirge des Psiloritis und Asterousia im Mittelpunkt der Betrachtungen. Dementsprechend fokussierte die Auswahl der Endmembers zunächst auf repräsentative Spektren der wichtigsten geologischen Einheiten, die bei den häufig geringen Bodenbedeckungsgraden des Arbeitsgebietes eine entscheidende Rolle zur Modellierung der Geländeoberflächen spielten.

Der enge wechselwirkende Zusammenhang zwischen Boden und Vegetation führt zusammen mit den genannten topographischen, lithologischen und pedologischen Randbedingungen zu einem komplexen Wirkungsgefüge, welches mit einer möglichst geringen Anzahl spektraler Endmembers charakterisiert werden sollte. Dementsprechend wurden Gesteinsspektren der auftretenden geologischen Einheiten, der damit korrespondierenden Böden und der dominierenden Pflanzenarten aufgenommen. Für letztere lagen integral gemessene Spektren (Spektren der gesamten Pflanze), der photosynthetisch aktiven Blattoorgane und gegebenenfalls auch Borkenspektren vor. Darüber hinaus wurden Spektren der Nekromasse erhoben. Nähere Ausführungen zu den mit der Datenerhebung verbundenen Techniken und durchgeführten Arbeiten finden sich in den Beschreibungen der jeweiligen Geländekampagnen (Preissler 1996; Hostert und Hill 1997; Hostert und Preissler 1997).

Anhand der digital vorliegenden und auf spektrale Eigenschaften hin optimierten geologischen Karten des Arbeitsgebietes (vgl. Kap. 5.3) war eine sinnvolle Aufnahmestrategie während der Geländekampagnen möglich. Für jede als bedeutend eingestufte Geländeeinheit

---

<sup>13</sup> GER S-IRIS: Geophysical Environmental Research Single-field-of-view InfraRed Intelligent Spectroradiometer; ASD FieldSpec-II: Analytical Spectral Devices Field Spectrometer II (ASD 1994)

wurden Spektren des Gesteinsuntergrunds, der Bodenauflage und der Vegetation erfasst. Eine weitere Variation erfolgte über die Geländehöhe, die einen determinierenden Einfluss auf Verwitterungsprozesse und Pflanzengesellschaften ausübt. Für Gebiete, die während der Geländekampagnen nur unter großem Aufwand zugänglich waren oder in denen aufgrund der Witterungsbedingungen keine Spektralmessungen möglich waren, wurden Materialproben gesammelt. Die weitere Auswertung erfolgte entweder noch auf Kreta oder durch Messungen im Spektrallabor.

Unter Laborbedingungen wurden alle Messungen standardisiert, um Störeffekte durch wechselnde Messgrößen zu minimieren: Der Abstand des Messfühlers von den Proben betrug 15 cm in Nadirposition, der Abstand der Beleuchtungsquelle 30 cm bei einem Einstrahlungswinkel von 30°. Die Beleuchtung erfolgte in einem abgedunkelten Raum mit einer Halogenlampe<sup>14</sup>, die über eine regelbare Spannungsquelle nach halbstündiger Aufwärmphase an 12 Volt betrieben wurde. Als absoluter Standard diente in allen Fällen ein Spektralonpanel, wobei die erste Referenzmessung nach der halbstündigen Aufwärmzeit des Spektrometers durchgeführt wurde. Die Vorgehensweise entspricht den Herstellerempfehlungen des ASD FieldSpec-II für Messungen unter Laborbedingungen und lehnt sich an häufig verwendete Standardmesskonstellationen an (Baumgardner et al. 1985; ASD 1994).

Den Vorteilen der Labormessungen, wie der Unabhängigkeit von tageszeitlichen Schwankungen im Strahlungsfluss unter genau definierten Beleuchtungsbedingungen oder fehlenden atmosphärischen Störeinflüssen stehen allerdings auch Nachteile gegenüber. So zeigen Böden im Labor gegenüber Geländemessungen, bedingt durch Austrocknung, Gefügezerstörung oder Beleuchtungseffekte, häufig Veränderungen in der Albedo oder auch in einzelnen Wellenlängenbereichen (Bowers und Hanks 1965; Stoner et al. 1980; Baumgardner et al. 1985). Im vorliegenden Fall wurden Böden bei Labormessungen von Gesteins- und Vegetationsanteilen befreit, um reine Bodenspektren zu erhalten. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit zwischen Labor- und Geländemessungen wurde sowohl auf eine Ofentrocknung als auch auf ein Mörsern der Proben verzichtet. Lediglich Makroaggregate wurden zur Minimierung von Schatteneffekten zerstört und die Proben luftgetrocknet. Die Kennzeichnung von Gesteinsproben bei der Probenahme erfolgte derart, dass ihre in situ Lage unter Laborbedingungen rekonstruiert werden konnte. Sie wurde sowohl an natürlichen Oberflächen, gegebenenfalls einschließlich Flechtenbedeckung, und an oberflächengereinigten Proben durchgeführt.

Vegetationsmessungen grüner Pflanzenteile wurden an Blattstapeln durchgeführt. Dabei entsteht ein aufgesättigtes Spektrum, welches die transmissiven Eigenschaften des Einzelspektrums nicht mehr aufweist (Guyot 1990). Diese Tatsache wird im Zusammenhang mit den in Kap. 8 erläuterten Verarbeitungstechniken nochmals aufgegriffen werden. Da photo-

---

<sup>14</sup> Typ Lowe Pro-Light P1-10 mit einer Leistung von 1.000 Watt

synthetisch aktive Pflanzen nach der Ernte nur kurze Zeit überdauern ohne ihre spektralen Eigenschaften zu verändern, wurden die meisten Messungen in situ oder innerhalb weniger Stunden im Feldlabor durchgeführt. Die Archivierung und Verwaltung der Spektraldaten erfolgte in einer Spektraldatenbank und mit ArcView. Zusätzlich zu den Spektren wurden jeweils relevante Geländeinformationen in Form von Text und Photographien im GIS verknüpft (Abbildung 5.2).

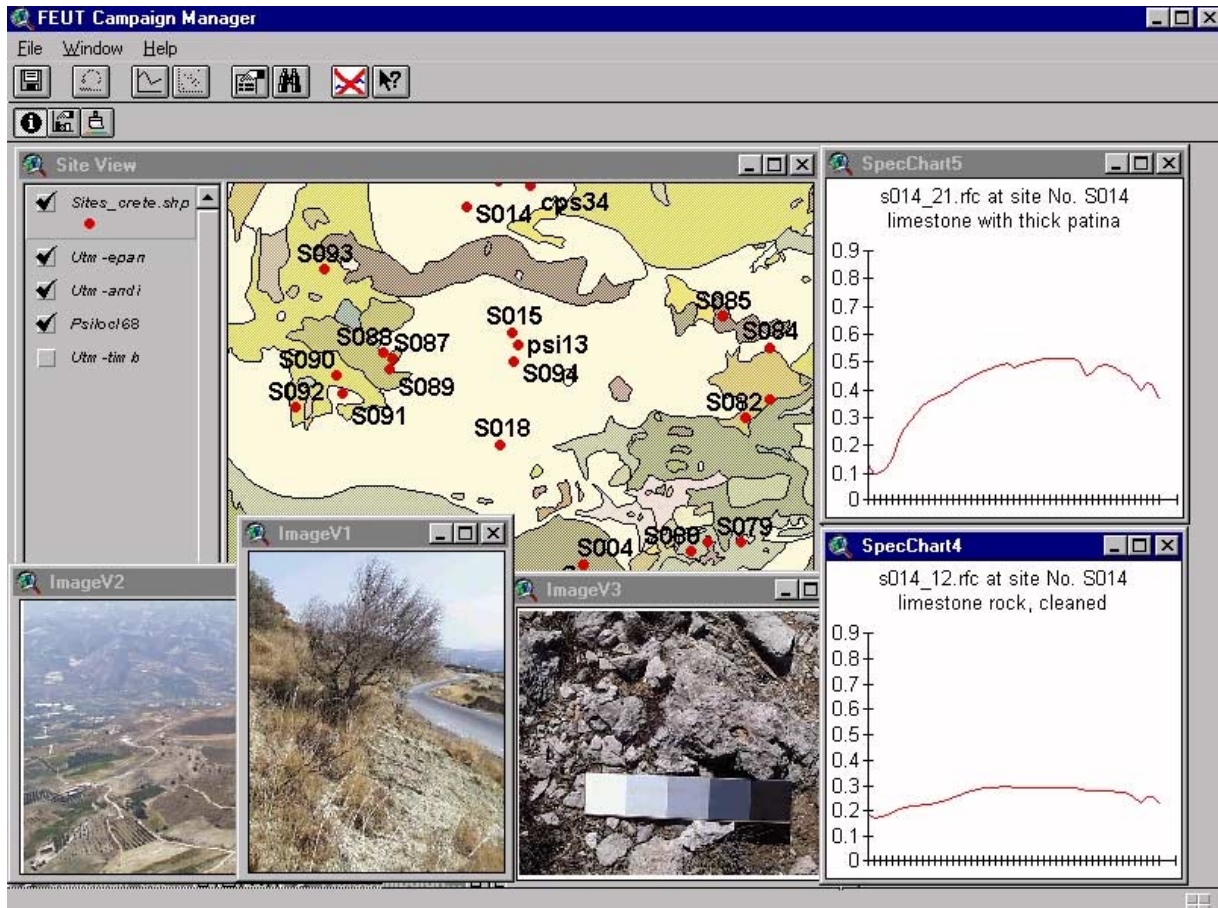


Abbildung 5.2: Verwaltung von Spektraldaten und Zusatzinformationen im GIS

So war eine Auswahl von Spektren nach inhaltlichen und räumlichen Kriterien möglich, wie beispielsweise die Anzeige aller erhobenen Spektren innerhalb einer geologischen Einheit (vgl. Kap. 8). Darüber hinaus verkürzt die gemeinsame und automatisierte Darstellung von spektraler und Zusatzinformation am Bildschirm Evaluierungs- und Selektionsaufgaben (Preissler et al. 1998; Hostert et al. 1999b).

### 5.3 GIS-Ebenen

Geländeerhebungen, vektorisierte Karten sowie mittels der Interpretation von Luftbildern abgeleitete Informationen wurden für Zentralkreta in einem GIS abgelegt (Abbildung 5.3). Im Fall analoger Eingangsdaten wurde entweder eine Digitalisierung gerasterter Vorlagen am

Bildschirm oder von analogen Vorlagen am Digitalisiertablett vorgenommen. Die Datenverarbeitung erfolgte je nach Schwerpunkt auf Raster- oder Vektordaten mit Erdas Imagine 8.x oder Arc/Info 7.x unter Unix bzw. ArcView 3.x unter Windows NT.

Mittels nicht-differentiellem GPS wurden während der drei Geländekampagnen Koordinaten erhoben. Dazu zählen die Ortsinformationen der Testflächen und Transekte zur Vegetations- und Bodenkartierung, ebenso wie Punktmessungen zur Beschreibung der in Kapitel 5.2 dargestellten Spektrometermessungen und der in Kapitel 5.5 beschriebenen korrespondierenden Zusatzinformationen.

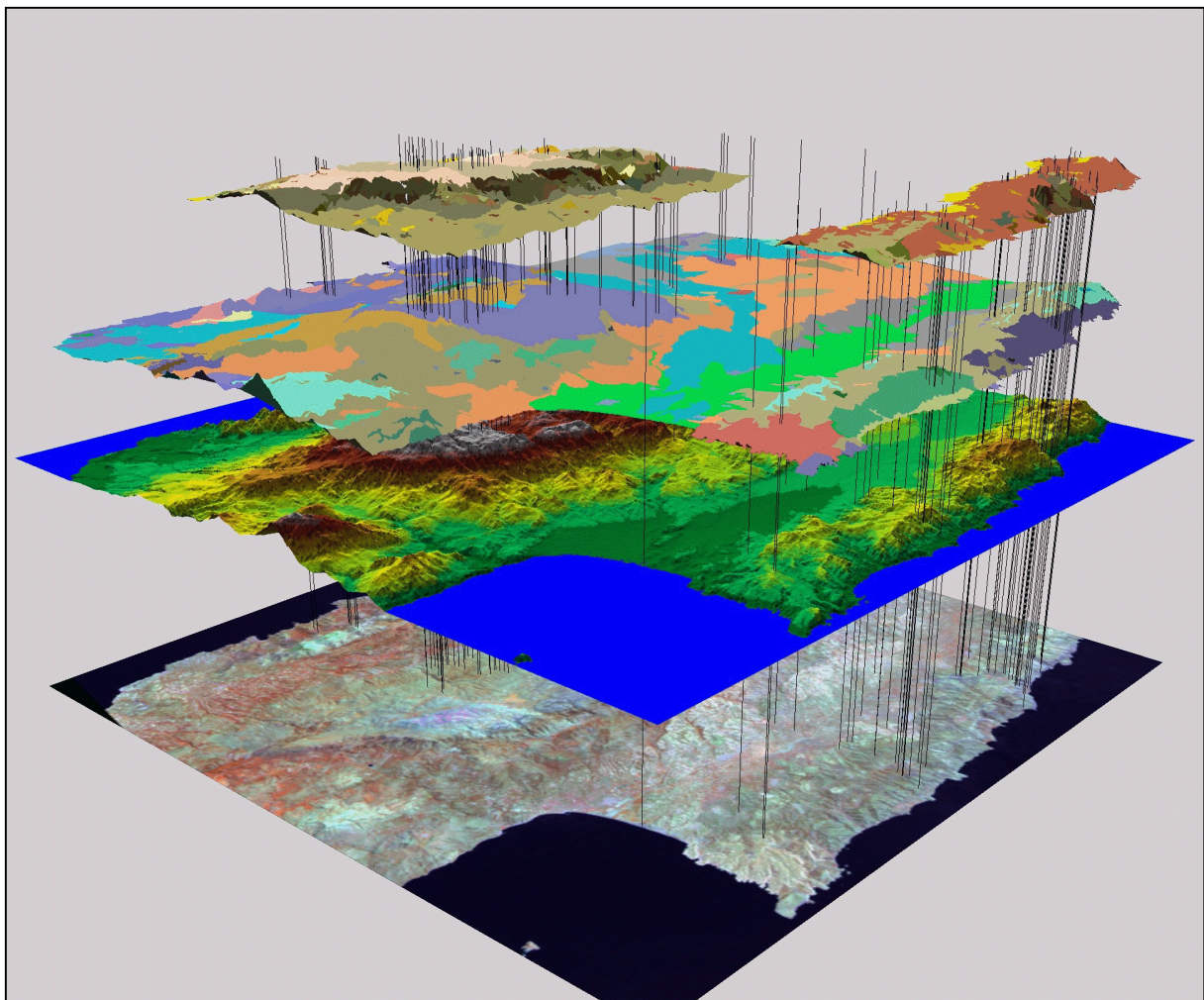


Abbildung 5.3: Verschiedene Datenebenen im GIS einschließlich Probenahmepunkte

Für Kreta liegen eine flächendeckende Karte der Geologie im Maßstab 1:200.000 sowie einzelne Kartenblätter im Maßstab 1:50.000 vor. Letztere decken für den hier betrachteten Raumausschnitt Zentralkretas ungefähr 70 % der Insel ab. Die Kartenblätter weisen – auch zwischen den Einzelblättern der großmaßstäbigen Kartierungen – unterschiedliche Kartierschlüssel auf. Diese lassen sich auf unterschiedliche Vorgehensweisen wechselnder Kartierteams bei der Geländeerhebung und der anschließenden kartographischen Umsetzung



zurückführen. Es wurden sowohl Kartierungen nach genetischen als auch nach tektonostratigraphischen Gesichtspunkten durchgeführt, die vor allem anhand der Kartenblattübergänge offensichtlich werden.

Da die Ergebnisse beider Kartiermethoden zur Unterstützung der spektral determinierten Analyse hier betrachteter Satellitendaten nicht genügen, wurde eine Satellitendateninterpretation nach spektralen Gesichtspunkten durchgeführt und daraus eine sekundäre geologische Karte für Zentralkreta abgeleitet. Eine Landsat-TM-Szene des Jahres 1996 in der Kanalkombination 1/4/7 diente als visuelle Interpretationshilfe zur Ableitung spektral unterschiedlicher Einheiten. Letztendlich erfolgte eine interaktive photo-geologische Interpretation der TM-Daten und eine Verschneidung mit den Strata der Karte 1:200.000 als auch der Kartenblätter 1:50.000. Daraus entstand eine flächendeckende geologisch-spektrale Aufteilung Zentralkretas mit 13 als signifikant einzustufenden Klassen (Sommer 1999).

Für Teile des Arbeitsgebietes lagen auch Karten der administrativen Einheiten Kretas vor. Diese spielen insofern eine wichtige Rolle, als dass die Weiderechte und damit einhergehende Beweidungsstrukturen auf die Nomoi, Eparchien und Dimoi bzw. Koinotis zurückgeführt werden können. Für Teile von Psiloritis und Asterousia existieren darüber hinaus Bestockungsdaten der amtlichen Statistiken für einzelne Jahre, die mit der zugehörigen Geometrie im GIS erfasst wurden.

## 5.4 Luftbildkartierung

Für beide Arbeitsgebiete lagen Luftbilder der Jahre 1945, 1968 und 1989 als Schwarz-Weiß-Reihenbefliegung unterschiedlicher Maßstäbe vor<sup>15</sup>. Eine Analyse der Bilddaten erfolgte an der Aristotle University Thessaloniki in Zusammenarbeit mit dem NAGREF Forest Research Institute in Thessaloniki. Aufgrund des Umfangs von mehreren hundert Luftbildern war nur eine Detailkartierung der wichtigsten strukturellen Klassen möglich. Der zur Verfügung gestellte Datensatz basierte auf einer Einteilung in Kulturflächen, Wiesen, Siedlungen, Oro-Phrygana, Phrygana, Matorral und Wald, von denen die beiden letzteren nach dominanten Arten unterteilt wurden. Eine Gliederung nach Arten oder die Kartierung von Dichteklassen war in Hinblick auf die Phrygana aus den Luftbildern leider nicht möglich.

Die Einteilung in Wald und Matorral wurde vor allem nach dem Kriterium der Wuchshöhe auf der Basis von Geländekenntnissen vorgenommen. Die Genauigkeit einer solchen Trennung ist bei der monokularen Interpretation historischer Luftbilder unterschiedlichen Maßstabs zweifelhaft, so dass bei der folgenden Betrachtung auf eine Trennung von Matorral

---

<sup>15</sup> Die Bildmaßstäbe variierten in Abhängigkeit vom Befliegungsjahr. Die erste Nachkriegsbefliegung wurde von der British Air Force als Übersichtskartierung der kriegsbedingten Schäden im Maßstab von ungefähr 1:34.000 vorgenommen; die späteren Überflüge waren vom Hellenic Military Geographical Service organisiert und lieferten Bilder im Maßstab von 1:12.000.

und Wald zu Gunsten der Zuverlässigkeit verzichtet wurde. Die als analoge Karten zur Verfügung gestellten Daten wurden in der Abteilung Fernerkundung der Universität Trier digitalisiert und im UTM-Koordinatensystem, basierend auf dem SPOT-Orthophoto, verortet. Neben der Vegetation wurden auch die in den Luftbildern erkennbaren Straßen und befahrbaren Wege Zentralkretas aufgenommen.

**PSILORITIS.** Die Befliegungsdaten decken sich nur teilweise mit den in Kapitel 10 zu betrachtenden Flächenanteilen aus der Interpretation von Satellitendaten. Für das Arbeitsgebiet des Psiloritis lag außerdem nur eine Teilbefliegung für die Jahre 1945 und 1968 vor, so dass bei der Betrachtung von Flächenveränderungen seit dem Zweiten Weltkrieg zunächst nur der Überschneidungsbereich aller drei Datensätze analysiert wurde (Abbildung 5.4).

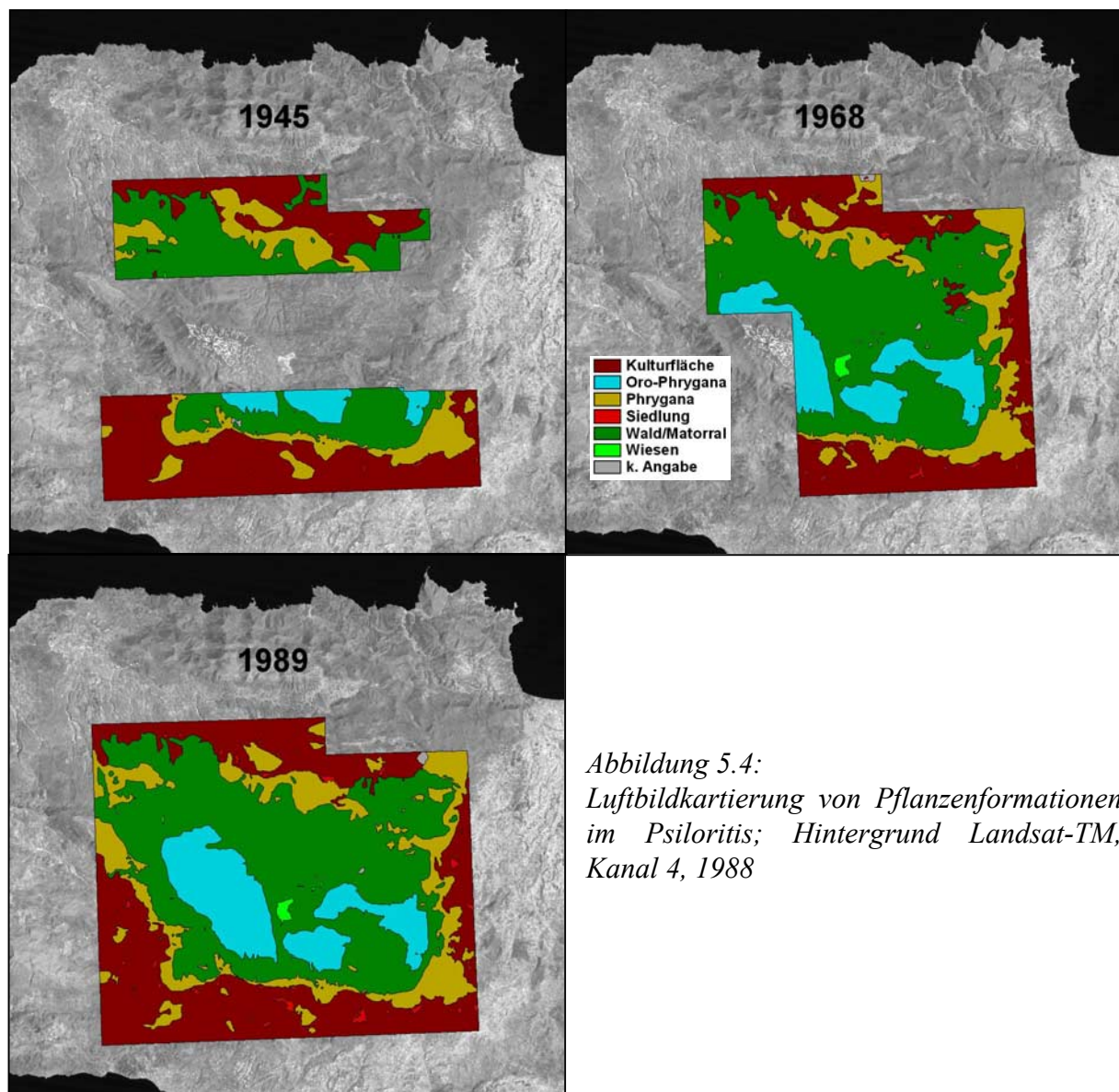


Abbildung 5.4:  
Luftbildkartierung von Pflanzenformationen  
im Psiloritis; Hintergrund Landsat-TM,  
Kanal 4, 1988

Auffällig ist vor allem die Konstanz in der Ausdehnung aller Klassen (Abbildung 5.5). Schwankungen zwischen 1945, 1968 und 1989 deuten eher auf Kartierungsungenauigkeiten als auf reelle Veränderungen hin. Da insbesondere der zentrale Bereich des Gebirges für 1945 nicht befliegen wurde, erfolgte eine gesonderte Analyse des Kerngebietes nur auf Grundlage der Luftbildmosaike von 1968 und 1989. Auch anhand dieses Vergleichs ließ sich lediglich das Entstehen einer Brachfläche im Norden der Gemeinde von Krousounas nachweisen. Dort wurden zwischen 1968 und 1989 ca. 1,7 km<sup>2</sup> an Anbauflächen aufgegeben und anschließend zu ungefähr gleichen Teilen durch Phrygana und Wald bzw. Matorral eingenommen.

Demnach scheinen seit dem Zweiten Weltkrieg keine tiefgreifenden Veränderungen in der räumlichen Ausdehnung verschiedener Pflanzenformationen dieser Region aufgetreten zu sein. Es ist vielmehr davon auszugehen, dass – falls sich ein solcher Wandel, wie von vielen Autoren angenommen, vollzogen hat – dieser spätestens in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts stattgefunden haben muss (vgl. Kap. 4.1.5). Vielleicht reichen die relevanten Prozesse sogar bis in die Zeit der Minoer zurück, wie von Rackham und Moody (1996) oder Grove et al. (1999) angenommen. Anhand der Luftbildkartierung ließen sich für das Arbeitsgebiet des Psiloritis im Gelände nachweisbare Veränderungen der Vegetation daher nicht nachvollziehen.



Abbildung 5.5: Flächenstatistik für die Jahre 1945, 1968 und 1989 aus Befliegungsdaten für Psiloritis (Angaben in km<sup>2</sup>)

**ASTEROUSIA.** Die naturräumliche Ausstattung Asterousias ist gegenüber dem klimatisch und edaphisch begünstigten Psiloritis als karg zu bezeichnen. Bäume kommen nur selten vor, die Bestände sind generell offen und die Nährstoffversorgung auf den häufig von Flynch dominierten Flächen ist mäßig (De Jong et al. 1997; Tsiourlis et al. 1998a, b).

Auch in diesem Gebiet blieben die wenigen bewaldeten Flächen in ihrer räumlichen Ausdehnung von 1945 bis 1989 nahezu konstant. Lediglich die Pinienbestände am Übergang vom niedriger gelegenen West-Asterousia zum zentralen Mittelgebirge zeigten von 1945 bis 1968 einen flächenmäßigen Rückgang (Abbildung 5.6). Darüber hinaus handelte es sich bei den Veränderungen der Waldflächen im Wesentlichen um die Auswirkungen lokaler Brände und damit Veränderungen in der Bestandsdichte.

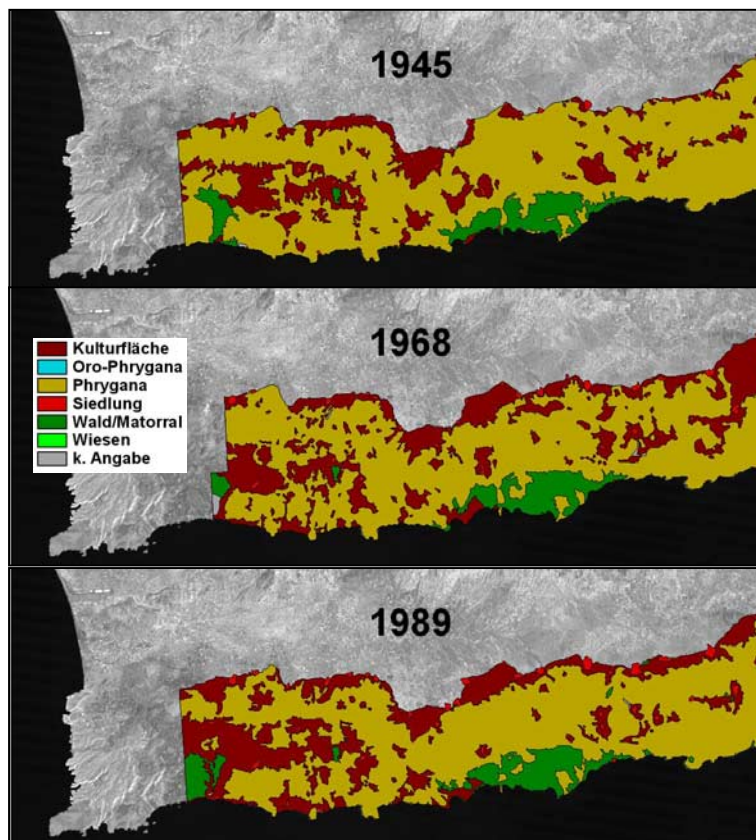


Abbildung 5.6: Luftbildkartierung von Pflanzenformationen in Asterousia; Hintergrund Landsat-TM, Kanal 4, 1988

Allerdings kam es insbesondere zwischen 1945 und 1968 zu einer massiven Ausweitung anthropogener Landnahme (Abbildung 5.7). Dies betraf vor allem die Randgebiete zur Messara im Norden des Gebirges, aber auch zentrale Bereiche um die Siedlungen auf dem Rücken des Gebirgszuges. Im Osten, um Achendrias und Ethia, führte dies sogar zum Zusammenwachsen der sich von der Messara her ausdehnenden und der um die Ortschaften wachsenden Kulturlächen. Im Kontext der Kulturlächenerweiterung durch Ackerbau ist auch die deutliche Abnahme der mit Phrygana bestandenen Areale im Asterousiagebirge bis Ende der 60er Jahre einzuordnen.

Im Gegensatz dazu stand die deutliche Abnahme der Anbauflächen bis 1989, verbunden mit einer Ausweitung der Ortschaften am Messararand. Im Gegensatz dazu behielten die zentralen Gebirgsorte höchstens ihre ursprüngliche Größe bei, häufig jedoch schrumpften sie oder wurden aufgegeben. Es wird deutlich, dass in dieser Region ein direkter Zusammenhang zwischen Landflucht und Kulturflächenausdehnung besteht (Lyrintzis und Papanastasis 1995).

Vormals als Ackerflächen genutzte Areale oder Phrygana wurden häufig in Ölbaumkulturen umgewandelt. Insgesamt erfolgte eine Verdoppelung der Anbaufläche von ca. 1.500 ha auf über 3.000 ha. Ohne die deutliche Ausweitung der Ölbaumplantagen wäre ein Rückgang der Kulturflächen Asterousias, trotz der auch hier einsetzenden Flächenkonzentration und dem Anbau von Sonderkulturen in Gunstlagen, auf nahe des Nachkriegsniveaus zu erwarten.

Interessanterweise sagen die aus der Luftbildinterpretation abzuleitenden Ergebnisse trotz des deutlichen Maßstabssprungs vom Satelliten- zum Luftbild nur in den wenigsten Fällen etwas über die qualitativen Veränderungen eines Bestandes aus. Durch Überweidung auftretende Veränderungen in der Artenzusammensetzung oder Veränderungen in der Vegetationsdichte der Phrygana können aus kleinmaßstäbigen Luftbildern nicht abgeleitet werden. Inwiefern kleinmaßstäbige Luftbilder daher eine geeignete Alternative zum Monitoring großer Areale darstellen können ist daher eher zweifelhaft.

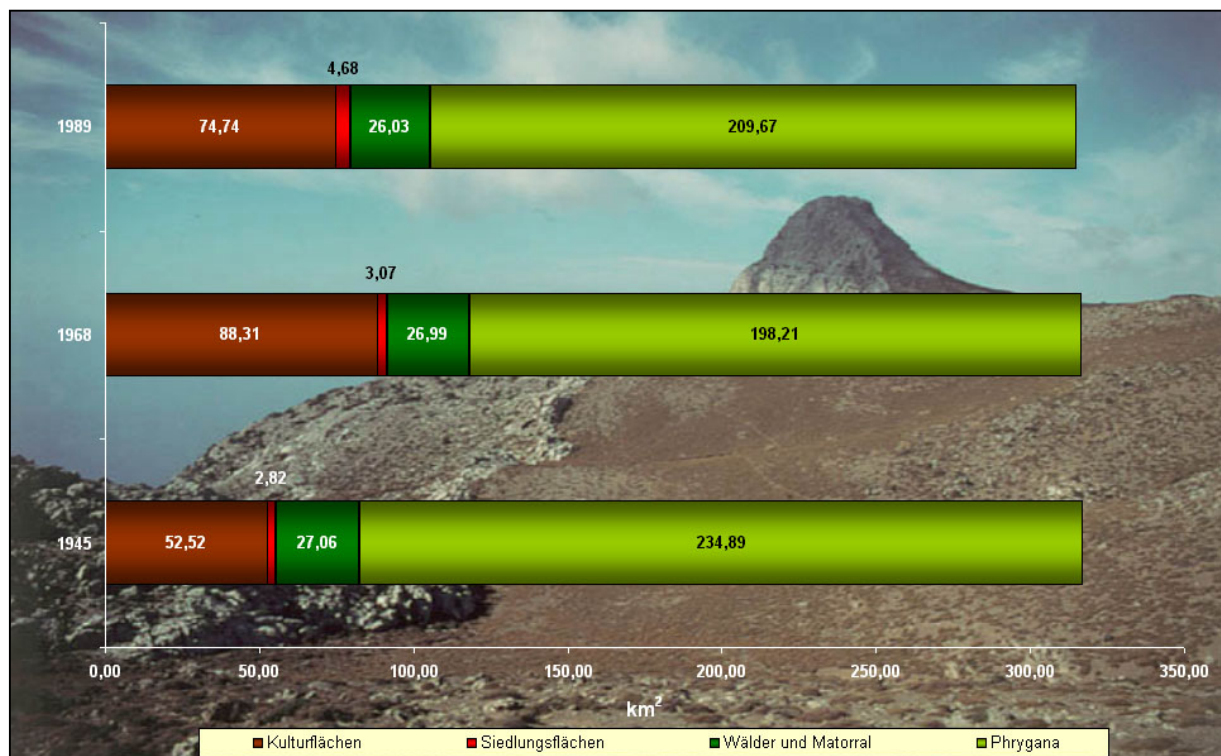


Abbildung 5.7: Flächenstatistik für die Jahre 1945, 1968 und 1989 aus Befliegungsdaten für Asterousia (Angaben in km<sup>2</sup>)

## 5.5 Deskriptive Daten

Einige Informationsquellen wurden zwar nicht in digitaler Form in die Verarbeitungskette eingebracht, spielten aber dennoch eine wichtige Rolle zur Validierung der Ergebnisse oder als Begleitinformation. Dazu gehörten u.a. topographische und weitere thematische Karten sowie klimatologische Zeitreihen. Als Kartenmaterial standen sämtliche Blätter der topographischen Karte 1:50.000 für die Insel Kreta zur Verfügung (vgl. Kartenverzeichnis). Darüber hinaus wurden einige thematische Kartenblätter für Zentralkreta in den Maßstäben 1:80.000 und 1:100.000 zur Überprüfung des Straßennetzes oder zur Bestätigung von Ortsnamen verwendet.<sup>16</sup>

Längere klimatologische Datenreihen standen lediglich für die Orte mit Wetterstationen erster Ordnung zur Verfügung (Chania, Ierapetra, Iraklion, Sitia). Für einzelne Jahre oder meteorologische Parameter lagen auch zeitlich verdichtete Angaben vor. Insbesondere die räumliche und zeitliche Niederschlagsverteilung spielt bei der Interpretation der jährlichen phänologischen Variabilität der mediterranen Vegetation eine entscheidende Rolle und wurde daher detaillierter ausgewertet (vgl. Kap. 4.1.1).

---

<sup>16</sup> Die Nutzung der topographischen Karten war insofern eingeschränkt, als dass dieses Kartenwerk vom HMGS verwaltet wird. Die Freigabe erfolgt jeweils nur für ein Projekt und unter Auflage der Nutzung innerhalb der Landesgrenzen. Weiterhin werden thematische Karten in Griechenland häufig wissentlich verfälscht, um auf illegale Reproduktionen rückschließen zu können oder um militärisch relevante Informationen zu verschleiern.

## 6 Geometrische Vorverarbeitung der Satellitendaten

Um Satellitendaten miteinander und auch mit anderen Informationsquellen wie Geländedaten oder Kartenmaterial zu vergleichen, ist eine Korrektur geometrischer Fehler sowie eine Anpassung an das entsprechende Landeskoordinatensystem notwendig. Dabei bestimmt die Güte der jeweiligen Vorverarbeitungsschritte maßgeblich die erreichbare Genauigkeit der darauf basierenden Analyseergebnisse und somit auch die Datenvergleichbarkeit einer multitemporalen Auswertung. Die Datenvorverarbeitung erlangt somit eine zentrale Bedeutung für die quantitative Auswertung digitaler Fernerkundungsdaten. Eine übersichtliche Zusammenstellung der in diesem Kontext zu berücksichtigenden Fehlerquellen und ihrer Korrektur liefern beispielsweise Itten et al. (1992), Hill (1993a) oder Pala und Pons (1995).

Innerhalb der Verarbeitungskette von Landsat-Aufnahmen erfahren die Satellitendaten eine standardisierte Vorprozessierung. Eine vollständige Beschreibung von der Datenaufzeichnung bis zum vertriebsfertigen Produkt findet sich in den Nutzerhandbüchern des USGS (1979) für Landsat-MSS bzw. USGS und NOAA (1984) für Landsat-TM. Die Vorverarbeitung des Daten-Providers beinhaltet bei der Bestellung systemkorrigierter Szenen die Korrektur folgender Fehler<sup>17</sup>:

- Verzerrungen durch die Erdrotation
- Pixelgrößenvariation in Abhängigkeit von der Nadirentfernung (Panoramaeffekt)
- Verzerrungen aufgrund planarer Abbildung der gekrümmten Erdoberfläche
- Scherung der Scanlinien durch die Vorwärtsbewegung der Aufnahmeplattform (Scan time skew)
- veränderte Pixelgeometrie aufgrund Geschwindigkeitsvariationen des oszillierenden Scanspiegels
- Variationen der Plattformgeschwindigkeit und -lage (Höhe über Grund; Roll-, Nick- und Gierbewegungen)
- geometrische Ungenauigkeiten aufgrund der verschiedenen Detektorebenen

Das Ergebnis dieser Vorverarbeitung ist eine Space-Oblique-Mercator-Projektion, die für Landsat-TM zu einer weitgehend planaren Abbildung führt. In Bezug auf Landsat-MSS muss zwischen Aufnahmen der verschiedenen Plattformen unterschieden werden. MSS-Daten der neueren Plattformen Landsat-4 und Landsat-5 unterliegen den gleichen Orbitparametern und bahngeometrischen Korrekturverfahren wie die entsprechenden TM-Daten. Hingegen hängt die Güte der Abbildungsgeometrie bei Aufnahmen der früheren Landsat-MSS-Generationen

---

<sup>17</sup> Daten des Landsat-TM können auch geometrisch korrigiert geordert werden. Mögliche Bearbeitungsstufen greifen entweder lediglich auf die Systempositionsdaten zurück (Level A), beinhalten eine passpunktgestützte Korrektur (Level B) oder Passpunkte und Höhenmodell (Level C). Dem Endbenutzer entgeht somit allerdings die Kontrolle über die zur Korrektur eingesetzten Hilfsdaten und damit über die Qualität des Ergebnisses. Darüber hinaus ist die Bestellung vorkorrigierter Daten mit erheblichen Zusatzkosten verbunden.

maßgeblich von der Plattformstabilität zum jeweiligen Aufnahmezeitpunkt ab (Welch et al. 1995).

Die geometrische Transformation und Anpassung an ein Landeskoordinatensystem geschieht in der Regel mittels einer empirischen Korrektur auf Basis bekannter Kartenkoordinaten, sogenannter Ground Control Points (GCPs). Zwischen den GCPs und ihren korrespondierenden Punkten im Bild wird eine Transferfunktion berechnet, die in Abhängigkeit von den geometrischen Eigenschaften des Satellitenbildes verschiedene Ausprägungen annehmen kann: vom linearen Bezug, über quadratische Funktionen hin zu Polynomen höherer Ordnung. Bezogen auf Kreta tritt zudem das Problem nicht-systematischer Verzerrungen in Abhängigkeit vom Relief auf, so dass eine reliefabhängige Korrektur notwendig wird. Das Resamplingverfahren bestimmt schließlich die Art und Weise, in der die Originalmatrix in eine neue räumliche Struktur überführt wird. Im vorliegenden Beispiel wurden sämtliche Datensätze und abgeleitete Informationen auf die Koordinatengrundlage des in Kapitel 5 beschriebenen SPOT-Orthophotos bezogen, welches eine geometrisch exakte Grundlage darstellte.

Zur Weiterverarbeitung der Datensätze des Landsat-MSS war zudem eine Korrektur der geometrischen Auflösungsunterschiede in horizontaler und vertikaler Richtung notwendig (Deconvolution). Durch das systembedingte Oversampling bei Landsat-MSS liegen die Rohdaten als geometrische Elemente von ungefähr  $79 \times 57 \text{ m}^2$  vor (aspect-ratio-distortion), so dass erst die Deconvolution die tatsächliche Bildgeometrie mit Pixelintegralen von  $79 \times 79 \text{ m}^2$  herstellt<sup>18</sup>. In der Bildschirmdarstellung wird dieser Effekt durch die Eliminierung der auffälligen Überdehnung eines Datensatzes in Ost-West-Richtung deutlich (Abbildung 6.1).

Vor der Entzerrung der Daten empfiehlt sich eine visuelle Kontrolle, um gegebenenfalls Aufzeichnungsfehler frühzeitig aufzudecken, da sich eine Reihe von Datenfehlern nur vor der geometrischen Entzerrung sinnvoll berichtigen lässt<sup>19</sup>. Bei den gelegentlich auftretenden Fehlpixeln und Fehlzeilen handelt es sich meist um extrem kurze Ausfälle in der Aufzeichnung einer Scanlinie oder bei der Funkübertragung der Daten zur Empfangsstation. Daraus resultieren deutlich hervortretende Pixel- oder Bildzeilenbereiche mit zufälliger Grauwerte Verteilung, die leicht zu identifizieren und korrigieren sind. Einzelpixel lassen sich durch einen lokal eingesetzten Medianfilter ersetzen. Handelt es sich um ganze oder teilweise Fehlzeilen erfolgt die arithmetische Mittelwertbildung zwischen vor- und nachfolgender Scanzeile.

---

<sup>18</sup> Lediglich die MSS-Szene des Jahres 1972 wurde vor Auslieferung durch EOSAT schon einer Deconvolution unterzogen (vgl. Kap. 5).

<sup>19</sup> In diesem Zusammenhang fällt auf, dass die Datenqualität des Landsat-TM-5 zumindest seit Mitte der 90er Jahre zurückgeht. Das Striping der 16-Zeilen-Blöcke nimmt augenscheinlich zu. Der gleiche Effekt tritt auch in TM-Szenen anderer Arbeitsgebiete auf, so dass hier auf eine verstärkte Degradation des Sensors nach der extrem langen Laufzeit von 13 Jahren geschlossen werden muss.



All diese Verfahren rekonstruieren nicht die ursprüngliche Radiometrie der fehlerhaften Daten, minimieren jedoch augenscheinliche Artefakte bei der nachfolgenden Datenverarbeitung. Liegen die Fehlpixel innerhalb homogener Flächen, so kann von einer hinreichend genauen Annäherung an die tatsächliche Signatur ausgegangen werden. Selbst in heterogenen Gebieten liegt aufgrund der Mischpixelkomponente benachbarter Bildelemente meist eine deutliche Autokorrelation der Daten vor, so dass bei gestörten Einzelpixeln oder einzelnen Zeilen die Korrektur zu guten Ergebnissen führt.

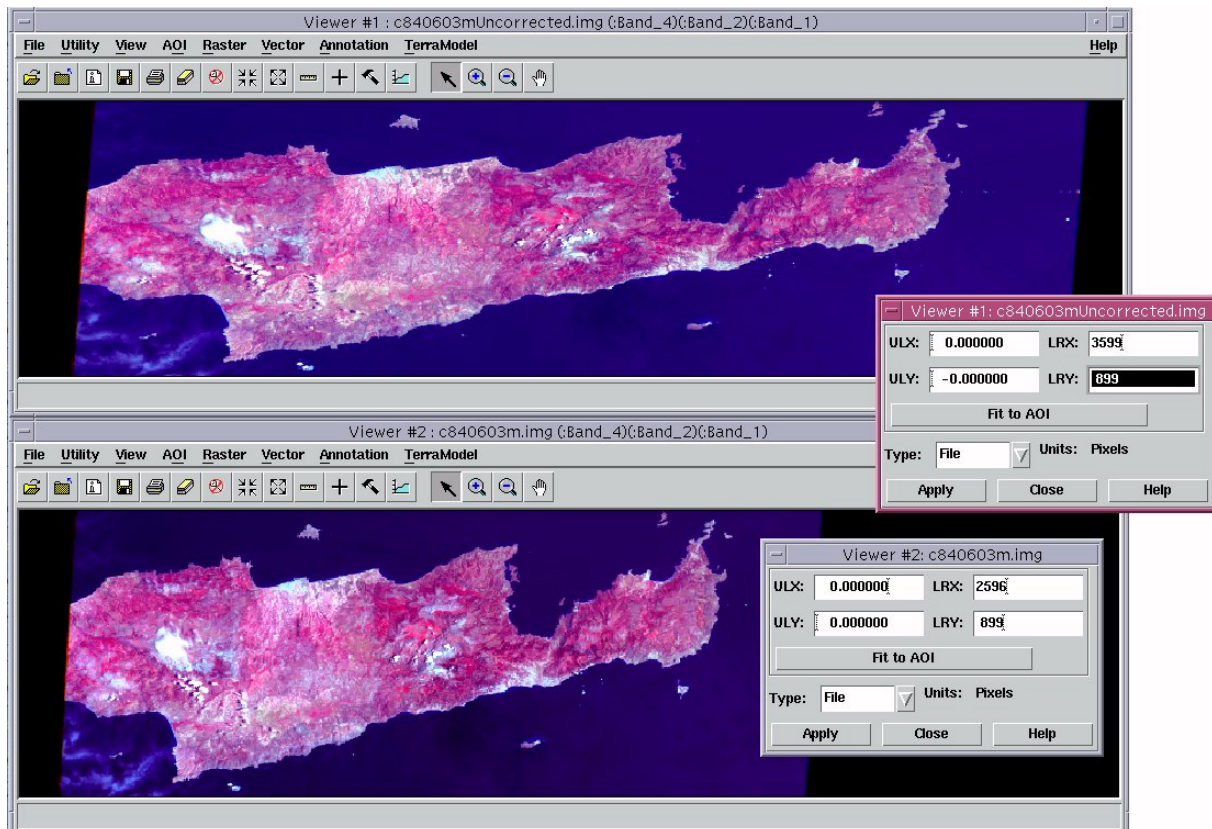


Abbildung 6.1: Landsat-MSS-Szene des Jahres 1984 vor und nach der Deconvolution

## 6.1 GCP-Bestimmung, Polynomauswahl und Restfehlerbewertung

Der erste Schritt zur geometrischen Korrektur von Satellitendaten unter Verwendung eines Polynomansatzes stellt die Passpunktbestimmung dar. Prioritär ist hierbei die gute Identifizierbarkeit der Punkte im Referenz-, wie auch im zu referenzierenden Datensatz. Als Referenz können gleichermaßen Karten, Orthophotos, Orthosatellitenbilder oder GPS-Messungen dienen. Die Mindestanzahl der zur geometrischen Korrektur benötigten Kartenkoordinaten richtet sich nach dem Grad des anzuwendenden Polynoms bei der Transformation. Als Gütemaß zur Beurteilung der Genauigkeit einer Transformation gelten Stärke und Verteilung der geometrischen Restfehler, die für jeden einzelnen GCP, für x- und y-Richtung und als Gesamtfehler interpretiert werden können.

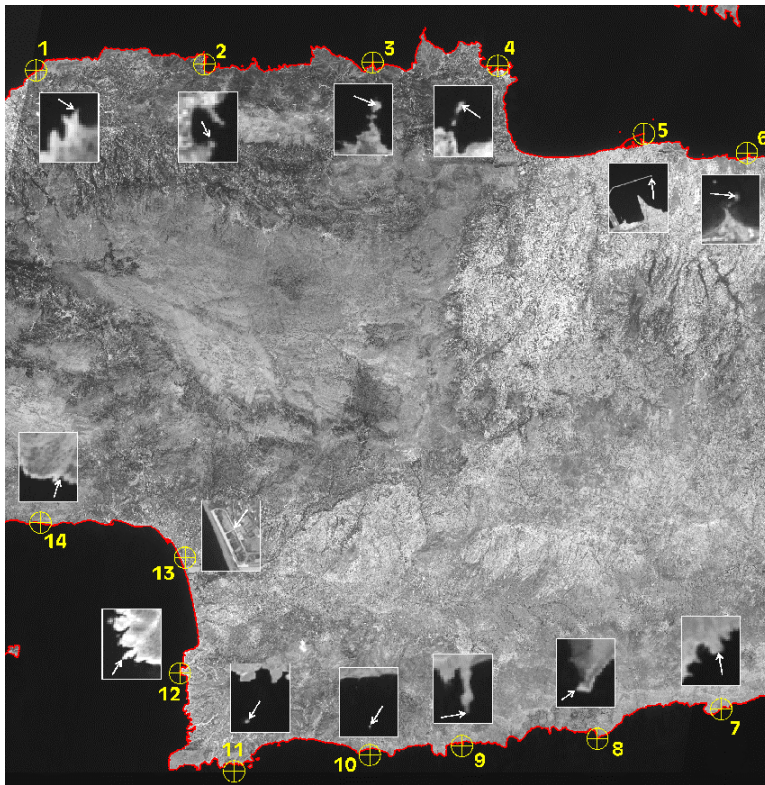


Abbildung 6.2: Lage der Passpunkte im Orthophoto

Spielt die Geländehöhe, wie im vorliegenden Fall, eine entscheidende Rolle, müssen die Passpunkte vor der geometrischen Entzerrung individuell auf Meereshöheniveau korrigiert werden, um nicht schon während der Polynomberechnung einen reliefbedingten Fehler zu induzieren. Es erfolgt also eine scanwinkel- und geländehöhenabhängige Korrektur der GCP-Positionen (vgl. Kap. 6.2). Im Fall Zentralkretas war es möglich, eine effektive Alternativmethode anzuwenden, die diesen Zwischenschritt obsolet machte: Die Ost-West-Ausdehnung der Insel und die durchgängige Küstenlinie im betrachteten Bildausschnitt ermöglichten die Auswahl regelmäßig über den Datensatz verteilter Passpunkte entlang der kontrastreichen Grenzlinie zwischen Wasser und Festland. Die Lage auf Normalnull und die gute Identifizierbarkeit der GCPs ergänzten sich somit ideal.

Für jede Szene wurden 14 Passpunkte entlang der Nord- und Südküste identifiziert, die eindeutig ihren korrespondierenden Positionen im Orthophoto zugeordnet werden konnten (Hostert et al. 1997). Die geringe Anzahl an GCPs ist aufgrund der hohen Plattform- und Sensorstabilität bei Landsat-TM und -MSS als vollkommen ausreichend anzusehen (Welch et al. 1985). Der hohe Kontrast entlang der Küste ermöglichte die Identifizierung identischer Punkte in allen Szenen, wodurch die Vergleichbarkeit der Ergebnisse nochmals verbessert wurde (Abbildung 6.2). Auf Grundlage dieser Koordinatenpaare war eine Beurteilung des Restfehlers unter Annahme verschiedener Polynome möglich. Zwölf Passpunktpaare ermöglichen dabei theoretisch die Verwendung von Polynomen bis zur dritten Ordnung. Aufgrund der in Landsat-TM und -MSS-Daten auftretenden Lagefehler erscheint eine solche Vorgehensweise jedoch überflüssig. Bei Lagefehlern die mittels Translation und Rotation

berichtigt werden können, bietet sich eine Korrektur mit einem Polynom erster Ordnung an, wobei alle höherwertigen Fehlerkomponenten nicht als plattform- oder sensorbedingte Fehler angenommen, sondern durch die Topographie des aufgezeichneten Gebietes induziert werden.

*Tabelle 6.1: Polynome und Restfehler*

Jahr	Sensor	RMS			Polynom (x)			Polynom (y)		
		x	y	ges.	a0	a1	a2	b0	b1	b2
1972	MSS	0,2435	0,1961	0,3127	-3231,87	0,01731	-0,00272	69819,74	-0,00238	-0,01727
1977	MSS	0,2284	0,1963	0,3011	-2406,99	0,01254	-0,00189	50039,35	-0,00180	-0,01226
1979	MSS	0,2483	0,2241	0,3345	-2963,23	0,01248	-0,00186	50112,28	-0,00181	-0,01234
1981	MSS	0,2435	0,2429	0,3439	-2361,13	0,01251	-0,00188	50371,97	-0,00190	-0,01233
1983	MSS	0,2513	0,2395	0,3472	-3674,55	0,01250	-0,00162	48002,29	-0,00154	-0,01185
1984	MSS	0,3188	0,2124	0,2770	-3756,38	0,01247	-0,00161	48088,23	-0,00155	-0,01186
1984	TM	0,2886	0,2504	0,3821	-10052,59	0,03302	-0,00430	134110,63	-0,00433	-0,03303
1986	TM	0,3621	0,2003	0,4138	-10142,94	0,03300	-0,00427	134137,85	-0,00430	-0,03304
1987	TM	0,2936	0,1988	0,3546	-10090,47	0,03298	-0,00431	134156,15	-0,00433	-0,03304
1988	MSS	0,1797	0,1781	0,2531	-3919,90	0,01243	-0,00160	48077,78	-0,00154	-0,01186
1988	TM	0,2606	0,2180	0,3398	-10076,90	0,03300	-0,00429	134191,05	-0,00432	-0,03304
1989	TM	0,3362	0,2253	0,4048	-10175,90	0,03304	-0,00427	134208,74	-0,00430	-0,03303
1991	TM	0,2536	0,2065	0,3271	-9955,49	0,03298	-0,00431	134174,44	-0,00430	-0,03303
1993	TM	0,3657	0,2467	0,4411	-10064,88	0,03301	-0,00429	134170,83	-0,00432	-0,03303
1994	TM	0,1385	0,2231	0,2626	-10122,38	0,03301	-0,00428	134175,79	-0,00431	-0,03304
1996	TM	0,1345	0,2378	0,2732	-9958,55	0,03299	-0,00430	133695,87	-0,00435	-0,03304

Die jeweilige Polynomfunktion ersten Grades resultierte in mittleren quadratischen Restfehlern unter 0,5 Pixel in x- und y-Richtung für alle betrachteten Datensätze (Tabelle 6.1). Darüber hinaus betrug der Fehler für keinen einzelnen Passpunkt über ein Pixel, so dass von einer nahezu verzerrungsfreien Abbildung der Erdoberfläche ausgegangen werden kann. Die somit gefundenen Transferfunktionen dienen im Folgenden als Grundlage der geometrischen Entzerrung, wobei zunächst der Einfluss der Topographie für jedes Pixel individuell abzuleiten ist.

## 6.2 Reliefkorrektur und Resampling

Wie schon eine Korrektur der GCPs um ihren reliefbedingten Lageversatz durchgeführt wurde, muss bei Topographieeinfluss auch der gesamte Datensatz mit Hilfe eines DHM um den reliefbedingten Versatz korrigiert werden. Der Grund für diese Verfahrensweise ist der reliefbedingte Pixelversatz, der in Zeilenscannerdaten mit zunehmender Nadirentfernung und wachsender Geländehöhe zunimmt. Für jede einzelne Zeile weisen solche Daten ein dem Luftbild vergleichbares geometrisches Verhalten auf, so dass in diesem Kontext ein zeilenweiser radialer Bildpunktversatz angenommen werden kann.

Die mathematische Beziehung zwischen Flughöhe der Aufnahmeplattform ( $h_{sat}$ ), Geländehöhe eines betrachteten Flächenelements ( $h$ ) und Scanwinkel des Sensors bei der Aufnahme eines Geländepunktes ( $\theta$ ) bzw. Nadirentfernung dieses Geländepunktes ( $x$ ) lautet

$$\Delta x = \frac{h \cdot x}{h_{sat}} \quad \text{bzw.} \quad \Delta x = h \cdot \tan(\Theta) \quad , \quad \text{Gleichung 6.1}$$

so dass der Pixelversatz  $\Delta x$  für jedes Bildelement unter Zuhilfenahme eines DHM problemlos berechnet werden kann (Abbildung 6.3).

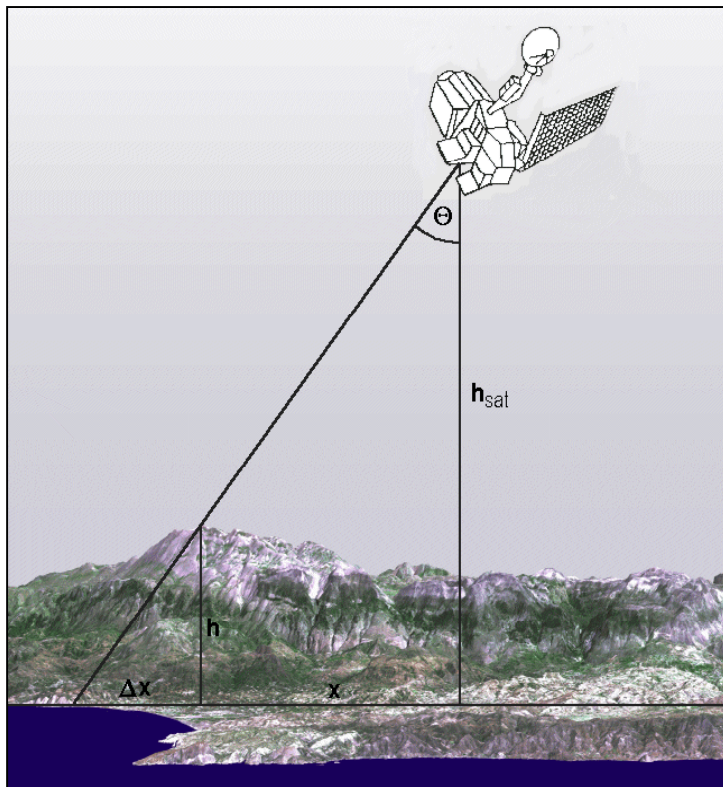


Abbildung 6.3:  
Topographiebedingter Pixelversatz

Konkret kann der Vorgang zur Berechnung der neuen Ausgabematrix also in folgende Schritte zerlegt werden:

- Ermittlung der Pixelposition  $p$  mittels der zuvor bestimmten Polynomfunktion

- Extraktion der Geländehöhe  $h$
- Bestimmung der Nadirentfernung  $x$
- Berechnung des Pixelversatzes  $\Delta x$  in Abhängigkeit von Nadirentfernung, Geländehöhe und Orbit der Plattform
- Korrektur der polynombestimmten Pixelposition um  $\Delta x$
- Resampling des Bildpunktes an der Position  $x$

Zur Berechnung der neuen Grauwerte wurde ein indirektes Cubic Convolution Resampling verwendet. Dadurch wurden deutliche radiometrische Abweichungen vom Ausgangsbild vermieden und gleichzeitig die geometrischen Eigenschaften der Bildobjekte weitgehend bewahrt.

### 6.3 Validierung der geometrischen Korrektur

Die in Kapitel 6.1 bestimmten RMS-Werte sind ebenso wie daraus abgeleitete weitere Maßzahlen, beispielsweise der Kappa-Koeffizient, zur Beschreibung der Genauigkeit einer geometrischen Korrektur nur bedingt geeignet. Zwar kann bei Landsat-TM-Daten aufgrund ihrer geometrischen Eigenschaften von einer linear korrelierten Fehlerkomponente in allen Bildbereichen ausgegangen werden, aber streng genommen gelten RMS-Werte nur für die Positionen der Passpunkte, anhand derer das Polynom zur geometrischen Korrektur bestimmt wurde. Weiterhin kommt als zweiter qualitätsdeterminierender Faktor die Genauigkeit des DHM hinzu.

Aus diesem Grund wurde eine 3-stufige Qualitätskontrolle durchgeführt, welche sowohl die geometrische Vergleichbarkeit der Daten untereinander, als auch mit anderen Datenebenen im GIS verifizierte. Zunächst wurde ein unabhängiger Passpunktdatensatz erstellt, der Geländepunkte aus dem gesamten Bildausschnitt und über sämtliche Höhenstufen mit Schwerpunkt auf den kritischen, also nadirfernen und hoch gelegenen Regionen, beinhaltete. Anhand der Abweichungen von Soll- und Ist-Koordinaten war eine sinnvolle Bewertung des Restfehlers möglich. Die Überprüfung der geometrischen Genauigkeit wurde anhand der Beurteilung von Gesamtfehler, Einzelfehler, richtungsabhängiger Fehlerkomponente und Höhenabhängigkeit des Fehlers vorgenommen (Abbildung 6.4).

Aufgrund der topographiegestützten geometrischen Korrektur reduzierte sich die mittlere Abweichung der Kontrollpunkte von 2,5 Pixel (75 m) auf ca. 0,3 Pixel (10 m). Gleichzeitig sank der maximale Versatz von über 7,5 Pixel (225 m) auf etwas mehr als ein Pixel (39 m). Während ohne Topographiekorrektur sämtliche Abweichungen eine deutliche und weit überwiegende Fehlerkomponente in x-Richtung aufwiesen, war dieser Zusammenhang nach Einbeziehung des digitalen Höhenmodells nicht mehr feststellbar. Zugleich wurde der zuvor

offenkundige Zusammenhang zwischen absoluter Geländehöhe und Kontrollpunktversatz (in Abhängigkeit von der Nadirentfernung) aufgehoben.

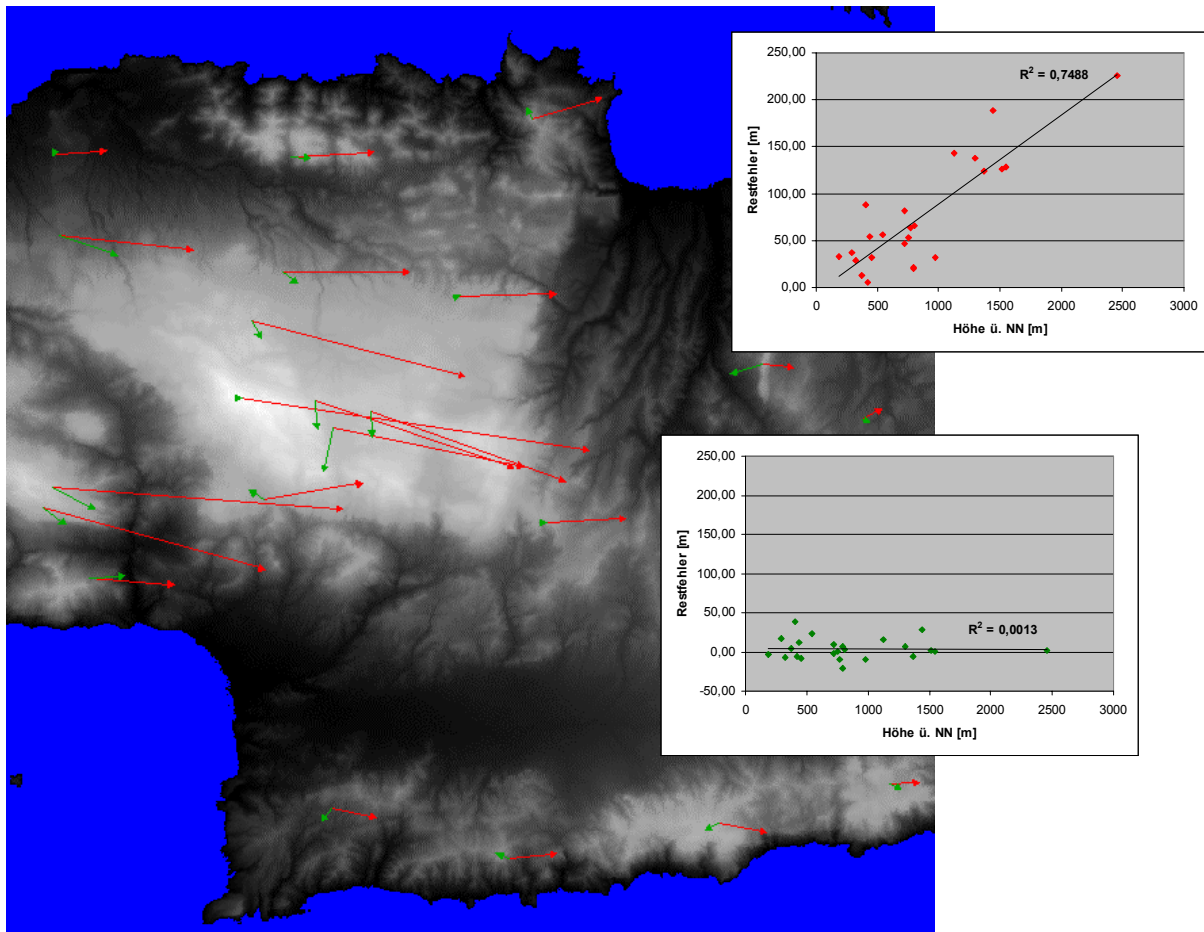


Abbildung 6.4: Restfehlervektoren und Zusammenhang zwischen Geländehöhe und Kontrollpunktversatz vor (rot) und nach (grün) DHM-gestützter geometrischer Korrektur

Darüber hinaus wurden markante georeferenzierte Kartenobjekte, in diesem Fall die Straße von Skinakas nach Nida und die deutlich auszumachende Umgrenzung der Polje von Nida, den entzerrten Satellitendaten überlagert (Abbildung 6.5). Die visuelle Überprüfung der Lagegenauigkeit vor und nach Einbeziehung des DHM verdeutlicht den Einfluss des Reliefs auf die exakte Pixelpositionierung und unterstreicht die Qualität der Topographiekorrektur.

Um die Vergleichbarkeit der multitemporalen Serie sicherzustellen, wurden die geometrisch korrigierten Satellitenszenen dem SPOT-Orthophoto überlagert und mit hoher Wiederholfrequenz ein- und ausgeblendet. Abweichungen in der Pixelgeometrie gegenüber der Referenz treten bei dieser Vorgehensweise deutlich hervor und ermöglichen die Identifizierung unzureichend korrigierter Bildausschnitte. Insbesondere in den Bereichen des Psiloritis wären in diesem Fall offenkundige Abweichungen zu erwarten. Bei der Überprüfung traten jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen Referenz und korrigierter Szene auf. Die Rot-Grün-Darstellung des zentralen Gebirgsmassivs verdeutlicht die Auswirkung der reliefbezogenen geometrischen Korrektur. Die Gegenüberstellung zeigt

das Entzerrungsergebnis unter Einbeziehung der Topographie einerseits und mit Standardverfahren andererseits.

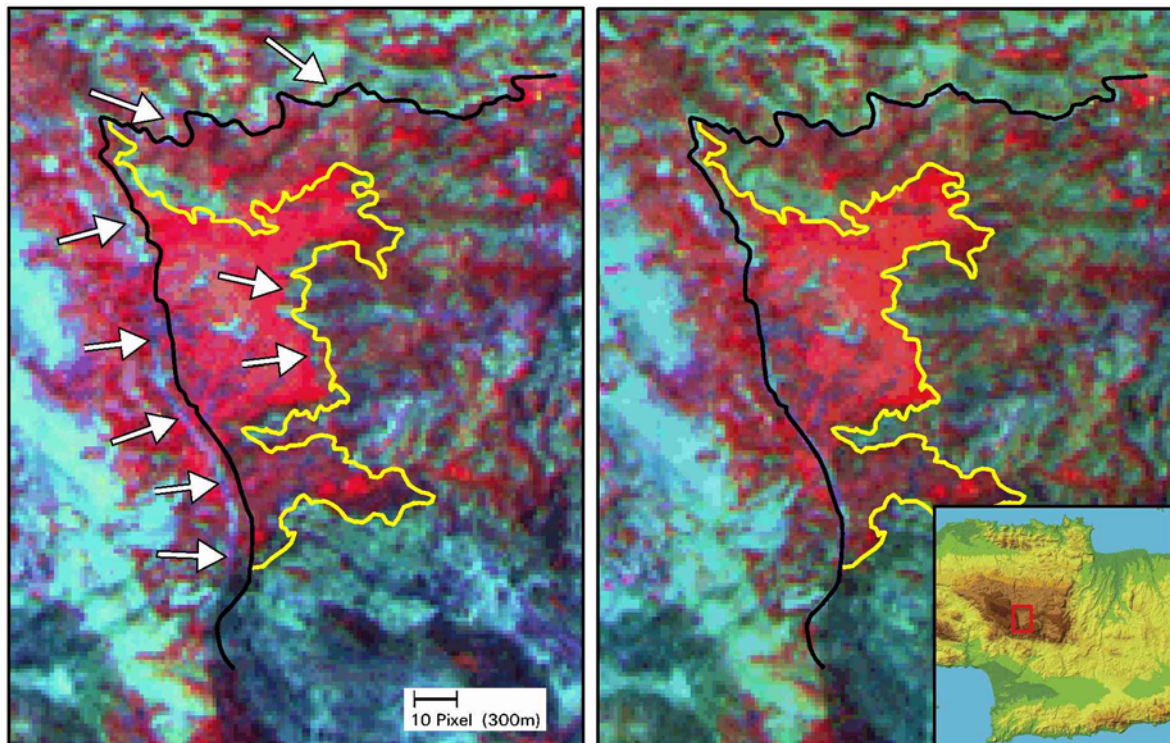


Abbildung 6.5: Überlagerung linearer Elemente aus der topographischen Karte mit geometrisch korrigierten Satellitendaten (li.: ohne DHM, re.: mit DHM; gelb: Poljenrand, schwarz: Straße Nida-Skinakas)

Einschränkend ist jedoch zu bemerken, dass in einigen Bereichen des automatisch erstellten DHM aus SPOT-PAN-Stereodaten deutliche Fehler wahrzunehmen sind. Bei der geometrischen Korrektur der Satellitendaten sind diese meist vernachlässigbar, da sie entweder niedrig gelegene Geländeauschnitte betreffen, oder aber in ihrem Ausmaß keine signifikante Auswirkung auf die extrahierte, absolute Höhenangabe haben. Diese potentielle Fehlerquelle wird im Rahmen der radiometrischen Korrektur allerdings eine entscheidendere Rolle spielen (vgl. Kap. 7).

## 7 Radiometrische Korrektur

Die Berechnung von Reflexionswerten stellt den entscheidenden Vorverarbeitungsschritt zur quantitativen Auswertung von Satellitendaten dar. Während die Anpassung der Bildgeometrie seit Beginn des digitalen Fernerkundungszeitalters standardisiert durchgeführt wurde, spielte die im Folgenden beschriebene Vorgehensweise zur radiometrischen Korrektur in der digitalen Satellitenbilddauswertung zunächst nur eine untergeordnete Rolle. Forschungsschwerpunkte lagen bis Anfang der 80er Jahre eher auf dem Gebiet der ingenieur-technischen Perfektionierung von Aufzeichnungssystemen. Inhaltlich fand eine Konzentration auf Bildanalyseverfahren zur thematischen Interpretation statt, wie beispielsweise Klassifikatoren, Indizes oder Transformationstechniken. Eine absolute radiometrische Korrektur und die Betrachtung quantitativer Parameter war in diesem Zusammenhang häufig nicht gefordert oder nachrangig (Price 1987; Dinguirard und Slater 1999).

Richtungsweisend für die operationelle radiometrische Vorverarbeitung von Satellitendaten waren vor allem die Arbeiten von Tanré et al. (1986, 1990). Der in diesem Zusammenhang entwickelte Computercode zur „Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum“ (5S) ermöglicht die quantitative Beschreibung des am Satelliten gemessenen Signals in Abhängigkeit der zum Zeitpunkt des Überflugs herrschenden atmosphärischen Bedingungen und der Reflexion des beobachteten Objekts<sup>20</sup>. Die in den folgenden Kapiteln beschriebenen radiometrischen Transfergleichungen bauen im Wesentlichen auf einem von Hill und Sturm (1991) modifizierten Ansatz des 5S-Code auf, der um die Korrektur der topographisch induzierten Variation des Reflexionssignals erweitert wurde (Hill et al. 1995b).

Bei fehlender Information zur Sensorkalibrierung wurde alternativ eine empirische (relative) radiometrische Korrektur durchgeführt (Hill und Aifadopoulou 1990; Elvidge et al. 1995; Smith und Milton 1999). So war es anhand der Kombination empirischer und parametrischer Verfahren möglich, MSS-Daten verschiedener Landsat-Plattformen in eine 25-jährige Zeitreihe mit TM-Daten zu verknüpfen. Die Satellitenplattformen Landsat-4 und Landsat-5 mit der jeweils gemeinsamen Implementierung von MSS und TM bieten dabei eine Kombination von in Bauart und Aufnahmecharakteristika ähnlichen Sensoren, die eine retrospektive Verlängerung der Zeitreihe bis in die 70er Jahre möglich macht.

---

<sup>20</sup> Vermote et al. (1994, 1997) entwickelten darauf aufbauend die Umsetzung zur „Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum“ (6S), die auf den gleichen grundsätzlichen Annahmen wie 5S basiert, jedoch weitere Entwicklungen, wie beispielsweise die Einbeziehung von Sensorflughöhe und Geländehöhe, nicht-Lambert'sches Oberflächenverhalten, weitere absorbierende Gase und weiterentwickelte Aerosol- und Rayleigh-Streukriterien beinhaltet.



## 7.1 Parametrische Korrektur

Die am Sensor aufgezeichnete, kanalweise Strahldichte lässt Rückschlüsse auf das jeweils beobachtete Objekt zu und ermöglicht über eine Reihe von Auswertungsverfahren die Ableitung weiterer Informationen. Die Erdbeobachtung mit Satellitendaten ist allerdings einschränkenden Rahmenbedingungen unterworfen, die eine radiometrische Vorverarbeitung des aufgezeichneten Signals unerlässlich machen.

Wie bei allen Fernerkundungsverfahren muss zunächst eine eindeutige Beziehung zwischen aufgezeichneter Signalstärke, quantisiert in sogenannten „digital numbers“ (DN), und der damit einhergehenden Strahldichte etabliert werden. Die sensorabhängige Kalibrierung unterliegt in der Regel einem zeitlichen Wandel. Unter Weltraumbedingungen ist die Erfassung und kontinuierliche Verfolgung der Sensordegradation demnach eine Voraussetzung zur quantitativen Auswertung fernerkundlicher Daten (vgl. Kap. 7.1.1).

Die gemessenen Strahldichten sind von der Atmosphäre beeinflusst und müssen somit um deren Absorptions- und Streucharakteristika korrigiert werden. Im Fall einer multitemporalen Auswertung fernerkundlicher Daten wird das Atmosphärenmodell Anpassungen an die Bedingungen zum jeweiligen Aufnahmezeitpunkt erfahren müssen. Nur selten treten an einem Ort zu verschiedenen Zeitpunkten des Jahres oder auch zu Aufnahmezeitpunkten in verschiedenen Jahren die gleichen atmosphärischen Bedingungen auf. Dementsprechend wird auch die am Sensor gemessene Strahldichte den jeweils aktuellen atmosphärischen Streu- und Absorptionsbedingungen unterliegen. Zudem bedingen auch die bidirektionalen Eigenschaften des beobachteten Objekts das zum Sensor reflektierte Signal, welches nochmals über die atmosphärenabhängige Interaktion mit der Umgebung variiert wird (vgl. Kap. 7.1.2).

Durch die Einbeziehung eines digitalen Höhenmodells können schließlich auch topographiebedingte Variationen korrigiert werden. In diesem Zusammenhang ist vor allem die korrekte Bestimmung der verschiedenen Einstrahlungskomponenten in Abhängigkeit von der Aufnahmekonstellation als vordringliches Problem zu behandeln. Obwohl die reliefabhängige Komponente einen integralen Teil der Atmosphärenkorrektur darstellt, wird sie aus Gründen der Übersichtlichkeit in einem gesonderten Kapitel erläutert (vgl. Kap. 7.1.3).

### 7.1.1 Sensorkalibrierung

Die Ergebnisse der passiven, satellitengestützten Erdbeobachtung mit optischen Sensoren sind in ihrer Qualität maßgeblich von der Aufzeichnungsgenauigkeit und Reproduzierbarkeit der Strahldichte bestimmt. Da systeminhärente Fehlerquellen und die Sensordegradation mit der Zeit nur begrenzt verhindert oder gesteuert werden können, hängt die Genauigkeit der Aufzeichnung letztlich von der Fähigkeit ab, Veränderungen im Aufzeichnungssystem zu registrieren und nach Möglichkeit auszugleichen. Unterbleibt eine diesbezügliche Anpassung,

sind die Strahldichtemessungen zu verschiedenen Zeitpunkten aufgrund der Abschwächung des aufgezeichneten Signals am Sensor nicht mehr vergleichbar. Im Fall des Landsat-5 TM existieren für die relativ lange Betriebsdauer des Aufnahmesystems eine Reihe von Untersuchungen, von der absoluten Laborkalibrierung vor dem Start im Jahre 1984 (USGS und NOAA 1984), bis hin zu letzten in-flight-Kalibrierungen Mitte und Ende der 90er Jahre (Moran et al. 1995; Thome et al. 1997a, b; Teillet et al. 2001).

Die Definition einer Übertragungsfunktion zwischen quantisierten Grauwerten an einem Detektor oder einer Detektoranordnung und der zugehörigen physikalischen Größe, beispielsweise der am Sensor empfangenen Strahldichte, bezeichnet man als „Sensorkalibrierung“. Für die sechs optischen Kanäle des Landsat-5 TM bedeutet dies dementsprechend die Ableitung von sechs kanalweisen Übertragungsfunktionen, wobei von einem linearen Zusammenhang zwischen Signalstärke beim Auslesen des Detektors ( $DN$ ) und dem über den Integrationszeitraum aufgetretenen Strahlungsfluss, quantisiert als Strahldichte ( $L_\lambda$ ), ausgegangen werden kann (USGS 1979; USGS und NOAA 1984)<sup>21</sup>.

Dementsprechend werden kanalweise Kalibrierfaktoren in Abhängigkeit vom jeweiligen Dynamikbereich eines Kanals abgeleitet:

$$L_\lambda = L_{\min,\lambda} + \left( \frac{L_{\max,\lambda} - L_{\min,\lambda}}{DN_{\max} - DN_{\min}} \right) \cdot DN \quad \text{Gleichung 7.1}$$

Vereinfacht ausgedrückt reduziert sich der Zusammenhang auf eine additive und eine multiplikative Komponente, so dass eine Anpassung nach dem Schema

$$L_\lambda = a + b \cdot DN \quad \text{Gleichung 7.2}$$

erfolgt. Der Einfluss der additiven Komponente bleibt in diesem Zusammenhang marginal, da der Dunkelstrom am Sensor geringe Werte aufweist (Brockmann 1992).

Zum Zeitpunkt der radiometrischen Datenvorverarbeitung lagen in-flight-Kalibrierungen der als Referenz genutzten White Sands Missile Range (New Mexico) nur bis 1993 und in unregelmäßigen Intervallen vor (Thome et al. 1993). Daher wurden auch Untersuchungen der Sensor-Interkalibrierung von Landsat-TM zu SPOT für die Kanäle 2, 3 und 4 des Jahres 1989 genutzt (Gu et al. 1992). Weiterhin gingen Untersuchungen von Reflexionsmessungen an homogenen Betonoberflächen am Flughafen Luxemburg in die Kalibrierung ein (Hill 1996). Für 1991 und 1994 standen empirische Untersuchungen von Signatúrauswertungen über

---

<sup>21</sup>Prinzipiell kann für jeden einzelnen Detektor des Sensors eine Übertragungsfunktion berechnet werden. Diese beispielsweise für ozeanische Fragestellungen sinnvolle Vorgehensweise spielt allerdings bei der Betrachtung heterogener Landoberflächen, aufgrund der geringen Variabilität zwischen den jeweiligen Detektoren, eine zu vernachlässigende Rolle (Brockmann 1992).

homogenen Forstflächen aus Untersuchungen am Lehrstuhl für Fernerkundung an der Universität Trier (FEUT) zur Verfügung.

Bei in-flight Kalibrierungen verschiedener Arbeitsgruppen zeigten sich neben Trends zur verstärkten Degradation, beispielsweise nach dem Start und zwischen 1988 und 1992, auch Phasen relativer Stabilität, wie von 1984 bis 1988 (Slater et al. 1986, 1987; Thome et al. 1993). Während die generelle Entwicklung die abnehmende Sensitivität des Sensors mit der Zeit verdeutlicht, suggerierten einige Messungen eine temporäre Regenerierung der Sensorik. Da bodengestützte Kalibrierverfahren allerdings Unsicherheitsmargen von ca. 5 % – vor allem bezüglich der Reflexionsmessungen, Wasserdampfschätzungen und Aerosolbestimmung – aufweisen (Biggar et al. 1994; Thome et al. 1997b), wurde auf die Berücksichtigung widersprüchlicher Messergebnisse bei der Erstellung der zeitabhängigen Kalibrierfunktion verzichtet (Abbildung 7.1).

Da die Degradation der Sensoren keinen kontinuierlichen Verlauf mit der Zeit aufweist, ist die Anwendung linearer Gleichungen zur Ableitung von Kalibrierfaktoren für jeden beliebigen Aufnahmezeitpunkt nur bedingt zielführend. In Weiterentwicklung des Ansatzes von Teillet und Fedosejevs (1995) wurde daher eine stückweise lineare Regression zur phasenweisen Anpassung der Kalibrierfaktoren durchgeführt. Zur operationellen Vorverarbeitung der Satellitendaten wurden, entsprechend der erstellten Funktion, kanalweise Halbjahreswerte der Kalibrierung abgeleitet. Für den Zeitraum nach 1994 wurden die letzten bekannten Kalibrierfaktoren von 1994 übernommen, womit eine gewisse Unsicherheit der Datenkalibrierung von 1996 bestand. Die im Laufe der Strahlungstransferberechnungen ermittelten Reflexionswerte invarianter Flächen bestätigte jedoch die Kalibrierung dieses Datensatzes innerhalb der zu erwartenden Unsicherheitsmargen (vgl. Kap. 7.3)

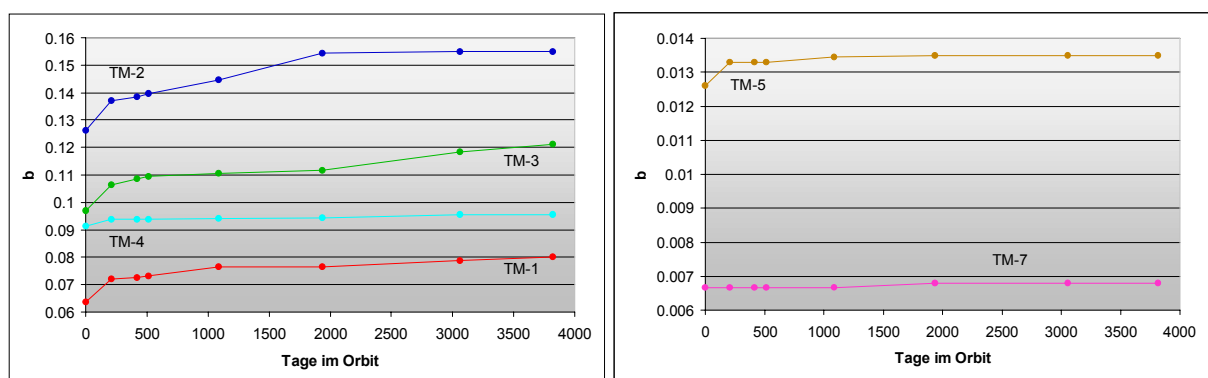


Abbildung 7.1: Zeitabhängige, phasenweise Kalibrierfunktion für Landsat-5 TM (berücksichtigt wurden Messergebnisse aus folgenden Publikationen: Markham und Barker 1986; Slater et al. 1986, 1987; Gu 1992; Thome et al. 1993; Hill 1993, 1996)

Von Teillet et al. (2001) publizierte Messungen für die Jahre 1994 (absolute Kalibrierung) und 1999 (absolute und relative Kalibrierung zu Landsat-7 ETM+) bestätigen die verwendeten Kalibrierfaktoren. Lediglich für die Reflexionswerte um 660 nm (Kanal 3) ergeben

sich Unsicherheiten in der Größenordnung von ungefähr 7 %. Die absoluten Reflexionswerte überschreiten in diesem Wellenlängenbereich selten 20 %, im Fall vitaler Vegetation liegen sie meist unter 5 %. Somit kann in der Regel von einer Unterschätzung der Reflexion im sichtbaren Rot von unter 1,5 % (absolut), für Vegetation von unter 0,5 % ausgegangen werden. Für künftige Anwendungen werden aus diesen Ergebnissen angepasste Kalibrierfaktoren für Daten ab dem Jahre 1994 zur Verfügung stehen.

### 7.1.2 Strahlungstransfer

Nach der Sensorkalibrierung können aus quantisierten Grauwerten die gemessenen Strahldichten berechnet werden. Mit Hilfe dieser Größe lässt sich die am Sensor gemessene Reflexion (equivalent at satellite reflectance,  $\rho^*$ ) als Verhältnisgröße aus aufgezeichneter Strahldichte und exoatmosphärischer Einstrahlung ableiten. Die solare Einstrahlung an der Atmosphärenobergrenze ( $E_0$ ) wird dabei in Abhängigkeit vom Kosinus des Sonnenzenitwinkels ( $\mu_s$ ) und der Entfernung zur Sonne ( $d$ ) variiert<sup>22</sup>:

$$\rho^* = \frac{\pi \cdot L}{E_0 \cdot \mu_s \cdot d} \quad \text{Gleichung 7.3}$$

Es gilt ein quadratischer Zusammenhang zwischen Entfernung der als punktförmig angenommenen Strahlungsquelle der Sonne und dem Strahlungsgewinn an einer betrachteten Atmosphärenobergrenze, so dass

$$d = au^{-2} \quad \text{Gleichung 7.4}$$

zutrifft, wobei die mittlere Distanz zwischen Sonne und Erde als eine astronomical unit ( $au$ ) bezeichnet wird.

Da  $\rho^*$  nur für den hypothetischen Fall einer völlig transparenten Atmosphäre der Reflexion am Erdboden entspricht, müssen atmosphärische Störeffekte eliminiert werden. Es müssen anhand eines Atmosphären- und Oberflächenmodells die Umgebungsbedingungen zum Zeitpunkt des Satellitenüberflugs rekonstruiert und invertiert werden. Zur Rekonstruktion einer Oberflächensignatur gilt es

- den Strahlungsgewinn an der Atmosphärenobergrenze zu definieren,
- die Veränderung der Strahlung beim Atmosphärendurchgang zum beobachteten Objekt zu erfassen,

---

<sup>22</sup> Die folgenden Darstellungen sind als spektrale (oder kanalweise) Betrachtungen zu verstehen. Aus Gründen der Übersicht wird auf eine entsprechende Denotation in den Gleichungen verzichtet.

- die Veränderung der Strahlung aufgrund ihrer Interaktion mit der Erdoberfläche zu modellieren und
- den Einfluss der Atmosphäre auf den Strahlungsfluss zum Sensor zu berücksichtigen.

Die dazu durchgeführten Korrekturen lehnen sich an die Arbeiten von Hill und Sturm (1991), Hill (1993a) und Hill et al. (1995b) an.

### 7.1.2.1 Vereinfachende Annahmen

Die Rekonstruktion des Strahlungstransfers durch die Atmosphäre und die Umsetzung verschiedener Strahlungsflüsse an der Erdoberfläche stellen einen komplexen Vorgang dar. Zur Korrektur atmosphärischer Störeinflüsse sind daher einige vereinfachende Annahmen sinnvoll, um eine operationelle Durchführung an Bilddatensätzen zu gewährleisten:

- Über den gesamten Bildausschnitt werden identische atmosphärische Störeinflüsse postuliert. Eine Bildsegmentierung in Bereiche unterschiedlicher atmosphärischer Bedingungen erfolgt nicht. Bei stabilen Wetterlagen trifft diese Kondition oft zu; jedoch können bei großen Bildausschnitten oder deutlichen Topographieunterschieden beispielsweise advective Luftströmungen oder Luv-Lee-Effekte zu inhomogenen Atmosphärenbedingungen führen.
- Weiterhin wird zur Korrektur atmosphärischer Störeinflüsse (vgl. Kap. 7.1.2.2 und 7.1.2.3) angenommen, dass alle Bildelemente in einer Ebene liegen. Bei Höhenunterschieden von Meereshöhe bis zum Gipfel des Psiloritis steigt unter dieser Voraussetzung der potentielle Schätzfehler mit zunehmender Geländehöhe (Hill 1993a). Allerdings liegen die Regionen in Höhen über 1800 m außerhalb der hier betrachteten Weidegebiete und sind somit vernachlässigbar (vgl. Kap. 7.3).

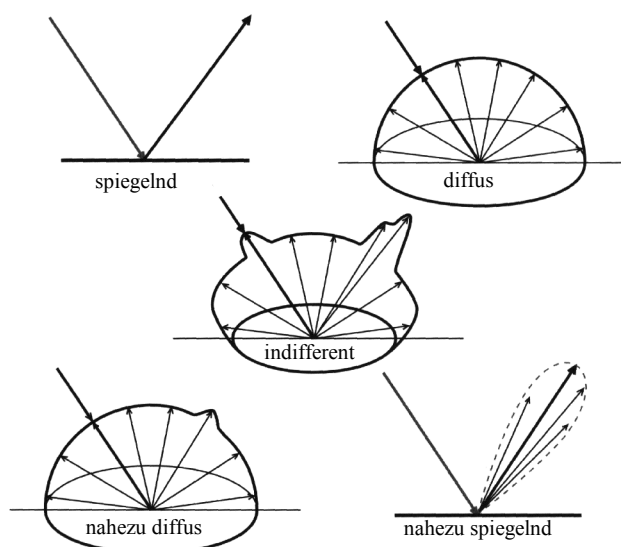


Abbildung 7.2: Typisierung der Reflexion (Schott 1997, verändert)

- Den Geländeoberflächen werden Lambert'sche Eigenschaften zugesprochen. Diese Annahme kann als eine sinnvolle Näherung betrachtet werden. Je nach Oberflächencharakteristika, Sonnenstand und Hangneigung kann das Reflexionsverhalten eines beobachteten Objekts allerdings deutlich davon abweichen (Abbildung 7.2). Beispielsweise bedingen verschiedene Vegetationstypen mehr oder minder stark ausgeprägte direktionelle Effekte (Guyot 1990). Da die jeweilige Landnutzungs-kategorie a priori in der Regel jedoch unbekannt ist, stellt sich eine individuelle Berücksichtigung der entsprechenden bidirektionellen Reflexionsfunktion (BRDF) als schwierig dar (Hill 1993a).
- Aufgrund des geringen Öffnungswinkels des TM-Sensors von  $\pm 7,5^\circ$  wird vereinfachend Nadirsicht für alle Bildelemente angenommen.
- Die Absorptionseigenschaften der Atmosphäre durch variable Gasanteile kann im Fall zeitgleicher Bodenmessungen, Sondenaufstiegsdaten oder der Auswertung von Daten, innerhalb der jeweiligen Absorptionsbanden aufzeichnender Satellitensysteme, rekonstruiert werden. Liegen solche Daten nicht vor, müssen Standardwerte angenommen werden. In Bezug auf die Landsat-Sensoren betrifft das mit der wichtigsten variablen Komponente, dem Wasserdampf, verbundene Fehlerpotential nahezu ausschließlich die Wellenlängenbereiche des Infrarot, vor allem entlang der Flanken von Absorptionsbanden im mittleren Infrarot (vgl. Kap. 7.1.2.2).

#### 7.1.2.2 Berechnung des Strahlungstransfers

Eine Reihe von Arbeiten haben sich mit der Reflexionsmodellierung von Objekten an der Erdoberfläche unter Berücksichtigung des störenden Atmosphäreinflusses beschäftigt. Der extraterrestrische Strahlungsgewinn in den Spektralbereichen des Landsat-TM ist innerhalb gewisser Genauigkeitsgrenzen bekannt und beispielsweise in Markham und Barker (1987b) tabelliert. Durch die quantitative Erfassung der atmosphärischen Interaktion mit der Strahlung (Tanré et al. 1990; Vermote et al. 1997) in Abhängigkeit von den Eigenschaften der Atmosphäre (Selby et al. 1978; Kneizys et al. 1980, 1988) kann das zu interpretierende Signal schließlich auf den von der Erdoberfläche zum Sensor zurückgesendeten Strahlungsanteil, die Reflexion, reduziert werden. Die Kombination der Einflussfaktoren zur Invertierung dieser Vorgänge wurde vielfach erfolgreich demonstriert, so beispielsweise von Royer et al. (1987), Hill und Sturm (1991), Itten et al. (1992), Hill (1993a, 1996) und Richter (1997, 1998).

Die am Sensor erfassten Strahldichten setzen sich aus Strahlungsanteilen der Atmosphäre, des beobachteten Objekts – im Folgenden kurz als „Target“ bezeichnet – und der Umgebung des Targets zusammen (Abbildung 7.3).

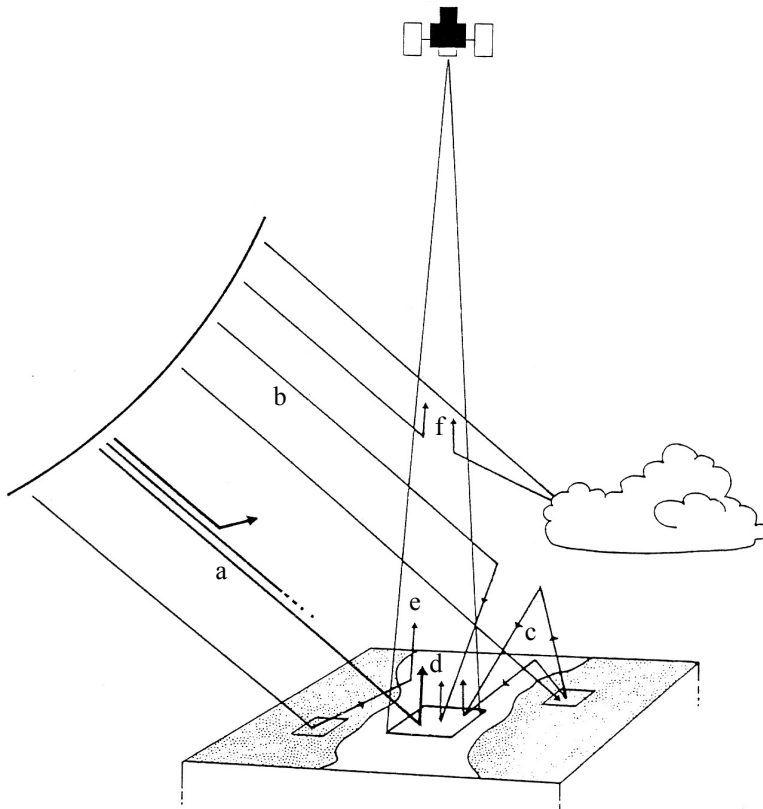


Abbildung 7.3: Strahlungsflüsse zwischen Sonne, Erde und Sensor (Tanré et al. 1985); Erläuterung s. Text

Bei der Betrachtung der Einstrahlungsprozesse lassen sich demnach drei Komplexe trennen, die den Strahlungsgewinn am Boden bestimmen (Tanré et al. 1986):

- die direkte Einstrahlung, die aus der abwärtsgerichteten, direkten Transmission der Atmosphäre ( $t_{dir\downarrow}$ ) in Abhängigkeit vom Kosinus des Sonnenzenitwinkels ( $\mu_s$ ) resultiert,
- die indirekte oder diffuse Einstrahlung, bestimmt durch die diffuse Transmission ( $t_{dif\downarrow}$ ) in Abhängigkeit vom Kosinus des Sonnenzenitwinkels sowie
- die diffuse Einstrahlung durch Mehrfachstreuung, gegeben durch die Hintergrundreflexion ( $\langle\rho\rangle$ ) und die sphärische Albedo ( $s$ ).

Demgegenüber stehen drei am Sensor aufgezeichnete Strahlungskomponenten (Tanré et al. 1986):

- die Reflexion des Targets ( $\rho_t\uparrow$ ), analog zu a) verändert durch die direkte Transmission der Atmosphäre in Abhängigkeit vom Kosinus des Beobachtungszenitwinkels ( $\mu_b$ ),
- die Hintergrundreflexion ( $\langle\rho\rangle$ ), analog zu b) verändert durch die diffuse Transmission der Atmosphäre in Abhängigkeit vom Kosinus des Beobachtungszenitwinkels sowie
- das atmosphärische Streulicht (path radiance,  $\rho_{at}$ ).

Alle genannten Terme unterliegen dem absorbierenden Einfluss gasförmiger Atmosphärenkonstituenten, der durch die Gastransmission ( $t_{gas}$ ) erfasst wird (Abbildung 7.4). Die wichtigsten absorbierenden Konstituenten der Atmosphäre sind Sauerstoff ( $O_2$ ), Ozon ( $O_3$ ), Wasserdampf ( $H_2O$ ), Kohlendioxid ( $CO_2$ ), Methan ( $CH_4$ ) und Stickoxid ( $N_2O$ ).  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$  und  $N_2O$  können als global invariant angenommen werden. Demgegenüber sind  $O_3$  und  $H_2O$  in

ihrer räumlichen und zeitlichen Verteilung variabel.  $O_3$  unterliegt jahreszeiten- und breitenabhängigen Konzentrationsschwankungen, während explizite Vorhersagen für die Konzentration von  $H_2O$  ohne zusätzliche Hilfsdaten zum Zeitpunkt der Datenaufnahme schwierig sind (Vermote et al. 1994). In ihrer Kombination bilden die Gaskomponenten ein komplexes Absorptionsmuster, dessen Banden und Transmissionsfenster die spektralen Charakteristika weltraumgestützter Fernerkundungssensoren zur Erdbeobachtung maßgeblich bestimmen.

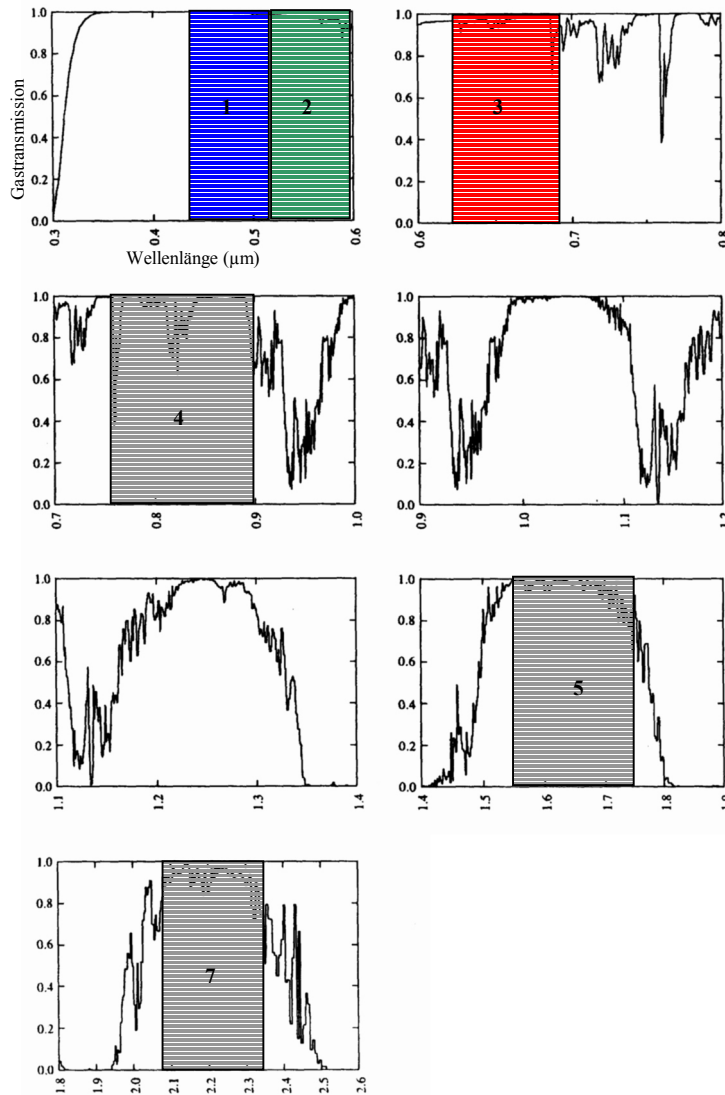


Abbildung 7.4: Atmosphärische Fenster zwischen 0,3 und 2,6  $\mu\text{m}$  und Landsat-TM-Kanäle (Vermote et al. 1994, verändert)

Dementsprechend kann folgender mathematische Zusammenhang zur Definition des am Sensor gemessenen Reflexionssignals in Abhängigkeit von den oben skizzierten Veränderungen der Strahlung beim Durchgang durch die Atmosphäre angenommen werden:

$$\rho^* = t_{gas} \cdot \left( \left( \frac{t_{dir} \downarrow + t_{dif} \downarrow}{1 - \langle \rho \rangle \cdot s} \right) \cdot (t_{dir} \uparrow \cdot \rho_t + t_{dif} \uparrow \cdot \langle \rho \rangle) + \rho_{at} \right) \quad \text{Gleichung 7.5}$$



Von Interesse für die fernerkundliche Auswertung der Daten ist der vom beobachteten Objekt ausgehende Strahlungsanteil, der vom Sensor aufgezeichnet wird. Wird Gleichung 7.5 daher nach  $\rho_t$  aufgelöst, so ergibt sich bei Zusammenfassung der abwärtsgerichteten direkten und diffusen Transmission zur Gesamttransmission  $T(\mu_s)$  folgender Zusammenhang:

$$\rho_t = \frac{\rho^* \cdot t_{gas}^{-1} \cdot (1 - \langle \rho \rangle \cdot s) - \rho_{at} \cdot (1 - \langle \rho \rangle \cdot s) - T \downarrow \cdot t_{dif} \uparrow \cdot \langle \rho \rangle}{T \downarrow \cdot t_{dir} \uparrow} \quad \text{Gleichung 7.6}$$

Bei Annahme einer korrekt determinierten Gastransmission lassen sich alle Unbekannten aus Gleichung 7.6 letztlich auf die optischen Dicken der Atmosphäre in Abhängigkeit von Aerosol ( $\tau_a$ ) und molekularen Streukomponenten ( $\tau_r$ ) reduzieren (Tanré 1979, 1981, 1987; Hill 1993a). Die abwärts gerichtete Gesamttransmission und direkte Transmission berechnen sich gemäß Tanré et al. (1979) nach

$$T \downarrow = e^{-(0.52 \cdot \tau_r + 0.16 \cdot \tau_a) / \mu_s} \quad \text{Gleichung 7.7}$$

und

$$t_{dir} \downarrow = e^{-\tau / \mu_s} \quad \text{Gleichung 7.8}$$

Die abwärts gerichtete diffuse Transmission  $t_{dif} \downarrow$  lässt sich dementsprechend aus der Differenz der beiden Terme ableiten. Analog erfolgt die Berechnung der aufwärts gerichteten Transmissionsgrade  $T \uparrow$ ,  $t_{dir} \uparrow$  und  $t_{dif} \uparrow$  durch Ersetzen von  $\mu_s$  durch  $\mu_b$ .

Zur Kalkulation des atmosphärischen Streulichts  $\rho_{at}$  wurde eine Näherungslösung nach Sobolev (1963) unter Berücksichtigung der Mehrfachstreuung eingebracht:

$$\rho_{at} = 1 - \frac{r_s \cdot r_b}{4 + (3 - x_{av}) \cdot \tau} + C \cdot \frac{1 - e^{(-\tau / \mu_s - \tau / \mu_b)}}{(\mu_s + \mu_b) / 4}, \quad \text{Gleichung 7.9}$$

mit

$$r_s = 1 + 1.5 \cdot \mu_s + (1 - 1.5 \cdot \mu_s) \cdot e^{-\tau / \mu_s} \quad \text{Gleichung 7.10}$$

bzw.

$$r_b = 1 + 1.5 \cdot \mu_b + (1 - 1.5 \cdot \mu_b) \cdot e^{-\tau / \mu_b} \quad \text{Gleichung 7.11}$$

und

$$x_{av} = 3 \cdot \frac{\tau_a}{\tau} (\alpha \cdot (g_1 + g_2) - g_2) \quad \text{Gleichung 7.12}$$

Die Parameter  $\alpha$ ,  $g_1$  und  $g_2$  bestimmen den jeweiligen Aerosoltyp (Aranuvachapun 1983, 1985).  $C$  parametrisiert die aerosolabhängigen Streuungsprozesse (Mie-Streuung) und molekulare Streuprozesse (Rayleigh-Streuung):

$$C = (3 + x_{av}) \cdot \mu_s \cdot \mu_b - 2 \cdot \mu_s \cdot \mu_b + P_a \cdot \frac{\tau_a}{\tau} + P_r \cdot \frac{\tau_r}{\tau} \quad \text{Gleichung 7.13}$$

Die Aerosol-Phasenfunktion  $P_a$  und die Rayleigh-Phasenfunktion  $P_r$  bestimmen in diesem Zusammenhang die winkelabhängige Verteilung der Streuung, die hinsichtlich der Mie-Streuung eine stark dominierende Vorwärtskomponente aufweist (Abbildung 7.5).

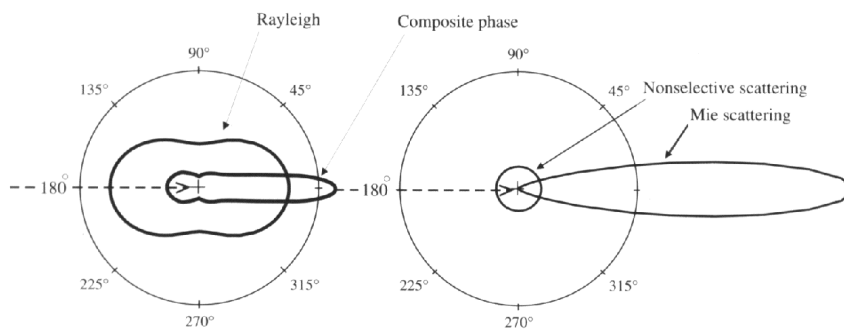


Abbildung 7.5:  
Phasenfunktionen der  
Rayleigh- und Mie-  
Streuung (Schott 1997)

Über eine erweiterte two-term Henyey-Greenstein Funktion (Henyey und Greenstein 1941; Irvine 1965; Aranuvachapun 1985) kann die jeweilige Aerosol-Phasenfunktion hinreichend genau approximiert werden mit

$$P_a = \frac{(1 - g_1^2) \cdot \alpha}{(1 + g_1^2 - 2 \cdot g_1 \cdot \cos \psi_-)^{1.5}} + \frac{(1 - g_2^2) \cdot (1 - \alpha)}{(1 + g_2^2 + 2 \cdot g_2 \cdot \cos \psi_-)^{1.5}}, \quad \text{Gleichung 7.14}$$

während die Rayleigh-Phasenfunktion mit

$$P_r = 0.75 \cdot (1 + \cos^2 \psi_-) \quad \text{Gleichung 7.15}$$

gegeben ist. Der Rückstreuungswinkel wird in Abhängigkeit von Azimut- und Zenitkonstellation zwischen Sonne, Erdoberfläche und Sensor mit

$$\psi_- = \cos^{-1} \left( -\mu_s \cdot \mu_b - \left( (1 - \mu_s^2) \cdot (1 - \mu_b^2) \right)^{0.5} \cdot \cos(\varphi_b - \varphi_s) \right) \quad \text{Gleichung 7.16}$$

definiert, wobei  $\varphi_s$  und  $\varphi_b$  die Azimutwinkel zwischen Sonne und Erdoberfläche bzw. zwischen Erdoberfläche und Sensor darstellen. Zur Berechnung des atmosphärischen

Streulichts standen drei anhand der Variablen  $\alpha$ ,  $g_1$  und  $g_2$  vordefinierte Aerosoltypen kontinentaler Prägung sowie zwei maritime Varianten zur Verfügung.

Die sphärische Albedo wird zur Berücksichtigung multipler Streuprozesse zwischen Erdoberfläche und Boden sowie zur Kalkulation der diffus in den Strahlungspfad zum Sensor gelangenden Strahlungsanteile aus der Umgebung des Targets benötigt. Sie lässt sich mit

$$s = e^{-\tau \cdot (0.92 \cdot \tau_r + 0.3 \cdot \tau_a)} \quad \text{Gleichung 7.17}$$

ableiten. Entscheidend für den über die sphärische Albedo definierten Strahlungsanteil am gemessenen Signal ist die Hintergrundreflexion  $\langle \rho \rangle$  als Maß der durchschnittlichen Umgebungsreflexion des beobachteten Bildelements. Sie kann mit

$$\langle \rho \rangle = \rho_t \cdot F(r) + (1 - F(r)) \cdot \rho_e \quad \text{Gleichung 7.18}$$

anhand der Umgebungsreflexion  $\rho_e$  und einer Gewichtung des Umgebungsanteils über  $F(r)$  angenähert werden (Tanré et al. 1979, 1987). Entscheidend für die Gewichtung ist die Homogenität des beobachteten Geländeauschnitts. Bei Targets mit einem Radius unter 0,25 km kann die Hintergrundreflexion mit der durchschnittlichen Umgebungsreflexion des Targets gleichgesetzt werden und eine Gewichtung von Objekt- und Umgebungsreflexion erübrigt sich. Entsprechend kann bei einem Radius über 5 km von einer homogenen Oberfläche ausgegangen werden und die Hintergrundreflexion entspricht der des Targets. Für alle anderen Fälle erfolgt die Bestimmung von  $F(r)$  näherungsweise mit

$$F(r) = \frac{0.8\bar{3} \cdot \tau_a \cdot F_a(r) + 0.5 \cdot \tau_r \cdot F_r(r)}{0.8\bar{3} \cdot \tau_a + 0.5 \cdot \tau_r} \quad \text{Gleichung 7.19}$$

Unter den üblichen atmosphärischen Bedingungen für fernerkundliche Aufnahmen liefert diese Näherung gute Resultate (Tanré et al. 1981). Die Funktion für den aerosolabhängigen Anteil wird mit

$$F_a(r) = 1 - (0.375 \cdot e^{-0.2 \cdot r} + 0.625 \cdot e^{-1.83 \cdot r}) \quad \text{Gleichung 7.20}$$

und für den Rayleigh-abhängigen Anteil mit

$$F_r(r) = 1 - (0.93 \cdot e^{-0.08 \cdot r} + 0.07 \cdot e^{-1.1 \cdot r}) \quad \text{Gleichung 7.21}$$

bestimmt ( $r$  in km).

Die Ableitung der Umgebungsreflexion aus dem am Sensor gemessenen Signal der Objektumgebung erfolgt nach Tanré et al. (1979) schließlich mit

$$\rho_e = \frac{(\rho_e^* - \rho_{at}/t_{gas})}{T \uparrow \cdot T \downarrow + s \cdot (\rho_e^* - \rho_{at}/t_{gas})}. \quad \text{Gleichung 7.22}$$

Somit sind alle Bestandteile von Gleichung 7.6 zur Bestimmung der Objektreflexion definiert. Als Unbekannte bleibt lediglich die Optische Dicke  $\tau$ , welche sich aus den beiden Teilbeiträgen der aerosoloptischen Dicke  $\tau_a$  und der Rayleigh-optischen Dicke  $\tau_r$  zusammensetzt. Wie in Kapitel 7.1.2.3 dargestellt, ist in diesem Zusammenhang die Schätzung der räumlich und zeitlich variablen aerosoloptischen Dicke der genauigkeitsbestimmende Faktor, während die Rayleigh-optische Dicke mit

$$\tau_r = 0.0088 \cdot \lambda^{(-4.15+0.2 \cdot \lambda)} \quad \text{Gleichung 7.23}$$

für eine Standard-Rayleigh-Atmosphäre nur von der jeweils betrachteten Wellenlänge abhängt und somit hinsichtlich der Atmosphärenkorrektur von Satellitendaten als invarianter Anteil betrachtet werden kann.

### 7.1.2.3 Schätzung der aerosoloptischen Dicke

Maßgeblich für die Qualität der radiometrischen Korrektur ist die exakte Bestimmung des Hilfsparameters der aerosoloptischen Dicke über die Ångstrom-Relation (Ångstrom 1964) mit

$$\tau_a = \beta \cdot \lambda^{-\alpha}. \quad \text{Gleichung 7.24}$$

Der sogenannte Ångstrom-Exponent  $\alpha$  und der Faktor  $\beta$  beschreiben in diesem Zusammenhang die Größenverteilung der Aerosolpartikel und den Aerosolgehalt der Atmosphäre.

Zur Ableitung der aerosoloptischen Dicke lassen sich prinzipiell zwei Verfahrensweisen unterscheiden: Die Schätzung aus den Bilddaten oder die Messung mittels Sondenaufstiegen oder Bodenmessungen parallel zum Überflug des Sensors. Wünschenswert ist sicherlich eine möglichst fundierte und vollständige Eliminierung atmosphärischer Effekte, die am besten durch überflugparallele Messungen erfasst werden können. Diese Konstellation wird allerdings in der überwiegenden Anzahl der Fälle nicht gegeben sein, da die damit verbundene Logistik einen hohen Planungs- und Durchführungsaufwand bedeutet und im Fall retrospektiver Analysen nicht möglich ist. Als Alternative bleiben häufig also nur direkte,

bildbezogene Methoden, die die Unabhängigkeit von Geländemessungen mit der Bestimmung absoluter Reflexionswerte verbinden.

Eine elegante Möglichkeit zur Ableitung der aerosoloptischen Dicke bietet der sogenannte „Dark-Target-Approach“, wie beispielsweise von Ahern et al. (1977) oder Royer et al. (1988) beschrieben. Werden zur Schätzung der am Sensor gemessenen Reflexion nach Gleichung 7.5 oligotrophe Meeresoberflächen herangezogen, so lässt sich deren Reflexion  $\rho_{cal}$  nach

$$\rho_{cal} = \rho_w + \rho_f \cdot t_{dif} \downarrow / T \downarrow \quad \text{Gleichung 7.25}$$

bestimmen. Diese setzt sich aus der Volumenreflexion eines Wasserkörpers  $\rho_w$  und der sogenannten Fresnel-Reflexion  $\rho_f$  als Maß der gerichteten Oberflächenreflexion zusammen. Für Sensoren mit Abweichungen unter  $10^\circ$  von der Nadirsicht kann ein nahezu wellenlängen-unabhängiger Wert für  $\rho_f$  von ungefähr 0,02 angenommen werden (Ahern et al. 1977). Unter der vereinfachenden Annahme einer unbewegten Oberfläche ist die spiegelnde Reflexion bei der Aufnahmekonstellation des Landsat-TM vernachlässigbar, so dass  $\rho_f$  über die diffuse Transmission definiert wird (Royer et al. 1988). Die aerosoloptische Dicke kann schließlich über einen iterativen Ansatz bestimmt werden, so dass ausgehend von einer aerosolfreien Atmosphäre eine inkrementelle Erhöhung von  $\tau_a$  erfolgt, bis die am Sensor modellierte Reflexion der Wasserfläche mit der Referenzsignatur übereinstimmt (Abbildung 7.6).

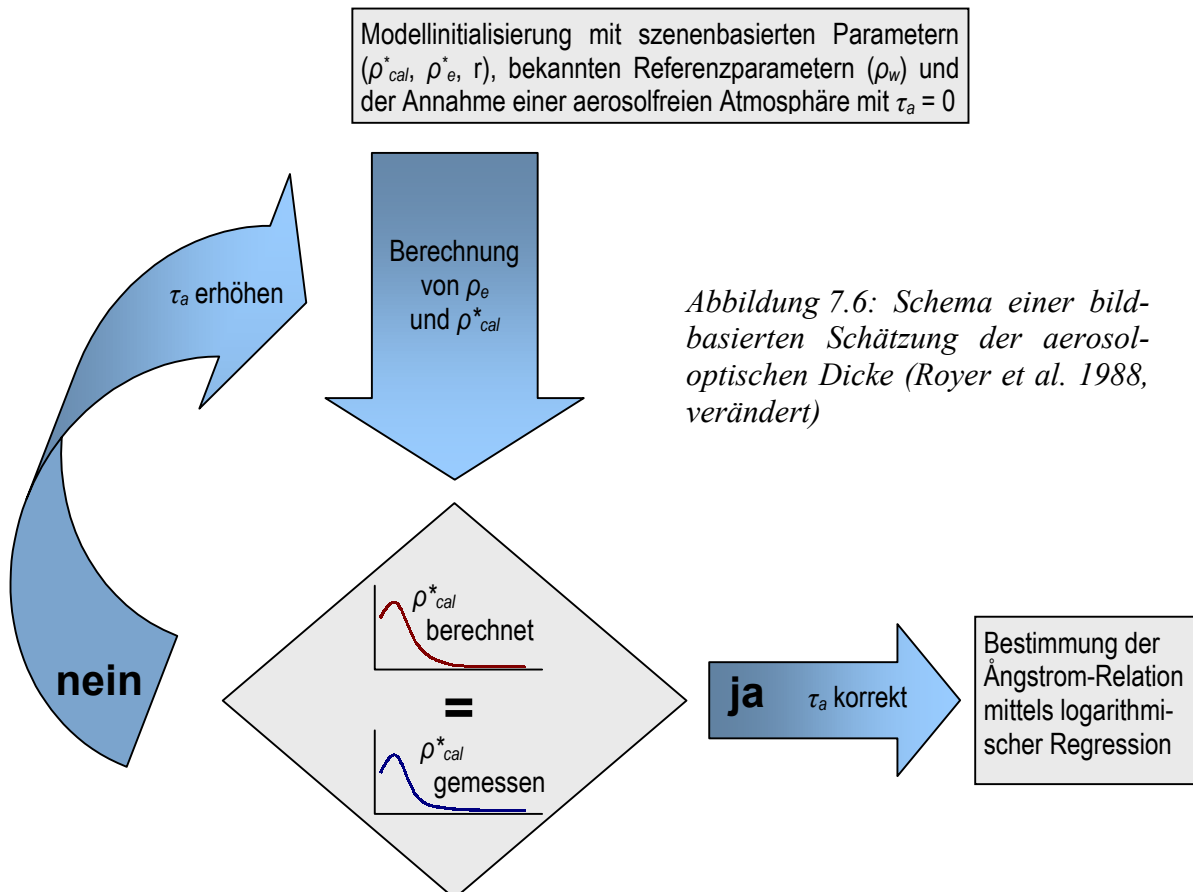


Abbildung 7.6: Schema einer bildbasierten Schätzung der aerosoloptischen Dicke (Royer et al. 1988, verändert)

Die Schätzwerte können anhand Gleichung 7.24 überprüft werden, indem eine logarithmisch skalierte Regression zwischen der kanalweisen aerosoloptischen Dicke und der entsprechenden Wellenlänge berechnet wird. Falls aufgrund des Aerosoltyps keine Abweichungen von der Ångström-Relation auftreten, kann der Korrelationskoeffizient als Gütemaß der Schätzung interpretiert und das Modell an die Regressionsgerade angepasst werden.

Als Kalibriersignaturen werden dunkle Bildbereiche selektiert, falls möglich oligotrophe und sedimentarme Wasserflächen. In diesem Fall kann angenommen werden, dass nach einer radiometrischen Korrektur Abweichungen von der Reflexion bekannter Referenzflächen auf den verbliebenen Streueinfluss der Atmosphäre zurückgeführt werden können. Mittels iterativer Erhöhung von  $\tau_a$  bis zu einem Wert bei dem die berechnete Reflexion am Sensor der Reflexion des aus der Szene extrahierten Objektes entspricht, kann über die Kopplung eines empirischen Verfahrens mit 5S eine bildbasierte Schätzung der aerosoloptischen Dicke erfolgen.

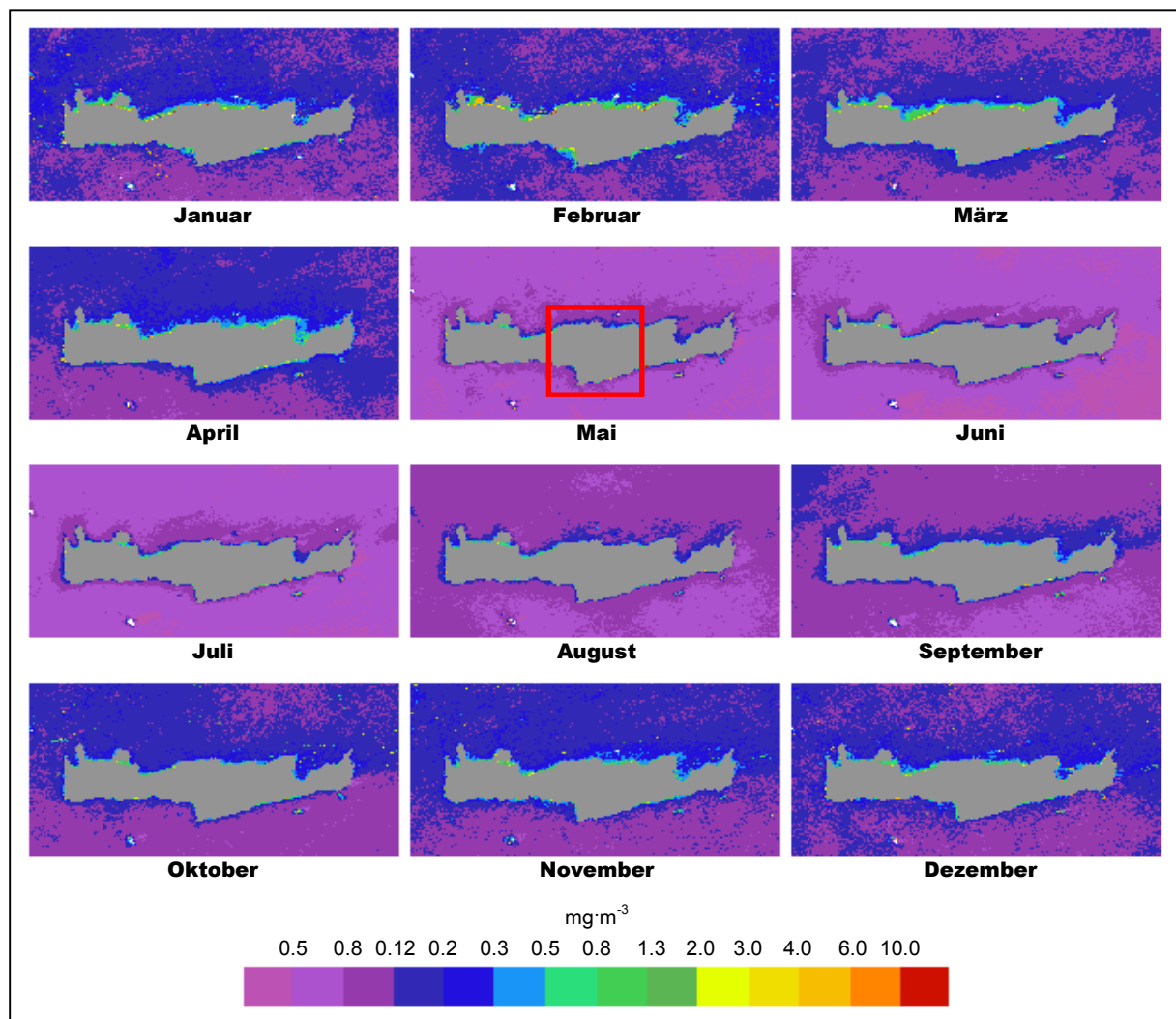


Abbildung 7.7: Mittlere jahreszeitenabhängige Schwebstoffbelastung um Kreta aus Daten des Coastal Zone Color Scanner (CZCS) für die Jahre 1979 bis 1985 (nach Extraktion aus online-Datenbank unter [http://me-www.jrc.it/OCEAN/co\\_czcs\\_medarea.html](http://me-www.jrc.it/OCEAN/co_czcs_medarea.html), verändert); bearbeiteter Bildausschnitt in rot

Die Auswahl geeigneter Wasserreferenzen erfordert die Abwesenheit von Bewölkung und eine ruhige Wasseroberfläche. Als Bildsignaturen boten sich bei der Analyse der Satellitenbildreihe über Zentralkreta die umgebenden Meeresoberflächen des kretischen und libyschen Meeres an, die bezüglich ihres Nährstoffgehalts als oligotroph einzustufen sind und aufgrund ihrer Lage, abseits kontinentaler Schelfgebiete, wenig Sedimentfracht aufweisen (Abbildung 7.7).

Lediglich die in dieser Region fast permanent auftretenden Winde, kombiniert mit der Kanalisierung durch die steilen Täler zur kretischen Küste, können Wellengang mit Schaumkronen und somit direktionelle Reflexionseffekte nach sich ziehen. Daher wurde eine sorgfältige Selektion von Kalibrierflächen durchgeführt, bei der alle, unter maximaler Histogrammstreckung der dunklen Bildbereiche, atypisch erscheinenden Meeresoberflächen nicht berücksichtigt wurden. Als Ergebnis lag für jede Satellitenszene mindestens eine bildbestimmte Wassersignatur zur Ableitung der aerosoloptischen Dicke vor. Abbildung 7.8 spiegelt in diesem Zusammenhang die Überlagerung von abnehmender Sensitivität in unkalibrierten Daten und atmosphärenbedingten Schwankungen wider.

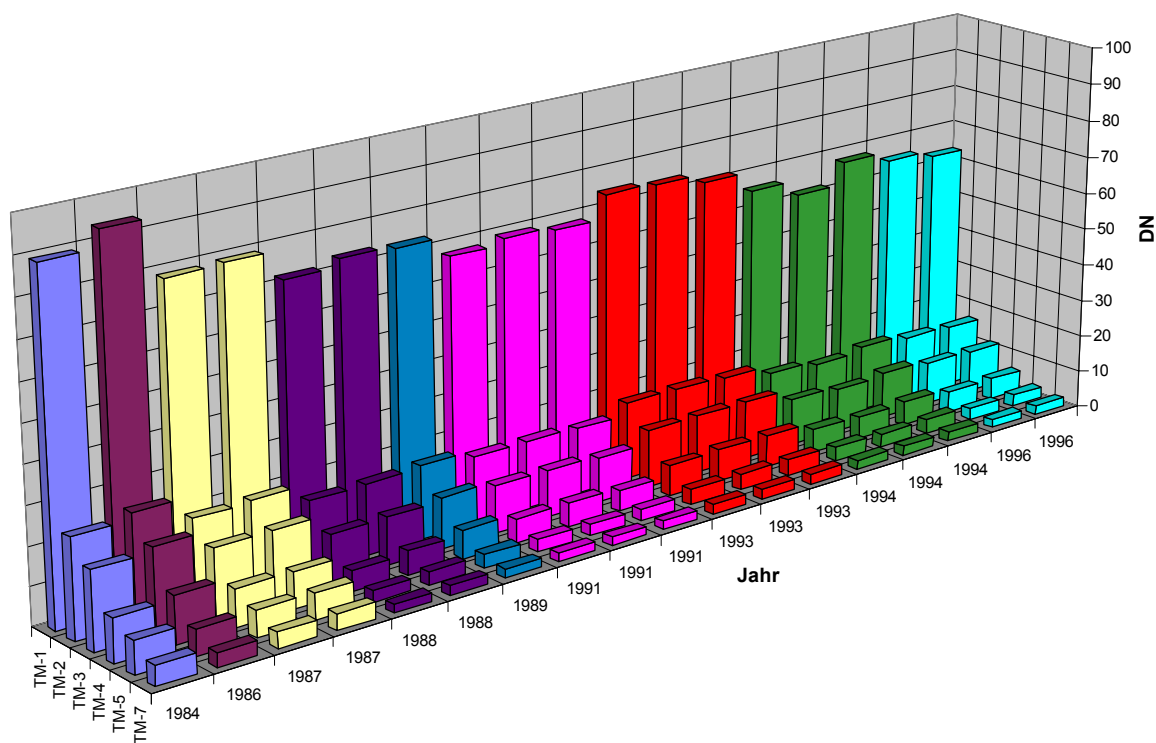


Abbildung 7.8: Minimale Wassersignaturen aller Satellitendaten der TM-Zeitserie

Es stellte sich heraus, dass anhand der skizzierten Vorgehensweise für vier der neun Datensätze des Landsat-TM eine Schätzung der aerosoloptischen Dicke vorgenommen werden konnte (Tabelle 7.1). Für die übrigen Jahre ließ sich keine sinnvolle Parameterkombination ableiten. Mögliche Gründe dafür sind aller Wahrscheinlichkeit nach die bewegte Wasseroberfläche und damit zusammenhängende spiegelnde Reflexionseffekte oder Schaumbildung.

Auch unterschiedliche Aerosolgehalte über Wasser und Land können zu inakzeptablen Ergebnissen der Korrektur führen. Die entsprechenden Datensätze wurde daher mittels eines iterativen Ansatzes an die Zeitreihe angepasst. Dazu wurde, ausgehend von niedrigen Aerosolgehalten, die Kombination aus Ångstrom-Exponent  $\alpha$  und Faktor  $\beta$  iterativ verändert, bis eine Auswahl invarianter Testsignaturen in Übereinstimmung mit der Reflexion gleicher Flächen aus den zuvor korrigierten TM-Szenen vorlag.

Tabelle 7.1: Szenenbasierte Parameter zur absoluten radiometrischen Korrektur

Aufnahme- datum	Aufnahmezeit (GMT)	Beleuchtungskonfiguration		Streuungsfunktion			Ångstrom- Beziehung	Korrelation
		Sonnenzenit	Sonnenazimut	g1	g2	$\alpha$		
03.06.1984	8,21310	30,15	107,20	0,8270	0,5130	0,9520	$0,354 \lambda^{-1,082}$	-0,9907
24.05.1986	8,29722	29,81	111,35	0,8270	0,5130	0,9520	$0,100 \lambda^{-1,400}$	direkte Eingabe
12.06.1987	8,28920	29,05	106,17	0,8270	0,5130	0,9520	$0,242 \lambda^{-1,125}$	-0,9688
29.05.1988	8,39555	28,28	111,38	0,8360	0,5370	0,9680	$0,040 \lambda^{-1,700}$	direkte Eingabe
17.06.1989	8,35416	28,36	106,57	0,8270	0,5130	0,9520	$0,040 \lambda^{-1,700}$	direkte Eingabe
22.05.1991	8,26666	30,36	111,52	0,8360	0,5370	0,9680	$0,040 \lambda^{-1,700}$	direkte Eingabe
27.05.1993	8,25666	30,02	109,73	0,8270	0,5130	0,9520	$0,101 \lambda^{-2,279}$	-0,9829
30.05.1994	8,21111	30,35	108,12	0,8360	0,5370	0,9680	$0,019 \lambda^{-1,786}$	-0,8431
04.06.1996	8,09389	31,48	105,14	0,8360	0,5370	0,9680	$0,040 \lambda^{-1,700}$	direkte Eingabe

### 7.1.3 Topographiekorrektur

Der Vorgang zur Rekonstruktion der Target-Reflexion wird weiterhin dadurch variiert, dass die oben gemachten Annahmen nur für die Einstrahlung auf und Reflexion von ebenem Gelände gelten. Eine Reihe von Verfahren wurde daher zur Eliminierung des Topographieinflusses vorgeschlagen. Simple Ansätze zielen darauf ab, die Variation des Reflexionssignals über Indexberechnungen (Holben und Justice 1981) oder Bildtransformationen (Conese et al. 1988) zu minimieren. Zur exakten radiometrischen Korrektur von Satellitendaten ist die Einbeziehung eines DHM allerdings unabdingbar. Erste Ansätze mittels einer Kosinuskorrektur resultierten in deutlichen Überkorrekturen des Topographieinflusses aufgrund der Vernachlässigung des diffusen Anteils der Einstrahlung (Civco 1989; Colby 1991). Erst die Trennung von diffuser und direkter Einstrahlung unter Berücksichtigung des atmosphärischen Strahlungstransfers ermöglichen eine exakte Korrektur des topographischen Störeinflusses (Hay und McKay 1985; Hay et al. 1986). Die folgenden Ausführungen basieren auf der Arbeit von Conese et al. (1993) und der darauf aufbauenden Erweiterung zur Einbindung in 5S nach Hill et al. (1995).

Unter Einfluss der Topographie kann die korrigierte Reflexion einer Oberfläche ( $\rho_{t,cor}$ ) anhand des Verhältnisses zwischen der senkrechten Einstrahlung am Boden ( $E$ ) und der um



Hangneigungs- und Expositionsabhängigkeit korrigierten Einstrahlung am Boden ( $E_{cor}$ ) ermittelt werden,

$$\rho_{t,cor} = \rho_t \cdot E/E_{cor} \text{ ,} \quad \text{Gleichung 7.26}$$

wobei

$$E = E'_0 \cdot T \downarrow \quad \text{Gleichung 7.27}$$

gilt und  $E'_0$  die um die Gastransmission korrigierte, exoatmosphärische Einstrahlung bezeichnet. Um  $E_{cor}$  zu bestimmen, müssen direkte ( $E_{dir}$ ) und diffuse Einstrahlung am Boden ( $E_{dif}$ ) getrennt erfasst und korrigiert werden, wobei die Prozessierung mit 5S beide Komponenten separat parametrisiert und somit die Einbindung einer topographischen Korrektur vereinfacht.

Die korrigierte Einstrahlung am Boden setzt sich aus der kosinuskorrigierten direkten Einstrahlung ( $E_{dir,cor}$ ) und zwei diffusen Einstrahlungskomponenten zusammen. Letztere stellen den isotrop ( $E_{iso,cor}$ ) und anisotrop diffusen Anteil ( $E_{an,cor}$ ) dar, wobei davon ausgegangen wird, dass der zirkumsolare und der horizontnahe Anteil der diffusen Einstrahlung deutlich anisotrop sind (Iqbal 1983):

$$E_{cor} = E_{dir,cor} + E_{an,cor} + E_{iso,cor} \text{ .} \quad \text{Gleichung 7.28}$$

Diese diffus anisotrope Komponente durchläuft, vergleichbar der direkten Einstrahlung, eine Kosinuskorrektur. Lediglich der isotrop diffuse Strahlungsanteil wird abhängig vom sichtbaren Anteil der Himmelskalotte ( $H$ ) und unabhängig vom Sonnenstand korrigiert. Der dazu eingeführte Anisotropieindex  $k$  wird aus dem Verhältnis zwischen direkter Einstrahlung am Boden und der extraterrestrischen solaren Einstrahlung abgeleitet mit

$$k = (E'_0 \cdot t_{dir} \downarrow) / E_0 \quad \text{Gleichung 7.29}$$

und stellt ein Maß für die Größenordnung der Anisotropie dar. Auch wenn dieser von der direkten Einstrahlung abhängige Parameter die Nichtlinearitäten der Anisotropie vernachlässigt, sind die damit zusammenhängenden Divergenzen in der Regel gering (Hay und McKay 1985). Es gilt demnach:

$$E_{cor} = \left( E'_0 \cdot t_{dir} \downarrow \cdot \frac{\mu_s}{\gamma} \right) + \left( k \cdot E'_0 \cdot t_{dif} \downarrow \cdot \frac{\mu_s}{\gamma} \right) + \left( (1-k) \cdot E'_0 \cdot t_{dif} \downarrow \cdot 0.5 \cdot (1+\theta_n) \cdot H \right) \quad \text{Gleichung 7.30}$$

mit  $\theta_n$ : Kosinus des Hangneigungswinkels

$\gamma$ : Kosinus des Winkels zwischen der Pixelnormalen und dem Sonnenzenit

$H$ : Anteil der sichtbaren Himmelskalotte

Der Anteil der sichtbaren Himmelskalotte kann aus einem DHM mittels einer pixelweisen Horizontberechnung abgeleitet werden. Zur operationellen Durchführung der Korrektur bietet sich die Integration von Richtungssegmenten an, die eine hinreichend gute Näherung an die Realität bieten (Dozier und Frew 1990). Im vorliegenden Fall wurden für jedes Pixel 16 Umgebungssegmente in Inkrementen von  $22,5^\circ$  definiert und summiert (Hill et al. 1995).

Für  $\gamma$  wird ein empirisch abzuleitender Grenzwert festgelegt, der vom Lambert'schen Verhalten der Oberflächen in Abhängigkeit von  $\cos^{-1}\gamma$  bestimmt wird. Je nach Oberflächenbeschaffenheit und Vegetationsbedeckung schwankt dieser Wert um einen Winkel von  $60^\circ$ . Im vorliegenden Fall wurde angenommen, dass bei Winkeln über  $50^\circ$  eine Überkorrektur der Bilddaten zu erwarten ist. Werden aus dem DHM größere Winkel zwischen der Pixelnormalen und dem Sonnenzenit abgeleitet, wird lediglich der Grenzwert angenommen (Hill 1997).

Im Fall einer Abschattung sonnenabgewandter Hänge entfallen die direkte und anisotrop diffuse Einstrahlung und es bleibt lediglich der Term der isotrop diffusen Einstrahlung für den Energiegewinn. Das hier dargestellte Modell vernachlässigt die Abschattung durch Gegenhänge und den anisotrop diffusen Anteil des Strahlungsgewinns aus Horizontnähe. Dennoch sind die mit dieser Methodik erzielten radiometrischen Bildverbesserungen beachtlich und der geländebedingte Reliefeindruck in den Daten wird nahezu vollständig eliminiert (Hill et al. 1995; Radeloff et al. 1997). Unter Einbeziehung der in Tabelle 7.1 aufgeführten Parameter zur Atmosphärenkorrektur und der für den jeweiligen Zeitpunkt berechneten Beleuchtungsverhältnisse über das DHM wurde die TM-Zeitreihe schließlich radiometrisch korrigiert.

## 7.2 Empirische Korrektur

Erst die Ergänzung der Landsat-TM-Szenen durch Landsat-MSS-Daten ermöglicht den Aufbau einer langen Zeitserie, die eine Aussage bezüglich der anthropogenen Einflussnahme auf die Landschaftsentwicklung zulässt. Die in den begrenzten technischen Möglichkeiten der 60er Jahre begründeten Nachteile des Landsat-MSS gegenüber dem TM-Sensor erfordern in diesem Zusammenhang einige Verarbeitungsschritte, welche über die bisher geschilderte mono-sensorale radiometrische Korrektur hinausgehen. Eine Reihe von Untersuchungen zur Interkalibrierung verschiedener Sensoren haben gezeigt, dass die mit solchen Verfahren erreichbare Genauigkeit bei sorgfältiger Datenverarbeitung auch für eine anschließende quan-

titative Auswertung der Datensätze hinreichend genau sein kann (Royer et al. 1987; Hill und Aifadopoulou 1990; Teillet et al. 2001).

Bei der Bild-zu-Bild-Korrektur nach Volchok und Schott (1986) erfolgt die radiometrische Anpassung unkorrigierter Bilddaten an einen korrigierten Referenzdatensatz mittels linearer Regression. Dazu werden invariante Referenzflächen eines korrigierten Datensatzes, der Masterszene, mit identischen Flächen des zu korrigierenden Datensatzes verglichen. Die grundlegende Idee dieses Verfahrens setzt voraus, dass der überwiegende Teil radiometrischer Störprozesse linearer Natur ist. So kann durch eine kanalweise, lineare Regression zwischen invarianten Flächen einer korrigierten und einer unkorrigierten Satellitenszene, eine relative Anpassung erfolgen. Dazu müssen mindestens zwei, besser aber mehrere Referenzflächen über hellen und dunklen Bildbereichen kanalweise verglichen werden, so dass eine zuverlässige Regressionsgerade aufgespannt werden kann (Smith und Milton 1999).

*Tabelle 7.2: Spektrale Charakteristika der Landsat-TM- und -MSS-Sensoren (USGS 1979; USGS und NOAA 1984)*

Thematic Mapper ( $\lambda$ in nm)				Multispectral Scanner ( $\lambda$ in nm)			
Kanal	$\lambda_{\text{mean}}$	$\lambda_{\text{min}}$	$\lambda_{\text{max}}$	Kanal	$\lambda_{\text{mean}}$	$\lambda_{\text{min}}$	$\lambda_{\text{max}}$
1	485	452	518	1	550	500	600
2	570	529	610	2	650	600	700
3	659	624	693	3	750	700	800
4	840	776	905	4	950	800	1100
5	1676	1568	1784				
7	2222	2097	2347				

Das wesentliche Problem besteht dabei in der Anpassung von Datensätzen, deren vier Spektralkanäle des Landsat-MSS und sechs reflektive Spektralkanäle des Landsat-TM unterschiedliche Wellenlängenbereiche abdecken (Tabelle 7.2). Die radiometrische Korrektur der MSS-Daten gliederte sich daher in zwei Schritte: Zunächst erfolgte die Anpassung einer Masterszene aus dem Jahre 1988 an die korrespondierende TM-Szene, einschließlich der dazu notwendigen Interpolation von Kalibrierungsfaktoren (vgl. Kap. 7.2.2). Anschließend war die relative Anpassung der MSS-Zeitreihe an den zuvor korrigierten MSS-Datensatz von 1988 zu ermöglichen (vgl. Kap. 7.2.3). Ein wichtiger Schritt sowohl für die Anpassung der Masterszene an die TM-Zeitreihe, als auch für die relative Korrektur der übrigen MSS-Datensätze stellte in diesem Zusammenhang die Auswahl geeigneter Kalibrierflächen dar.

### 7.2.1 Definition der Kalibrierflächen

Problematisch gestaltet sich häufig die Selektion invarianter Flächen. Daher wird in der Regel auch von „pseudo-invarianten Flächen“ gesprochen, da nur selten Objekte in zwei verschiedenen Datensätzen als spektral identisch gelten können. Als sinnvoll haben sich Gewässer, versiegelte Flächen oder Sportplätze erwiesen. Unter günstigen Bedingungen können auch homogene und dichte Pflanzenbestände gleicher Phänologie in beiden Datensätzen oder anstehende Kalke und Böden zum Vergleich herangezogen werden. Ideale Flächen, wie die zur in-flight-Kalibrierung verschiedener Sensorsysteme genutzten Wüstenböden oder Salzseen stehen nur in den seltensten Fällen zur Verfügung. All diesen Oberflächen ist gemein, dass nur ab einer bestimmten Größe von homogenen Gebieten ausgegangen werden kann, die weder durch Mischpixel, noch durch einen bedeutenden Anteil an Mehrfachstreuung aus der Umgebung beeinflusst sind (Tanré et al. 1987; Milton et al. 1997).

Im Fall Kretas ist die Auswahl solcher Objekte schwierig, da nur wenige versiegelte Flächen (z.B. breite Flughafenrollbahnen, freie Parkplätze, große Sportanlagen), zur Verfügung stehen. Hinzu kommt die extreme Sensibilität der kretischen Flora hinsichtlich der pluvial determinierten Jahreszeiten. Der Umschwung von der winterlich-frühjährlichen Wachstums- und Blühphase zur sommerlichen Trockenphase kann sehr plötzlich eintreten und erschwert somit die Interkalibrierung über Vegetation (vgl. Kap. 4). Dieser Problematik wurde mit der Auswahl überwiegend vegetationsfreier Flächen entgegenzuwirken versucht. Aber selbst in den eng bebauten innerstädtischen Bereichen finden sich immer wieder Baum- und Gebüschgruppen, die letztlich eine zweifelsfreie Vergleichbarkeit von Kalibrierflächen nicht zulassen. Darüber hinaus bedingt die rege Bautätigkeit in Städten wie Dörfern, selbst innerhalb kürzerer Zeitspannen, lokal häufig merkliche Unterschiede in der Oberflächenreflexion.

So wurden neben Versiegelungsräumen relativ homogene Gebiete innerhalb anstehender Gesteinsflächen selektiert. Um eine gewisse Bandbreite der Reflexionswerte im nahen Infrarot zu erreichen, ließ sich die Einbeziehung einzelner Vegetationsflächen allerdings nicht vermeiden. Beispielsweise wurden die relativ dichten und homogenen Waldstandorte westlich des Psiloritis in den Referenzdatensatz einbezogen. Dies schien insofern zulässig, als dass die vergleichbare Aufnahme- und Beleuchtungskonstellation der eingesetzten Daten die Variation bidirektioneller Eigenschaften der Vegetation minimierte (vgl. Tabelle 7.1). Um etwaige lokale Veränderungen zu unterdrücken, erfolgte die Selektion über größere Gebiete, so dass Reflexionsunterschiede zwischen den Jahren bestmöglich eliminiert wurden.

### 7.2.2 Interkalibrierung von Landsat-TM und -MSS

Werden Satellitenbilder verschiedener Aufzeichnungssysteme verarbeitet und sollen die jeweiligen Ergebnisse im Zusammenhang ausgewertet werden, spielen deren unterschiedliche radiometrische, spektrale und geometrische Eigenschaften eine entscheidende Rolle. Auch

bedingen unterschiedliche Überflugszeiten und unterschiedliche Aufnahmegeometrien Abweichungen in der spektralen Erfassung der Erdoberfläche. Die genaue Kenntnis der Sensor- und Atmosphärenbedingungen zum Zeitpunkt des Überflugs schaffen daher erst die Voraussetzung zur relativen Anpassung der differierenden Datengrundlagen (Royer et al. 1987; Hill und Aifadopoulou 1990).

Landsat-TM und -MSS unterscheiden sich in geometrischer, radiometrischer und spektraler Auflösung, so dass ein direkter Vergleich der Daten nicht möglich ist. Darüber hinaus existieren auch verschiedene on-board-Kalibriersysteme für beide Sensoren<sup>23</sup> (USGS 1979; USGS und NOAA 1984; Dinguirard und Slater 1999). Mit Sensordaten von vier verschiedenen Plattformen (Landsat-1 bis Landsat-5; keine Aufnahmen von Landsat-3) war die hier aufbereitete MSS-Zeitserie sehr heterogen.

Die zeitweise parallele Verfügbarkeit von TM- und MSS-Daten der Plattformen Landsat-4 und -5 muss in diesem Zusammenhang als Vorteil für die Kalibrierung gegenüber anderen multisensoralen Ansätzen herausgestellt werden. Die einmalige Sensorkombination bietet absolut synoptische Aufnahmen identischer Gebiete. Hinzu kommt die ähnliche Geometrie der Datensätze aufgrund der gleichen Aufnahmetechnik. Am wichtigsten ist bei der Betrachtung der Kalibrierung aber sicherlich die völlige Konformität der atmosphärischen Bedingungen, die eine direkte Übertragung der für Landsat-TM ermittelten Atmosphärenparameter auf den parallelen MSS-Datensatz erlaubt (Kiang 1982).

Für die vorliegende Arbeit standen synoptisch aufgezeichnete TM- und MSS-Daten von Landsat-5 für die Jahre 1984 und 1988 zur Verfügung. Erstere wurden aufgrund der mäßigen atmosphärischen Bedingungen (heterogene Atmosphäre, stellenweise Bewölkung) und radiometrischen Fehlern in der MSS-Szene allerdings nicht weiter berücksichtigt. Als Datensatz der radiometrischen Referenzreihe lagen für 1988 außerdem ideale atmosphärische Bedingungen vor, allerdings behaftet mit dem Nachteil des größeren zeitlichen Abstandes zu früheren MSS-Daten.

Die parallele Aufzeichnung der beiden Datensätze garantierte eine angemessene Selektion identischer und synoptisch erfasster Kalibrierobjekte. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde der Landsat-TM Datensatz zudem auf die geometrische MSS-Auflösung von  $79 \times 79 \text{ m}^2$  degradiert. Anhand von 52 ausgewählten Targets wurde die Referenzszene mit den bekannten Kalibrierkonstanten von Landsat-TM für 1988 in Strahldichten überführt. Die eingesetzten pseudo-invarianten Flächen umfassten eine Vielzahl von Targets aus allen Bildbereichen, so dass von einer hinreichend guten Repräsentation des Spektraldatenraumes ausgegangen werden konnte (Schott et al. 1988; Elvidge et al. 1995).

---

<sup>23</sup> Landsat-TM besitzt ein Tungsten-Lampensystem, welches nur die Filter und Detektoren, nicht jedoch die Linsen und Spiegel erfasst. Landsat-MSS verfügt über ein Kalibriersystem mittels Anpeilung der Sonne, das einer ungewissen Degradation unterworfen ist. Die MSS-Sensoren auf Landsat-4 und -5 wurden ohne ein Solarkalibrierungssystem gestartet (Nelson 1985).

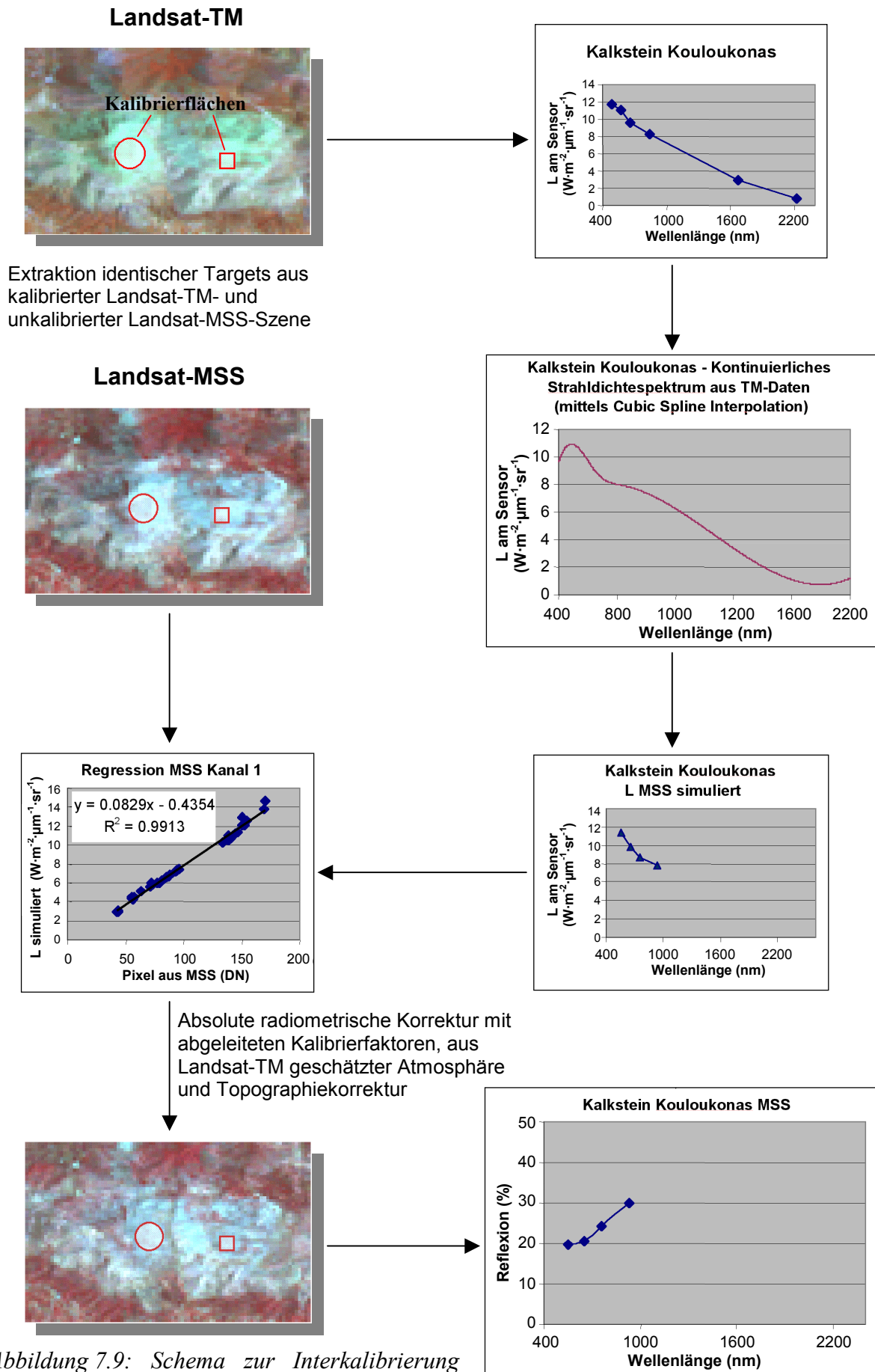


Abbildung 7.9: Schema zur Interkalibrierung von Landsat-MSS mit Landsat-TM (Röder et al. 1998, verändert)

Eine Cubic-Spline-Interpolation zwischen den spektralen Stützpunkten der betrachteten TM-Kanäle ergab die Strahldichtewerte in den Wellenlängenbereichen des Landsat-MSS (Hill und Aifadopoulou 1990). Diese Vorgehensweise war trotz des Spline-typischen Ausschlagens der Funktion sinnvoll, da alle interpolierten Wellenlängen in den durch die TM-Kanäle gut repräsentierten Spektralbereichen des sichtbaren Lichts und des nahen Infrarots liegen. Derart konnten die Strahldichten in den Kanälen des Landsat-MSS aus Landsat-TM-Daten simuliert und den Rohdaten des Landsat-MSS gegenübergestellt werden. Die daraus abgeleitete Kalibrierung (Tabelle 7.3) diente als Basis der nachfolgenden absoluten radiometrischen Korrektur der MSS-Daten unter Anwendung der in Tabelle 7.1 zusammengestellten Eingangsparameter für die korrespondierende TM-Szene (Abbildung 7.9). Zur topographischen Korrektur wurde analog zur Vorgehensweise bei der Prozessierung der TM-Daten in Kapitel 7.1.3 das DHM zur Berechnung der Beleuchtungsverhältnisse herangezogen.

*Tabelle 7.3: Kalibrierkonstanten für Landsat-5 MSS aus Strahldichtevergleich zwischen Landsat-TM und Landsat-MSS (offset nach Markham und Barker 1986)*

Kanal	offset (pre-flight)	gain	r <sup>2</sup> (gain)
1	0,0722	-0,1009	0,9957
2	0,0700	-0,1919	0,9969
3	0,0609	-0,1682	0,9901
4	0,0520	-0,1819	0,9958

Die anhand der linearen Regression abgeleiteten, hoch signifikanten Zusammenhänge zeugen von der Stabilität des Modells bei Nutzung einer hinreichend großen Anzahl an Kalibrierflächen. Die geringe Steigung der Regressionsgeraden zeugt von der begrenzten radiometrischen Auflösung des Landsat-MSS und dem damit verbundenen geringeren Dynamikumfang. Die Güte des Zusammenhangs liegt in der Größenordnung vergleichbarer Untersuchungen (Royer et al. 1987) und wird in Kapitel 7.3.4 nochmals näher betrachtet.

### 7.2.3 Anpassung der MSS-Zeitserie an eine MSS-Masterszene

Nach der Interkalibrierung wurde die MSS-Zeitreihe mit Datensätzen zwischen 1972 und 1983 an die radiometrisch korrigierte MSS-Szene von 1988 angepasst. Die Datensätze stammten von drei verschiedenen Sensoren der Plattformen Landsat-1, -2, und -4, für die keine Kalibrierfaktoren vorlagen.

Standardprozeduren zur Bild-zu-Bild-Anpassung integrieren die über das Geländemodell zu realisierende Beleuchtungskorrektur nicht, so dass hier ein semi-empirischer Ansatz gewählt wurde, bei dem die lineare Bild-zu-Bild-Regression mit einer absoluten radiometrischen Korrektur gekoppelt werden konnte. Da die einzubindende Topographiekorrektur eine Bezug-

nahme auf die direkten und diffusen Einstrahlungsanteile verlangt, allerdings keine Schätzung der Atmosphärenparameter ohne vorherige Kalibrierung des Sensors möglich ist, wurde per Regression zunächst eine Anpassung der Rohdaten an die radiometrisch unkorrigierten und unkalibrierten MSS-Daten von 1988 durchgeführt (Tabelle 7.4). Dadurch konnte die für die Masterszene gefundene Ångstrom-Relation zur Korrektur der atmosphärischen Störeinflüsse einschließlich der aus dem DHM abgeleiteten geländeabhängigen Parameter für alle MSS-Daten verwendet werden. Die relative Anpassung an den MSS-Datensatz von 1988 beinhaltet somit sowohl die Einbeziehung bekannter Kalibrierfaktoren wie auch die Kompensation linearer, atmosphärisch bedingter Unterschiede in den Rohdaten.

Einschränkend ist allerdings zu bemerken, dass mit zunehmender atmosphärischer Trübung und zunehmendem Streulichtanteil eine Abnahme der linearen Eigenschaften, beispielsweise beim Streulichteinfluss der Umgebung oder bei der Topographiekorrektur mittels DHM, verbunden ist und daher die Übertragung der identischen Ångstrom-Relation Fehler nach sich zieht. Die Validierung der Ergebnisse in den Kapiteln 7.3.3 und 7.3.4 verdeutlicht allerdings die vergleichbar geringen Fehlermargen unter den gegebenen atmosphärischen Bedingungen, so dass der empirische Ansatz unter Einbeziehung der geländeabhängigen Beleuchtungssituation eine geeignete Möglichkeit zur radiometrischen Korrektur der unkalibrierten MSS-Zeitreihe bietet.

Tabelle 7.4: Regressionsparameter der relativen Anpassung zur MSS-Szene vom 29.05.1988

Sensor	Aufnahmedatum	Kanal	offset	gain	r <sup>2</sup>
Landsat-1	05.09.1972	1	-18,101	2,7631	0,9961
		2	-4,478	2,3668	0,9937
		3	+6,568	2,5961	0,8950
		4	+3,692	3,3318	0,8944
	21.05.1977	1	-40,561	1,9667	0,9924
		2	-26,271	1,3548	0,9928
		3	-28,147	1,3609	0,9922
		4	-9,858	1,2962	0,9923
Landsat-2	04.07.1979	1	-10,345	1,4216	0,9926
		2	-17,000	1,2193	0,9906
		3	+28,344	0,8358	0,9818
		4	+28,574	0,8633	0,9781
	18.05.1981	1	-8,635	1,4098	0,9963
		2	-7,584	1,0748	0,9968
		3	-3,758	1,0314	0,9926
		4	+2,862	1,0246	0,9925
Landsat-4	08.05.1983	1	-35,436	1,5646	0,9860
		2	-24,564	1,2422	0,9853
		3	-16,089	1,3586	0,9718
		4	-7,510	1,1489	0,9749



### 7.3 Validierung und Sensitivitätsanalyse

Als Ergebnis der parametrischen (vgl. Kap. 7.1) und empirischen Korrektur (vgl. Kap. 7.2) lag eine radiometrisch korrigierte Zeitserie von 14 Satellitenbildern im Zeitraum zwischen 1972 und 1996 vor. Die Vielzahl der Vorverarbeitungsschritte hinsichtlich Kalibrierung, parametrischer Atmosphärenkorrektur, Topographiekorrektur und multisensoraler Anpassung bedingen eine Reihe potentieller Fehlerquellen, so dass eine sorgfältige Überprüfung der Ergebnisse notwendig ist.

Denkbare Unsicherheiten stellen vor allem folgende Teilkomplexe des radiometrischen Modellierungsprozesses dar:

- die Sensorkalibrierung (Thome et al. 1997a; Dinguirard und Slater 1999)
- die Quantifizierung der extraterrestrischen Einstrahlung, vor allem im mittleren Infrarot (Markham und Barker 1987b)
- die Simulation der atmosphärischen Absorptions-, Streu- und Transmissionseigenschaften (De Haan et al. 1991)
- die räumliche und höhenabhängige Variabilität der aerosoloptischen Dicke innerhalb einer Szene (Hill 1993a)
- die Annahme von Lambert'schem Reflexionsverhalten der betrachteten Oberflächen (Smith et al. 1980; Ekstrand 1996)
- Fehler im DHM (Theodossiou und Dowman 1990; Ekstrand 1996)
- der Abgleich zwischen Dark-Target-Referenz- und -Kalibrierflächen (Teillet und Fedosejevs 1995)
- die unterschiedlichen spektralen, geometrischen und radiometrischen Eigenschaften der Sensoren bei Landsat-TM und Landsat-MSS (Röder 2001)

Mögen sich einzelne dieser Faktoren einer Einschätzung aufgrund fehlender, absoluter Vergleichsdaten zum Überflugszeitpunkt entziehen, so ist doch eine Kontrolle der qualitativen und quantitativen Übereinstimmung verschiedener Randbedingungen möglich. Zur Bestimmung der Güte der durchgeführten radiometrischen Korrekturen wurden daher verschiedene Teilaspekte anhand von Bild-zu-Bild-Vergleichen überprüft. Dazu zählen die qualitative und quantitative Beurteilung von Reflexionsspektren bekannter Oberflächen nach der radiometrischen Korrektur einschließlich DHM und eine Evaluierung potentieller Fehler aus den Höhendaten des SPOT-DHM. Außerdem erfolgte eine Sensitivitätsanalyse hinsichtlich der Höhenabhängigkeit des Verfahrens für die gegebenen Atmosphärenkonstellationen (vgl. Kap. 7.3.1). Weiterhin wurde eine Überprüfung der Anpassungsgenauigkeit innerhalb der parametrisch korrigierten TM-Teilserie (vgl. Kap. 7.3.2) und der empirisch korrigierten MSS-Teilserie (vgl. Kap. 7.3.3) durchgeführt sowie die Interkalibrierung beider Systeme überprüft (vgl. Kap. 7.3.4).

### 7.3.1 Güte der radiometrischen Korrektur mit DHM

Die topographiegestützte radiometrische Korrektur der Daten stellte aufgrund der starken Relieferung der Arbeitsgebiete einen entscheidenden Faktor für die erzielbare Genauigkeit bei der weiterführenden Datenanalyse dar. Die Überprüfung der Qualität erfolgte sowohl an ausgewählten Bildausschnitten (Abbildung 7.10), wie auch mittels Extraktion von Signaturen an Sonn- und Schatthängen vor und nach der Topographiekorrektur (Abbildung 7.11).

Bei Echtfarbdarstellung zeugt die blaue und diesige Erscheinung der Bilddaten vom unkorrigierten Anteil des diffusen Himmelslichts in den kürzeren Wellenlängen (Abbildung 7.10a). Die radiometrische Vorverarbeitung der Satellitendaten unter Berücksichtigung bildbasiert bestimmter aerosoloptischer Dicken belegt die wirksame Korrektur dieser Störgröße (Abbildung 7.10c). Allerdings tritt ohne Relieffkorrektur der Einfluss der Beleuchtung auf sonnenab- und -zugewandten Hängen noch deutlich hervor. Es entsteht ein plastischer Eindruck, welcher erst nach Einbeziehung des DHM (Abbildung 7.10b) einer konturlosen Darstellung der Oberflächen weicht (Abbildung 7.10d).

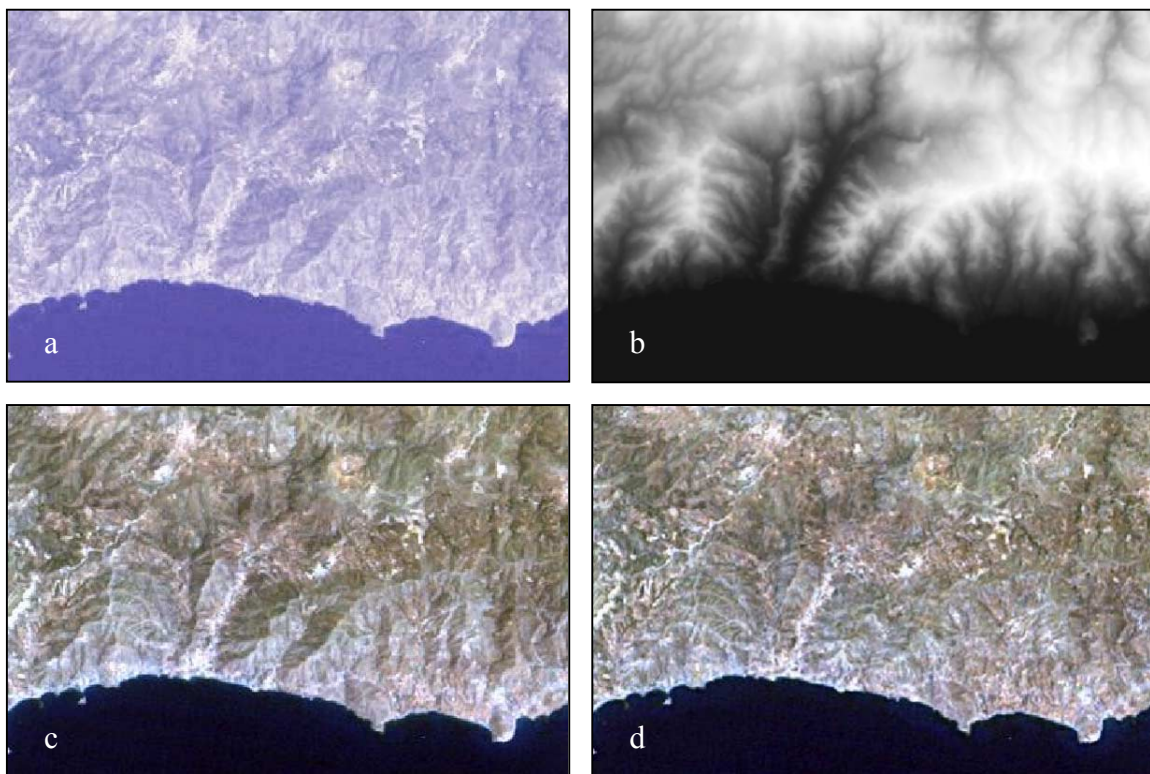


Abbildung 7.10: Ausschnitt der reliefierten Südküste Kretas (Echtfarbdarstellung); a: radiometrisch unkorrigierte Daten, b: zugehöriger Ausschnitt des DHM, c: nach radiometrischer Korrektur ohne DHM, d: nach radiometrischer Korrektur einschließlich DHM

Dieser Effekt spiegelt sich auch in den Bildsignaturen vergleichbarer Oberflächen auf Sonn- und Schatthängen wider. Erst nach erfolgreicher Topographiekorrektur weisen gleiche Objekte auch ein vergleichbares Reflexionsverhalten auf. Abbildung 7.11 zeigt einen Bildausschnitt mit anstehendem Kalkgestein und geringer Vegetationsbedeckung an der Südküste Kretas.

Die Signaturen belegen den deutlichen Reliefeinfluss auf das am Sensor gemessene Signal und die Möglichkeiten der Korrektur bei Einbeziehung eines DHM. Während die Reflexionsunterschiede verschieden exponierter Hänge vor der Topographiekorrektur überwiegend den Einfluss des Geländes repräsentieren, offenbart das einschließlich DHM korrigierte Bild die marginalen, expositionsabhängigen Unterschiede in Hinsicht auf die Vegetation.

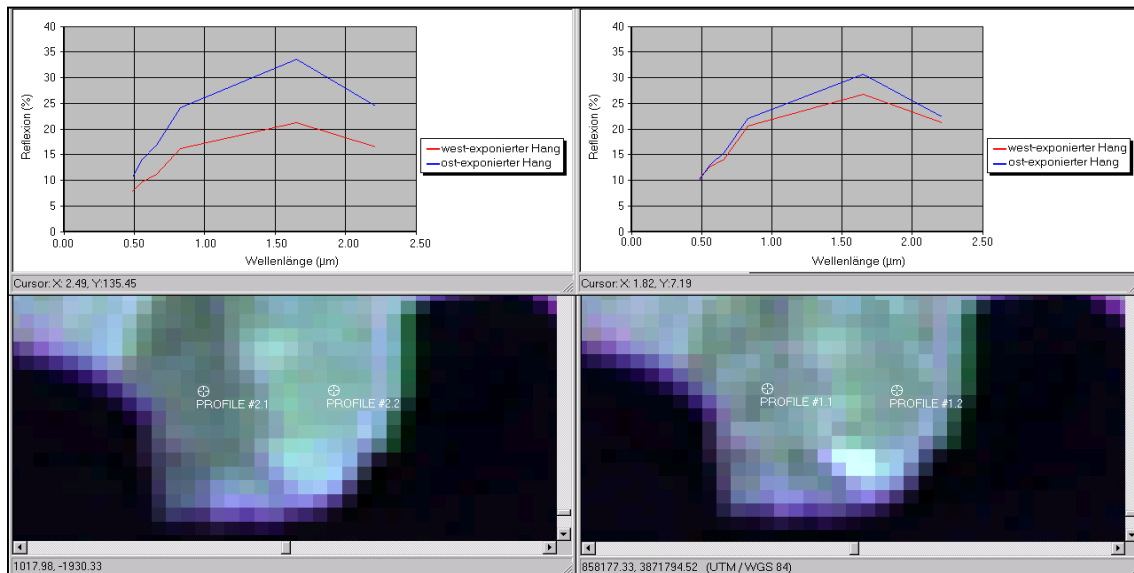


Abbildung 7.11: Reflexionssignaturen an sonnenzu- und -abgewandten Hängen nach radiometrischer Korrektur ohne (links) und mit DHM (rechts)

Um einen Eindruck der höhenabhängigen Sensibilität der Topographiekorrektur zu erhalten, wurde weiterhin die Konstanz von Vergleichssignaturen aus verschiedenen Höhenzonen getestet. Dazu wurden die Datensätze von 1987 und 1988 verglichen – letzterer mit deutlich höherer Transmissivität. Signaturen auf Meereshöheniveau, über Bereiche der Mittelgebirgsregionen bis hin zu Höhenzonen über 2.000 m ü.NN wurden einander gegenübergestellt und deren relative Veränderung in Abhängigkeit von der Höhenlage geprüft (Abbildung 7.12). Mit einem  $r^2$  von unter 0,1 konnte kein direkter Zusammenhang zwischen Geländehöhe und Fehlermarge bei den in den vorliegenden Daten aufgetretenen aerosoloptischen Dicken festgestellt werden.

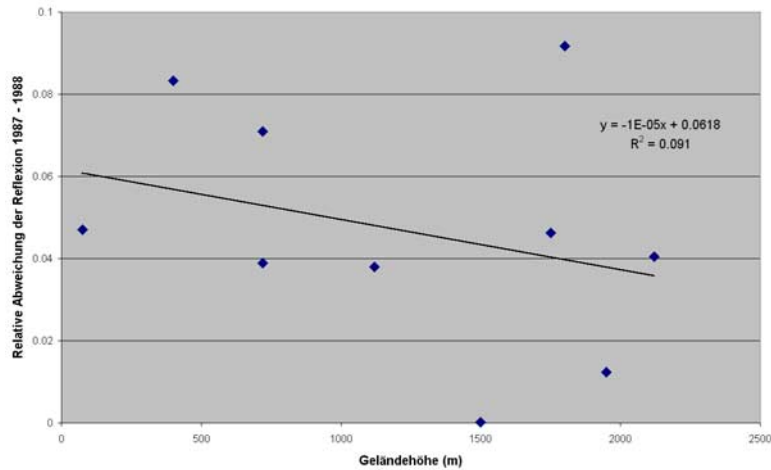


Abbildung 7.12: Höhenunabhängigkeit invarianter Reflexionssignaturen nach radiometrischer Korrektur für Szenen mit hoher (1987) und niedriger aerosoloptischer Dicke (1988)

Es muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass lokale Fehler der topographischen Korrektur letztendlich nicht vollständig ausgeschlossen werden können. Deutlich wird diese Tatsache vor allem bei Betrachtung der Ungenauigkeiten im DHM. Diesbezügliche Fehler können auf eine Reihe von Ursachen zurückgeführt werden, die teilweise in der Sensorauflösung des SPOT-PAN begründet liegen, häufig aber verfahrensbedingt bei der DHM-Erstellung auftreten (Rodriguez et al. 1988; Theodossiou und Dowman 1990).

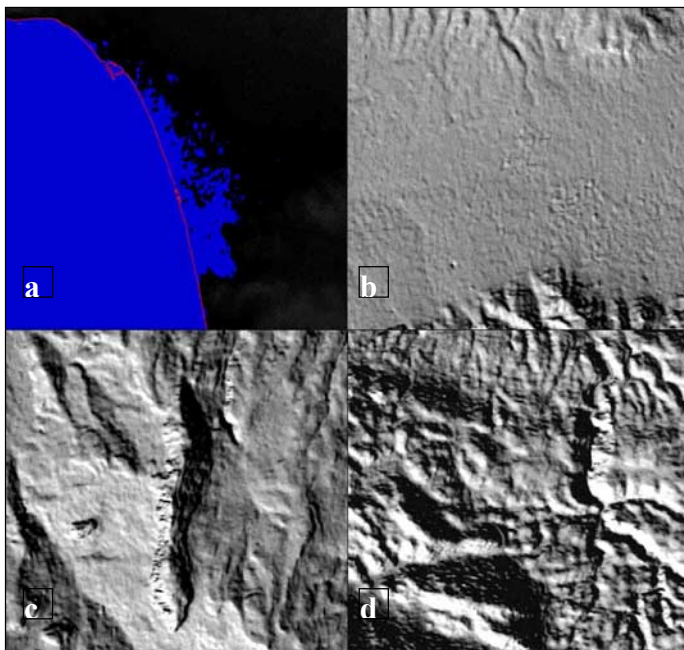


Abbildung 7.13: Potentielle Fehlerquellen der radiometrischen Korrektur aufgrund von Fehlern im DHM (a: DHM, b-d: illuminierte Geländeoberfläche)

Im Wesentlichen zeigten sich bei genauer Betrachtung nach digitaler Illumination des Höhenmodells zur Hervorhebung der Geländeoberfläche vier verschiedene Unsicherheitsfaktoren:

- In sehr flachen Bereichen wurden die Grenzen des Auflösungsvermögens der Stereoauswerteverfahren für SPOT-PAN-Daten erreicht. Dies ließ sich anhand des Küstenverlaufs sehr gut nachvollziehen, der im Gebiet der Messara und bei Iraklion stellenweise deutlich

verschoben war (Abbildung 7.13a). Anhand einer aus dem SPOT-Orthophoto abgeleiteten Maske konnte dieser Fehler korrigiert werden.

- Bebauung oder vegetationsbestandene Oberflächen traten im Höhenmodell als Mikrorelief hervor. Insbesondere in der mit Olivenbäumen bestandenen Messara wurde dies deutlich (Abbildung 7.13b). Die damit assoziierten Höhenunterschiede sind in der Regel gering und haben keinen nennenswerten Einfluss auf die radiometrische Korrektur.
- Steillagen, wie der Westhang des Jouchtas oder Kerbtäler im zentralen Psiloritis, lagen während der Aufnahme teilweise im Kernschatten und konnten daher nicht mehr aufgelöst werden (Abbildung 7.13c). Daraus resultierende Höhenfehler im DHM betragen bis zu 100 m und verursachen entsprechende Ungenauigkeiten bei der Erstellung der korrespondierenden DHM-Derivate und deren Nutzung zur Topographiekorrektur. Die damit verbundenen Fehler bleiben für Zentralkreta allerdings lokal begrenzt.
- An langgezogenen Hängen zeigten sich lineare Strukturen, die auf eine fehlerhafte Prozessierung der Stereodaten hindeuten und insbesondere in der Hangneigungsbeziehung artefaktische Geländestufen nach sich zogen (Abbildung 7.13d). Auch diese Fehler finden sich lokal in den korrigierten Landsat-Daten wieder.

### 7.3.2 Radiometrische Qualität der TM-Zeitreihe

Zur quantitativen Kontrolle wurden unabhängige Kontrollflächen aus allen Landsat-TM-Szenen extrahiert und einander gegenübergestellt. Die pseudoinvarianten Flächen lagen über den gesamten Bildausschnitt verteilt und wiesen eine möglichst große Spannweite an Reflexionswerten auf, um sowohl die Auswirkungen der Atmosphärenkorrektur in verschiedenen Bildbereichen als auch für verschiedene Reflexionsniveaus zu überprüfen.

Die Bedingung der Invarianz erfüllten vor allem vegetationsfreie Flächen und die Meeresoberfläche der Libyschen See. Als Maß für die Güte der radiometrischen Korrektur dienten die maximale positive und negative Abweichung vom Mittelwert der jeweiligen Oberfläche. Trotz einer Zeitspanne von 12 Jahren zwischen der ersten und letzten Aufnahme traten keine deutlichen Abweichungen in den Reflexionswerten auf, unabhängig vom Reflexionsniveau der gewählten Kontrolloberflächen. Auch sehr hohe Reflexionswerte, wie beispielsweise die der Kalkflächen am Kouloukonas im Wellenlängenbereich um 2200 nm (TM-Kanal 5), bewegten sich innerhalb enger Grenzen um den jeweils langjährigen Mittelwert (Abbildung 7.14).

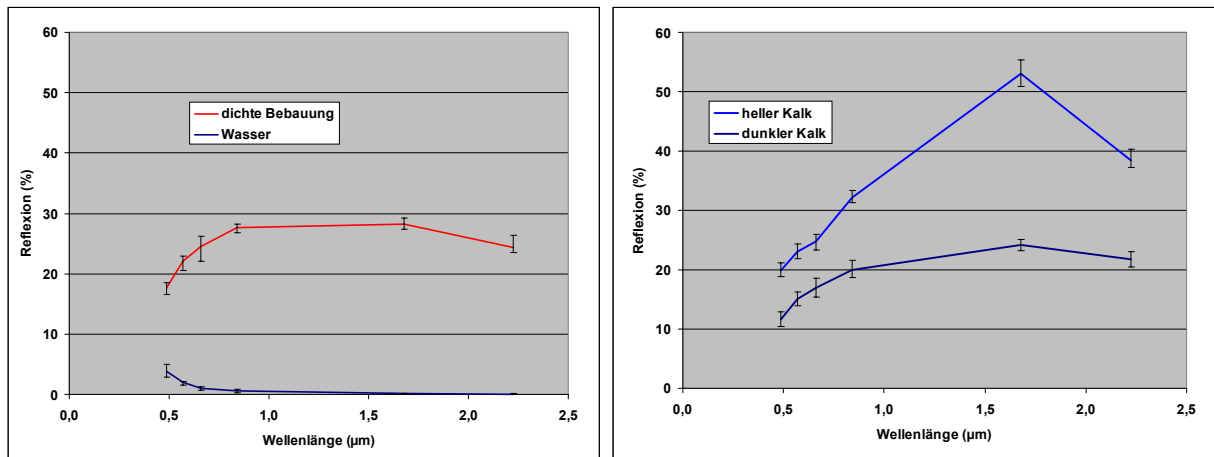


Abbildung 7.14: Relative Abweichungen in der Reflexion weitgehend vegetationsfreier Oberflächen der TM-Datenreihe (1984 bis 1996)

Ein Teil der zeitabhängigen Varianz in Bezug auf die Innenstadtbebauung Iraklions sowie der Kalksteinflächen liegt sicherlich an den geringen, aber dennoch vorhandenen Vegetationsanteilen innerhalb der TM-Pixel von  $900 \text{ m}^2$ . Für die hellen Kalke wird dies beispielsweise an der angedeuteten Absorptionsbande im Wellenlängenbereich um  $660 \text{ nm}$  deutlich. Die prägnanten Reflexionscharakteristika der Vegetation bedingen, auch schon bei geringen Anteilen an der Oberflächenbedeckung, Abweichungen vom mittleren Reflexionsniveau eines Pixels.

Für die dichte Bebauung Iraklions kommt die Tatsache hinzu, dass rege Bautätigkeit im Innenstadtbereich unkontrollierbare Veränderungen ansonsten über lange Zeiträume stabil reflektierender Oberflächen mit sich bringt. Weiterhin trug die in ihrer Korrektur problematische TM-Szene des Jahres 1986 zu der relativ hohen Abweichung der Reflexion dichter Bebauung im Wellenlängenbereich um  $630 \text{ nm}$  bei. In Anbetracht der im Modell nicht fassbaren atmosphärischen Situation über Iraklion, sollte der damit verbundene Fehler nicht überbewertet werden. Diese Auffassung wird auch durch die Singularität dieses Fehlers gestützt, während alle anderen Oberflächen keine außergewöhnliche Abweichung im gleichen Wellenlängenbereich aufweisen.

### 7.3.3 Radiometrische Qualität der MSS-Zeitserie

Um die radiometrische Qualität von MSS- und TM-Zeitserien vergleichen zu können, wurden die gleichen Testflächen wie in Kapitel 7.3.2 auch für die MSS-Daten übernommen. Geringfügige Modifikationen bezüglich der Größe und Lage der Gebiete ließen sich aufgrund der schlechteren geometrischen Auflösung des MSS-Sensors von  $79 \text{ Metern}$  jedoch nicht vermeiden. Die damit verbundene, rund 7-fach größere Flächenabdeckung eines Einzelpixels gegenüber Landsat-TM führt ansonsten wegen des erhöhten Anteils an Mischpixeln zur Einbeziehung benachbarter Objekte in die Signaturanalyse. Gegebenenfalls wurde durch eine Verkleinerung oder Verschiebung der Referenzflächen vor allen Dingen die Einbeziehung höherer

Vegetationsanteile – und damit eine verstärkte Abhängigkeit von der phänologischen Entwicklung der Vegetation – vermieden.

Weiterhin wurde, aufgrund erhöhter Chlorophyllgehalte in den Gewässern um Kreta zum Aufnahmezeitpunkt der Szene aus dem Jahre 1979, keine Wassersignatur zum Vergleich herangezogen<sup>24</sup>. Gleiches galt für das Jahr 1977 bezüglich der Bebauungssignatur aus dem Innenstadtbereich Iraklions, da eine Dunstglocke über der Stadt die Extraktion einer sinnvollen Vergleichssignatur nicht zuließ.

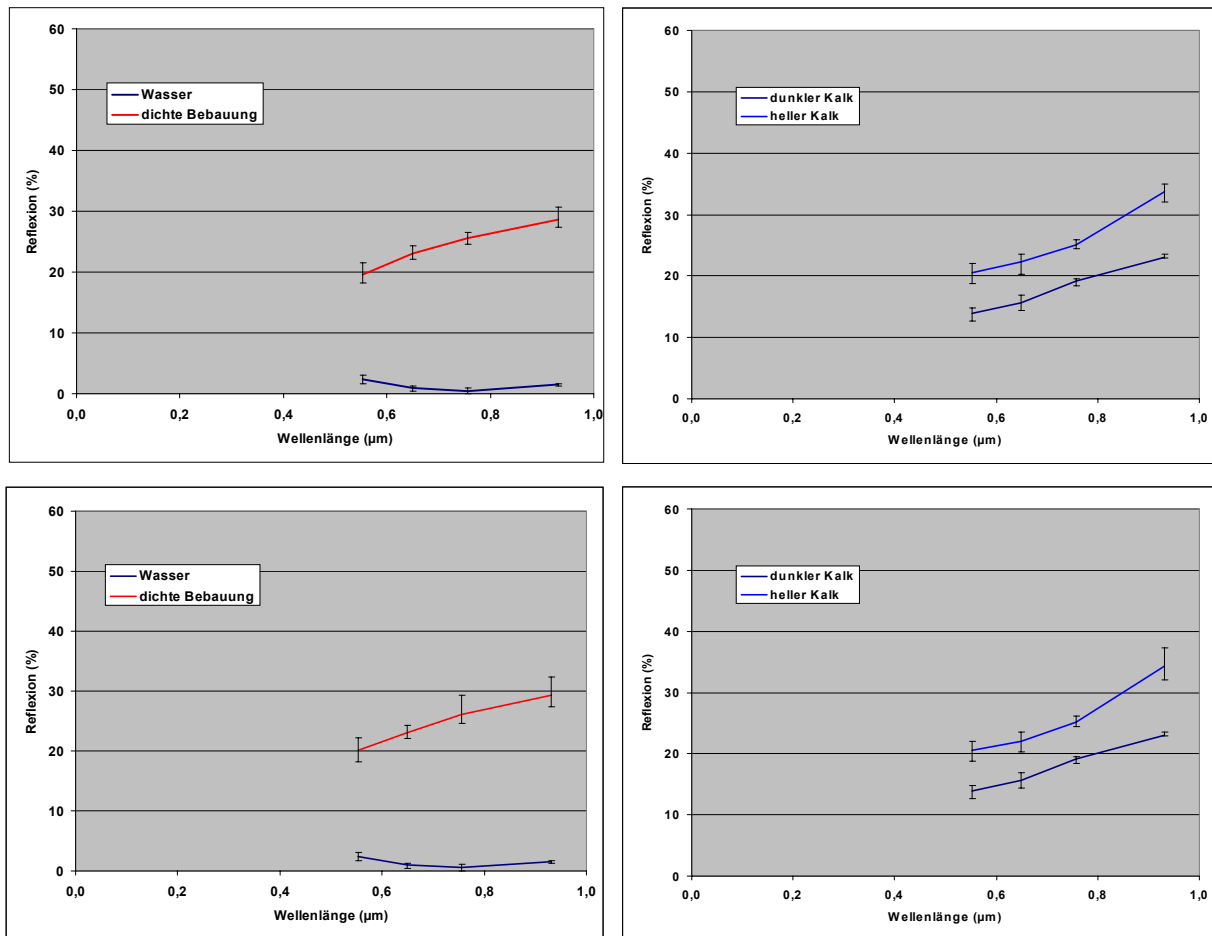


Abbildung 7.15: Relative Abweichungen in der Reflexion weitgehend vegetationsfreier Oberflächen der MSS-Datenreihe (oben: ohne Datensatz von 1972; unten: 1972 bis 1988)

Die Betrachtung der übrigen Signaturen belegte einen korrekten Verlauf der Reflexionskurven, allerdings mit leichten Abweichungen von erwarteten Reflexionswerten im Wellenlängenbereich um 930 nm im Fall von Wasser (Abbildung 7.15). Wenn auch der Einfluss von Schwebstoffen in diesem Zusammenhang nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann, so spricht die bemerkenswert geringe Schwankungsbreite doch gegen diese Annahme.

<sup>24</sup> Eine um das ungefähr 5-fach überhöhte Schwebstoffkonzentration gegenüber Vergleichswerten der übrigen Aufnahmejahre ließ sich auch anhand von CZCS-Daten zum Zeitpunkt des Überflugs nachweisen.

Vielmehr scheinen sich hier Defizite des Cubic-Spline-Verfahrens auszuwirken, da der nächste Stützpunkt zur Interpolation der Kalibrierkonstanten für MSS-Kanal 4 im langwelligeren Bereich bei TM-Kanal 5 und somit im mittleren Infrarot liegt. Die damit verbundenen, geringfügigen Abweichungen der Reflexionswerte sind allerdings nur bei einer absoluten Reflexion nahe Null im nahen Infrarot feststellbar.

Eine relativ hohe Schwankungsbreite wiesen die Innenstadtsignatur im nahen Infrarot und heller Kalkstein im Wellenlängenbereich um 930 nm auf. Das Maximum der Abweichungen im nahen Infrarot deutete in diesem Zusammenhang auf einen Einfluss von Vegetation hin und eine Analyse der Einzelsignaturen bestätigte die Aufnahme des Jahres 1972 als Hauptursache dieser Abweichungen. Unter Ausschluss der Signaturen dieses Datensatzes verringerte sich der Fehleranteil in den vorher problematischen Wellenlängenbereichen deutlich. Die bei der visuellen Inspektion der Daten auffälligen Unterschiede in der Vegetationsreflexion dieser Szene gegenüber den anderen Datensätzen lag im unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkt der Daten begründet (vgl. Kap. 5). Die damit verbundene Problematik für die hier betrachtete Fragestellung wurde deshalb in Kapitel 9 einer kritischen Betrachtung unterzogen.

Unter Ausschluss der genannten Fehlerkomponenten konnte die absolute Vergleichbarkeit innerhalb der MSS-Zeitreihe aufgrund der Prüfsignaturen als ausgesprochen gut angenommen werden. Die maximal auftretende Schwankungsbreite von ungefähr  $\pm 2\%$  absoluter Reflexion wurde für die meisten Referenzoberflächen in allen Kanäle des MSS deutlich unterschritten. Der Vergleich der MSS-Aufnahmen aus den Jahren 1977 bis 1988 ergab somit keine Anhaltspunkte für Inhomogenitäten in der radiometrischen Korrektur. Diese Tatsache lag nicht zuletzt sicherlich auch an den günstigen atmosphärischen Bedingungen (hohe Transmissionsgrade) zum jeweiligen Überflugszeitpunkt und der damit verbundenen Möglichkeit der empirisch angepassten Topographiekorrektur.

#### 7.3.4 Evaluierung der Interkalibrierung von Landsat-TM und Landsat-MSS

Eine Überprüfung der Anpassung von Landsat-MSS an Landsat-TM war notwendig, um einen Eindruck der absoluten Vergleichbarkeit nachfolgender Analysen über lange Zeiträume zu gewinnen. Die sinnvolle Interkalibrierung beider Systeme war daher von entscheidender Bedeutung für die Güte anknüpfender Bearbeitungsverfahren.

Eine derartige Überprüfung erfolgte wiederum anhand zuvor nicht in die Interkalibrierung einbezogener Testsignaturen. Da für 1988 zeitgleiche Aufnahmen der Landsat-5-Plattform zur Verfügung standen, ergab sich nicht das Problem invarianter Flächen. Vielmehr konnte eine Reihe von Objekten und somit der gesamte Spektraldatenraum einschließlich Vegetationssignaturen abgedeckt werden.



Die Kontrolle der Interkalibrierung erfolgte mittels zusammengesetzter Signaturen aus den mit beiden Sensoren aufgezeichneten 10 Wellenlängenbereichen des reflektiven Spektrums. Dazu wurden identische Flächen aus beiden Bilddatensätzen extrahiert, deren Reflexionswerte anhand der Wellenlängenbereiche von Landsat-TM und Landsat-MSS sortiert und zu jeweils einer einzigen Signatur zusammengesetzt (Tabelle 7.5).

Tabelle 7.5: Kanalweise, zentrale Wellenlänge der zusammengesetzten Signaturen (in nm)

Kanal	TM 1	MSS 1	TM 2	MSS 2	TM 3	MSS 3	TM 4	MSS 4	TM 5	TM 7
zentrale Wellenlänge	486	553	570	650	660	757	840	931	1676	2223

Die daraus gewonnenen Signaturen für einige typische Oberflächen der Untersuchungsgebiete zeugten von der guten Vergleichbarkeit beider Systeme. Die Analyse spektral unterschiedlicher Oberflächen aus verschiedenen Bildbereichen ergab weitgehend homogene Signaturverläufe, unabhängig vom absoluten Reflexionsniveau (Abbildung 7.16).

Geringfügige Abweichungen zwischen MSS-Kanal 1 und TM-Kanal 2 sowie MSS-Kanal 2 und TM-Kanal 3, welche fast identische Wellenlängenbereiche repräsentieren, zeugen von marginalen Inkonsistenzen im Interkalibrierungsmodell. Diese können zum Teil aber auch auf die unterschiedliche geometrische Auflösung beider Systeme zurückgeführt werden. Diese führt zu einer Kontrastverminderung in der Oberflächenreflexion benachbarter Pixel. Aufgrund der absoluten Größenordnung der verbliebenen Reflexionsunterschiede kann allerdings von einer zuverlässigen Interkalibrierung der beiden Aufnahmesysteme ausgegangen werden.

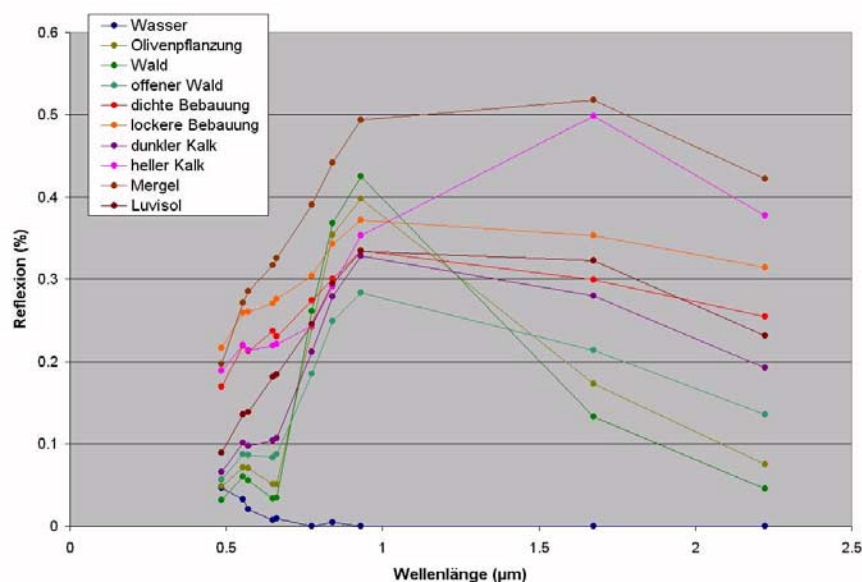


Abbildung 7.16:  
Synthetische Spektralsignaturen aus interkalibrierten TM- und MSS-Daten des Jahres 1988

## 8 Ableitung von Oberflächenparametern aus multispektralen Fernerkundungsdaten

Eines der Kernprobleme bei der Auswertung optischer Fernerkundungsdaten liegt in der geometrischen Dimension der Daten begründet, der Größe eines Bildelementes oder Pixels. Verschiedene Verfahren versuchen dem unterschiedlichen Verhältnis zwischen Pixel- und Objektgröße gerecht zu werden – meist mittels der statistischen Zuordnung spektral definierter Objekte zu Prototypsignaturen (Multispektralanalyse) oder der Interpretation räumlicher Statistiken (Texturanalyse, Kriging).

Bei der Analyse von Vegetation kommen, neben der Problematik hinsichtlich der geometrischen Auflösung, weitere komplizierende Faktoren aufgrund des Beobachtungsobjektes zum Tragen. Dazu zählen die charakteristischen Eigenschaften der grünen Pflanzenteile, insbesondere der Blätter, ebenso wie die Komplexität im Reflexionsverhalten der Gesamtpflanze und des Pflanzenbestandes. Weiterhin trägt der Hintergrund aus Boden und Gestein in Abhängigkeit von Bedeckung und Bestandeigenschaften zur am Sensor gemessenen Reflexion bei (Guyot 1990; Atzberger 1998).

Oft werden daher zur Analyse von Pflanzenbeständen spektral definierte Indizes berechnet oder Datenraumtransformationen zur Hervorhebung der Vegetation eingesetzt, um so eine Aussage über Vegetationsbedeckung oder Vegetationstypen treffen zu können. Aufgrund einer Vielzahl operationeller Anwendungen ist insbesondere der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) weit verbreitet. Während diese Vorgehensweise bei Beständen mittlerer Bedeckung als hinreichend genau und kalibrierbar angesehen werden kann, treten mit zunehmendem Boden- oder Gesteinsanteil am Spektralsignal wachsende Ungenauigkeiten auf, da diese als solche schon einen von Null verschiedenen NDVI nach sich ziehen. Deutlich wird dieses Problem, wenn es sich – wie im Fall Zentralkretas – um Standorte mit gängigen Vegetationsbedeckungen von unter 10 % bis rund 60 % handelt. Insbesondere auf dem weit verbreiteten Kalkuntergrund muss aufgrund des starken Anstiegs der Reflexion zwischen 600 und 900 nm mit Schätzungen eines Vegetationsanteils von bis zu 25 % auf vegetationsfreien Flächen gerechnet werden (Huete et al. 1985; Ringrose et al. 1989).

Reflexionsbasierte, quantitative Modellierungsansätze stellen eine fortgeschrittene Alternative zur eher simplifizierenden Indexberechnung dar. Es existiert eine Fülle verschiedener Modellierungsverfahren zur Vegetationsanalyse mit Fernerkundungsdaten, denen die Ableitung von Vegetationseigenschaften aus multi- oder hyperspektralen Fernerkundungsdaten gemeinsam ist. Die Herstellung des Zusammenhangs zwischen fernerkundlich erfasster Reflexion der betrachteten Oberfläche und ausgewählten Vegetationsparametern kann auf empirischer Basis oder durch physikalisch basierte und mathematisch-statistisch umgesetzte Simulation der Realität erfolgen. Für die analytische Vegetationsmodellierung spielt dabei die Nachbildung

prägender Eigenschaften des Pflanzenbestandes und seiner Einzelkomponenten bis auf die Ebene der Einzelpflanze eine entscheidende Rolle. Die meisten Modelle existieren dementsprechend zur Simulation mathematisch gut fassbarer Oberflächen, wie Getreidekulturen, Steppenvegetation oder Forstkulturen (Jaquemoud 1995; Atzberger 1998; Skidmore und Schmidt 1998).

Die modellhafte Ableitung der Vegetationsbedeckung in heterogen strukturierten, mediterranen Gebirgsräumen stellt sich für die Simulation von Oberflächeneigenschaften als problematisch dar. Bezogen auf Kreta kommt die Tatsache eines durch die Topographie stark modifizierten Landschaftsgefüges hinzu, verbunden mit stark höhen- und expositionsabhängiger Vegetationsausprägung. Die uneinheitliche Vegetationszusammensetzung mit überwiegend baum- und strauchartigen Spezies, der stark variable Bodenanteil am Untergrund sowie meist fehlende Zusatzdaten klimatischer Rahmenbedingungen erschweren die seriöse Parametrisierung analytischer Modelle und die darauf basierende Inversion zur Ableitung von Vegetationseigenschaften.

Zur Lösung der skizzierten Problematik kann die Spektrale Mischungsanalyse (SMA) einen Beitrag leisten. Diese führt Reflexionssignaturen unter Einbeziehung physikalisch sinnvoller Randbedingungen auf die Beträge ihrer spektralen Bestandteile zurück (Hill 1998). Der nachfolgend dargestellte Ansatz nutzt Verfahren der SMA, um auf Basis der radiometrisch korrigierten Datengrundlage aus Landsat-TM- und -MSS-Szenen langjährige Analysen der Vegetationsentwicklung abzuleiten.

## 8.1 Problematik spektraler Mischsignaturen

Digitale Fernerkundungsdaten liegen in der Regel als Pixelraster einer genau definierten geometrischen Auflösung in zwei Dimensionen vor. Die geometrische Dimension wird durch eine Reihe von Faktoren bestimmt, wobei dem Bestreben, bessere geometrische Auflösungen zu erreichen, etwa Grenzen in der Sensortechnologie (ausreichender Strahldichtefluss am Messelement) oder – im Fall satellitengestützter Sensoren – in der Datentransferrate zur Bodenempfangsstation gesetzt sind. Für den Landsat Thematic Mapper resultiert daraus ein Instantaneous Field of View (IFOV) von 30 m, verglichen mit 79 m des Landsat-MSS oder 10 m des SPOT-Pan<sup>25</sup>. Zur eingehenden Erläuterung des Problems einer optimalen geometrischen Dimension von Fernerkundungsdaten sei beispielsweise auf die detaillierte Diskussion in Woodcock und Strahler (1987) verwiesen.

---

<sup>25</sup> Die Ermittlung der letztlich idealen Auflösung für eine Sensorconstellation beinhaltet eine Reihe weiterer Faktoren, wie beispielsweise die Kombination aus Plattformgeschwindigkeit, Scanspiegelbeschleunigung bzw. -geschwindigkeit (für opto-mechanische Systeme) und Flughöhe.

Ein häufig erschwerender Faktor bei der Lösung fernerkundlicher Fragestellungen kann in direktem Zusammenhang mit dem Auftreten von Mischpixeln gesehen werden. Die Aufzeichnung spektraler Oberflächen für ein Flächenintegral, das die Dimension des zu beobachtenden Objektes überschreitet, führt zur Erfassung von Mischsignaturen, deren Interpretation einen entscheidenden Problemfaktor darstellt (Foody und Cox 1994). Um beispielsweise mit Sicherheit eine homogene, zu 100 % einer einzigen Oberfläche zuzuordnende Signatur mit Landsat-TM-Daten zu erhalten, muss das beobachtete Objekt eine Minimaldimension von ungefähr  $75 \times 75 \text{ m}^2$  aufweisen – eine Größenordnung, die bei wenigen natürlichen und nur selten bei anthropogen geschaffenen Landoberflächen erreicht wird.

Mit dem Aufkommen der ersten Landsat-Generation, basierend auf dem MSS-Sensor, entstanden daher relativ zügig erste Ansätze zur Mischpixelanalyse fernerkundlicher Daten (Detchmندی und Pace 1972; Horwitz et al. 1975). Die Methodik entwickelte sich aber erst Mitte der 80er Jahre zu einem als semi-operationell zu bezeichnenden Ansatz (Adams et al. 1989). Die Motivation zu dieser Entwicklung entstand durch die Suche nach Lösungen für eine ähnliche Problematik auf anderem Gebiet: es galt, für die Mond- und Marsmissionen der NASA, Möglichkeiten zur berührungsfreien Analyse, der von Sonden auf anderen Planeten gewonnenen Multispektraldaten, zu entwickeln (Singer und McCord 1979; Adams et al. 1986).

In der Folge wurde eine Reihe von Verfahren zur linearen, wie auch zur nicht-linearen Mischungsanalyse entwickelt. Letztere versuchen unter anderem den multiplen Streulichtanteil, etwa in Pflanzenbeständen, zu berücksichtigen, sind aber aufgrund der eingeschränkten a priori Kenntnisse über die jeweilige Oberfläche oder den Vegetationstyp nur bedingt anwendbar (Borel und Gerstl 1994; Foody et al. 1997). Methoden der linearen SMA haben daher die weiteste Verbreitung gefunden und bilden auch die Grundlage des nachfolgend dargestellten Ansatzes<sup>26</sup>.

## 8.2 Theoretischer Hintergrund der Linearen Spektralen Mischungsanalyse

Die spektrale Charakterisierung von Mischpixeln kann anhand der anteiligen Mischung der spektralen Komponenten erfolgen. Dabei wird mittels bekannter Oberflächenspektren, sogenannter „Endmember“, jedes Bildelement hinsichtlich der Anteile dieser Endmember am Gesamtspektrum des Pixels analysiert. Die verwendeten Spektren können entweder aus den Bilddaten selbst gewonnen werden, es handelt sich dann um sogenannte Bild-Endmember,

---

<sup>26</sup> Es entstanden darüber hinaus etliche modifizierte Ansätze, die alle auf linearer SMA basieren, wie beispielsweise verschiedene Derivate des Partial Unmixing (Smith et al. 1994; Boardman et al. 1995) oder des Spectral Angle Mapping (McCubbin et al. 1998). Spectral Angle Mapping wird nachfolgend als Analysewerkzeug im Rahmen der linearen SMA zum Tragen kommen.

oder aus Spektralmessungen am Boden stammen, die entsprechend als Referenz-Endmember bezeichnet werden (Smith et al. 1990b). Während im ersten Fall auch bei fehlender Atmosphärenkorrektur eine SMA durchgeführt werden kann, gilt dies beim Einsatz von Referenz-Endmembern nicht. Der Unterschied zwischen Reflexionsmessungen am Objekt gegenüber satellitengestützter und damit atmosphärenbeeinflusster Messung verhindert einen sinnvollen Vergleich zwischen Bild- und Gelände- bzw. Laborspektrum (Smith et al. 1990a; Settle und Drake 1994).

Verfahren zur linearen SMA optimieren die Ermittlung prozentualer Oberflächenanteile am Pixel über eine Restfehlerminimierung aller Eingangskanäle. Dabei gilt die Annahme, dass jedes Photon mit der observierten Oberfläche nur einmal interagiert. Über ein lineares Modell werden daher die kanalweisen Reflexionswerte der Endmember, entsprechend ihres als „Fraction“ bezeichneten Anteils, am zu rekonstruierenden spektralen Signal gewichtet und addiert:

$$\rho_j = \sum_{i=1}^m F_i \cdot \rho_{i,j} + E_j \quad \text{Gleichung 8.1}$$

mit  $m$ : Anzahl der Endmember

$\rho_j$ : Reflexion eines Pixels im Kanal  $j$

$F_i$ : Anteil (Fraction) des Endmembers  $i$  am Pixel

$\rho_{i,j}$ : Reflexion des Endmembers  $i$  in Kanal  $j$

$E_j$ : Residuum im Kanal  $j$

Das Ergebnis ist ein optimiertes Mischungsmodell dessen unerklärter, spektraler Varianzanteil in einer Restfehlerkomponente, dem Root Mean Squared Error (RMSE), abgelegt wird<sup>27</sup>:

$$RMSE = \sum_{k=1}^p \left( \sqrt{\left( \sum_{j=1}^n (\rho_{j,k} - \rho'_{j,k})^2 \right) / n} \right) / p \quad \text{Gleichung 8.2}$$

mit  $p$ : Anzahl der Pixel eines Bildes

$n$ : Anzahl der Kanäle

$\rho_{i,k}$ : modellierte Reflexion des Pixels  $k$  im Kanal  $j$

$\rho'_{i,k}$ : gemessene Reflexion des Pixels  $k$  im Kanal  $j$

<sup>27</sup> hier: Ableitung des RMSE für das Gesamtbild. Entfällt die Mittelwertbildung über alle Pixel des Datensatzes, kann auch die räumliche Darstellung des pixelweisen RMSE aufschlussreich sein (vgl. Kap. 8.5).

Darüber hinaus können auch die kanalweisen Residuen  $\varepsilon_j$  zur Beurteilung der Modellgüte herangezogen werden:

$$\varepsilon_j = \rho_j - \sum_{i=1}^m F_i \cdot \rho_{i,j} \quad \text{Gleichung 8.3}$$

Die Bedingung, dass die Summe aller Endmemberanteile 100 % des zu modellierenden Reflexionssignals ergeben muss (Gleichung 8.4), erzwingt die vollständige Erklärung des Signals unter Berücksichtigung des RMSE. Man spricht in diesem Zusammenhang daher auch von „constrained SMA“ (Boardman 1990; Smith et al. 1990a; Roberts et al. 1993).

$$\sum_{i=1}^m F_i = 1 \quad \text{Gleichung 8.4}$$

Einige Einschränkungen linearer Mischungsmodelle sind allerdings zu berücksichtigen: Beispielsweise basiert SMA auf der Hypothese, dass ein Großteil der spektralen Varianz innerhalb des Untersuchungsraumes durch eine geringe Anzahl spektraler Endmember erklärbar ist. Während diese Aussage für lunare Beobachtungen oder das Studium von Wüstenregionen zutrifft, muss unter anderen Bedingungen die Gültigkeit dieser Aussage eingeschränkt werden. Je komplexer die Zusammensetzung der untersuchten spektralen Objekte ist, desto größer ist auch die Wahrscheinlichkeit für einen hohen Anteil nicht erklärter spektraler Komponenten innerhalb eines Modells zur Mischungsanalyse.

Eine beliebige Erhöhung der Endmember ist dabei aus statistischen Gründen nicht möglich. Die maximal mögliche Anzahl spektraler Komponenten entspricht der um eins erhöhten Anzahl der Spektralkanäle des betrachteten Datensatzes. Dabei muss zudem berücksichtigt werden, dass die häufig hohe Korrelation verschiedener Spektralkanäle die inhärente, spektrale Dimensionalität bei Multispektraldaten auf zwei bis drei, bei Hyperspektraldaten auf fünf bis sechs beschränkt (Settle und Drake 1993). Eine definitive Aussage zur maximalen Dimension ist schwierig, da auch der Kontrast der gewählten Endmember in Abhängigkeit von der Sensitivität des Aufzeichnungsinstruments eine wichtige Rolle spielt (Drake und Settle 1989; Smith et al. 1990b). Die eingeschränkten Möglichkeiten hinsichtlich der Dimensionalität der Daten und die damit einhergehende maximale Anzahl einsetzbarer Endmember wird noch in den Betrachtungen zur unterschiedlichen Sensitivität von Landsat-TM und -MSS zur Detektion verschiedener Oberflächenelemente eine Rolle spielen (vgl. Kap. 8.5).

Auch wenn in der Regel mit zunehmender Anzahl eingehender Spektralkanäle die Dimension unabhängiger Endmember steigt, kann nicht pauschal von einer Verbesserung der spektralen Differenzierung ausgegangen werden. In Einzelfällen können ungünstige Kontrastverhältnisse

verschiedener Endmember in zusätzlichen Kanälen die Erkennbarkeit dieser Komponenten sogar herabsetzen (Sabol et al. 1990).

Komplizierend kommt hinzu, dass die notwendige Annahme einfacher Streuungsprozesse im linearen Mischungsmodell nicht immer gegeben ist. Vor allem die Vegetationsreflexion ist, aufgrund der schon beschriebenen Komplexität der Pflanzen- und Bestandseigenschaften, durch Mehrfachstreuung gekennzeichnet (Guyot 1990; Atzberger 1998). Erschwerend wirkt vor allem die besonders hohe Transmissivität vitaler Blätter im nahen Infrarot. Hinsichtlich der in Phryganabeständen überwiegend kompakten und kugelförmigen Büsche mit auffallend dicken Blättern kann zumindest von einer Minimierung dieser Effekte ausgegangen werden. Auch die deutlich wellenlängenabhängige Direktionalität, welche vor allem von der Oberflächenrauigkeit der Blätter und der Aufnahmekonstellation abhängt, spielt aufgrund der relativ hoch stehenden Sonne zum Aufnahmezeitpunkt bei gleichzeitiger Nadirsicht eine eher untergeordnete Rolle (Breece und Holmes 1971; Suits 1971; Liang et al. 1997).

In der Summe verbindet die lineare SMA vor allem eine Reihe von Vorteilen: so hat sich beispielsweise bei vielen Untersuchungen gezeigt, dass bei der Auswahl korrekter Endmember, fehlende Spektralanteile am Gesamtsignal oder Effekte der multiplen Streuung zuverlässig in den kanalweisen Residuen und damit im RMSE akkumuliert werden. Die damit verbundene Genauigkeit kann als so hoch eingeschätzt werden, dass darauf basierende Auswertungen der Residualspektren möglich sind. Häufig können Komponenten, die aufgrund der Kontrastverhältnisse nicht in das Endmembermodell integrierbar waren, anhand einer Residualspektralanalyse detektiert werden (Sabol et al. 1992; Roberts et al. 1993; Hill et al. 1994).

Das grundlegende Problem der Mischpixelanalyse wird somit durch die Erstellung von Fraction-Bildern zuvor definierter Endmember – eine sinnvolle Endmemberselektion vorausgesetzt – zuverlässig gelöst. Damit eignet sich SMA hervorragend zur Charakterisierung und spektralen Analyse von Strukturelementen eines Landschaftsgefüges, die unterhalb der räumlichen Auflösung des aufzeichnenden Sensors liegen. Dies betrifft bei den Sensoren der Landsat-Plattformen nahezu alle betrachteten Oberflächen.

Darüber hinaus lassen sich nicht nur qualitative, sondern auch quantitative Aussagen über die zu untersuchenden Objekte ableiten; im Vordergrund steht nicht eine Klassenzugehörigkeit, sondern die thematisch fundierte und physikalisch basierte Auswertung. Vor allem wirken die bei vielen Vegetationsindizes störenden pedo- und lithologischen Hintergrundeigenschaften nicht auf die Schätzung des Vegetationsanteils ein (Guyot 1990). Die Zuverlässigkeit der Aussage lässt sich somit vor allem in Gebieten mit geringer Vegetationsbedeckung bedeutend steigern.

Und schließlich kann bei der Verwendung von Referenz-Endmembers, auf Basis bodengestützter Hyperspektraldaten, jedes beliebige Sensorspektrum, bei Kenntnis der entsprechenden Sensorcharakteristika, abgeleitet und eine zuverlässige Vergleichbarkeit multi-sensoraler Untersuchungen gewährleistet werden. Im vorliegenden Fall der Untersuchungen mit

Landsat-TM- und -MSS-Daten, ist dies ein nicht zu unterschätzender Vorteil gegenüber empirisch basierten Verfahren.

### 8.3 Stratifizierte Endmembermodellierung

Bei der spektralen Mischungsanalyse stellt die Selektion adäquater Endmember den entscheidenden, qualitätsbestimmenden Faktor dar. Endmember können in diesem Zusammenhang nicht beliebig gewählt werden, sondern müssen zunächst die physikalisch basierte und statistisch determinierte Bedingung der „Reinheit“ erfüllen. Da die SMA eine Kombination verschiedener Einzelkomponenten zu einem spektral sinnvollen Gesamtkomplex verlangt, müssen die dazu eingesetzten Endmember den Datenraum auch tatsächlich repräsentieren. Dies kann nur über die spektralen Eigenschaften solcher Materialien erreicht werden, die die begrenzenden Vektoren des Merkmalsraumes so charakterisieren, dass im Idealfall alle Mischungen dieser Endmember innerhalb des aufgespannten Vektorraumes liegen. Die Definition eines solchen einhüllenden Epipeds um einen mehrdimensionalen Spektraldatenraum ist nur mit Endmembers ohne spektralen Fremdeinfluss möglich. Ausführliche Diskussionen über die Problematik spektral reiner Endmember finden sich beispielsweise in Settle und Drake (1993) oder Price (1994).

Weiterhin enthalten Mischsignaturen immer eine Schattenkomponente, entweder geländebedingt oder als sogenannten „Mikroschatten“ im Subpixelbereich. Ersterer wird durch die topographiegestützte, radiometrische Korrektur ausgeglichen, während Mikroschatten ein inhärentes Phänomen nahezu aller Strukturelemente einer Landschaft darstellen. Als Konsequenz beinhaltet ein formal angepasstes Mischungsmodell immer als eines der Endmember „Schatten“, wobei im Folgenden unter diesem Begriff alle Schatten- und Beschattungskomponenten subsumiert werden sollen.

Die wesentliche Problematik liegt daher in der Bestimmung der übrigen spektral relevanten, physischen Oberflächenkomponenten. Es existieren eine Reihe von Verfahren, die auf mathematisch-statistischer Basis versuchen, eine sinnvolle Selektion von Endmembers aus spektralen Datenbanken (Referenz-Endmember) oder direkt aus den Bilddaten (Bild-Endmember) abzuleiten. Auf der anderen Seite der Selektionsmethoden steht der „trial-and-error“ Prozess, also die Auswahl geeigneter Spektren aufgrund der Geländekenntnisse des Bearbeiters. Falls die spektrometrische Datenerhebung, Geländedokumentation und Bildverarbeitung in einer Hand liegen, ist damit ein nicht zu unterschätzender Vorteil aufgrund des gebündelten Expertenwissens verbunden. Schließlich muss auch bei den „objektiven“ Verfahren die endgültige Auswahl der geeigneten Spektren durch den Bearbeiter erfolgen. Als ideale Lösung kann daher eine Vorgehensweise avisiert werden, die eine objektive Vorauswahl sinnvoller Endmember bei anschließender Kontrolle und Optimierung durch den Bearbeiter zulässt (Tompkins et al. 1997).



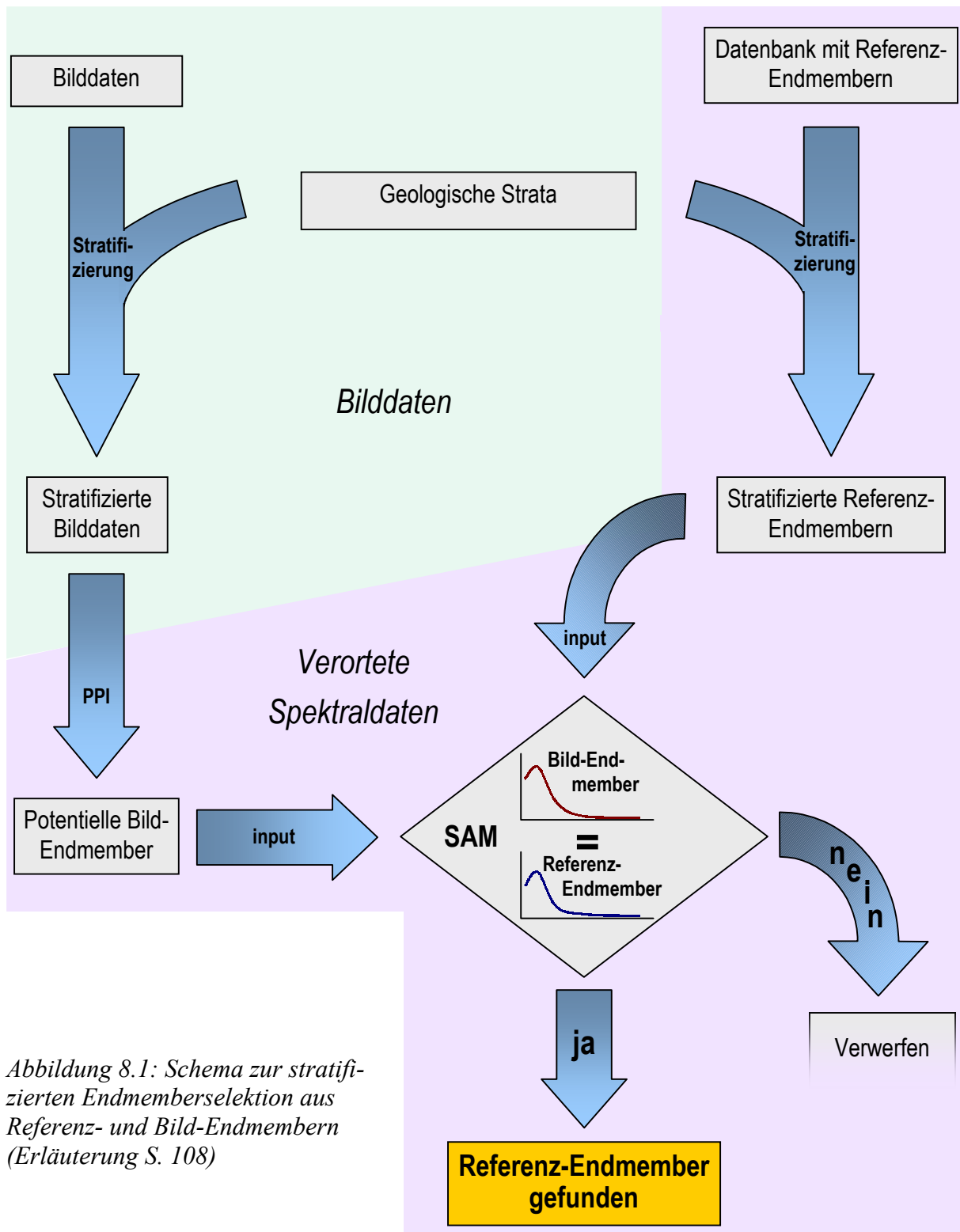


Abbildung 8.1: Schema zur stratifizierten Endmemberselktion aus Referenz- und Bild-Endmembers (Erläuterung S. 108)

Mathematisch-statistische Selektionsverfahren tendieren dazu – gemäß der Idee zur Charakterisierung eines spektralen Datenraumes durch diesen begrenzende Endmember – die spektralen Extreme einer Region zu betonen. Dieser prinzipiell sinnvollen Vorgehensweise widerspricht im Einzelfall allerdings das Auftreten singulärer oder räumlich begrenzter Phänomene, die sich im Spektralraum deutlich von anderen Oberflächen abheben, ohne jedoch

eine besondere Bedeutung zur Beschreibung der untersuchten Phänomene zu haben. Als Beispiel können extrem helle Marmorsteinbrüche in Kalksteinmassiven genannt werden, wie beispielsweise am Kouloukonas im Norden Zentralkretas. Solche Oberflächenspektren erfüllen die formalen Kriterien zu ihrer Ausweisung als Endmember, repräsentieren allerdings nicht die physisch manifestierten Charakteristika der überwiegenden Oberflächenanteile.

Unter dieser Maßgabe wurde ein Prozessierungsschema entwickelt, das die Ableitung von Bild-Endmembers aus Satellitendaten ermöglichte und diesen in einem zweiten Schritt Referenz-Endmember zum Vergleich gegenüberstellte (Abbildung 8.1). Die Ableitung von Bild-Endmembers garantierte die Relevanz der selektierten Spektren für den im Datensatz abgedeckten Spektraldatenraum. Der automatisierte Abgleich zwischen Referenz-Endmember-Bestand und potentiell Bild-Endmember führte zur Auswahl reiner Reflexionssignaturen aus Geländemessungen, wie sie in den Bilddaten aufgrund der Mischpixelproblematik meist nicht vorhanden sind.

Angesichts heterogen strukturierter Arbeitsgebiete und einer Vielzahl von Geländemessungen war eine Selektion sinnvoller Referenz-Endmember aus dem zu diesem Zweck erstellten Datenmanagementsystem nur gebietsweise möglich. Gleiches galt für die Untersuchung des durch die Satellitendaten abgedeckten Datenraumes. Die schon während der Geländearbeiten angewandte Samplingstrategie entlang geologischer Einheiten wurde zu diesem Zweck anhand der digital aufbereiteten geologischen Karte auf die Datenanalyse übertragen (vgl. Kap. 5). So wurden die beiden Arbeitsgebiete, die Gebirgszüge von Psiloritis und Asterousia, für die Selektion differenzierter Endmember ausgegliedert und in Subeinheiten zerlegt. Eine Auswahl möglicher Referenz-Endmember war so im GIS möglich, um den Bild-Endmembers aus entsprechend aufbereiteten Bilddaten gegenübergestellt zu werden.

### 8.3.1 Bild-Endmember

In einem ersten Schritt erfolgte daher eine Analyse der stratifizierten Bilddaten. Deren Ziel war die Zusammenstellung einer Reihe potentieller, bildbasierter Endmemberkandidaten, die auf ihre Eignung zur Mischungsanalyse überprüft werden mussten. Es existieren eine Reihe von Verfahren zur Detektion extremer und somit als Endmember geeigneter Oberflächen in einem Datensatz, wie etwa die Hauptkomponentenanalyse (Cross et al. 1991), Selektion mittels neuronaler Netze (García-Haro et al. 1999), multiple Entmischung oder der Pixel Purity Index (PPI), ein empirisch abgeleitetes Maß für die Reinheit eines Spektrums (Boardman et al. 1995). Hier wurde Letzterer zur Vorstrukturierung der Bilddaten hinsichtlich einer Endmemberauswahl angewendet.

### 8.3.1.1 Pixel Purity Index

Beim PPI wird ein beliebiger Zufallsvektor in der Dimensionalität des zu analysierenden Datensatzes generiert und alle Bildpunkte oder eine zu definierende Submenge auf diesen Vektor projiziert. Anhand der Lage der Pixel am Vektor können jene bestimmt werden, die ein spektral extremes Verhalten hinsichtlich dieser Richtung im multidimensionalen Spektralraum aufweisen. Dabei dient ein vorher festzulegender Schwellwert zur Definition der extremen Pixel am Ende des Zufallsvektors. Bei einer hinreichend großen Anzahl von Iterationen kann davon ausgegangen werden, dass solche Bildpunkte, die tatsächlich die Einhüllende des Multispektralraumes beschreiben, entsprechend häufig als Extrema selektiert werden. Dieser Häufigkeitswert wird daher als Pixel Purity Index bezeichnet.

Im vorliegenden Fall wurde bei 1.000 Iterationen der gesamte Bildbereich eines Stratum zur Analyse herangezogen. Als Extrema wurden jeweils die am Vektorende liegenden 5 % aller Pixel definiert. Das daraus resultierende Indexbild weist die höchsten Werte in solchen Bereichen auf, die potentielle Endmemberkandidaten darstellen und damit am häufigsten als extrem ausgewiesen wurden.

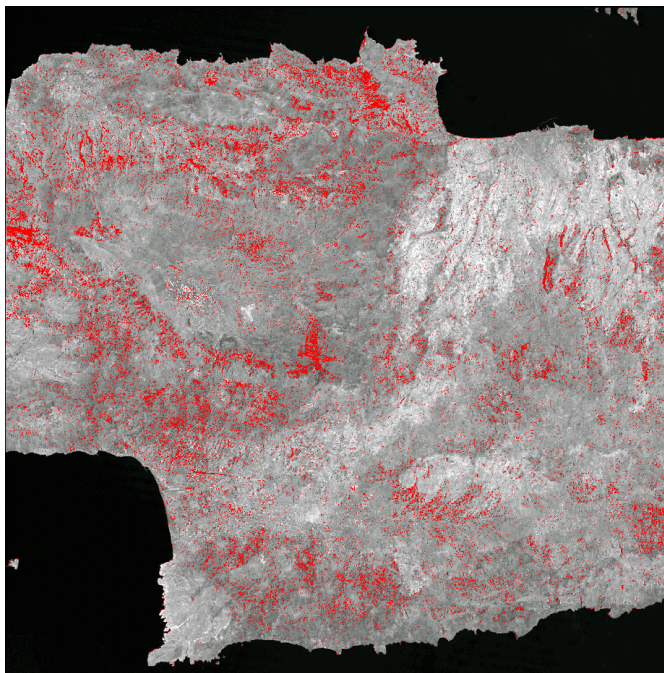


Abbildung 8.2: Beispiel einer PPI-Ausgabe für Zentralkreta

Bei 1.000 Projektionen auf zufällig gewählte Vektoren kann von einer repräsentativen Auswahl der im PPI-Bild erfassten Pixel ausgegangen werden. Diese Bildbereiche können, müssen aber nicht geeignete Endmember darstellen (Abbildung 8.2). Die finalen Endmember sollen einerseits die Eckpunkte einer Einhüllenden um den zu beschreibenden Multispektralraum bilden, andererseits stellt die inhärente Dimensionalität des Datensatzes jedoch eine statistisch determinierte Begrenzung der Endmember-Anzahl dar. Somit müssen aus der potentiell hohen Zahl mittels PPI extrahierter Punkte, jene Kandidaten selektiert werden, die

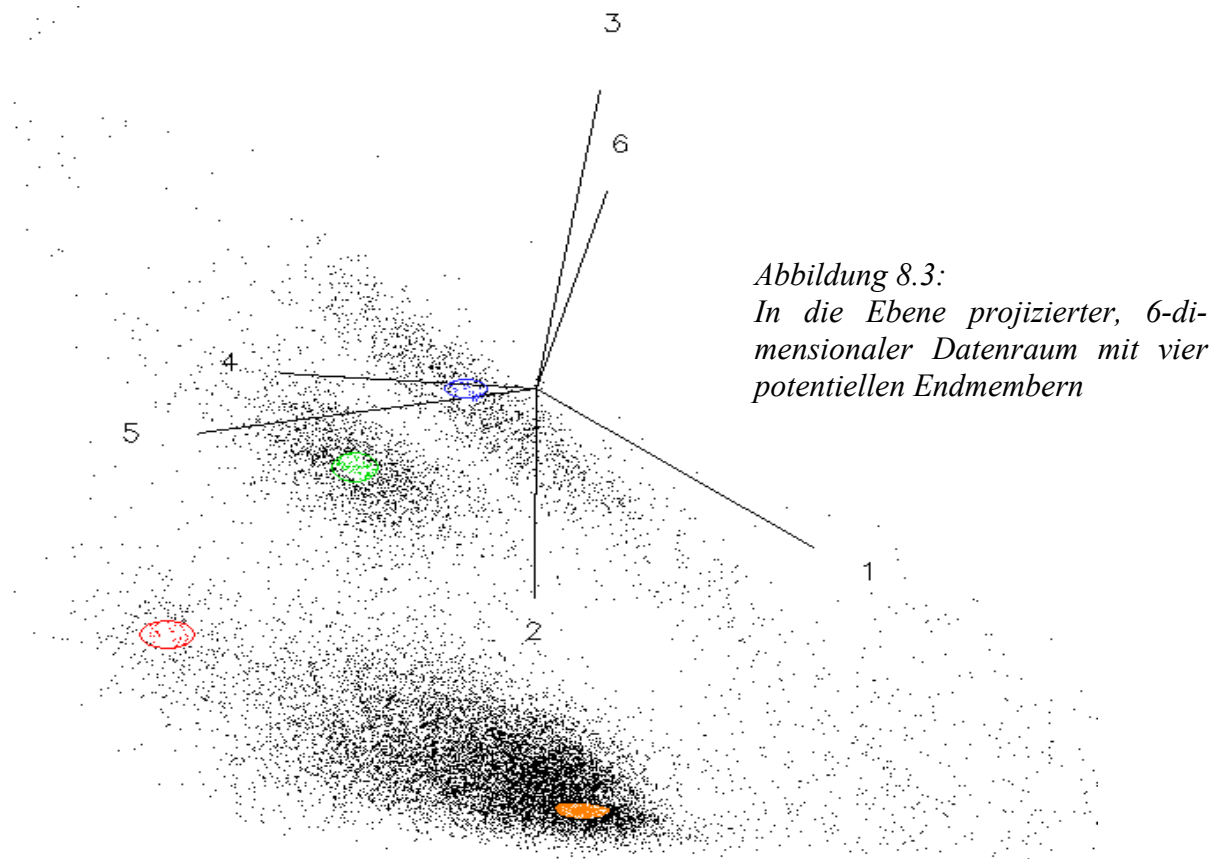
für die Datenraumbeschreibung tatsächlich am besten geeignet sind. Dazu ist eine graphische Umsetzung der selektierten Bildpixel in den Spektraldatenraum angebracht, um ihre spektralen Eigenschaften und die relative Lage zueinander besser beurteilen zu können.

### 8.3.1.2 *Selektion potentieller Bild-Endmember*

Im Anschluss an die Berechnung des PPI werden jene Pixel aus dem Satellitenbild extrahiert, die als Endmember geeignet erscheinen. Dies kann über die höchsten Indexwerte mittels Schwellwertverfahren oder aber durch interaktive Flächenabgrenzung geschehen, falls zusätzliche Informationen über das Arbeitsgebiet aus Karten, Luftbildern, Literatur oder aufgrund von Geländekenntnissen vorliegen.

Alternativ können in einem ersten Schritt alle im PPI-Bild repräsentierten Punkte übernommen und anschließend durch den Einsatz geeigneter Darstellungsformen im Spektraldatenraum umgesetzt werden. Zu diesem Zweck existieren multidimensionale Visualisierungstechniken, die eine Rotation der Bildpunkte in theoretisch unbegrenzt dimensionalisierten Spektralräumen erlauben (Boardman 1993). Es bilden sich je nach Betrachtungswinkel mehr oder minder deutliche Cluster ab, die zur Endmemberdefinition herangezogen werden können. Der Visualisierungsvorgang lässt sich zu beliebigen Zeitpunkten anhalten, um die verschiedenen Perspektiven zur interaktiven Definition spektral geeigneter Signaturen aus Datenclustern zu nutzen. Diese werden bei einer fortgesetzten Rotation mitgeführt, so dass die Auswahl überprüft werden kann (Abbildung 8.3). Die daraus resultierenden Spektren stellen die bestmögliche Repräsentation des Datenraumes auf Basis der Bilddaten dar und können als Mittelwertspektren gespeichert werden.

Die eingehende Analyse dieser Spektren belegt, dass trotz der vorgeschalteten Auswahlverfahren nicht alle Signaturen als Endmember betrachtet werden können. Beispielsweise führt die Extraktion der deutlich erkennbaren Cluster aus den als extrem selektierten Pixeln auch zur Generierung von Mischsignaturen aus Vegetation und Kalken. Dies lässt sich aus der spektralen Repräsentation im Gelände beobachteter Landschaftsparameter schlüssig erklären: Auf Kreta bilden die verkarsteten Kalke vor allem im Zentralmassiv des Psiloritis und im Kouloukonas weite Flächen mit geringen Bodenbedeckungen bei gleichzeitig mittlerer Vegetationsdichte. Bodenmaterial findet sich an solchen Standorten fast ausschließlich im Durchwurzelungsbereich der Pflanzenindividuen. Die aus solchen Konstellationen resultierenden Spektralsignaturen weisen über den gesamten Wellenlängenbereich hohe bis sehr hohe Reflexionswerte auf. Liegen aufgrund der geometrischen Auflösung des jeweiligen Sensors wirklich reine Signaturen solcher Kalke nicht oder nur vereinzelt vor, stellt die Mischsignatur, bezogen auf den Bilddatensatz, eine extreme Spektralsignatur dar. Daher muss aus dieser Auswahl die letztendliche Zusammenstellung sinnvoller Oberflächensignaturen durch den Abgleich mit Referenz-Endmembers der Datenbank erfolgen (Smith et al. 1990a).



### 8.3.2 Referenz-Endmember

Zum Vergleich von Bild- und Referenz-Endmembern wurden die während verschiedener Geländekampagnen erhobenen Hyperspektraldaten auf die Wellenlängenbereiche von Landsat-TM und -MSS interpoliert. Nach dem Resampling lagen drei identische Versionen der Spektraldatenbank in den Auflösungen des ASD FieldSpec-II, des Landsat-TM und des Landsat-MSS vor. Mit diesem Prozess verbunden ist zugleich eine Verbesserung des Signal-Rausch-Verhaltens (signal-to-noise-ratio, SNR).

Dies beruht auf der Mittelwertbildung einer großen Anzahl hyperspektral aufgezeichneter Kanäle für die Erzeugung der 60 bis 270 nm breiten Spektralkanäle des Landsat-TM. Im Fall des MSS-Sensors bedingen die noch breiteren Bänder des älteren Systems eine noch stärkere Glättung der Daten (Abbildung 8.4).

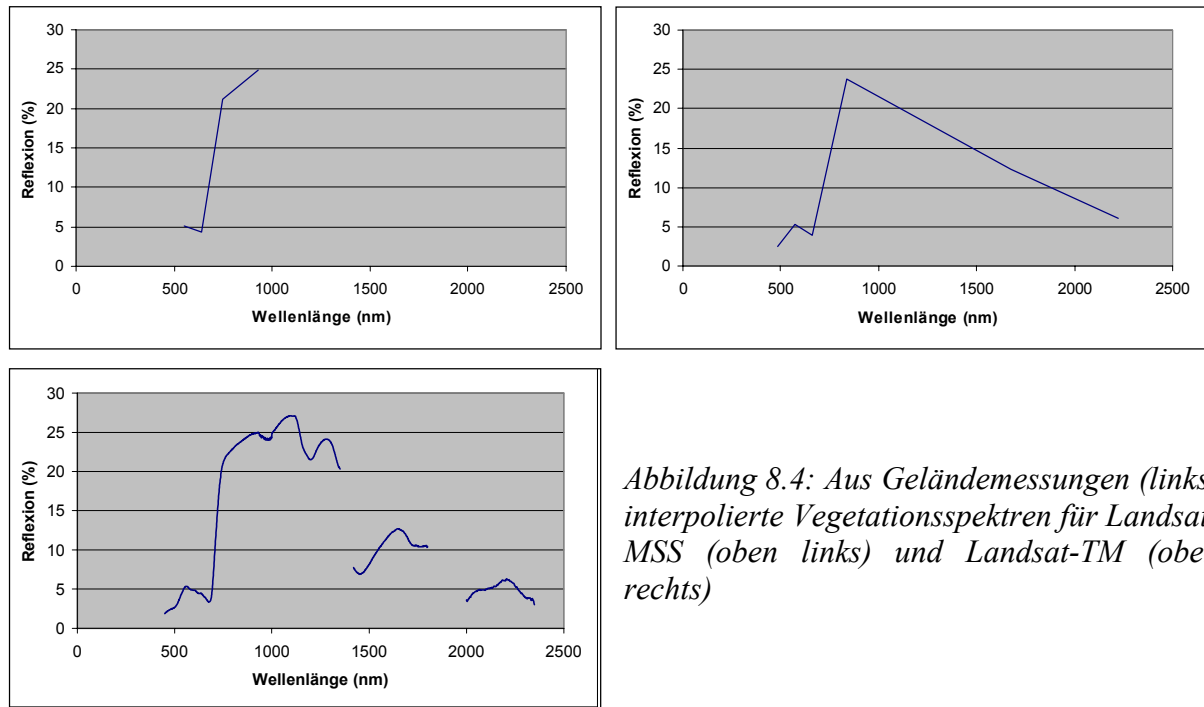


Abbildung 8.4: Aus Geländemessungen (links) interpolierte Vegetationsspektren für Landsat-MSS (oben links) und Landsat-TM (oben rechts)

### 8.3.2.1 Spectral Angle Mapping

Zum automatisierten Vergleich von Bild-Endmembers mit Spektren einer Bibliothek existieren verschiedene Verfahren, wie beispielsweise Spectral Angle Mapping, Spectral Feature Fitting oder Binary Encoding. Alle Techniken weisen Vor- und Nachteile auf, die anhand der jeweils vorliegenden Fragestellung und der Datenlage abgewogen werden müssen. Spectral Feature Fitting und Binary Encoding wurden für spektral hochauflösende Daten entwickelt, da eine ausreichende Anzahl von Spektralkanälen auch eine angemessene Repräsentation vorhandener Absorptionsbanden garantiert (Goetz et al. 1985; Clark et al. 1990). Je geringer die spektrale Auflösung und je schlechter die SNR der Daten, desto wahrscheinlicher ist die Einebnung eines Spektrums hinsichtlich schwacher oder schmaler Absorptionsbanden. Im Zusammenhang mit Landsat-TM- und -MSS-Daten stellen Spectral Feature Fitting und Binary Encoding daher keine Alternative zur Identifizierung von Endmembers dar.

Beim Spectral Angle Mapping (SAM) werden die Winkel zwischen Bild- und Referenz-Endmembers im Multispektraldatenraum bestimmt. Die Winkelabweichung zwischen beiden Spektren stellt dabei das Maß der Ähnlichkeit dar – bei einem Winkel von  $0^\circ$  sind beide Spektren identisch (Kruse et al. 1993; McCubbin et al. 1998). Ein entscheidender Vorteil dieser Methodik ist, dass die Funktionalität des Algorithmus auch im Fall niedrig dimensionierter Datensätze erhalten bleibt. Weiterhin ist die Übereinstimmung von Winkeln im Spektraldatenraum für radiometrisch korrigierte Daten unabhängig von Albedounterschieden der betrachteten Spektren, so dass potentielle Differenzen im Reflexionsniveau zwischen Gelände- oder Laborspektren einerseits und Bilddaten andererseits nicht zum Tragen kom-

men. SAM wurde somit als geeignetes Verfahren zum Vergleich zwischen TM- und MSS-Daten mit Gelände- und Labormessungen herangezogen.

### 8.3.2.2 *Selektion der Referenz-Endmember*

Die photosynthetisch aktive Vegetation stellte für die Selektion geeigneter Endmember – unabhängig vom Arbeitsgebiet – einen relativ unkritischen Faktor dar. Mit extremen Reflexionsminima im sichtbaren Wellenlängenbereich, einem ausgeprägten Maximum hinsichtlich des Reflexionsplateaus im nahen Infrarot und geringerer Reflexion im mittleren Infrarot, wird ein Spektrum photosynthetisch aktiver Vegetation im Multispektraldatenraum grundsätzlich verschieden von allen anderen natürlichen und anthropogenen Oberflächen abgebildet.

Man muss in diesem Zusammenhang beachten, dass Referenzspektren der Vegetation im 6-dimensionalen TM-Datenraum nur selten Signifikanz auf dem Spezies- oder Genus-Niveau aufweisen. Vielmehr handelt es sich eher um Vertreter einer Gruppe ähnlicher Vegetationstypen (Smith et al. 1990a). Während dies als Einschränkung hinsichtlich einer Analyse der Komposition eines Pflanzenbestandes hingenommen werden muss, wird die Ausgliederung bestandsübergreifender Parameter, insbesondere der Vegetationsbedeckung, durch diese Tatsache erleichtert, da eine weitere Stratifizierung nach einzelnen Spezies unterbleibt. Somit finden sich – genügend dichte Bestände mit geringen Anteilen an Trockenvegetation vorausgesetzt – in den Bilddaten immer sinnvolle Vegetationsendmember. Aber auch in Abwesenheit dichter Bestände lassen sich aus Referenz-Endmembers einer Datenbank passende Signaturen problemlos selektieren.

***PSILORITIS.*** Für die von Kalk dominierten Gebirgstteile des Psiloritis konnte auf dieser Basis eine eindeutige Signatur zur Repräsentation des Gesteinsuntergrundes ausgemacht werden. Vor allem die vegetationsarmen Hochflächen des Gebirgsstocks bieten aufgrund nur lokal vorhandener Bodenauflage ideale Bedingungen zur bildbasierten Endmemberselektion. Lediglich die potentiell mit der Höhe über NN veränderlichen Flechtenanteile auf den Kalken können einen Störfaktor zwischen Bild- und Referenz-Endmembers darstellen.

Für die roten bis rotbraunen Böden der Region konnte erwartungsgemäß kein befriedigendes Ergebnis auf Basis der Bilddaten erzielt werden: keines der in der spektralen Datenbank vorliegenden Bodenspektren wurde mit hinreichender Übereinstimmung im Bilddatensatz identifiziert. Für die in den Bilddaten ausschließlich als Mischsignaturen auftretenden Böden auf Kalk, erfolgte eine Auswahl geeigneter Endmember daher ausschließlich anhand der Spektraldatenbank. Unter Zuhilfenahme der geologischen Strata wurden im GIS gelände-basierte Spektralmessungen auf den Kalkflächen selektiert und visualisiert, so dass unter

Einbindung verschiedener Metadaten<sup>28</sup> die Auswahl geeigneter Endmember auch in diesem Fall möglich war.

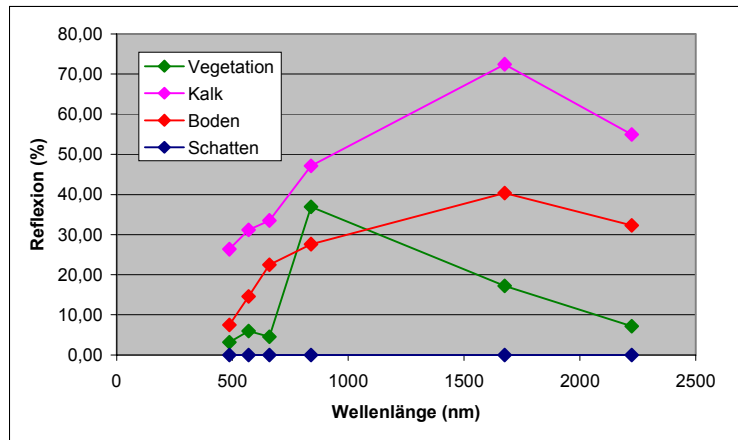


Abbildung 8.5:  
Modell mit vier Endmembern zur  
SMA des Stratums „Psiloritis“

Für den Psiloritis stellte sich schließlich eine Kombination mit vier Endmembern aus einem flechtenbesetzten Kalk, einem Luvisol, photosynthetisch aktiver Vegetation (*Quercus coccifera*) und Schatten als ideal heraus (Abbildung 8.5). Eine sicherlich sinnvolle, fünfte Komponente zur Beschreibung des Anteils der Trockenvegetation ließ sich aufgrund der Dimensionalität des Datenraumes in Zusammenhang mit dem spektralen Kontrast der Endmember nicht mehr realisieren. Diese Tatsache wird von der Beobachtung gestützt, dass durch die ersten drei Hauptkomponenten über 99 % der Gesamtvarianz für den Kernbereich des Psiloritis erklärt werden. Die in Kapitel 8.2 erläuterte maximale Dimensionalität bei der Entmischung wird daher schon bei einer Anzahl von vier Endmembern erreicht.

Hinsichtlich des nur durch MSS-Daten erfassten Zeitraumes bis einschließlich 1983 musste dieses Modell um eine Komponente verringert werden, um so der reduzierten Dimensionalität des MSS-Spektraldatenraumes Rechnung zu tragen. Die spektrale Mischungsanalyse der MSS-Datensätze wurde für den Psiloritis daher mit einem gemischten Hintergrundspektrum durchgeführt, das keine weitere Differenzierung zwischen Gesteins- und Bodenmaterial erlaubte.

**ASTEROUSIA.** Während der Aufbau des Psiloritismassivs fast ausschließlich aus massiv gebankten Kalken und Plattenkalken besteht, stellt sich die Situation in Asterousia als etwas komplizierter dar. Die Nordflanke des Gebirges besteht überwiegend aus den in Kapitel 4.1.2 besprochenen Flyschserien, die als spektral vergleichbar angesehen werden können. Diese sind durch die Übersteilung darunter liegender Sedimente häufig von spektral deutlich

<sup>28</sup> Als Metadaten können prinzipiell alle sinnvollen Attribute, einschließlich multimedialer Inhalte wie Videosequenzen oder digitalisierte Sprachnotizen, abgelegt werden. Im vorliegenden Fall beschränkte sich die Dokumentation auf die während der Geländekampagnen erhobenen Beschreibungen und zugehörige Photographien.



distinguieren Kalkrippen durchbrochen; damit verbunden ist auch ein deutlicher Wechsel der Pedotope und der Pflanzengesellschaften. Demgegenüber steht eine zum Libyschen Meer hin offene Südflanke, die von West nach Ost im Wechsel aus neogenem Kalk, Gneis, Flysch und massivem Kalk besteht. Die Spektralanalyse konzentrierte sich, entsprechend der Lage der betrachteten Gebiete, auf die Teilbereiche der massiven Kalke und des Flysch.

Die anstehenden Kalke im Süden des zentralen Asterousiagebirges sind mit jenen im Psilorit über weite Gebiete vergleichbar, so dass auch identische Kalk- und Bodensignaturen zur SMA herangezogen werden konnten. Die Selektion passender Signaturen für die Flyschgebiete war problematischer, da die Eigenschaften der überwiegend als Regosol ausgeprägten Böden denen des Ausgangsmaterials sehr nahe kommen (vgl. Kap. 4.1.4). Eine chemische Verwitterung verbunden mit der Veränderung spektraler Eigenschaften hat kaum stattgefunden, so dass der spektrale Kontrast zwischen bodenbildendem Substrat und Bodenauflage sehr gering ist (Abbildung 8.6). Ebenso belegt eine auf die Flyschgebiete beschränkte Hauptkomponententransformation der Landsat-TM-Daten eine eher 2- als 3-dimensionale Ausprägung der unabhängigen Hauptkomponenten. Mittels SAM konnte daher lediglich ein einziges zu den selektierten Bild-Endmembern passendes Referenzspektrum zur gleichzeitigen Charakterisierung des geologischen Hintergrundmaterials und Bodens ausgemacht werden.

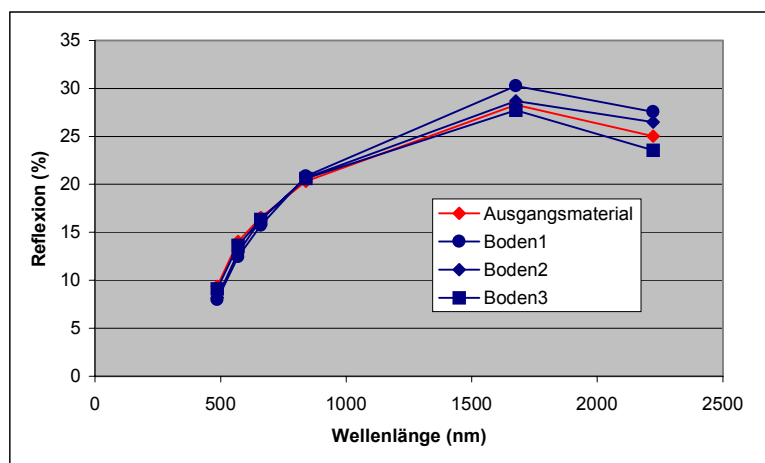


Abbildung 8.6:  
Spektraler Vergleich zwischen  
Bodenauflage und Ausgangs-  
material im Flysch

Daher kam für die Modellierung dieser Zone nur eine Kombination aus drei Endmembern in Betracht: Flysch, photosynthetisch aktive Vegetation und Schatten. Aufgrund der Spektraleigenschaften der im Flysch dominierenden Vegetation wurde ein Spektrum der Dornigen Bibernelle (*Sarcopoterium spinosum*) als Vegetationsendmember identifiziert (Abbildung 8.7). Dieses niedrig dimensionierte Modell konnte sowohl auf Landsat-MSS- wie auch -TM-Daten angewendet werden.

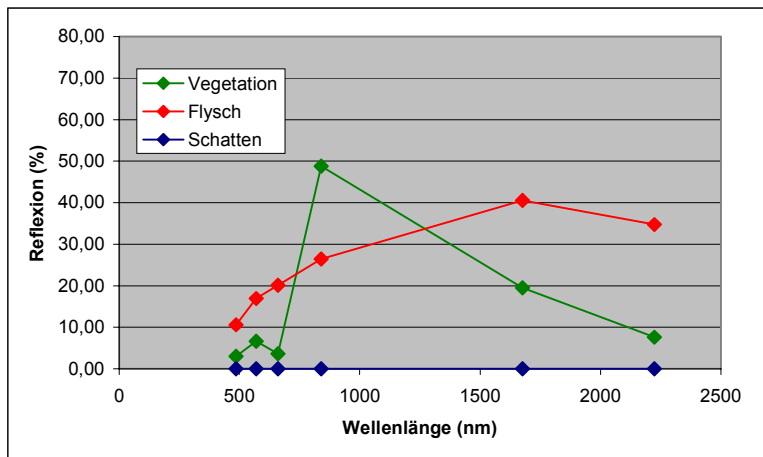


Abbildung 8.7:  
Modell mit drei Endmembern  
zur SMA der Flyschzone im  
Stratum „Asterousia“

## 8.4 Ergebnisse

Für die beiden Arbeitsgebiete im Psiloritis- und Asterousiagebirge wurden spektrale Mischungsanalysen der gesamten Zeitreihe mit TM- und MSS-Daten durchgeführt. Im Anschluss an die Mischungsanalyse wurde die Pseudokomponente des Schattens anhand eines Normalisierungsfaktors anteilig auf die physischen Oberflächenkomponenten verteilt:

$$f = 1/(1 - F_{Schatten}) \quad \text{Gleichung 8.5}$$

mit  $f$ : Normalisierungsfaktor

$F_{Schatten}$ : Anteil des Schatten-Endmembers am Pixel

Dies bewirkt, dass die Summe aller Fractions ohne den Schattenanteil 100 % der Pixelanteile erklären:

$$\sum_{i=1}^{(m-1)} F_i \cdot f = 1 \quad \text{Gleichung 8.6}$$

Man spricht in diesem Zusammenhang von der „Normalisierung“ der Ergebnisse. An den relativen Verhältnissen der Oberflächenkomponenten zueinander ändert sich nichts, jedoch können die Werte anschließend als quantitative Anteile der als Endmember selektierten Komponenten am jeweiligen Bildelement interpretiert werden (Adams et al. 1989).

Zur Erläuterung soll kurz auf die räumliche Interpretation des Schattenanteils eingegangen werden (Abbildung 8.8). Die Schattenfraktion erfüllt mehrere Zwecke bei der Interpretation von Bilddaten mittels SMA (vgl. Kap. 8.2); dementsprechend kann auch ihre Ausprägung in verschiedener Hinsicht interpretiert werden. Schatten im Sinne der SMA stellt ein Komposit aus reellem Schatten und Albedoeffekten dar. Der reelle Schattenanteil korrespondiert oft mit

hohen Vegetationsanteilen, welche nach der topographieabhängigen, radiometrischen Korrektur (vgl. Kap. 7), den höchsten Anteil am Bildschatten verursachen. In heterogenen Bilddaten repräsentiert der Schatten jedoch häufig auch Helligkeitsunterschiede zwischen Endmember und betrachteter Geländeoberfläche.

Die Ursachen solcher Unterschiede können vielfältig sein und beispielsweise von Unterschieden zwischen Reflexionsmessung am Boden und Spektralsignal der entsprechenden Oberfläche im Bild herrühren. Häufig können aber auch, wie im vorliegenden Fall, reelle Unterschiede zwischen Endmember und Geländeausprägung der repräsentierten Oberfläche vorliegen. So sind etwa die niedrigen Schattenanteile für die Hochfläche von Nida mit den Unterschieden zwischen der dort vorherrschenden Grasvegetation gegenüber dem Vegetationsendmember des *Quercus coccifera* zu erklären. Gleiches gilt für die hohen Schattenanteile im Kouloukonas aufgrund der dort vorkommenden marmorartigen Kalkvarietäten, welche wesentlich heller als das flechtenbesetzte Endmember aus Plattenkalk erscheinen.

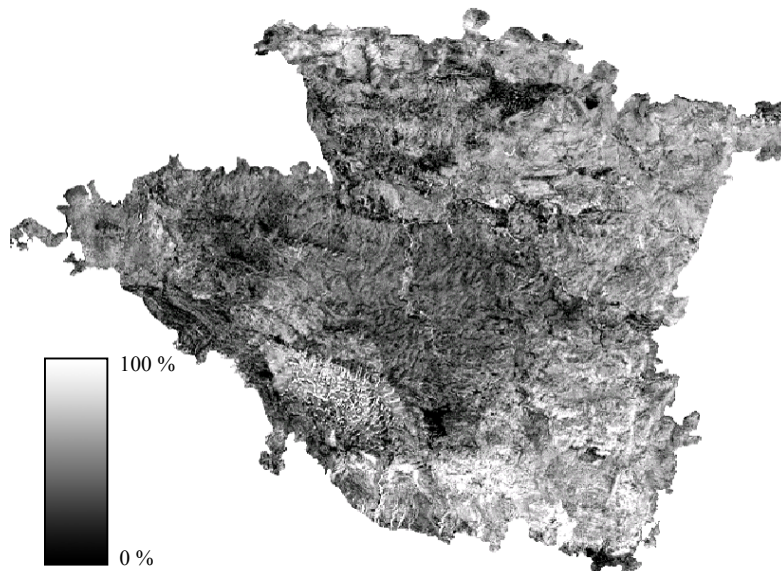


Abbildung 8.8: Schattenanteile des Stratums Psiloritis im Jahr 1996

Die aus der SMA hervorgehenden Bilder der Endmemberanteile verdeutlichen die Vorteile der Datenraumtransformation unter Berücksichtigung geländebasierter Oberflächenkomponenten. Die wichtigsten im Gelände kartierten Gebietscharakteristika finden sich deutlich in den analysierten Bilddaten wieder. So zeichnen die dunklen Bildausschnitte der Vegetationsanteile in Abbildung 8.9a die nahezu vegetationslosen Hochflächen über 1800 m ü.NN im zentralen Psiloritis und die kahlen Hänge des Kouloukonas im Norden nach. Die höchsten Vegetationsanteile finden sich im Wald, wie die nahezu geschlossene, helle Fläche im Talverlauf zwischen Kouloukonas und Psiloritis eindrucksvoll belegt. Dort finden sich neben immergrünem Hartlaubwald intensive Obstbaumkulturen und Gartenanlagen, die teilweise intensiv bewässert werden. Ebenso zeichnet sich die nahezu geschlossene Grasfläche der Hochebene von Nida durch hohe Vegetationsanteile aus.

Für die Waldstandorte wird deutlich, wie unterschiedlich die Wälder Kretas geartet sein können. Die Gebirgswälder von Rouvas und Krousounas weisen kaum höhere Vegetationsanteile als beispielsweise die als Matorral bezeichneten, offenen Baumgruppen des zentralen Hochplateaus auf. Der Übergang zwischen diesen Einteilungen ist fließend und die zugrundeliegten, formalen Kriterien zur Unterscheidung von Wald-, Matorral- und Phryganagesellschaften (vgl. Kap. 4.1.5) lassen keinen unmittelbaren Schluss auf die damit verbundene Vegetationsdichte zu (Tsiourlis und Kasapidis 1999).

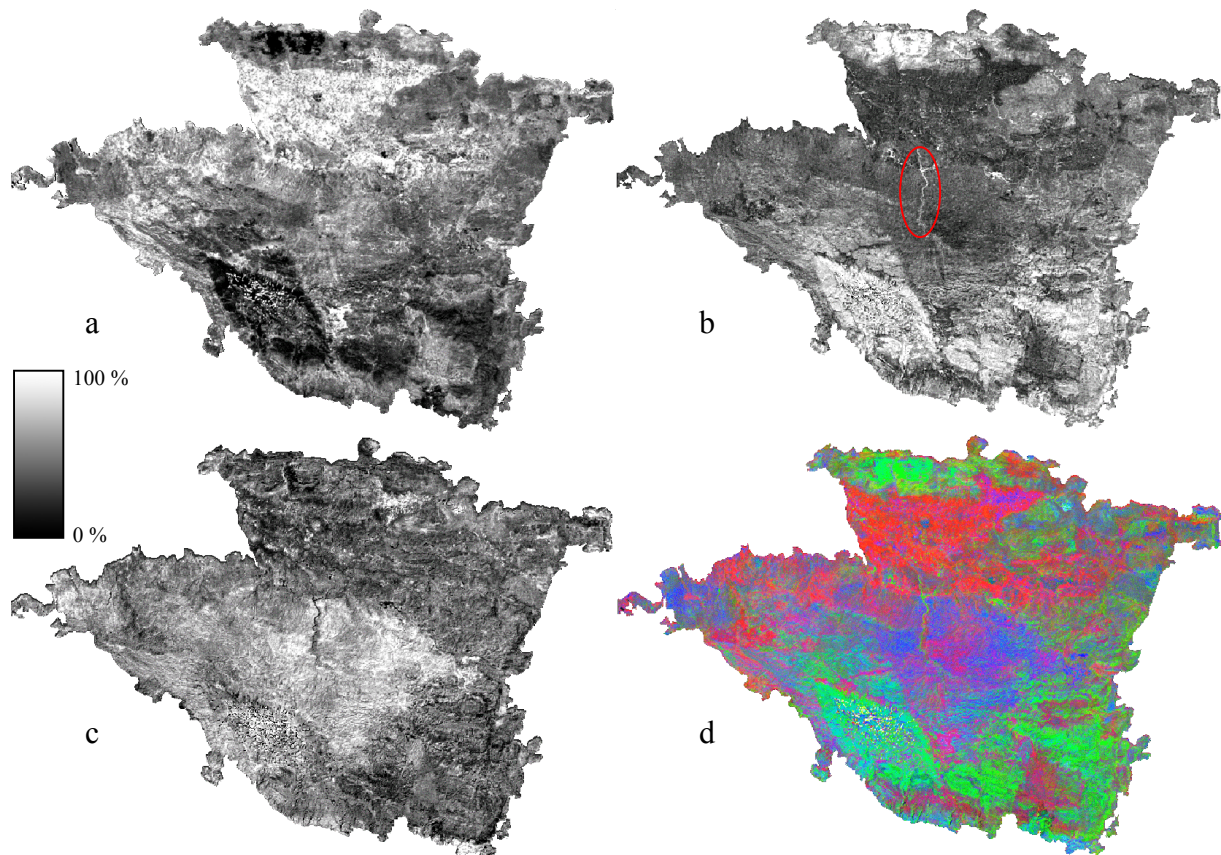


Abbildung 8.9: Ergebnisse der SMA für das Jahr 1996 im Stratum Psiloritis; a: Vegetation, b: Kalk, c: Boden, d: 3-Kanal-Komposit aus Vegetation, Kalk und Boden (rote Ellipse: Tal von Zoniana; weitere Erläuterungen im Text)

Die Darstellung der Kalkfraktion offenbart ein gleichsam als „Negativ-Darstellung“ der Vegetationsfraktion interpretierbares räumliches Muster: die vegetationsarmen Höhenzonen werden zum überwiegenden Teil durch anstehende Kalke geprägt, ebenso die stark erodierten Steilhänge des Kouloukonas im Norden des Bildausschnittes. Während diese hohen Kalksteinanteile weitgehend höhen- und hangneigungsabhängig gedeutet werden können, korrespondieren extrem niedrige Werte mit den Zonen deutlicher Vegetationsbedeckung. Diese Ausprägung kann zweifach ausgelegt werden. Einerseits liegen unter Vegetationsbedeckung tatsächlich häufig niedrige Werte für exponierten Kalk vor, andererseits lässt sich unter dichter Vegetation aufgrund ihrer maskierenden Eigenschaften der Gesteins- und Bodenunter-

grund nicht mehr hinreichend genau differenzieren. Innerhalb der Weidegebiete in Höhenzonen über 700 m ü.NN sind derart hohe Vegetationsanteile allerdings als Ausnahme zu betrachten, so dass die Kalkfraktion quantitativ interpretiert werden kann.

Interessanterweise stechen Ortschaften, wie beispielsweise Anogia, deutlich innerhalb der Kalkfraktion hervor. Die Kalkung der Häuser im südlichen Mittelmeerraum bedingt ein dem Kalk recht ähnliches Spektralsignal, welches Siedlungen – allerdings bei entsprechend hohem Fehler – mit hohem Kalkanteil erscheinen lässt (Hill und Hostert 1996). Gleiches gilt für tief eingeschnittene Straßen entlang der Gebirgshänge, wie im Tal von Zoniana deutlich erkennbar. Allerdings bedingt in diesem Fall meist der im Straßenanschnitt sichtbare Gesteinsuntergrund eine erhöhte Kalkfraktion, so dass auch der damit assoziierte Fehler geringer ist (vgl. Kap. 8.5).

Die Auswertung der dritten Komponente, des Bodens, stellt sich gegenüber dem Kalk als problematischer dar, weil zwei Effekte im Fall niedriger Bodenanteile miteinander konkurrieren. In den hier betrachteten Gebirgsräumen treten in der Tat häufig niedrige Bodenanteile auf, so dass das insgesamt niedrige Niveau der Bodenfraktion gerechtfertigt ist. Allerdings greift häufig auch ein Maskierungseffekt der Vegetation, der stellenweise zu einer Unterschätzung des Bodensignals führen kann. Im Gegensatz zum Gesteinsuntergrund sind mit zunehmender Vegetation meist auch zunehmende Bodenanteile zu erwarten. Falls diese Bodendecke keinen flächenhaften Charakter aufweist, so ist das oft unmittelbar unter der Einzelpflanze befindliche Solum spektral nicht oder kaum nachweisbar.

Die höchsten Bodenanteile finden sich dementsprechend auf dem Plateau des Psiloritis im zentralen Untersuchungsgebiet unter Matorral. Die offene Vegetationsstruktur mit hohem Anteil an Bäumen und hinsichtlich des Gebirgsklimas intermediären Bedingungen – kalte Winter, aber milde Sommer sowie eine verkürzte Vegetationsperiode mit ausreichender Wasserversorgung – sorgen für eine verlangsamte, aber doch deutliche Bodenbildung. Große Bereiche weisen lediglich moderate Hangneigung auf, so dass die Erosionsgefährdung nicht so hoch wie etwa an den Hängen des zentralen Gebirgsstocks ausgeprägt ist.

Alle oben beschriebenen Phänomene zeigen sich am eindrucksvollsten im 3-kanaligen Farbkomposit wieder (Abbildung 8.9 d). Die Vegetationsanteile erscheinen rot, Boden blau und die Kalkfraktion grün. Die schwerlich interpretierbaren weißen Flächen im zentralen Psiloritismassiv – also Bereiche hoher Anteile an allen Fraktionen – stellen die auch im Juni noch vorhandenen Schneeflächen des Hochgebirges dar, welche von der Betrachtung ausgeschlossen werden können.

## 8.5 Validierung

Es existieren eine Reihe formaler Kriterien zur Beurteilung der Güte einer SMA. Dazu zählen die Residuen zwischen Modellierungsergebnissen und Reflexionswerten in den einzelnen Eingangskanälen oder der RMSE. Weiterhin erlaubt die mathematische Umsetzung des Entmischungsalgorithmus theoretische Anteile einzelner Komponenten über 100 % bzw. unter 0 %. Tritt dieses Phänomen in den Analysen gehäuft auf, muss entweder von einer Fehlzuordnung der Endmemberkombination – in der Regel wegen nicht oder inadäquat berücksichtigter Oberflächenkomponenten – oder von nicht-linearen Mischungsanteilen ausgegangen werden (Drake und Settle 1989; Gong et al. 1994).

Die sinnvolle räumliche Verteilung der Mischungskomponenten spielt ebenfalls eine bedeutende Rolle. Ein Mischungsmodell kann befriedigende Ergebnisse hinsichtlich der Restfehler und der Mischungsanteile zeigen und dennoch die naturräumlichen Gegebenheiten unzureichend repräsentieren. Dies ist beispielsweise bei einer Überdimensionierung des Endmembermodells möglich, wenn aufgrund einer überhöhten Anzahl frei kombinierter Mischungsanteile immer eine nahezu vollständige Erklärung der spektralen Varianz möglich ist. In einem solchen Fall muss von einer Überschreitung der erlaubten Freiheitsgrade des Mischungsmodells ausgegangen werden.

Die Darstellung in Kapitel 8.4 verdeutlicht zunächst die geforderte qualitative Übereinstimmung zwischen Geländebefunden und Analyseergebnissen. Darüber hinaus ist eine quantitative Verifizierung der Resultate im direkten Vergleich mit Bodenmessungen oder Kartierungen jedoch problematisch. Ein Grund hierfür ist die integrale Betrachtungsweise der Geländeoberfläche bei der Auswertung von Satellitendaten; die Endmemberanteile stellen die jeweiligen Fraktionen für eine Fläche von  $30 \times 30 \text{ m}^2$  im Fall von Landsat-TM bzw.  $79 \times 79 \text{ m}^2$  bei Landsat-MSS dar. Die mit einer quantitativen Überprüfung verbundene, flächendeckende Kartierung von Referenzflächen für alle betrachteten Oberflächen ist problematisch, stellt doch allein die Beprobung der Vegetation entlang eines Transektes – insbesondere unter den vorliegenden Geländegegebenheiten – schon einen erheblichen zeitlichen und logistischen Aufwand dar.

Des weiteren wird selbst durch eine präzise geometrische Anpassung der Daten keine Übereinstimmung zur Referenz im Meterbereich möglich (vgl. Kap. 6), so dass eine großmaßstäbige Geländeerhebung nur bei der Kartierung ausgedehnter Bereiche in Verbindung mit einer Mittelwertbildung auf die Bilddaten übertragbar ist. Ein Versatz von nur wenigen Metern kann im Fall heterogen strukturierter Oberflächen und kleiner Testflächen eine nicht vernachlässigbare Abweichung der Referenzdaten gegenüber der Satellitendatengrundlage nach sich ziehen (Hostert 1995).

Eine sinnvolle Alternative stellt der Vergleich zwischen der Interpretation des Vegetationsanteils aus Luftbildern mit Ergebnissen aus der Entmischung von Satellitendaten dar

(Hill 1996). Die für das Jahr 1989 vorliegenden Luftbildauswertungen kamen für einen derartigen Vergleich allerdings nicht in Frage, da eine Kartierung der Vegetationsklassen vorlag und dementsprechend die abgeleiteten Vegetationsbedeckung lediglich klassenweise Mittelwerte repräsentierten (Tsiourlis 1998). Die Beurteilung des Mischungsmodells erfolgte daher vor allem auf Basis empirisch abgeleiteter Maßzahlen.

### 8.5.1 Restfehleranalyse

Da flächendeckende Kartierungen der zur Analyse herangezogenen Endmember nicht zur Verfügung standen, lieferte die Betrachtung der Fehlerkomponenten, neben der qualitativen Beurteilung der Ergebnisse, die wichtigsten Hinweise zur Güte der Entmischung. Ein summarisches Maß für die Qualität bietet zunächst der RMSE, als die kombinierte Darstellung aller kanalweisen Abweichungen zwischen modellierter und pixelweise gemessener Reflexion (Tabelle 8.1).

*Tabelle 8.1: RMSE aller prozessierten Datensätze für das Stratum Psiloritis; grün: MSS, blau: TM; (jeweils bezogen auf die Gesamtszene)*

Jahr	1972	1977	1979	1981	1983	1984	1986	1987	1988	1989	1991	1993	1994	1996
RMSE (%)	1,47	0,80	1,01	1,32	1,77	3,42	2,20	2,20	1,99	2,02	1,87	2,39	2,11	1,09

Die Fehlermargen deuten auf insgesamt nur mäßige Abweichungen zwischen Modell und Realität hin. Des weiteren fällt der im Durchschnitt niedrigere Fehler im Fall der MSS-Daten gegenüber TM auf. Hier spielen die niedrigere radiometrische und spektrale Auflösung der MSS-Daten und die damit geringere pixelweise Spektralvarianz die entscheidende Rolle. Diese ermöglichen trotz niedriger dimensioniertem Entmischungsmodell (drei statt vier Endmember) eine zuverlässige Erklärung des Reflexionssignals. Entscheidender und aussagekräftiger als der auf den Gesamtausschnitt bezogene RMSE ist jedoch dessen räumliches Verteilungsmuster und die damit verbundenen Konsequenzen für die Analysegenauigkeit.

Die Verteilung des RMSE in den Bilddaten bestätigt die gute Übereinstimmung der modellierten mit der am Sensor gemessenen Reflexion für einen Großteil des Arbeitsgebietes (Abbildung 8.10). Grüne Bildbereiche, also niedrige Restfehler, werden vor allem auch für alle deutlich vegetationsbestandenen Flächen erreicht und sind ein Indiz für die schon erwähnte Insensitivität des Mischungsmodells für verschiedene Vegetationstypen sowie für die nichtlinearen Reflexionseigenschaften der Vegetation. Hohe RMSE finden sich demgegenüber vor allem in fünf Bildbereichen wieder:

- in der schneebedeckten Zone des zentralen Psiloritis, entsprechend der nicht berücksichtigten spektralen Charakteristika von Schnee,

- in den Höhenzonen des Psiloritis über 1800 m ü.NN; dort herrschen extrem niedrig reflektierende Kalke vor, deren Reflexion vor allem im mittleren Infrarot weit unterhalb der des eingesetzten Endmembers liegt,
- im Gebirge des Kouloukonas, das lokal aus marmorartigen Kalken aufgebaut wird, deren Anstieg der Reflexionskurve vom sichtbaren Wellenlängenbereich zum Infrarot extrem steil ausgeprägt ist,
- in den Ortschaften, insbesondere in Anogia, mit ihren zwar kalkähnlichen Spektren, die aber nicht denen natürlicher Kalke entsprechen und
- in einem Steinbruch im Nordosten des betrachteten Ausschnitts, wo anstehendes Gestein im Anschnitt deutlich verschiedene Spektraleigenschaften gegenüber dem flechtenbesetzten, natürlichen Kalkgestein aufweist.

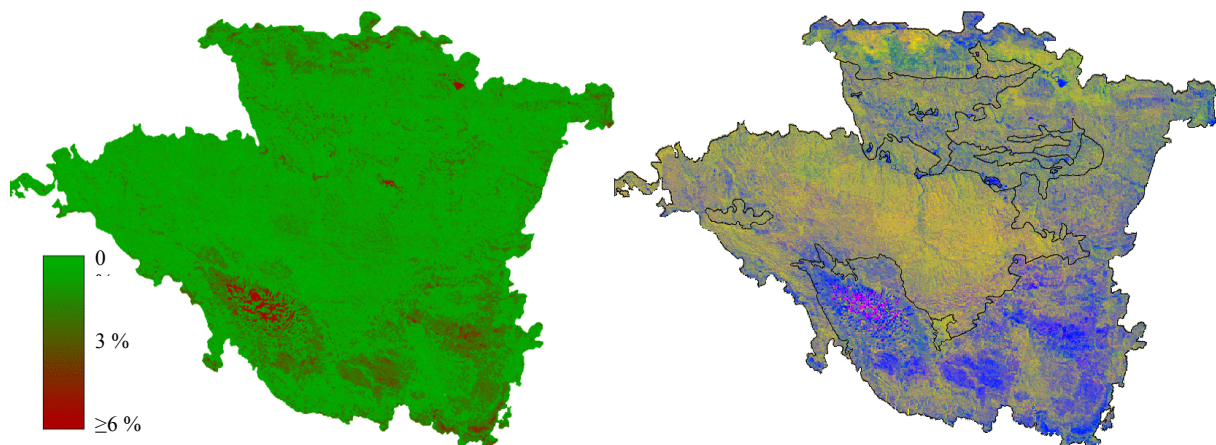


Abbildung 8.10: Root Mean Squared Error (links) und kanalweise Residuen für TM-3, TM-4 und TM-5 mit überlagerten geologischen Einheiten (rechts); Erläuterungen im Text

Keine der genannten Regionen stellt ein für die weidewirtschaftlich determinierte Fragestellung bedeutendes Gebiet dar, so dass die mit den höheren Restfehlern assoziierten Defizite bei der Mischungsanalyse für die Interpretation der Daten keine weitergehende Bedeutung haben. Wird der RMSE lediglich für die im Zusammenhang dieser Arbeit relevanten Bildbereiche berechnet, so sinkt der mittlere Wert unter 1 %.

Die Betrachtung der Residualspektren erlaubt eine detailliertere Analyse der Restfehlerkomponenten. Ein Überblick der räumlichen Verteilung für drei Kanäle aus dem sichtbaren Wellenlängenbereich (Kanal 3), dem nahen Infrarot (Kanal 4) und dem mittleren Infrarot (Kanal 5) zeigt die Hauptursachen für die Verteilung des RMSE – vor allem für die Kalke und kalkähnlicher Flächen – deutlich auf (Abbildung 8.10 rechts). Ein mittlerer Grauwert bedeutet keine Abweichung zwischen modelliertem und gemessenem Spektrum in den dargestellten Kanälen. Das dunkle Blau der Hochflächen, des Steinbruchs und der Ortschaften signalisiert somit negative Residuen im Wellenlängenbereich um 660 nm und positive Abweichungen um 1680 nm. Dementsprechend weist der als Endmember verwendete Kalk, im Vergleich zu den



aufgezeichneten Reflexionswerten, zu niedrige Werte in den kurzwelligeren gegenüber zu hohen Reflexionswerten in den langwelligeren Spektralbereichen auf. Genau umgekehrt verhält es sich mit den extrem hellen Kalken des Kouloukonas, die vor allem durch die zu niedrigen Reflexionswerte des Endmembers im mittleren Infrarot ungenügend repräsentiert werden.

Interessanterweise lassen sich anhand der räumlichen Verteilung der Residualspektren große Teile der geologischen Unterschiede im Psiloritis nachvollziehen, belegt anhand der überlagerten Vektoren aus der geologischen Karte in Abbildung 8.10 rechts. Im Umkehrschluss deuten einige Abweichungen im Residualbild gegenüber den überlagerten geologischen Einheiten auf Fehler in der Kartengrundlage hin. Dies ist beispielsweise eine logische Erklärung für die Differenzen im Übergang zwischen Plattenkalken und massiven Kalken südöstlich von Anogia.

Ein Problem bei der Vegetationsanalyse mit Satellitendaten ist die Bestimmung des Anteils photosynthetisch inaktiver Vegetation (nonphotosynthetic vegetation, NPV). Die TM-Kanäle – vor allem die in diesem Zusammenhang wesentlichen Kanäle 5 und 7 – sind in Anbetracht ihrer Sensitivität über weite Wellenlängenbereiche nicht dazu geeignet die durch NPV potentiell verursachten Absorptionsbanden aufzulösen bzw. erfassen diese aufgrund ihrer Lage im Wellenlängenspektrum nicht (Tabelle 8.2). Die Identifikation von NPV in den Residualspektren des Landsat-TM ist somit schwierig. Es muss daher davon ausgegangen werden, dass ein Großteil der in den Bilddaten erfassten NPV aufgrund ihrer spektralen Eigenschaften bei der SMA der Bodenfraktion zufällt und nur zu geringen Anteilen zur photosynthetisch aktiven Vegetationsfraktion beiträgt (Roberts et al. 1993).

*Tabelle 8.2: Wichtige Inhaltsstoffe der NPV und deren Absorptionsbanden (Elvidge 1990)*

Inhaltsstoff	Absorptionsbanden (nm)
Lignin	1700, 1740, 2130, 2270
Tannin	1650
Xylan	1700, 1720, 1780, 2090, 2270, 2340
Zellulose	1700, 1770, 2090, 2270, 2340

Die in Hinblick auf die vorliegende Untersuchung entscheidenden Weidegebiete des Psiloritis liegen im zentralen Bildausschnitt sowie im Südosten um Rouvas und Krousounas. Im Vergleich unterscheiden sich die Residualspektren aus der Modellierung dieser Bildbereiche deutlich von den schon erwähnten Problemflächen der Höhenzonen über 1800 m ü.NN oder des Kouloukonas (Abbildung 8.11).

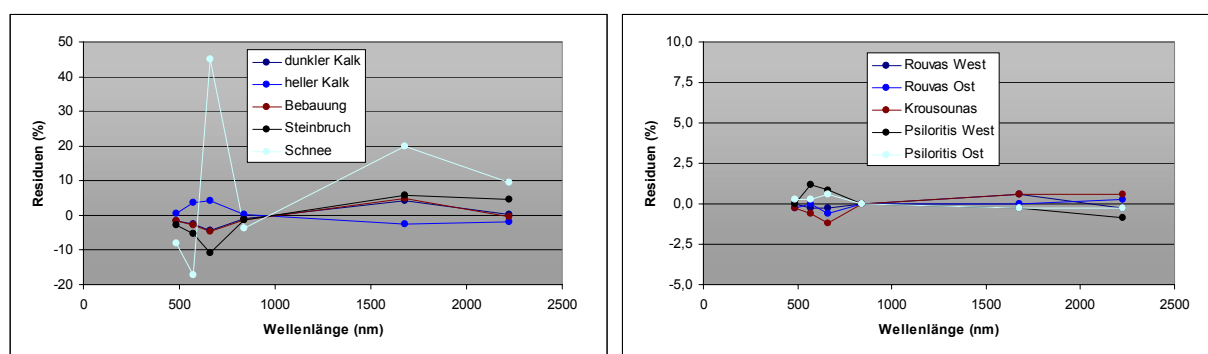


Abbildung 8.11: Residualanalyse für Flächen außerhalb (rechts) und innerhalb (links) der untersuchten Arbeitsgebiete

Restfehler in einzelnen Kanälen liegen nach der Modellierung mit einem 4-Endmembermodell bei maximal knapp 1,2 %, meist jedoch deutlich unter 1 %. Restfehler treten im nahen Infrarot nahezu nicht auf, alle Residualspektren kreuzen die Nulllinie bei 850 nm<sup>29</sup>. In ihrer Gesamtheit weisen die Residualspektren innerhalb der untersuchten Arbeitsgebiete ein um ein Mehrfaches niedrigeres Niveau gegenüber den Flächen außerhalb auf. Somit kann auch nach der Analyse der Residualbilder und -spektren von einer guten Abbildung der Realität durch die SMA ausgegangen werden.

### 8.5.2 Vergleich der SMA für TM und MSS

Ein wichtiger Punkt ist die Überprüfung der Konsistenz im Mischungsmodell und der SMA zwischen Aufnahmen des Landsat-TM und -MSS. Insbesondere die Unterschiede in geometrischer (30 m x 30 m gegenüber 79 m x 79 m), radiometrischer (8 Bit gegenüber 7 Bit) und spektraler Auflösung (keine Kanäle jenseits 1µm bei Landsat-MSS) machen eine genaue Überprüfung und gegebenenfalls Anpassung der Analysen notwendig (Röder 1997). Hinzu kommen die eingeschränkten Kenntnisse über die absolute Kalibrierung des Landsat-MSS (vgl. Kap. 7).

Daher wurden zur Überprüfung der Konsistenz in den synoptisch gewonnenen Daten des Landsat-MSS und -TM von 1988 Prüfflächen für Asterousia und Psiloritis ausgewiesen. Im Psiloritisgebirge wurden diese Areale in den weiter zu untersuchenden Matorralflächen südlich von Anogia angelegt, während in Asterousia vor allem die für die Weidewirtschaft entscheidenden Flächen des Flysch betrachtet wurden.

Für die Testflächen im Psiloritis ergab der Vergleich beider Entmischungsergebnisse im auftretenden Wertebereich von ungefähr 20 bis 70 % Vegetationsanteil eine sehr gute Übereinstimmung auf hohem Signifikanzniveau (Abbildung 8.12). Diese Tatsache bestätigt, dass

<sup>29</sup> Es gilt zu beachten, dass die Spektren nur für die Aufnahmekanäle des jeweiligen Sensors definiert sind. Aus Gründen der Interpretierbarkeit werden die Stützpunkte allerdings in der graphischen Übersicht verbunden.

das entsprechend der spektralen Dimensionalität der MSS-Daten reduzierte Modell mit nur drei Endmembern adäquate Ergebnisse im Vergleich zum TM-Modell mit vier Endmembern lieferte.

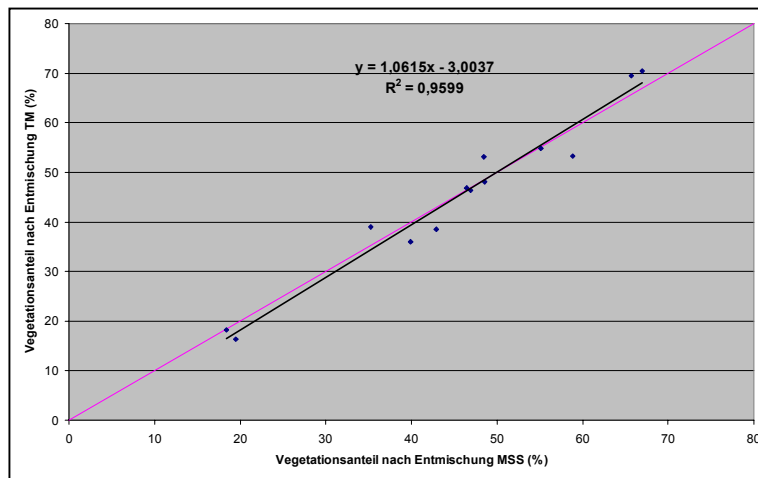


Abbildung 8.12:  
Vergleich der Entmischungsergebnisse von MSS und TM für die Matorralgebiete auf Plattenkalk des Psiloritis (1988)

Bezogen auf die Flyschgebiete Asterousias stellt sich ein etwas anderes Bild dar: auch hier belegen die Testflächen einen sehr guten linearen Zusammenhang zwischen der Entmischung aus Landsat-TM- und Landsat-MSS-Daten (Abbildung 8.13). Im Gegensatz zum Psiloritis wurden die modellierten Vegetationsanteile aus Landsat-MSS-Daten für 1988 allerdings um ca. 4,9 % unterschätzt.

Der Grund für die Unterschätzung der Vegetation auf Basis der MSS-Daten liegt möglicherweise im fehlenden Kontrast zwischen dem Flyschuntergrund und der holzigen Komponente der Phrygana. Vor allem die über weite Flächen dominierende Spezies *Sarcopoterium spinosum*, aber auch eine Reihe anderer Arten weisen gegenüber photosynthetisch aktiven Blattorganen einen großen Anteil an Nekromasse auf, der sich in Abhängigkeit von Jahreszeit und klimatologischen Rahmenbedingungen im Beobachtungsjahr noch deutlich erhöhen kann.

Während im Multispektraldatenraum des Landsat-TM aufgrund der höheren Dimensionalität der Daten eine bessere Diskriminanz spektraler Elemente erreicht wird, können ähnliche Signaturen im nahezu zweidimensionalen Datenraum des Landsat-MSS nicht mehr aufgelöst werden (Röder 1997). Als Konsequenz wird ein Teil der Vegetationskomponente dem Hintergrundspektrum des Flysch zugeordnet.

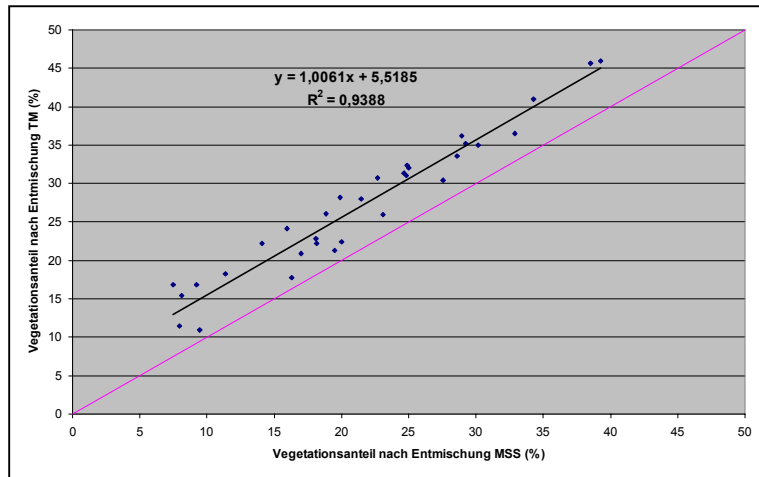


Abbildung 8.13:  
Vergleich der Entmischungsergebnisse von MSS und TM für die Phryganengebiete auf Flysch im Asterousiagebirge (1988)

Um diesem systematischen Fehler Rechnung zu tragen, wurden die Schätzungen der Vegetationskomponente aus Landsat-MSS für das Stratum Asterousia im Anschluss an die Mischungsanalyse für alle Szenen um 4,9 % erhöht. So wurden sensorbedingte oder systematische Abweichungen hinsichtlich der nachfolgenden Zeitreihenanalyse vermieden.

## 9 Ableitung statistischer Parameter zur Interpretation der Zeitreihe

Die standardisierte Vorprozessierung und spektrale Entmischung der Landsat-MSS- und Landsat-TM-Daten ermöglicht die Behandlung der jeweiligen Oberflächenfraktionen als Elemente einer Zeitreihe. Mit 14 Datensätzen zwischen 1972 und 1996 liegt eine durchschnittliche Abdeckung in einem Wiederholungsintervall von weniger als zwei Jahren vor.

Es bietet sich demzufolge eine statistisch gestützte Betrachtung des Gesamtzeitraumes hinsichtlich einer Reihe pixelbasierter Kenngrößen an, deren Interpretation eine zeitliche, wie auch räumliche Komponente beinhaltet. Die gezielte Selektion solcher Parameter und die Überprüfung der Konsistenz der Zeitreihe stellen somit entscheidende Schritte zur systematischen, inhaltlichen Interpretation der Datenbasis dar.

Bei der Annahme des klassischen Komponentenmodells zur Zeitreihenanalyse gehen folgende vier Elemente in die Betrachtung ein (Schlittgen und Streitberg 1999):

- Trend,
- Konjunkturkomponente,
- Saison und
- Restkomponente.

Der glatten Komponente des Trends gilt zunächst das eigentliche Interesse der Analyse. Im Fall einer Reihe aus Satellitendaten entfällt hingegen die Untersuchung der mehrjährigen Konjunkturkomponente. Die Betrachtung der phänologischen Schwankungen zwischen den verschiedenen Aufnahmezeitpunkten stellt in der vorliegenden Konstellation das Problem der Saisonkomponente dar. Die zufällige Restkomponente, beispielsweise aufgrund dateninhärenter Fehler, ist davon ohne weitere Information nicht trennbar.

### 9.1 Berechnung relevanter Parameter zur Zeitreihenanalyse

Die anhand der Satellitenbilddauswertung ermittelten Oberflächenfraktionen spiegeln verschiedene sich überlagernde Prozesse und Einflussfaktoren wider, die es nach Möglichkeit zu unterscheiden und separat zu interpretieren gilt. In erster Linie ist die zeitliche Entwicklung für Rückschlüsse auf umweltrelevante Veränderungen entscheidend, also die Untersuchung auf Vorhandensein und Richtung eines Trends. Speziell in den traditionell durch Beweidung dominierten Regionen lassen sich so Rückschlüsse auf die Auswirkungen der Weidewirtschaft über längere Zeiträume ziehen.

Eine wichtige Rolle bei der Erklärung der Schwankungsbreite um eine Trendgerade spielt die Variabilität in der Vegetationsausprägung. Da die phänologischen Unterschiede mit klimatologischen Rahmenbedingungen, aber auch mit strukturellen Parametern des Pflanzen-

bestandes gekoppelt sind, besteht die Möglichkeit zur Untersuchung dieser Schwankungen mit Hinblick auf die Bestandseigenschaften. Beispielsweise werden immergrüne Pflanzen sicherlich ein anderes Variabilitätsmuster aufweisen als Pflanzengesellschaften mit einem hohen Anteil an Krautigen. Ein wichtiger Punkt liegt somit in der Beurteilung der Residuen um eine Trendgerade sowie ihrem Verhältnis zur Veränderung über den Gesamtzeitraum.

Weiterhin können prominente Einzelereignisse einen Trend suggerieren, ohne dass tatsächlich Langzeitprozesse wirksam werden. Stark ansteigende oder fallende Tendenzen innerhalb einer Zeitreihe sollten daher immer auf Stetigkeit untersucht werden, um permanent wirkende Faktoren von abrupten Veränderungen trennen zu können. Dazu gehören gleichermaßen die Rodung von Flächen für landwirtschaftliche oder anderweitige Nutzung, wie auch die im mediterranen Raum mehr oder minder regelmäßig auftretenden Feuer. Anhand von Schwellwertverfahren kann eine Erfassung solcher Phänomene erfolgen. Dabei gilt es, gegebenenfalls verstärkende oder abschwächende Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Einflussfaktoren sinnvoll zu interpretieren.

### 9.1.1 Parameter zur Trendanalyse

Die Charakterisierung einer zeitabhängigen Entwicklung geschieht in der Regel mittels Trendanalyse, also einer linearen Einfachregression über die Zeit<sup>30</sup>. Die Berechnung der Regressionsgeraden erfolgt unter der Maßgabe, dass die Summe der Residuen, also der quadrierten Differenzen zwischen Eingangswerten und korrespondierenden Stützpunkten der Trendfunktion, minimal werden. Ist diese Bedingung erfüllt, so beschreibt die Trendgerade die bestmögliche lineare Anpassung an die Originalwerte. Der y-Achsenabschnitt der Trendfunktion bestimmt das Ausgangsniveau der Vegetationsschätzung zu Beginn des Beobachtungszeitraumes, die Steigung beschreibt den linearen Zusammenhang zwischen Ausgangsniveau und Ausprägung der Vegetationsbedeckung in den Folgejahren.

Ein geeigneter Parameter zur Beschreibung der Güte eines Zusammenhangs ist der mittlere quadratische Gesamtfehler einer Trendfunktion:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{x=0}^n \left( y_x - \hat{y}_x \right)^2 / n} \quad \text{Gleichung 9.1}$$

Der RMSE bietet gegenüber dem im Zusammenhang mit Regressionsanalysen häufig verwendeten Korrelationskoeffizienten den Vorteil der Unabhängigkeit von der Steigung der Datenreihe. Soll darüber hinaus die Variabilität in Bezug zum absoluten Niveau der betrach-

<sup>30</sup> Nicht-lineare Abhängigkeiten sind im vorliegenden Fall möglich, aber anhand der eingeschränkten Anzahl an Aufnahmezeitpunkten nicht sinnvoll ableitbar.

teten Werte gesetzt werden, kann der RMSE ins Verhältnis zum Mittelwert der betrachteten Reihe gesetzt (relativer Fehler) oder der Variationskoeffizient nach Pearson herangezogen werden:

$$v = \frac{s}{|\bar{x}|} \cdot 100 \quad \text{Gleichung 9.2}$$

Im Fall der Analyse von Satellitenbilddatenauswertungen sollte außerdem die Anzahl der für jedes Pixel betrachteten Fälle, also die Anzahl der jeweils zur Trendschätzung eingehenden Jahre berücksichtigt werden. In Abhängigkeit von Zeilenausfällen, Schneebedeckung oder lokaler Bewölkung kann für einige Gebiete eine deutlich kleinere Grundgesamtheit zustande kommen. In solchen Fällen muss unter Umständen von der Analyse betroffener Gebiete Abstand genommen werden. Als weiterer Parameter wurde daher die Anzahl der betrachteten Fälle in die Analyse aufgenommen.

Auf Basis der dargestellten Parameter ist eine Beschreibung des Trends in qualitativer und quantitativer Form möglich. Mittelwert der Reihe, Steilheit und Richtung der Trendfunktion sowie die Güte des Zusammenhangs sind somit die Kenngrößen zur Beurteilung langfristiger Veränderungen. Die Größenordnung der Residuen ist nach den in Kapitel 9.1 getroffenen Aussagen zugleich ein Maß für die phänologische Variation.

### 9.1.2 Parameter zur Beschreibung von Einzelereignissen

Neben dem Trend spielen bei der Beurteilung von Veränderungen häufig auch singuläre Ereignisse eine bedeutende Rolle. Treten sprunghafte Abweichungen vom Trend regional einheitlich ausgeprägt auf, so kann von einem einschneidenden Vorfall im Landschaftsgefüge ausgegangen werden. Beispielsweise lassen sich durch die Bestimmung des Zeitpunkts der maximalen Trendabweichung der Vegetationsentwicklung Feuerereignisse oder flächenhafte Rodungen zuverlässig bestimmen. Werden darüber hinaus solche Flächen auch zu den Zeitpunkten  $t-1$  und  $t+1$  betrachtet, lassen sich Aussagen über Regeneration oder Degradation der entsprechenden Oberflächen treffen.

Da nahezu jede Zeitreihe Schwankungen unterworfen ist und somit immer einen Zeitpunkt der maximalen Abweichung vom Trend aufweist, können verschiedene Kriterien zur Beurteilung der Relevanz von Einzelereignissen herangezogen werden. Zwei Bedingungen sollten im vorliegenden Fall erfüllt sein: zum einen die Überschreitung eines Schwellwertes zwischen dem Zeitpunkt der maximalen Trendabweichung und dem vorangegangenen Beobachtungsjahr, weiterhin aber auch eine räumliche Häufung gleichartiger Abweichungen.

Nur so kann eine Unterscheidung zwischen möglicherweise fehlerbedingten Abweichungen einzelner Pixel und raumübergreifend relevanten Phänomenen erfolgen. In der Praxis erfolgt

die Umsetzung dieser Bedingungen durch die Berechnung eines Ausgabekanals, der den Zeitpunkt der maximalen Abweichung vom Trend räumlich repräsentiert. Nach Einführung eines aus der Analyse des Bildes empirisch festzulegenden Abweichungsgrenzwertes für singuläre Ereignisse erfolgt schließlich eine Medianfilterung zur Beurteilung räumlich zusammenhängender Phänomene. Alternativ ist der Einsatz eines Clump-Sieve-Algorithmus möglich, um homogene Raumeinheiten der Veränderung abzuleiten (Hostert 1994).

### 9.1.3 Ergebnisse der Trendanalyse

Zur räumlichen Umsetzung der Trendanalyse wurden die kanalweisen Entmischungsergebnisse aller Beobachtungsjahre für die beiden Arbeitsgebiete zu je einem Bildstapel zusammengefasst und prozessiert. Als Ergebnis lag jeweils ein Bildprodukt mit folgenden Ausgabekanälen vor:

- Steigung der Trendgeraden ( $b$ ),
- y-Achsenabschnitt der Trendgeraden ( $a$ ),
- Durchschnittswert über den Beobachtungszeitraum ( $\bar{x}$ ),
- Zeitpunkt der maximalen Residualabweichung von der Trendgeraden ( $t_{max}$ ),
- maximale Residualabweichung von der Trendgeraden ( $res_{t(max)}$ ),
- Wert zum letzten Aufnahmezeitpunkt vor der maximalen Abweichung ( $res_{t(max-1)}$ ),
- Wert zum nächsten Aufnahmezeitpunkt nach der maximalen Abweichung ( $res_{t(max+1)}$ ),
- Standardabweichung ( $\sigma$ ),
- Variationskoeffizient nach Pearson ( $v$ ),
- relativer Fehler ( $r$ ).

Die Darstellung der vegetationsbezogenen Trend- und Mittelwertbilder für Psiloritis und Asterousia veranschaulicht bereits vor einer detaillierten inhaltlichen Interpretation deutliche räumliche Muster. Im Psiloritis zeichnen sich im zentralen Gebirgsraum große Areale mit einer negativen Entwicklung der Vegetationsbedeckung ab, während entlang der südöstlichen Flanke des Gebirges neutrale bis zunehmende Tendenzen vorzuherrschen scheinen (Abbildung 9.1 links). Die mittlere Vegetationsbedeckung ist in den ackerbaulich genutzten Talbereichen im Norden sehr hoch und erreicht auf den Höhenzügen des Psiloritis ein Minimum. Die zwischen diesen Gebieten liegenden Weidegebiete der mittleren Höhenzone prägen ein sehr variables Bild (Abbildung 9.1 rechts).



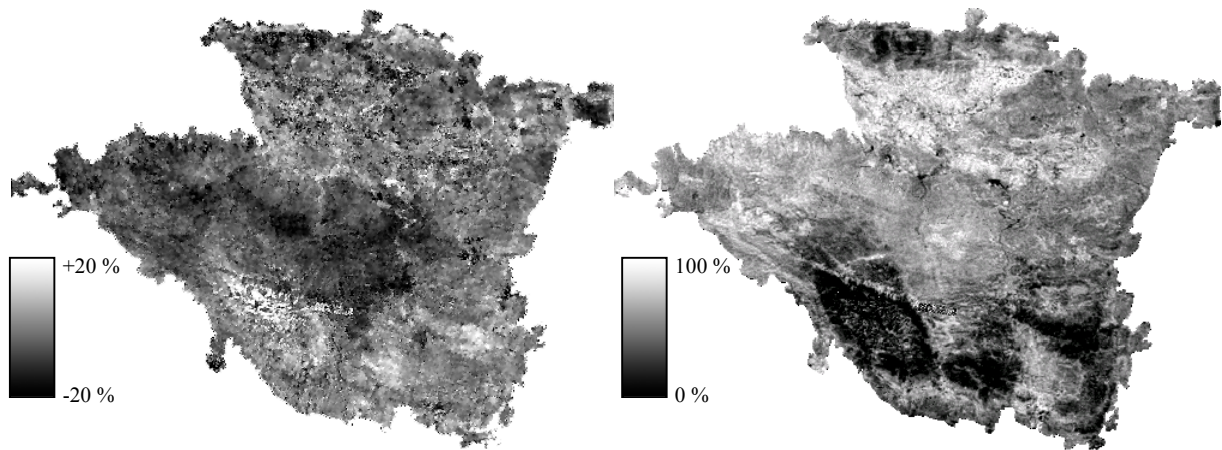


Abbildung 9.1: Zeitliche Dynamik (links) und mittlere Vegetationsbedeckung (rechts) im Psiloritis aus einer Zeitserie mit 14 Aufnahmezeitpunkten

Für Asterousia lassen sich in der Überblicksdarstellung keine großräumigen Strukturen zur Veränderung der Vegetationsbedeckung nachvollziehen (Abbildung 9.2 oben). Allerdings treten vermehrt lokale Zentren der Zu- und Abnahme auf. Die mittlere Vegetationsbedeckung lässt eine Zweiteilung der Gebirgskette ungefähr parallel zur Küstenlinie erkennen. Die niedrigsten Werte konzentrieren sich dabei entlang der Südseite Asterousias, aber auch die nördlichen Hänge weisen einige Zonen mit deutlichen Minima auf. (Abbildung 9.2 unten).

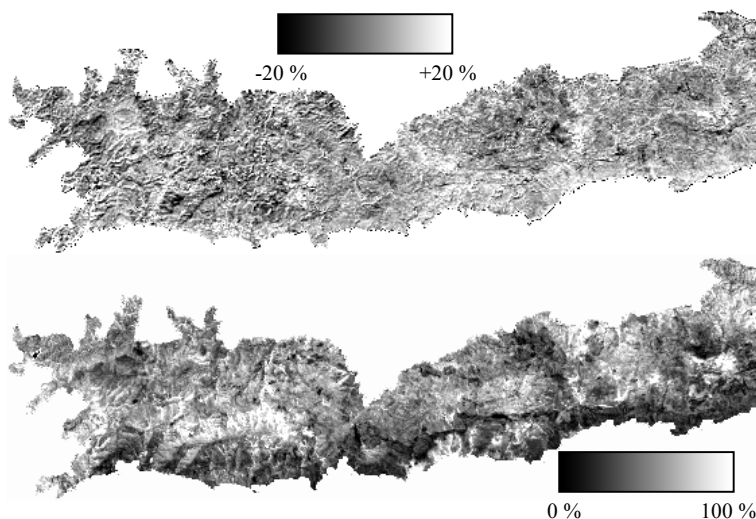


Abbildung 9.2: Zeitliche Dynamik (oben) und mittlere Vegetationsbedeckung (unten) in Asterousia aus einer Zeitserie mit 14 Aufnahmezeitpunkten

Die Betrachtung von Zeitschnitten in den Entmischungsergebnissen und dazugehörigen Trends offenbart die unterschiedliche Dynamik der Vegetation innerhalb beider Arbeitsgebiete (Abbildung 9.3). Am Beispiel zweier typischer Pflanzenformationen auf Kalk (Wald und Matorral) und auf Flysch (verschiedene Phryganagesellschaften) lassen sich markante Unterschiede erkennen.

Der Mittelwert der Vegetationsbedeckung spiegelt die in der räumlichen Abbildung sichtbaren Unterschiede – mit überwiegend mittlerer Bedeckung im Psiloritis und meist sehr niedrigen Werten in Asterousia – gut wider. Die Vegetation zeigt im zeitlichen Verlauf, je nach betrachteter Oberfläche, eine mehr oder minder deutliche Dynamik, so dass die Residuen um eine resultierende Trendfunktion sehr unterschiedliche Werte annehmen können. Auffällig ist vor allem die geringe Schwankungsbreite im Fall von Wald. Die damit verbundene inhaltliche Interpretation erfolgt in Kapitel 10. Zunächst ist jedoch eine Qualitätskontrolle der Ergebnisse zur Zeitreihenanalyse notwendig, um eventuell auftretende Fehler in der Trendberechnung aufgrund einzelner Datensätze zu eliminieren.

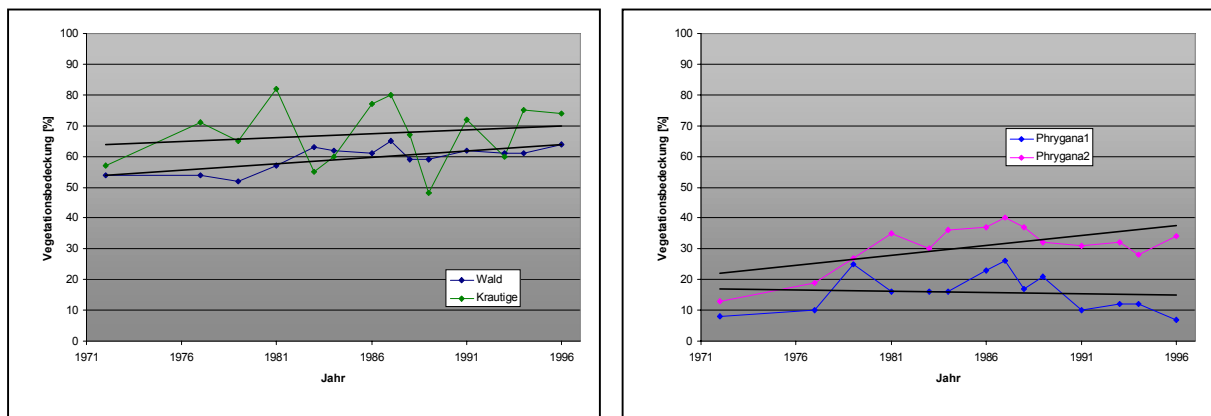


Abbildung 9.3: Ausgangsdaten (farbig) und Trendfunktionen (schwarz) für Pflanzenformationen im Psiloritis (links) und in Asterousia (rechts)

## 9.2 Kreuzvalidierung

Um die statistische und damit inhaltliche Konsistenz der Datenreihe zu gewährleisten, sollte eine Überprüfung des Einflusses jedes einzelnen Datensatzes auf die gesamte Zeitreihe vorgenommen werden. Bei der Kreuzvalidierung wird dazu in mehreren Durchläufen jeweils ein Datensatz von der Analyse ausgeschlossen, so dass schließlich 14 Zeitserien mit jeweils nur 13 betrachteten Zeitpunkten vorliegen.

Weicht bei der Eliminierung eines einzelnen Beobachtungszeitpunktes das Ergebnis deutlich von allen anderen ab, so muss davon ausgegangen werden, dass die Berücksichtigung des korrespondierenden Datensatzes hinsichtlich der Trendanalyse Inkonsistenzen nach sich zieht. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass aufgrund der natürlichen Schwankung aller Werte um die Trendgerade, Abweichungen innerhalb einer gewissen Größenordnung als konsistent angenommen werden dürfen. Vielmehr sollten solche Datensätze von der Analyse ausgeschlossen werden, die für große Bereiche des Arbeitsgebietes erhöhte Residuen gegenüber dem Rest der Zeitreihe aufweisen.

Nicht alle berechneten Kennzahlen eignen sich gleichermaßen zur Beurteilung der Güte einer Regression. So stellt beispielsweise eine deutliche Veränderung der Steigung einer Trendgeraden bei Eliminierung eines einzelnen Datensatzes ein deutliches Indiz für Inhomogenitäten dar. In einem solchen Fall muss dies als Hinweis auf einen nicht hinreichenden Zusammenhang zwischen dem Datensatz des entsprechenden Jahres und dem Rest der Zeitserie interpretiert werden. Auf einen statistischen Test hinsichtlich der Datenkonsistenz wurde an dieser Stelle bewusst verzichtet. Für kurze Reihen, im vorliegenden Fall 14 Fälle, liefern Testverfahren wie etwa nach Art des Vorzeichen-tests von Wilson und Cox keine zuverlässigen Ergebnisse (Sachs 1997).

**PSILORITIS.** Für den Teilausschnitt des Psiloritis ergab eine Kreuzvalidierung deutlich abweichende Trendparameter bei der Kalkulation mit und ohne Berücksichtigung des Beobachtungsjahres 1972. Abbildung 9.4 zeigt beispielhaft die Vorzeichenänderung des Trends bei Prozessierung der Datenreihe mit und ohne den Landsat-MSS-Datensatz von 1972.

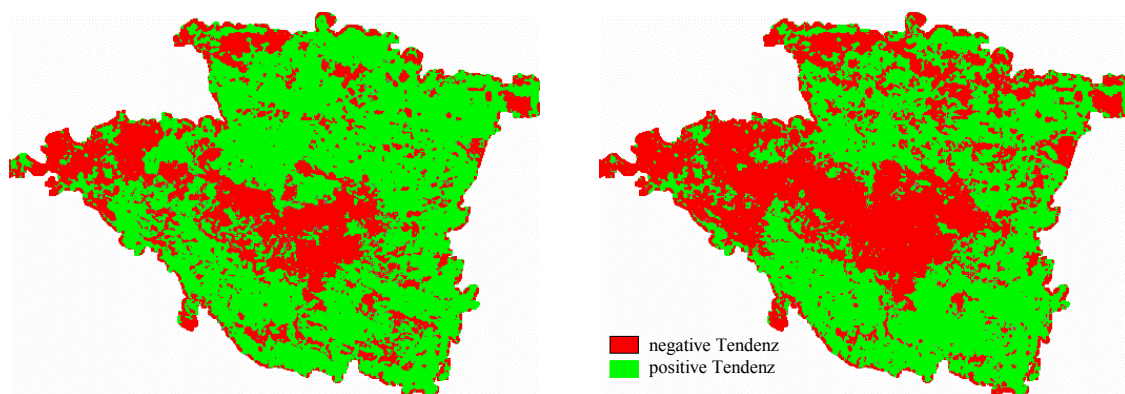


Abbildung 9.4: Verteilung positiver und negativer Trendrichtungen mit (links) und ohne (rechts) Berücksichtigung des Datensatzes von 1972

Die Gründe für die Inkonsistenzen können vielschichtig sein: Zum einen mögen sensorbedingte Störfaktoren eine Rolle spielen. Die Satellitenszene von 1972 war der einzige mit Landsat-1-MSS akquirierte Datensatz. Somit können fehlende Angaben über abweichende Sensor- oder Detektoreigenschaften des ersten Landsat-MSS einen Problemfaktor darstellen (vgl. Kap. 7). Zudem wurde diese Szene als einzige vom amerikanischen Datenprovider EOSAT geordert, so dass auch potentielle Abweichungen in der Datenvorverarbeitung eine Rolle spielen können<sup>31</sup>. Wahrscheinlicher ist jedoch der Einfluss der Phänologie im Pflanzenbestand. Aufgrund der eingeschränkten Datenverfügbarkeit für Europa bis Mitte der 70er Jahre musste bezüglich des Aufnahmezeitpunkts der Szene ein Kompromiss eingegangen

<sup>31</sup> Die MSS-Daten von 1972 wurden als einziger Datensatz vom Provider einschließlich Deconvolution ausgeliefert (vgl. Kap. 5)

werden. Während alle anderen Datensätze im Spätfrühjahr bis Frühsommer aufgenommen wurden, lag für 1972 nur ein Datensatz vom September des Jahres vor.

Damit gehen eine Reihe von Veränderungen hinsichtlich der photosynthetischen Aktivität der Vegetation einher. In Höhenlagen über 1.400 m tritt die gesamte Vegetation zum üblichen Aufnahmezeitpunkt ab Mitte Mai meist erst in die Blüh- und Grünphase ein, während im September das Ende der Vegetationsperiode im Gebirgsstock des Psiloritis naht. Insbesondere die in mittleren bis höheren Lagen auftretenden Matorralbestände des Arbeitsgebietes weisen vom Frühsommer bis zum Herbst entscheidende phänologische Veränderungen auf. Diese Annahme wird auch durch das Auftreten maximaler Abweichungen innerhalb dieser Gebiete bei der Kreuzvalidierung bestätigt.

Aufgrund dieser Ergebnisse wurde die erste Szene der Datenreihe von den nachfolgenden Untersuchungen für das Arbeitsgebiet des Psiloritis ausgenommen. Somit verkürzte sich die Gesamtreihe auf den Zeitraum zwischen 1977 und 1996. Während der Wegfall des frühesten Beobachtungszeitpunktes als Nachteil in Kauf genommen werden musste, stieg durch diese Maßnahme die durchschnittliche Wiederholungsrate der Beobachtung für den verbliebenen Zeitraum von 20 Jahren auf rund 18 Monate. Die Aussage der Analysen anhand dieser kürzeren, aber verdichteten Zeitreihe wird aus diesem Grund gegenüber der ursprünglichen Serie nochmals zuverlässiger.

**ASTEROUSIA.** Die vorgenommene Kreuzvalidierung ergab ebenso für das Arbeitsgebiet der Asterousiaberge eine deutliche Abweichung zwischen den Datenreihen mit und ohne die im Spätsommer akquirierte Szene von 1972. Insbesondere die mittlere Vegetationsbedeckung und ihre Veränderung zwischen dem ersten und letzten Monitoring-Zeitpunkt zeigten deutliche Differenzen bei Eliminierung der Analyseergebnisse des Jahres 1972. Eine Überprüfung der szenenweisen Mittelwerte bestätigte diese Feststellung.

Der Grund für diese Inkonsistenz liegt darin, dass auch die im Wesentlichen durch Phrygana geprägte Region der Asterousiaberge im September einen deutlich höheren Anteil an Trockenvegetation aufweist. Dies betrifft zum Teil die Strauchvegetation der Phrygana selbst, aber vor allem auch die im Spätfrühjahr bis Frühsommer vor dem Einsetzen der maximalen Sommertrockenheit noch aktiven Geophyten. Je nach klimatischer Situation eines Jahres können diese während der Aufnahmezeitpunkte im Mai oder Juni einen nicht unerheblichen Anteil der photosynthetisch aktiven Vegetation ausmachen, während oberirdische Organe im Spätsommer und Herbst fehlen.

Überraschenderweise zeigten sich während der Kreuzvalidierung jedoch auch deutliche Veränderungen in der Zeitreihe bei der Eliminierung des Datensatzes von 1977 (Abbildung 9.5 rechts). Niederschlagsdaten der Stationen Iraklion, Chania, Sitia und Ierapetra geben für den Aufnahmezeitpunkt am 21.5.1977 keinen Hinweis auf pluviale Differenzen zu anderen

Jahren. Allerdings sind die verfügbaren Stationen nicht repräsentativ für die lokalen Niederschlagsverhältnisse in Asterousia. Wie im Psiloritis auch, können lokale Phänomene, wie Luv-Lee-Effekte oder die Kanalisation von Luftströmungen entlang einiger weniger Talverläufe in Abhängigkeit von der vorherrschenden Windrichtung, das lokale Niederschlagsregime deutlich verändern. Im Fall des Jahres 1977 lässt sich anhand der unprozessierten Bilddaten ein solcher Effekt nachvollziehen: während im Norden und zentralen Teil der Inselmitte ein mit anderen Jahren vergleichbarer Vegetationsanteil ausgemacht werden kann, zeigt der Süden – speziell der Gebirgszug von Asterousia – eine deutlich verminderte Vitalität. In der Konsequenz wurden für die Zeitreihenanalyse des Arbeitsgebietes Asterousia daher sowohl der Datensatz von 1972, als auch die Szene des Jahres 1977 von einer weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

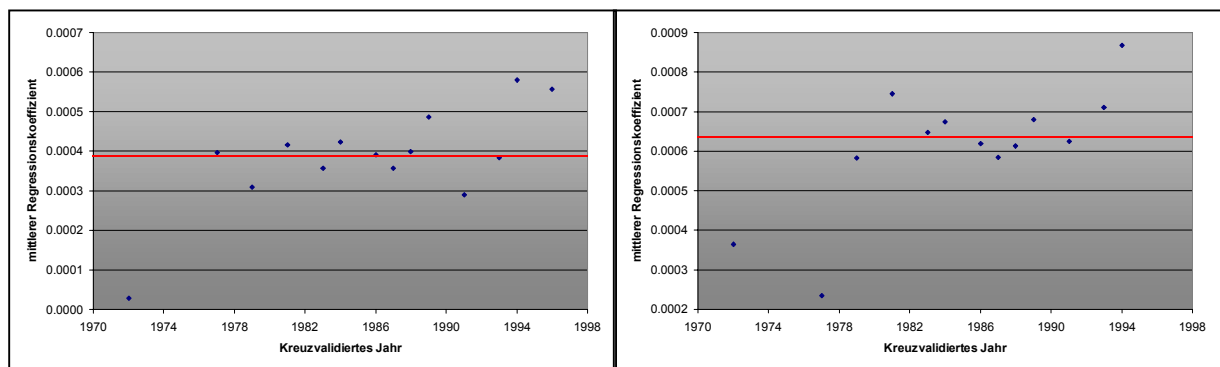


Abbildung 9.5: Kreuzvalidierung des mittleren Regressionskoeffizienten aller Bildpixel für Psiloritis (links) und Asterousia (rechts); Mittelwerte der Reihen in Rot

*Teil III:*

*Analyse und Interpretation*

## 10 Raum-zeitliche Modellierung

Im Folgenden sollen die in Kapitel 9 ausgeführten methodischen Grundlagen zur Interpretation der Zeitreihe im regionalen Kontext und nach inhaltlichen Gesichtspunkten umgesetzt werden. Das komplexe ökologische Gefüge Zentralkretas wird dabei nach dem in Abbildung 10.1 dargestellten Degradations- und Regenerationsschema verschiedenen Entwicklungsstadien zugeordnet.

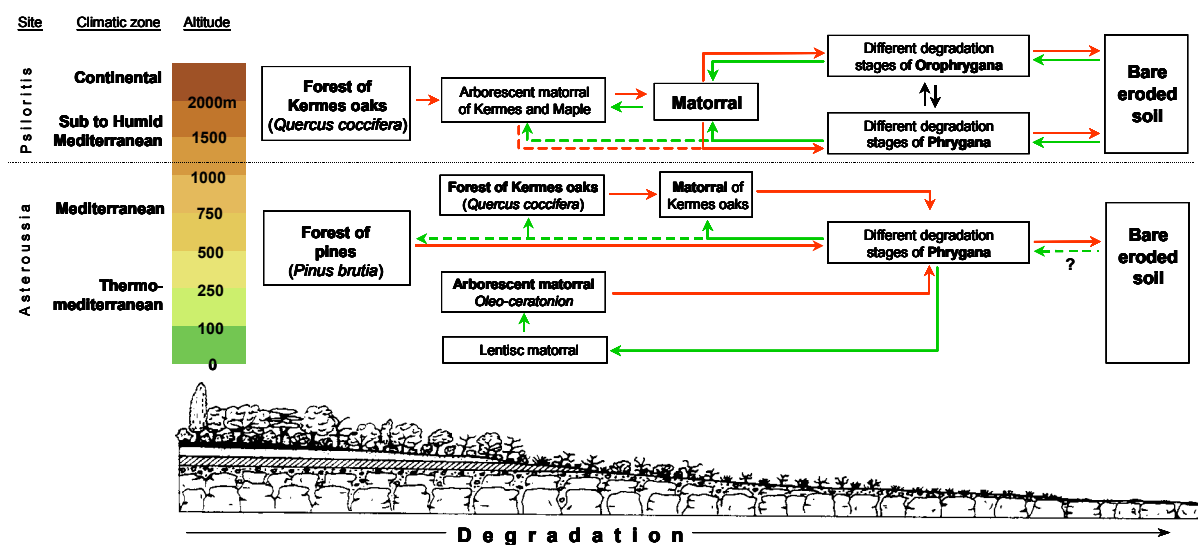


Abbildung 10.1: Entwicklungsstufen der Pflanzengesellschaften Kretas (Schema nach Tsiourlis und Kasapidis 1997, verändert; Graphik nach Giessner 1990, verändert)

Der Schwerpunkt der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen konzentriert sich auf die Analyse der weidewirtschaftlich genutzten Gebiete des Psiloritis mit lokalen Zentren um Anogia und Livadia im Norden und Gergeri im Süden. In den Asterousiabergen umfassen die untersuchten Flächen den fast ausschließlich zur Viehhaltung in Wert gesetzten Bereich zwischen Lendas und Tsoutsouras. Wichtigstes Maß zur Bewertung der Landschaftsentwicklung ist die Vegetationsbedeckung als fernerkundlich ableitbares und damit raumübergreifendes Kriterium. Die daraus abgeleiteten Parameter umfassen zeitliche Dynamik, den Mittelwert der Vegetationsbedeckung über den Gesamtzeitraum und die phänologische Variabilität. Darüber hinaus werden ergänzend zur qualitativen Beurteilung, wo immer möglich, während der Geländearbeiten erhobene Daten, beispielsweise zu Artenzusammensetzung oder Wuchsform, hinzugezogen.

Die Ergebnisse der Luftbildinterpretation in Kapitel 5 haben gezeigt, dass auch mit hohem Aufwand die Veränderungen der Vegetation in den Weidegebieten Zentralkretas mit klassischen Methoden nicht erfasst werden können. Demgegenüber zeigen die Ergebnisse der satellitengestützten Analyse auch ohne weitere Interpretation eine deutliche räumliche und

zeitliche Varianz (vgl. Kap. 9). Die relativ hohe Wiederholrate von durchschnittlich knapp zwei Jahren, der Bezugszeitraum von 20 Jahren und standardisierte Methoden der digitalen Datenverarbeitung eröffnen neue Möglichkeiten der Informationsextraktion aus fernerkundlich gewonnenen Daten.

## 10.1 Analysen zur zeitlichen Dynamik und zu mittlerer Vegetationsbedeckung mit Satellitendaten

Die Vegetation entwickelt sich in den beiden Arbeitsgebieten offensichtlich verschieden. Dies betrifft sowohl die sich abbildenden räumlichen Muster, die mittlere Vegetationsbedeckung sowie die zeitliche Dynamik. Zur Darstellung dieser Unterschiede wurde, in Anlehnung an eine von griechischen Arbeitsgruppen genutzte Einteilung, eine Dreiteilung für Klassen der Vegetationsbedeckung vorgenommen (Tsiourlis und Kasapidis 1997):

- geringe Vegetationsbedeckung: geringer als 30 %
- mittlere Vegetationsbedeckung: 30 bis 60 %
- hohe Vegetationsbedeckung: über 60 %

Zur Betrachtung der zeitlichen Dynamik wurde unter Berücksichtigung des aus der Zeitreihenanalyse hervorgegangenen Wertebereichs eine 5-stufige Skala prozentualer Veränderungen entwickelt:

- stark negativ: Abnahme von über 15 %
- negativ: Abnahme zwischen 5 und 15 %
- neutral: Zu- oder Abnahme bis 5 %
- positiv: Zunahme zwischen 5 bis 15 %
- stark positiv: Zunahme über 15 %

**PSILORITIS.** Eine Betrachtung der räumlichen Muster zur zeitlichen Dynamik der Vegetationsbedeckung zwischen 1977 und 1996 zeigt vor allem eine überwiegend negative Entwicklung für die Region zwischen Anogia und dem zentralen Gebirgskamm (Anh. A, Karte A.1). Diese Zone reicht von Margarites im Westen bis jenseits von Anogia im Osten. Damit weist fast die gesamte oro-mediterrane Stufe entlang der Nordabdachung des Psiloritis eine deutlich abnehmende Vegetationsbedeckung auf. Entsprechendes gilt für die in der Provinz Iraklion gelegenen Gebiete östlich bis nordöstlich von Gonies. In der Spitze betragen die Abnahmeraten über 50 %, meist liegen die Werte um 5 bis 20 % niedriger als im Jahre 1977 (Abbildung 10.2 rechts).

Eine vom oben gezeichneten Bild deutlich abweichende Entwicklung weisen die Weidegebiete des Kermeseichenwaldes von Rouvas auf. Eine abnehmende Vegetationsbedeckung ist nur lokal feststellbar; es überwiegen sogar Flächen mit zunehmender Tendenz. Weiterhin bleibt festzuhalten, dass nicht nur im Wald von Rouvas, sondern fast im gesamten Weide-



gebiet des südlichen Psiloritis, eine eher stabile bis zunehmende Tendenz der Vegetationsbedeckung überwiegt. Lediglich die Gemarkungen westlich von Platania weisen eine negative Trendrichtung auf.

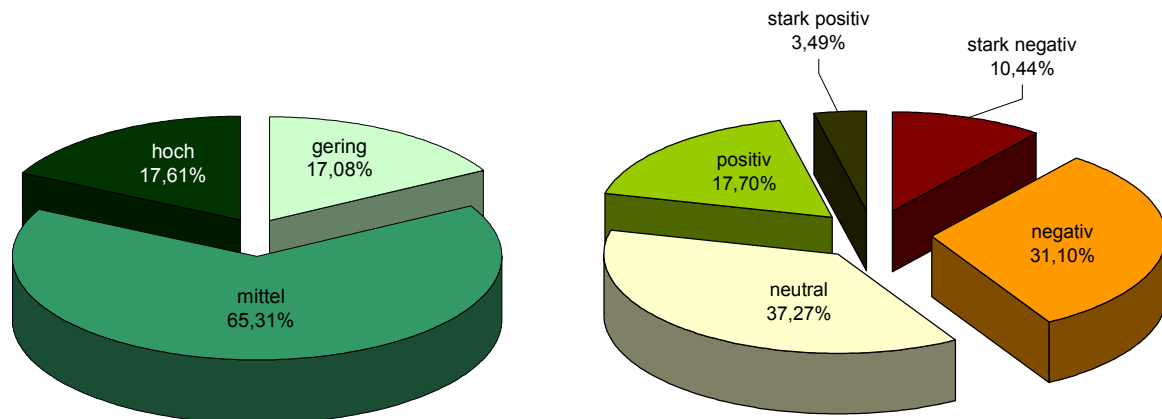


Abbildung 10.2: Mittelwert der Vegetationsbedeckung (links) und zeitliche Dynamik (rechts) aus 13 Aufnahmezeitpunkten (Psiloritis)

Vor allem hinsichtlich der mittleren Vegetationsbedeckung über den Gesamtzeitraum können im Psiloritis extreme Unterschiede in den verschiedenen Gebirgsregionen ausgewiesen werden (Abbildung 10.2 links; Anh. A, Karte A.2). Bleibt der nördlich des Psiloritismassivs anschließende, ackerbaulich genutzte Talverlauf außer Betracht, so liegt die Spanne der auftretenden Vegetationsbedeckung bei unter 10 % bis rund 60 %.

Hohe Werte weisen die Matorralgebiete im äußersten Westen des Gebirges und südlich bis südwestlich von Anogia sowie der Kermeseichenwald von Rouvas auf. Die übrigen Weideflächen tendieren um 45 % Vegetationsbedeckung oder niedriger. Auffallend sind insbesondere die häufig fast vegetationslosen Flächen der klimatisch ungünstig gelegenen Steilhänge im Lee des Psiloritis an der Abdachung zum Neogen.

**ASTEROUSIA.** Auf über einem Drittel der Fläche des Asterousiagebirges überwiegt eine abnehmende Tendenz der Vegetationsentwicklung (Abbildung 10.3 rechts und Anh. A, Karte A.3). Ausnahmen bilden lediglich die südöstlichen Küstenbereiche, der Talverlauf um Kapetaniana im zentralen Asterousia und einige Gebiete südlich und südwestlich des Vigla-Gipfels im äußersten Westen. Eine indifferente Entwicklung weisen die Übergangszonen zwischen diesen Gebieten und ausgedehntere Teile des zentralen Gebirgsstocks auf. Aber auch die Region um Achendrias im östlichen Asterousia und große Areale im Westen des Gebirgszuges fallen in diese Kategorie der Vegetationsentwicklung.

Bei Betrachtung der mittleren Vegetationsbedeckung fällt vor allen Dingen das niedrige mittlere Niveau auf (Abbildung 10.3 links). Darüber hinaus verdeutlicht Karte A.4 (Anhang A), dass eine recht deutliche Zonierung parallel zum Gebirgsverlauf auftritt. Während

besonders die südlichen Gebiete des Gebirgsstocks auf niedrigstem Niveau liegen, wird in den zentralen Gebirgsbereichen häufig eine als mittlere Bedeckung einzustufende Vegetationsdichte erreicht. Lediglich in der an die Messara grenzenden Region östlich von Sternes erreichen auch größere Flächen der tiefergelegenen Hangzonen im nördlichen Asterousia eine Vegetationsbedeckung zwischen 30 und 60 %. Ein großer Teil des Arbeitsgebietes weist allerdings eine Bedeckung von maximal 30 % auf.

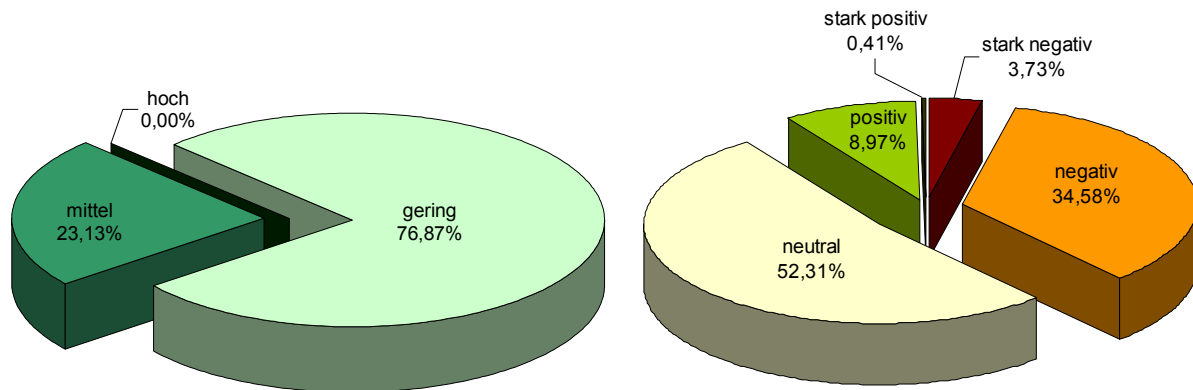


Abbildung 10.3: Mittelwert der Vegetationsbedeckung (links) und zeitliche Dynamik (rechts) aus 12 Aufnahmezeitpunkten (Asterousia)

### 10.1.1 Integration der Ergebnisse mit Geländeerhebungen

Eigene Untersuchungen vor Ort (Hostert und Hill 1997; Hostert und Preissler 1997; Röder et al. 2000), vor allem aber auch die detaillierten Geländearbeiten der griechischen Projektpartner (Tsiourlis und Kasapidis 1997, 1999; Tsiourlis 1998; Tsiourlis et al. 1998a, b), ermöglichen die Betrachtung der fernerkundlich gewonnenen Ergebnisse im Kontext geländebasierter Kartierungen. Die im Folgenden zitierten Angaben zur Artenverteilung beruhen alle auf Geländeerhebungen an charakteristischen Standorten des jeweiligen Arbeitsgebietes. Jeder Standort wurde entlang von 10 Transekten mit jeweils 50 m Länge auf die dort vorkommenden Arten untersucht. Zudem wurde die Vegetationsbedeckung entlang des Transekts auf Basis der projizierten Fläche jeder aufgenommenen Pflanze ermittelt. Für Waldgesellschaften erfolgte die Aufnahme anhand von Erhebungen auf 900 m<sup>2</sup> großen Testarealen (Tsiourlis und Kasapidis 1997).

**PSILORITIS.** Die Ergebnisse decken sich weitgehend mit den Befunden griechischer Arbeitsgruppen vor Ort (Tsiourlis und Kasapidis 1999). Beispielsweise wird deutlich, dass die Bestände des Matorral südlich und westlich von Anogia aufgrund ihres Habitus und der räumlichen Verteilung einem erheblichen Weidedruck unterliegen. In vielen Arealen treten Bäume, wie etwa *Acer creticum* oder *Quercus coccifera*, nur als degradierte Varianten in Form von Kugelbüschen auf. Bei ein- oder mehrjähriger Schonung hingegen entstehen deutlich sicht-

bare, singuläre Triebe, die zugunsten des Höhenwachstums keinerlei Lateralwachstum aufweisen. Auf diese Weise ist es beweideten Arten möglich, bei nachlassendem Weidedruck, spontan baumartige Wuchsformen jenseits der durch Weidetiere unmittelbar erreichbaren Höhe zu bilden (Abbildung 10.4).

Im gesamten Taleinschnitt von Rouvas finden sich deutliche Spuren der Weidewirtschaft und Herden mit Weidetieren sind allgegenwärtig. Dennoch offenbart die Trendanalyse nur geringe Tendenzen zur Vegetationsabnahme; häufig ist die Situation als stabil einzuschätzen, oft zeigt sich sogar eine Tendenz zur Zunahme der Vegetationsbedeckung. Die Ursachen hierfür sind sicherlich vielfältig und können mit einigen schon erwähnten Tatsachen in einen sinnvollen Zusammenhang gestellt werden. In diesen Gebieten überwiegen baumartige Pflanzenindividuen, im Gegensatz zu den Verbissformen entlang der Nordabdachung. Die Beweidung findet im südlichen Psiloritis überwiegend im Unterwuchs statt, weshalb damit zusammenhängende Veränderungen teilweise der fernerkundlichen Erfassung entgehen.



*Abbildung 10.4:  
Typische Wuchsformen von *Acer creticum* unter Beweidung*

Ausgewachsene Baumindividuen sind bei fehlenden Kletterhilfen selbst für Ziegen nur schwer zu befressen, so dass sich der Standort einer totalen Überweidung entziehen kann.<sup>32</sup> Dieser zunächst positiv erscheinende Faktor zur Limitierung des Weidedrucks führt allerdings zur Gefahr der Bestandsüberalterung. Aufkommende Jungvegetation steht aufgrund des hohen Tierbestandes unter starkem Druck und eine Regeneration findet kaum statt, so können bei fehlenden Gegenmaßnahmen Feuerereignisse oder Kalamitäten zum Absterben des Bestandes führen (Egli 1998). Bergmeier (1996) vertritt jedoch die These, dass durch die Beweidung der bodennahen Vegetation die Regenerationsbedingungen für Bäume in den Weidegebieten auf Kreta auch verbessert werden können. Auf jeden Fall hat diese Form der Beweidung Einfluss auf die Feueregefährdung eines Bestandes, da der Anteil der Nekromasse im

<sup>32</sup> In Anbetracht der Tatsache, dass in dieser Region Zufütterung zur Weidepraxis zählt, klettern Ziegen nur selten und die Baumkronen bleiben meist vom Fraß verschont.

Verlauf des trockenen Sommers durch intensive Beweidung insgesamt zurückgeht und die Feuerwahrscheinlichkeit sinkt.

Abbildung 10.5 illustriert die Zusammenhänge zwischen der aus Satellitendaten ermittelten Vegetationsbedeckung und im Gelände kartierten Beständen. Für die dargestellte Oro-Phrygana (Diagramm oben links), Ahorn-Matorral (oben rechts), Ahorn-Matorral mit hohem Anteil an Bäumen (rechts) und offenen Kermeseichenwald (unten) zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Vegetationsbedeckungsklassen und den bodengestützten Erhebungen. Bezüglich der zeitlichen Dynamik der Vegetationsbedeckung weisen vor allem die Gebiete des Matorral im Zentrum des Bildausschnitts seit 20 Jahren eine rückläufige Tendenz auf, während die Entwicklung im Wald von Rouvas umgekehrt verläuft.

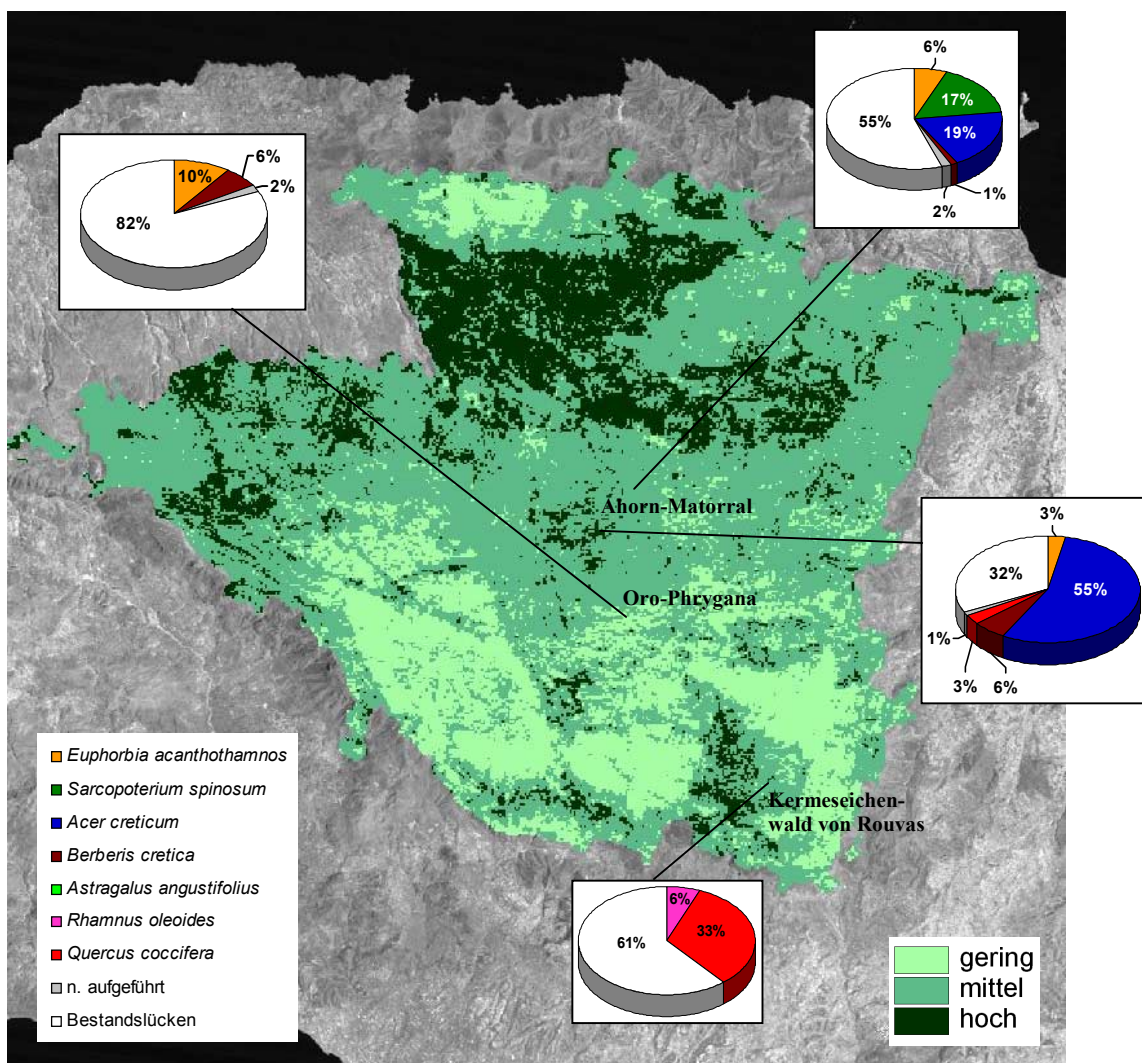


Abbildung 10.5: Mittlere Vegetationsbedeckung aus Zeitreihenanalyse und Artenverteilung im Psiloritis (aus Tsiourlis und Kasapidis 1997); Erläuterung im Text

Das hier gewonnene Gesamtbild illustriert die Strukturierung der Region hinsichtlich der betrachteten Indikatoren in Abhängigkeit von der vorherrschenden Pflanzenformation und

dem Einfluss des wirtschaftenden Menschen. Vor allem wird offensichtlich, dass selbst für ein regional begrenztes Untersuchungsgebiet differenzierte Aussagen vonnöten sind, um eine sinnvolle Einschätzung von Degradationsphänomenen zu ermöglichen. Für den Gesamttraum geltende positive oder negative Entwicklungen zeichnen sich in einem derart heterogenen Raumausschnitt wie dem Psiloritisgebirge nicht ab, wohl aber können Teilbereiche des Gebietes als deutlich gefährdete Regionen ausgegliedert werden (Anh. A, Karte A.1).

**ASTEROUSIA.** Die vorherrschende Pflanzenformation umfasst im Asterousiagebirge fast ausschließlich Phrygana und kontrastiert somit gegenüber den oft mit Bäumen durchsetzten Pflanzenbeständen des Psiloritis. Darüber hinaus zieht die Mittelgebirgstopographie mit maximalen Höhen um 1.000 m ü.NN im Zusammenhang mit der Küstengebirgssituation im Süden Kretas eine deutliche Luv-Lee-Situation nach sich. Auch der Einfluss der Geologie mit überwiegend Gneis im Westen, Flysch entlang der sich östlich daran anschließenden, breiten Nordabdachung und Kalken in südexponierten Lagen, führt scheinbar zu lokalen Unterschieden in der Vegetationsbedeckung und -dynamik (Tsiourlis und Kasapidis 1997). Beide Aspekte werden in Kapitel 11 ausführlicher zu untersuchen sein.

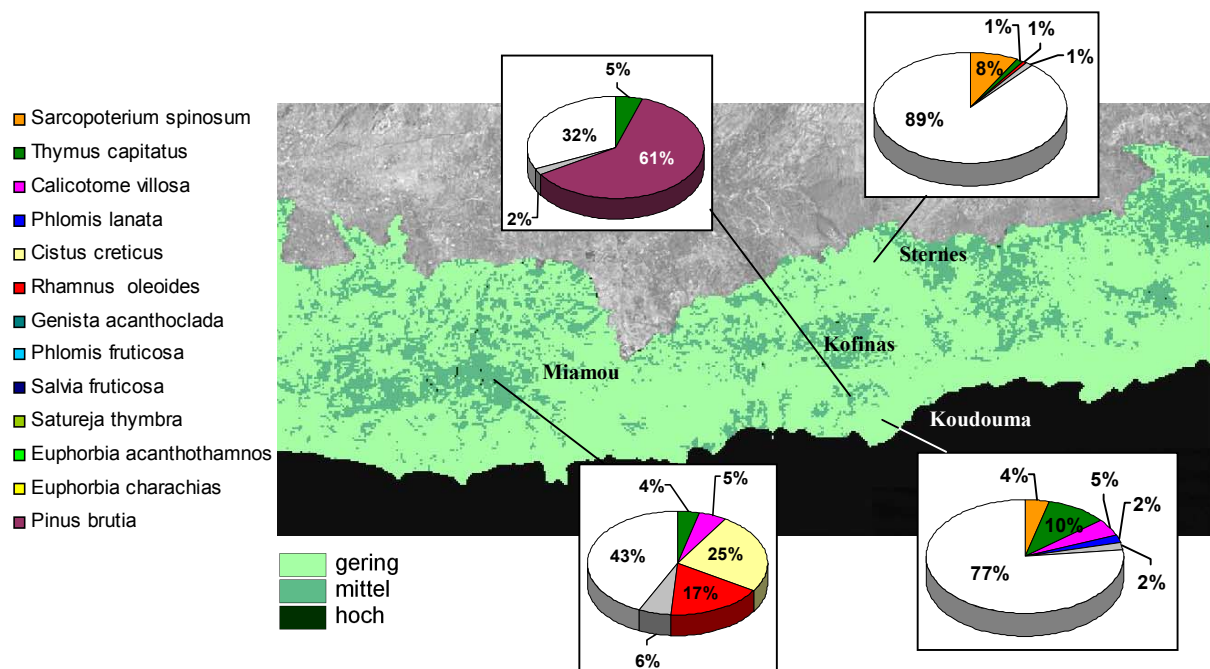


Abbildung 10.6: Mittlere Vegetationsbedeckung aus Zeitreihenanalyse und Artenverteilung in Asterousia (aus Tsiourlis und Kasapidis 1997); Erläuterung im Text

Die sich deutlich negativ entwickelnden Bereiche (Anh. A, Karte A.3) weisen eine hohe Übereinstimmung mit artenarmen, phryganischen Gebieten bzw. Gebieten mit hoher Dominanz einer oder zweier Arten auf. Insbesondere die häufig fast nur durch *Sarcopoterium spinosum* eingenommenen Hänge südlich von Steries (Abbildung 10.6, Diagramm oben rechts)

bilden ein fast geschlossenes Gebiet mit einer Abnahme der Vegetation von über 15 % innerhalb des Beobachtungszeitraumes. Das stellenweise sogar ausschließliche Auftreten dieser weideresistenten Art belegt den Einfluss der Weidewirtschaft im zentralen Gebirgsbereich. Hier treffen abnehmende Vegetationsbedeckung und geringe Artenzahl aufeinander und bilden besonders ungünstige Rahmenbedingungen für die künftige Entwicklung dieser Region. Die Ursachen liegen in der Kombination abiotischer Ungunsth Faktoren und weidewirtschaftlicher Nutzung begründet, welche eine hohe Variabilität in der Artenzusammensetzung nach sich ziehen können (vgl. Kap. 11 und 12).

Die im Westen Asterousias gelegenen Phryganaflächen mit deutlich zurückgehender Vegetationsbedeckung weisen eine deutlich höhere Anzahl verschiedener Arten auf als dies in den daran anschließenden Gebieten des zentralen Gebirgsstocks der Fall ist (Abbildung 10.7). Obwohl die Abnahmeraten aufgrund der Beweidung vergleichbar scheinen, deutet die höhere Artenzahl auf einen merklichen Einfluss des Substrats oder anderer variierender Faktoren hin, der sich anhand der Bedeutung verschiedener naturräumlicher Randbedingungen in Kapitel 11 auch belegen lässt.



*Abbildung 10.7:  
Artenreiche Phrygana nördlich  
von Miamou*

Es existieren nur wenige Bereiche, in denen eine geringe Vegetationsbedeckung mit einer hohen Anzahl von Arten koinzidiert, wie z.B. auf der Südseite des Kofinas (Abbildung 10.6, Diagramm unten rechts). Vielmehr scheinen solche Flächen fast immer auch mit einer Vegetationsbedeckung von zumindest 30 %, eher sogar über 45 % zusammenzufallen. Deutlich wird dies beispielsweise bei Mesochorio, Treis Ekklesias oder Miamou (Abbildung 10.6, Diagramm unten links).

Allerdings kann daraus nicht die umgekehrte Konsequenz gezogen und allen Bereichen mit mittlerer oder höherer Vegetationsbedeckung generell auch eine höhere Artenzahl zugeordnet werden. Es existieren vielmehr auch Areale, deren relativ hohe Werte an oberirdischer Biomasse im Wesentlichen durch eine bis maximal drei Arten gebildet werden. Als Beispiele

seien die Umgebung von Sternes oder auch begrenzte Zonen am Kofinas genannt; dort ist bei einer über 50%igen Vegetationsbedeckung die fast ausschließliche Dominanz von *Sarcopoterium spinosum* für das im Vergleich des gesamten Gebirgsstocks recht hohe Niveau verantwortlich. Neben der Indikatorfunktion von *Sarcopoterium spinosum* für hohen Weidedruck bedingt die geringe Strukturierung dieser Bestände auch eine Reihe von Konsequenzen für die Habitategnung der Tierwelt (Dretakis und Tsiourlis 1998).

### 10.1.2 Ableitung eines vegetationsbasierten Degradationsindex

Aus der Kombination von mittlerer Vegetationsbedeckung sowie Richtung und Stärke des Trends lässt sich anhand eines Verschneidungsmodells eine synoptische Betrachtung der Degradationsgefährdung ableiten. In Anlehnung an Tsiourlis et al. (1998b) entstand so ein weiterentwickelter Degradationsindex auf Vegetationsbasis für Zentralkreta. Im Gegensatz zu einer Reihe vergleichbarer Indizes ermöglichen durch fernerkundliches Monitoring abgeleitete Parameter die Einbeziehung der zeitlichen Dimension. Eine Kombination aus mittlerer Vegetationsbedeckung und zeitlicher Dynamik der Vegetationsbedeckung dient als Maßzahl für die potentielle Gefährdung eines Gebietes. Dabei wird eine Abnahme der Vegetationsbedeckung auf einem niedrigen Ausgangsniveau gegenüber einer gleich starken Abnahme auf höherem Niveau stärker negativ gewertet. Auch wenn aus statistischer Sicht eine Extrapolation der Trendanalyse über den Monitoring-Zeitraum hinweg abzulehnen ist, ermöglichen derart abgeleitete Maßzahlen eine Interpretation der derzeitigen Gefährdung und damit auch der potentiellen, künftigen Entwicklung.

**PSILORITIS.** Als im Wesentlichen unverändert werden Areale ohne erkennbare Tendenz zur Zu- oder Abnahme der Vegetationsbedeckung eingeordnet; dies trifft auf etwas mehr als ein Drittel der betrachteten Flächen zu. Demgegenüber stehen Gebiete, die – basierend auf verschiedenen Ausgangssituationen – während der letzten 20 Jahre mäßige bis starke Veränderungen offenbaren (Anh. A, Karte A.5). Eine deutlich positive Entwicklung ausgehend von niedriger Vegetationsbedeckung findet kaum statt. Allerdings weisen vor allem die Anstiege zu den im Süden liegenden Höhenzügen des Psiloritis Tendenzen einer mäßigen Vegetationszunahme auf mittlerem bis niedrigem Niveau auf. Es handelt sich dabei in der Hauptsache um die randlichen Ausläufer der Weidegebiete. Die Vegetationszunahme auf relativ hohem Niveau in den Waldgebieten von Rouvas und Krousounas scheinen eher auf eine Zunahme der vitalen Blattmasse der unter geringem Beweidungsdruck stehenden Bäume hinzuweisen. Die damit verknüpfte Langzeitproblematik wurde bereits dargestellt.

Bei summarischer Betrachtung der Ergebnisse überwiegen degradationsgefährdete Flächen mit einem Gesamtanteil von über 40 % (Tabelle 10.1). Innerhalb der letzten 20 Jahre dominieren Abnahmeraten von 5 bis 15 % auf rund  $\frac{3}{4}$  dieser Flächen, etwas mehr als 10 % weisen abnehmende Vegetationsbedeckung in der Größenordnung von 15 % und mehr auf.

Als Kerngebiete fallen auch hier die Matorralbestände der nördlichen Psiloritisabdachung auf, innerhalb derer in der Region südlich von Anogia und südwestlich von Zoniana die Gefährdungsstufen -4 bis -6 entsprechend Tabelle 10.1 überwiegen. Interessant ist darüber hinaus, dass auch in den Randbereichen der Kermeseichenwälder von Rouvas und Krousounas lokale Schwerpunkte abnehmender bis deutlich abnehmender Vegetationsbedeckung basierend auf einem relativ hohen Ausgangsniveau auftreten (Stufe -1 bis -2). Besonders deutlich tritt dieses Phänomen an der Schnittstelle der nördlichen und südlichen Weidegebiete an der Wasserscheide südlich des Skinakas-Gipfels hervor, wo sich die Häufung im Sommer genutzter Weiden auf einer Fläche von ca. 1 km<sup>2</sup> in einem deutlichen Hot Spot bis zur Gefährdungsstufe -5 klar mittels der fernerkundlich abgeleiteten Indikatoren abbildet (Anh. A, Karte A.5).

Tabelle 10.1: Statistik der Degradationsgefährdung für die Weideflächen im Psiloritisgebirge

Einstufung	Entwicklung / Vegetationsbedeckung	Pixel	Prozent	Fläche (km <sup>2</sup> )	Fläche (km <sup>2</sup> )
-6	deutlich negativ / gering	64	0,19	0,40	
-5	deutlich negativ / mittel	2096	6,27	13,08	
-4	deutlich negativ / hoch	1328	3,97	8,29	86,67
-3	negativ / gering	768	2,30	4,79	
-2	negativ / mittel	7264	21,72	45,33	
-1	negativ / hoch	2368	7,08	14,78	
0	neutral	12464	37,27	77,79	77,79
1	positiv / hoch	592	1,77	3,69	
2	deutlich positiv / hoch	32	0,10	0,20	
3	positiv / mittel	3328	9,95	20,77	44,23
4	deutlich positiv / mittel	672	2,01	4,19	
5	positiv / gering	2000	5,98	12,48	
6	deutlich positiv / gering	464	1,39	2,90	
Summe		33440	100,00	208,69	208,69

**ASTEROUSIA.** Interessanterweise liegen in Asterousia die Flächen, die eine starke, absolute Zunahme an Vegetation aufweisen, sehr häufig in Gebieten mit niedrigem Ausgangsniveau der Vegetationsbedeckung (Anhang A, Karte A.6). Hier scheint tatsächlich eine Art „Erholungseffekt“ auf nahezu vegetationslosen oder zumindest vegetationsarmen Flächen einzutreten. Eine andere Erklärung wäre die verstärkte Ansiedlung von Weideunkräutern bei weiterhin hohem Beweidungsdruck. Die betroffenen Gebiete liegen vor allem entlang einiger Täler, die als Wasserleitlinien fungieren und zeichnen sich durch eine bessere Wasserversorgung gegenüber ihrer Umgebung aus.



Tabelle 10.2: Statistik der Degradationsgefährdung für die Weideflächen im Asterousia-gebirge

Einstufung	Entwicklung / Vegetationsbedeckung	Pixel	Prozent	Fläche (km <sup>2</sup> )	Fläche (km <sup>2</sup> )
-6	stark negativ / gering	936	2,87	5,84	
-5	stark negativ / mittel	279	0,86	1,74	
-4	stark negativ / hoch	0	0,00	0,00	77,96
-3	negativ / gering	8793	26,97	54,88	
-2	negativ / mittel	2484	7,62	15,50	
-1	negativ / hoch	0	0,00	0,00	
0	neutral	17055	52,31	106,46	106,46
1	positiv / hoch	0	0,00	0,00	
2	stark positiv / hoch	0	0,00	0,00	
3	positiv / mittel	846	2,59	5,28	19,10
4	stark positiv / mittel	90	0,28	0,56	
5	positiv / gering	2079	6,38	12,98	
6	stark positiv / gering	45	0,14	0,28	
Summe		32607	100,00	203,52	203,52

Neben etwas mehr als 50 % neutraler Flächen, weisen eine Reihe von Gebieten eine hohe Degradationsgefährdung auf (Tabelle 10.2). Die Indexstufen -2 und vor allem -3 sind mit einem Gesamtanteil von über einem Drittel der Fläche überproportional vertreten, aber selbst in den beiden Klassen mit höchstem Degradationspotential finden sich noch fast 4 % der Gesamtfläche Asterousias. Insbesondere die Gebiete nördlich von Lendas und südlich von Sternes treten als deutlich gefährdet hervor.

## 10.2 Analyse der Vegetationsstruktur

Eine häufig vernachlässigte Frage bezüglich der Vegetationsanalyse mit optischen Fernerkundungsdaten betrifft die Möglichkeiten zur Erhebung struktureller Bestandsparameter. Eine Erfassung auf Artenniveau ist mit satellitengestützten Systemen in der Regel nicht möglich. Verschiedene Pflanzengesellschaften können aufgrund der Interpretation ihres Reflexionssignals durch die spektrale Mischungsanalyse eine ähnliche Vegetationsbedeckung suggerieren, von ihrer Zusammensetzung her jedoch völlig verschieden sein. In diesem Zusammenhang bietet die multitemporale Auswertung einer Zeitreihe Möglichkeiten zur Interpretation der phänologischen Variabilität von Pflanzenbeständen.

Als Beispiel mag die deutlich verschieden ausgeprägte Schwankungsbreite um den Trend bei der Betrachtung der Hochebene von Nida gegenüber den Waldflächen von Rouvas dienen.

Die von krautiger Vegetation geprägte Polje von Nida weist zum Frühjahrseende eine dichte Grasdecke auf, so dass eine intensive Weidenutzung erfolgen kann. Nach dem Ende der früh-jährlichen Regenzeit lässt die photosynthetische Aktivität deutlich nach, der Anteil an Nekromasse hingegen nimmt zu (Abbildung 10.8). Demgegenüber bleiben die von immergrünen Hartlaubgewächsen dominierten Wälder bezüglich ihres fernerkundlich detektierbaren Gehalts an Blattpigmenten auch über den Sommer auf einem relativ hohen Niveau, wodurch eine geringere Schwankungsbreite der Vegetationsschätzungen in der Zeit des Übergangs vom regenreichen Frühjahr zur sommerlichen Trockenzeit auftritt.



*Abbildung 10.8: Vegetationsbedeckung der Hochebene von Nida im Frühjahr 1997 und im Sommer 1998*

Diese Tatsache lässt sich anhand der Trendanalyse nachvollziehen. Bei der Betrachtung der Vegetationsbedeckung für das Gebiet der Polje wird offensichtlich, dass sich die beschriebenen phänologischen Gegebenheiten als starke Schwankungen um die mittlere Trendgerade wiederfinden. Die zum Vergleich abgetragene Funktion für die Waldflächen von Rouvas weist hingegen eine deutlich geringere Schwankungsbreite auf (Abbildung 10.9). Ähnliche Verläufe finden sich auch für andere waldbedeckte Flächen innerhalb des Arbeitsgebietes.

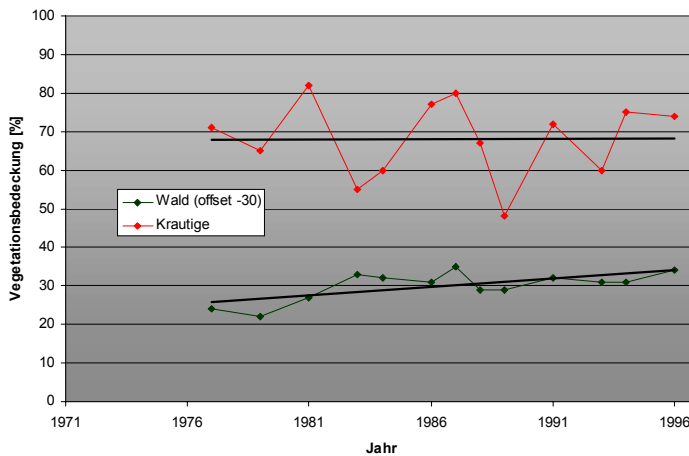


Abbildung 10.9: Variabilität der Vegetationsschätzungen um die Trendfunktion am Beispiel gras- und waldbedeckter Flächen

Eine Zwischenstellung nehmen die von phryganischen Gesellschaften dominierten Regionen ein. Sie weisen häufig eine in ihren jeweiligen Anteilen stark variierende Kombination von Sträuchern und Halbsträuchern mit krautigen Pflanzen auf (Jahn und Schönfelder 1995). Je nach Artenzusammensetzung zeigt die Vegetation auf diesen Flächen daher mehr oder minder deutlich ausgeprägte Schwankungen im Pigmentgehalt.

Zur pixelbasierten Quantifizierung der Variabilität lassen sich akkumulierte Residuen oder der RMS heranziehen (vgl. Kap. 9). Lediglich auf Basis dieses Maßes ist jedoch keine zuverlässige Trennung von Pflanzengesellschaften mit verschiedenen hohen Anteilen an immergrüner Vegetation möglich. So stimmen beispielsweise weite Gebiete der Phrygana mit grasbedeckten Flächen in der Größenordnung ihrer Fluktuation um den Trend überein. In Abbildung 10.10 b (vgl. auch Anh. A, Karte A.7) wird dies anhand der flächenhaften Darstellung des RMS in drei Klassen deutlich. Zur Orientierung kann das Falschfarbenkomposit in Abbildung 10.10 d dienen, welches Nida südlich des Bildzentrums als sich deutlich abhebende orangefarbene Fläche hervortreten lässt. Erst durch die Einbeziehung der Vegetationsbedeckung (Abbildung 10.10 a) können weitere Aussagen getroffen werden. Durch die Verschneidung beider Parameter heben sich Flächen mit starken Schwankungen bei gleichzeitig hohem Vegetationsanteil von solchen mit konstanterem Reflexionsverhalten ab (Abbildung 10.10 c).

Trotz der vergleichbar hohen Vegetationsbedeckung von Nida und Rouvas lässt sich nach der Verschneidung problemlos eine Trennung beider Flächen vornehmen. Ähnliches gilt für alle Wälder entlang des südlichen Gebirgsrandes. Die in Abbildung 10.10 a grün dargestellten bewaldeten Hänge südlich des Hauptkammes heben sich so z.B. gegenüber den mit Krautigen durchsetzten Matorralgebieten im Zentrum des Psiloritis ab.

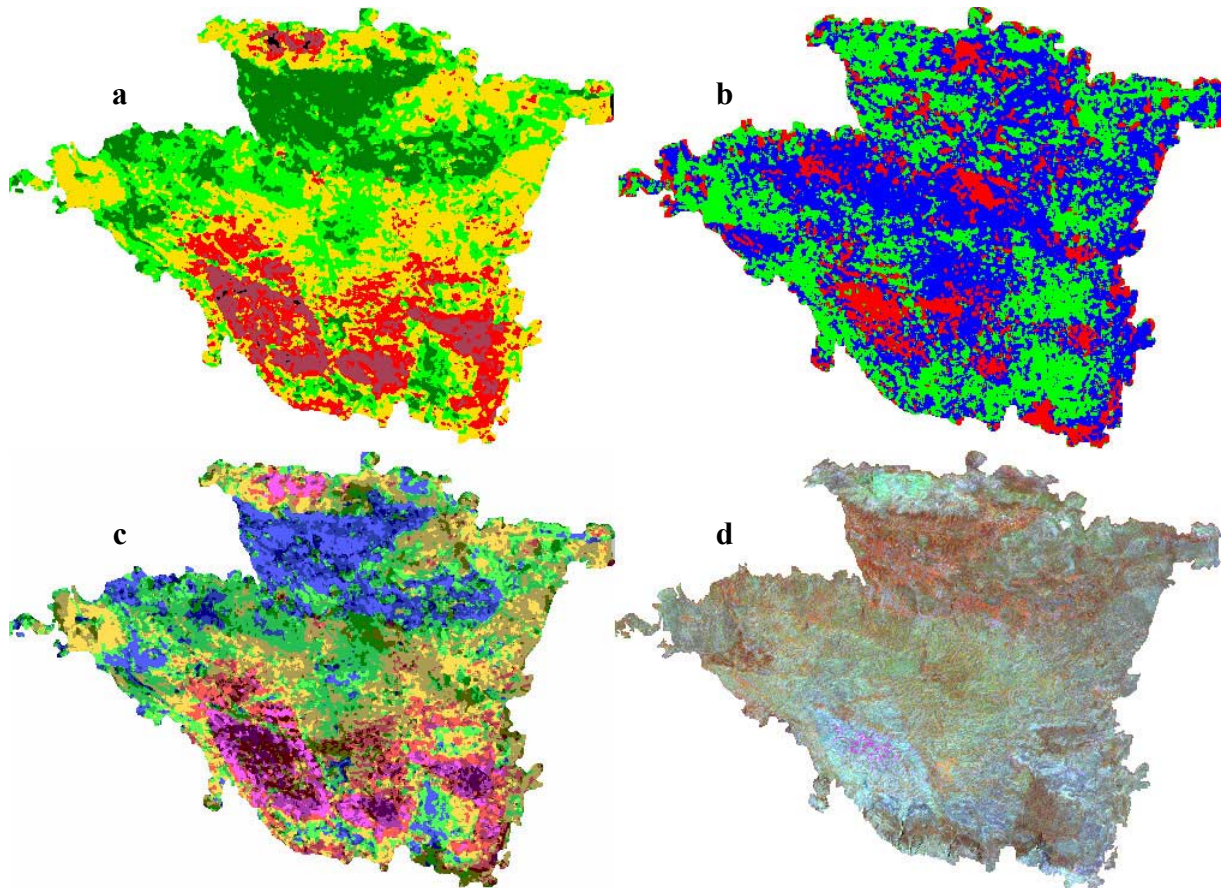


Abbildung 10.10: Räumlicher Zusammenhang von Vegetationsbedeckung (a: abnehmend von dunkelgrün nach dunkelrot) und Variabilität der Vegetationsentwicklung (b: grün – RMS < 6; blau – RMS 6 - 9; rot – RMS > 9), dargestellt mittels Matrixverschneidung (c: abnehmende Vegetationsdichte von blau über grün, gelb und rot nach violett, zunehmender RMS mit zunehmender Farbintensität); Falschfarbkomposit aus Landsat-TM 4/5/3 (R/G/B) des Jahres 1996 zum Vergleich (d)

Auch auf Basis der in Kapitel 5 beschriebenen Luftbildkartierungen des Untersuchungsgebietes lässt sich, trotz der bekannten Kartierungsungenauigkeiten und teilweise undifferenzierter Vegetationsklassen, diese Tatsache untermauern (Abbildung 10.11). Anhand des RMS sowie der Vegetationsdichte als weiterem Unterscheidungsmerkmal können Pflanzengesellschaften mit unterschiedlichen Anteilen an krautiger Vegetation charakterisiert werden. Eine Sonderstellung nehmen die Dornpolsterfluren der Oro-Phrygana ein, die lediglich niedrige bis mittlere Vegetationsbedeckung bei gleichzeitig variablem RMS aufweisen. Die in Abbildung 10.11 dargestellten Anteile mit hohem RMS werden allerdings teilweise durch im Hochgebirge häufig auftretende Schneedecken zum Aufnahmezeitpunkt verursacht, die einen erhöhten Schätzfehler in verschiedenen Jahren bedingen.

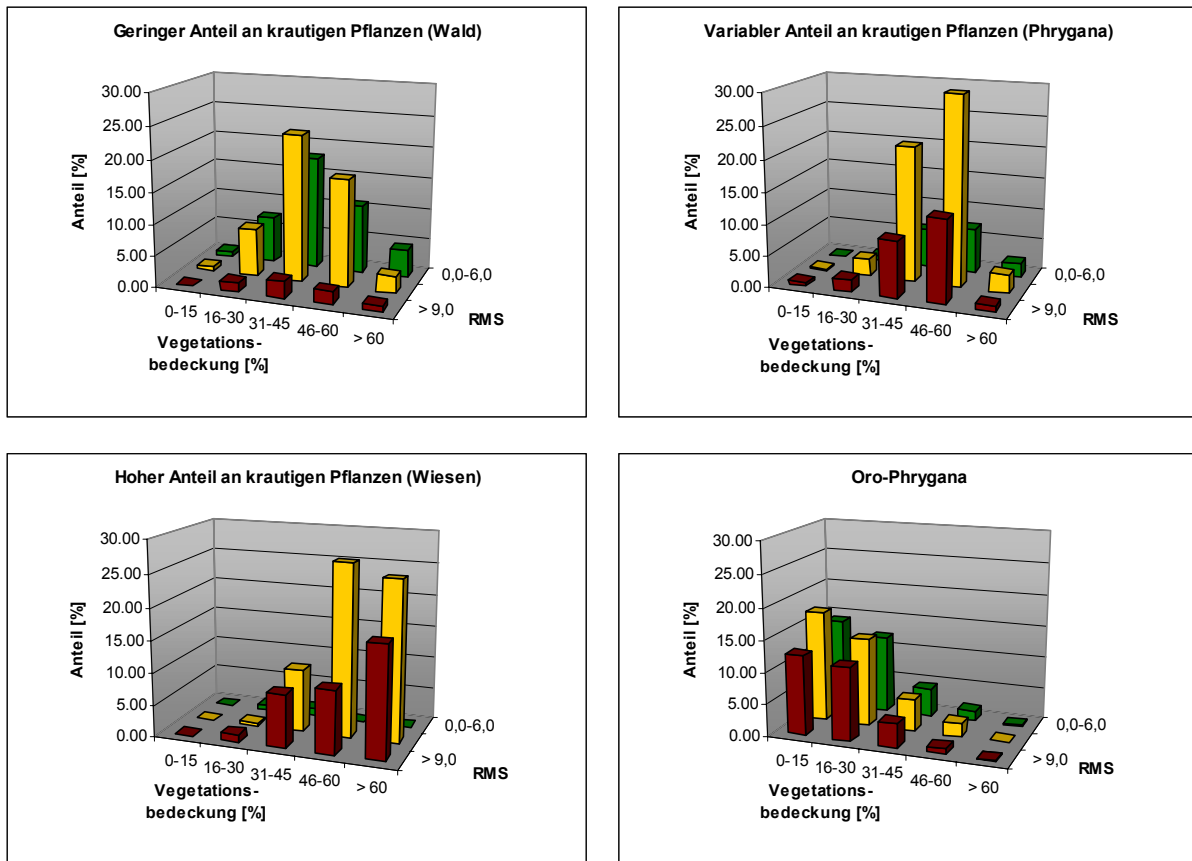


Abbildung 10.11: Zusammenhang zwischen Variabilität der Vegetationsentwicklung, mittlerer Vegetationsbedeckung und unterschiedlich strukturierten Pflanzenbeständen (nach Ergebnissen der Luftbildkartierung in Kapitel 5)

## 10.3 Zusätzliche Informationsebenen aus der Satellitendateninterpretation

Neben den vorgestellten Möglichkeiten zur Charakterisierung der Entwicklung eines Großraumes, können anhand der gleichen Datengrundlage weitere Informationsebenen abgeleitet werden. Dazu zählen die Kartierung von Brandflächen oder Rodungsmaßnahmen, die Bestimmung der Biomasse oder auch Analysen zum Bodenzustand.

### 10.3.1 Analyse von Einzelereignissen: Feuer und Flächenerschließung

Plötzlich auftretende Veränderungen der Vegetationsbedeckung weisen in der Regel ein negatives Vorzeichen auf, d.h. sie stehen für einen deutlichen Vegetationsrückgang. Die dabei betrachtete Größenordnung unterscheidet sich von den bisher ausgewerteten, kontinuierlichen Phänomenen derart, dass eine Unterscheidung beider Typisierungen über Schwellwertverfahren möglich ist. Charakteristische Ereignisse, die solche Veränderungen hervorrufen können,

sind Feuer, insbesondere gezielte Brandrodungen, Baumaßnahmen (z.B. Straßenbau, Siedlungserweiterungen) oder Rodungen zur Erschließung neuer Anbauflächen.

Aufgrund der deutlichen Unterschiede aufeinanderfolgender Analysedaten im Fall eindeutiger Einzelereignisse, eignen sich diese ausgezeichnet zur automatisierten Kartierung mit Fernerkundungsdaten. Bei Betrachtung der maximalen Differenz der Vegetationsbedeckung zwischen zwei Aufnahmezeitpunkten kann mittels eines Schwellwertverfahrens die Grenze für eine signifikante Veränderung gezogen werden. Da alle Datensätze einen geometrischen Restfehler aufweisen, darf nicht jede deutliche Variation als eine Zerstörung der Vegetation interpretiert werden. Dies gilt speziell für die schlechter aufgelösten Landsat-MSS-Daten. Vielmehr sind solche Gebiete als betroffen einzustufen, die eine zusammenhängende Fläche mit deutlicher und sprunghafter Veränderung bilden.

**PSILORITIS.** Ein Grenzwert zur Identifikation sprunghafter Veränderungen wurde bei einer Abweichung der Vegetationsbedeckung von mindestens 30 % zwischen zwei aufeinanderfolgenden Beobachtungszeitpunkten gezogen (Abbildung 10.12). Die Forderung zusammenhängender Areale konnte durch Anwendung eines 5 x 5 Medianfilter umgesetzt werden. Durch Multiplikation des entstandenen Datensatzes mit einem Kanal zur pixelweisen Angabe des Zeitpunkts der maximalen Abweichung vom Trend ließen sich die jeweiligen Ereignisse in ihrer zeitlichen Dimension einordnen.

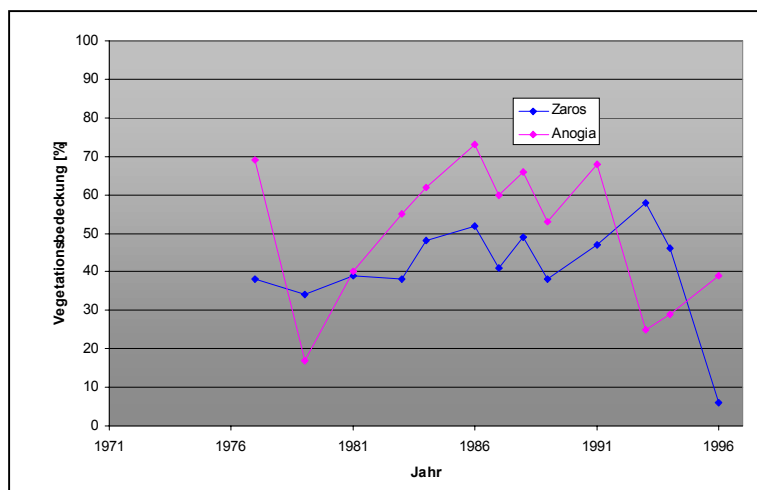


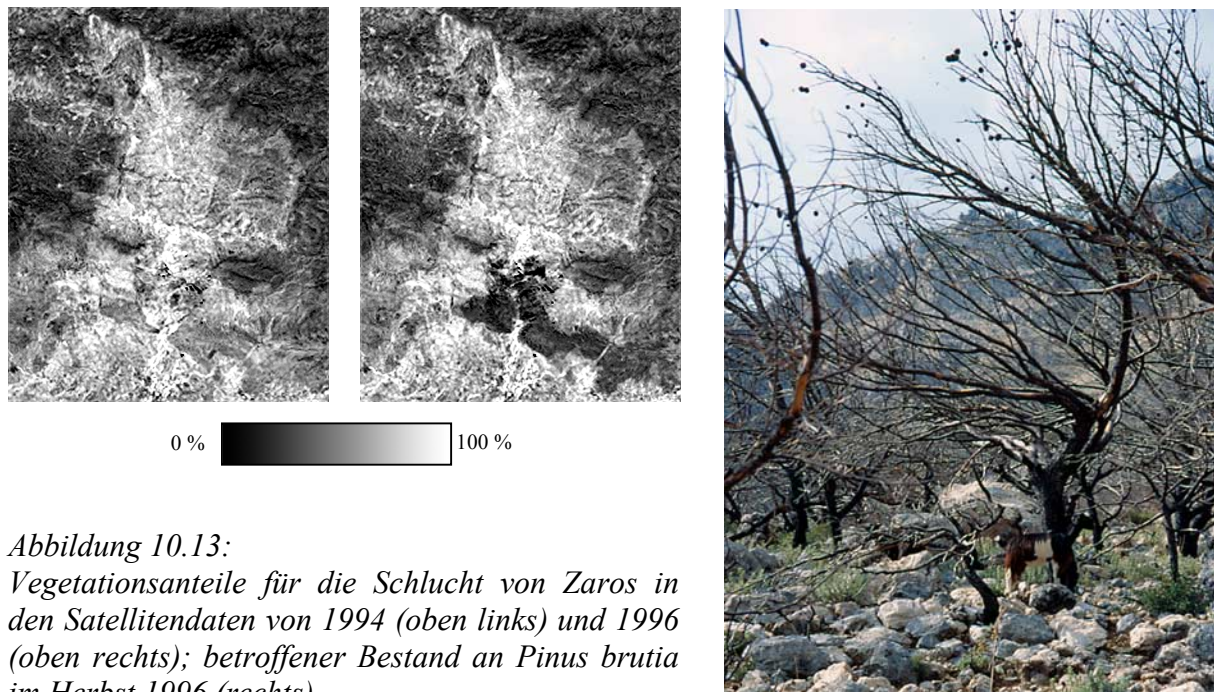
Abbildung 10.12:  
Detektion von Feuerereignissen  
anhand abrupter Veränderungen  
der Vegetationsschätzungen aus  
Satellitendaten

Im Wesentlichen ließen sich auf diese Weise zwei großräumige Brandereignisse identifizieren (Anh. A, Karte A.8): zum einen ein Feuer südwestlich von Anogia im Jahre 1979 sowie ein Brand im Verlauf der Schlucht von Zaros (Wald von Rouvas) im Jahre 1995<sup>33</sup>. Letzterer zer-

<sup>33</sup> Da für beide Zeitpunkte die zeitliche Differenz aufeinanderfolgender Szenen zwei Jahre betrug, war die Bestimmung des exakten Zeitpunktes nur aus Satellitendaten nicht möglich. Für die Brandfläche bei Rouvas war das Jahr des Feuerereignisses aufgrund der Geländearbeiten bekannt.

störte eine von *Pinus brutia* dominierte Fläche in der Größe von ca. 300 ha (Abbildung 10.13). Das Feuer von Anogia hatte eine Ausdehnung von ungefähr 230 ha in einem von Phrygana und Gräsern geprägten Talverlauf.

Entsprechend der unterschiedlichen naturräumlichen Ausgangssituation handelte es sich wahrscheinlich auch um zwei verschiedene Feuerursachen. Die Nähe zu Anogia eine der Hauptweideregionen des Psiloritis und das Auftreten auf phryganischen Flächen legen nahe, dass es sich in diesem Fall um gezielte Brandrodung handelte. Dies deckt sich auch mit den Beobachtungen vor Ort, da während der Geländearbeiten im Jahre 1998 im gleichen Talabschnitt Brandrodungsmaßnahmen durchgeführt wurden. Abbildung 10.12 zeigt weiterhin dass diese Fläche 1991 nochmals brandgerodet wurde. Durch mehr oder minder regelmäßige Feuer wird das Einwandern von für die Beweidung ungeeigneten, phryganischen Arten zugunsten von Grasvegetation unterdrückt. Ebenso von Interesse ist die Beobachtung der einsetzenden Sukzession nach einem Feuerereignis. Im niederschlagsreichen Luv der nördlichen Psiloritis-Abdachung weist die nach dem Brand nahezu vegetationslose Fläche schon zum nächsten Aufnahmezeitpunkt im Jahre 1981 eine flächendeckende Sekundärvegetation auf. Bezogen auf den Anteil photosynthetisch aktiver Vegetation ist der Unterschied zur letzten Aufnahme vor dem Brand sehr gering.



*Abbildung 10.13:*  
*Vegetationsanteile für die Schlucht von Zaros in den Satellitendaten von 1994 (oben links) und 1996 (oben rechts); betroffener Bestand an *Pinus brutia* im Herbst 1996 (rechts)*

Für das Gebiet in der Schlucht von Zaros ist im Laufe des Beobachtungszeitraumes eine Zunahme der mittleren Vegetationsbedeckung zu verzeichnen, die schließlich durch das Feuerereignis abrupt endet. Diese Tatsache deckt sich mit dem Konzept durch Feuer limitierten Biomassenzuwachses in mediterranen Räumen. Feuerereignisse stellen einen

wichtigen funktionalen Prozess mediterraner Ökosysteme dar und tragen wesentlich zur Strukturierung des Landschaftsgefüges bei. Es besteht eine negative Rückkopplung zwischen Beweidungsdruck und Feuerhäufigkeit insofern, dass bei Rückgang der Beweidung meist eine Zunahme der Phytomasse und damit auch der anfallenden Nekromasse einher geht. Dementsprechend erhöht sich die Brandgefährdung durch natürliche oder anthropogen induzierte Brandauslöser (Le Houérou 1981, Noy-Meir 1995, Strid et al. 1995).

*ASTEROUSIA.* Die automatische Ableitung von Flächen mit sprunghaften Veränderungen verlief für Asterousia ähnlich der Analyse für Psiloritis. Lediglich der Schwellwert zur Detektion solcher Ereignisse wurde aufgrund des im Durchschnitt niedrigeren Ausgangsniveaus der Vegetationsbedeckung gesenkt. Als Grenzwert wurde eine Differenz zwischen dem Zeitpunkt der maximalen Abweichung vom Trend und der vorherigen Vegetations-schätzung von 25 % festgesetzt. Anschließend erfolgte wiederum eine 5 x 5-Median-Filterung, um Störpixel zu eliminieren und einheitliche Flächen auszugliedern. Auch für Asterousia wurden auf diese Weise Rodungsflächen, durch Brand oder mechanische Rodung entstanden, extrahiert.

Feuerereignisse treten in Asterousia – sicherlich auch aufgrund der deutlich spärlicheren Vegetationsbedeckung – selten großflächig auf. Nur ein größerer Brandherd wurde über den gesamten Beobachtungszeitraum identifiziert; südlich von Pombia brannte an der Abdachung des Gebirgszuges zur Messara im Jahre 1988 eine Fläche von ungefähr 170 ha nieder (Anh. A, Karte A.9).

Einige Gebiete mit sprunghaften Veränderungen decken sich mit Flächen anthropogener Kulturturnahme innerhalb der letzten Jahrzehnte. Auch in Asterousia wird der Anbau von Ölbaumkulturen innerhalb von ursprünglich für den Pflanzenbau bedeutungslosen Gebieten scheinbar attraktiv. Als Beispiel können die großflächigen Olivenbaumanpflanzungen im Ortsbereich von Miamou angeführt werden. Bei Geländearbeiten im Jahre 1998 zeigte sich, dass dieser Prozess noch nicht abgeschlossen ist und in den peripheren Ortslagen weitere Rodungen mit schwerem Gerät und Pflanzungen bis jenseits der küstenparallel verlaufenden Wasserscheide durchgeführt werden (Abbildung 10.14).

Aus der Zeitreihenanalyse ging das Gebiet um Lendas als größte Neuanlage von Kulturflächen hervor. Im Jahre 1981 begann dort der Rodungsprozess mit der Anlage erster Gemüseplantagen und Olivenbaumpflanzungen. Seit 1988 erfolgte keine weitere Flächenumwandlung, allerdings entstehen in den letzten Jahren vermehrt Gewächshauskulturen. Die heute für den Anbau genutzten Flächen bei Lendas summieren sich nach Kartierung der Gebiete aus Satellitendaten auf rund 140 ha.





*Abbildung 10.14:  
Neuanlage von Kulturen mit  
*Olea europaea sylvestris* um  
Miamou (September 1998)*

### 10.3.2 Fernerkundliche Bestimmung der Biomasse

In verschiedenen Studien mit fernerkundlichem Schwerpunkt wurde geprüft, inwiefern ein Zusammenhang zwischen Biomasse und dem Kronendurchmesser baumartiger Vegetation abzuleiten ist (Hellden 1987, Larsson 1993). Bisherige satellitengestützte Ansätze versuchen eine Beziehung zwischen Klassifikationsergebnissen oder klassischen Vegetationsindizes, wie beispielsweise dem NDVI, und der Vegetationsbedeckung einzelner Arten herzustellen. Auf daraus erwachsende Einschränkungen wurde in Kapitel 8 bereits hingewiesen. Darüber hinaus treten vielfältige Probleme bei artenbezogener Betrachtung heterogener Pflanzenbestände auf. Dies gilt umso mehr für die phryganischen Bestände Asterousias, die auf Entfernungen weniger 100 Meter eine extreme Variabilität in Bestandsdichte und Artenzusammensetzung aufweisen können.

Tsiourlis und Kasapidis (1997, 1999) und Tsiourlis et al. (1999) haben auf der Basis biometrisch ausgewerteter Geländeerhebungen Zusammenhänge zwischen der Biomasse phryganischer Pflanzenbestände und der Vegetationsbedeckung abgeleitet. Somit lagen für das Ende des im Rahmen der vorliegenden Arbeit betrachteten Zeitraumes bodengestützte Erhebungen der Biomasse sowie Kartierungen der Vegetationsbedeckung entlang ausgewählter Transekte des Asterousiagebirges vor (vgl. Kap. 10.1.1). Die Ableitung eines statistischen Zusammenhangs zwischen fernerkundlich erfassbaren Oberflächeneigenschaften eines Objektes und ökologisch sinnvollen Kenngrößen einer Landschaft stellt somit die Verbindung zur räumlich expliziten Modellierung ansonsten nur punktuell vorliegender Einzelmessungen dar. Diese Tatsache erlaubt, eine flächendeckende Kartierung der Biomasse aus den fernerkundlich erhobenen Vegetationskartierungen exemplarisch für das Jahr 1996 abzuleiten.

Nach den vorliegenden Untersuchungsergebnissen findet sich je nach Artenzusammensetzung eines Bestandes ein mehr oder minder deutlicher statistischer Zusammenhang linearer Natur zwischen diesen beiden Kenngrößen (Abbildung 10.15). Unter der plausiblen Annahme einer

direkten Korrelation zwischen der aus den Satellitendaten abgeleiteten Kartierung der photosynthetisch aktiven Biomasse und der im Labor bestimmten oberirdischen Biomasse für Vegetationsproben aus phryganischen Pflanzenbeständen kann auf die oberirdische Biomasse eines ganzen Bestandes rückgeschlossen werden<sup>34</sup>. Die Darstellung in Anhang A, Karte A.10 kann somit als räumlich explizite Ableitung der oberirdischen Biomasse phryganischer Pflanzengesellschaften in Asterousia verstanden werden.

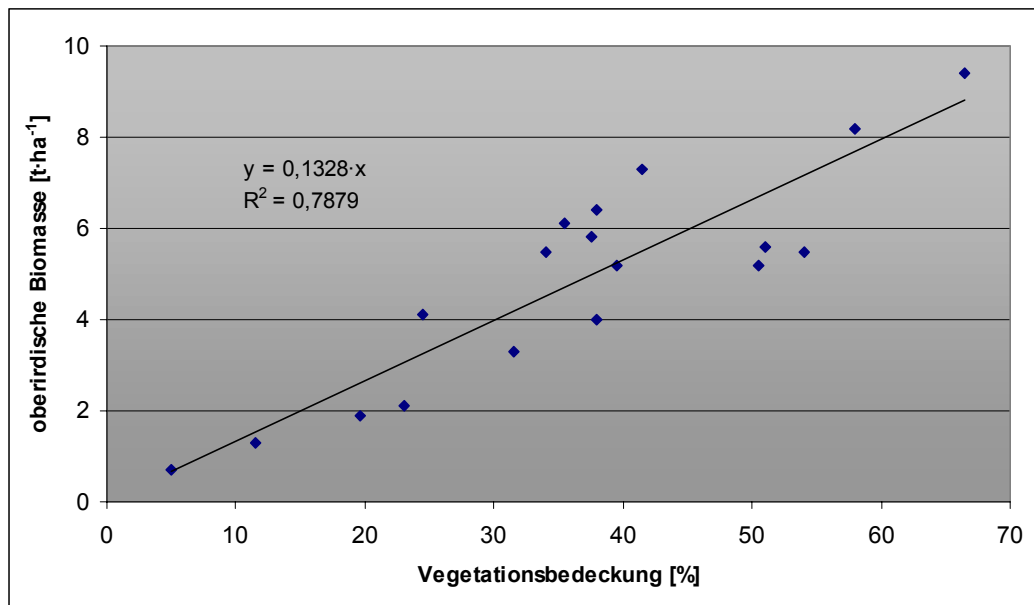


Abbildung 10.15: Zusammenhang zwischen Vegetationsbedeckung und Biomasse in Asterousia (aus Tsiourlis und Kasapidis 1999)

### 10.3.3 Ableitung einer Bodenzustandskarte

Während in Asterousia eine spektrale Trennung von Böden und Gesteinsuntergrund nicht möglich ist (vgl. Kap. 8), lassen sich auf den Kalkflächen des Psiloritis die gelblichen bis roten Luvisols oder auch der Anteil der Bodenmatrix an rendzic Leptosols spektral vom geologischen Hintergrundmaterial unterscheiden. Aufbauend auf das Konzept progressiver bzw. regressiver Bodenentwicklung nach Birkeland (1990) werden Böden mit zunehmender Ausbildung ihrer Horizonte solchen mit sich zurückentwickelnder pedogenetischer Differenzierung aufgrund von Bodenerosion gegenübergestellt.

<sup>34</sup> Zur Bestimmung der Trockenmasse wurden nach der in Kapitel 10.1.1 beschriebenen Methode alle Pflanzen entlang von Transekten abgeerntet. Es wurden ober- wie unterirdischer Anteile, grüne Blattmasse, Holzanteil sowie die Gesamtbio-masse untersucht. Die Bestimmung der Trockenmasse erfolgte nach Behandlung der Proben im Trockenschrank. Die dargestellte Regression beruht auf der gesamten oberirdischen Trockenmasse, welche die beste Korrelation zur Vegetationsbedeckung aus Geländeerhebungen ergab.

Da in den Residualspektren der Mischungsanalyse häufig ein nur schwerlich zu quantifizierender Teil an Trockenvegetation identifiziert werden konnte, bot die Kalkfraktion mit einer im Vergleich zu Böden geringeren Korrelation zur Nekromasse ein geeignetes, komplementäres Maß zur Abschätzung des Bodenanteils. Da die Entwicklung des Bodens in einem umgekehrt proportionalen Verhältnis zum sichtbaren Kalkanteil der Mischsignaturen steht, wurde dieser als indirektes Maß zur Kartierung des Bodenmaterials herangezogen.

Als geeignete Größe zur Quantifizierung wurde ein Maximum Value Composite<sup>35</sup> gewählt, um trotz der hohen Sensitivität des Mischungsmodells mit vier Endmitgliedern auf Kalk eine verlässliche Aussage hinsichtlich der Vergleichbarkeit aller betrachteten Gebiete treffen zu können (Hill et al. 2000). Auf diese Weise ließen sich über den Beobachtungszeitraum auftretende Schwankungen des spektral erfassbaren Kalkanteils in Abhängigkeit von der jahresabhängigen Variabilität der Vegetation wirkungsvoll unterdrücken. Allerdings musste aufgrund der gewählten Methodik auf eine Betrachtung der Bodenentwicklung und die Einbeziehung der wegen ihrer geringeren spektralen Varianz mit einem 3-Endmitgliedmodell analysierten MSS-Daten verzichtet werden.

Dementsprechend liefert ein Maximum Value Composite auch kein direktes Maß der Degradation, sondern bezeichnet vielmehr den Zustand einer Oberfläche, von pedogenetisch nicht entwickelten oder erodierten, bis hin zu deutlich ausgeprägten bzw. nicht erodierten Böden. Zu diesem Zweck wurden die Entmischungsergebnisse in fünf Bodenklassen eingeteilt, die die anthropogen induzierte als auch die natürliche Degradationsanfälligkeit und damit einhergehende Bodenentwicklungsstadien repräsentieren (Anh. A, Karte A.11).

Die Pflanzendecke stabilisiert vor allem in Steillagen den Boden und stellt für das Substrat eine effektive Schutzschicht dar. Wird dieser Schutz zerstört oder reduziert, zieht dies häufig auch die Zerstörung des Bodens nach sich; Gründe hierfür können die beschleunigte Bodenerosion, die Störung des bodenchemischen Gleichgewichts oder geringere bodenbiologische Aktivität sein (Kuntze et al. 1994). Überhöhter Weidedruck ist somit eine potentielle Ursache für denudative, aber vor allem auch durch ungehinderten Oberflächenabfluss induzierte Bodenerosion. Eine Beurteilung der Bodenerosionsgefährdung ist daher implizit immer als eine gekoppelte Betrachtung der Vegetationsentwicklung und des Bodenzustands zu verstehen. Es wird auch ersichtlich, dass beispielsweise für die nahezu komplett vegetationsbedeckten und zudem flachen Gebiete zwischen Psiloritis und Kouloukonas eine Degradationskartierung weitgehend obsolet ist.

---

<sup>35</sup> Als „Maximum Value Composite“ wird in diesem Fall die pixelbezogene Darstellung des innerhalb der Zeitreihe höchsten Anteils für Boden bezeichnet.



*Abbildung 10.16:  
Tief wurzelnder Sarcopoterium spinosum auf Luvisol  
(Psiloritis)*

Anders ist die Situation für die Regionen des zentralen Gebirgsraumes einzuschätzen, deren Vegetationsbedeckung von nahezu vegetationsfreien Flächen im Hochgebirge bis hin zu fast vollständig vegetationsbedeckten Waldflächen wie in Rouvas reichen. Wichtig ist in diesem Kontext das Konzept der Schutzstellendynamik, wie beispielsweise von Fowler (1988) oder Urbanska (1992) beschrieben. Im Psiloritis lässt sich häufig ein kleinräumiges Muster vegetations- und bodenfreier Flächen mit baum- oder strauchartiger Vegetation auf teilweise tiefgründig entwickelten Böden feststellen. Pflanzenindividuen schaffen sich gleichsam eine ökologische Nische und leben an einem von ihnen geprägten Standort, mit individuellen Bodeneigenschaften und eigenem Mikroklima. Häufig findet die Bodenentwicklung in tiefreichenden Spalten und Klüften des karstigen Untergrundes statt, so dass potentielle Standorte für eine Reihe von Chasmophyten entstehen (Jahn und Schönfelder 1995). Im Profil handelt es sich meist um Luvisol-gefüllte Bodentaschen mit tiefer Durchwurzelung (Abbildung 10.16), so dass bei der fernerkundungsgestützten Analyse derart strukturierter Gebiete einige Randbedingungen berücksichtigt werden müssen.

Die eingangs schon erwähnten Einschränkungen einer Bodenzustandskarte gegenüber einer Karte des Degradationspotentials sind bei der Interpretation der räumlichen Strukturen zu beachten. Unter relativ dichter Vegetationsdecke können Böden nur in ihrem ökologischen Kontext sinnvoll interpretiert werden. Insbesondere zwischen flächig ausgebildeten Böden in der Ebene und mosaikartig eingeschalteten Bodenvorkommen im Hoch- und Mittelgebirge ist zu unterscheiden. Daraus resultiert, dass lokal tief entwickelte Bodenprofile im spektral abgeleiteten Oberflächenanteil des Bodens nur ungenügend repräsentiert werden und somit in einigen Gebieten zu einer systematischen Unterschätzung des realen Bodenanteils führen.

Einen gegenteiligen Effekt verursacht hingegen Kalkgestein mit ausgeprägtem Bodenüberzug, was einen erhöhten Bodenanteil im Spektralsignal simuliert.

Demgegenüber stehen die Vorteile einer auf anderem Wege nur schwerlich ableitbaren flächendeckenden Bodenkartierung, die bei sachgemäßer Interpretation eine gute Übersicht der räumlichen Verteilung bodenabhängiger Ressourcen vermittelt. So finden sich im Kern der Matorralbestände des zentralen Psiloritis Gebiete mit auffallend hohen Bodenanteilen. Obwohl die stellenweise dichte Vegetationsbedeckung sicherlich eine gewisse Maskierung der Untergrundeigenschaften nach sich zieht und eine quantitative Interpretation der Ergebnisse erschwert, decken sich die Kartierungen mit punktuellen Geländeerhebungen in diesem Bereich. In flachen Lagen kann sich eine Luvisoldecke ausbilden, die zwar nicht mit den tiefgründigen Böden der Talbereiche zu vergleichen ist, aber dennoch in Anbetracht eines Höhengniveaus von 1.200 bis 1.500 m ü.NN als gut entwickelt bezeichnet werden kann. Vergleichbare Verhältnisse spiegeln auch die Wälder von Rouvas und Krousounas wider; letzterer allerdings nur im zentralen Bestand.

Eine geschlossene Bodendecke findet sich auch in der Nida-Ebene. Trotz der saisonal starken Beweidung haben sich in der auf über 1.500 m ü.NN gelegenen Polje fast flächendeckend Luvisole entwickelt. Der Grund dafür liegt im heute permanent wasserfreien Poljenboden, der die lokale Erosionsbasis für die umgebenden Höhenzüge darstellt und das Sammelbecken für denudativ aber vor allem auch durch Oberflächenabfluss angeschwemmtes Sediment des zentralen Psiloritis ist.

Erwartungsgemäß sind die meisten Böden der Weidegebiete in Höhenlagen über 700 m ü.NN, abgesehen von den bisher genannten Flächen, nur schwach entwickelt. Grundsätzlich hängt diese Tatsache mit den Steillagen zusammen, die eine geschlossene bzw. im Profil ausgebildete Bodendecke nur über lange Zeiträume entstehen lassen. In Kombination mit dem in Kapitel 4 dargestellten Niederschlagsregime und lang anhaltenden Frostperioden in den höher gelegenen Gebieten sind so nur mäßige bis ungünstige Voraussetzungen zur Bodenentwicklung gegeben. Eine Störung der langwierigen pedogenetischen Prozesse, beispielsweise durch verstärkte Beweidung, kann aufgrund der hohen Erodibilität der Böden zu massiver und möglicherweise irreversibler Bodenzerstörung führen.

Eine meist nur spärlich ausgeprägte Vegetationsdecke und geringe Bodenanteile kennzeichnen die bis in die alti-mediterranen Regionen reichenden Höhenzüge. So dominieren auf den Bergrücken des Psiloritis Dornpolsterfluren oder häufig nahezu unbedeckte Felslandschaften (Abbildung 10.17). Damit korrespondieren in der Bodenzustandskarte die Flächen niedrigster Bodenbedeckung. Degradationsprozesse können diese Oberflächenausprägung verstärken, wie Vergleiche mit den um rund 1.000 m niedriger gelegenen Gebirgsrücken des Kouloukonas entlang der Nordküste Zentralkretas belegen. Dort treten ausgedehnte vegetations- und bodenfreie Flächen auch in der supra-mediterranen Stufe auf.



*Abbildung 10.17: Nahezu vegetationslose Hochgebirgslagen am Psiloritis (links) und am Kouloukonas (rechts)*

# 11 Naturräumliche Einflussgrößen und Vegetationsentwicklung

In der bisherigen Betrachtung waren alle Analysen zur Vegetationsentwicklung auf die Ableitung und Interpretation fernerkundungsbasierter Daten beschränkt. Letztlich stellen jedoch alle betrachteten Größen das Ergebnis unterschiedlich komplexer Vorgänge dar, die nur im lokalen, regionalen oder überregionalen Gefüge ineinandergreifender Prozesse oder Prozessketten zu fassen sind. Im Folgenden soll mit Blick auf die Vegetation eine Reihe potentiell wichtiger Determinanten näher betrachtet werden.

Es stellt sich beispielsweise die Frage, welche der naturräumlichen Rahmenbedingungen entscheidend für mögliche Degradationsszenarien innerhalb verschiedener Pflanzengesellschaften sind. Für einige Parameter ist dieser Zusammenhang offensichtlich, wie zwischen Höhenlage und Vegetationsbedeckung, für andere sind die Auswirkungen von Wechselbeziehungen vielfältig interpretierbar (z.B. der Einfluss von Lithotopen auf die Vegetation).

Als wichtige Einflussgrößen auf die Entwicklung des Naturraumes können prinzipiell alle in Kapitel 4 dargestellten Elemente angeführt werden. So erklärt das Relief, im Zusammenhang mit der klimatischen Einordnung der Gesamtregion, einen Großteil der lokalklimatischen Gegebenheiten. Weiterhin spielt die Geologie eine ausschlaggebende Rolle bei der Bodenbildung und für die Wasserversorgung. Anhand der geologischen Kartierung Zentralkretas und den aus digitalen Höhendaten ableitbaren Geländeparametern können daher einige der Geofaktoren für das Untersuchungsgebiet näher untersucht werden.

Derivate aus digitalen Höhenmodellen bilden eine wesentliche Komponente zur Beschreibung der naturräumlichen Rahmenbedingungen für eine Reihe ökologischer Fragestellungen. Dies gilt umso mehr, als auf Kreta das Relief in den zentralen Gebirgsräumen deutlich ausgeprägt ist und die anthropogenen Nutzungsmöglichkeiten maßgeblich mitbestimmt. Dabei sind die verschiedenen Reliefelemente eng mit den geologischen Gegebenheiten der Region verknüpft, so dass bei der Untersuchung von Abhängigkeiten zwischen Vegetation und Topographie immer berücksichtigt werden muss, inwiefern abgeleitete Korrelationen indirekter Art sind. Im Einzelfall mag eine deutliche Trennung der Effekte allerdings nur schwer möglich sein. Die Darstellung in den Kapiteln 11.1 bis 11.4 beschränkt sich daher auf die Beschreibung der auftretenden Phänomene, während in Kapitel 11.5 der Versuch einer Synthese erfolgt, die sich gegenseitig beeinflussende Einzelfaktoren sinnvoll integrieren soll.

Zur Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Vegetationsbedeckung und -entwicklung wurden die jeweiligen Ergebnisse der Satellitenbilddauswertung mit den entsprechenden naturräumlichen Faktoren in einem GIS durch rasterbasierte Matrixverschneidung verknüpft. Als Ergebnis lagen jeweils die pixelweise kombinierten Attribute der Eingangsdatensätze zur räumlich expliziten Interpretation innerhalb eines gemeinsamen Datensatzes vor.

Zur Vergleichbarkeit der jeweiligen Verschneidungsergebnisse wurden die Datensätze über die Anteile der unabhängigen Variablen am Gesamtdatensatz normalisiert, so dass etwa verschieden große Expositionsanteile keinen Einfluss auf die Interpretation expositionsabhängiger Vegetationsparameter nach sich zogen.

## 11.1 Geologie

Der geologische Untergrund ist mitbestimmend für die Eigenschaften des Bodens und damit für einen der entscheidenden Faktoren der Vegetationsentwicklung. Darüber hinaus existiert ein enger Zusammenhang zwischen Geologie, Relief und Hydrologie (vgl. Kap. 4). Das Ausgangssubstrat ist ein wichtiger Faktor für die Wasserversorgung und damit auch für die bodenbiologische Aktivität und davon abhängige Mineralisierungsprozesse. Weiterhin bestimmt der geologische Untergrund das Potential an Tonmineralen und ist entscheidend für das Säuremilieu des Bodens. Der Einfluss des geologischen Substrats auf die naturräumliche Ausstattung einer Region ist somit vielfältig und weitreichend. Variationen im Gesteinsuntergrund finden häufig ihren Ausdruck in den damit assoziierten Böden und der davon abhängigen Vegetationsentwicklung.

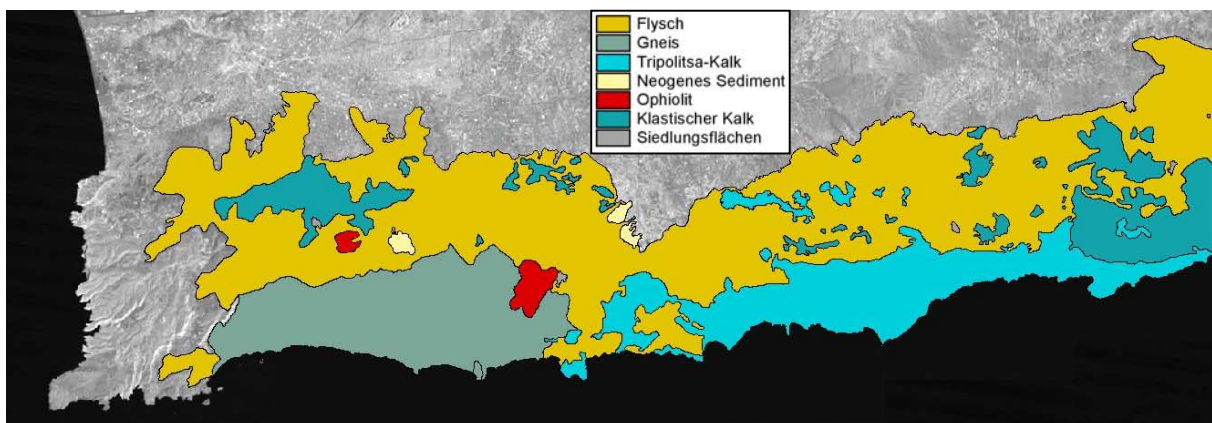


Abbildung 11.1: Geologische Struktur Asterousias aus geologischer Karte und Satellitenbildkartierung (nach Sommer 1999)

Da das Gebirgsmassiv des Psiloritis nahezu ausschließlich aus Kalken aufgebaut ist, wurde auf eine Stratifizierung anhand der Geologie verzichtet. In Asterousia hingegen kommen innerhalb des Untersuchungsgebietes fünf wesentliche Einheiten vor: Flysch, Karbonat, klastisches Karbonat, Gneis und Ophiolit (Abbildung 11.1). Die Vorkommen an Ophiolit treten allerdings nur lokal begrenzt auf, so dass die flächenbezogene Auswertung mit Vorbehalt betrachtet werden muss. Aufgrund der deutlichen Unterschiede in der Artenzusammensetzung auf diesen Flächen – wie beispielsweise bei Miamou – wurden sie dennoch in die Betrachtung einbezogen (vgl. Kap. 10.1.1)



Die absolute Verteilung der Vegetation in verschiedenen, geologischen Strata verdeutlicht zunächst keinen Zusammenhang zwischen Petrographie und Vegetationsbedeckung oder -entwicklung. Die Anteile der jeweiligen geologischen Einheiten Asterousias am Gesamtkomplex des Gebirgsstocks sind zu verschieden, um eine sinnvolle Interpretation zuzulassen. Analog zur Vorgehensweise bei der Betrachtung der Höhenmodellderivate wird erst durch die Normalisierung eine sinnvolle Aussage über Zusammenhänge möglich.

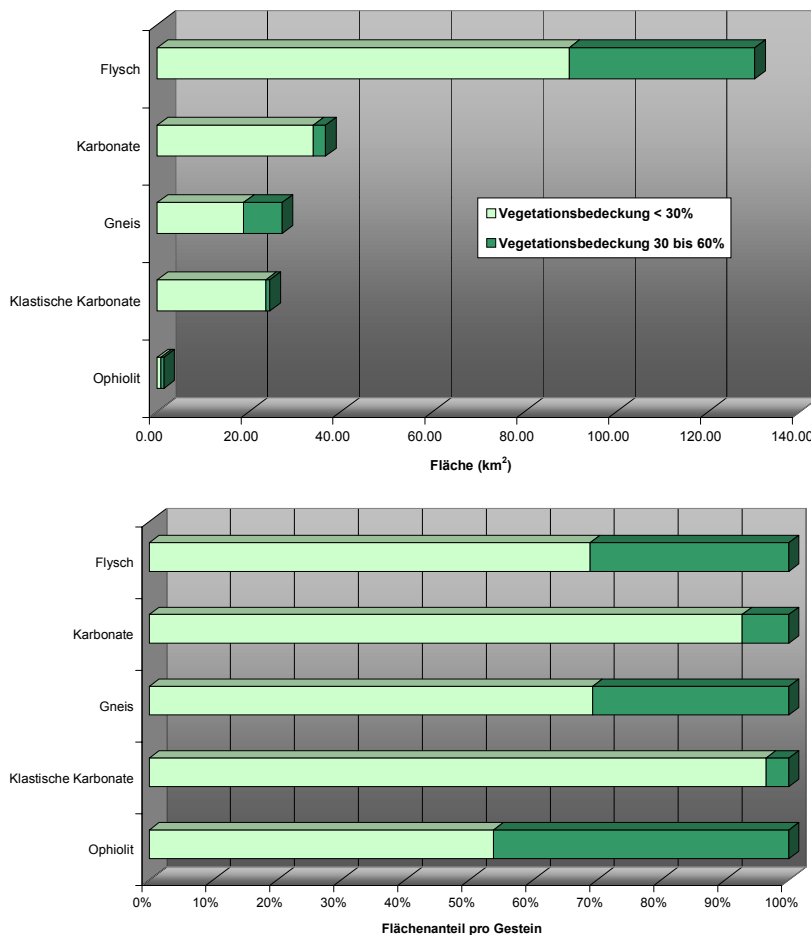


Abbildung 11.2:  
Absolute (oben) und relative (unten) Verteilung von Flächen verschiedener Vegetationsbedeckung in Abhängigkeit von verschiedenen geologischen Substraten in Asterousia

Im Mittel weisen die Kalke und Kalkbrekzien die geringste Vegetationsbedeckung auf (Abbildung 11.2 unten). Primäre Ursache ist die Wasserversorgung auf diesen edaphisch trockenen Flächen; insbesondere die Verkarstung karbonathaltiger Gesteine mindert den Wasseranschub und bedingt erhöhte Versickerungsraten. Kombiniert mit den teilweise steilen Hanglagen entlang des Südabfalls Asterousias zum Libyschen Meer und der ungünstigen Südexposition wird dieser Effekt noch verstärkt. Die flächenbezogene Auswertung wird zudem durch die Einbeziehung freigelegter Kalkrippen entlang der Nordhänge Asterousias beeinflusst. Die Wände der steilgestellten und teilweise überkippten Falten der durch die Flyschdecke ragenden Kalke sind über weite Bereiche nahezu vegetationsfrei (Abbildung 11.3 oben).

Auch bei der Geländeaufnahme zeigen vor allem die Kalkflächen des zentralen Asterousia eine Tendenz zu geringerer Vegetationsbedeckung bei gleichzeitig höherer Anzahl der Arten (Abbildung 11.3 unten). Die abwechslungsreiche Flora mit meist geringer Individuenzahl kann als Beleg für die ausreichende Basenversorgung angesehen werden, während Wasser ein Minimumfaktor auf den südexponierten Kalken darstellt. Auch die über weite Strecken äußerst kargen Steillagen der östlichen Küstenregion auf klastischen Kalken weisen sehr ähnliche Bedingungen wie die Tripolitsakalke am Südabhang des Kofinas auf.

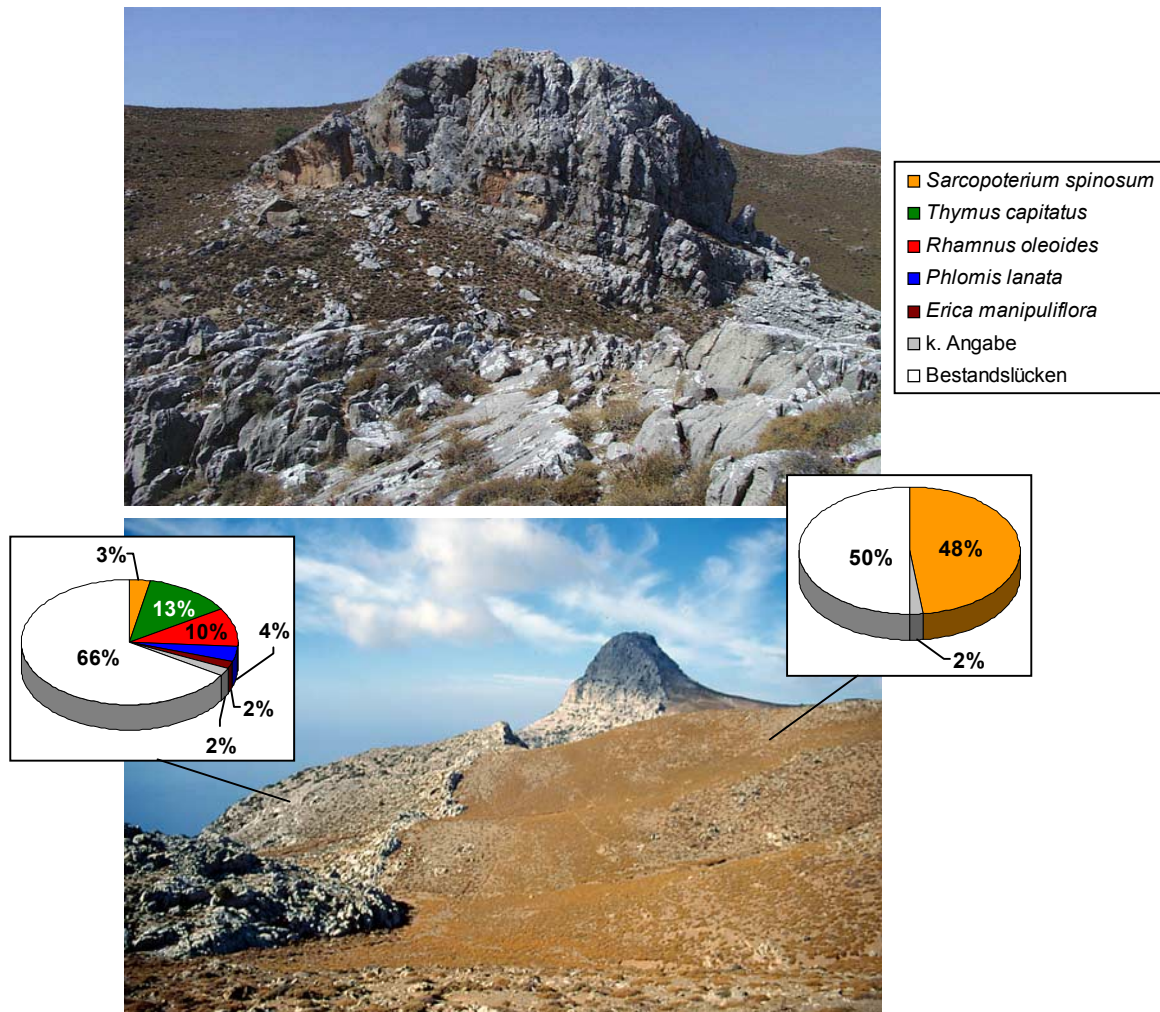


Abbildung 11.3: Kalkrippen im Flysch am Nordhang der zentralen Asterousiaberge (oben); Grenze zwischen Flysch- und Kalkstratum am Gipfel des Kofinas (unten) mit Angaben zur Artenverteilung (nach Tsiourlis und Kasapidis 1997)

Größere Anteile von Flächen mittlerer Vegetationsbedeckung existieren auf Flysch und Gneis, die zusammen über 70 % des Gebirgszuges ausmachen. Die Vergleichbarkeit der Vegetationsausprägung auf beiden Gesteinstypen lässt sich anhand ihrer genetischen Verwandtschaft erklären, da große Teile des Flysch mehr oder minder deutliche Metamorphite aus Gneis darstellen. Der Übergang zwischen Flysch und Gneis ist deshalb häufig nur unscharf

auszumachen. Auch der in diesen Gebieten oft vorherrschende Paragneis ist zum überwiegenden Teil aus Sandsteinen und Tonschiefer aufgebaut.

Die auf Gneis und Flysch anzutreffenden Bodentypen unterscheiden sich daher wenig und sind Grundlage für ähnliche Phryganagesellschaften. Eine chemische Verwitterung des Gesteins findet nur in geringem Maße statt (vgl. Kap. 8), so dass die vorherrschende physikalische Umwandlung zu einem grusigen Endprodukt führt, welches eine ungünstige Wasserversorgung bedingt und eine ärmere Basenversorgung als die vorgenannten Kalke aufweist. Dementsprechend finden sich zwar häufig höhere Vegetationsanteile, gegenüber den Standorten auf Karbonaten ist die Anzahl der Arten jedoch meist deutlich reduziert. Dies führt so weit, dass etwa auf den Flyschhängen südlich von Sternes über mehrere Quadratkilometer fast ausschließlich *Sarcopoterium spinosum* auftritt (Abbildung 11.4).

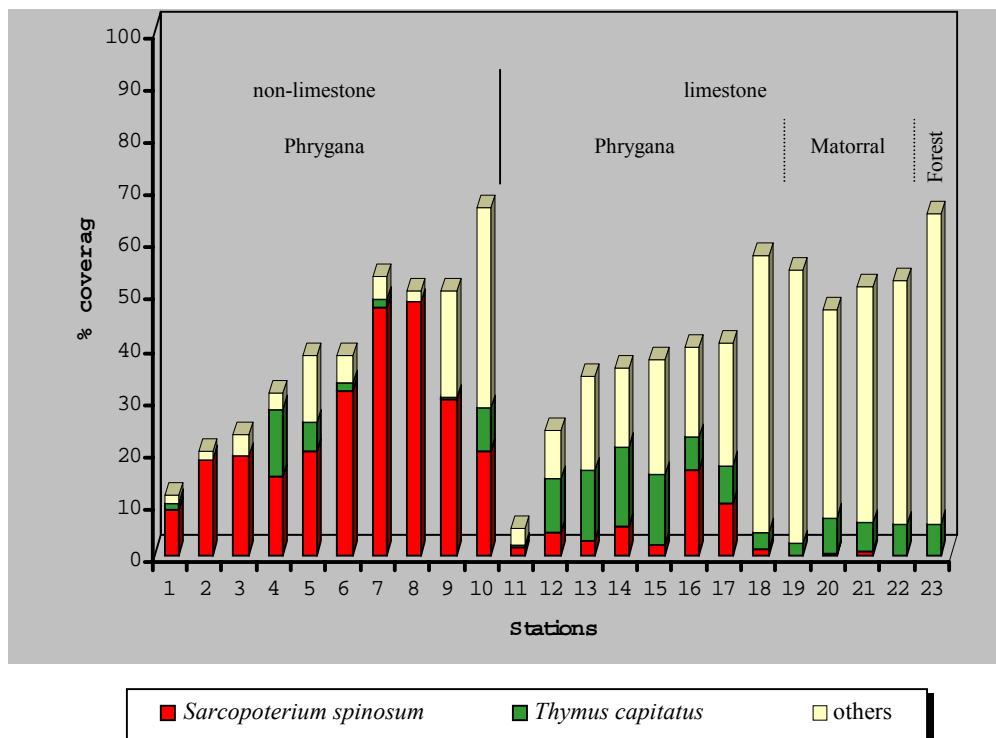
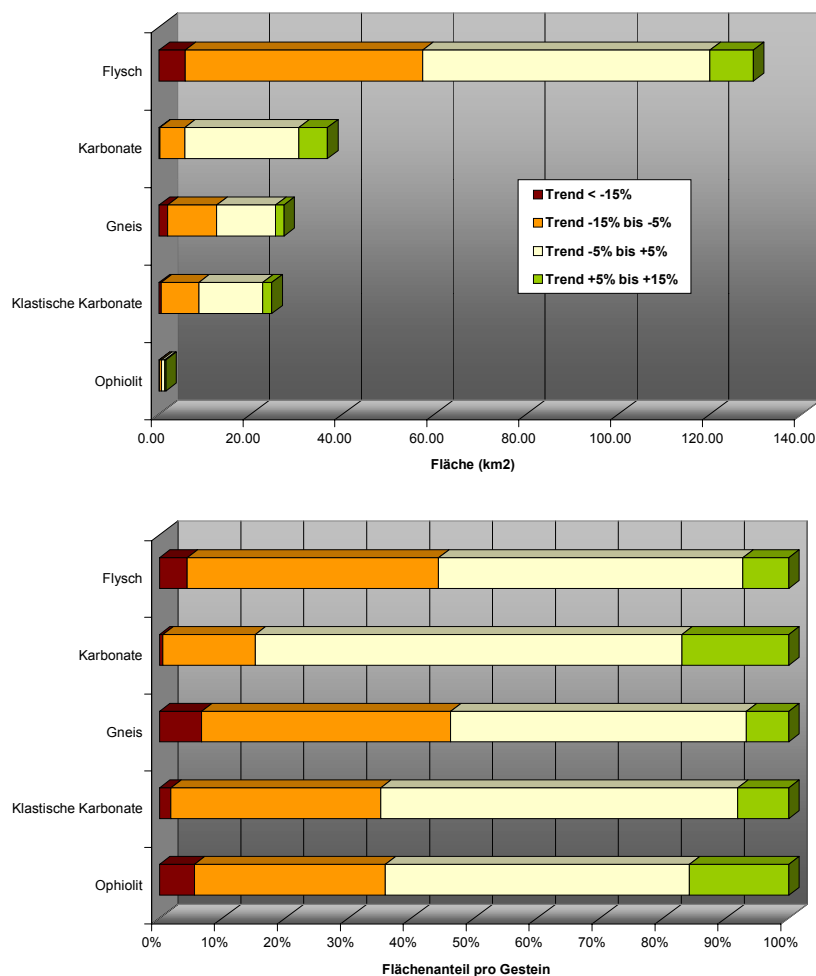


Abbildung 11.4: Vegetationsbedeckung mit holzigen Arten auf Kalk im Vergleich zu anderen geologischen Substraten in Asterousia (aus Tsiourlis und Kasapidis 1997)

Die Ophiolite bieten gegenüber den bisher betrachteten Ausgangsmaterialien bessere Ausgangsbedingungen für die Vegetation. Fast die Hälfte der auf Ophiolit vorkommenden Standorte fällt in die Klasse mittlerer Vegetationsbedeckung. Speziell die höhere Wasserhaltekapazität der feinkörnigeren Regosols auf Ophiolit dürfte vorteilhaft für die Vegetationsentwicklung sein. Im Vergleich zu den umgebenden Flysch- und Gneiseinheiten findet somit auch eine stärkere Verwitterung des geologischen Substrats statt. Während eine geringe Basenversorgung auf ultra-mafischem Untergrund vorliegt, sind aufgrund der aus dem Ophiolit freigesetzten Tonminerale eine angemessene Austauschkapazität und Mineralversorgung gewähr-

leistet. So wird nicht nur die relativ hohe Vegetationsdichte auf den Ophiolitdomen um Mia-mou erklärbar, sondern auch warum diese sich artenreicher als ihre Umgebung präsentieren.

Bei Betrachtung der Vegetationsbedeckung fällt auf, dass sich zunehmende und abnehmende Tendenzen auf den Karbonaten Asterousias im Laufe der letzten 20 Jahre nahezu die Waage halten (Abbildung 11.5 unten). Der überwiegende Teil der karbonatischen Flächen bleibt fast unverändert. Eine Degradation hin zu unbedeckten Böden scheint auch in den deutlich degradierten Regionen entlang der Südküste Asterousias nicht vorzukommen, so dass von einer Stabilisierung der Vegetationsbedeckung auf sehr niedrigem Niveau ausgegangen werden kann. Die unterschiedliche Entwicklung auf Karbonaten gegenüber klastischen Karbonaten ließ sich anhand der vorliegenden Daten nicht klären und muss daher zunächst offen bleiben.



*Abbildung 11.5: Absolute (oben) und relative (unten) Verteilung von Flächen verschiedener zeitlicher Dynamik auf verschiedenen geologischen Substraten in Asterousia*

Auf Flysch und Gneis scheint sich die Vegetationsbedeckung vergleichbar zu entwickeln. Gleichbleibende und abnehmende Anteile sind in derselben Weise vertreten, während Flächen dichter Vegetation gegenüber Ende der 70er Jahre nur selten vorkommen. Wie bei der Betrachtung der mittleren Vegetationsbedeckung zeigt sich die genetische Verwandtschaft der beiden Gesteinskomplexe, welche eine nahezu identische Entwicklung nach sich zieht. Es bleibt allerdings fraglich, inwiefern der gegenüber anderen Substraten erhöhte Anteil abneh-

mender Tendenz substratspezifisch oder in der historischen Nutzung dieser Gebiete als Weideflächen zu sehen ist.

Auf Ophiolit zeigen etwas mehr als die Hälfte der Flächen eine deutliche Veränderung gegenüber ihrer Vegetationsbedeckung vor 20 Jahren. Dabei treten abnehmende gegenüber zunehmende Tendenzen ungefähr doppelt so häufig auf. In Anbetracht der im Mittel etwas höheren durchschnittlichen Vegetationsdichte und einer höheren Artenzahl sind diese Flächen, bezogen auf das Degradationspotential, dennoch als am wenigsten gefährdet einzustufen.

## 11.2 Exposition

Der Einfluss der Exposition auf die Vegetation kann vielfältiger Natur sein. Direkt oder indirekt ist die Hangausrichtung einer der dominierenden Faktoren für das Geländeklima. Primärer Natur ist der Einfluss auf den Strahlungsfluss für ein Oberflächenelement im Tages- und Monatsgang. Somit liegt eine wesentliche Bedeutung in der Steuerung strahlungsabhängiger Kenngrößen, wie etwa der Evapotranspiration der Vegetation, der Verdunstungsrate des Bodens, der Aktivität von Bodenmikroorganismen und der Mineralisationsprozesse. Darüber hinaus bestimmt die Exposition maßgeblich eine Reihe klimatologischer Rahmenbedingungen jenseits der Einstrahlung. Luv- und Leelagen bedingen beispielsweise ein spezifisches Temperatur-, Niederschlags- und Windregime, das insbesondere in Gebirgsregionen den Naturraum im allgemeinen und die Vegetation im besonderen beeinflusst.

Zur Matrixverschneidung von Vegetationsparametern und Exposition wurde eine Einteilung in vier Expositionsklassen gewählt (Nord: 315° bis 45°, Ost: 45° bis 135°, Süd: 135° bis 225°, West: 225° bis 315°). Diese Einteilung repräsentiert auch recht gut die Ausrichtung der beiden Gebirgszüge: Asterousia bildet als küstenparalleles Gebirge eindeutig eine meridionale Barriere, während der nahezu elliptische Gebirgsblock des Psiloritis sich mit der größeren Halbachse annähernd in West-Ost-Richtung erstreckt.

**PSILORITIS.** Die Exposition spielt für die mittlere Vegetationsbedeckung im Psiloritisgebirge in mehrfacher Hinsicht eine wichtige Rolle. Insbesondere Luv-Lee-Effekte bedingen eine klimatische Differenzierung entlang eines von Nordwest nach Südost verlaufenden Gradienten, der seinen Ausdruck unter anderem in der Exposition findet. Dementsprechend findet sich auf nord- oder westexponierten Hängen häufiger eine hohe Vegetationsbedeckung, während das Auftreten mittlerer Bedeckungen expositionsunabhängig ist. Der expositionsabhängige Strahlungsgewinn stellt auf Kreta keinen Minimumfaktor dar, so dass die mit Nordlagen verbundene geringere Einstrahlung keine niedrigere Vegetationsbedeckung nach sich zieht. Vielmehr spielt der erhöhte Wasserstress bei Sommertrockenheit in Verbindung mit höherem Strahlungsgewinn pro Flächeneinheit auf südexponierten Hängen eine wichtigere Rolle (Abbildung 11.6 oben). Hinzu kommt die bessere Wasserversorgung auf Nordhängen

bis in den Sommer aufgrund des langsamer abschmelzenden Schneevorrats in den Höhenlagen des Psiloritis.

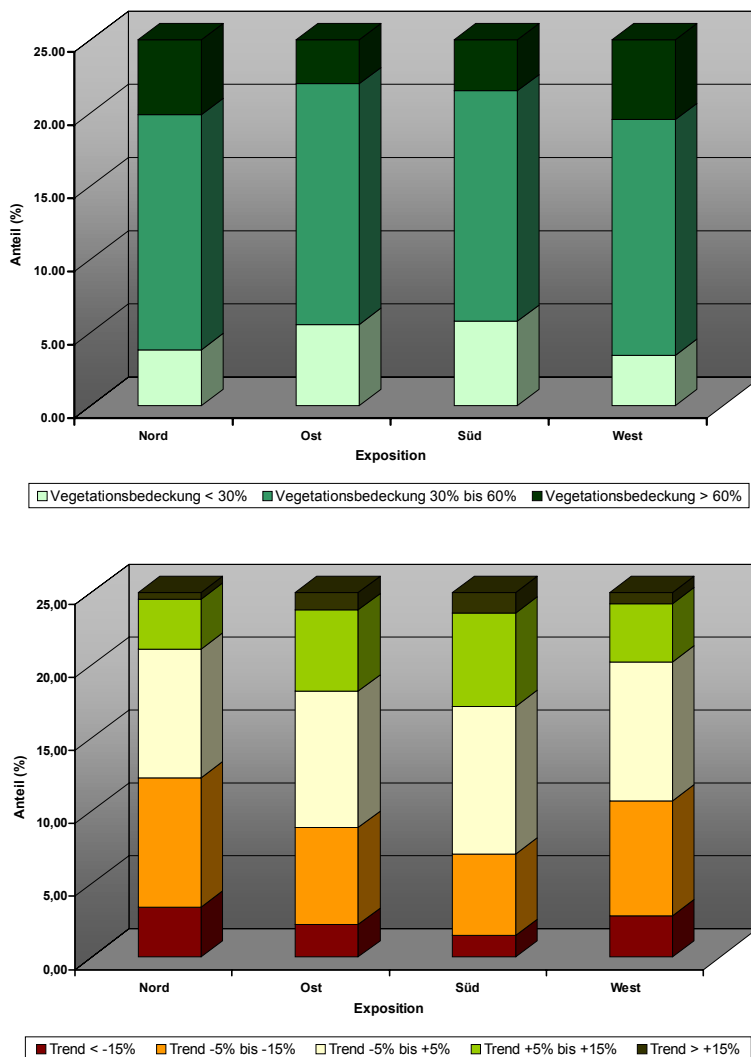


Abbildung 11.6: Abhängigkeit der mittleren Vegetationsbedeckung (oben) und der zeitlichen Dynamik der Vegetation (unten) von der Exposition im Psiloritis

Von insgesamt 39 % Flächenanteil mit abnehmender Vegetationsbedeckung entfallen nahezu drei Fünftel auf nord- oder westexponierte Hänge; bei Betrachtung der besonders stark betroffenen Gebiete mit einer Abnahme von über 15 % in der Vegetationsbedeckung verschieben sich die Verhältnisse sogar in Richtung zwei Drittel für die genannten Expositionen. Verursacht werden diese Verhältnisse vor allem durch die Lage der zentralen Matorralflächen des Psiloritis entlang der Nordabdachung und entlang der nordwestlichen Hänge, welche eine überwiegend abnehmende Vegetationsbedeckung seit Ende der 70er Jahre aufweisen (Abbildung 11.6 unten).

**ASTEROUSIA.** Alle bestandsbezogenen Prozesse spielen sich in Asterousia auf einem deutlich niedrigeren Niveau der Vegetationsbedeckung ab, die im Mittel um ungefähr 30 % niedriger

als im Psiloritis liegt. Die expositionsabhängige Verteilung der mittleren Vegetationsbedeckung tritt hier stärker hervor als im Psiloritisgebirge: Süd- und ostexponierte Hänge zeigen eine eindeutige Neigung zu geringerer Bedeckung. Trotz des generell hohen Flächenanteils mit einer Vegetationsbedeckung unter 30 % tritt die nochmals stärkere Ausprägung dieses Sachverhalts auf den Südhängen Asterousias deutlich hervor (Abbildung 11.7 oben).

In diesem Zusammenhang spielt die Ost-West-Ausdehnung des Gebirgszuges eine entscheidende Rolle. Als Barriere für die speziell während des Sommers Nord-Süd-gerichteten Luftströmungen der Etesien verstärkt sich beim Passieren der Gipfelzone Asterousias deren pasatartig trockener Charakter. Die trockenadiabatische Erwärmung der Luftmassen beim Abstieg zum Libyschen Meer entzieht der Landoberfläche nochmals Feuchte, so dass vor allem entlang der tiefergelegenen Südhänge des Gebirges das Entwicklungspotential der Vegetation deutlich eingeschränkt ist.

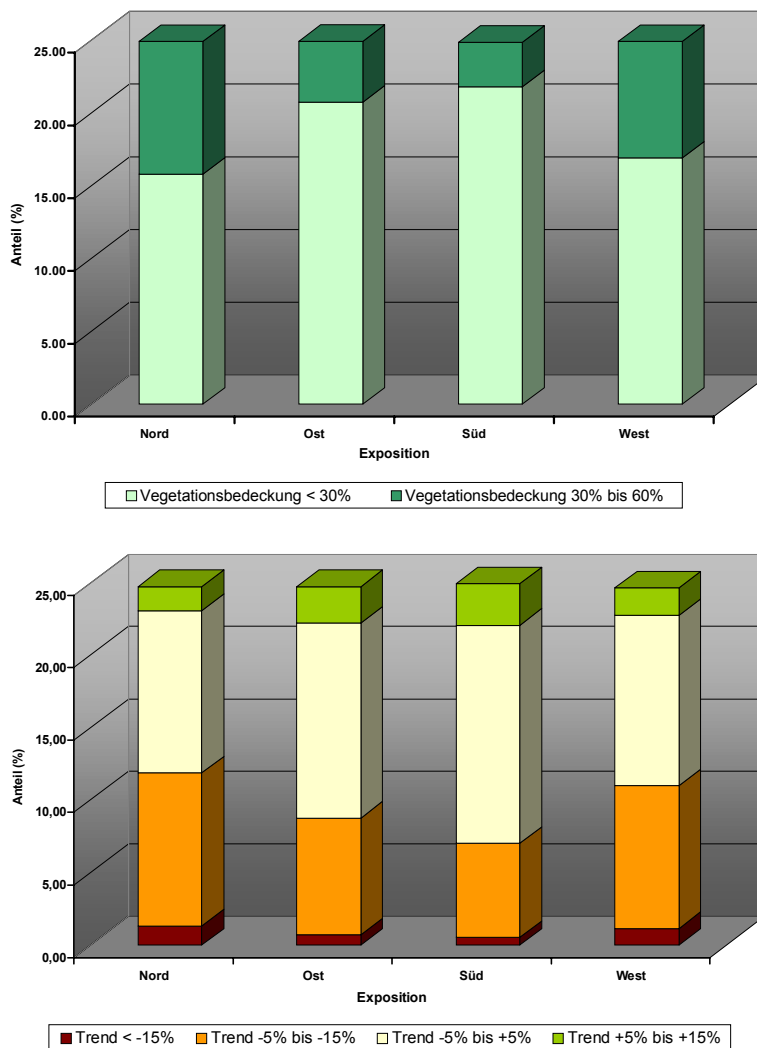


Abbildung 11.7: Abhängigkeit der mittleren Vegetationsbedeckung (oben) und der zeitlichen Dynamik der Vegetation (unten) von der Exposition in Asterousia

Bei Betrachtung der zeitlichen Dynamik fällt im Vergleich zum Psiloritisgebirge der sehr geringe Flächenanteil mit zunehmender Tendenz in der Vegetationsbedeckung auf

(Abbildung 11.7 unten). Darüber hinaus scheinen die süd- und ostexponierten Lagen gegenüber den übrigen Flächen günstigere Entwicklungsbedingungen aufzuweisen. Dies betrifft sowohl die höheren Flächenanteile mit zunehmender Vegetationsbedeckung, als auch die geringeren mit abnehmender Tendenz im Vergleich zu nord- und westexponierten Positionen. Nur aufgrund der Exposition lässt sich hierfür keine schlüssige Erklärung finden (vgl. Kap. 11.5)

### 11.3 Hangneigung

Neben der Exposition spielt die Steilheit des Reliefs eine entscheidende Rolle zur Beurteilung der naturräumlichen Rahmenbedingungen. Beispielsweise hängen Oberflächenabfluss, Bodenabtragsraten oder Hangrutschungspotential direkt mit der Hangneigung zusammen. Die Flachgründigkeit des Bodens in Steillagen zieht zudem meist eine ungünstige Wasserversorgung nach sich, die in den trockeneren Regionen Südkretas oder auf karstigem Untergrund das natürliche Potential der Vegetation deutlich einschränken kann.

In diesem Zusammenhang sollte jedoch nicht unerwähnt bleiben, dass der Einfluss des aus einem SPOT-basierten Höhenmodell nicht ableitbaren Mikroreliefs auf die Boden- und Vegetationsentwicklung beträchtlich sein kann. So werden die Verkürzung des Hangprofils durch natürliche (z.B. Verwerfungen) oder anthropogene, hangparallele Lineamente (z.B. Straßenstrassen) häufig nicht erfasst. Weiterhin können besonders stark geneigte Geländeelemente, wie Abrisskanten oder Steilhänge, oft nicht ausreichend aufgelöst werden. Die Hangneigung ist somit im Rahmen der vorliegenden Arbeit als meso- bis makroskaliges Geländemerkmale zu interpretieren. Es wurde eine Dreiteilung in Hangbereiche unter  $10^\circ$ ,  $10^\circ$  bis  $20^\circ$  und über  $20^\circ$  Neigung vorgenommen, was eine ungefähr flächengleiche Verteilung der Hangneigungsklassen gewährleistete.

**PSILORITIS.** Die mittlere Vegetationsbedeckung nimmt mit zunehmender Steilheit des Reliefs leicht ab (Abbildung 11.8 oben). Der indirekte Einfluss der Hangneigung auf die Vegetation durch die geringere Bodenreicherung bei steilerem Relief und die damit verbundene schlechtere Wasserversorgung wirkt sich nur mäßig auf die angepassten Pflanzengesellschaften des Hochgebirges aus.

Bei Betrachtung der Hangneigung ist eine zunehmende Sensibilität für Degradationerscheinungen auf stärker geneigten Flächen zu erwarten. Verantwortlich dafür kann die Zunahme der denudativ- und fluvial-erosiven Wirkung auf Böden an steilen Hängen und die dadurch erschwerte Durchwurzelung, schlechtere Wasserversorgung und geringere Nährstoffmobilisierung sein. Interessanterweise kehrt sich bei Betrachtung der Entwicklung über den Beobachtungszeitraum jedoch der Einfluss der Hangneigung ins Gegenteil, mit einer Tendenz



zur regenerativen Entwicklung in steileren Lagen bei gleichzeitig zunehmender Degradation in Flachbereichen und auf mäßig geneigten Hängen (Abbildung 11.8 unten).

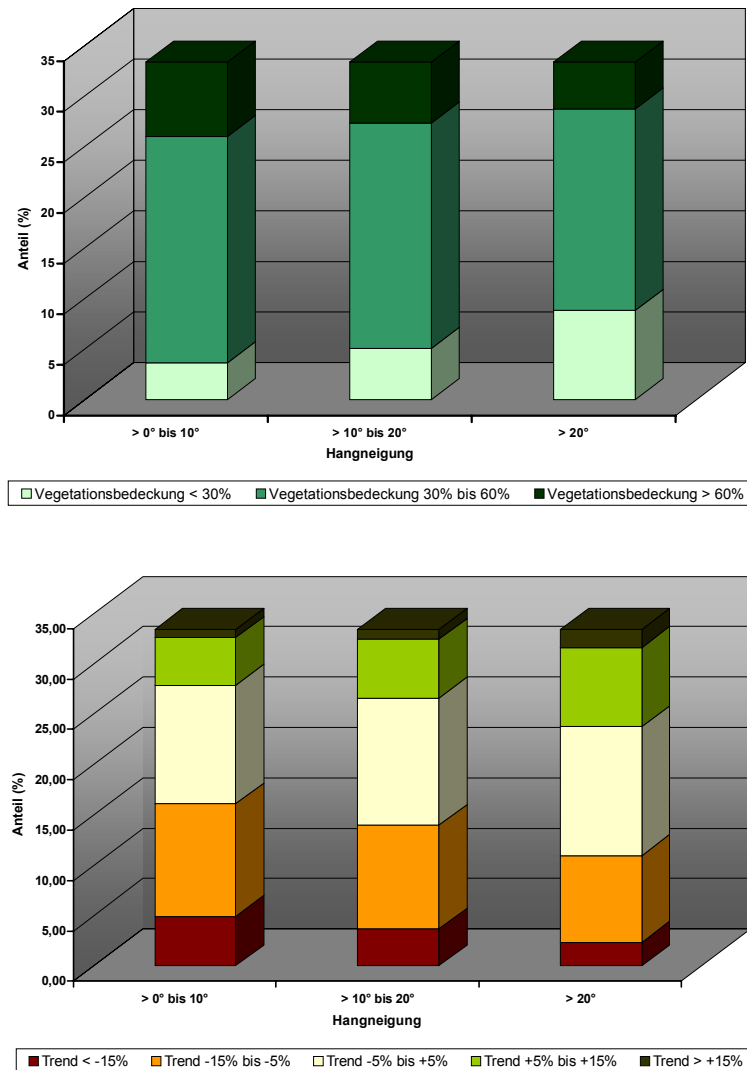


Abbildung 11.8: Abhängigkeit der mittleren Vegetationsbedeckung (oben) und der zeitlichen Dynamik der Vegetation (unten) von der Hangneigung im Psiloritis

**ASTEROUSIA.** Zusammenhänge von Hangneigung und Vegetationsbedeckung sind für Asterousia noch schwächer ausgeprägt als dies im Psiloritisgebirge der Fall ist (Abbildung 11.9 oben). Lediglich die steilsten Bereiche im Anstieg von der Küste zum Gebirgskamm oder an den Hängen des Kofinas weisen eine im Mittel geringere Vegetationsbedeckung auf. So finden sich an Steilhängen südlich des Kofinasgipfels Waldformationen, die einen relativ dichten, von *Pinus brutia* dominierten Bewuchs ausbilden.

In Asterousia hat die Steilheit des Reliefs keinen Einfluss auf die zeitliche Dynamik der Vegetationsbedeckung (Abbildung 11.9 unten). Marginale Unterschiede der Vegetationsentwicklung zwischen leicht, mäßig und stark geneigten Hängen lassen keinen begründbaren Zusammenhang zu diesem Reliefparameter erkennen.

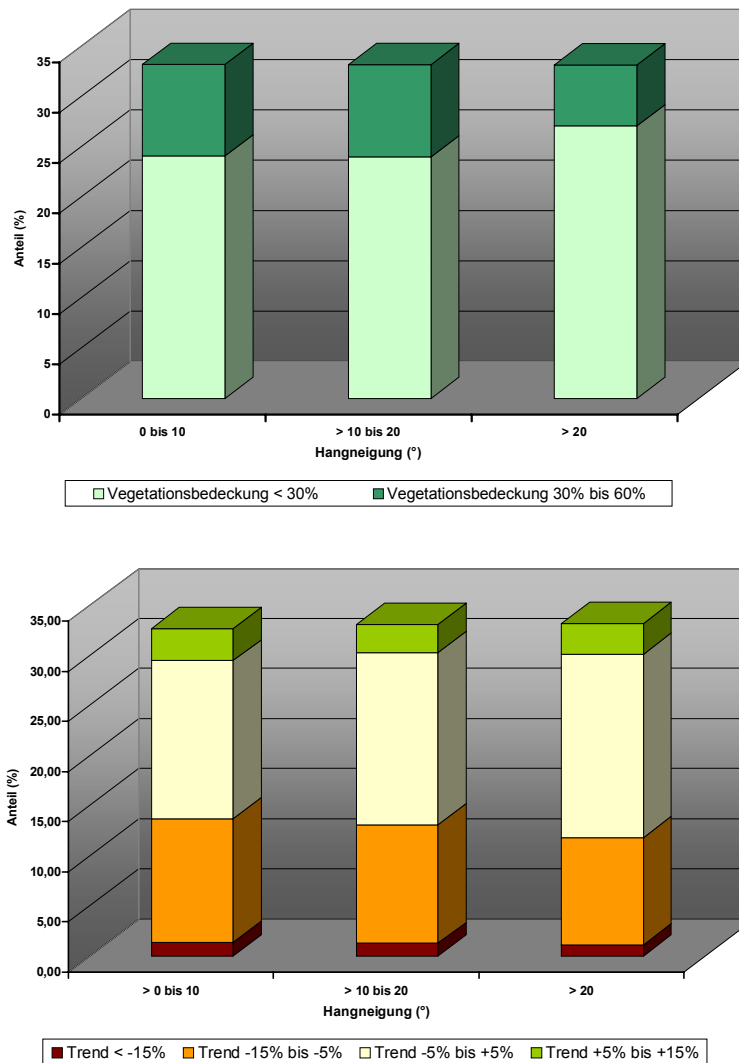


Abbildung 11.9: Abhängigkeit der mittleren Vegetationsbedeckung (oben) und der zeitlichen Dynamik der Vegetation (unten) von der Hangneigung in Asterousia

## 11.4 Geländehöhe

Der Höhenlage kommt sicherlich der augenfälligste Einfluss auf die Pflanzengesellschaften in Gebirgsräumen zu, wie auch die höhenabhängige Gliederung der Sukzessionsschemata in Kapitel 10 belegt. Insbesondere die Dauer der Vegetationsperiode und die Eintrittszeiten der Sommertrockenheit werden von der Geländehöhe beeinflusst. Dementsprechend lässt sich für den Gebirgsstock des Psiloritis mit einer maximalen Höhe von ungefähr 2.500 m ü.NN eine wesentlich deutlichere Zonierung ausmachen als für das Mittelgebirge Asterousia.

**PSILORITIS.** Beim Anstieg von Anogia im Norden oder Gergeri im Süden zu den Höhenbereichen des Psiloritis lassen sich in kurzer Folge alle wichtigen Vegetationszonen des Gebirgsstocks ausmachen. Eine Einteilung in sechs Höhenstufen – in Anlehnung an die in Kapitel 4 eingeführten Vegetationsstufen – zeigt einen evidenten Zusammenhang zwischen

Höhenzonen und mittlerer Vegetationsbedeckung<sup>36</sup> (Abbildung 11.10 oben). Generell lässt sich eine Abnahme der Vegetationsbedeckung mit der Höhe feststellen. Insbesondere die durch Oro-Phrygana dominierten Höhenzonen ab 1.500 m ü.NN werden von Vegetationsanteilen unter 30 % dominiert (vgl. Kap. 10.1 und 10.2). Die Tatsache, dass im Höhenniveau zwischen 900 und 1.200 m ü.NN ein Maximum der Vegetationsbedeckung auftritt, ist durch die hier auftretenden Waldgesellschaften im West-Psiloritis, südlich von Anogia und im Tal von Rouvas begründet. Die Kermeseichenbestände reichen nur in einigen Zonen im Nordwesten auch bis in die niedriger gelegenen Bereiche des Gebirges.

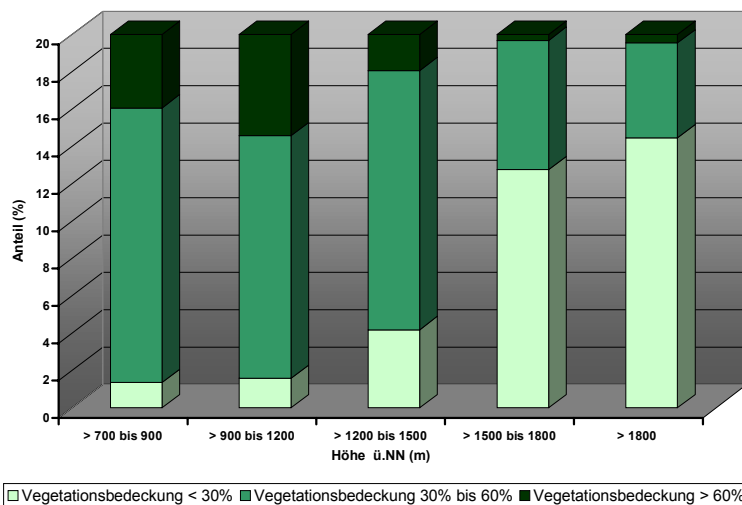
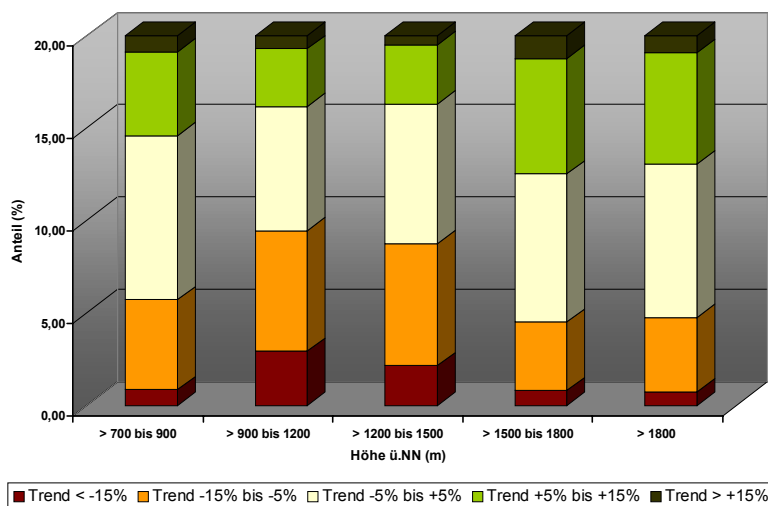


Abbildung 11.10: Abhängigkeit der mittleren Vegetationsbedeckung (oben) und der zeitlichen Dynamik der Vegetation (unten) von der Geländehöhe im Psiloritis



Die zeitliche Dynamik der Vegetationsbedeckung seit 1977 stellt sich in weniger starkem Maße höhenabhängig dar (Abbildung 11.10 unten). Die höchsten Abnahmeraten liegen im Höhenintervall von 900 bis 1.500 m ü.NN und stellen damit sicherlich keinen einfachen Zusammenhang mit der Höhenlage dar (vgl. Kap. 11.5). Unterhalb dieser Zone halten sich zu-

<sup>36</sup> Die unterhalb von 700 m ü.NN liegenden Gebiete der thermo- und meso-mediterranen Stufe wurden wegen ihrer Lage außerhalb der Sommerweidegebiete nicht weiter betrachtet (vgl. Kap. 12).

und abnehmende Tendenzen ungefähr die Waage, in den höher liegenden Gebieten lässt sich im Mittel sogar eine leichte Zunahme der mittleren Vegetationsbedeckung ausmachen.

**ASTEROUSIA.** Eine Reihe der auf das Psiloritisgebirge zutreffenden Aussagen zur Vegetationsbedeckung und deren Entwicklung in Abhängigkeit von der Geländehöhe lassen sich prinzipiell auch auf das Arbeitsgebiet in Asterousia übertragen. Allerdings führt der Mittelgebirgscharakter Asterousias zu einer weniger differenzierten Höhenzonierung. Vor allem die für den Psiloritis prägende Zone oberhalb von 1.200 m ü.NN entfällt.

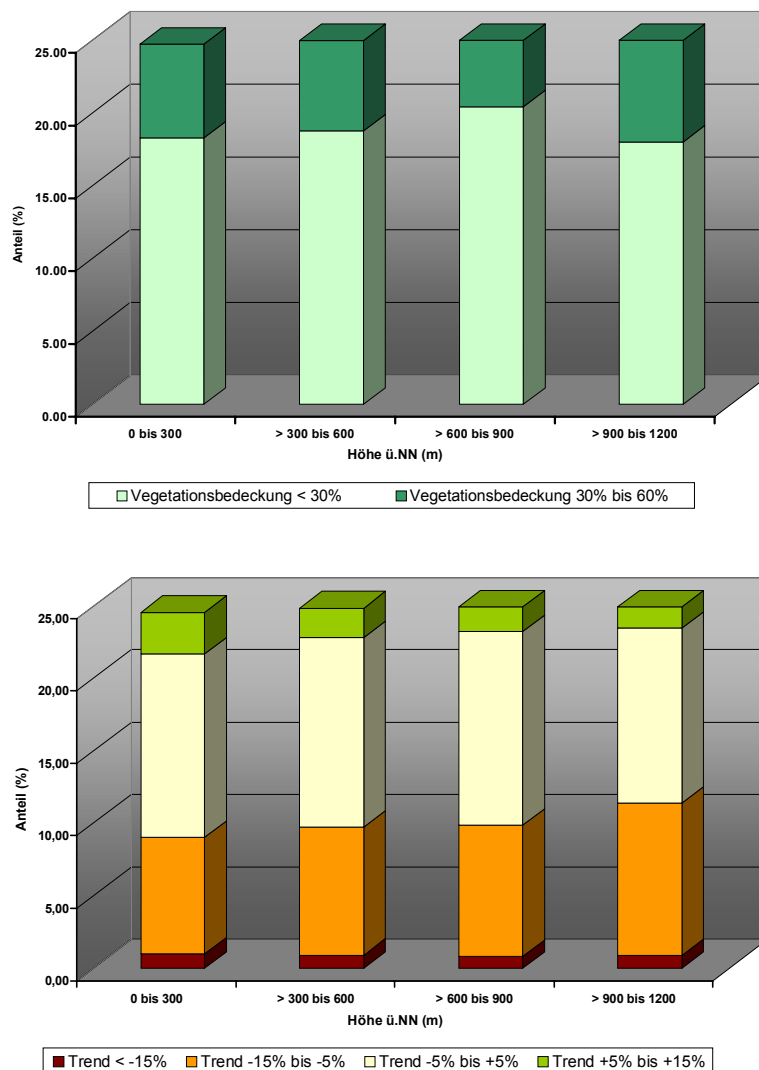


Abbildung 11.11: Abhängigkeit der mittleren Vegetationsbedeckung (oben) und der zeitlichen Dynamik der Vegetation (unten) von der Geländehöhe in Asterousia

Die Vegetationsbedeckung Asterousias zeigt daher bei weitem nicht eine dem Psiloritis vergleichbare Sensitivität der Höhenabhängigkeit (Abbildung 11.11 oben). Der Mittelgebirgscharakter mit maximalen Höhen um 1.200 m ü.NN am Gipfel des Kofinas zieht eine nur schwach ausgeprägte Höhenzonierung nach sich. So sind es denn auch lediglich die Gipfelregionen und die Flächen auf dem östlich davon liegenden Höhenrücken zwischen 600 und 900 Metern Geländehöhe, die sich durch eine etwas geringere Vegetationsbedeckung

abheben. Interessant ist, dass nicht nur die tiefer liegenden, sondern auch die Geländebereiche oberhalb eine Tendenz zu dichter Vegetation aufweisen. Erklären lässt sich dies durch die entlang der südlichen Höhenzone des Kofinas in über 900 m ü.NN fußenden Zypressen- und Pinienwälder mittlerer Dichte.

Mit zunehmender Höhe zeigt sich in Asterousia eine leicht zunehmende Häufigkeit der Vegetationsabnahme über den Beobachtungszeitraum von 20 Jahren (Abbildung 11.11 unten). Damit liegt eine Übereinstimmung zwischen Asterousia und Psiloritis vor, wenn auch die Höhenabhängigkeit in Asterousia aufgrund fehlender Höhen über 1.200 m ü.NN wesentlich geringer ausgeprägt ist.

## 11.5 Synthese zur Betrachtung der naturräumlichen Einflussfaktoren

Bei der Betrachtung einzelner Einflussfaktoren wird deutlich, dass keiner dieser Parameter für sich eine hinreichende Erklärung für die Vegetationsentwicklung geben kann. Dies liegt zum einen in der Wechselwirkung zwischen Geologie und topographieabhängigen Größen begründet. Darüber hinaus legen die bisherigen Analysen das Vorhandensein einer weiteren entscheidenden Störgröße nahe: Den Einfluss des wirtschaftenden Menschen, der durch eine Ausweitung von Kulturlächen, vor allem aber durch intensive Beweidung, das Zusammenwirken der Geofaktoren und der Vegetationsentwicklung stark überprägt.

**PSILORITIS.** Bei genauerer Betrachtung bleiben für den Psiloritis nur zwei bestimmende Faktoren mit Bedeutung für die mittlere Vegetationsbedeckung und für die Vegetationsentwicklung: die Höhenlage und der Einfluss der Weidewirtschaft. Während einerseits der höhenabhängige Klimagradien für die mittlere Vegetationsbedeckung ab der supra-mediterranen Stufe aufwärts bestimmend ist, kann die Geländehöhe nur als indirektes Maß für die Tendenz zu stärkerem Vegetationsrückgang in tieferen Lagen verstanden werden. Die nachlassende Vegetationsbedeckung korrespondiert auffällig mit der Höhenzone der Sommerweidegebiete bis in ungefähr 1.500 m ü.NN.

Zwar finden sich selbst auf Flächen oberhalb von 2.000 m ü.NN noch vereinzelt Spuren der Beweidung, die beschwerlichen Möglichkeiten der zusätzlichen Anlieferung von Futter aus tieferen Regionen schränken die Besatzdichten in dieser Höhenzone jedoch auf ein deutlich reduziertes Maß ein. Damit decken sich auch Interpretationen einer Reihe von Autoren zu den Zufütterungspraktiken in überweideten Gebieten Kretas (Menjli 1994; Strid et al. 1995; Papanastasis und Kazaklis 1998).

Somit können Exposition und Hangneigung eher als indirektes Maß für die Zugänglichkeit des Gebirgsraumes und damit für nachgelagerte, anthropogen induzierte Prozesse interpretiert werden. Die steileren Bereiche liegen vor allem in den hochgelegenen Gebieten des zentralen

Gebirgskammes und sind daher ähnlich wie die Höhenlage selbst zu interpretieren. Da allerdings auch einige Steilanstiege in niedrigeren Lagen vorkommen, wird der Einfluss des wirtschaftenden Menschen nicht ganz so deutlich durch die Hangneigung wie durch die Höhenzonierung ausgedrückt.

Auch die stärkeren Abnahmeraten der Vegetationsbedeckung in nord- und westexponierten Positionen stehen stellvertretend für die dort vorherrschende Nutzungsform bzw. die betroffenen Pflanzengesellschaften. Die überweideten Matorralformationen des Psiloritis liegen fast ausnahmslos entlang der Nordabdachung bis in den äußersten Westen des Gebirges angeordnet. Die Gemeinden mit den größten Weidetierpopulationen – Anogia, Livadia und Kolyros – fallen in dieses Areal. Demgegenüber stehen die auch heute noch schwer zugängliche Steilhänge an der Südseite, die im Wesentlichen durch *Quercus coccifera* eingenommen werden. Bei ungestörter Entwicklung zeigen diese innerhalb der letzten 20 Jahre erwartungsgemäß einen Zuwachs an Biomasse und verhalten sich damit entgegengesetzt zur Entwicklung der Matorral- und Phryganabestände auf der anderen Seite des Gebirgskammes.

**ASTEROUSIA.** In Asterousia weisen vor allem geologischer Untergrund, Exposition und Hangneigung eine hohe Korrelation auf. Im zentralen Bereich, zwischen Sternes im Norden und Koudouma im Süden, bedingt das karbonatische Ausgangsmaterial auf südexponierten Hängen steilere Reliefformen. Während die Hangneigung aufgrund der ohnehin meist nach dem Prinzip der Schutzstellen auf Mikrostandorten siedelnden Pflanzen von untergeordneter Bedeutung ist, spielen Wasserknappheit auf verkarstem Gestein im Zusammenspiel mit erhöhter Verdunstungsrate auf südexponierten Hängen eine wichtige Rolle für die Vegetation. Allerdings bieten die meist als rendzic Leptosols ausgeprägten Böden eine gute Basenversorgung, welche in der vergleichsweise hohen Artenzahl ihren Ausdruck findet.

Dabei täuscht die Betrachtung der vier Hauptexpositionsrichtungen über die Tatsache hinweg, dass vor allem die höhere Vegetationsbedeckung der nordexponierten Hänge nicht als stellvertretend für die gesamte Nordseite des Gebirgszuges gelten können. Auf den steileren Flynshängen am Anstieg von der Messara bis in ca. 900 m Höhe ü.NN sind die nordexponierten Lagen aufgrund der starken Beweidung eher benachteiligt. Diese Feststellung bestätigt sich auch bei der Betrachtung der höhengeprägten Vegetationsverteilung.

Mit größerer Höhe zeigt sich in Asterousia außerdem eine leicht zunehmende Häufigkeit der Vegetationsabnahme über den Beobachtungszeitraum. Dabei sollte die Zweiteilung des Gebirgsstocks in einen niedriger gelegenen, westlichen Teil und einen im Durchschnitt höher reichenden Ostteil nicht vernachlässigt werden. Die Flächenstatistik spiegelt in diesem Kontext lediglich die Neuanlage von Ölbaumkulturen oder die zunehmende Bewässerung vorhandener Kulturflächen im Westteil Asterousias wider. Auch in den zentralen Bereichen Asterousias sowie in den östlichen Randlagen zur Messara fallen Gebiete mit zunehmender Vegetation häufig mit Kulturflächen zusammen. Vegetationsbedeckung mit einem Anteil über 30 %

ist daher häufig mit Anbauflächen oder Plantagen in bestimmten Gebirgsbereichen gleichzusetzen (vgl. Kap. 10.3.1).

Die Tatsache, dass an südexponierten Hängen eine verhältnismäßig geringe Neigung zur Vegetationsabnahme besteht, spricht nicht notwendigerweise für eine höhere Resistenz solcher Flächen gegen Degradationserscheinungen. Vielmehr scheint auf niedrigem Niveau eine Degradation bis zum unbedeckten Boden fast nie stattzufinden. Zu dem einleitend in Kapitel 10 dargestellten Diagramm (Abbildung 10.1) nach Tsiourlis und Kasapidis (1997) lässt sich zumindest aus den bisherigen Erkenntnissen kein Beleg für die Entstehung vegetationsfreier Bodenflächen finden. Es bildet sich eher ein Basisniveau phryganischer Vegetation, welches auch bei intensiver Beweidung nicht mehr weiter reduziert wird. An ständige Beweidung angepasste Pflanzen, z.B. *Sarcopoterium spinosum* oder *Calicotome villosa*, werden durch Verbiss nicht zerstört, sondern nur in ihrem Wachstum beschränkt.

## 12 Kulturräumliche Einflussgrößen und Vegetationsentwicklung

Im Zusammenhang mit der Darstellung der naturräumlichen Rahmenbedingungen wurde die Überlagerung vieler Geofaktoren durch anthropogene Einflüsse deutlich. Allerdings sind die damit verknüpften Prozesse schwierig zu fassen und können nicht ohne weiteres mit den Analyseergebnissen in Einklang gebracht werden. Daher gilt es, zunächst Indikatoren zu definieren, anhand derer eine Abschätzung des anthropogenen Einflusses möglich wird. Als solche können in den weidewirtschaftlich dominierten Gebieten Kretas sicherlich der Viehbestand oder auch indirekte Faktoren, wie die Gebietserschließung durch verkehrstechnische Infrastruktur, angeführt werden.

Zur näheren Untersuchung der Zusammenhänge erfolgte eine Verschneidung der vorliegenden Rasterdaten mit vektorbasierter Information in Form von Straßenkartierungen aus Luftbildern und Tierbestandszahlen auf Basis der Koinotis. Statistische Angaben zu den Weidetieren standen leider nur für die Gemeinden des Psiloritis zeitlich und räumlich aufgelöst zur Verfügung (Menjli 1994; NSSG 1991, 1996), so dass sich die Analyse der Zusammenhänge zwischen Beweidung und Vegetationsentwicklung auf dieses Gebiet beschränken muss.

### 12.1 Erweiterung des Straßennetzes

Eine Reihe von Autoren nennt die Erweiterung des Straßennetzes als einen der wichtigsten Faktoren für die Ausweitung der Beweidung und damit auch als eine der indirekten Ursachen für die zunehmende Degradation durch Überweidung (Grove et al. 1993; Rackham und Moody 1996; Tsiourlis und Kasapidis 1999). Vor allem in den oro-mediterranen Regionen des Psiloritis ist die Weidewirtschaft die maßgebliche Nutzungsform und stellt die wichtigste Motivation für die verkehrstechnische Erschließung dieses Raumes dar. Der Entwicklung des Straßennetzes kommt somit eine Indikatorfunktion für die Ausweitung bzw. Intensivierung der Beweidung zu.

Der Ausbau des Straßennetzes, insbesondere in den schwer zugänglichen Gegenden des Psiloritis, ist im Wesentlichen ein Phänomen der letzten 50 bis 60 Jahre. Die genauere Erschließung des Zusammenhangs in räumlicher und zeitlicher Dimension ermöglicht auch hier die Luftbildanalyse. Mit drei Aufnahmezeitpunkten in den Jahren 1945, 1968 und 1989 werden die verschiedenen Phasen des Straßenbaus auf Kreta seit dem Zweiten Weltkrieg abgedeckt (Rackham und Moody 1996):

- die Ausgangssituation zum Ende des Zweiten Weltkrieges nach der ersten Straßenbaukampagne seit Anfang der 30er Jahre,



- die Phase der zunehmenden wirtschaftlichen Erschließung der Mittel- und Hochgebirgsregionen mit moderner Infrastruktur seit den 50er Jahren,
- die Phase des verstärkten Straßenbaus mit schwerem Gerät, insbesondere seit dem Beitritt Griechenlands zur Europäischen Union.

In Luftbildern kleineren Maßstabs stellt die Kartierung von Straßen, vor allem von unbefestigten Straßen, häufig eine Kartierung indirekter Objekteigenschaften dar. Der Straßenbau bedingt im reliefierten Gelände die Konstruktion von im Luftbild deutlich erkennbaren Trassen, in der Regel assoziiert mit geländeabhängig ausgeprägten Schuttfächern unterhalb des Straßenverlaufs. So ist es zu erklären, dass häufig gut ausgebaute Straßen in flacheren Arealen schlechter kartierbar sind, als beispielsweise ein schmaler Weg im Hochgebirge. Hinzu kommt eine bessere Erkennbarkeit ungeteeter Wege im Kalkstein oder Flysch gegenüber Straßen mit dunklerem Belag, die sich von der Umgebung in kleinmaßstäbigen und kontrastarmen SW-Bildern oft nur geringfügig abheben.

Daher ist es zwar möglich, aus Luftbildern die meisten individuellen Zufahrten zu Schaf- oder Ziegentränken im Gebirge zu kartieren, die Fehlerrate bei der Erfassung schmaler, befestigter Wege kann jedoch durchaus beträchtlich sein. Insbesondere die Kartierung auf Basis der in einem kleineren Befliegungsmaßstab erhobenen Daten von 1945 (vgl. Kap. 4) kann zu einer systematischen Unterschätzung des Straßenausbaus zum ersten Aufnahmezeitpunkt führen. Im Folgenden soll unter Berücksichtigung dieser Rahmenbedingungen eine Betrachtung zur Entwicklung beider Arbeitsgebiete vorgenommen werden.

**PSILORITIS.** Zu einem ersten Schub im Straßenausbau führte eine von der Regierung Kretas durchgeführte Kampagne zur Verbesserung der Infrastruktur mit Beginn in den 30er Jahren des letzten Jahrhunderts. Der Zweite Weltkrieg unterbrach zunächst die Erschließung abgelegener Gebiete, deren Verkehrsanbindung erst nach 1945 weiter vorangetrieben wurde (Grove et al 1993). Bis 1945 war lediglich die wichtigste Gemeinde des zentralen Psiloritis, Anogia, an das Verkehrsnetz der Insel angeschlossen, während die tiefer gelegenen Randgebiete ein für damalige Verhältnisse gutes Straßennetz aufwiesen (Abbildung 12.1).

Bis 1968 existierten zwei ausgebaute Zugangswege zum zentralen Psiloritis; einer ausgehend von Anogia und ein weiterer über Krousounas im Osten. Ersterer führte bis zur Polje von Nida, während der östliche Zugang die Schlucht von Agias Irinis erschloss und im Norden bei Agias Marina die Straße nach Anogia erreichte. Zu den Gemeinden von Gergeri, Gonies und Zoniana fanden sich zu dieser Zeit die ersten Ansätze heutiger Zugangsstraßen, sie reichten allerdings nicht bis in die Höhenzonen jenseits von 1.000 m ü.NN.

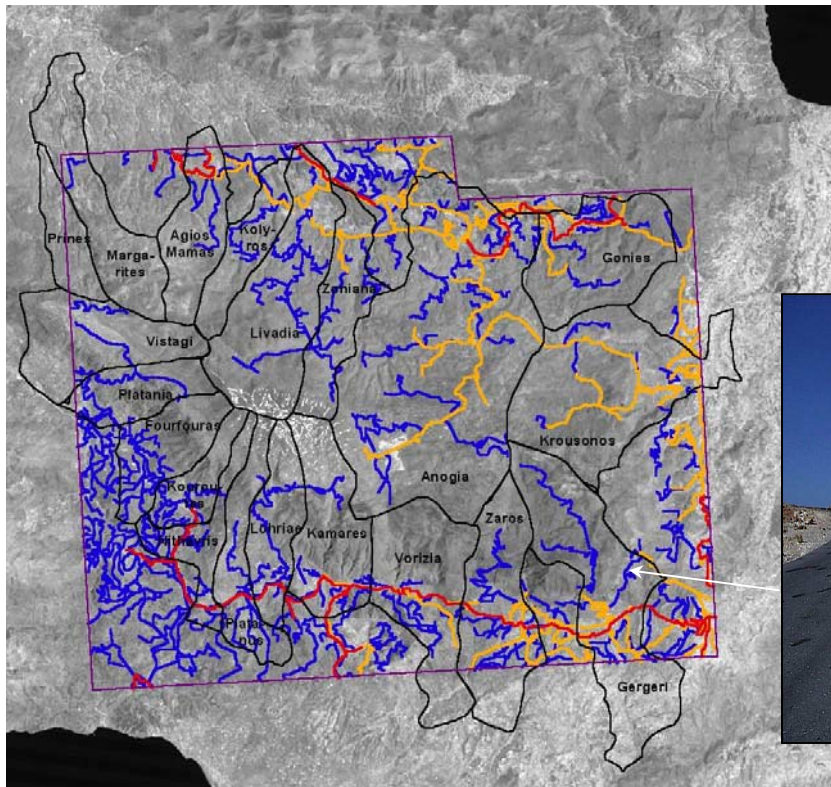


Abbildung 12.1: Straßen-  
ausbau im Psiloritis nach  
Luftbildkartierung; 1945  
(rot), 1968 (orange), 1989  
(blau); Auffahrt zu den  
Weidegebieten von Rouvas  
bei Gergeri (unten)



Demnach war bis zu diesem Zeitpunkt die Erschließung des Psiloritis noch nicht allzu weit fortgeschritten. Der gesamte Westteil des Gebirges und der Süden wiesen – abgesehen von historischen Ziegenpfaden und Fußwegen – noch keinerlei verkehrstechnische Infrastruktur auf, während entlang der leichter zugänglichen nordöstlichen Abdachung des Gebirgsstocks die Vorstufe des heutigen Straßennetzes schon bestand.

Die heutige Situation wird durch die Überfliegung im Jahre 1989 gut wiedergegeben. Nur die Steilanstiege im Nordwesten und Süden sowie die oberhalb von 1.800 m ü.NN gelegene zentrale Gipfelregion sind noch unerschlossen. Demgegenüber finden sich Ende der 80er Jahre selbst in dezentralen Gebieten des Psiloritis Erschließungslinien, sofern dort eine weidewirtschaftliche Nutzung möglich ist. Dabei reicht die Bandbreite der Straßen von nur mit Allradantrieb zu befahrenden Schneisen im Hochgebirge bis zu gut ausgebauten Auffahrten in die unteren Weidegebiete am Südrand des Gebirges bei Gergeri (Abbildung 12.1).

Zusammenfassend lässt sich für den Psiloritis ein rasanter Ausbau des Straßennetzes zwischen 1945 und 1968, vor allem aber nach 1968 belegen (Tabelle 12.1). Von 1945 bis 1968 wuchs die Straßenkilometerzahl nach Auswertung der Luftbilder um 58 km, um bis 1989 nochmals um 170 km erweitert zu werden. Gründe für diese Entwicklung sind sicherlich der Anschluss Griechenlands an den Rest Europas im Vorfeld des Beitritts zur Europäischen Union und die massiven Fördermittelausschüttungen nach der Zugehörigkeit.

Heute sind alle Weidegebiete zumindest mit allradgetriebenen Fahrzeugen erreichbar. Somit entfällt in der Regel die früher übliche Wanderung von Herden zwischen Sommer- und

Winterweideflächen und die temporäre Beweidung der Durchgangsgebiete. Die Tiere werden häufig mit Fahrzeugen in die jeweiligen Weidegebiete transportiert. Eine weitere Konsequenz liegt in der Anlieferung zusätzlicher Futtermittel in die Sommerweidegebiete des Gebirges. Ohne erhebliche Zufütterung wären die hohen Besatzdichten in Teilen des Gebirges sicherlich nicht möglich (vgl. Kap. 13.2).

*Tabelle 12.1: Länge des Straßennetzes im Psiloritis (alle Angaben in m)*

Gemeinde	1945	1968	1989	(Fortsetzung)			
Agios Mamas	0	0	3399	Lohriae	0	0	5285
Anogia	2353	36529	88663	Nithavris	0	0	253
Fourfouras	0	0	474	Platania	0	0	4973
Gergeri	0	2911	22272	Platanus	0	0	649
Gonies	0	2481	9324	Vistagi	0	0	8234
Kamares	0	0	5472	Vorizia	0	0	156
Kolyros	0	0	7554	Zaros	0	0	4671
Kouroutes	0	0	2634	Zoniana	0	2840	18709
Krousounas	0	15071	21511	<b>Summe</b>	<b>2353</b>	<b>872</b>	<b>40941</b>
Livadia	0	458	26225				

**ASTEROUSIA.** Der Mittelgebirgscharakter Asterousias bedingte im Vergleich zum Psiloritis nach dem Zweiten Weltkrieg eine gänzlich andere Ausgangssituation. Die verkehrstechnische Anbindung der Siedlungen und Weidegebiete war schon vor über 50 Jahren sehr weit vorangeschritten und nur in einigen dünn besiedelten und schwierig zu erschließenden Regionen existierte 1945 noch kein Wegenetz (Abbildung 12.2). Es bestand zu dieser Zeit allerdings keine einzige befestigte Straße durch die Berge Asterousias, aber auch heute werden die meisten Verkehrswege lediglich als planierte Einschnitte in die Berghänge angelegt.

Ausgehend von den südlichen Randbereichen der Messara führten wichtige Routen in den östlichen Gebirgsteil um Ethia und Achendrias sowie im zentralen Asterousia nach Miamou und in die daran westlich anschließenden Gebiete. Die Küstenregion war jedoch nur westlich der Schlucht von Leto mit Fahrzeugen zugänglich, während die steilen Südhänge um den Kofinas-Gipfel und östlich davon nur per Boot oder auf Fußpfaden erreicht werden konnten.

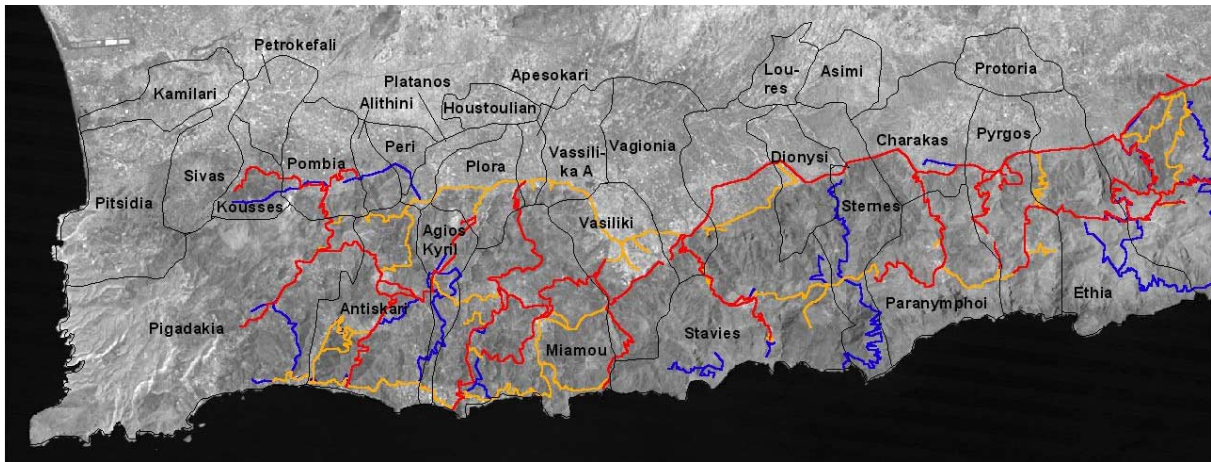


Abbildung 12.2: Straßenausbau in Asterousia nach Luftbildkartierung; 1945 (rot), 1968 (orange), 1989 (blau)

Im Jahre 1968 existierten schon nahezu 80 % der heutigen Verkehrswege. Lediglich die strabentechnische Erschließung der zentralen Südküste war Ende der 60er Jahre noch nicht erfolgt, während von Lendas nach Platia Peramata schon eine Küstenstraße angelegt war.

Die Erweiterungen bis 1989 waren hinsichtlich der angelegten Straßenkilometer eher gering, erschlossen aber einige Gebiete, die bis dahin mit Fahrzeugen noch nicht erreichbar waren. Dies umfasste den Ausbau der Serpentina hinab zur zentralen Südküste am Koudouma-Kloster und südlich von Achendrias im Osten Asterousias. Darüber hinaus erfolgte eine starke Verdichtung des Wegenetzes auf dem Plateau von Miamou, einer heute landwirtschaftlich intensiv genutzten Region.

Tabelle 12.2: Länge des Straßennetzes in Asterousia (alle Angaben in m)

Gemeinde	1945	1968	1989	(Fortsetzung)			
Agios Kyril	3881	6539	14388	Pigadakia	9969	12937	17050
Alithini	0	0	1384	Platanos	0	988	2083
Antiskari	12685	34338	32790	Plora	2854	8191	8191
Apesokari	361	1916	1916	Pombia	7456	2078	4820
Charakas	5993	5993	7461	Pyrgos	16901	20030	20030
Dionysi	2804	4593	4258	Stavies	10645	22415	28180
Ethia	7158	11226	22357	Sternes	1777	3341	19257
Kousses	2980	0	2051	Vaglonia	5953	7998	6954
Miamou	28516	51456	55459	Vasiliki	9101	16431	16431
Paranymphei	9170	14168	14617	Vassilika	0	2326	2326
Peri	0	0	1182	<b>Summe</b>	<b>138204</b>	<b>226964</b>	<b>283185</b>

Das Asterousiagebirge war allerdings schon vor der verkehrstechnischen Anbindung an den Rest der Insel gut erschlossen. Die vergleichsweise kurzen Distanzen in Asterousia machten eine Besiedlung und damit einhergehende Beweidung schon in früherer Zeit möglich (Rackham und Moody 1996). Auch war der Straßenbau im Vergleich zum Psiloritisgebirge schon wesentlich früher in einem fortgeschrittenen Stadium (Tabelle 12.2). Es ist daher wahrscheinlich, dass die vergleichsweise geringen Erweiterungen des Verkehrswegenetzes in Asterousia keinen wesentlichen Einfluss auf die Beweidung durch Schafe und Ziegen in dieser Region nach sich ziehen konnte.

## 12.2 Bestand an Weidetieren

Die Hochgebirgsregion des Psiloritis ist seit historischer Zeit von der Weidewirtschaft mit Schafen und Ziegen geprägt. So gehen die Grenzen der Gemarkungen auf historisch gewachsene Weiderechte zurück und laufen im Psiloritis am zentralen Gipfelgrat zusammen. Gemeinden wie Anogia oder Livadia leben traditionell fast ausschließlich von der Weidewirtschaft. Auch heute wird noch ein großer Teil des Einkommens durch die Tierzucht und deren Produkte, wie Milchprodukte, Wolle und Leder, erwirtschaftet (Menjli 1994; Lyrintzis und Papanastasis 1995; Rackham und Moody 1996).

Es werden drei verschiedene Systeme der Viehhaltung im Psiloritis unterschieden (Ziogas et al. 1998)<sup>37</sup>: häusliche Viehwirtschaft (domestic), Transhumanz innerhalb der Gemeindegrenzen (in flock) und Transhumanz mit regelmäßigem Wechsel der Weideflächen über die Grenzen der eigenen Gemeinde hinaus (nomadic). Die letztgenannte Beweidungsform spielt vor allem in den tiefergelegenen Gebieten der Winterweide eine wichtige Rolle. Der in englischsprachigen Veröffentlichungen griechischer Autoren geläufige Begriff der „nomadic flocks“ bezeichnet also keinen Nomadismus nach dem gängigen Verständnis nicht sesshafter Herdenbesitzer. Die häusliche Viehwirtschaft schließlich basiert auf Stallhaltung und lokalen Weideflächen, spielt im Psiloritis allerdings nur eine untergeordnete Rolle (Tabelle 12.3).

*Tabelle 12.3: Prozentuale Verteilung der Weidesysteme im Psiloritis für das Jahr 1992 (Menjli 1994)*

	domestic	in flock	nomadic
Schafe	6,2 %	33,9 %	59,8 %
Ziegen	7,2 %	19,6 %	72,5 %

<sup>37</sup> Die in der englischsprachigen Landwirtschaftsstatistik Griechenlands gebräuchlichen Bezeichnungen werden in Klammern angegeben.

Für die Analyse potentieller Zusammenhänge zwischen der Bestockung und Vegetationsparametern stellen die vorherrschenden Weidepraktiken eine wichtige Randbedingung dar. Es ist ersichtlich, dass die auf Gemeindebasis erhobenen Zählungen nicht im direkten Zusammenhang mit der Anzahl innerhalb der Gemeindegrenzen weidender Tiere stehen müssen. Vor allem während der Winterweide, also in den tiefergelegenen Weidegebieten, wechseln die meisten Herden in Abhängigkeit vom Futterangebot auch zwischen den Weideflächen verschiedener Gemeinden.

Weiterhin muss auf möglicherweise unzuverlässige statistische Erhebungen hingewiesen werden. Die Unterstützung der Weidewirtschaft durch Förderprämien pro Tier lässt eine Überschätzung der Zahlen erwarten. Rackham und Moody (1996) mutmaßen jedoch, dass das historisch gewachsene Misstrauen der Herdenbesitzer gegenüber dem Staat trotz hoher Förderquoten eher zu zurückhaltenden Angaben bei Tierzählungen und somit zu einer Unterschätzung der Weidetierpopulation führt. In jedem Fall sind die tierbezogenen Landwirtschaftsstatistiken kritisch zu interpretieren. Die folgenden Darstellungen zur Bestockung im Psiloritis basieren auf Tierzählungen der Erhebungsjahre 1961, 1971, 1981 und 1992 (Anh. C, Tabellen C.1 und C.2).

Die räumliche Darstellung der Weidetierpopulation verdeutlicht die uneinheitliche Entwicklung in verschiedenen Gemeinden des Psiloritis (Abbildung 12.3)<sup>38</sup>. Folgende grundsätzliche Aussagen lassen sich treffen:

- Die Weidetierpopulation steigt innerhalb der meisten Koinotis des Psiloritis seit Anfang der 60er Jahre an.
- Der westliche und südwestliche Gebirgsteil präsentieren sich als relativ beständig auf niedrigem Niveau.
- Zwischen 1961 und 1971 ist die Entwicklung zweigeteilt – neben einigen Zunahmen treten vereinzelt auch abnehmende Weidetierpopulationen auf.
- In Kouroutes, Zaros und Zoniana findet eine Abnahme in den 80er Jahren statt.
- Bis 1992 sind die Zuwachsraten in den Gemeinden Kolyros, Livadia, Anogia und Krousounas besonders hoch.
- Die traditionell von der Weidewirtschaft geprägten Gemeinden von Livadia und Anogia weisen Anfang der 60er Jahre und auch am Ende der statistisch erfassten Periode die höchste absolute Weidetierpopulation auf.

Beim Vergleich fernerkundlich gewonnener Informationen mit den dargestellten Kennzahlen zur Beweidung stellen sich mehrere einschränkende Probleme. Am schwierigsten gestaltet sich die zeitliche Integration der beiden Datengrundlagen. Mit einem durch die Datenreihe aus Landsat-MSS und -TM abgedeckten Zeitraum von 1977 bis 1996 und statistischen Daten von

---

<sup>38</sup> Die exponentielle Klasseneinteilung wurde gewählt, um in allen Datensätzen eine Differenzierung der räumlichen Disparitäten trotz der großen Wertespanne bei den Bestockungszahlen zu gewährleisten.

1961 bis 1992 kann im Grunde genommen nur eine Betrachtung des Überschneidungszeitraumes von Ende der 70er bis Anfang der 90er Jahre erfolgen. Auch mindert der 10-jährige Abstand statistischer Erhebungen die Vergleichbarkeit der Daten.

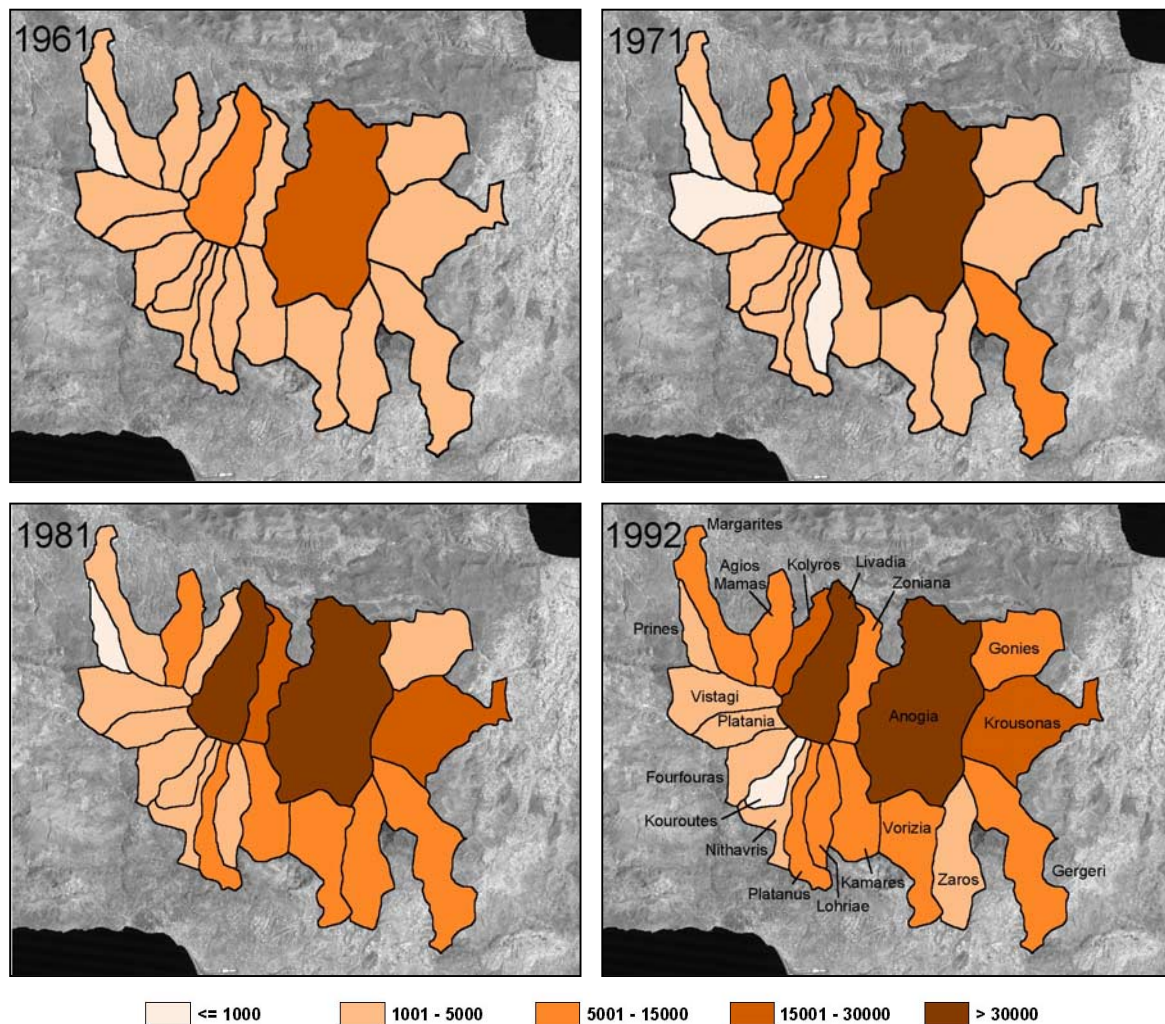


Abbildung 12.3: Entwicklung der Bestockungszahlen im Psiloritis (nach Anh. C, Tabellen C.1 und C.2)

Um dennoch eine Gegenüberstellung beider Datenebenen zu ermöglichen, wurden vier Vergleichszeiträume von jeweils fünf Jahren zwischen 1977 und 1996 ausgewiesen. Die Ermittlung der jeweiligen Besatzdichte für diese Intervalle wurde durch lineare Interpolation der Daten erreicht. Für den Beobachtungszeitraum von 1992 bis 1996 wurden die gleichen Veränderungsraten wie im vorangegangenen 5-Jahres-Abschnitt angesetzt.

Eine Untersuchung des Einflusses von Weidetierpopulationen auf die Vegetation macht nur für die Gebiete der Sommerweide Sinn. Unterhalb der Übergangszone zwischen meso- und supra-mediterraner Stufe liegen die winterlichen Weideflächen in ein dichtes Mosaik intensiv genutzter Ackerflächen und Plantagen eingebettet, das eine separate Betrachtung von Veränderungen aufgrund der Beweidungseffekte verhindert. Die Analyse wurde daher auf die Sommerweidegebiete der Höhenzone oberhalb von 700 m ü.NN begrenzt. Sie reichen bis

ungefähr 1.500 m ü.NN, während in der höher gelegenen alti-mediterranen Zone kaum noch Weidetiere anzutreffen sind. Die Koinotis von Fourfouras, Nithavris und Platanus mussten nach der Einschränkung auf das Höhenintervall zwischen 700 und 1.500 m ü.NN anschließend aufgrund ihrer marginalen Anteile an den Sommerweidegebieten von der weiteren Analyse ausgeschlossen werden.

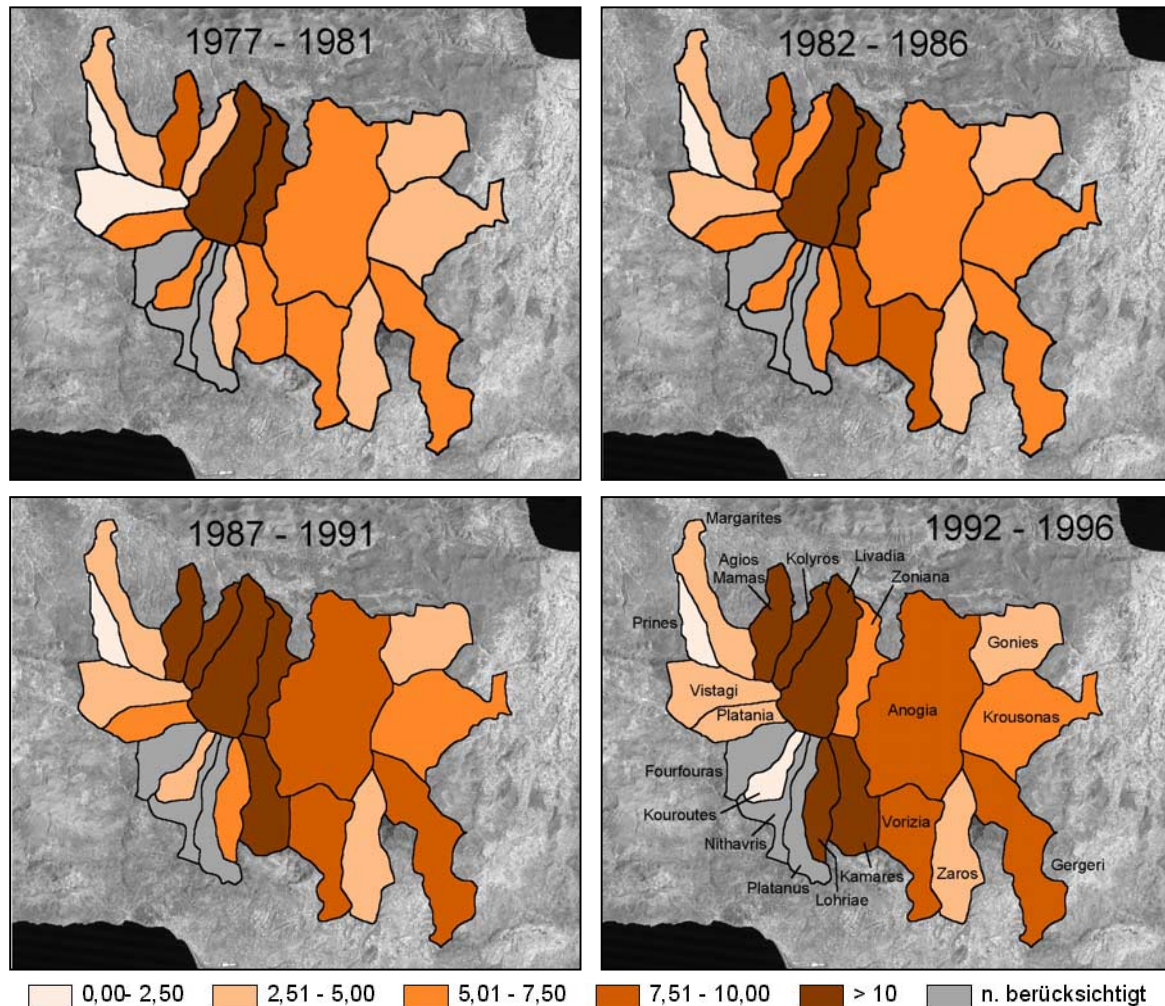


Abbildung 12.4: Entwicklung der Bestockungsdichte im Psiloritis (Angaben in Tiere/ha)

Aus der Verschneidung der Gemeindeflächen mit der Höhenzonierung wurden Flächenangaben für die Sommerweidegebiete berechnet, welche die Grundlage aller flächenbezogenen Berechnungen auf Gemeindebasis darstellen. So ergibt sich das folgende Bild zur Veränderung der Bestockungsdichte pro ha (Abbildung 12.4):

- Durch die Normalisierung pro Flächeneinheit werden die Schwankungen zwischen den 5-Jahres-Abschnitten bei Gemeinden mit geringen Weideflächenanteilen hervorgehoben.
- In Livadia werden die Besatzdichten der anderen Gemeinden bei weitem übertroffen. Mit Werten von über 20 Tieren/ha liegt der Wert Ende der 70er Jahre schon höher als in irgendeiner anderen Gemeinde zum Ende des Untersuchungszeitraumes.



- Eine gegenläufige Entwicklung erfährt Zoniana, mit der deutlichsten Abnahme aller Gemeinden innerhalb von 20 Jahren.
- Die Bestockungsdichten zeugen davon, dass in der Regel deutlich weniger als der angesetzte Flächenbedarf von 1 ha pro Weidetier zur Verfügung steht (Papanastasis et al. 1990; Lyrintzis und Papanastasis 1995).

Es sollte allerdings auch bedacht werden, dass der genannte Flächenbedarf pro Weidetier einen Richtwert darstellt, der von Papanastasis et al. (1990) für weidewirtschaftlich genutzte Phrygana aufgestellt wurde. Der überwiegende Teil der betrachteten Koinotis erstreckt sich von der meso- bis zur oro-mediterranen, in den zentralen Gebirgsbereichen auch bis zur supra-mediterranen Zone. Nur ein Teil dieser Flächen wird von Phrygana oder offenem Matorral bedeckt, so dass für die tiefer gelegenen Gebiete deutlich höhere Bestockungsdichten möglich sind, während auf den von Oro-Phrygana eingenommenen Höhenrücken der Flächenbedarf pro Weidetier wesentlich größer ist.

Für die innerhalb der Sommerweidegebiete liegenden Bereiche des fernerkundlich betrachteten Stratums wurde anschließend die modellierte Vegetationsbedeckung des jeweiligen Bezugszeitraumes kalkuliert. Durch die Nutzung der regressionsbestimmten Werte konnte die phänologische Variation in den ausgewerteten Satellitendaten wirkungsvoll unterdrückt werden. Aus der jeweiligen Kombination von mittlerer Vegetationsbedeckung der Weidegebiete und Bestockungsdichte wurden Trajektorien gebildet, welche die Richtung und Stärke des Zusammenhangs der beiden Variablen verdeutlichen (Abbildung 12.5).

Es lassen sich demnach drei Kategorien von Gemeinden unterscheiden: Die erste Gruppe zeigt einen negativen Zusammenhang zwischen Vegetationsbedeckung und Besatzdichte mit Weidetieren (Abbildung 12.5, oben). Eine zweite Gruppe neigt zu indifferentem Verhalten. Nur zeitweise läuft die Entwicklung der Vegetation gegenläufig zur Entwicklung der Weidetierpopulation (Abbildung 12.5, Mitte). Die letzte Gruppe weist einen positiven Zusammenhang zwischen Vegetation und Bestockung auf, verhält sich also umgekehrt wie erwartet, mit steigender Vegetationsbedeckung bei fallender Bestockung (Abbildung 12.5, unten).

Geländearbeiten im Laufe des DeMon-II-Projektes sowie Publikationen anderer Arbeitsgruppen belegen den eindeutigen Zusammenhang zwischen Beweidung und qualitativer sowie quantitativer Veränderungen der Vegetation auf Kreta (Grove et al. 1993; Strid 1995; Bergmeier 1996; Tsiourlis et al. 1998a, b; Tsiourlis und Kasapidis 1999). Für die erste Gruppe mittels Trajektorien ausgegliederter Gemeinden scheint dieser Effekt auch anhand der Vegetationsbedeckung nachweisbar. Das Bedeckungsniveau innerhalb dieser Koinotis spiegelt ihre Anordnung entlang des Gebirgszuges gut wider: Prines, Margarites und Agios Mamas liegen im regenreichen Luv des Psiloritis, Anogia im trockeneren Osten, während Kolyros und Livadia eine Zwischenstellung einnehmen. Vier dieser Gemeinden – Agios Mamas, Kolyros, Livadia und Anogia – repräsentieren rund 60 % des Gesamtbestandes an Weidetieren im Psiloritis.

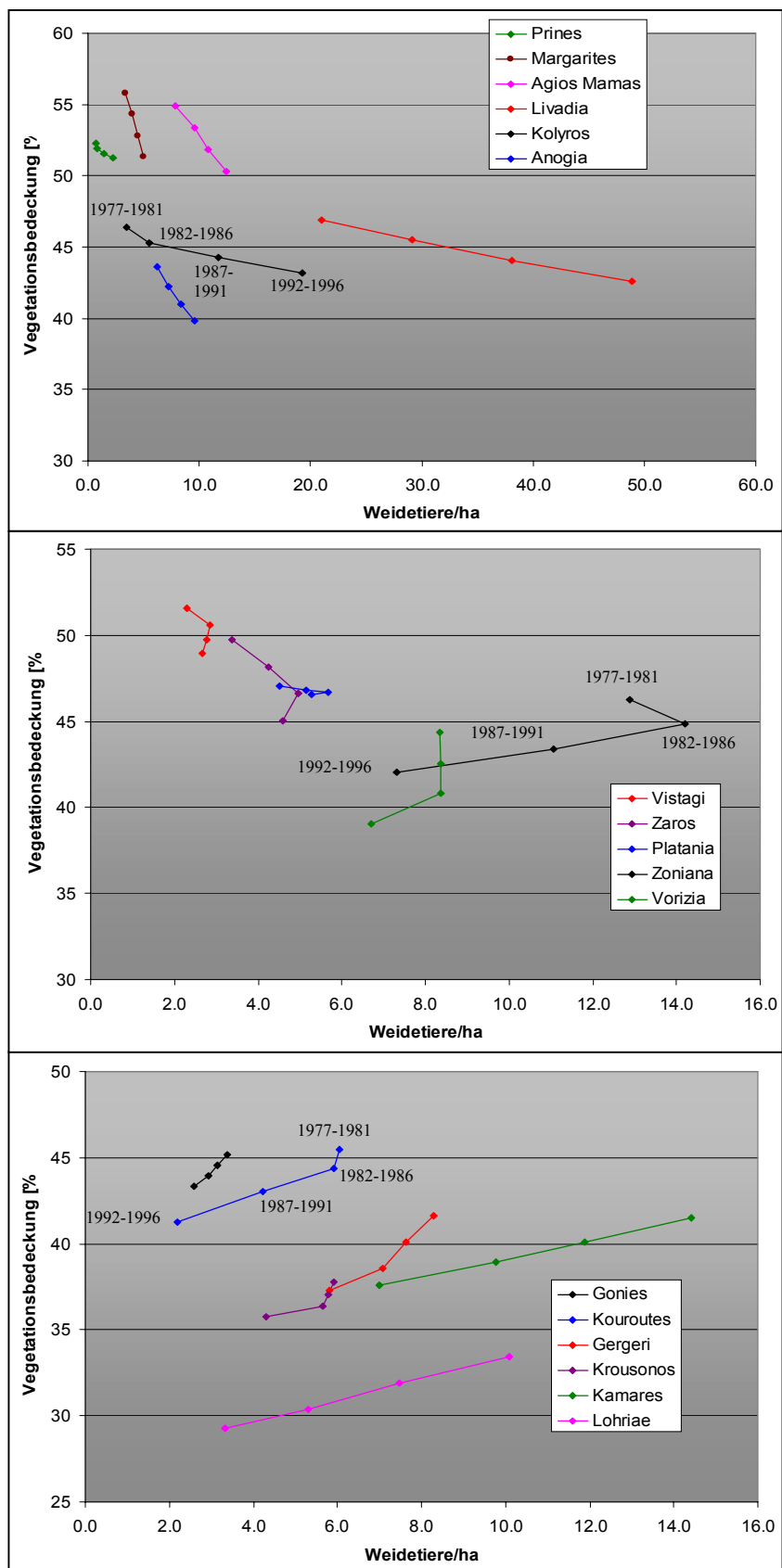


Abbildung 12.5:  
 Gruppen von Trajektorien  
 der Bestockungsdichte und  
 der Vegetationsbedeckung  
 (Erläuterung im Text)

Die als Gruppe mit indifferentem Verlauf ausgegliederten Gemeinden zeichnen sich alle durch einen Wechsel von zunehmenden zu abnehmenden Bestockungsraten im Laufe des Untersuchungszeitraumes aus. Inwiefern diese Abnahme seit Anfang der 80er Jahre auf ein eher temporäres Phänomen, einen andauernden Strukturwandel oder Mängel in der statistischen Erhebung zurückgeführt werden kann, muss an dieser Stelle offen bleiben. Für die Bestockungszahlen dieser Koinotis kann im Grunde genommen kein Zusammenhang mit der Entwicklung der Vegetationsbedeckung gefunden werden, da die aus der Satellitendatenanalyse abgeleitete lineare Trendfunktion derartige Veränderungen nicht nachzeichnen kann. Als Alternative kommen eine stückweise lineare oder eine nicht-lineare Trendberechnung in Betracht. Bei der gegebenen Anzahl an Aufnahmezeitpunkten und der Variabilität in den jährlichen Vegetationsbedeckungsschätzungen ist eine Aufteilung der Datenreihe in zwei oder mehrere Teilreihen jedoch nicht sinnvoll (Röder et al. 2000).

Die dritte Gruppe umfasst Gemeinden der südlichen und östlichen Gebirgsteile. Die Entwicklung der Vegetationsbedeckung scheint dort unabhängig von den Besatzzahlen zu sein. Ein Erklärungsansatz für die gleichgerichtete Tendenz von Tierbesatzdichte und Vegetationsbedeckung liegt sicherlich in der naturräumlichen Ausstattung der Koinotis. Der gesamte Süden und Südosten des Psiloritis weist einen hohen Anteil an Waldformationen auf. Die überwiegend auf die bodennahe Vegetation beschränkte Beweidung hat daher nur bedingt Einfluss auf die fernerkundlich erfassbaren Veränderungen (vgl. Kap. 10.1.2). Bergmeier (1996) belegt zudem, dass sich in einigen Regionen Kretas der Wald sogar ausdehnt. Dies betrifft überwiegend das Vordringen von Kiefern auf brach gefallenem Kulturflächen. Im Psiloritis zeugen zumindest intensive Forstmaßnahmen in den Koinotis an der Südseite des Gebirgszuges, dass auch der Mensch für die Zunahme des Waldes mitverantwortlich ist. Eine Nettozunahme der Waldfläche war aus der Luftbildinterpretation für den Psiloritis allerdings nicht nachweisbar (vgl. Kap. 5).

Zu Vergleichszwecken wurde die Entwicklung des Straßennetzes (Abbildung 12.6 unten links) im Vergleich zur Entwicklung der Besatzdichten (Abbildung 12.6 oben rechts), Veränderungen in der Vegetationsbedeckung (Abbildung 12.6 unten rechts) und der Zugehörigkeit von Gemeinden zu den oben beschriebenen Gruppen dargestellt (Abbildung 12.6 oben links). Die räumliche Übersicht verdeutlicht nochmals die oben dargestellten Zusammenhänge. Wie in Kapitel 12.1 erläutert, zeigt die Zunahme der Straßendichte zwar deutlich die Erschließung des Gebirges, lässt aber sicherlich keinen direkten Rückschluss auf die damit einhergehende Entwicklung der Beweidung zu. Alle Weidegebiete bis in 1.500 m ü:NN sind heute jedenfalls an das Verkehrsnetz der Insel angeschlossen.

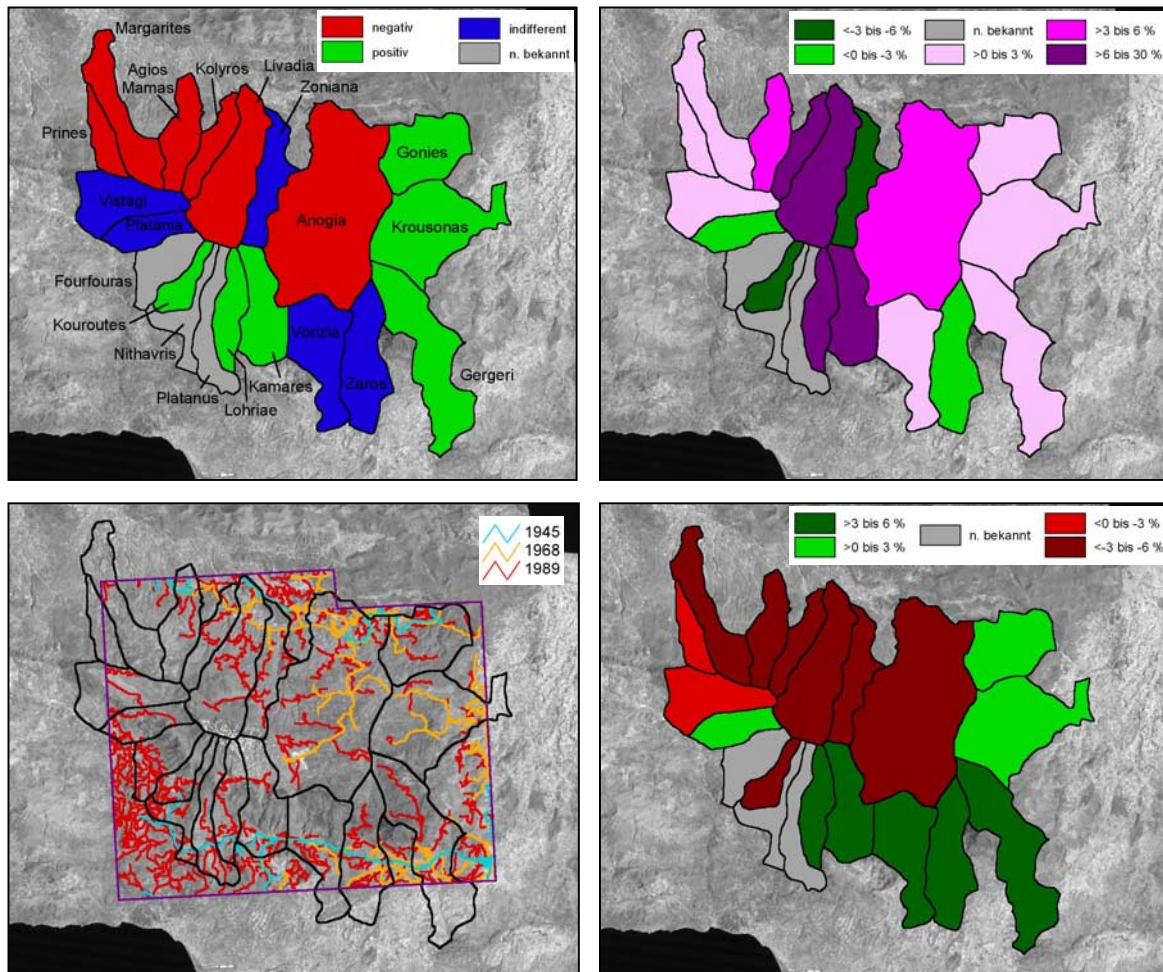


Abbildung 12.6: Zusammenhang zwischen Vegetations- und Bestandsentwicklung (oben links); Veränderung der Bestandszahlen (oben rechts); Entwicklung des Straßennetzes (unten links); Veränderung der Vegetationsbedeckung (unten rechts)

Es zeigt sich deutlich die Einteilung des Gebirges in einen von Vegetationszunahme geprägten Südost- und einen von Abnahmen gekennzeichneten Nordwestteil. Kouroutes im Süden und Platania im Westen bilden jeweils die einzigen Ausnahmen. Inwiefern in Kouroutes forstliche Maßnahmen zu dieser eher ungewöhnlichen Abnahme in der Vegetationsbedeckung waldbeständiger Gebiete geführt haben, bleibt noch zu klären.

Auch wenn die Analyse von Abhängigkeiten zwischen Vegetationsentwicklung und Bestockungszahlen aufgrund der räumlich und zeitlich eingeschränkten Beweidungsdaten keine quantitativen Schlüsse zulässt, so kann doch ein qualitativer Zusammenhang zwischen Veränderungen der Vegetation und Änderungen der Beweidungsintensität in Abhängigkeit von der betroffenen Pflanzenformation hergestellt werden.

Zum einen wird ersichtlich, dass derart hohe Bestockungsdichten nur durch die im Psiloritis überall verbreitete Zufütterung möglich sind. Zioganas et al. (1998) beziffern den Anteil zusätzlicher Futtermittel auf 20 bis 50 % des Gesamtfutterbedarfs in Abhängigkeit von der Beweidungsform. Dementsprechend wird eine weiter gesteigerte Besatzdichte nicht unmittel-

bar zu einem erhöhten Weidedruck führen müssen. Umgekehrt kann auch nicht davon ausgegangen werden, dass eine Verminderung der Tierzahl in jedem Fall eine kurzfristig wirksame Entlastung nach sich zieht.

Weiterhin werden auch im Sommer nicht ausschließlich die Gebirgsweiden genutzt und eine Beweidung von Flächen außerhalb der jeweiligen Gemeindegrenzen bringt eine gewisse Entzerrung der Verhältnisse mit sich. Der relativ geringe Anteil von Herden, die ausschließlich innerhalb ihrer Koinotis verbleiben, kann möglicherweise auch ein Grund für die vermeintlich gegenläufige Entwicklung von Vegetationsbedeckung und Besatzdichte in Gemeinden wie Zoniana sein. Eingegrenzt von Gebieten mit hoher absoluter Tierzahl und hoher Besatzdichte pro ha ist eine Nutzung der Weideflächen durch Herden der Nachbargemeinden wahrscheinlich.

Wie schon in den vorangegangenen Kapiteln zeigt sich vor allem auch bei der Interpretation der sozio-ökonomischen Zusammenhänge, dass erst die Integration fernerkundlich gewonnener Ergebnisse mit räumlichen Zusatzdaten, Statistiken und Erhebungen vor Ort eine folgerichtige Interpretation erlaubt. Im vorliegenden Fall wären Daten zu Herdenbewegungen innerhalb und zwischen Gemeinden sicherlich eine große Hilfe zur Erklärung wichtiger Sachverhalte. Auch Daten der lokalen Behörden zu forstlichen Maßnahmen können unter Umständen wertvolle Hinweise zur Deutung zunächst außergewöhnlich erscheinender Phänomene geben. Im Fall der Erschließung solcher Informationen werden fernerkundliche Monitoring-Ergebnisse zukünftig in stärkerem Maße mit statistisch abgesicherten Modellen untermauert werden können.

*Teil IV:*

*Resümee*

## 13 Abschließende Bewertung und Ausblick

Die der Arbeit zugrunde liegenden und in Kapitel 3 umrissenen Fragestellungen sollen an dieser Stelle nochmals kritisch aufgegriffen werden. Die Zielsetzung liegt in der Überprüfung von Möglichkeiten eines Langzeit-Monitoring von Degradationsphänomenen mit Methoden der Fernerkundung und Unterstützung durch Geographische Informationssysteme. Bei den Untersuchungen zur Vegetationsentwicklung in den Weidegebieten von Psiloritis und Asterousia in Zentralkreta wurde der Schwerpunkt auf die Analyse der Vegetationsbedeckung, ihrer Veränderung mit der Zeit und die phänologischen Einflüsse auf die Variabilität detektierbarer Vegetationsanteile gelegt. Während sich mit bodengestützten Methoden detaillierte Angaben über Veränderungen an einzelnen Standorten treffen lassen, stoßen konventionelle Untersuchungsmethoden bei der Beurteilung raumübergreifender Prozesse in einer hohen zeitlichen Auflösung an ihre Grenzen. Wie die Analyse von Bildprodukten aus Reihenbefliegungen in Kapitel 5 zeigt, sind allerdings auch fernerkundliche Untersuchungen mit Luftbildern sehr aufwendig, vor allem aber in den Auswertemöglichkeiten und somit in ihrer Aussagekraft begrenzt.

Eine Alternative bietet der Einsatz multispektraler und multitemporaler Satellitendaten. Die Daten des Landsat-Systems bieten dazu eine ideale Kombination aus angemessener geometrischer und spektraler Auflösung bei gleichzeitig bis in die 70er Jahre zurückreichender Datengrundlage. Damit stellt sich die Frage, wie eine Prozessierungskette aufgebaut sein muss, mit deren Hilfe eine fernerkundliche Erfassung relevanter Oberflächenparameter möglich ist.

Die Quantifizierung von Vegetationsanteilen in Satellitenbilddaten setzt die Ableitung genau definierter Größen, beispielsweise der Reflexion, als Eingangsparmeter zur Bildanalyse voraus. Während die geometrische Korrektur der Satellitenbilddaten einen weitgehend standardisierten Prozess darstellt, muss bei der radiometrischen Vorverarbeitung einigen Rahmenbedingungen Rechnung getragen werden. Insbesondere unter der Maßgabe, Landsat-TM- und Landsat-MSS-Daten zu verknüpfen ist die möglichst exakte radiometrische Anpassung beider Systeme wichtig, um Inkonsistenzen bei nachfolgenden Verarbeitungsschritten zu vermeiden. Für die seit 1972 verfügbaren Daten des Landsat-MSS liegen keine verlässlichen Kalibrierfaktoren vor, so dass zum Aufbau einer sensorübergreifenden Zeitreihe eine relative Anpassung an die radiometrischen Eigenschaften des Landsat-TM vorgenommen werden muss. Die Atmosphärenkorrektur der Satellitendaten erfolgt schließlich unter Verwendung des 5S-Code einschließlich der Einbeziehung topographischer Störeinflüsse. Eine Validierung der vorprozessierten Daten ergab Unsicherheitsmargen in einer bei der radiometrischen Modellierung zu erwartenden Größenordnung und ließ keine systematischen Fehler in den Ergebnissen erkennen.

Die vor allem bei der Betrachtung heterogener Gebiete mit der Satellitendateninterpretation verknüpfte Mischpixelproblematik wurde mittels eines Ansatzes zur Linearen Spektralen Mischungsanalyse gelöst. Ein wesentlicher Faktor ist in diesem Zusammenhang die Bestimmung von Referenzsignaturen zur korrekten Ableitung der prozentualen Anteile verschiedener Oberflächen an jedem Bildpunkt. Zu diesem Zweck werden die Bilddaten nach geologischen Einheiten stratifiziert, um gebietsbezogene Eigenschaften von Boden und Gestein berücksichtigen zu können. Der Anteil grüner Vegetation kann aufgrund des ihr eigenen Spektralverhaltens meist exakt quantifiziert werden.

Zwei Einschränkungen sind mit der Spektralen Mischungsanalyse unter den gegebenen Rahmenbedingungen verbunden: Zum einen bietet der niedriger dimensionierte spektrale Datenraum des Landsat-MSS keine Möglichkeit der zuverlässigen Trennung der Bodenkomponekte vom geologischen Substrat. Bis zur Verfügbarkeit von Landsat-TM-Daten aus dem Jahre 1984 sind somit keine Aussagen über die Böden im Arbeitsgebiet möglich. Weiterhin ist die Bodenschicht in den Bergen von Asterousia auf Flysch spektral nicht vom geologischen Substrat zu unterscheiden, so dass eine diesbezügliche Interpretation für Asterousia nicht vorgenommen werden kann.

Ein wesentlicher Vorteil der Spektralen Mischungsanalyse liegt in der Verwendung identischer, physikalisch basierter Referenzdaten aus Geländemessungen für alle betrachteten Datensätze. Somit kann selbst bei Ungenauigkeiten in der quantitativen Schätzung, beispielsweise wegen nicht-linearen Reflexionsverhaltens der Vegetation, von einer in sich konsistenten Datenreihe ausgegangen werden. Basierend auf diesen Ergebnissen erfolgt eine Zeitreihenanalyse, die mittels einer pixelbasierten Trendberechnung die Integration räumlicher und zeitlicher Interpretationsebenen ermöglicht. Nach einer Kreuzvalidierung erfolgt schließlich die Eliminierung solcher Datensätze, die aufgrund besonders hoher Schwankungen in der phänologischen Entwicklung der Vegetation Artefakte in der Zeitreihenanalyse nach sich ziehen.

Als Zwischenergebnis kann die Ableitung homogener Datenreihe über einen Zeitraum von 20 Jahren festgehalten werden, welche über den primären Parameter der Reflexion zu einer Schätzung von Vegetationsanteilen – unter den oben genannten Einschränkungen auch Bodenanteilen – führt. Somit ist anhand des aufgezeigten Prozessierungsschemas eine zeitlich hochaufgelöste Quantifizierung relevanter Oberflächenparameter zur Beurteilung von Degradationsphänomenen möglich.

Gesucht wird letztlich jedoch ein Zusammenhang zwischen im Gelände feststellbaren Veränderungen und fernerkundlich abgeleiteten Parametern. Aus der Literatur und Geländekampagnen sind die Verteilung von Vegetationsformationen und ihre Beeinflussung durch die Beweidung bekannt. Allerdings fehlen sowohl der raumübergreifende Überblick, wie auch eine konsistente retrospektive Sichtweise zur umfassenden Charakterisierung der Problematik.



Die Analyse der Fernerkundungsdaten bietet hingegen ein Gesamtbild zur Entwicklung der Vegetationsbedeckung für das Hochgebirge des Psiloritis und die Mittelgebirgslandschaft Asterousias, welches sich mit den zur Verfügung stehenden Geländebefunden deckt und über die punktuellen oder räumlich begrenzten Geländeaufnahmen hinausgeht. Im Psiloritis zeigt sich vor allem entlang der nördlichen und westlichen Abdachung des Gebirgsstocks eine deutliche Entwicklung hin zu geringeren Vegetationsanteilen. Dies betrifft in erster Linie Phryganaformationen und von *Acer creticum* dominierten Matorral der supra-mediterranen Stufe. Demgegenüber stehen allerdings auch Teile des Psiloritis mit stabiler oder zunehmender Tendenz in der Vegetationsbedeckung. Sie repräsentieren die Waldformationen entlang der südlichen und westlichen Steilhänge des Gebirges.

In Asterousia zeichnen sich hingegen geringere räumliche Unterschiede ab. Das niedrige Ausgangsniveau der Vegetationsbedeckung – weite Bereiche des Gebirgszuges weisen Werte von unter 30 % auf – und die stellenweise auffällige Artenarmut prägen das Bild. Die niedrigsten Vegetationsanteile treten entlang der küstenzugewandten Gebirgsteile auf. Auf Basis der Datenanalyse zeigen rund 40 % der betrachteten Gesamtfläche einen Rückgang in der Vegetationsbedeckung.

Neben den getroffenen Aussagen zu Veränderungen der Vegetation können aus der Zeitreihenanalyse aber auch Schlüsse auf strukturelle Parameter der Vegetation gezogen werden. In den Schwankungen um die Trendgerade spiegelt sich die phänologische Variation eines Bestandes zu den betrachteten Zeitpunkten wider. Ein wesentlicher Faktor für diese Variabilität liegt im Anteil von krautigen Pflanzen an einer Pflanzengesellschaft. So lassen sich beispielsweise weitgehend stabile Waldformationen von Wiesen mit hoher Variabilität sehr deutlich in den Analyseergebnissen unterscheiden. Dementsprechend kann anhand der Schwankungsbreite verschiedener Matorral- und Phryganaformationen auf deren Verhältnis von krautigen zu immergrünen Arten rückgeschlossen werden.

Es bestehen zudem vielfältige Möglichkeiten zur Ableitung weiterer Informationsebenen aus analysierten Fernerkundungsdaten. So kann anhand von Schwellwertverfahren eine Kartierung von Feuerereignissen und Rodungsmaßnahmen zur ergänzenden Beschreibung der Dynamik des Raumes erfolgen. Basierend auf der Übertragung von Ergebnissen aus Labormessungen wird außerdem die raumübergreifende Bestimmung der oberirdischen Biomasse für Phryganabestände möglich. Im Kontext der Landschaftsbewertung für Weidegebiete stellt die Biomasse einen wesentlichen Bewertungsfaktor dar. Weiterhin kann für die spektral vom geologischen Untergrund differenzierbaren Böden im Psiloritis eine Bodenzustandskarte aus den Ergebnissen der Spektralen Mischungsanalyse abgeleitet werden.

Die Frage, inwiefern für relevante raumbezogene Parameter und raum-zeitliche Prozesse Kennzahlen aus der Analyse satellitenbasierter Zeitreihen gewonnen werden können, ist anhand dieser Ergebnisse positiv zu beantworten. Es kann ein raumübergreifendes und schlüssiges Bild wichtiger Größen im zeitlichen Verlauf abgeleitet werden. Dies ist auf

anderem Wege nicht zu erzielen, wie etwa der Vergleich mit den Ergebnissen der Luftbildauswertung zeigt.

Einige der beschriebenen Veränderungen können in einen konkreten Zusammenhang mit den naturräumlichen Rahmenbedingungen gesetzt werden. Für das Gebiet des Psiloritis zeigt sich beispielsweise ein erwartungsgemäß deutlich ausgeprägter Bezug von Vegetationsausprägung und Höhenzonierung, welcher im Vergleich der Satellitenbildanalyse mit verschiedenen Geländeparametern seinen ebenso deutlichen Ausdruck findet. Auch Beziehungen zwischen der Exposition und der Vegetationsbedeckung sind auf diese Weise gut nachweisbar. In Asterousia zeigt sich hingegen eine wesentlich stärkere Prägung der Vegetation durch das geologische Substrat und damit zusammenhängende Faktoren.

Trotz der eindeutig nachweisbaren Zusammenhänge zwischen der naturräumlichen Ausstattung und der anhand der Satellitendateninterpretation abgeleiteten Vegetationsbedeckung zeigt sich, dass vor allem die zeitliche Dynamik in den betrachteten Arbeitsgebieten von Psiloritis und Asterousia maßgeblich von einem anderen Einflussfaktor geprägt sein muss – dem Einfluss des wirtschaftenden Menschen. Der wesentliche raumprägende Prozess ist ohne Zweifel in der Beweidung zu sehen.

So weisen alle gut zugänglichen Gebiete mehr oder minder deutliche Abnahmen in der Vegetationsbedeckung auf. Lediglich Räume, die sich aufgrund ihrer Höhenlage der Beweidung entziehen, zeigen keine nennenswerten Abnahmeraten. Ausnahmen bilden die Waldformationen des Psiloritis, die sich trotz hoher Weidetierpopulation der fernerkundlichen Erfassung von Veränderungen in der bodennahen Vegetation teilweise entziehen. Diese Schlussfolgerung wird auch durch den Vergleich der Statistiken von Weidetierpopulationen mit der Entwicklung der Vegetationsbedeckung über einen Zeitraum von 20 Jahren gestützt.

Es bleibt anzumerken, dass für viele Fragestellungen die Einbindung zusätzlicher Informationsebenen entscheidend für die Möglichkeiten der weiterführenden Interpretation ist. Zu den Veränderungen der Vegetation können ohne Kenntnisse der Artenzusammensetzung einer Pflanzengesellschaft nur Aussagen ohne qualitativen Bezug getroffen werden. Die verstärkte Ansiedlung von Weideunkräutern in stark überweideten Gebieten kann unter Umständen sogar zu einer Vegetationszunahme führen. Eine Interpretation derartiger Prozesse kann allein auf Basis fernerkundlich gewonnener Informationen nicht vorgenommen werden. Insofern ist bei Untersuchungen zur Vegetationsdynamik mit Fernerkundungsdaten immer ein enger Bezug zu Bodenerhebungen zu suchen.

Andererseits stellen die beschriebenen Resultate nur einen Ausschnitt möglicher Auswertungen aus Satellitendaten dar. So bietet beispielsweise die Analyse der phänologischen Variabilität weiteres Potential. Denkbar sind Untersuchungen zum Einfluss beweidungsbedingter Veränderungen in Abhängigkeit von ausgewählten strukturellen Eigenschaften eines Bestandes. Zur besseren Trennung von phänologisch bedingter Variabilität und langzeitlicher Dynamik ist eine separate Betrachtung beider Phänomene

anzustreben. So kann die saisonale Komponente am besten anhand multitemporaler Aufnahmen innerhalb eines Jahres charakterisiert werden.

Demgegenüber sollten unter Einbeziehung zusätzlicher klimatologischer Daten ausgewählte Satellitenszenen zur Beurteilung der langfristigen Entwicklung möglichst frei von Einflüssen der Phänologie sein. Für eine kleinmaßstäbige Beurteilung bietet sich die Analyse der für die jeweiligen Jahre verschiedenen klimatologischen Rahmenbedingungen mit meteorologisch ausgerichteten Satellitensystemen an. Im Fall komplex strukturierter Räume ist weiterhin die Einbindung hochaufgelöster klimatologischer Daten wünschenswert, was allerdings eine adäquate Messnetzdichte im Untersuchungsgebiet voraussetzt.

Weiteres Potential bietet auch die Integration inzwischen operationeller und exakt kalibrierter Satellitensysteme, wie beispielsweise Landsat-7 ETM+ und Aster. Im Zusammenhang mit den verwendeten Daten der Landsat-TM- und Landsat-MSS-Sensoren lassen sich nochmals erweiterte Zeitreihen generieren. Dadurch können einerseits nicht-lineare Effekte in der Vegetationsentwicklung anhand von Teilreihen nachvollzogen werden. Andererseits wird durch eine Verdichtung der Aufnahmezeitpunkte die statistische Signifikanz der Ergebnisse erhöht, so dass im Zusammenhang mit exakteren statistischen Zusatzdaten die Aussagekraft retrospektiver Studien verbessert werden kann.

Viele der getroffenen Feststellungen gelten nicht nur für die Agrarlandschaft Kretas, sondern gleichermaßen für andere Regionen Griechenlands bzw. für große Teile des gesamten Mittelmeerraumes. So vielschichtig wie die Betrachtung ineinandergreifender Prozesse und daraus resultierender Phänomene sind daher auch die Einsatzmöglichkeiten von Fernerkundung und GIS bei der Beurteilung der räumlichen Ausprägung von Degradationserscheinungen. Als Konsequenz aus den gewonnenen Erkenntnissen stellen die Weiterentwicklung der eingeführten Methodik und die Integration zusätzlicher Informationen in den Auswerteprozess eine vielversprechende Möglichkeit dar, um über die retrospektive Sichtweise hinaus einen konkreten Beitrag zur Formulierung angepasster Managementszenarien zu leisten.

## 14 Zusammenfassung

Am Beispiel Zentralkretas wird mit Methoden der Fernerkundung und Geographischen Informationssystemen (GIS) der raum-zeitliche Wandel von Weidegebieten im europäischen Mittelmeerraum untersucht. Die beiden Arbeitsgebiete – Asterousia und Psiloritis – wurden aufgrund ihrer unterschiedlichen naturräumlichen Ausstattung und damit stellvertretend für eine Vielzahl mediterraner Ökosysteme ausgewählt. Im Mittelpunkt steht die Erfassung und Beurteilung von Degradationserscheinungen und deren potentieller Zusammenhang mit naturräumlichen und sozio-ökonomischen Determinanten. Dies geschieht unter besonderer Berücksichtigung der Integration Griechenlands in die Europäische Union.

Während die Luftbildinterpretation für derart ausgedehnte Regionen zeitaufwendig ist und in ihren Ergebnissen oft unbefriedigend bleibt, bietet satellitengestützte Fernerkundung mit multispektralen Sensoren Möglichkeiten des Monitorings ausgedehnter Räume über lange Zeitspannen. Seit 1984 liefern Sensoren vom Typ des Landsat-TM kontinuierliche Daten, welche zur Verlängerung des Monitoring-Zeitraums bis zum Anfang der 70er Jahre mit denen des Landsat-MSS verknüpft werden können.

Die zuverlässige Quantifizierung primärer Parameter, in diesem Fall der Reflexion, zur Ableitung charakteristischer Oberflächeneigenschaften eines Gebietes, stellt den ersten und qualitätsbestimmenden Schritt für eine sinnvolle Integration von Fernerkundungsdaten in ein GIS dar. Die geometrische und radiometrische Vorverarbeitung erfolgen auf Basis einer höhenmodellgestützten Korrektur. In diesem Zusammenhang ist die Anpassung der Kalibrierung für das ältere System des Landsat-MSS an die Daten des Landsat-TM ein wichtiger Prozessierungsschritt.

Die Interpretation der Reflexionswerte erfolgt mittels Spektraler Mischungsanalyse. Die quantitative Trennung des Vegetationsanteils von den übrigen Oberflächenkomponenten führt zu einer konsistenten Datenreihe der Vegetationsbedeckung über den Beobachtungszeitraum. Erst diese Vorverarbeitungskette erlaubt die im Anschluss vorgenommene, pixelbasierte Zeitreihenanalyse und ermöglicht so die Ableitung der raum-zeitlichen Dynamik von Pflanzenbeständen, der mittleren Vegetationsbedeckung und der Variabilität aufgrund phänologischer Schwankungen.

Die daraus gewonnenen Ergebnisse zeigen nicht nur deutliche Unterschiede im Vergleich der beiden Arbeitsgebiete, sondern auch innerhalb der jeweiligen Region. Es lassen sich darüber hinaus nicht nur Flächen zu- und abnehmender bzw. hoher und niedriger Vegetationsbedeckung kartieren, sondern auch Aussagen über das Verhältnis von krautiger zu immergrüner Vegetation treffen. Die räumliche Kombination von mittlerer Vegetationsbedeckung über den Beobachtungszeitraum und zeitlicher Dynamik führt zur Ableitung eines auf Vegetationseigenschaften basierenden Degradationsindex. In beiden Gebirgstteilen zeigen

demnach ausgedehnte Flächen eine Tendenz zur Degradation. Allerdings laufen alle Prozesse in Asterousia auf einem deutlich niedrigeren Ausgangsniveau der Vegetationsbedeckung ab.

Auf Basis der gleichen Datengrundlage werden weitere Analyseergebnisse präsentiert. So lässt sich aus der Zeitreihenanalyse auch eine Kartierung von Feuerereignissen und Rodungsflächen im Verlauf der letzten 20 Jahre ableiten. Für die Phryganaformationen Asterousias kann anhand laborgestützter Untersuchungen ein Zusammenhang zwischen Vegetationsbedeckung und Biomasse abgeleitet werden, welcher eine flächendeckende Biomassenkarte für Phrygana erlaubt. Darüber hinaus wird für das Psiloritisgebirge eine Bodenzustandskarte auf Basis von Ergebnissen der Spektralen Mischungsanalyse vorgestellt.

Bei der Betrachtung der naturräumlichen Rahmenbedingungen erfolgt ein Vergleich von Vegetationsbedeckung und -entwicklung mit geologischem Untergrund, Exposition, Hangneigung und Geländehöhe. Der Einfluss des wesentlich durch die Höhenzonierung geprägten Lokalklimas bildet die wichtigste Rahmenbedingung im Psiloritis, während die Entwicklung Asterousias stärker durch die Geologie determiniert wird. In beiden Fällen wird allerdings klar, dass letztlich der Einfluss des wirtschaftenden Menschen durch neu angelegte Plantagen, vor allem aber durch die Weidewirtschaft gegenüber den naturräumlichen Faktoren in den Vordergrund tritt.

Quantitative Korrelationen zwischen sozio-ökonomischer Entwicklung und der Veränderung von Vegetationsparametern lassen sich aufgrund der ungenügenden statistischen Datenbasis nicht herstellen. Allerdings zeigt eine Interpretation der Weidetierzahlen im Zusammenhang mit den Ergebnissen der Satellitenbildinterpretation deutliche Muster räumlicher Zusammenhänge. In den Gemeinden entlang der Nordseite des Psiloritis mit besonders hohen Bestockungszahlen geht mit dem Zuwachs an Weidetieren auch eine Abnahme der Vegetationsbedeckung einher.

Die Frage nach der Degradationsgefahr innerhalb der Weidegebiete Zentralkretas muss nach abschließender Betrachtung differenziert beantwortet werden. Weder das Szenario irreversibel degradiert Weidegebiete, noch die Vorstellung eines durch intensive Beweidung geschaffenen Kulturraumes im Equilibrium werden der tatsächlichen Situation gerecht. Retrospektives, satellitengestütztes Monitoring kann daher mit der Einordnung von Degradationserscheinungen in einen räumlichen und zeitlichen Kontext zur sinnvollen Beurteilung des sozio-ökonomischen Wandels in Zentralkreta beitragen und bietet darüber hinaus Potential zur Übertragung der Methodik auf weitere Regionen des europäischen Mittelmeergebietes.

# Literatur

- Adams, J.B., Smith, M.O. (1986): Spectral Mixture Modeling: A New Analysis of Rock and Soil Types at the Viking Lander 1 Site. – In: *Journal of Geophysical Research*, **91**, B8, 8098-8112.
- Adams, J.B., Smith, M.O., Gillespie, A.R. (1989): Simple Models for Complex Natural Surfaces: A Strategy for the Hyperspectral Era of Remote Sensing. – In: *Proc. IEEE Int. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, New York, vol. 1, 16-21.
- Ahern, F.J., Goodenough, D.G., Jain, S.C., Rao, V.R., Rochon, G. (1977): Use of Clear Lakes as Standard Reflectors for Atmospheric Measurements. – In: *Proc. 11<sup>th</sup> Int. Symp. Remote Sensing of the Environment*, Ann Arbor, Michigan, 731-755.
- Allen, H., Katsikis, A. (1990): Environmental and Climatic Change in the Aegean during the Late Quaternary. – In: Grove, A.T., Moody, J., Rackham, O. (Hrsg.), *Stability and Change in the Cretan Landscape (Petromarula, 1)*, Cambridge, England, 9-15.
- Analytical Spectral Devices, ASD (1994): *FieldSpec FR User's Guide*. – Boulder.
- Angelakis, A., Kosmas, C., Monopolis, D., Vardavas, I., Yassoglou, N., Papamastorakis, Y., Danalatos, N. (1996): Land and Water Resources in Crete and their Degradation with Emphasis on the Messara Valley. – *Field Trip Int. Conf. Mediterranean Desertification*, Oct 29<sup>th</sup> – Nov 1<sup>st</sup>, Crete, Greece.
- Anuta, P., Bartolucci, L., Dean, E., Lonzano, F., Malaret, E., McGillem, C., Valdes, J., Valenzuela, C. (1984): Landsat-MSS and Thematic Mapper Data Quality and Information Content Analysis. – In: *Proc. IGARSS 1984*, Strasbourg, 27-30 August, 85-92.
- Aranuvachapun, S. (1983): Variation of Atmospheric Optical Depth for Remote Sensing Radiance Calculation. – In: *Remote Sensing of Environment*, **13**, 131-147.
- Aranuvachapun, S. (1985): Satellite Remote Sensing of Atmospheric Optical Depth Spectrum. – In: Rollin, E.M., Steven, M.D., Mather, P.M. (Hrsg.), *Atmospheric Corrections for Remote Sensing*, *Proc. Remote Sensing Workshop on Atmospheric Corrections*, 22<sup>nd</sup> May 1985, Univ. of Nottingham.
- Arianoutsou-Faraggitaki, M. (1985): Desertification by Overgrazing in Greece: The Case of Lesvos Island. – In: *Journal of Arid Environments*, **9**, 237-242.
- Arseni-Papadimitriou, A., Balafoutis, C., Papadimitriou, J. (1990) : Fluctuations of the Water Balance at Heraklion During the Last Half Century. – In: *Proc. 4<sup>th</sup> Hellenic Hydrotechnical Congress on Water Resources and Regional Development*, 14<sup>th</sup> - 17<sup>th</sup> March 1990, Iraklion, 61-70.
- Atzberger, C. (1998): Estimates of Winter Wheat Production through Remote Sensing and Crop Growth Modelling. A Case Study on the Carmargue Region. – *Dissertation*, Universität Trier, Verlag für Wissenschaft und Forschung, Berlin.
- Aubreville, A. (1949): *Climats, Forêts et Désertification de l'Afrique tropicale*. – Société des Editions Géographiques Maritimes et Coloniales, Paris.
- Barker, J.L. (1984): Significant Figures for TM Dynamic Range Constants. Technical Memo, Goddard Space Flight Center. – Greenbelt.
- Barrow, C.J. (1991): *Land Degradation – Development and Breakdown of Terrestrial Environments*. – Cambridge University Press, Cambridge.

- Baumgardner, M.F., Silva, L.F., Biehl, L.L., Stoner, E.R. (1985): Reflectance Properties of Soils. – In: Brady, N.C. (Hrsg.), *Advances in Agronomy*, **38**, Academic Press, Orlando, FL, 1-44.
- Bennett, H.H. (1939): *Soil Conservation*. – McGraw Hill, New York.
- Bergmeier, E. (1996): Zur Bedeutung der Beweidung für die griechische Phrygana. – In: *Berichte der Reinhardt-Tüxen-Gesellschaft*, **8**, 221-236.
- Bergmeier, E. (1998): Are Cretan Endemics Threatened by Grazing? – In: Papanastasis, V.P., Peter, D. (Hrsg.), *Proc. Int. Workshop “Ecological Basis of Livestock Grazing in Mediterranean Ecosystems”*, Thessaloniki (Greece), 23<sup>rd</sup> – 25<sup>th</sup> October 1997, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 90-92.
- Biggar, S.F., Slater, P.N., Gellman, D.I. (1994): Uncertainties in the In-flight Calibration of Sensors with Reference to Measured Ground Sites in the 0.4 to 1.1  $\mu\text{m}$  Range. – In: *Remote Sensing of Environment*, **48**, 242-252.
- Binns, T. (1990): Is Desertification a Myth? – In: *Geography*, **75**, 106-113.
- Birkeland, P.W. (1990): Soil-geomorphic Research - a Selective Overview. – In: *Geomorphology*, **3**, 207-224.
- Blondel, J. (1981): Structure and Dynamics of Bird Communities in Mediterranean Habitats. – In: Di Castri, F., Goodall, D.W., Specht, R.L. (Hrsg.), *Mediterranean-type Shrublands, (Ecosystems of the World, 11)*, Elsevier, Amsterdam/Oxford/New York, 361-385.
- Boardman, J.W. (1990): Inversion of High Spectral Resolution Data. – In: *SPIE*, **1298**, 222-233.
- Boardman, J.W. (1993): Automated Spectral Unmixing of AVIRIS Data Using Convex Geometry Concepts. – In: *Proc. 4<sup>th</sup> Annual JPL Airborne Earth Science Workshop*, Pasadena, 11-14.
- Boardman, J.W., Kruse, F.A., Green, R.O. (1995): Mapping Target Signatures via Partial Unmixing of AVIRIS Data. – In: *Proc. 5<sup>th</sup> Annual JPL Airborne Earth Science Workshop*, January 23-26, Pasadena, 23-26.
- Boer, M. (1999): *Assessment of Dryland Degradation. Linking Theory and Practice through Site Water Balance Modelling*. – (Nederlandse Geografische Studies, **251**), Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen Universiteit Utrecht, Dissertation, Utrecht.
- Bonnefont, (1972): *La Crete. Etude Morphologique*. – Dissertation, Université de Paris IV, Paris.
- Borel, C.C., Gerstl, S.A.W. (1994): Nonlinear Spectral Mixing Models for Vegetative and Soil Surfaces. – In: *Remote Sensing of Environment*, **47**, 403-416.
- Bottema, S. (1980): Palynological Investigations on Crete. – In: *Review of Palaeobotany and Palynology*, **31**, 193-217.
- Bowers, S.A., Hanks, R.J. (1965): Reflection of Radiant Energy from Soils. – In: *Soil Science*, **100**, 2, 130-138.
- Breece, H.T., Holmes, R.H. (1971): Bidirectional Scattering Characteristics of Healthy Green Soybean and Corn Leaves in Vivo. – In: *Applied Optics*, **10**, 119-127.
- Brockmann, C. (1992): *Zur Nutzung des Thematic Mapper für die Ozeanographie*. – Dissertation, Universität Hamburg, Hamburg.
- Bromley, J., Llamas, R., Cruces, K., Dolz, J., Thornes, J.B., Imeson, A. (2000): Groundwater Crisis in the Upper Guadiana Basin. – In: Balabanis, P., Peter, D., Ghazi, A., Tsogas, M.

- (Hrsg.), *Mediterranean Desertification – Research Results and Policy Implications*, vol. 2, Proc. Int. Conf. Oct 29<sup>th</sup> – Nov 1<sup>st</sup>, Crete, Greece, 179-191.
- Brouwer, L.C. (1998): *Desertification through Grazing - the Example of Crete. – Unveröffentlichter Projektbericht, EU-Kontrakt ENV4-CT95-0166 (DG 12 - DTEE).*
- Brouwer, L.C., De Jong, S.M., Riezebos, H.Th. (1998): *Ecozones in Mediterranean Europe. – Unveröffentlichter Projektbericht, EU-Kontrakt ENV4-CT95-0166 (DG 12 - DTEE).*
- Burrough, P.A., McDonnell, R.A. (1998): *Principles of Geographical Information Systems. – Oxford University Press, Oxford.*
- Camperio-Ciani, A., Castillo, P. (2000): *The Desertification Process in the Last Natural Forest of the Southern Mediterranean Region. – In: Balabanis, P., Peter, D., Ghazi, A., Tsogas, M. (Hrsg.), Mediterranean Desertification – Research Results and Policy Implications, vol. 2, Proc. Int. Conf. Oct 29<sup>th</sup> – Nov 1<sup>st</sup>, Crete, Greece, 471-480.*
- Centre Spatial de Toulouse, SPOT Image - CNES, SPOT Image (1989a): *SPOT User's Handbook vol. 1: Reference Manual. – Toulouse.*
- Centre Spatial de Toulouse, SPOT Image - CNES, SPOT Image (1989b): *SPOT User's Handbook vol. 2: SPOT Handbook. – Toulouse.*
- Civco, D.L. (1989): *Topographic Normalization of Landsat Thematic Mapper Digital Imagery. – In: Photogr. Engineering & Remote Sensing, 55, 9, 1303-1309.*
- Clark, R.N., Gallagher, A.J., Swayze, G.A. (1990): *Material Absorption Band Depth Mapping of Imaging Spectrometer Data Using the Complete Band Shape Least-squares Algorithm Simultaneously Fit to Multiple Spectral Features from Multiple Materials. – In: Proc. 3<sup>rd</sup> AVIRIS Workshop, JPL-Publication 90-54, 176-186.*
- Colby, J.D. (1991): *Topographic Normalization in Rugged Terrain. – In: Photogr. Engineering & Remote Sensing, 57, 5, 531-537.*
- Collin, J.J. (1995): *Some Aspects of Desertification Seen from the Groundwater Viewpoint. – In: Fantechi, R., Peter, D., Balabanis, P., Rubio, J.L. (Hrsg.), Desertification in a European Context, Brussels/Luxembourg, 111-121.*
- Conese, C., Maracci, G., Miglietta, F., Maselli, F., Sacco, V.M. (1988): *Forest Classification by Principal Components Analyses of TM Data. – In: Int. J. Remote Sensing, 9, 10/11, 1597-1612.*
- Conese, C., Gilabert, M.A., Maselli, F., Bottai, L. (1993): *Topographic Normalization of TM Scenes through the Use of an Atmospheric Correction Method and Digital Terrain Models. – In: Photogr. Engineering & Remote Sensing, 59, 12, 1745-1753.*
- Creutzburg, N. (1966): *Die südägäische Inselbrücke. Bau und geologische Vergangenheit. – In: Erdkunde, 20, 20-30.*
- Creutzburg, N., Papastamatiou, J. (1966): *Neue Beiträge zur Geologie der Insel Kreta. – In: Geophys. Meldungen Inst. Geol. Erevn. Ypedaph. (Athinai), 11, 173-185.*
- Creutzburg, N., Papastamatiou, J. (1969): *Die Ethia-Serie des südlichen Mittelkreta und ihre Ophiolitvorkommen. – In: Sitzungsber. Heidelberger. Akad. Wiss. Math.-Naturwiss. Kl., 1-47.*
- Cross, A.M., Settle, J.J., Drake, N.A., Paivinen, R.T.M. (1991): *Subpixel Measurement of Tropical Forest Cover Using AVHRR Data. – In: Int. J. Remote Sensing, 12, 5, 1119-1129.*



- D'Assiras, E. (1990): Aquifers and Irrigation Water in the Khania Area. – In: Grove, A.T., Moody, J., Rackham, O. (Hrsg.), *Stability and Change in the Cretan Landscape* (Petromarula, 1), Cambridge, England, 68-69.
- De Haan, J.F., Hovenier, J.W., Kokke, J.M.M., van Stokkom, H.T.C. (1991): Removal of Atmospheric Influences on Satellite-Borne Imagery: A Radiative Transfer Approach. – In: *Remote Sensing of Environment*, **37**, 1-21.
- De Jong, S.M., Brouwer, L.C., Riezebos, H.Th., Tsiourlis, G.M. (1997): DeMon-II Field Survey Crete - Technical Report. – Unveröffentlichter Projektbericht, EU-Kontrakt ENV4-CT95-0166 (DG 12 - DTEE).
- De Montmollin, B. (1991): Endemisme Intra-cretois et Trans-egéo-cretois – Origine et Differentiation. – In: *Botanika Chronika*, **10**, 125-135.
- Detchmندی, D.M., Pace, W.H. (1972): A Model for Spectral Signature Variability for Mixtures. – In: *Proc. Earth Resources Observations and Information Analysis Conf.*, Tullahoma Tennessee, 596-620.
- Detoraki, T. (1990): *History of Crete*. – Theohari Detoraki Publications, Heraklion.
- Detrakis, M., Tsiourlis, G.M. (1998): Preliminary Results on Breeding Bird Communities in Relation to Grazing in Mediterranean Ecosystems of Asterousia Mountain in Crete, Greece. – In: Papanastasis, V.P., Peter, D. (Hrsg.), *Proc. Int. Workshop "Ecological Basis of Livestock Grazing in Mediterranean Ecosystems"*, Thessaloniki (Greece), 23<sup>rd</sup> – 25<sup>th</sup> October 1997, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 98-102.
- Diamantopoulos, J., Pirintsos, S.A., Margaris, N.S., Stamou, G.P. (1994): Variation in Greek Phrygana Vegetation in Relation to Soil and Climate. – In: *Journal of Vegetation Science*, **5**, 335-360.
- Di Castri, F. (1981): Mediterranean Type Shrublands of the World. – In: Di Castri, F., Goodall, D.W., Specht, R.L. (Hrsg.), *Mediterranean-type Shrublands, (Ecosystems of the World, 11)*, Elsevier, Amsterdam/Oxford/New York.
- Di Castri, F., Goodall, D.W., Specht, R.L. (Hrsg., 1981): *Mediterranean-type Shrublands. – (Ecosystems of the World, 11)*, Elsevier, Amsterdam/Oxford/New York.
- Dinguirard, M., Slater, P.N. (1999): Calibration of Space-multispectral Imaging Sensors: A Review. – In: *Remote Sensing of Environment*, **68**, 194-205.
- Dozier, J., Frew, J. (1990): Rapid Calculation of Terrain Parameters for Radiation Modeling from Digital Elevation Model Data. – In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **28**, 963-969.
- Drake, N.A., Settle, J.J. (1989): Linear Mixture Modelling of Thematic Mapper Data of the Peruvian Andes. – In: *Proc. 9<sup>th</sup> EARSeL Symp.*, Helsinki, Finland, 27<sup>th</sup> June - 1<sup>st</sup> July 1989, 490-495.
- Dubost, M. (1998): European Policies and Livestock Grazing in Mediterranean Ecosystems. – In: Papanastasis, V.P., Peter, D. (Hrsg.), *Proc. Int. Workshop "Ecological Basis of Livestock Grazing in Mediterranean Ecosystems"*, Thessaloniki (Greece), 23<sup>rd</sup> – 25<sup>th</sup> October 1997, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 298-310.

- Duguay, C.R., Walker, D.A. (1996): Environmental Modeling and Monitoring with GIS: Niwot Ridge Long-term Ecological Research Site. – In: Goodchild, M.F., Steyaert, L.T., Parks, B.O., Johnston, C., Maidment, D., Crane, M., Glendinning, S. (Hrsg.), GIS and Environmental Modeling – Progress and Research Issues, GIS World Books, Fort Collins, CO, 219-223.
- Egli, B.R. (1993): Ökologie der Dolinen im Gebirge Kretas (Griechenland). – Dissertation, Zürich.
- Egli, B.R. (1998): Effects of Grazing on the Natural Forests of Western Crete. – In: Papanastasis, V.P., Peter, D. (Hrsg.), Proc. Int. Workshop “Ecological Basis of Livestock Grazing in Mediterranean Ecosystems”, Thessaloniki (Greece), 23<sup>rd</sup> – 25<sup>th</sup> October 1997, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 103-106.
- Ehlers, M., Welch, R. (1988a): Kartographische Leistungsfähigkeit von Landsat-TM Aufnahmen. Teil 1. In: Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, **56**, 4, 139-147.
- Ehlers, M., Welch, R. (1988b): Kartographische Leistungsfähigkeit von Landsat-TM Aufnahmen. Teil 2. In: Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, **56**, 5, 157-166.
- Ekstrand, S. (1996): Landsat TM-based Forest Damage Assessment: Correction for Topographic Effects. – In: Photogr. Engineering & Remote Sensing, **62**, 2, 151-161.
- Ellison, W.D. (1944): Studies of Raindrop Erosion. – In: Agricultural Engineering, **25**, 131-136.
- Elvidge, C.D. (1990): Visible and Infrared Reflectance Characteristics of Dry Plant Materials. – In: Int. J. Remote Sensing, **12**, 1775-1795.
- Elvidge, C.D., Yuan, D., Weerackoon, R.D., Lunetta, R.S. (1995): Relative Radiometric Normalization of Landsat Multispectral Scanner (MSS) Data Using an Automatic Scattergram-controlled Regression. – In: Photogr. Engineering & Remote Sensing, **61**, 10, 1255-1260.
- EOSAT (Hrsg., 1986): Landsat Technical Notes - New Lookup Tables. Maryland.
- Eurimage (1996): Mitteilung an den Autor.
- European Environment Agency, EEA (Hrsg., 1999): Environment in the European Union at the Turn of the Century. – Kopenhagen.
- Ezra, C.A., Tinney, L.R., Jackson, R.D. (1984): Effect of Soil Background on Vegetation Discrimination Using Landsat Data. – In: Remote Sensing of Environment, **16**, 233-242.
- Folke, C., Berkes, F., Colding, J. (1998): Ecological Practices and Social Mechanisms for Building Resilience and Sustainability. – In: Berkes, F., Folke, C. (Hrsg.), Linking Social and Ecological Systems - Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience, Cambridge University Press, Cambridge/New York/Melbourne, 414-436.
- Footy, G.M., Cox, D.P. (1994): Sub-pixel Land Cover Composition Estimation Using a Linear Mixture Model and Fuzzy Membership Functions. – In: Int. J. Remote Sensing, **15**, 3, 619-631.
- Footy, G.M., Lucas, R.M., Curran, P.J., Honzak, M. (1997): Non-linear Mixture Modelling without End-members Using an Artificial Neural Network. – In: Int. J. Remote Sensing, **18**, 4, 937-953.

- Forman, R.T.T. (1995): Some General Principles of Landscape and Regional Ecology. – In: *Landscape Ecology*, **10**, 133-142.
- Fowler, N.L. (1988): What is a Safe Site? Neighbour, Litter, Germination Date and Patch Effects. – In: *Ecology*, **69**, 947-961.
- Francis, C.F., Thornes, J.B. (1990): Runoff Hydrographs from Three Mediterranean Vegetation Cover Sites. – In: Thornes, J.B. (Hrsg.), *Vegetation and Geomorphology*, Wiley and Sons, London, 363-385.
- Fröhlich, M. (1987): *Westkreta - Zur Geographie der Agrarlandschaft*. – Verlag Dr. Tesdorpf, Berlin/Vilseck.
- García-Haro, F.J., Gilabert, M.A., Meliá, J. (1999): Extraction of Endmembers from Spectral Mixtures. – In: *Remote Sensing of Environment*, **68**, 237-253.
- Giessner, K. (1990): Geo-ecological Controls of Fluvial Morphodynamics in the Mediterranean Subtropics. – In: *Geoökodynamik*, **11**, 17-42.
- Goetz, A.F.H., Vane, G., Solomon, J.E., Rock, B.N. (1985): Imaging Spectrometry for Earth Remote Sensing Science. – In: *Science*, **228**, 1147-1153.
- Gong, P. Miller, J.R., Spanner, M. (1994): Forest Canopy Closure from Classification and Spectral Unmixing of Scene Components - Multisensor Evaluation of an Open Canopy. – In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **32**, 5, 1067-1080.
- Goward, S.N., Williams, D.L. (1997): Landsat and Earth Systems Science: Development of Terrestrial Monitoring. – In: *Photogr. Engineering & Remote Sensing*, **63**, 7, 887-900.
- Graetz, R.D., Gentle, M.R. (1982): The Relationships between Reflectance in the Landsat Wavebands and the Composition of an Australian Semi-arid Shrub Rangeland. – In: *Photogr. Engineering & Remote Sensing*, **48**, 11, 1721-1730.
- Graetz, R.D. (1996): Empirical and Practical Approaches to Land Surface Characterisation and Change Detection. – In: Hill, J., Peter, D. (Hrsg.), *The Use of Remote Sensing for Land Degradation and Desertification Monitoring in the Mediterranean Basin - State of the Art and Future Research*. Proc. Experts Workshop, Valencia, Spain, 13<sup>th</sup>-15<sup>th</sup> June 1994, Brussels/Luxembourg, 9-21.
- Grenon, M., Batisse, M. (1989): *Futures for the Mediterranean Basin. The Blue Plan*. – Oxford University Press, New York.
- Greuter, W. (1975): Die Insel Kreta - Eine geobotanische Skizze. – In: *Zur Vegetation und Flora von Griechenland*. Ergebnisse der 15. Internationalen Pflanzengeographischen Exkursion (IPE) durch Griechenland 1971, (Veröffentlichungen des Geobotanischen Institutes der ETH Zürich, **1**), 141-197, Zürich.
- Grove, A.T., Moody, J., Rackham, O. (Hrsg., 1990): *Stability and Change in the Cretan Landscape*. – Petromarula, **1**, Cambridge, England.
- Grove, A.T., Ispikoudis, J., Kazaklis, A., Moody, J.A., Papanastasis, V., Rackham, O. (1993): *Threatened Mediterranean Landscapes: West Crete*. – EU-Report, Department of Geography, University of Cambridge, Cambridge.
- Grove, A.T., Ispikoudis, I., Karteris, M., Kazaklis, A., Moody, J.A., Papanastasis, V.P., Rackham, O. (1999): *Threatened Mediterranean Landscapes of Western Crete*. – In: Balabanis, P., Peter, D., Ghazi, A., Tsogas, M. (Hrsg.), *Mediterranean Desertification – Research Results and Policy Implications*, vol. 1, Proc. Int. Conf. Oct 29<sup>th</sup> – Nov 1<sup>st</sup>, Crete, Greece, 391-398.

- Grove, J.M. (1990): Climatic Reconstruction in the Eastern Mediterranean with Particular Reference to Crete. – In: Grove, A.T., Moody, J., Rackham, O. (Hrsg.), *Stability and Change in the Cretan Landscape* (Petromarula, 1), Cambridge, England, 16-20.
- Gu, X.F., Verbrugge, M.; Guyot, G. (1992): Inter-étalonnage de Spot1-HRV, Landsat-5 TM et NOAA11-AVHRR dans les domaines du visible et du proche infrarouge. – In: GU, X.F., *Étalonnage et intercomparaison des données satellitaires en utilisant le test site de La Crau*. These de Doctorat de L'Université Paris VII, 197-207.
- Guyot, G. (1990): Optical Properties of Vegetation Canopies. – In: Steven, M.D., Clark, J.A. (Hrsg.), *Applications of Remote Sensing in Agriculture*, Butterworths, London, 19-43.
- Hager, J. (1985): Pflanzenökologische Untersuchungen in den subalpinen Dornpolsterfluren Kretas. – (Dissertationes Botanicae, 89), Gantner Verlag, Vaduz.
- Hay, J.E., McKay, D.C. (1985): Estimating Solar Irradiance on Inclined Surfaces: A Review and Assessment of Methodologies. – In: *Int. J. Solar Energy*, **3**, 203-240.
- Hay, J.E., Perez, R., McKay, D.C. (1986): Addendum and Errata to the Paper Estimating Solar Irradiance on Inclined Surfaces: A Review and Assessment of Methodologies. – In: *Int. J. Solar Energy*, **4**, 321-324.
- Hellenic National Meteorological Service (HNMS, 1996): *Monthly Climatological Bulletin*, **31**, 4.
- Hellden, U. (1991): Desertification - Time for an Assessment? - In: *Ambio*, **20**, 372-383.
- Henyey, L.G., Greenstein, J.L. (1941): Diffuse Radiation in the Galaxy. – In: *Astrophysical Journal*, **93**, 70-83.
- Hill, J. (1993a): High Precision Land Cover Mapping and Inventory with Multi-temporal Earth Observation Satellite Data. The Ardèche Experiment. – Dissertation Universität Trier, EUR 15271 EN, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Hill, J. (1993b): Monitoring Land Degradation and Soil Erosion in Mediterranean Environments. – In: *ITC-Journal*, 1993-4, 323-331.
- Hill, J. (Hrsg., 1996): DeMon – Integrated Approaches to Desertification Mapping and Monitoring in the Mediterranean Basin. – Final Report of the DeMon-1 Project, EUR 16448 EN, Brussels/Luxembourg.
- Hill, J. (1997): A Short User's Guide for Atmospheric Correction Programs of the Remote Sensing Department, University of Trier, Germany. – FEUT Image Processing Software, **1**, Technical Report, Universität Trier, Abteilung Fernerkundung, Trier,.
- Hill, J. (1998): Neue Wege zur geowissenschaftlichen Auswertung multispektraler Fernerkundungsdaten. – In: *Geographische Rundschau*, **50**, 2, 113-119.
- Hill, J., Aifadopoulou, D. (1990): Radiometric Comparison of Landsat-5 TM and SPOT HRV-1 Sensors for the Use in Multiple Sensor Approaches. – In: *Remote Sensing of Environment*, **34**, 55-70.
- Hill, J., Sturm, B. (1991): Radiometric Correction of Multi-temporal Thematic Mapper Data for the Use in Agricultural Land-cover Classification and Vegetation Monitoring. – In: *Int. J. Remote Sensing*, **12**, 7, 1471-1491.
- Hill, J., Hostert, P. (1996): Monitoring the Growth of a Mediterranean Metropolis with Landsat TM Data - The Case of Athens, Greece. – In: Parlow, E. (Hrsg.), *Progress in*

- Environmental Remote Sensing Research and Applications. Proc. 15<sup>th</sup> EARSeL Symp., Basel, 4<sup>th</sup> - 6<sup>th</sup> September 1995, 21-31.
- Hill, J., Mehl, W., Altherr, M. (1994): Land Degradation and Soil Erosion Mapping in a Mediterranean Ecosystem. – In: Hill, J., Mégier, J. (Hrsg.), *Imaging Spectrometry - a Tool for Environmental Observations*, Brussels / Luxembourg, 237-260.
- Hill, J., Sommer, S., Mehl, W., Mégier, J. (1995a): Use of Earth Observation Satellite Data for Land Degradation Mapping and Monitoring in Mediterranean Ecosystems: Towards a Satellite Observatory. In: Hill, J., Peter, D. (Hrsg.), *Environmental Monitoring and Assessment*, **37**, 1-16. Kluwer Academic Publishers.
- Hill, J., Mehl, W., Radeloff, V. (1995b): Improved Forest Mapping by Combining Corrections of Atmospheric and Topographic Effects in Landsat TM Imagery. – In: Askne, J. (Hrsg.), *Sensors and Environmental Applications in Remote Sensing*, Proc. 14<sup>th</sup> EARSeL Symp., Göteborg, Sweden, 6-8 June 1994, 143-151.
- Hill, J., Sommer, S., Mehl, W., Mégier, J. (1996): A Conceptual Framework for Mapping and Monitoring the Degradation of Mediterranean Ecosystems with Remote Sensing. – In: Hill, J., Peter, D. (Hrsg.), *The Use of Remote Sensing for Land Degradation and Desertification Monitoring in the Mediterranean Basin - State of the Art and Future Research*. Proc. Experts Workshop, Valencia, Spain, 13<sup>th</sup>-15<sup>th</sup> June 1994, Brussels/Luxembourg, 23-43.
- Hill, J., Hostert, P., Tsiourlis, G., Kasapidis, P., Udelhoven, T., Diemer, C. (1998): Monitoring 20 Years of Increased Grazing Impact on the Greek Island of Crete with Earth Observation Satellites. – In: *Journal of Arid Environments*, **39**, 165-178.
- Hill, J., Hostert, P., Röder, A., Lacaze, B., Riezebos, H., Brouwer, L., De Jong, S., Caselles, V., Valor, E., Sommer, S., Mehl, W., Preissler, H., Tsiourlis, G., Kasapidis, P. (2000): DeMon-II - An Integrated Approach to Assess and Monitor Desertification Processes in the Mediterranean Basin. – EU-Report, EU-Kontrakt ENV4-CT95-0166 (DG 12 - DTEE), Universität Trier, Abteilung Fernerkundung, Trier.
- Hobbs, R.J. (1990): Remote Sensing of Spatial and Temporal Dynamics of Vegetation. – In: Hobbs, R.J., Mooney, H.A. (Hrsg.), *Remote Sensing of Biosphere Functioning (Ecological Studies: Analysis and Synthesis, 79)*, 203-219.
- Holben, B.N., Justice, C.O. (1981): An Examination of Spectral Band Ratioing to Reduce the Topographic Effect of Remotely Sensed Data. – In: *Int. J. Remote Sensing*, **2**, 115-123.
- Holm, R.G. (1987): The Absolute Radiometric Calibration of Space Based Sensors. – Dissertation, University of Arizona, Tucson.
- Horwitz, H.M., Lewis, J.T., Pentland, A.P. (1975): Estimating Proportions of Objects from Multispectral Scanner Data. – Final Report, NASA Contract NAS9-14123, NASA-CR-141862, Environmental Research Institute, Michigan.
- Hostert, P. (1994): Ein optimiertes Verfahren zur Landnutzungsklassifikation heterogen strukturierter Gebiete. Untersuchungen im Raum Trier. – Diplomarbeit, Universität Trier, Trier.
- Hostert, P. (1995): Remote Sensing for Urban Applications: Enhanced Satellite Image Interpretation with Spectral Mixture Analysis. – MSc Thesis, University of Edinburgh, Scotland.
- Hostert, P., Hill, J. (1997): Field Spectroscopy of Soils, Rocks and Vegetation Elements in Crete Study Site. Intermediate Results of the DeMon-II Project. – Unveröffentlichter Projektbericht, EU-Kontrakt ENV4-CT95-0166 (DG 12 - DTEE).

- Hostert, P., Udelhoven, T., Hill, J., Diemer, C. (1997): Employing a SPOT-derived Orthophoto and DEM for Geometrically Correcting Landsat Data. Intermediate Results of the DeMon-II Project. – Unveröffentlichter Projektbericht, EU-Kontrakt ENV4-CT95-0166 (DG 12 - DTEE).
- Hostert, P., Preissler, H. (1997): Spectral Data Catalogue of the Field Campaign in Crete, Greece (27.4. - 11.5.1997). – Unveröffentlichter Projektbericht, EU-Kontrakt ENV4-CT95-0166 (DG 12 - DTEE).
- Hostert, P., Radeloff, V., Röder, A., Hill, J. (1999a): Monitoring 20 Years of Vegetation Dynamics with Spectral Unmixing of Landsat Data in Crete, Greece. – In: Abstracts of the 5<sup>th</sup> World Congress of the International Association of Landscape Ecology, 29<sup>th</sup> July - 3<sup>rd</sup> August 1999, Snowmass Village, CO, **1**, 69.
- Hostert, P., Seidel, O., Röder, A., Hill, J. (1999b): Customizing ArcView: GIS als Instrument zum Management fernerkundlicher Geländekampagnen - Fallstudie Zentralkreta. – In: Strobl, K. (Hrsg.), Beiträge zum Symposium für Angewandte Geographische Informationstechnologie (AGIT), Salzburg, 8. - 10. Juli 1999, 273-279.
- Houghton, R.A. (1994): The Worldwide Extent of Land-use Change. – In: BioScience, **44**, 305-313.
- Huete, A.R., Jackson, R.D., Post, D.F. (1985): Spectral Response to a Plant Canopy with Different Soil Backgrounds. – In: Remote Sensing of Environment, **53**, 37-53.
- Imagerie Stéreo Appliquée au Relief, ISTAR (1996): Datenblatt und Mitteilung an den Autor.
- Imeson, A.C. (1995): The Physical, Chemical and Biological Degradation on Soil. – In: Fantechi, R., Peter, D., Balabanis, P., Rubio, J.L. (Hrsg.), Desertification in a European Context, Brussels/Luxembourg, 153-168.
- Imeson, A.C. (1996): Desertification Research – Thematic Issues and Spatial and Temporal Scaling. – In: Hill, J., Peter, D. (Hrsg.), The Use of Remote Sensing for Land Degradation and Desertification Monitoring in the Mediterranean Basin – State of the Art and Future Research, Proc. Experts Workshop, Valencia, Spain, 13<sup>th</sup>-15<sup>th</sup> June 1994, Brussels/Luxembourg, 1-7.
- Imeson, A.C., Cammeraat, L.H., Perez-Trejo, F. (1995): Desertification Response Units. – In: Fantechi, R., Peter, D., Balabanis, P., Rubio, J.L. (Hrsg.), Desertification in a European Context, Brussels/Luxembourg, 169-194.
- Irvine, W.M. (1965): Multiple Scattering by Large Particles. – In: Astrophysical Journal, **142**, 2, 1563-1575.
- Iqbal, M. (1983): An Introduction to Solar Radiation. – Academic Press, New York.
- Ispikoudis, I., Lyrintzis, G., Kyriakakis, S. (1993): Impact of Human Activities on Mediterranean Landscapes in Western Crete. – In: Landscape and Urban Planning, **24**, 1-4, 259-271.
- Itten, K., Meyer, P., Kellenberger, T., Leu, R., Sandmeier, S., Bitter, P., Seidel, K. (1992): Correction of the Impact of Topography and Atmosphere on Landsat-TM Forest Mapping of Alpine Regions. – (Remote Sensing Series, **18**), Universität Zürich, Zürich.
- Jacobshagen, V. (Hrsg., 1986): Geologie von Griechenland. – (Beiträge zur regionalen Geologie der Erde, **19**), Gebrüder Bornträger, Berlin/Stuttgart.
- Jahn, R., Schönfelder, P. (1995): Exkursionsflora für Kreta. – Stuttgart.

- Jaquemoud, S. (1995): Extraction of Vegetation Biophysical Parameters by Inversion of the PROSPECT+SAIL Models on Sugar Beet Canopy Reflectance Data. Application to TM and AVIRIS Sensors. – In: Remote Sensing of Environment, **52**, 163-172.
- Johnson, D.L., Lewis, L.A. (1995): Land Degradation. Creation and Destruction. – Blackwell, Oxford/Cambridge.
- Kaufman, Y.J., Tanré, D. (1996): Direct and Indirect Methods for Correcting the Aerosol Effect on Remote Sensing. – In: Remote Sensing of Environment, **55**, 65-79.
- Kiang, R.K. (1982): Atmospheric Effects on TM Measurements: Characterization and Comparison with the Effects of MSS. – In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, **20**, 365-370.
- Kneizys, F.X., Shettle, E.P., Gallery, W.O., Chetwynd, J.H., Abreu, L.W., Selby, J.E.A., Fenn, R.W., McClatchey, R.A. (1980): Atmospheric Transmittance/ Radiance - Computer Code LOWTRAN 5. – Environmental Research Papers 697 (AFGL-TR-89-0067), Air Force Geophysics Laboratory, Optical Physics Division, Hanscom AFB, Massachusetts.
- Kneizys, F.X., Shettle, E.P., Abreu, L.W., Chetwynd, J.H., Anderson, G.P., Gallery, W.O., Selby, J.E.A., Clough, S.A. (1988): User's Guide to LOWTRAN-7, Air Force Geophysics Laboratory, AFGL-TR-88-0177, Hanscom AFB, Massachusetts.
- Knithakis, M. (1990): The Hydro-geology of Crete. – In: Grove, A.T., Moody, J., Rackham, O. (Hrsg.), Stability and Change in the Cretan Landscape (Petromarula, **1**), Cambridge, England, 65-67.
- Kramer, H.J. (1996): Observation of the Earth and its Environment. Survey of Missions and Sensors. – Berlin/Heidelberg/New York.
- Kruse, F.A., Lefkoff, A.B., Boardman, J.B., Heidebrecht, K.B., Shapiro, A.T., Barloon, P.J., Goetz, A.F.H. (1993): The Spectral Image Processing System (SIPS) - Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data. – In: Remote Sensing of Environment, **44**, 145-163.
- Kuntze, H., Roeschmann, G., Schwerdtfeger, G. (1994): Bodenkunde. – Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- Kuss, S.E. (1965): Eine pleistozäne Säugetierfauna der Insel Kreta. – Berichte der Naturforschungsgesellschaft Freiburg i.Br., **55**, 271-348.
- Lambin, E.F. (1994): Modelling Deforestation Processes. A Review. – Trees Series B: Research Report 1, EUR 15744 EN, Brussels/Luxembourg.
- Lamprey, H.F. (1975): Report on the Desert Encroachment Reconnaissance in Northern Sudan. – National Council for Research, Ministry of Agriculture, Food and Resources, Khartoum.
- Lanter, D.P., Veregin, H. (1992): A Research Paradigm for Propagating Error in Layer-based GIS. – Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, **58**, 825-833.
- Larsson, H. (1993): Linear Regressions for Canopy Cover Estimation in Acacia Woodlands Using Landsat-TM, -MSS and SPOT HRV XS Data. – In: Int. J. Remote Sensing, **14**, 11, 2129-2136.
- Lauer, D.T., Morain, S.A., Salomonson, V.V. (1997): The Landsat Program: Its Origins, Evolution, and Impacts. – In: Photogr. Engineering & Remote Sensing, **63**, 7, 831-838.
- Laws, J.O. (1940): Recent Studies in Raindrops and Erosion. – In: Agricultural Engineering, **21**, 431-433.

- Legg, C., Papanastasis, V.P., Heathfield, D., Arianoutsou, M., Kelly, A., Muetzelfeldt, R., Mazzoleni, S. (1998): Modelling the Impact of Grazing on Vegetation in the Mediterranean: The Approach of the ModMED Project. – In: Papanastasis, V.P., Peter, D. (Hrsg.), Proc. Int. Workshop “Ecological Basis of Livestock Grazing in Mediterranean Ecosystems”, Thessaloniki (Greece), 23<sup>rd</sup> – 25<sup>th</sup> October 1997, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 189-199.
- Le Houérou, H.N. (1981): Impact of Man and His Animals on Mediterranean Vegetation. – In: Di Castri, F., Goddall, D.W., Specht, R. (Hrsg.), Ecosystems of the World, **2**, Mediterranean-type Shrublands, Elsevier, Amsterdam, 479-521.
- Le Houérou, H.N. (1990): Ecological Guidelines to Control Land Degradation in European Mediterranean Countries. – In: Rubio, J.L., Rickson, R.J. (Hrsg.), Strategies to Combat Desertification in Mediterranean Europe, Brussels/Luxembourg, 331-360.
- Liang, S., Strahler, A.H., Jin, X., Zhu, Q. (1997): Comparisons of Radiative Transfer Models of Vegetation Canopies and Laboratory Measurements. – In: Remote Sensing of Environment, **61**, 129-138.
- Lienau, C. (1989): Griechenland: Geographie eines Staates der europäischen Südperipherie. – Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Verlag Eugen Ulmer, Darmstadt.
- Lyrantzis, G. (1996): Human Impact Trend in Crete: The Case of Psilorites Mountain. – Environmental Conservation, **23**, 2, 140-148.
- Lyrantzis, G., Papanastasis, V. (1995): Human Activities and their Impact on Land Degradation - Psilorites Mountain in Crete: A Historical Perspective. – In: Land Degradation and Rehabilitation, **6**, 79-93.
- Lyrantzis, G., Papanastasis, V., Ispikoudis, I. (1998): Role of Livestock Husbandry in Social and Landscape Changes in White Mountains and Psilorites of Crete. – In: Papanastasis, V.P., Peter, D. (Hrsg.), Proc. Int. Workshop “Ecological Basis of Livestock Grazing in Mediterranean Ecosystems”, Thessaloniki (Greece), 23<sup>rd</sup> – 25<sup>th</sup> October 1997, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 322-327.
- Mabbutt, J.A. (1985): Desertification of the World’s Rangelands. – In: Desertification Control Bulletin, **12**, 1-11.
- Magioris, S.N., Tsiourlis, G.M. (1990): Annual Evolution – Activity and Influence of the Goat in Two Insular Biotopes Island of Naxos, Cyclades, Aegean Sea, Greece. – In: Rapport du Commission Internationale pour l’Exploration Scientifique de la Mer Méditerranée, **32**, 114-115.
- Mainguet, M. (1994): Desertification – Natural Background and Human Mismanagement. – Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg.
- Mainguet, M. (1999): Aridity – Droughts and Human Development. – Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg.
- Markham, B.L., Barker, J.L. (1983): Spectral Characterization of the Landsat-4 MSS Sensors. – Photogr. Engineering & Remote Sensing, **49**, 6, 811-833.
- Markham, B.L., Barker, J.L. (1986): Landsat MSS and TM Post-calibration Dynamic Ranges, Exoatmospheric Reflectances and At-satellite Temperatures. In: EOSAT (Hrsg.), Landsat Technical Notes - New Lookup Tables. Maryland.
- Markham, B.L., Barker, J.L. (1987a): Radiometric Properties of US Processed Landsat MSS Data. – In: Remote Sensing of Environment, **22**, 39-73.



- Markham, B.L., Barker, J.L. (1987b): Thematic Mapper Bandpass Solar Exoatmospheric Irradiances. – In: *Int. J. Remote Sensing*, **8**, 3, 517-523.
- Marsh, S.E., Lyon, R.J.P. (1980): Quantitative Relationships of Near-surface Spectra to Landsat Radiometric Data. – In: *Remote Sensing of Environment*, **10**, 241-262.
- Matthäs, U. (1988): Die laubwerfenden Eichenwälder Kretas. – (Dissertationes Botanicae, 119), Gantner Verlag, Vaduz.
- Mayer, A. (1995): Comparative Study of the Coastal Vegetation of Sardinia (Italy) and Crete (Greece) with Respect to the Effects of Human Influence. – (Libri Botanici, **15**), IHW-Verlag, München.
- McCubbin, I., Green, R., Lang, H., Roberts, D. (1998): Mineral Mapping Using Partial Unmixing at Ray Mine, AZ. – In: *Proc. 8<sup>th</sup> Annual JPL Airborne Earth Science Workshop*, Pasadena, 112-116.
- Menjli, M. (1994): Effects of Pastoral Activities on Desertification of Mountain Psilorities. – Dissertation, Chania, Crete.
- Metaxas, D.A. (1990): Climatic Fluctuations in Crete During the Twentieth Century. – In: Grove, A.T., Moody, J., Rackham, O. (Hrsg.), *Stability and Change in the Cretan Landscape (Petromarula, 1)*, Cambridge, England, 21-25.
- Mika, A.M. (1997): Three Decades of Landsat Instruments. – In: *Photogr. Engineering & Remote Sensing*, **63**, 7, 839-852.
- Milton, E.J., Lawless, K.P., Roberts, A., Franklin, S.E. (1997): The Effects of Unresolved Scene Elements on the Spectral Response of Calibration Targets: an Example. – In: *Canadian Journal of Remote Sensing*, **23**, 252-256.
- Moran, M.P., Jackson, R.D., Clarke, T.R., Qi, J., Cabot, F., Thome, K.J., Markham, B.L. (1995): Reflectance Factor Retrieval from Landsat-TM and SPOT-HRV-data for Bright and Dark Targets. – In: *Remote Sensing of Environment*, **52**, 218-230.
- Moreno, J.M. (1999): Forest Fires: Trends and Implications in Desertification Prone Areas of Southern Europe. – In: Balabanis, P., Peter, D., Ghazi, A., Tsogas, M. (Hrsg.), *Mediterranean Desertification – Research Results and Policy Implications*, vol. 1, *Proc. Int. Conf. Oct 29<sup>th</sup> – Nov 1<sup>st</sup>*, Crete, Greece, 115-150.
- Mustard, J.F. (1993): Relationships of Soil, Grass, and Bedrock over the Kaweah Serpentinite Melange through Spectral Mixture Analysis of AVIRIS Data. – In: *Remote Sensing of Environment*, **44**, 293-308.
- Nahal, I. (1981): The Mediterranean Climate from a Biological Viewpoint. – In: Di Castri, F., Goodall, D.W., Specht, R.L. (Hrsg.), *Mediterranean-type Shrublands, (Ecosystems of the World, 11)*, Elsevier, Amsterdam/Oxford/New York.
- National Statistical Service of Greece (NSSG, 1991): Results of the Agriculture-Livestock Census of March 17, 1991. – Athens, Greece.
- National Statistical Service of Greece (NSSG, 1996): Agriculture Statistics 1996. – Athens, Greece.
- Nelson, R.F. (1985): Sensor-Induced Temporal Variability of Landsat MSS Data. – In: *Remote Sensing of Environment*, **18**, 35-48.
- Noy-Meir, I. (1995): Interactive Effects of Fire and Grazing on Structure and Diversity of Mediterranean Grasslands. – In: *Journal of Vegetation Science*, **6**, 701-710.

- Noy-Meir, I., Gutman, M., Kaplan, Y. (1989): Responses of Mediterranean Grassland Plants to Grazing and Protection. – In: *Journal of Ecology*, **77**, 290-310.
- O'Neill, R.V., Krummel, J.R., Gardner, R.H., Sugihara, G., Jackson, B., De Angelis, D.L., Milne, B.T., Turner, M.G., Zygmunt, B., Christensen, F.W., Dale, V.H., Graham, R.L. (1988): Indices of Landscape Pattern. – In: *Landscape Ecology*, **1**, 3, 153-162.
- Pala, V., Pons, X. (1995): Incorporation of Relief in Polynom-based Geometric Correction. – In: *Photogr. Engineering & Remote Sensing*, **61**, 7, 935-944.
- Palutikof, J.P., Trigo, R.M., Adcock, S.T. (1999): Scenarios of Future Rainfall over the Mediterranean: Is the Region Drying? – In: Balabanis, P., Peter, D., Ghazi, A., Tsogas, M. (Hrsg.), *Mediterranean Desertification – Research Results and Policy Implications*, vol. 1, Proc. Int. Conf. Oct 29<sup>th</sup> – Nov 1<sup>st</sup>, Crete, Greece, 33-39.
- Pantis, J.D., Mardiris, T.A. (1992): The Effects of Grazing and Fire on Degradation Processes of Mediterranean Ecosystems. – In: *Israel Journal of Botany*, **41**, 233-242.
- Papanastasis, V.P. (1998): Livestock Grazing in Mediterranean Ecosystems: an Historical and Policy Perspective. – In: Papanastasis, V.P., Peter, D. (Hrsg.), Proc. Int. Workshop “Ecological Basis of Livestock Grazing in Mediterranean Ecosystems”, Thessaloniki (Greece), 23<sup>rd</sup> – 25<sup>th</sup> October 1997, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 5-9.
- Papanastasis, V.P., Kyriakakis, S., Ispikoudis, J. (1990): Forestry and Grazing Practices in Crete. – In: Grove, A.T., Moody, J., Rackham, O. (Hrsg.), *Stability and Change in the Cretan Landscape (Petromarula, 1)*, Cambridge, England, 42-46.
- Papanastasis, V.P., Kazaklis, A. (1998): Land Use Changes and Conflicts in the Mediterranean-type Ecosystems of Western Crete. – In: *Ecological Studies*, **136**, 141-154.
- Pech, R.P., Davis, A.W., Lamacraft, R.R., Graetz, R.D. (1986): Calibration of LANDSAT Data for Sparsely Vegetated Semi-arid Rangelands. – In: *Int. J. Remote Sensing*, **7**, 12, 1729-1750.
- Perez-Trejo, F. (1994): Desertification and Land Degradation in the European Mediterranean. – EUR 14850 EN, Office of Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Pickup, G. (1996): Estimating the Effects of Land Degradation and Rainfall Variation on Productivity in Rangelands: An Approach Using Remote Sensing and Models of Grazing and Herbage Dynamics. – In: *Journal of Applied Ecology*, **33**, 819-832.
- Pickup, G., Bastin, G.N., Chewings, V.H. (1998): Identifying Trends in Land Degradation in Non-equilibrium Rangelands. – In: *Journal of Applied Ecology*, **35**, 365-377.
- Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Shpritz, L., Fitton, L., Saffouri, R., Blair, R. (1999): Assessment of the Environmental and Economic Costs of Soil Erosion. – In: Balabanis, P., Peter, D., Ghazi, A., Tsogas, M. (Hrsg.), *Mediterranean Desertification – Research Results and Policy Implications*, vol. 1, Proc. Int. Conf. Oct 29<sup>th</sup> – Nov 1<sup>st</sup>, Crete, Greece, 285-329.
- Poesen, J. (1995): Soil Erosion in Mediterranean Environments. – In: Fantechi, R., Peter, D., Balabanis, P., Rubio, J.L. (Hrsg.), *Desertification in a European Context*, Brussels/Luxembourg, 125-152.

- Preissler (1996): Spectral Data Catalogue of the Field Campaign in Crete, Greece (2.10. - 9.10.1996). – Unveröffentlichter Projektbericht, EU-Kontrakt ENV4-CT95-0166 (DG 12 - DTEE).
- Preissler, H., Bohbot, H., Mehl, W., Sommer, S. (1998): MEDSPEC - a Spectral Database as a Tool to Support the Use of Imaging Spectroscopy Data for Environmental Monitoring. – In: Schaepman, Schlaepfer, Itten (Hrsg.), 1st EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, Zurich, 6-8 October 1998, 455-462.
- Price, J.C. (1994): How Unique are Spectral Signatures? - In: Remote Sensing of Environment, **49**, 181-186.
- Pulina, G., Cappio-Borlino, A., D'Angelo, M., Francesconi, A.H.D. (1998): Grazing in Mediterranean Ecosystems: A Complex Approach as Addressed in the EU MEDALUS Project. – In: Papanastasis, V.P., Peter, D. (Hrsg.), Proc. Int. Workshop "Ecological Basis of Livestock Grazing in Mediterranean Ecosystems", Thessaloniki (Greece), 23<sup>rd</sup> – 25<sup>th</sup> October 1997, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 173-188.
- Quézel, P. (1981): Floristic Composition and Phytosociological Structure of Sclerophyllous Matorral around the Mediterranean. – In: Di Castri, F., Goodall, D.W., Specht, R.L. (Hrsg.), Mediterranean-type Shrublands, (Ecosystems of the World, **11**), Elsevier, Amsterdam/Oxford/New York, 107-121.
- Rackham, O. (1990): Vegetation History of Crete. – In: Grove, A.T., Moody, J., Rackham, O. (Hrsg.), Stability and Change in the Cretan Landscape (Petromarula, **1**), Cambridge, England, 29-39.
- Rackham, O., Moody, J. (1996): The Making of the Cretan Landscape. – Manchester University Press, Manchester/New York.
- Radeloff, V., Hill, J., Mehl, W. (1997): Forest Mapping from Space. Enhanced Satellite Data Processing by Spectral Mixture Analysis and Topographic Corrections. – EUR 17702 EN, European Commission, Brussels/Luxembourg.
- Richards, J.A. (1994): Remote Sensing Digital Image Analysis – an Introduction. – Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York.
- Richter, R. (1997): Correction of Atmospheric and Topographic Effects for High Spatial Resolution Satellite Imagery. – In: Int. J. Remote Sensing, **18**, 1099-1111.
- Richter, R. (1998): Correction of Satellite Imagery over Mountainous Terrain. – In: Applied Optics, **37**, 18, 4004-4015.
- Ringrose, S., Matheson, W., Mogotsi, B., Tempest, F. (1989): The Darkening Effect in Drought Affected Savanna Woodland Environments Relative to Soil Reflectance in Landsat and SPOT Wavebands. – In: Remote Sensing of Environment, **30**, 1-19.
- Roberts, D.A., Smith, M.O., Adams, J.B. (1993): Green Vegetation, Nonphotosynthetic Vegetation, and Soils in AVIRIS Data. – In: Remote Sensing of Environment, **44**, 255-269.
- Röder, A. (1997): Möglichkeiten der Interkalibrierung von Landsat TM und MSS zur Ableitung vergleichbarer Vegetations- und Bodenparameter - dargestellt am Beispiel Kreta. – Diplomarbeit an der Universität Trier, Trier.

- Röder, A., Hill, J., Hostert, P. (1998): A Summary on Calibration Issues for Landsat-EOS Data. Intermediate Results of the DeMon-II Project. – Unveröffentlichter Projektbericht, EU-Kontrakt ENV4-CT95-0166 (DG 12 - DTEE).
- Röder, A., Hostert, P., Hill, J. (2000): Evaluation of Remotely Sensed Environmental Change in Central Crete. – Unveröffentlichter Projektbericht, EU-Kontrakt 15418-1999-11 F1ED ISP D (JRC).
- Röder, A., Hill, J., Hostert, P. (2001): Radiometric Intercalibration of Landsat-TM and -MSS Data for Quantitative Long-term Environmental Monitoring. – In: 20<sup>th</sup> EARSeL Symposium - Remote Sensing in the 21st Century, 14<sup>th</sup>-16<sup>th</sup> June 2000, Dresden, Deutschland (in Druck).
- Rodriguez, V., Gigord, P., De Gaujac, A.C., Munier, P., Begni, G. (1988): Evaluation of the Stereoscopic Accuracy of the SPOT Satellite. – In: Photogr. Engineering & Remote Sensing, **54**, 2, 217-221.
- Roughgarden, J., Running, S.W., Matson, P.A. (1991): What Does Remote Sensing Do for Ecology? - In: Ecology, **72**, 6, 1918-1922.
- Rother, K. (1993): Der Mittelmeerraum. Ein geographischer Überblick. – Teubner Studienbücher, Stuttgart.
- Royer, A., Charbonneau, L., Brochu, R., Murphy, J., Teillet, P.H. (1987): Radiometric Comparison of the Landsat-5 TM and MSS Sensors. – In: Int. J. Remote Sensing, **8**, 4, 579-591.
- Royer, A., Charbonneau, L., Teillet, P.M. (1988): Interannual Landsat-MSS Reflectance Variations in an Urbanized Zone. Remote Sensing of Environment, **24**, 423-446.
- Rubio, J.L. (1995): Desertification - Evolution of a Concept. – In: Fantechi, R., Peter, D., Balabanis, P., Rubio, J.L. (Hrsg.), Desertification in a European Context: Physical and Socio-economic Aspects. EUR 15415 EN, European Commission, DG XIII, Luxembourg.
- Sachs, L. (1997): Angewandte Statistik. Anwendung statistischer Methoden. – Springer Verlag, Berlin/Heidelberg/New York.
- Sabol, D.E., Adams, J.B., Smith, M.O. (1990): Predicting the Spectral Detectability of Surface Materials Using Spectral Mixture Analysis. – In: Proc. IGARSS 1990, College Park, MD, 967-970.
- Sabol, D.E., Adams, J.B., Smith, M.O. (1992): Quantitative Subpixel Spectral Detection of Targets in Multispectral Images. – In: Journal of Geophysical Research, **97**, E2, 2659-2672.
- Schlittgen, R., Streitberg, B.H.J. (1999): Zeitreihenanalyse. – R. Oldenbourg Verlag, München/Wien.
- Schott, J.R. (1997): Remote Sensing – The Image Chain Approach. – Oxford University Press, New York/Oxford.
- Schott, J.R., Salvaggio, C., Volchok, W.J. (1988): Radiometric Scene Normalization Using Pseudo-invariant Features. – In: Remote Sensing of Environment, **26**, 1-16.
- Sciortino, M., Svalduz, A. (2000): Report of the Group of Annex IV Countries on the Implementation of the UNCCD. – Rom.
- Selby, J.E.A., Kneizys, F.X., Chetwynd, J.H., McClatchey, R.A. (1978): Atmospheric Transmittance/Radiance: Computer Code LOWTRAN-4, Air Force Geophysics Laboratory, AFGL-TR-78-0053, AD A058 643, Bedford, Massachusetts.

- Seligman, N.G., Perevolotsky, A. (1994): Has Intensive Grazing by Domestic Livestock Degraded Mediterranean Basin Rangelands? – In: Arianoutsou, M., Groves, R.H. (Hrsg.), *Plant-animal Interactions in Mediterranean-type Ecosystems*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London, 93-103.
- Settle, J.J., Drake, N.A. (1993): Linear Mixing and the Estimation of Ground Cover Proportions. – In: *Int. J. Remote Sensing*, **14**, 6, 1159-1177.
- Singer, R.B., McCord, T.B. (1979): Large Scale Mixing of Light and Dark Surface Materials and Implications for the Analysis of Spectral Reflectance. – In: *Proc. 10<sup>th</sup> Lunar Planet Science Conference*, 1835-1848.
- Skidmore, A.K., Schmidt, K.S. (1998): Mapping Rangeland Vegetation Using Hyperspectral Vegetation Spectra. – In: Schaepman, Schlaepfer, Itten (Hrsg.), *1st EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy*, Zurich, 6-8 October 1998, 285-297.
- Slater, P.N., Biggar, S.F., Holm, R.G., Jackson, R.D., Mao, Y., Moran, M.P., Palmer, J.M., Yuan, B. (1986): Absolute Radiometric Calibration of the Thematic Mapper. – In: *SPIE*, **660**, 2-8.
- Slater, P.N., Biggar, S.F., Holm, R.G., Jackson, R.D., Mao, Y., Moran, M.P., Palmer, J.M., Yuan, B. (1987): Reflectance- and Radiance-Based Methods for the In-flight Absolute Calibration of Multispectral Sensors. – In: *Remote Sensing of Environment*, **22**, 11-37.
- Slater, P.N., Biggar, S.F., Palmer, J.M., Thome, K.J. (1995): Unified Approach to Pre- and In-flight Satellite-sensor Absolute Radiometric Calibration. – In: *Proc. SPIE Conf. EUROPTO*, **2583**, Paris, France, 130-141.
- Smith, J.A., Lin, T.L., Ranson, K.J. (1980): The Lambertian Assumption in Landsat Data. – In: *Photogr. Engineering & Remote Sensing*, **46**, 1183-1189.
- Smith, M.O., Ustin, S.L., Adams, J.B., Gillespie, A.R. (1990a): Vegetation in Deserts: I. A Regional Measure of Abundance from Multispectral Images. – In: *Remote Sensing of Environment*, **31**, 1-26.
- Smith, M.O., Adams, J.B., Gillespie, A.R. (1990b): Reference Endmembers for Spectral Mixture Analysis. – In: *Proc. 5<sup>th</sup> Australasian Remote Sensing Conference*, Perth, Western Australia, 331-340.
- Smith, M.O., Roberts, D., Hill, J., Mehl, W., Hosgood, B., Verdebout, J., Schmuck, G., Koechler, C., Adams, J. (1994): A New Approach to Quantifying Abundances of Materials in Multispectral Images. – In: *Proc. IGARSS 1994*, Pasadena CA, 2372-2374.
- Smith, G.M., Milton, E.J. (1999): The Use of the Empirical Line Method to Calibrate Remotely Sensed Data to Reflectance. – In: *Int. J. Remote Sensing*, **20**, 13, 2653-2662.
- Sobolev, V.V. (1963): *A Treatise on Radiative Transfer*. Van Nostrand, Princeton.
- Sommer, S. (1999): DeMon-II - An Integrated Approach to Assess and Monitor Desertification Processes in the Mediterranean Basin. – Contribution to the final report by EGEO-SAI (DG JRC), Ispra, Italy. Unveröffentlichter Projektbericht, EU-Kontrakt ENV4-CT95-0166 (DG 12 - DTEE).
- Stoner, E.R., Baumgardner, M.F., Weismiller, R.A., Biehl, L.L., Robinson, B.F. (1980): Extension of Laboratory-measured Soil Spectra to Field Conditions. – In: *Soil Science Society American Journal*, **44**, 572-574.
- Strid, A. (1993): Phytogeographical Aspects of the Greek Mountain Flora. – In: *Fragm. Flor. Geobot. Suppl.*, **2**, 2, 411-433.

- Strid, A., Damanakis, M., Bergmeier, E., Matthäs, U. (1995): Desertification in the White Mountains of Crete. A Botanical Study with Special Reference to the Effects of Grazing and Wildfires. – EU-Report, EU-Kontrakt ENV5V-CT91-0031, University of Copenhagen, Botanical Laboratory, Copenhagen.
- Suits, G.H. (1972): The Calculation of the Directional Reflectance of a Vegetative Canopy. – In: *Remote Sensing of Environment*, **2**, 117-125.
- Tanré, D., Herman, M., Deschamps, P.Y., De Leffe, A. (1979): Atmospheric Modelling of the Background Contribution upon Space Measurements of Ground Reflectance Including Bi-directional Properties. – In: *Applied Optics*, **18**, 3587-3594.
- Tanré, D., Herman, M., Deschamps, P.Y. (1981): Influence of the Background Contribution upon Space Measurements of Ground Reflectance. – In: *Applied Optics*, **20**, 3676-3684.
- Tanré, D., Deroo, C., Duhaut, P., Herman, M., Morcrette, J.J., Perbos, J., Deschamps, P.Y. (1985): Effets atmosphériques en télédétection, logiciel de simulation du signal satellitaire dans le spectre solaire. – In: *Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Coll. on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing*, 16<sup>th</sup> – 20<sup>th</sup> Dec., Les Arcs, France, 315-319.
- Tanré, D., Deroo, C., Duhaut, P., Herman, M., Morcrette, J.J., Perbos, J., Deschamps, P.Y. (1986): Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (5S). User's Guide. – Laboratoire d'optique atmosphérique, Université Lille, France.
- Tanré, D., Deschamps, P.Y., Duhaut, P., Herman, M. (1987): Adjacency Effect Produced by the Atmospheric Scattering in Thematic Mapper Data. – In: *Journal of Geophysical Research*, **92**, D10, 12000-12006.
- Tanré, D., Deroo, C., Duhaut, P., Herman, M., Morcrette, J.J., Perbos, J., Deschamps, P.Y. (1990): Description of a Computer Code to Simulate the Satellite Signal in the Solar Spectrum. The 5S Code. – In: *Int. J. Remote Sensing*, **11**, 4, 659-668.
- Teillet, P.M. (1986): Image Correction for Radiometric Effects in Remote Sensing. – In: *Int. J. Remote Sensing*, **7**, 12, 1637-1651.
- Teillet, P.M., Fedosejevs, G. (1995): On the Dark Target Approach to Atmospheric Correction of Remotely Sensed Data. – In: *Canadian Journal of Remote Sensing*, **21**, 374-387.
- Teillet, P.M., Fedosejevs, G., Irish, R.R., Barker, J.L., Markham, B.L. (2001): Landsat-7 ETM+ and Landsat-5 TM Cross-Calibration Based on Tandem Data Sets. – Vorabdruck unter <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/tekrd/rd/ana/calral/radioe.html>.
- Theodossiou, E., Dowman, I.J. (1990): Heighting Accuracy of SPOT. – In: *Photogr. Engineering & Remote Sensing*, **56**, 12, 1643-1649.
- Thomas, D.S.G., Middleton, N.J. (1994): *Desertification - Exploding the Myth*. – Wiley and Sons, London.
- Thome, K.J., Gellman, D.I., Parada, R.J., Biggar, S.F., Slater, P.N., Moran, M.P. (1993): In-flight Radiometric Calibration of Landsat-5 Thematic Mapper from 1984 to Present. – In: Chavez, P., Schowengerdt, R. (Hrsg.), *Recent Advances in Sensors, Radiometric Calibration and Processing of Remotely Sensed Data*, Proc. SPIE, **1938**, 126-130.
- Thome, K.J., Biggar, S.F., Gellmann, D.I., Slater, P.N. (1994): Absolute Radiometric Calibration of Landsat-5 Thematic Mapper and the Proposed Calibration of the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer. – In: *Proc. IGARRS 1994*, Pasadena, California, 2295-2297.

- Thome, K.J., Markham, B.L., Barker, J.L., Slater, P.N., Biggar, S.F. (1997a): Radiometric Calibration of Landsat. – In: *Photogr. Engineering & Remote Sensing*, **63**, 7, 853-858.
- Thome, K.J., Crowther, B.G., Biggar, S.F. (1997b): Reflectance- and Irradiance-based Calibration of Landsat-5 Thematic Mapper. – In: *Canadian Journal of Remote Sensing*, **23**, 309-317.
- Thornes, J.B. (1995): Mediterranean Desertification and the Vegetation Cover. – In: Fantechi, R., Peter, D., Balabanis, P., Rubio, J.L. (Hrsg.), *Desertification in a European Context*, Brussels/Luxembourg, 169-194.
- Thornes, J.B. (1999): Mediterranean Desertification – the Issue. – In: Balabanis, P., Peter, D., Ghazi, A., Tsogas, M. (Hrsg.), *Mediterranean Desertification – Research Results and Policy Implications*, vol. 1, Proc. Int. Conf. Oct 29<sup>th</sup> – Nov 1<sup>st</sup>, Crete, Greece, 9-15.
- Tomaselli, R. (1981): Main Physiognomic Types and Geographic Distribution of Shrub Systems Related to Mediterranean Climates. – In: Di Castri, F., Goodall, D.W., Specht, R.L. (Hrsg.), *Mediterranean-type Shrublands, (Ecosystems of the World, 11)*, Elsevier, Amsterdam/Oxford/New York, 95-106.
- Tompkins, S., Mustard, J.F., Pieters, C.M., Forsyth, D.W. (1997): Optimization of Endmembers for Spectral Mixture Analysis. – In: *Remote Sensing of Environment*, **59**, 472-489.
- Tromp, M., Epema, G.F. (1998): Spectral Mixture Analysis for Mapping Land Degradation in Semi-arid Areas. – In: *Geologie en Mijnbouw*, **77**, 2, 153-161.
- Tsiourlis, G.M. (1995): Propositions de Gestion du Cheptel Caprin en Grèce Insulaire. – In: *Rapport du Commission Internationale pour l'Exploration Scientifique de la Mer Méditerranée*, **34**, 12-13.
- Tsiourlis, G.M. (1998): Evolution of Biomass and Productivity of Kermes Oak Grazed and Ungrazed Shrubs in an Insular Phryganic Ecosystem in Naxos, Greece. – In: Papanastasis, V.P., Peter, D. (Hrsg.), Proc. Int. Workshop “Ecological Basis of Livestock Grazing in Mediterranean Ecosystems”, Thessaloniki (Greece), 23<sup>rd</sup> – 25<sup>th</sup> October 1997, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 86-89.
- Tsiourlis, G.M., Kasapidis, P. (1997): Preliminary results on the structure of ecosystems and the desertification processes in relation to overgrazing in Asterousia and Psiloritis mountains (Crete, Greece). – *Intermediate Results of the DeMon-II Project. – Unveröffentlichter Projektbericht, EU-Kontrakt ENV4-CT95-0166 (DG 12 - DTEE)*.
- Tsiourlis, G.M., Kasapidis, P. (1999): Final Contribution to the DeMon-II Project. – *Unveröffentlichter Projektbericht, EU-Kontrakt ENV4-CT95-0166 (DG 12 - DTEE)*.
- Tsiourlis, G.M., Kasapidis, P., Parmakelis, A., Dretakis, M. (1998a): Effects of Grazing on the Structure of Phryganic Ecosystem in the Asterousia Mountain of Crete, Greece. – In: Papanastasis, V.P., Peter, D. (Hrsg.), Proc. Int. Workshop “Ecological Basis of Livestock Grazing in Mediterranean Ecosystems”, Thessaloniki (Greece), 23<sup>rd</sup> – 25<sup>th</sup> October 1997, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 94-97.
- Tsiourlis, G.M., Tsekoura, Z., Kasapidis, P., Chatzaki, M., Maroukli, M. (1998b): Preliminary Results on the Woody Plants Composition of Cretan Phryganic Ecosystems. – In: *Progress in Botanical Research. Proc. 1st Balkan Botanical Congress.* – Tsekos, I., Moustakas, M. (Hrsg.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London, 169-172.
- Tueller, P.T. (1991): Remote Sensing Applications for Monitoring Rangeland Vegetation. – In: *Journal of the Grassland Society of Southern Africa*, **8**, 4, 160-167.

- Turner, M.G. (Hrsg., 1987): *Landscape Heterogeneity and Disturbance*. – Springer Verlag, New York.
- Turner, M.G. (1989): *Landscape Ecology: The Effect of Pattern on Process*. – In: *Annual Review of Ecology and Systematics*, **20**, 171-197.
- Turner, M.G. (1990): *Spatial and Temporal Analysis of Landscape Patterns*. – In: *Landscape Ecology*, **4**, 1, 21-30.
- United Nations Convention to Combat Desertification - UNCCD (Hrsg., 1994): *Übereinkommen der Vereinten Nationen zur Bekämpfung der Wüstenbildung in den von Dürre und/oder Wüstenbildung schwer betroffenen Ländern, insbesondere in Afrika*. – Dt. Übersetzung 1998, Bonn.
- United Nations Conference on Desertification - UNCOD (Hrsg., 1977): *Desertification: Its Causes and Consequences*. – Oxford/New York.
- United States Geological Survey - USGS (Hrsg., 1979): *Landsat Data Users Handbook*. – Arlington.
- United States Geological Survey, National Oceanographic and Atmospheric Administration - USGS, NOAA (Hrsg., 1984): *Landsat 4 Data Users Handbook*. – Alexandria.
- Urbanska, K.M. (1992): *Populationsbiologie der Pflanzen – Grundlagen, Probleme, Perspektiven*. – Gustav Fischer Verlag, Stuttgart/Jena.
- Van der Leeuw, S.E. (1998, Hrsg.): *Understanding the Natural and Anthropogenic Causes of Land Degradation and Desertification in the Mediterranean Basin – The Archeomedes Project. Research Results*. – EU-Report 18181 EN, Luxembourg.
- Van der Leeuw, S.E. (1999): *Degradation and Desertification: Some Lessons from the Long-term Perspective*. – In: Balabanis, P., Peter, D., Ghazi, A., Tsogas, M. (Hrsg.), *Mediterranean Desertification – Research Results and Policy Implications*, vol. 1, Proc. Int. Conf. Oct 29<sup>th</sup> – Nov 1<sup>st</sup>, Crete, Greece, 17-31.
- Vasilakis, A. (1994): *The Fauna of the Minoan Crete in Life and Art*. – In: *Geotechnica Kritis (in griechisch)*, **12/13**, 4-8.
- Vermote, E., Tanré, E., Deuzé, J.L., Herman, M., Morcrette, J.J. (1994): *Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S). – 6S User's Guide, Version 0, NASA-GSFC, Code 923, Greenbelt*.
- Vermote, E., Tanré, E., Deuzé, J.L., Herman, M., Morcrette, J.J. (1997): *Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum. An Overview*. – In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **35**, 675-686.
- Volchok, W., Schott, J. (1986): *Scene to Scene Radiometric Normalization of the Reflected Bands of the Landsat Thematic Mapper*. – In: Slater, P.N. (Hrsg.), *Earth Remote Sensing Using the Landsat Thematic Mapper and SPOT Sensor Systems, SPIE-Proc.*, **660**, 9-17.
- Wagner, H.-G. (2001): *Mittelmeerraum*. – Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- Walker, B.H., Steffen, W.L. (1999): *The Nature of Global Change*. – In: Walker, B.H., Steffen, W., Canadell, J., Ingram, J. (Hrsg.), *The Terrestrial Biosphere and Global Change. Implications for Natural and Managed Ecosystems*, Cambridge University Press, Cambridge/New York/Melbourne, 1-18.
- Walker, B.H., Steffen, W.L., Langridge, J. (1999): *Interactive and Integrated Effects of Global Change on Terrestrial Ecosystems*. – In: Walker, B.H., Steffen, W., Canadell, J., Ingram, J. (Hrsg.), *The Terrestrial Biosphere and Global Change. Implications for Natural*



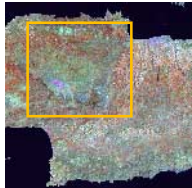
- and Managed Ecosystems, Cambridge University Press, Cambridge/New York/Melbourne, 329-375.
- Welch, R., Jordan, T.R., Ehlers, M. (1985): Comparative Evaluations of the Geodetic Accuracy and Cartographic Potential of Landsat-4 and Landsat-5 Thematic Mapper Image Data. – In: *Photogr. Engineering & Remote Sensing*, **51**, 9, 1249-1262.
- Wilkinson, G.G. (1996): A Review of Current Issues in the Integration of GIS and Remote Sensing. – In: *Int. J. Geographical Information Systems*, **10**, 1, 85-101.
- Woodcock, C.E., Strahler, A.H. (1987): The Factor of Scale in Remote Sensing. – In: *Remote Sensing of Environment*, **21**, 311-332.
- Yassoglou, N. (1995): Land and Desertification. – In: Fantechi, R., Peter, D., Balabanis, P., Rubio, J.L. (Hrsg.), *Desertification in a European Context*, Brussels/Luxembourg, 35-55.
- Yuan, D., Elvidge, C.D. (1993): Application of Relative Radiometric Rectification Procedure to Landsat Data from Use in Change Detection. – In: *Proc. Workshop on Atmospheric Correction of Landsat Imagery*, Torrence, Canada, 162-166.
- Ziogas, C., Anephalos, E., Papanastasis, V.P. (1998): Livestock Farming Systems and Economics in the Psilorites Mountain of Crete, Greece. – In: Papanastasis, V.P., Peter, D. (Hrsg.), *Proc. Int. Workshop “Ecological Basis of Livestock Grazing in Mediterranean Ecosystems”*, Thessaloniki (Greece), 23<sup>rd</sup> – 25<sup>th</sup> October 1997, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 332-335.

*Anhang A*

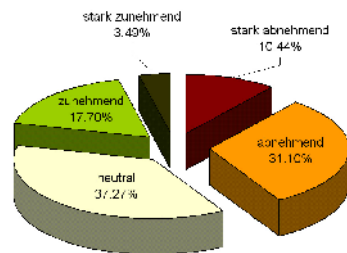
*Kartenmaterial*

# Vegetationsentwicklung im Psiloritis

## Ergebnisse der Zeitreihenanalyse von 1977 bis 1996

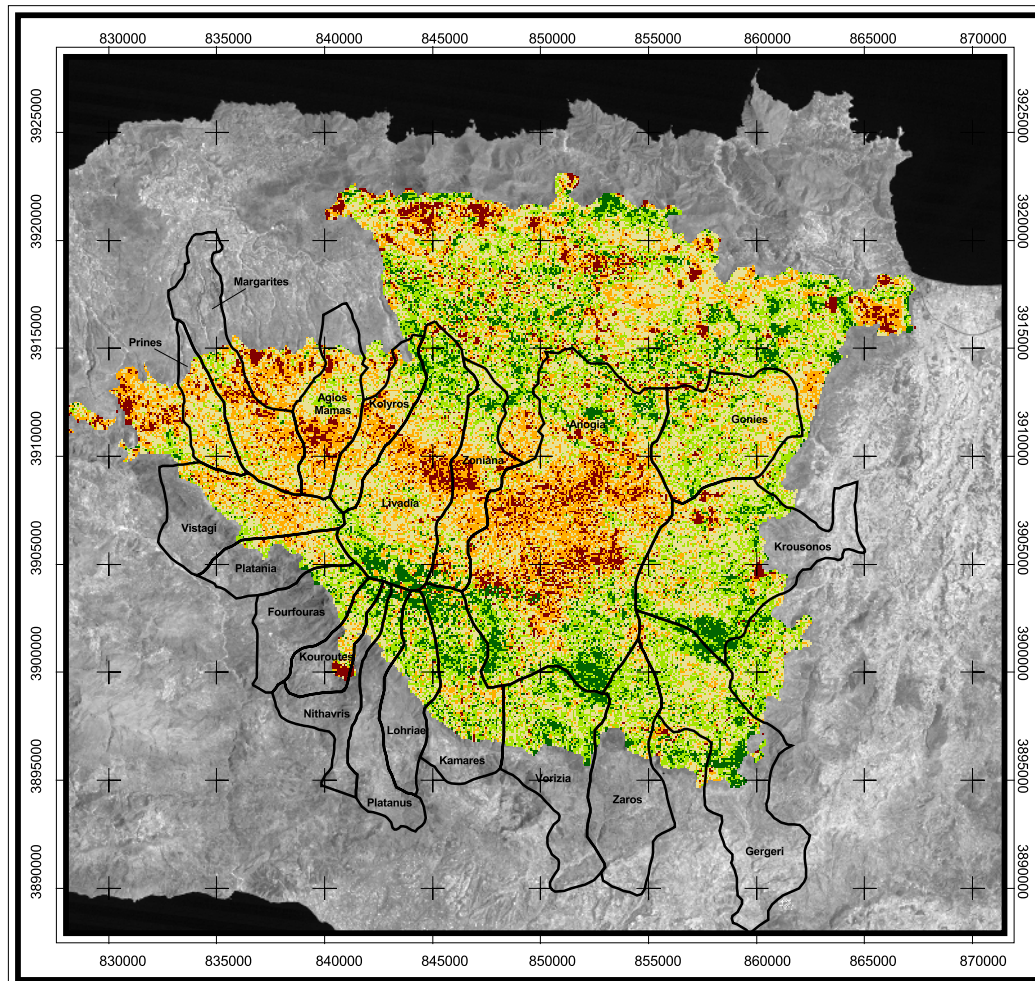


### Flächenstatistik



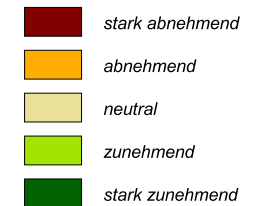
Datengrundlage:  
 Landsat MSS (1977 bis 1983)  
 Landsat TM (1984 bis 1996)  
 Provider: Eurimage  
 Hintergrund: TM 1988, Kanal 4

Projektion: UTM (34 N)  
 Ellipsoid: WGS 84  
 Datum: WGS 84

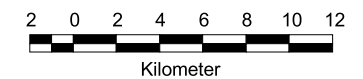


### Legende

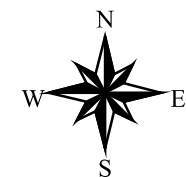
#### Vegetationsentwicklung



#### Grenzen



Maßstab 1:350000

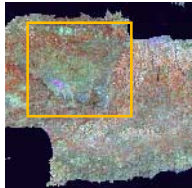


Analyse und Kartographie:  
 Patrick Hostert (© 2000)  
 Fernerkundung  
 Universität Trier

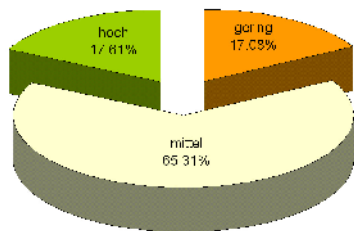
Karte A.1: Zeitliche Dynamik der Vegetationsentwicklung im Psiloritis über einen Zeitraum von 20 Jahren

# Mittlere Vegetationsbedeckung im Psiloritis

Ergebnisse der Zeitreihenanalyse von 1977 bis 1996

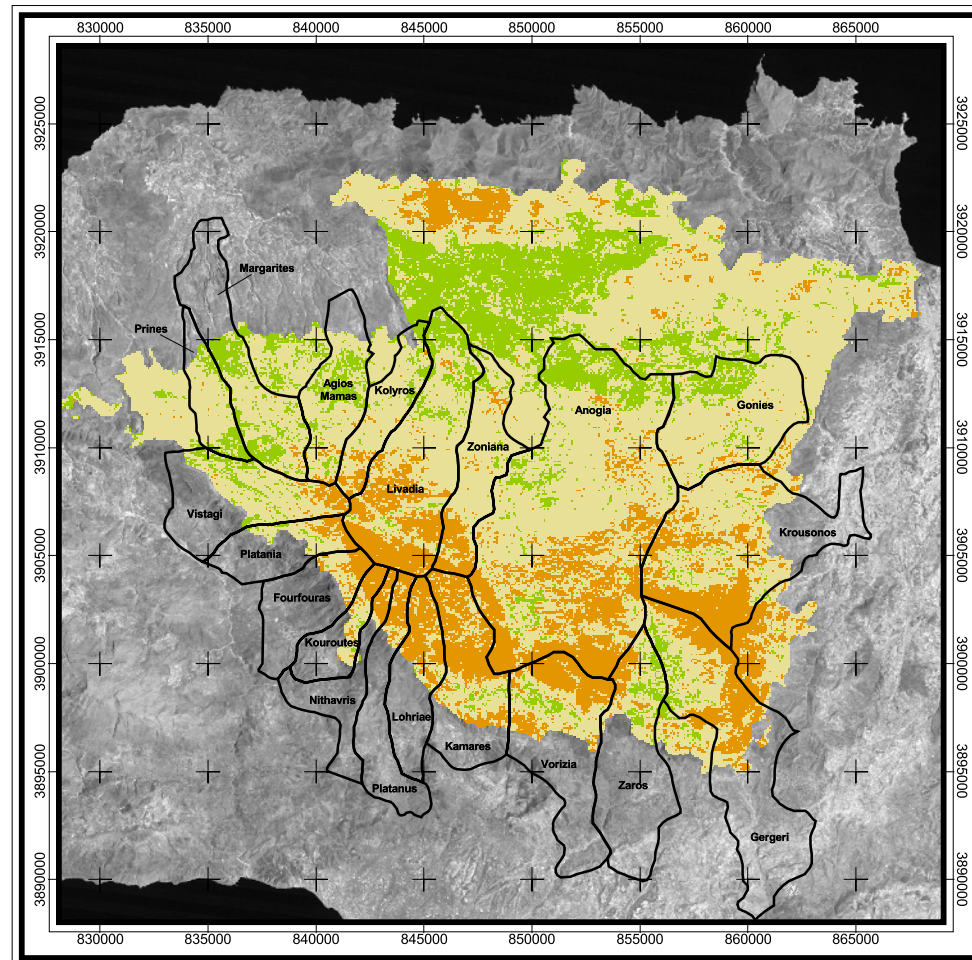


## Flächenstatistik



Datengrundlage:  
Landsat MSS (1977 bis 1983)  
Landsat TM (1984 bis 1996)  
Provider: Eurimage  
Hintergrund: TM 1988, Kanal 4

Projektion: UTM (34 N)  
Ellipsoid: WGS 84  
Datum: WGS 84

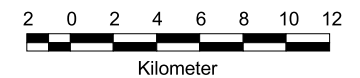


## Legende

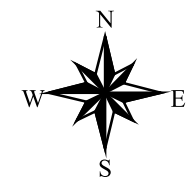
### Vegetationsbedeckung



### Grenzen



Maßstab 1:350000

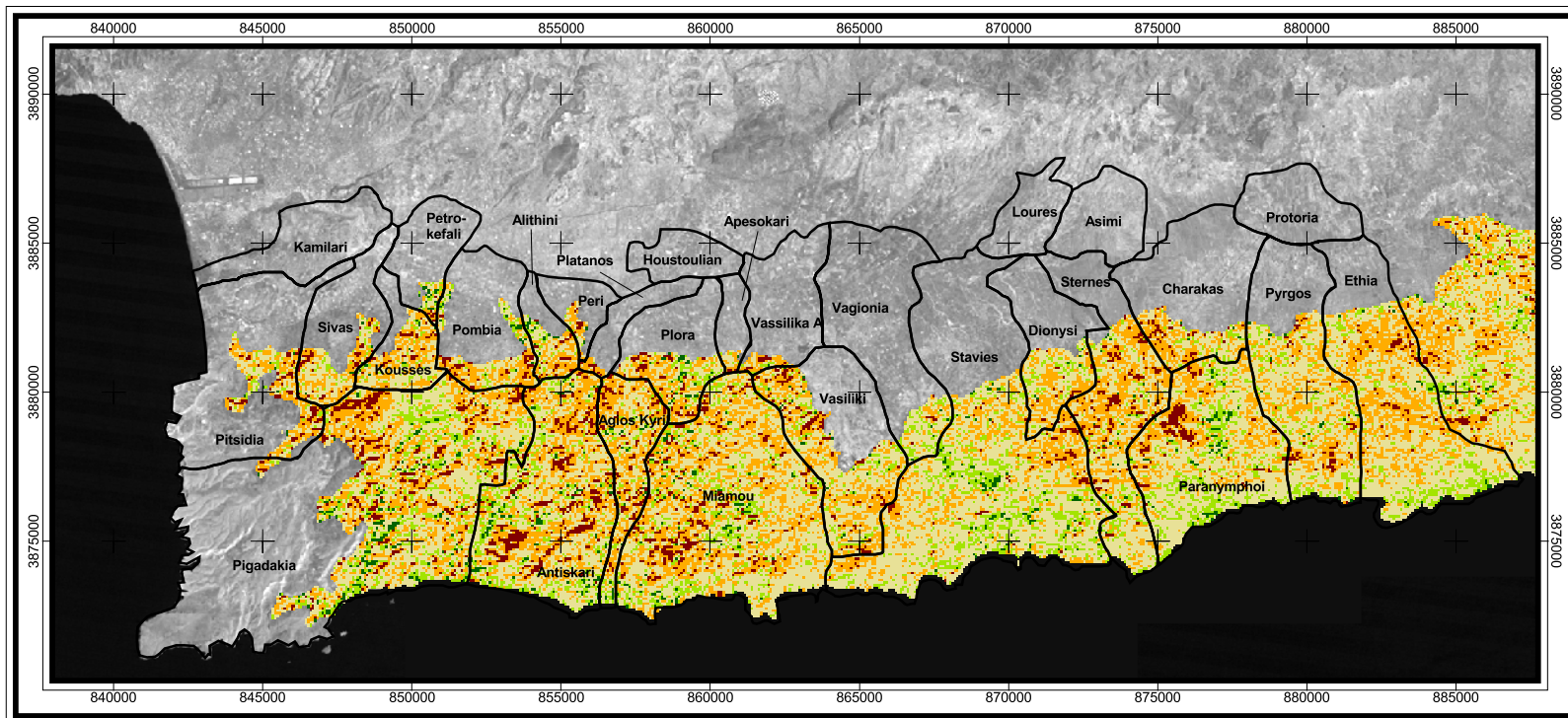
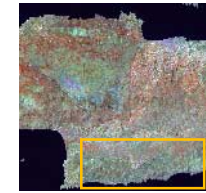


Analyse und Kartographie:  
Patrick Hostert (© 2000)  
Fernerkundung  
Universität Trier

Karte A.2: Mittlere Vegetationsbedeckung im Psiloritis über einen Zeitraum von 20 Jahren

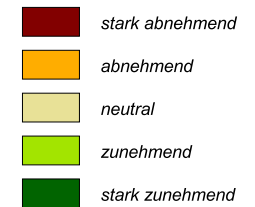
# Vegetationsentwicklung in Asterousia

Ergebnisse der Zeitreihenanalyse von 1979 bis 1996

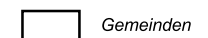


## Legende

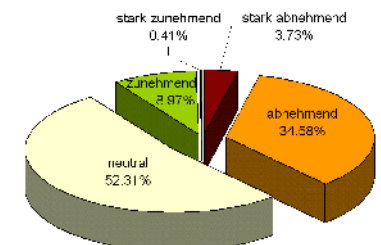
### Vegetationsentwicklung



### Grenzen



### Flächenstatistik



2 0 2 4 6 8

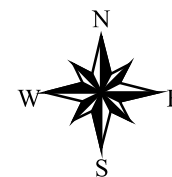


Kilometer

Maßstab 1:250000

Datengrundlage:  
Landsat MSS (1979 bis 1983)  
Landsat TM (1984 bis 1996)  
Provider: Eurimage  
Hintergrund: TM 1988, Kanal 4

Projektion: UTM (34 N)  
Ellipsoid: WGS 84  
Datum: WGS 84

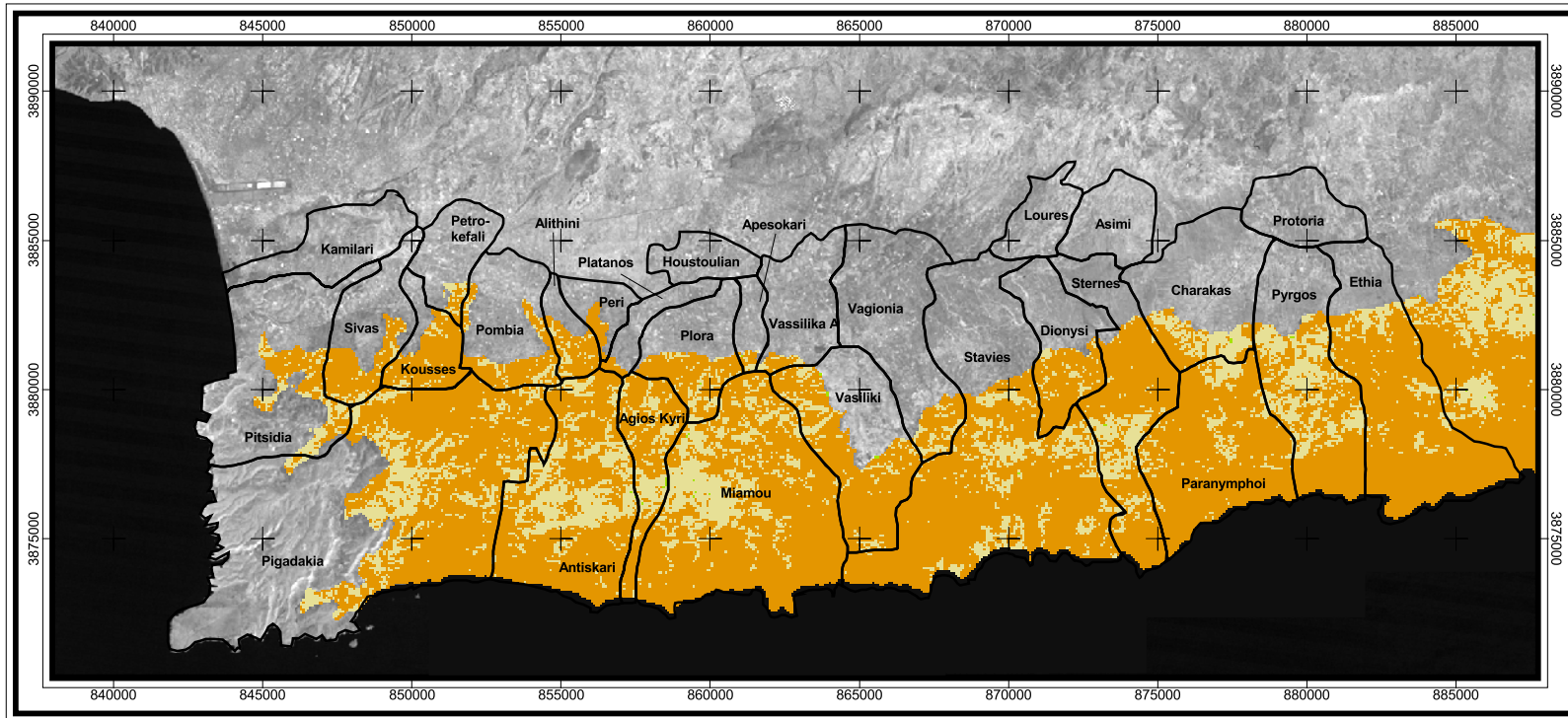
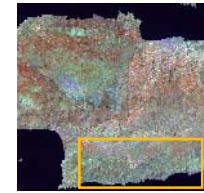


Analyse und Kartographie:  
Patrick Hostert (©2000)  
Fernerkundung  
Universität Trier

Karte A.3: Zeitliche Dynamik der Vegetationsentwicklung in Asterousia über einen Zeitraum von 18 Jahren

# Mittlere Vegetationsbedeckung in Asterousia

Ergebnisse der Zeitreihenanalyse von 1979 bis 1996



## Legende

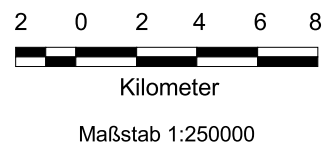
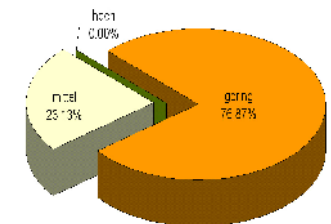
### Vegetationsbedeckung



### Grenzen

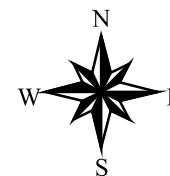


## Flächenstatistik



Datengrundlage:  
Landsat MSS (1979 bis 1983)  
Landsat TM (1984 bis 1996)  
Provider: Eurimage  
Hintergrund: TM 1988, Kanal 4

Projektion: UTM (34 N)  
Ellipsoid: WGS 84  
Datum: WGS 84

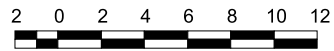
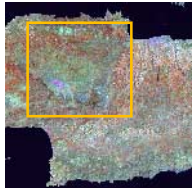


Analyse und Kartographie:  
Patrick Hostert (©2000)  
Fernerkundung  
Universität Trier

Karte A.4: Mittlere Vegetationsbedeckung in Asterousia über einen Zeitraum von 18 Jahren

# Degradationsindex für den Psiloritis

## Ergebnisse der Zeitreihenanalyse von 1977 bis 1996



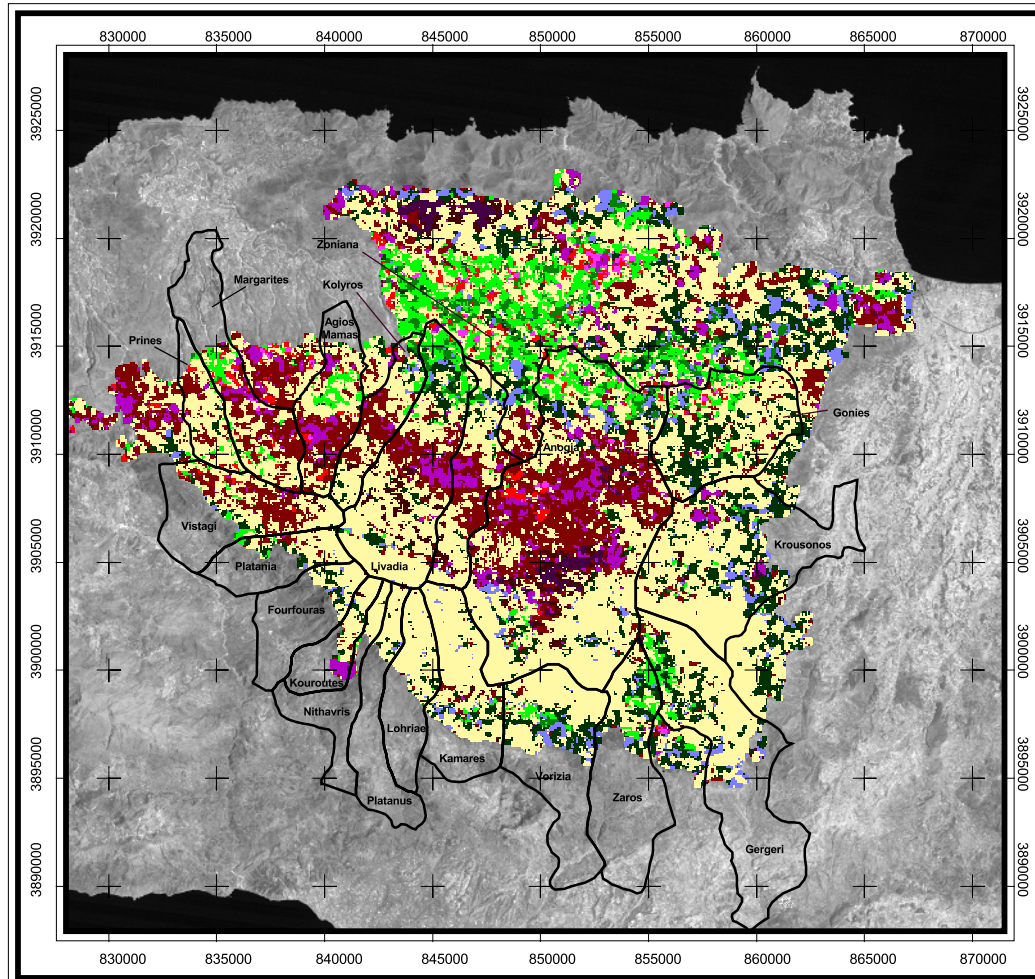
Kilometer

Maßstab 1:350000



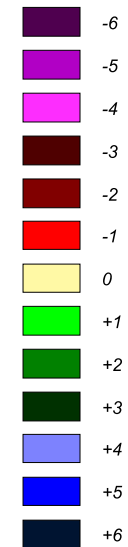
Datengrundlage:  
 Landsat MSS (1977 bis 1983)  
 Landsat TM (1984 bis 1996)  
 Provider: Eurimage  
 Hintergrund: TM 1988, Kanal 4

Projektion: UTM (34 N)  
 Ellipsoid: WGS 84  
 Datum: WGS 84



### Legende

#### Degradationsindex



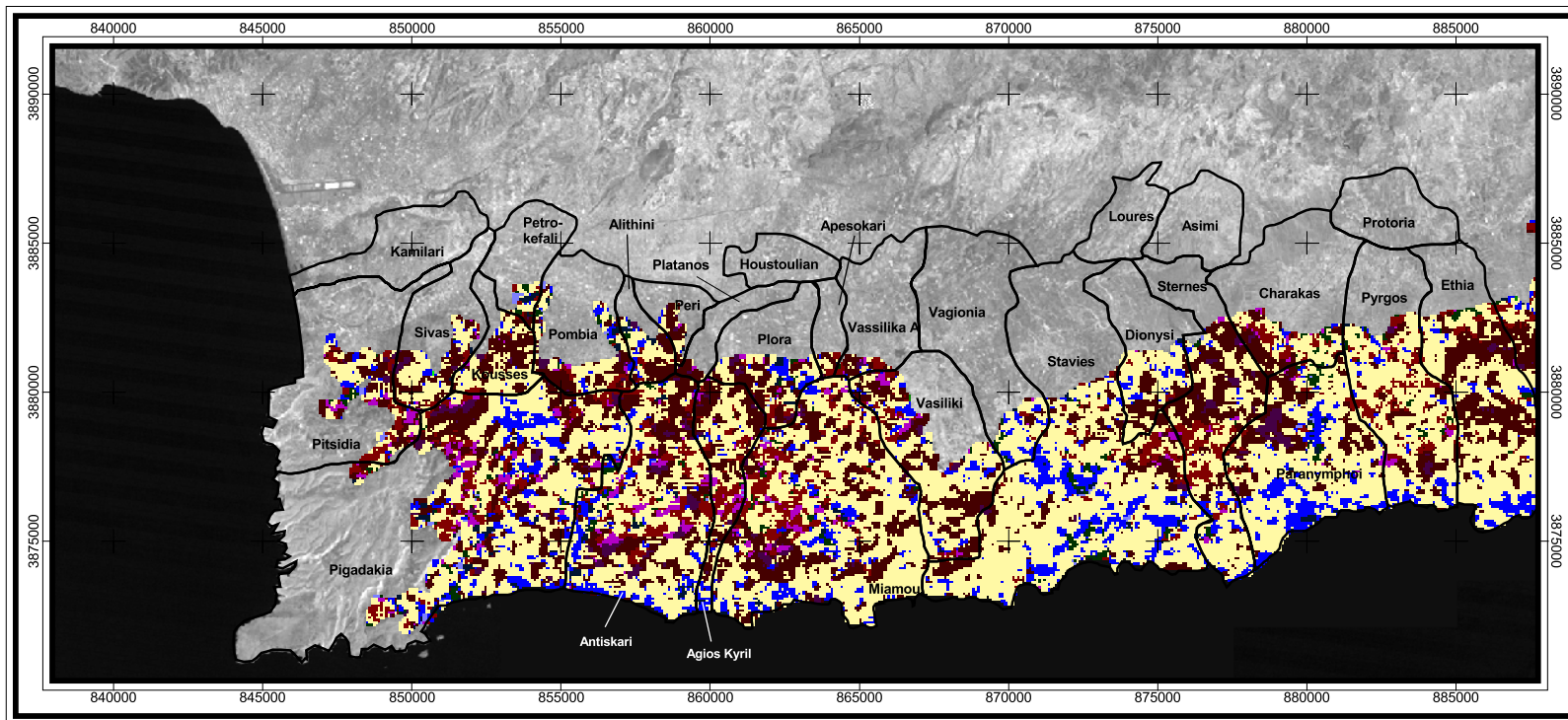
#### Grenzen



Analyse und Kartographie:  
 Patrick Hostert (© 2000)  
 Fernerkundung  
 Universität Trier

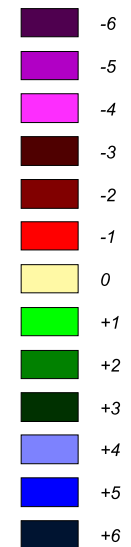
# Degradationsindex für Asterousia

Ergebnisse der Zeitreihenanalyse von 1979 bis 1996

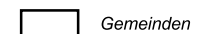


## Legende

### Degradationsindex



### Grenzen



2 0 2 4 6 8

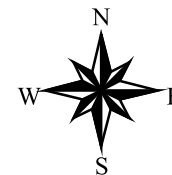


Kilometer

Maßstab 1:250000

Datengrundlage:  
Landsat MSS (1979 bis 1983)  
Landsat TM (1984 bis 1996)  
Provider: Eurimage  
Hintergrund: TM 1988, Kanal 4

Projektion: UTM (34 N)  
Ellipsoid: WGS 84  
Datum: WGS 84

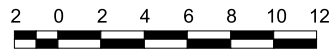


Analyse und Kartographie:  
Patrick Hostert (©2000)  
Fernerkundung  
Universität Trier



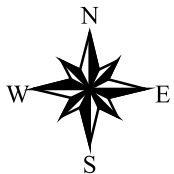
# Phänologische Variabilität der Vegetation im Psiloritis

Matrixverschneidung von RMS und Vegetationsbedeckung für die Zeitreihe von 1977 bis 1996



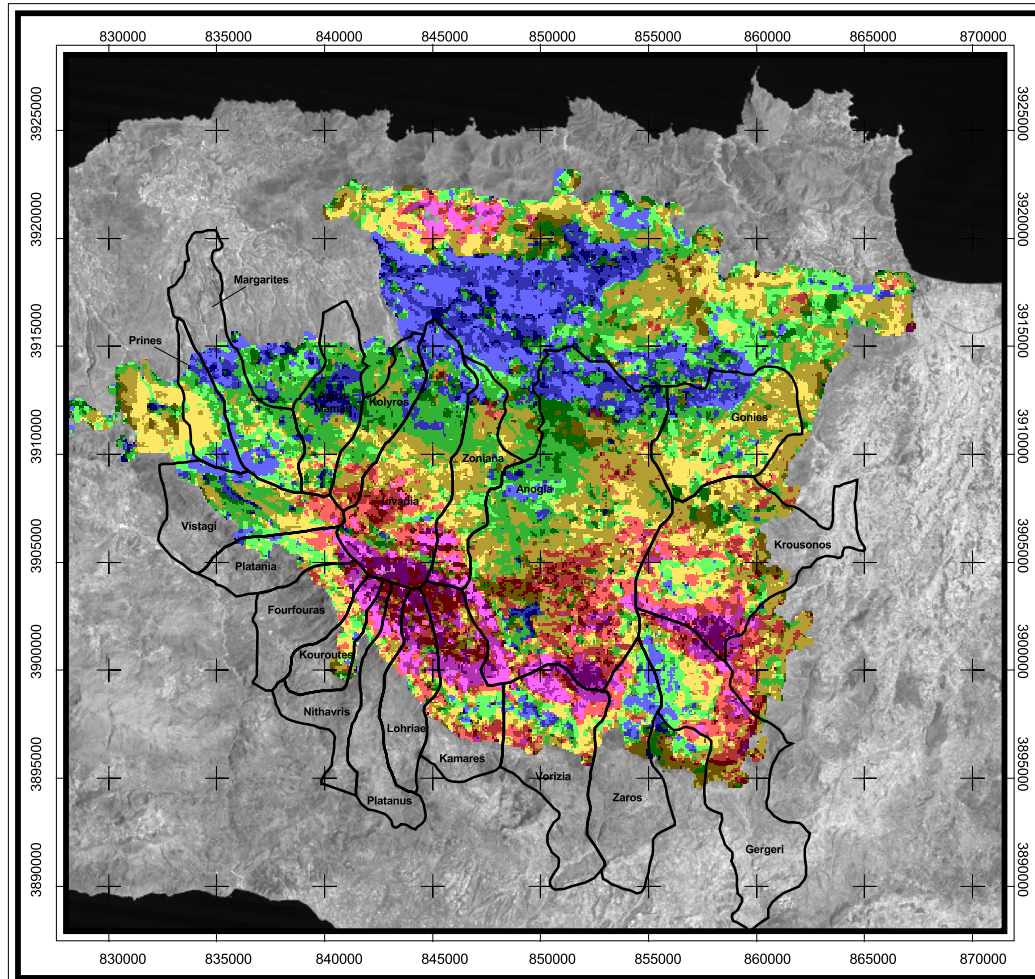
Kilometer

Maßstab 1:350000



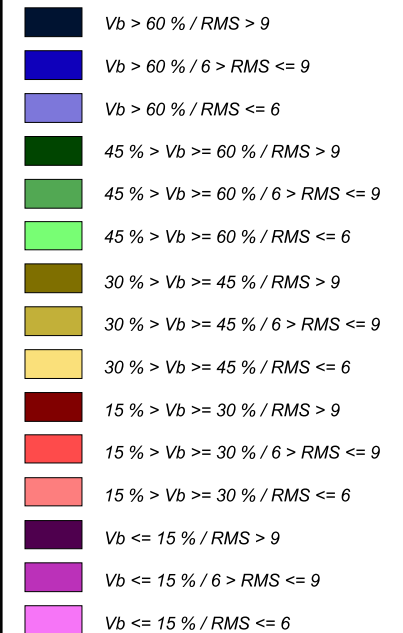
Datengrundlage:  
Landsat MSS (1977 bis 1983)  
Landsat TM (1984 bis 1996)  
Provider: Eurimage  
Hintergrund: TM 1988, Kanal 4

Projektion: UTM (34 N)  
Ellipsoid: WGS 84  
Datum: WGS 84



## Legende

### Vegetationsbedeckung und RMS



### Grenzen



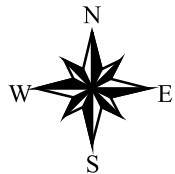
Analyse und Kartographie:  
Patrick Hostert (© 2000)  
Fernerkundung  
Universität Trier

# Feuerereignisse und Rodungen im Psiloritis

Ergebnisse der Zeitreihenanalyse von 1977 bis 1996

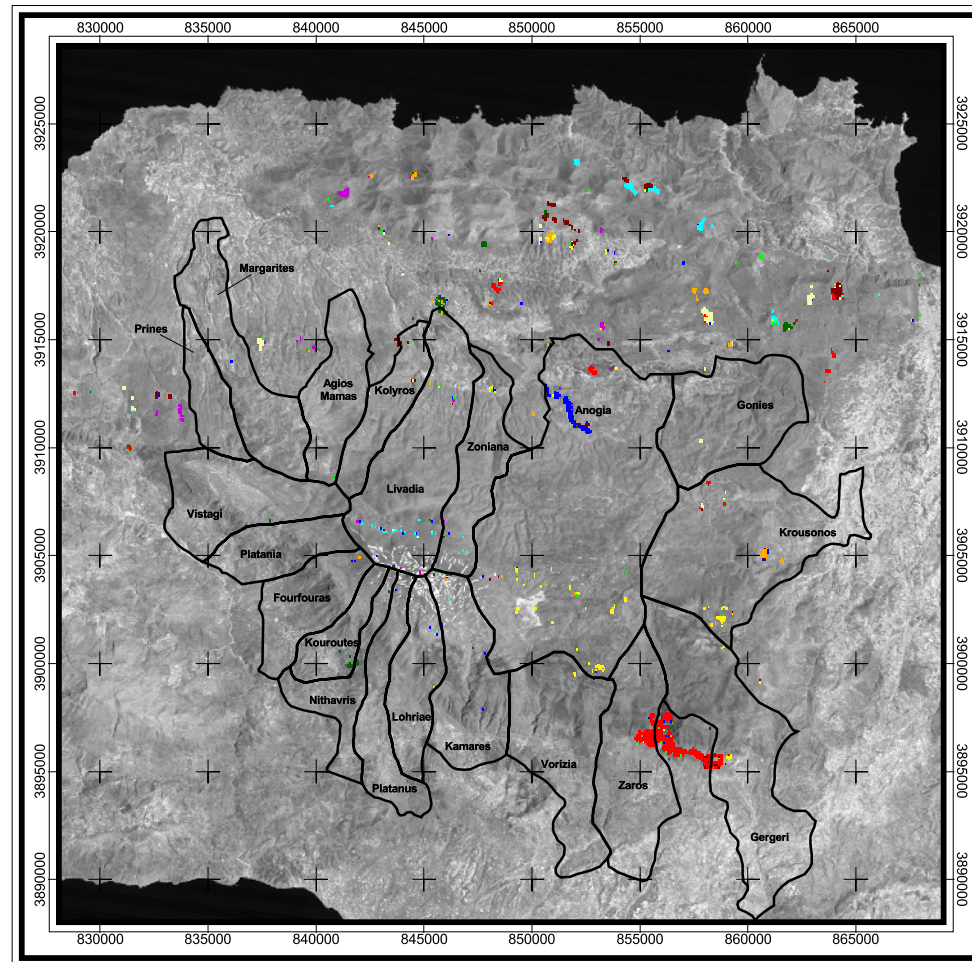


Maßstab 1:350000



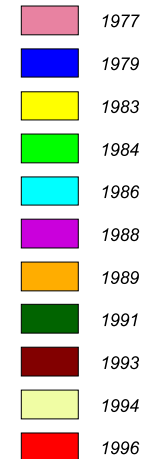
Datengrundlage:  
Landsat MSS (1977 bis 1983)  
Landsat TM (1984 bis 1996)  
Provider: Eurimage  
Hintergrund: TM 1988, Kanal 4

Projektion: UTM (34 N)  
Ellipsoid: WGS 84  
Datum: WGS 84



## Legende

### Jahr



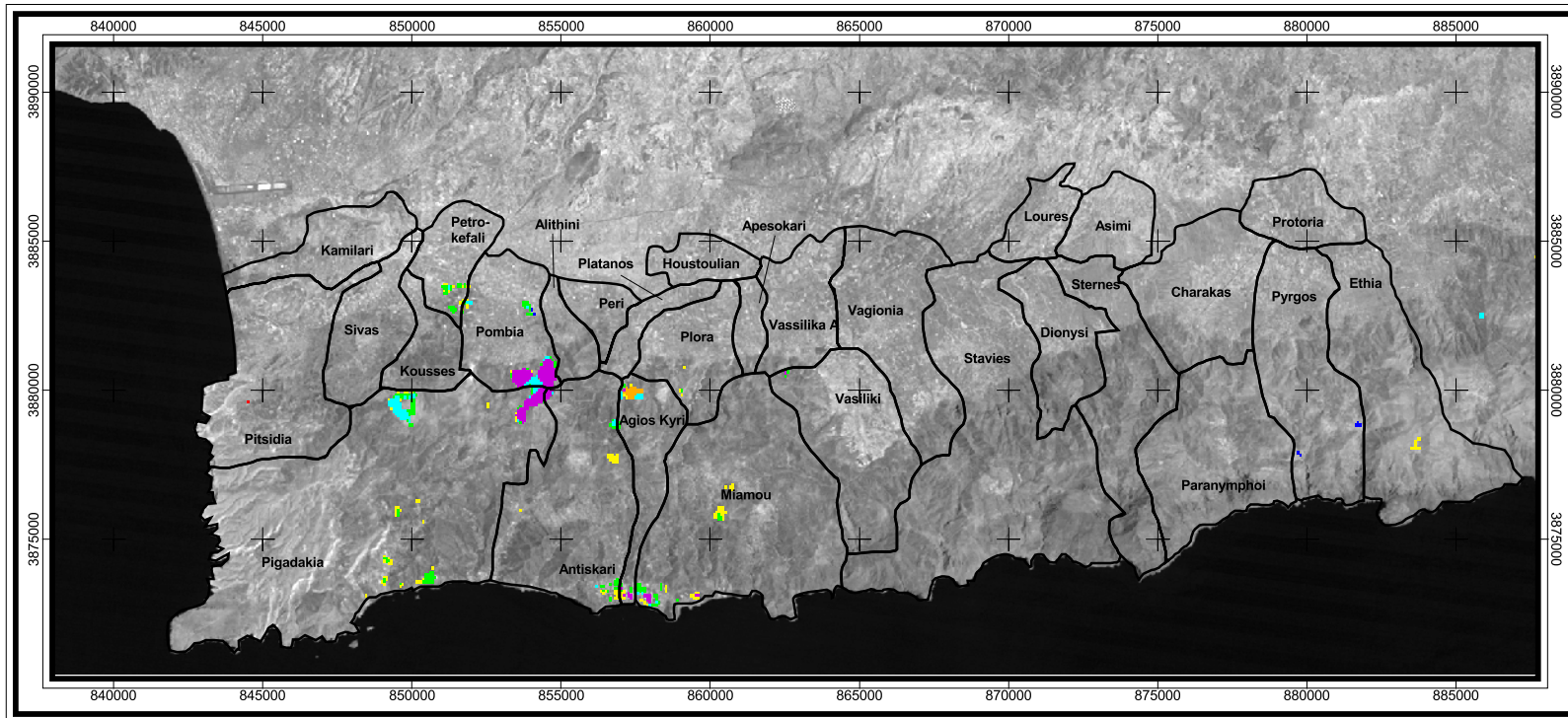
### Grenzen



Analyse und Kartographie:  
Patrick Hostert (© 2000)  
Fernerkundung  
Universität Trier

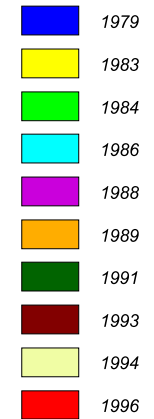
# Feuerereignisse und Rodungen in Asterousia

Ergebnisse der Zeitreihenanalyse von 1979 bis 1996

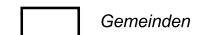


## Legende

### Jahr



### Grenzen



2 0 2 4 6 8

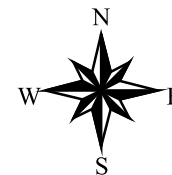


Kilometer

Maßstab 1:250000

Datengrundlage:  
Landsat MSS (1979 bis 1983)  
Landsat TM (1984 bis 1996)  
Provider: Eurimage  
Hintergrund: TM 1988, Kanal 4

Projektion: UTM (34 N)  
Ellipsoid: WGS 84  
Datum: WGS 84

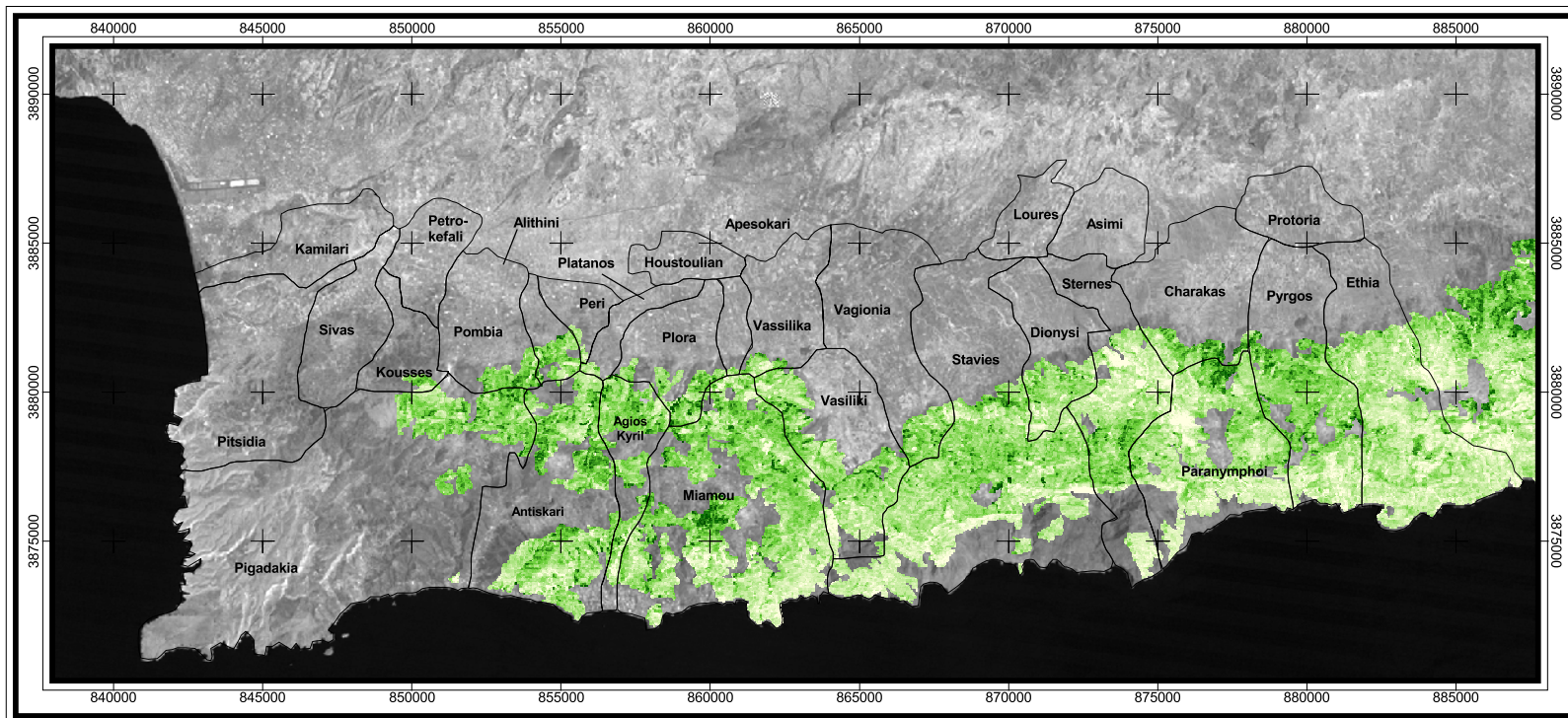


Analyse und Kartographie:  
Patrick Hostert (©2000)  
Fernerkundung  
Universität Trier

A.9: Feuerereignisse und Rodungen in Asterousia in einem Zeitraum von 18 Jahren

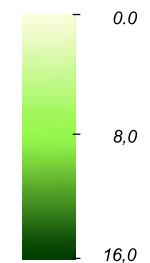
# Biomassenkalkulation der Flyschgebiete Asterousias

Darstellung auf Basis der linearen Entmischung für das Jahr 1996



## Legende

Gesamtbiomasse (t/ha)



Grenzen



2 0 2 4 6 8

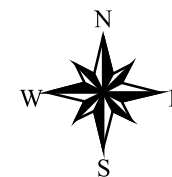


Kilometer

Maßstab 1:250000

Datengrundlage:  
Landsat TM 1996  
Provider: Eurimage  
Hintergrund: TM 1988, Kanal 4

Projektion: UTM (34 N)  
Ellipsoid: WGS 84  
Datum: WGS 84

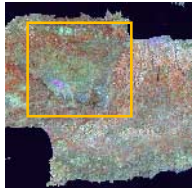


Analyse und Kartographie:  
Patrick Hostert © 2000  
Fernerkundung  
Universität Trier

Karte A.10: Kalkulation der Biomasse für die Flyschgebiete Asterousias im Jahr 1996

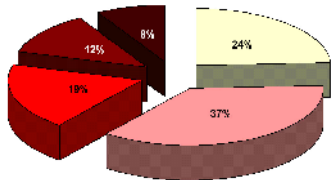
# Bodenzustandskarte für Psiloritis

Maximum Value Composite der Zeitreihenanalyse von 1984 bis 1996



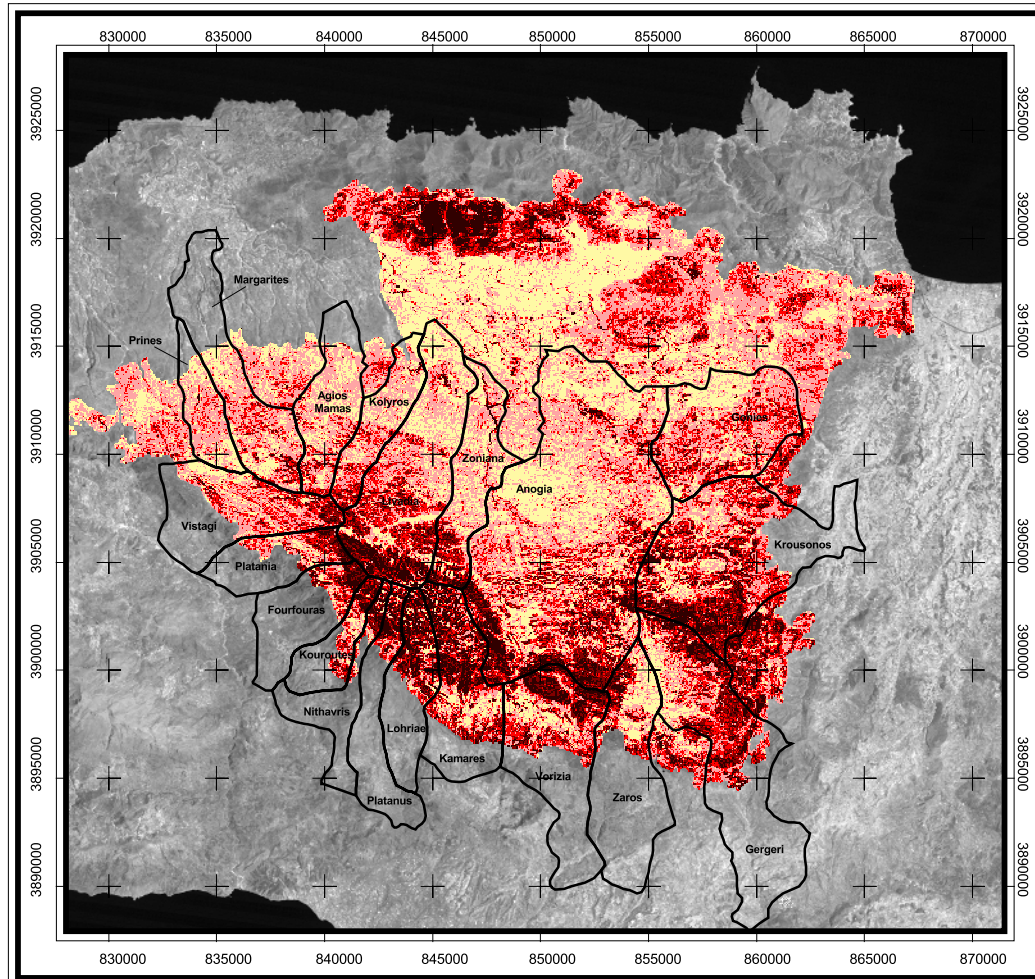
## Flächenstatistik

(Klasseneinteilung s. Legende)



Datengrundlage:  
Landsat TM (1984 bis 1996)  
Provider: Eurimage  
Hintergrund: TM 1988, Kanal 4

Projektion: UTM (34 N)  
Ellipsoid: WGS 84  
Datum: WGS 84



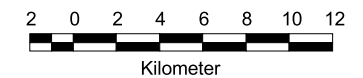
## Legende

### Bodenzustand

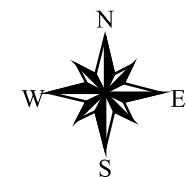
- gut entwickelt / nicht degradiert
- entwickelt / kaum degradiert
- mäßig entwickelt / leicht degradiert
- schwach entwickelt / deutlich degradiert
- nicht entwickelt / stark degradiert

### Grenzen

- Gemeinden

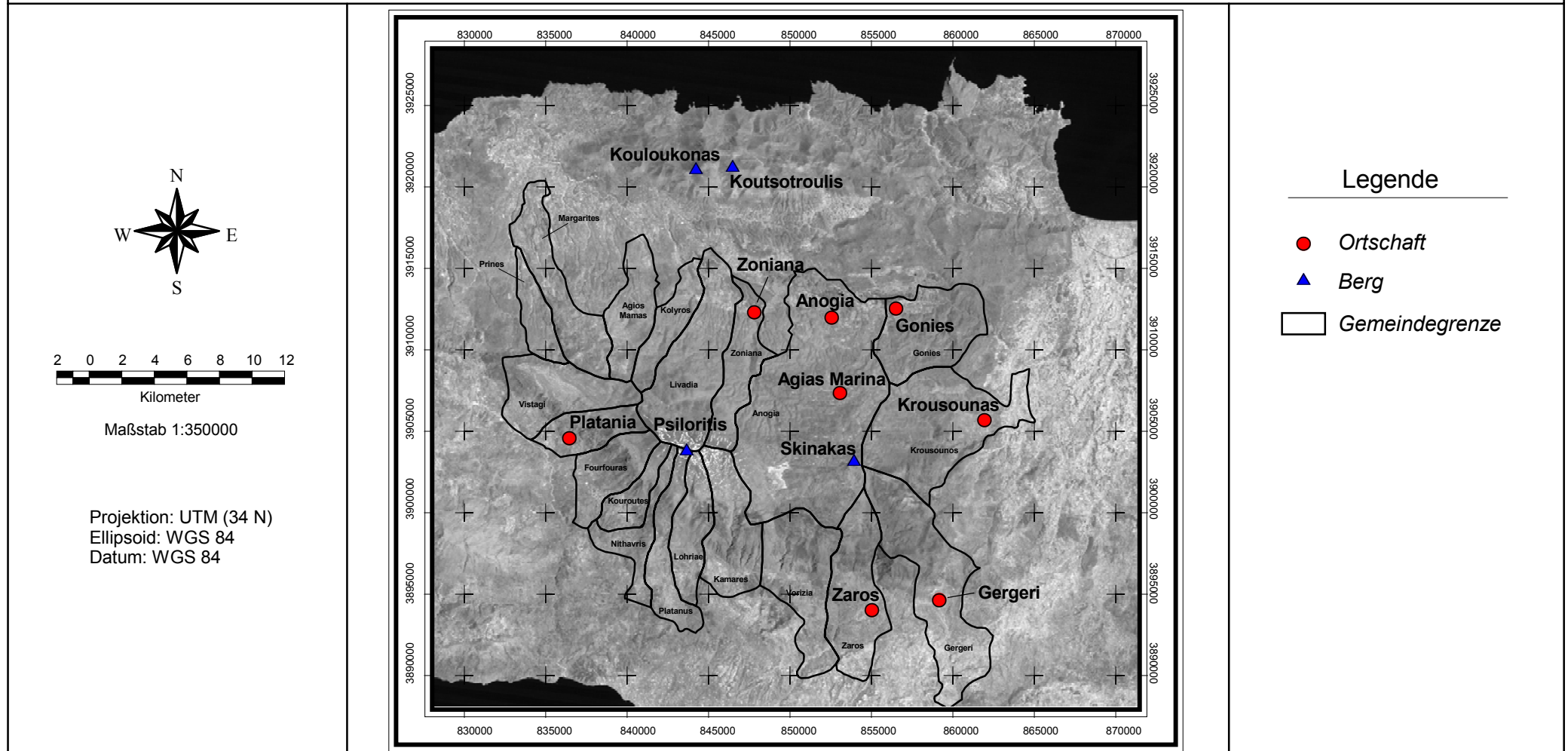


Maßstab 1:350000



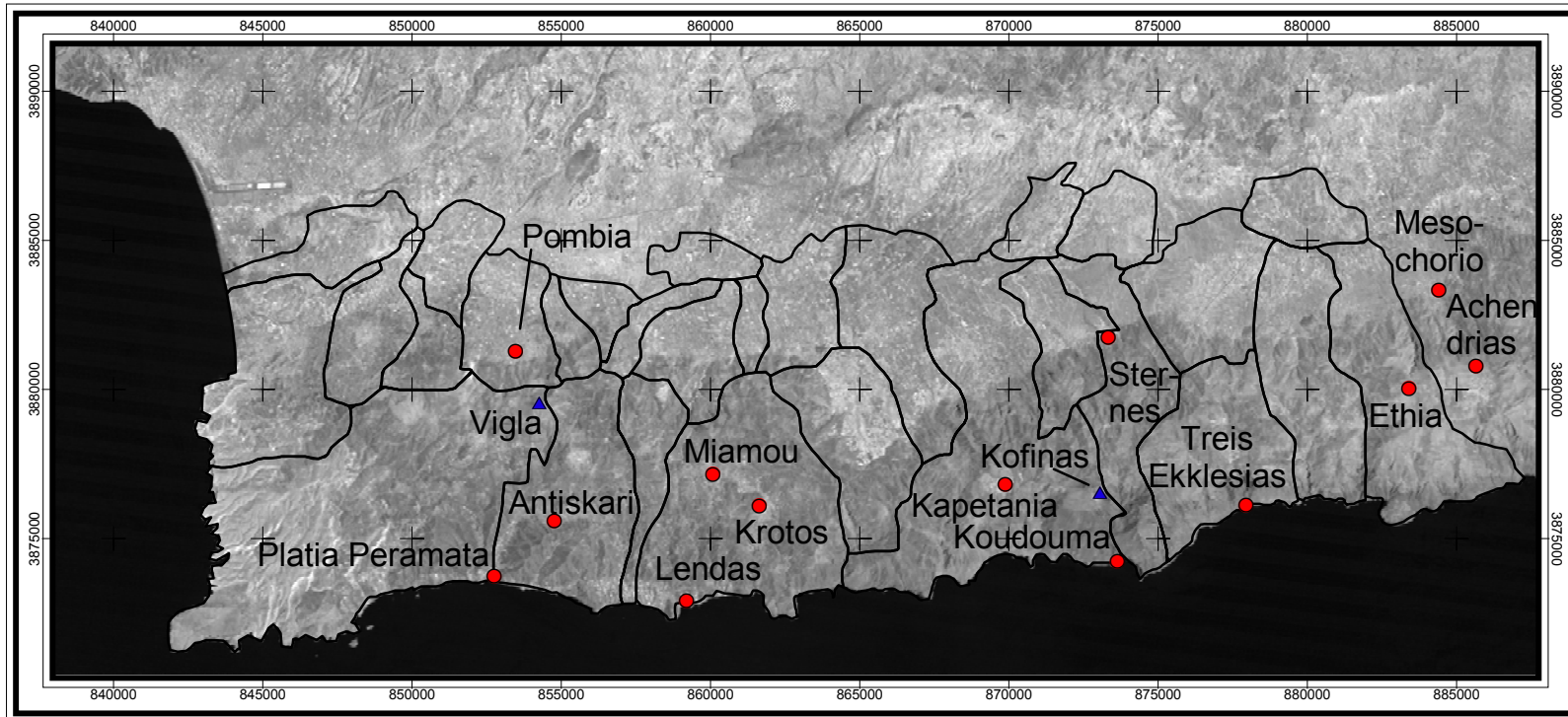
Analyse und Kartographie:  
Patrick Hostert (© 2000)  
Fernerkundung  
Universität Trier

# Ortschaften und Berge im Psiloritis und Kouloukonas



Karte A.12: Übersicht der wichtigsten Ortschaften und Berge in Psiloritis und Kouloukonas

# Ortschaften und Berge in Asterousia



## Legende

- Ortschaft
- ▲ Berg
- Gemeindegrenze

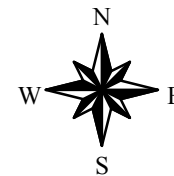
2 0 2 4 6 8



Kilometer

Maßstab 1:250000

Projektion: UTM (34 N)  
 Ellipsoid: WGS 84  
 Datum: WGS 84



Karte A.13: Übersicht der wichtigsten Ortschaften und Berge in Asterousia

## *Anhang B*

### *Nomenklatur zu Flora und Fauna*



## B.1: Flora

<b>Lateinische Bezeichnung</b>	<b>Deutsche Bezeichnung</b>
<i>Acer creticum</i>	Kretischer Ahorn
<i>Astragalus angustifolius</i>	Schmalblättriger Tragant
<i>Berberis cretica</i>	Kretische Berberitze
<i>Calicotome villosa</i>	Behaarter Dornginster
<i>Ceratonia siliqua</i>	Johannisbrotbaum
<i>Cupressus sempervirens</i>	Mittelmeer-Zypresse
<i>Euphorbia acanthothamnos</i>	Dornbusch-Wolfsmilch
<i>Juniperus phoenicea</i>	Phönizischer Wacholder
<i>Olea europaea (sylvestris)</i>	Ölbaum
<i>Phlomis lanata</i>	Wolliges Brandkraut
<i>Phlomis fruticosa</i>	Strauchiges Brandkraut
<i>Pinus brutia</i>	Brutische Hartkiefer
<i>Pistacia lentiscus</i>	Mastixstrauch
<i>Quercus coccifera</i>	Kermeseiche
<i>Quercus ilex</i>	Steineiche
<i>Rhamnus oleoides</i>	Ölbaum-Kreuzdorn
<i>Sarcopoterium spinosum</i>	Dornige Bibernelle
<i>Thymus capitatus</i>	Kopfiger Thymian
<i>Urginea maritime</i>	Meerzwiebel

## B.2: Fauna

Lateinische Bezeichnung	Deutsche Bezeichnung
<i>Acomys minous</i>	Kretastachelmaus
<i>Capra aegagrus</i> Erxleben spp. <i>cretica</i> Schinz	Kretische Wildziege (Agrimi)
<i>Felis silvestris</i>	Wildkatze
<i>Fringilla coelebs</i>	Buchfink
<i>Galerida cristata</i>	Haubenlerche
<i>Gypaetus barbatus</i>	Bartgeier (Lämmergeier)
<i>Gyps fulvus</i>	Gänsegeier
<i>Martes foina bunites</i>	Kretischer Steinmarder
<i>Mustela nivalis galinthis</i>	Kretisches Mauswiesel
<i>Oenanthe hispanica</i>	Mittelmeersteinschmätzer
<i>Sylvia melanocephala</i>	Samtkopfgrasmücke

## *Anhang C*

### *Weidetierpopulation im Psiloritis*

## C.1: Schafe

	1961	1971	1981	1992
<b>Anogia</b>	16789	30282	37220	54500
<b>Zoniana</b>	2769	4159	17104	4700
<b>Livadia</b>	4250	12412	31396	47500
<b>Kolyros</b>	1825	5005	1804	11000
<b>Agios Mamas</b>	2366	4910	9260	11500
<b>Margarites</b>	788	1385	2772	3500
<b>Prines</b>	450	654	248	900
<b>Vistagi</b>	1944	704	2368	3000
<b>Platania</b>	1445	1351	392	2500
<b>Fourfouras</b>	884	942	2036	900
<b>Kouroutes</b>	888	449	2036	600
<b>Nithavris</b>	664	1102	3032	2200
<b>Platanus</b>	1090	854	4704	4200
<b>Lohriai</b>	1165	192	648	4200
<b>Kamares</b>	1093	827	4060	6354
<b>Vorizia</b>	1185	1426	7488	6186
<b>Zaros</b>	787	686	1760	2838
<b>Gergeri</b>	2359	2364	8516	8793
<b>Krousonos</b>	1579	449	11908	11179
<b>Gonies</b>	1557	1654	2416	3084

(zusammengestellt nach Menjli 1994)

## C.2: Ziegen

	1961	1971	1981	1992
<b>Anogia</b>	6530	4905	10820	10500
<b>Zoniana</b>	1537	938	1936	6000
<b>Livadia</b>	1489	4166	8980	25500
<b>Kolyros</b>	496	1537	424	4500
<b>Agios Mamas</b>	412	533	716	1700
<b>Margarites</b>	690	1012	1580	2000
<b>Prines</b>	351	112	56	200
<b>Vistagi</b>	1512	106	2424	1500
<b>Platania</b>	935	760	3340	500
<b>Fourfouras</b>	735	872	192	700
<b>Kouroutes</b>	727	809	192	400
<b>Nithavris</b>	977	964	164	750
<b>Platanus</b>	572	937	1664	1050
<b>Lohriai</b>	743	298	2256	2000
<b>Kamares</b>	847	584	2608	3884
<b>Vorizia</b>	1097	472	1968	3245
<b>Zaros</b>	1390	1636	3348	744
<b>Gergeri</b>	2114	2695	3956	5862
<b>Krousonos</b>	2684	809	5868	7453
<b>Gonies</b>	1777	1127	2032	2056

(zusammengestellt nach Menjli 1994)

# Lebenslauf

Name: Patrick Hostert

Geboren: 29.12.1967 in Trier

Wohnort: Saarstr. 12, 54290 Trier

Staatsangehörigkeit: Deutsch

- 03/1996 – 02/2001**                      Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fach Fernerkundung des  
FB VI, Geographie/Geowissenschaften der Universität Trier;  
zunächst Mitarbeiter im Forschungsprojekt DeMon-II,  
seit 11/1997 Mitarbeiter des Lehrstuhls
- 09/1994 – 11/1995**                      Studium zum Master of Science (MSc) in Geographical  
Information Systems (GIS) am Department of Geography,  
University of Edinburgh  
Abschluss mit MSc (GIS); Thema der Abschlussarbeit:  
*Remote Sensing for Urban Applications: Enhanced Satellite  
Image Interpretation with Spectral Mixture Analysis.*
- 04/1988 – 07/1994**                      Studium der Angewandten Physischen Geographie im FB VI,  
Geographie/Geowissenschaften der Universität Trier;  
von 04/1993 bis 07/1994 Studentischer Mitarbeiter am  
Lehrstuhl für Fernerkundung; von 08/1990 bis 04/1991  
Studentischer Mitarbeiter am Lehrstuhl für Kartographie;  
Abschluss mit Diplom; Thema der Diplomarbeit im Nebenfach  
Fernerkundung:  
*Ein optimiertes Verfahren zur Landnutzungsklassifikation  
heterogen strukturierter Gebiete. Untersuchungen im Raum  
Trier.*
- 09/1987 – 03/1988**                      Studium der Agrarwissenschaften an der Rheinischen  
Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
- 08/1978 – 06/1987**                      Staatliches Hindenburg Gymnasium Trier  
Abschluss mit der Allgemeinen Hochschulreife
- 08/1976 – 07/1978**                      Keune-Grundschule Trier
- 08/1974 – 07/1976**                      Grundschule Speicher