

Landschafts- und Landnutzungswandel im nigerianischen Tschadbecken

**Qualitative und quantitative räumliche Analysen
durch Auswertung multitemporaler und multisensoraler Fernerkundungsdaten
im Rahmen eines geographischen Informationssystems**

D i s s e r t a t i o n

zur Erlangung des Doktorgrades
der Naturwissenschaften

vorgelegt beim Fachbereich Geowissenschaften / Geographie
der Johann Wolfgang Goethe-Universität
in Frankfurt am Main

von
Ina Franke-Scharf
aus Leipzig

Frankfurt am Main 2000

vom Fachbereich Geowissenschaften – Geographie
der Johann Wolfgang Goethe-Universität als Dissertation angenommen.

Dekan: Herr Prof. Dr. W. Oschmann

Gutachter: Herr Prof. Dr. G. Nagel
Frau Prof. Dr. C. Schmullius
Herr Prof. Dr. W. Andres
Herr Prof. Dr. H. Thiemeyer

Datum der Disputation: 22. November 2001

Vorwort

Im Rahmen des Frankfurter Sonderforschungsbereiches "Kulturentwicklung und Sprachgeschichte im Naturraum Westafrikanische Savanne" entstand die vorliegende Arbeit. Die langjährige finanzielle Förderung dieses Projektes durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft ermöglichte mir eine intensive Beschäftigung mit dem Thema einschließlich mehrerer Geländeaufenthalte in Nigeria und anderen Ländern Westafrikas sowie die Arbeit mit modernsten Bildverarbeitungsanlagen und Fernerkundungsdaten am Institut für Physische Geographie der Universität Frankfurt.

Neben der finanziellen Förderung trugen zahlreiche Personen zum Gelingen dieser Arbeit bei:

Frau Dr. Friderun Fuchs danke ich für das Vertrauen, das sie als Teilprojektleiterin und Betreuerin dieser Arbeit in mich gesetzt und die Verantwortung, die sie mir innerhalb des Teilprojektes übertragen hat. Herr Prof. Dr. Heinrich Thiemeyer hat seit Anfang dieses Jahres die Leitung des Teilprojektes übernommen. Ihm danke ich für die gute Zusammenarbeit im Projekt.

Für die Betreuung meiner Arbeit bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. Günter Nagel, der als Sprecher des Sonderforschungsbereiches die interdisziplinäre Zusammenarbeit immer gefördert hat und jederzeit Ansprechpartner war. Ihm und Frau Prof. Dr. Christiane Schullius vom Institut für Geographie der Friedrich Schiller-Universität Jena (Lehrstuhl für Geoinformatik und Fernerkundung) danke ich für die Übernahme der Begutachtung.

Stellvertretend für alle Mitarbeiter des Sonderforschungsbereiches, denen ich viele interessante und den geographischen Horizont erweiternde Diskussionen und Gespräche und zudem sehr schöne Momente sowohl in Frankfurt als auch besonders in Afrika verdanke, möchte ich herzlich Frau Dr. Ursula Greinert-Byer danken. Als Geschäftsführerin des in mindestens vier verschiedenen Ländern agierenden Forschungsprojektes war sie Ansprechpartnerin in allen organisatorischen Fragen.

Besonders erwähnen möchte ich diejenigen, die zum Teil sehr viel Zeit und auch Wissen in Dinge investiert haben, die dieser Arbeit zu Gute kamen. Dazu gehören meine Vorgänger im Teilprojekt Dr. Silvester Schuchmann und Claudia Dobe, die Grundsteine für die Verarbeitung von Fernerkundungsdaten am Institut für Physische Geographie legten und einige von mir verwendete Daten beschafften, aber auch jene, die mich im ständigen Kampf mit den *Bits & Bytes* unterstützten und damit stärker inhaltliches Arbeiten zuließen: Dirk Schneider, Jörg Breuer und Ulrike Simons. Dazu zählen außerdem alle, die als Hiwis oder für Diplomkanten mühsam digitalisierten.

Gute Ideen und konstruktive Diskussionen steuerte Thomas Skorupinski bei. Viele wertvolle Hinweise bei der Durchsicht des Manuskriptes erhielt ich von Claudia Dobe, Dr. Irene Marzloff und Dr. Stefan Schmid. Die mühsame Arbeit der abschließenden Korrektur von Text, Abbildungen und Tabellen übernahmen Claudia Marcks und Ulrike Simons.

Die vorliegenden Untersuchungen wären nicht möglich gewesen ohne die intensive Unterstützung in Nigeria. Auch hier können unmöglich alle genannt werden, die Anteil am Erfolg der Geländeaufenthalte hatten. Ein Versuch sei dennoch gemacht.

Bei Dr. Hans-Jürgen Sturm vom botanischen Teilprojekt bedanke ich mich für erste Orientierungshilfen zwischen Maiduguris *'Roundabouts'* und bei den zahlreichen nigerianischen Behörden. Außerdem ermöglichte mir die sehr konstruktive und intensive fachliche Zusammenarbeit im Untersuchungsgebiet zusammen mit Mandingo Ataholo zumindest ansatzweise 'botanische Einsichten'.

Zu einem schnellen Einstieg in den nigerianischen Forschungsalltag verhalfen mir vor allem die Ethnologen Dr. Editha Platte und Dr. Holger Kirscht, die vorher schon im gleichen Untersuchungsraum arbeiteten. Sie vermittelten mir Kontakte zu Ansprechpartnern und Mitarbeitern vor Ort sowie die Aufnahme in den Dörfern des Untersuchungsgebietes. Beiden sei dafür und für die fachliche Zusammenarbeit herzlich gedankt.

Nicht zählbar sind die Menschen, die mir bei den Forschungsarbeiten wegweisend, übersetzend, informierend, erklärend, autoschiebend oder anders geholfen haben. In Marte, Musune, Ngala und Gambaru wurde ich während meiner Aufenthalte im Tschadbecken herzlich aufgenommen. Besonders erwähnen möchte ich die Bewohner des Dorfes Musune, die mir einen weiten Einblick in das nigerianische Dorfleben und die Themen meiner Untersuchungen gestatteten. Maina Kuwata war dabei ein sehr engagierter und interessierter Mitarbeiter. Neben letzterem begleitete mich vor allem Mohamed Adam vom *Center for Transsaharan Studies* der Universität Maiduguri bei meinen Geländearbeiten. Seine Hausa-, Kanuri- und Shuwa-Sprachkenntnisse ermöglichten mir die Verständigung mit den unterschiedlichen Bewohnern des Tschadbeckens.

Wichtigen Anteil am Erfolg der Geländeexkursionen vor allem in weiter abgelegene Gebiete hatte immer wieder Musa Saleh in Maiduguri, der nicht nur bei Autoreparaturen und bei der oft aussichtslos scheinenden Suche nach Werkstätten oder Ersatzteilen eine sehr wertvolle Hilfe darstellte. An der Universität Maiduguri wurde ich vor allem von Seiten des *Department of Geography* unterstützt. Stellvertretend danke ich Prof. Josef Ijere, Dr. Jacob Nyanganji und Abba Kagu. Danken möchte ich auch den Mitarbeitern des 'Goethe-Hauses' in Maiduguri, die einen nicht unerheblichen Anteil daran hatten, daß sich die Nigeriaaufenthalte so angenehm gestalteten.

Frankfurt am Main, im Dezember 2000

Ina Franke-Scharf

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Zielsetzung und Fragestellungen	3
1.2	Vorgehensweise	4
2	Forschungsstand	7
2.1	Regional inhaltlich-thematisch: Landschaft und Landnutzung im nigerianischen Tschadbecken	7
2.2	Methodisch: Auswertung von Fernerkundungsdaten im semiariden Westafrika	8
3	Untersuchungsraum	13
3.1	Naturräumlicher Überblick	15
3.1.1	Klimatische Gegebenheiten	17
3.1.2	Quartäre Sedimente und Geomorphologie	20
3.1.3	Böden	23
3.1.4	Hydrographie	24
3.1.5	Vegetationsüberblick	25
3.2	Kulturräumliche Aspekte	27
4	Datengrundlage	30
4.1	Karten	30
4.1.1	Topographische Karten	30
4.1.2	Thematische Karten	31
4.1.3	Digitale Karten	32
4.2	Luftbildmosaike	33
4.3	Luftbilder	35
4.4	Satellitenszenen	36
4.4.1	<i>Landsat-MSS</i>	37
4.4.2	<i>Landsat-TM</i>	37
4.4.3	<i>SPOT-HRV</i>	39
4.5	Sonstiges	40
5	Methodik	41
5.1	Entwicklung eines Klassifizierungsschemas	42
5.2	Geländeuntersuchungen	44
5.2.1	Allgemeine Beobachtungen	44
5.2.2	Befragungen	45
5.2.3	GPS-Messungen	45
5.2.3.1	Aufnahme von Paßpunkten	46
5.2.3.2	Aufnahme von Vergleichsflächen	46
5.2.3.3	Weiterverarbeitung der Geländeerhebungen	47

5.3	Bearbeitung der Karten	48
5.3.1	Extraktion der relevanten Information und Digitalisierung	48
5.3.2	Transformation und Projektion	49
5.3.3	Attributierung	49
5.4	Bearbeitung der Luftbildmosaike	50
5.4.1	Erstellung eines Interpretationsschlüssels und visuelle Kartierung.....	50
5.4.2	Digitalisierung und Import.....	51
5.4.3	Transformation, Mosaikierung und Anpassung	52
5.5	Bearbeitung der Luftbilder	53
5.5.1	Scannen	53
5.5.2	Relative Entzerrung	53
5.5.3	Kontrastverbesserung und -anpassung, Mosaikierung	55
5.5.4	Versuche digitaler Bildverarbeitung der panchromatischen Daten.....	55
5.5.5	Visuelle Auswertung mittels Bildschirmdigitalisierung und Attributierung.....	56
5.6	Bearbeitung der Satellitendaten	56
5.6.1	Einlesen und Aufbereitung	56
5.6.2	Georeferenzierung.....	57
5.6.3	Visuelle Auswertung	60
5.6.3.1	Darstellung und Bildverbesserung.....	60
5.6.3.2	Statistische Analysen	61
5.6.4	Digitale Bildverarbeitung.....	61
5.6.4.1	Ratios, Indizes, Differenzen.....	62
5.6.4.2	Hauptkomponenten	63
5.6.5	Digitale Klassifizierungen	64
5.6.5.1	Klassifizierungsansätze und Zuweisungsregeln.....	64
5.6.5.2	Vorgehensweise und Beurteilungskriterien	66
5.6.5.3	Genauigkeitsüberprüfungen und Vergleichsmöglichkeiten	68
5.7	Integration im regionalen Geoinformationssystem FirGIS	68
5.7.1	Struktur	69
5.7.1.1	Datenformate	69
5.7.1.2	Datenbanksysteme	69
5.7.2	Datenbearbeitung und -auswertung	70
5.7.2.1	Abfragen und Statistik einzelner und mehrerer Themen	70
5.7.2.2	Physische Verschneidungen	70
5.7.2.3	Pufferbildung zur Flächenerzeugung.....	71
5.7.2.4	Projektion und Flächenberechnung.....	71
5.7.2.5	Komplexe räumliche GIS-Analysen.....	72
5.7.3	Ergebnisdarstellung.....	72
5.7.3.1	Analoge Darstellungsformen	72
5.7.3.2	Digitale Darstellung	73
6	Ergebnisse	74
6.1	Aktuelle Landbedeckung und Landnutzung	74
6.1.1	Sediment	74
6.1.2	Gewässer	79
6.1.2.1	Stehende Gewässer	79
6.1.2.2	Fließende Gewässer	79

6.1.3	Bebauung	82
6.1.3.1	Siedlungen.....	82
6.1.3.2	Verkehr	86
6.1.4	Landwirtschaft	87
6.1.4.1	Regenzeitanbau	88
6.1.4.2	Trockenzeitanbau	90
6.1.4.3	Sonstige Anbauformen	94
6.1.4.4	Großflächiger Bewässerungsanbau	97
6.1.5	Vegetation	98
6.1.5.1	Gehölze	98
6.1.6	Sonstiges.....	102
6.1.6.1	Deflationserscheinungen	102
6.1.7	Zusammenfassung der aktuellen Flächenverteilung	104
6.2	Saisonale Dynamik.....	106
6.2.1	Sediment	116
6.2.2	Gewässer	119
6.2.3	Bebauung	122
6.2.4	Landwirtschaft	124
6.2.5	Vegetation	127
6.2.6	Sonstiges.....	133
6.2.6.1	Deflationserscheinungen	133
6.2.6.2	Brandflächen	133
6.2.7	Zusammenfassung der saisonalen Veränderungen und multitemporale Klassifizierung.....	134
6.3	Abschätzung des Einflusses interannueller Schwankungen	140
6.3.1	Vergleich Januar 1995 - Januar 1996	142
6.3.2	Vergleich November 1992 - November 1995	146
6.3.3	Vergleich März 1975 - März 1976 - März 1979	150
6.3.4	Vergleich Dezember 1972 - Dezember 1978	155
6.3.5	Vergleich Februar 1973 - (April 1986) - Februar 1988	159
6.3.6	Zusammenfassung zu den interannuellen Schwankungen und Vergleich in einer Zeitreihe.....	163
6.4	Langfristige Entwicklungen.....	167
6.4.1	Sediment	167
6.4.2	Gewässer	169
6.4.2.1	Stehende Gewässer	169
6.4.2.2	Fließende Gewässer	169
6.4.3	Bebauung	170
6.4.3.1	Siedlungen.....	170
6.4.3.2	Verkehr	172
6.4.4	Landwirtschaft	173
6.4.4.1	Regenzeitanbau	174
6.4.4.2	Trockenzeitanbau	174
6.4.4.3	Sonstige Anbauformen	175
6.4.4.4	Veränderungen der Anbauflächen.....	175
6.4.5	Vegetation	180
6.4.5.1	Gehölze	180

6.4.6	Sonstiges.....	185
6.4.7	Zusammenfassung der Veränderungen innerhalb von 33 Jahren	185
7	Schlußfolgerungen	188
7.1	Beurteilung der Datengrundlage.....	188
7.1.1	Luftbilder versus Satellitenszenen.....	190
7.2	Beurteilung der Auswertemethoden	191
7.2.1	Visuelle versus computergestützte Auswertung.....	192
7.2.2	Einschätzung der untersuchten digitalen Verfahren.....	195
7.2.3	Genauigkeitsüberlegungen und Fehlerquellen.....	199
7.3	Beurteilung der Ergebnisse	202
8	Ausblick	207
9	Zusammenfassung	208
	Summary	211
10	Quellenverzeichnis	214
10.1	Schriftenverzeichnis	214
10.2	Kartenverzeichnis	224
10.3	Luftbildverzeichnis	226
10.4	Satellitenszenenverzeichnis	227
10.5	Verzeichnis der zitierten Internetadressen	227

Abbildungsverzeichnis

Titelbild:	Rispenhirse im Trockenzeitanbau auf den ausgetrockneten Tonböden des Tschadbeckens kurz vor der Ernte (Februar 1997)	
Abb. 1:	Gliederung und Vorgehensweise	5
Abb. 2:	Überblick über das Tschadbecken und seine Zuflüsse.....	13
Abb. 3:	Satellitenbildkarte der Untersuchungsregion nigerianisches Tschadbecken	16
Abb. 4:	Wasserhaushalt nach LAUER & FRANKENBERG und Variabilität der jährlichen Niederschläge nach KLAUS für Westafrika	17
Abb. 5:	Länge der Regenzeit, monatliche Niederschlagsverteilung und Isohyeten mittlerer jährlicher Niederschläge aller Stationen im Untersuchungsraum	18
Abb. 6:	Abweichungen der jährlichen Niederschläge vom Mittelwert für die Stationen Maiduguri, Marte, Ngala während der Aufnahmezeiträume der Fernerkundungsdaten	19
Abb. 7:	Landschaftsgliederung und Substrat der oberflächennahen Sedimente im Untersuchungsraum.....	21
Abb. 8:	Verbreitung der Böden im Untersuchungsraum.....	23
Abb. 9:	Gliederung des Untersuchungsraumes gemäß Klima und Vegetation nach AUBRÉVILLE, KEAY und WHITE	25
Abb. 10:	Verbreitung der Vegetation im Untersuchungsraum	26
Abb. 11:	Administrative Grenzen und Bevölkerungsdichte von Borno <i>State</i> / Nordost-Nigeria	28
Abb. 12:	Räumliche Abdeckung der bearbeiteten Fernerkundungsdaten.....	34
Abb. 13:	Gegenüberstellung Luftbildausschnitt 1957-1990.....	35
Abb. 14:	Landbedeckungs- und Landnutzungskarte 1990: Sediment und natürliche Gewässer	75
Abb. 15:	Blick über die ehemals vom Tschadsee überflutete flache Tonebene zwischen Kajere und Sugume (Oktober 1995)	76
Abb. 16:	Blick von der erhöht liegenden Siedlung Bula Cesabe nach Norden über die mächtige vegetationsbestandene Sandfläche im Umkreis der Siedlung (Oktober 1995).....	77
Abb. 17:	Wasserflächen im nordöstlichen Bereich des Untersuchungsgebietes nördlich der Siedlung Jillam (Oktober 1995).....	78
Abb. 18:	Blick von der Pumpstation Kirenowa nach Norden entlang des Hauptzufuhrkanals vom Tschadsee (September 1995).....	81
Abb. 19:	Landbedeckungs- und Landnutzungskarte 1990: Bebauung und Bewässerungskanäle.....	82
Abb. 20:	Verlassene Kanurisiedlung Mulje auf einer sandigen Erhebung innerhalb der Tonebene (Oktober 1995).....	83
Abb. 21:	Kanurisiedlung Aja Gana südlich Old Marte (Oktober 1995)	84
Abb. 22:	Shuwasiedlung Dubua (Oktober 1995)	85
Abb. 23:	Landbedeckungs- und Landnutzungskarte 1990: Landwirtschaft.....	87
Abb. 24:	Rispenhirse im Regenzeitanbau bei Old Marte (September 1995).....	88
Abb. 25:	Frauen mahlen Kolbenhirse auf einem frisch geernteten Feld bei Wulwa (Oktober 1995)	89
Abb. 26:	Familie auf dem Weg zum Umpflanzen der Trockenzeithirse (Oktober 1995)	91

Abb. 27:	Flußbewässerungsfelder bei Wurge (Februar 1997)	95
Abb. 28:	Flutfolgeanbaufelder in der Nähe von Wolgo (Februar 1997).....	96
Abb. 29:	Großflächiger Bewässerungsanbau der <i>Chad Basin Development Authority</i> (Februar 1997)	97
Abb. 30:	Landbedeckungs- und Landnutzungskarte 1990: Gehölzverbreitung.....	99
Abb. 31:	Typischer baumloser Ausschnitt aus der Tonebene bei Missini (Februar 1997)	100
Abb. 32:	Deflationswanne westlich Dura (November 1995, T. Skorupinski)	103
Abb. 33:	Landbedeckungs- und Landnutzungskarte 1990: Deflationswannen im Bereich der Kartenblätter 68SW1, 68SW2 und 68SE1	103
Abb. 34:	Zusammenfassung Landbedeckung und Landnutzung 1990 für das gesamte Untersuchungsgebiet	104
Abb. 35:	Saisonale Veränderungen anhand von 5 <i>SPOT-XS</i> -Satellitenszenen- ausschnitten (a) mit Beispielen verschiedener Landschafts- und Landnutzungseinheiten als Legende (b - ausklappbare Rückseite)	108
Abb. 36:	Wichtigste statistische Parameter der Grauwertverteilung in den drei Spektralbereichen des <i>SPOT-XS</i> -Satelliten in Abhängigkeit vom Aufnahmezeitpunkt	109
Abb. 37:	Betonung saisonaler Veränderungen durch Vergleich zweier Differenzbilder aus den jeweils drei Spektralbereichen	113
Abb. 38:	Ausgewählte multitemporale Hauptkomponenten zur Betonung saisonaler Landbedeckungs- und Landnutzungsveränderungen	115
Abb. 39:	Reflexionsverhalten der Sedimente im Untersuchungsgebiet	117
Abb. 40:	Reflexionsverhalten der Gewässer im Untersuchungsgebiet	120
Abb. 41:	Reflexionsverhalten der Regen- und Trockenzeitanbauflächen im Untersuchungsgebiet	126
Abb. 42:	Veränderungen der Vegetationsbedeckung saisonal 1995/96	129
Abb. 43:	Reflexionsverhalten vegetationsbedeckter Flächen im Untersuchungsgebiet...	132
Abb. 44:	Zusammenfassung der phänologischen Zustände im Jahresverlauf für alle Landbedeckungs- und Landnutzungsklassen im Untersuchungsgebiet und Markierung der Zeiten bester allgemeiner Differenzierung	135
Abb. 45:	Landbedeckungs- und Landnutzungsklassifizierung der Vegetationsperiode 1995/96 aus multitemporalen <i>SPOT-XS</i> -Satellitenszenen	136
Abb. 46:	Zusammenfassung der Landbedeckung und Landnutzung für die Saison 1995/96	139
Abb. 47:	Interannueller Vergleich der Vegetationsbedeckung 15. Januar 1995 und 16. Januar 1996	144
Abb. 48:	Interannueller Vergleich der Vegetationsbedeckung 4. November 1992 und 29. November 1995	147
Abb. 49:	Interannueller Vergleich der Vegetationsbedeckung 7. März 1975, 19. März 1976 und 13. März 1979	152
Abb. 50:	Interannueller Vergleich der Vegetationsbedeckung 8. Dezember 1972 und 13. Dezember 1978	157
Abb. 51:	Interannueller Vergleich der Vegetationsbedeckung 18. Februar 1973, (9. April 1986), 27. Februar 1988	161

Abb. 52:	Zeitreihe der Vegetationsbedeckung aus allen verfügbaren Satellitenszenen im Untersuchungsgebiet über 24 Jahre	165
Abb. 53:	Landbedeckungs- und Landnutzungskarte 1957: Sediment, Gewässer und Bebauung	168
Abb. 54:	Vergleich der Siedlungsflächen 1957-1990	171
Abb. 55:	Landbedeckungs- und Landnutzungskarte 1957: Anbauflächen	173
Abb. 56:	Vergleich der Anbauflächen 1957-1990	176
Abb. 57:	Landbedeckungs- und Landnutzungskarte 1957: Gehölze	180
Abb. 58:	Vergleich der Gehölzverbreitung 1957-1990	183
Abb. 59:	Vergleich der Landnutzung 1957-1990 für das zu beiden Zeitpunkten abgedeckte Untersuchungsgebiet	185

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Übersicht über die bearbeiteten Luftbildmosaike	33
Tab. 2:	Übersicht über die bearbeiteten Luftbildserien	35
Tab. 3:	Übersicht über die bearbeiteten <i>Landsat-MSS</i> -Szenen	37
Tab. 4:	Übersicht über die bearbeiteten <i>Landsat-TM</i> -Szenen	38
Tab. 5:	Übersicht über die bearbeiteten <i>SPOT</i> -Szenen	39
Tab. 6:	Klassifizierungsschema Landbedeckung und Landnutzung im Tschadbecken	43
Tab. 7:	Ausschnitt aus der Paßpunkt- und Vergleichsflächendatei	47
Tab. 8:	Parameter der als Standard festgelegten Projektion für die im FirGIS erfassten Daten	72
Tab. 9:	Korrelationskoeffizienten der Originalkanäle und der <i>NDVI</i> der verschiedenen Aufnahmezeitpunkte	110
Tab. 10:	Übersicht und Bewertung der untersuchten Datenkombinationen und -transformationen	196
Tab. 11:	Übersicht und Bewertung der untersuchten Klassifizierungsverfahren	198
Tab. 12:	Ergebnisse der bis zu jeweils 6 <i>GPS</i> -Vergleichsmessungen an 28 Punkten innerhalb des Untersuchungsgebietes	199

Anhang

A.1:	Auszug aus dem regionalen geographischen Informationssystem
A.1.1:	Verzeichnis der bereits digital vorliegenden aufbereiteten Karten
A.1.2:	Verzeichnis der digitalisierten und neu erarbeiteten Karten
A.1.3:	Verzeichnis der wichtigsten sonstigen digital vorliegenden Daten

Beilagen

Beilage 1:	Landbedeckungs- und Landnutzungskarte Tschadbecken, Nordost-Nigeria 1990
Beilage 2:	Landbedeckungs- und Landnutzungskarte Tschadbecken, Nordost-Nigeria 195

1 Einleitung

"Bei den meisten Raumfährenflügen ergibt es sich, daß Nordafrika der erste Landstrich ist, den wir zu Gesicht bekommen, wenn wir erwachen. (...) Ehe unser Arbeitstag beginnt, drückt sich jedes der Besatzungsmitglieder an irgendeinem Fenster die Nase platt. Der unglaubliche Wechsel von Afrikas riesigen Wüsten zu seinen saftiggrünen Grasflächen fasziniert uns immer wieder. Wenn wir südwärts über die Sahara fliegen, warten wir mit ungeduldiger Spannung darauf, den Tschadsee zu erblicken, der zwischen den Wüsten des Nordens und dem Grüngürtel Äquatorialafrikas liegt. (...) Der Tschadsee hatte einmal die fünfzigfache Größe, verglichen mit der jetzigen. Sein Wasserspiegel ist ein guter Gradmesser dafür, wie feucht oder trocken diese Region, die Sahelzone, ist. Während meines ersten Fluges lag er größtenteils unter Wolken: ein gutes Zeichen für die Menschen, die dort unten leben. 17 Monate später bei meinem zweiten Flug konnten wir sehen, daß der Wasserstand angestiegen war; die Dürre in der Sahelzone hatte vorübergehend nachgelassen. (...) Fliege ich über Afrika, denke ich über Veränderungen nach: (...) Klimaveränderungen – und ein Gewährwerden dessen, was eine kleine Störung der Luftströmungen für Millionen von Menschen am Rande des Grüngürtels bewirken kann. Veränderungen der Erde – vom Menschen verursacht, Änderungen, die man mehrere hundert Kilometer weit über der Erde sehen kann."

(Bericht eines NASA-Astronauten von einem Raumfährenflug, APT et al. 1997: 26)

Das Tschadbecken mit dem Tschadsee in seinem Zentrum hat schon lange vor Beginn der Raumfahrt nicht nur auf die dort siedelnden Menschen eine große Faszination ausgeübt. Erste Berichte über den See am Rand der Wüste drangen im Gegensatz zu anderen Gebieten vergleichbarer geographischer Lage schon sehr früh nach außen. Bereits kurz nach der Zeitenwende soll der römische Feldherr Julius Maternus den Tschadsee erreicht haben. Ab etwa dem 10. Jahrhundert ergaben sich im Zuge der sich ausdehnenden arabischen Handelsbeziehungen weitere Kontakte, anschließend entstanden erste Karten aus arabischer Hand wie z. B. die Mohammed Idrisis, später auch etliche von europäischen Kartographen (KLEMP 1968: 9ff).

Ab dem 19. Jahrhundert unternahmen mehrere europäische Reisende und Forscher Expeditionen zum größten See Westafrikas. Durch sie gelangten erste Berichte, Handzeichnungen und Kartenskizzen nach Europa. Heinrich Barth war wohl der bekannteste unter ihnen. Er zeichnete in einem ausführlichen mehrbändigen und mit Karten versehenen Tagebuch seine Mitte des 19. Jahrhunderts unter anderem im Tschadbecken gemachten Beobachtungen akribisch auf (BARTH 1857). Den Landschafts- und Kulturbeschreibungen der ersten Forschungsreisenden folgten grundlegende Werke in verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen; große Materialsammlungen zu den verschiedensten Themen wurden vor allem während der Kolonialzeit in unterschiedlichen Archiven zusammengetragen. Die damaligen Kolonialmächte führten meist auch die ersten Luftbildbefliegungen durch und erstellten daraus die häufig noch heute genutzten topographischen Kartenwerke.

Seit dem Beginn der ersten Landschaftsaufnahmen aus der Luft und seit den 1960er Jahren vor allem auch aus dem Weltraum ist der Tschadsee ein sehr beliebtes Motiv. Etwa gleichzeitig mit der Inbetriebnahme systematischer Erdbeobachtungssatelliten zu Beginn der 1970er Jahre erregte er aufgrund seiner Lage in der immer wieder von Dürren bedrohten Sahelzone nun auch in der allgemeinen Weltöffentlichkeit Aufsehen. Seitdem reißen die Berichte über ein Zuwenig oder auch Zuviel an Wasser hier wie auch anderswo auf der Welt nicht mehr ab. Verstärkt seit den 1970er Trockenjahren wurden insbesondere in den frankophonen Ländern des Sahel und Sudan unzählige Entwicklungshilfeprojekte organisiert; in Nigeria begann in dieser Zeit die Planung und Realisierung des größten Bewässerungsprojektes Westafrikas an den Ufern des Tschadsees.

Es erstaunt, daß man trotz dieser breiten allgemeinen Aufmerksamkeit, des wirtschaftlichen Anreizes des Sees und seiner wenn auch eher traurigen Berühmtheit vergleichsweise wenige detaillierte wissenschaftliche Untersuchungen über den Tschadsee und seine Umgebung findet. Dies trifft ganz besonders für den zu Nigeria gehörenden Teil zu, der aufgrund seiner spezifischen Morphologie zu den hochvariablen Bereichen des Tschadbeckens gehört und wegen seiner Lage im Grenzbereich dreier Länder auch politischen Zündstoff aufwirft. Vereinzelt anzutreffende Studien haben bevorzugt Aspekte der Seeschwankungen zum Thema. Das genaue Verhalten des Wasserkörpers, seine Entwicklung über längere Sicht genauso wie seine Wechselwirkungen mit den ihn umgebenden Landschaften sind jedoch immer noch in weiten Bereichen unklar.

Daran ändert auch die Tatsache nichts, daß aufgrund einer immer rasanter fortschreitenden Entwicklung im Bereich der Datenverarbeitungstechniken und der Fernerkundungsaufnahmeverfahren mit immer zahlreicheren Beobachtungssatelliten im Umlauf eine kontinuierlich anwachsende Datenflut produziert wird. Die bereits bis heute registrierten Fernerkundungsdaten stellen gerade in solch hochvariablen und noch wenig kartographierten Regionen, wie es in ganz besonderem Maße auf das nigerianische Tschadbecken zutrifft, ein noch längst nicht erschöpftes Potential dar. Sie bilden zudem die Bezugsgrundlage, an der zukünftig aufgenommene Daten gemessen werden müssen. Die Fernerkundungsdaten bieten erstmals die Möglichkeit, umfassend und flächendeckend quantitativ auszuwerten. Operationelle Satellitenumläufe mit hohen Wiederholungsraten ermöglichen zudem sowohl räumliche als auch zeitliche Vergleiche. Unterschätzt wird in der heutigen schnellebigen Welt dabei meist die Wichtigkeit, mit Fernerkundungsdaten auch vergangene Entwicklungen zu rekonstruieren, ohne deren Kenntnis momentane Zustände und künftige Entwicklungen nicht zufriedenstellend eingeordnet und erklärt werden können.

Das vorhandene Potential kann allerdings nur dann ausgeschöpft und erhalten werden, wenn die bereits heute unüberschaubaren Datenmengen schnell in strukturierte Information überführt, allgemeinverständlich verfügbar gemacht und kontinuierlich fortgeschrieben werden. Problematisch erscheint dabei, daß einst moderne Techniken so schnell veralten, daß die Einbeziehung älterer Daten für Räume, die nicht gerade im Mittelpunkt der Forschung stehen, immer schwieriger, wenn nicht gar unmöglich wird.

1.1 Zielsetzung und Fragestellungen

Ziel dieser Arbeit ist es, als ein Stein im Mosaik des Sonderforschungsbereiches 'Westafrikanische Savanne' und des untergeordneten Teilprojektes 'Naturraumpotential und Landnutzung im südlichen Tschadbecken', Landschaft und Landnutzung sowie deren Veränderungen in einem Ausschnitt des nigerianischen Tschadbeckens zu dokumentieren und zu analysieren. Besonderes Augenmerk soll darauf gelegt werden, die größtmögliche Zeitspanne zu bearbeiten und dabei alle verfügbaren Datenquellen, insbesondere Fernerkundungsdaten, einzubeziehen. Unter dieser Zielsetzung ergeben sich zwei Fragenkomplexe. Zum einen die thematischen Fragestellungen:

- Wie ist die Landschaft im nigerianischen Tschadbecken gegliedert, welches sind die entscheidenden Merkmale für ihre Nutzung?
- Welche Landschaftseinheiten und -elemente werden genutzt, welche räumlichen Muster lassen sich erkennen und wie sieht die Nutzung im einzelnen aus?
- Welche Wechselwirkungen bestehen zwischen naturräumlicher Ausstattung und Nutzung, wie eng sind diese und wie stark wirken sich unterschiedliche Nutzungen auf den Naturraum aus?
- Hat es im Laufe der Zeit Veränderungen im Naturraum bzw. in der Nutzung gegeben, welcher Art sind sie und worauf sind sie zurückzuführen?
- Können die für den Untersuchungsraum erzielten Ergebnisse auch auf andere Räume übertragen werden?
- Lassen sich Aussagen über zukünftige Entwicklungen ableiten?

Zum anderen müssen zur Erlangung der Zielsetzung aber auch methodische Fragen beantwortet werden:

- Welche Informationen zur Landbedeckung und Landnutzung sind bereits vorhanden, welche Aussagen liefern sie?
- Lassen sich weitere Datenquellen, insbesondere Fernerkundungsdaten, erschließen, welche thematischen Aspekte, welche Räume und welche Zeitspannen lassen sich mit ihnen abdecken?
- Welche Methoden und Auswerteverfahren wurden bereits angewendet, wie können sie an die speziellen Anforderungen angepaßt oder verändert bzw. wie können neue Vorgehensweisen entwickelt werden?
- Auf welchen Maßstabsebenen lassen sich mit den verschiedenen Methoden sinnvolle Ergebnisse ableiten und darstellen?
- Wie lassen sich Informationen unterschiedlicher Datenquellen und Zeitpunkte miteinander vergleichen?
- Und schließlich, wie können die bereits vorhandenen gesammelten Informationen, zusätzlichen Datenquellen und erzielten Ergebnisse allgemein verfügbar gemacht und zukünftig ergänzt werden?

Die vorliegende Arbeit strebt also zweierlei an: sowohl einen Zugewinn an regionalem Wissen für das nigerianische Tschadbecken hinsichtlich Landschaft und Landnutzung sowie deren Wandel in der Zeit zu leisten, als auch im Zuge dieser Auswertungen neue Erkenntnisse auf dem Feld methodischer Forschung für die Bearbeitung von Fernerkundungsdaten und im Bereich geographischer Informationsverarbeitung zu erbringen. Eine Herausforderung stellt dabei die Verknüpfung beider Felder und die verständliche Darstellung für die zwei recht unterschiedlichen potentiellen Interessensgruppen dar.

1.2 Vorgehensweise

Da bei der Durchführung langandauernder umfangreicher Untersuchungen meist eine ständige Verzahnung inhaltlicher, methodischer und organisatorischer Aspekte stattfindet und auch nur ein Teil der viel umfangreicheren Arbeit im Rahmen dieser Dissertation präsentiert werden kann, ist die Gliederung und Struktur in Abb. 1 nochmals graphisch dargestellt.

Im folgenden Kapitel 2 wird der Stand der Forschung getrennt nach inhaltlich-thematischen und methodischen Aspekten zusammengestellt. Im Anschluß erfolgt in Kapitel 3 anhand der für das Untersuchungsgebiet bereits vorliegenden Daten und Informationen ein Einstieg in den weiteren Untersuchungsraum Tschadbecken. Größere Bedeutung wird an dieser Stelle den naturräumlichen Gegebenheiten beigemessen; kulturräumliche Aspekte, die später in den Vordergrund treten werden, sind nur untergeordnet dargestellt.

Ein wichtiger Aspekt der Fragestellungen, nämlich bereits vorhandene Daten zur Landnutzung zusammenzutragen und aufzubereiten bzw. neue Information aus vorhandenen Medien zu extrahieren und diese zu dokumentieren spiegelt sich in Kapitel 4 wider. Dort werden alle in die Untersuchung eingeflossenen Daten dargestellt und je nach Relevanz mehr oder weniger detailliert interpretiert. Dieses Kapitel gibt auch einen ersten Überblick über die im Rahmen dieser Arbeit aufbereiteten und in einem regionalen geographischen Informationssystem integrierten Daten.

Der methodische Einstieg erfolgt in Kapitel 5. Neben der Beschreibung der Geländeerhebungen ist die Vorgehensweise bei der Auswertung der in Kapitel 4 beschriebenen Daten festgehalten. Schwerpunkt bildet die Beschreibung der verwendeten Methoden und Verfahren, deren Anwendung eine intensive Auseinandersetzung mit Programmen der digitalen Bildverarbeitung und geographischer Informationsverarbeitung vorausging. Wegen des Umfangs und der Komplexität dieser Methoden muß dieses Kapitel auf einen Überblick bzw. auf die für die Ergebnisse wichtigsten relevanten Verfahren beschränkt bleiben. Grundlegende und weiterführende Literaturangaben sollen aber einen Einstieg gewährleisten bzw. eine intensivere Beschäftigung mit den Methoden und deren Hintergründen ermöglichen.

Ein Aspekt, der bei der Methodenbeschreibung nur sehr wenig Raum einnimmt, für die gesamte Arbeit aber einen wichtigen Schwerpunkt und einen enormen Zeitaufwand darstellte, ist der Aufbau eines spezifischen regionalen geographischen Informationssystems für den Untersuchungsraum. Die Bedeutung der strukturierten Integration aller verwendeten Daten in einem geographischen Informationssystem kann allerdings in einer schriftlich vorgelegten Arbeit nicht zufriedenstellend dargelegt werden. Einige Beispiele geben die an

verschiedenen Stellen der Arbeit eingefügten Karten, die Bestandteile des weitaus umfangreicheren Informationssystems sind.

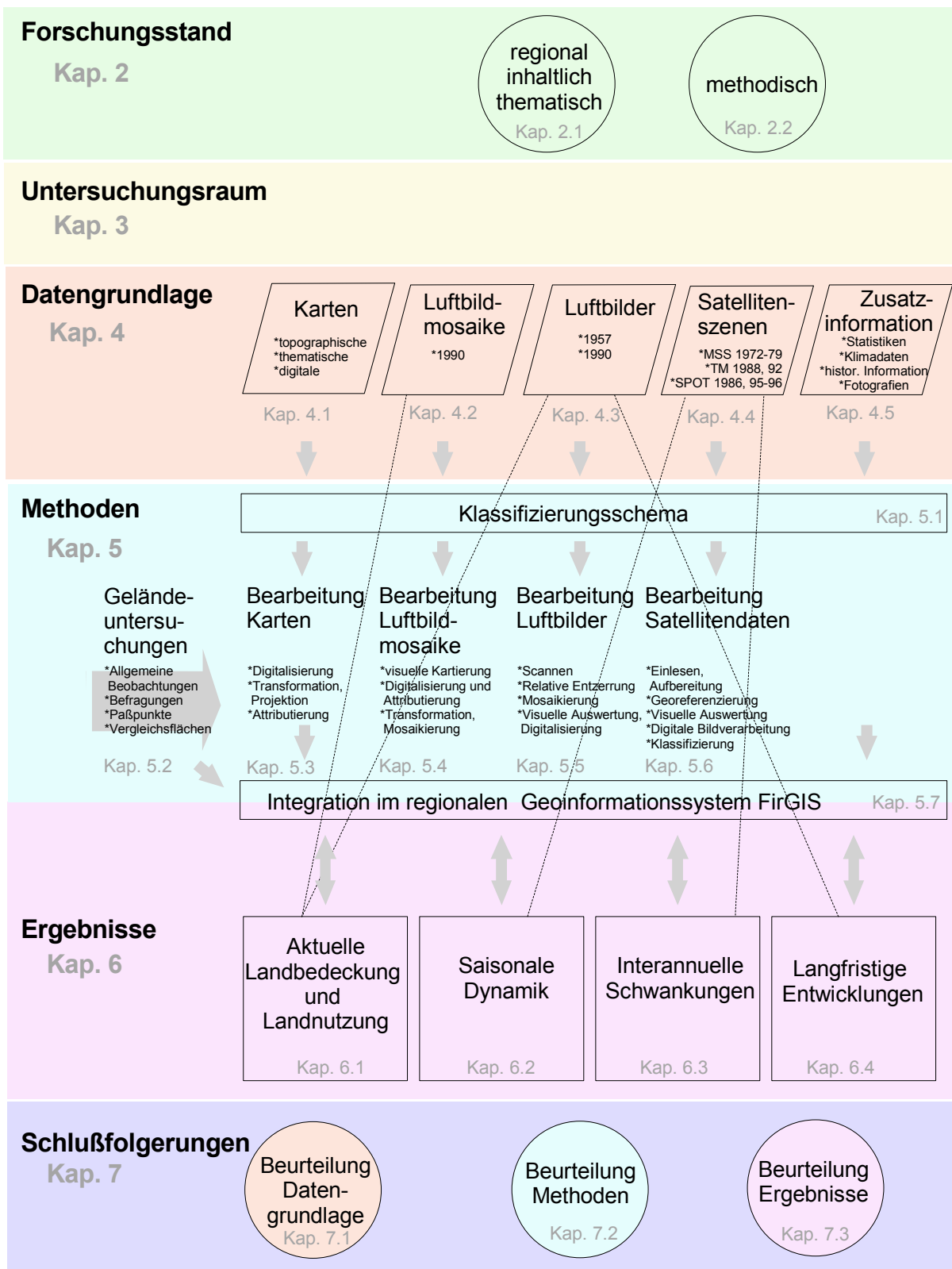


Abb. 1: Gliederung und Vorgehensweise

Neben den relevanten Ausgangsdaten wurden auch alle Ergebnisse zum Wandel von Landschaft und Landnutzung ins regionale geographische Informationssystem aufgenommen. Einige der wichtigsten Karten sind im Zusammenhang mit der Darstellung der Ergebnisse in Kapitel 6 präsentiert. Entsprechend dem komplexen Untersuchungsansatz wurde die Darstellung der Ergebnisse in vier Schwerpunkte gegliedert. Gliederungskriterien sind gemäß der Zielsetzung der Kartierung von Veränderungen die verschiedenen Dimensionen von Zeit. Ausgehend von einem Zeitpunkt, anhand dessen die aktuelle Landnutzungssituation detailliert dargestellt wird (Kap. 6.1), über die Betrachtung der saisonalen Dynamik (Kap. 6.2) und interannueller Schwankungen (Kap. 6.3) werden schließlich langfristige Veränderungen über einen Zeitraum von fast 40 Jahren dokumentiert und analysiert (Kap. 6.4).

Den letzten Punkt vor dem Ausblick (Kap. 8), der Zusammenfassung (Kap. 9) und der Übersicht über die verwendeten Quellen (Kap. 10) bilden die Schlußfolgerungen (Kap. 7). An dieser Stelle wird versucht, sowohl die methodischen Erfahrungen als auch die inhaltlich-thematischen regionalen Erkenntnisse zu bewerten und in einen allgemeinen Bezug zu setzen. Die englische Zusammenfassung (Kap. 9.1) ist als erster kleiner Schritt zu deuten, die Ergebnisse auch umfassend im Untersuchungsraum zur Verfügung zu stellen.

2 Forschungsstand

Wie bereits aus dem Thema und der Zielsetzung dieser Untersuchung ersichtlich wird, sind zwei unterschiedliche Forschungsansätze miteinander verknüpft. Das Hauptinteresse gilt dabei der regionalen thematisch-inhaltlichen Aufgabenstellung, Information zur Landnutzung und deren Veränderung im nigerianischen Tschadbecken zu erlangen. Unerlässlich für diese Zielsetzung ist aber auch die Auseinandersetzung mit bestehenden Techniken der Fernerkundung, der digitalen Bildverarbeitung und geographischer Informationsverarbeitung, um darauf aufbauend diese Methoden für die Fragestellung anzupassen oder neue Vorgehensweisen zu entwickeln.

2.1 Regional inhaltlich-thematisch: Landschaft und Landnutzung im nigerianischen Tschadbecken

"The study of land use in West Africa has not been sufficiently developed to allow the presentation of a survey of land-use patterns."

Dieser Aussage fügen MORGAN & PUGH (1969: 122f) einige Beispiele für kleinräumige Untersuchungen aus den unterschiedlichsten Regionen Westafrikas an. Sie beklagen aber gleichzeitig, daß diese Arbeiten überregional nur von geringem Wert sind, da es sich meist um isolierte Beispiele handelt und abgesehen von wenigen Ausnahmen keine quantitativen Angaben gemacht wurden. Dieser Zustand hat sich bis heute nicht geändert. Recht zahlreich sind die Veröffentlichungen zur naturräumlichen Ausstattung des Untersuchungsraumes (z. B. TULEY 1972a; GASTON et al. 1979; CARMOUZE et al. 1983; vgl. auch Kap. 3). Viele dieser Arbeiten liegen jedoch schon länger zurück und bedürfen einer Revision unter Hinzuziehung modernerer Arbeitsmethoden (vgl. z. B. D.O.S. North East Nigeria – Geomorphology bei THIEMEYER 1997).

Informationen zur Landnutzung sind in den meisten Arbeiten nur sehr beschränkt enthalten. Ein standardisiertes fortgeführtes Erhebungssystem existiert nach meinen Nachforschungen in Nigeria nicht. An einigen wenigen Stellen stößt man auf allgemeine Zahlen zur Landnutzung (z. B. FEDERAL MINISTRY OF AGRICULTURE & NATURAL RESOURCES 1974: 3), aber fast immer fehlt der Raumbezug und damit lassen sich die Zahlen meist weder regional noch temporal vergleichen. Da Angaben zur Landnutzung einem ständigen Wandel unterliegen, sind meist auch keine aktuellen Beschreibungen verfügbar.

Eine der ganz seltenen flächenhaften Angaben zur Landnutzung für Nordost-Nigeria liefert die *Land Resource Study* des *Directorate of Overseas Survey*. Die Karte *Present Landuse* aus den 1970er Jahren im Maßstab 1:1 Mio. kann aber nur einen sehr groben Überblick über die Situation vor mehr als 30 Jahren geben (D.O.S. North East Nigeria – Present Landuse, vgl. auch Kap. 4.1.2).

Die Lage des Arbeitsgebietes im Südwesten des Tschadsees ermöglicht die Einbeziehung von ebenfalls im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 'Westafrikanische Savanne' in verschiedenen Disziplinen durchgeführten detaillierten Arbeiten. Ethnologische Untersuchungen, die unter anderem auch Fragen zur Landnutzung behandeln, wurden innerhalb

des Untersuchungsgebietes in Siedlungen unterschiedlicher ethnischer Zusammensetzung durchgeführt (BRAUKÄMPER et al. 1993; PLATTE 1998; KIRSCHT 1999). Mit einem speziellen Aspekt, dem Trockenzeitanbau im Tschadbecken, hat sich ein interdisziplinäres Projekt auseinandergesetzt (ZACH et al. 1996 und KAHLHEBER & NEUMANN, im Druck). Ebenfalls für diesen Raum beleuchten archäologische und archäobotanische Forschungsarbeiten des Sonderforschungsbereiches die kulturelle Entwicklung im Holozän und die zu der jeweiligen Zeit herrschenden Umweltbedingungen (vgl. BREUNIG & NEUMANN 1996 und weitere Literaturhinweise dort).

Die oben genannten Arbeiten beruhen bisher allerdings immer auf punkthaften Einzeluntersuchungen. Erste Ansätze zu flächenhaften Erfassungen finden sich in den interdisziplinären Arbeiten von KIRSCHT & SKORUPINSKI (1996) zu Böden und Landnutzung sowie in STURM et al. (1996) zu Böden, Vegetation und Landnutzung. In letzterer fanden auch Satellitendaten Anwendung. Ergebnisse eigener Landnutzungsstudien wurden in FRANKE-SCHARF (1997) und unter dem speziellen Aspekt von Desertifikationsschäden aufgrund anthropogener Nutzung in Zusammenarbeit mit Thomas Skorupinski (SKORUPINSKI & FRANKE-SCHARF 1997) veröffentlicht. Die beiden letzten Artikel sind Bestandteile eines im Rahmen des Sonderforschungsbereiches herausgegebenen Sammelbandes zur Landnutzung in der westafrikanischen Savanne (REIKAT 1997).

2.2 Methodisch: Auswertung von Fernerkundungsdaten im semiariden Westafrika

"Land cover mapping has become the most frequent use of remote sensing data."
(PRINCE et al. 1990: 31).

"Notwithstanding the numerous research papers which have been published and the many demonstration projects which have been carried out, the provision of reliable operational land cover information from satellite data still lies largely in the future." (TOWNSHEND 1992: 1319).

Die beiden Zitate verdeutlichen die widersprüchliche Situation sehr gut: Ungeachtet vieler Fernerkundungsuntersuchungen haben sich in kaum einem Anwendungsbereich – auch nicht im 'klassischen' Anwendungsfeld der Landbedeckungs- und Landnutzungskartierung – bestimmte Techniken geschweige denn Standards durchgesetzt. Für die meisten Problemstellungen gibt es eine größere Anzahl verschiedener Herangehensweisen und noch zahlreichere Möglichkeiten für neue Ansätze. Entsprechend unüberschaubar sind die darüber erschienenen Veröffentlichungen. Die größte Schwierigkeit besteht darin, abzuschätzen, inwieweit erfolgreich angewandte Methoden auf andere Gebiete übertragen werden können.

Zunächst losgelöst vom regionalen Bezug spielen für die vorliegende Untersuchung verschiedene methodische Aspekte eine Rolle:

- Der erste Schritt bei der Interpretation von Fernerkundungsdaten ist die Festlegung auf für die Zielsetzung und das Untersuchungsgebiet geeignete Auswertungsprinzipien. Für Landbedeckungs- und Landnutzungskartierungen sind zwar die meisten Klassifizierungssysteme entwickelt worden (vgl. z. B. ATKIS für Deutschland und CORINE für Europa in UMWELTBUNDESAMT (1992) sowie das USGS-System für die USA von

ANDERSON et al. (1976, in SABINS 1987) und viele andere nationale); es existiert aber immer noch kein international anerkanntes System. Insbesondere mangelt es an einem standardisierten Schema, das auch in den Tropen angewendet werden kann.

- Verschiedene Datentypen erfordern unterschiedliche, zum Teil sogar gegensätzliche Verarbeitungsweisen. Luftbilder sind die bereits am längsten eingesetzten Fernerkundungsdaten. Hier läßt sich auch von operationellem Einsatz für die topographische Kartierung und die photogrammetrische Interpretation sprechen (ALBERTZ 1989: 59). Da Luftbilder in den meisten Fällen nicht digital vorliegen, werden sie in der Mehrzahl der Fälle visuell ausgewertet (vgl. LÖFFLER 1994: 111-162). Ein wichtiger Faktor für die Qualität der Auswertungen ist hierbei – neben dem Interpretationsschlüssel – die Kompetenz des Interpreten. Seit Mitte der 1950er Jahre werden Luftbildbefliegungen auch in Westafrika zur topographischen Kartierung eingesetzt (vgl. z. B. Topographische Karten vom *Institute Geographique National* bzw. *Directorate of Overseas Surveys*). In Nigeria gibt es allerdings seit der Unabhängigkeit keine regelmäßigen Befliegungen und damit nur für wenige Gebiete aktuelle Luftbilder; entsprechend gering und außerdem schwer zugänglich sind die Daten selber und ebenso die Veröffentlichungen zur Luftbildauswertung.
- Der Vorteil von Scanner-Satellitenszenen besteht neben ihrer freien Zugänglichkeit darin, daß sie digital vorliegen. Sie können mit Methoden der digitalen Bildverarbeitung (BÄHR & VÖGTLE 1991; HABERÄCKER 1991; KRAUS 1990) so optimiert werden, daß eine bessere visuelle Bearbeitung möglich ist oder aber direkt automatisch ausgewertet werden. Daraus ergibt sich die Frage der Auswertemethoden. Zahlreiche Veröffentlichungen und Grundlagenwerke beschäftigen sich unter sehr unterschiedlichen Gesichtspunkten mit diesem Thema (u. v. a. z. B. RICHARDS & JIA 1999; SABINS 1987; SWAIN & DAVIS 1978). Ein weites Experimentierfeld geben dabei Fragen zu den Spektraleigenschaften der zu kartierenden Objekte, deren Übereinstimmung zum gewählten Klassifizierungssystem und Methoden zur optimalen Identifizierung ab (vgl. u. v. a. KRONBERG 1985).
- Werden, wie im vorliegenden Fall, mehrere Datensätze bearbeitet, kommen 'multitemporale Ansätze' hinzu. Unter diesem Begriff werden zwei völlig unterschiedliche Herangehensweisen subsumiert: Das sind zum einen, häufiger, Vergleiche zeitlich unterschiedlicher Daten zur Beschreibung von Veränderungen. Sie werden auch durch den Begriff '*Change Detection*' oder bei der Verwendung längerer Zeitreihen durch '*Monitoring*' spezifiziert. SINGH (1989) beschreibt und evaluiert für diese Anwendungen die wichtigsten Techniken und gibt eine ausführliche Literaturübersicht (vgl. dazu auch RINGROSE et al. 1990; MOUAT et al. 1993). Die zweite Herangehensweise verwendet ebenfalls Daten unterschiedlicher Zeitpunkte. Der bedeutende Unterschied liegt jedoch darin, daß die zu bearbeitenden Aufnahmen in engerem Abstand (meist während einer Vegetationsperiode) vorliegen. Sie sollen inklusive dieser zusätzlichen temporalen Identifizierungsmerkmale zur Kartierung nur eines bestimmten Merkmales oder Zustandes herangezogen werden (gute Einführung bei SWAIN & DAVIS 1978: 5-10). Durch die Einbeziehung zeitlicher Unterschiede (meist unterschiedliche phänologische Phasen) lassen sich Klassifizierungen in bestimmten Fällen optimieren (vgl. LO et al. 1986 für MSS-Daten in den USA; FRANKE 1994 für multitemporale TM-Datenauswertung im Hessischen Ried in Deutschland und JEWELL 1989 für die Auswertung von vier SPOT-Szenen einer

Vegetationsperiode in England). SCHMID (1997) verwendet in seiner Arbeit ebendiesen Ansatz zur Bearbeitung von multitemporalen SPOT-Daten der Sudanzone Burkina Fasos und gibt dazu einen umfassenden Literaturüberblick.

- Der Verwendung multitemporaler Daten, ganz gleich welchen Ansatzes, folgt meist die Auseinandersetzung mit einem weiteren Methodenkomplex der digitalen Datenverarbeitung. Große Datenmengen, wie sie sich durch die gleichzeitige Bearbeitung mehrerer Szenen ergeben, fordern zum einen spezielle Datenkompressionsmethoden, eröffnen aber andererseits auch weitere Möglichkeiten zur Datenoptimierung für bestimmte Auswertungen. Zu diesen Verfahren können einfache arithmetische Funktionen von Bildern (z. B. Differenzen und Ratios) wie auch unterschiedliche Verfahren der Hauptkomponentenanalyse (LUJIAJU 1988; TOWNSHEND 1984; MANIÈRE et al. 1991) gezählt werden.
- In Erweiterung zum ersten Methodenpunkt zur gemeinsamen Auswertung von Daten unterschiedlicher Systeme lassen sich ähnliche Überlegungen anstellen wie für Daten unterschiedlicher Aufnahmezeitpunkte. In vorliegender Untersuchung muß zur Abdeckung des größtmöglichen Untersuchungszeitraumes auf Aufnahmen von verschiedenen Fernerkundungsplattformen zurückgegriffen werden. Diese 'multisensoralen' Daten weisen verschiedene spektrale, geometrische und radiometrische Eigenschaften auf und bedürfen unterschiedlicher Behandlung bzw. können nur eingeschränkt miteinander verglichen werden. Die Unterschiede in den Merkmalen bieten jedoch auch hier potentielle zusätzliche Identifikationsmerkmale, die bewußt zur Differenzierung eingesetzt werden können. DWIVEDI et al. (1997) vergleichen und kombinieren z. B. Multisensordaten zur Erosionskartierung in Indien. STOW et al. (1990) verbinden multitemporale mit multisensoralen Daten allerdings gleicher Plattformen zur Kartierung von Landnutzungsveränderungen und evaluieren unterschiedliche Methoden.
- Schließlich ist ein sehr wichtiger Aspekt dieser Arbeit die Integration der Daten und Ergebnisse in einem geographischen Informationssystem. Arbeiten zu diesem Thema haben in den letzten Jahren enorm an Bedeutung gewonnen. Grundlagen, auf die in diesem Rahmen nicht eingegangen werden kann, lassen sich an vielen Stellen ausführlich nachlesen (u. a. ESRI 1997; BILL 1996; BILL & FRITSCH 1991). Zunehmend werden Fernerkundungs- und Zusatzdaten innerhalb geographischer Informationssysteme kombiniert (u. v. a. MOUAT & LANCASTER 1996; ADINARAYANA & RAMA KRISHNA 1996; TRIPATHY & GNOSH 1996; RINGROSE et al. 1997). Die Bedeutung der Integration der Daten und gewonnenen Ergebnisse in geographischen Informationssystemen – vor allem für Länder, in denen die allgemeine Datenlage schwieriger ist – wurde in letzter Zeit von vielen erkannt (z. B. ALBERTZ 1989). So präsentieren nun weltweit vor allem Universitäten aber auch andere Forschungseinrichtungen ihre Untersuchungsergebnisse im Rahmen geographischer Informationssysteme im Internet (vgl. z. B. Universität Hohenheim unter <http://www.uni-hohenheim.de/~atlas308/> oder Universität Maryland, U.S.A. unter <http://bcnet.org/learning/african/justice.htm>).

Versucht man, sich den Fernerkundungsmethoden unter Einbeziehung des regionalen Kontextes zu nähern, so stellt man fest, daß die Anwendung der unterschiedlichen – zum Teil oben beschriebenen – Methoden für Kartierungen in den USA (z. B. COLWELL 1983b) und in Europa (z. B. TOWNSHEND 1992; LÖFFLER 1994: 194ff) am weitesten fortgeschritten sind. Dabei werden für regionale Landnutzungskartierungen Daten unterschiedlicher Sensoren hauptsächlich aber Daten der amerikanischen *Landsat*- und französischen *SPOT*-Satelliten und sehr untergeordnet *RADAR*-Daten eingesetzt (vgl. Spektrum an Anwendungen in TOWNSHEND 1992: 1320). Einige der wenigen operationellen Anwendungen liegen neben meteorologischen im Bereich landwirtschaftlicher Fragestellungen wie z. B. in der Erntertragsabschätzung in den USA (vgl. LÖFFLER 1994: 195) und der Überwachung von Stilllegungs- und Landwirtschaftsflächen durch die Europäische Union (vgl. FRANKE 1994). Ebenfalls ein europäisches Projekt ist das *CORINE*-Programm, für das die ersten Ergebnisse einer europaweiten, allerdings visuellen, Landbedeckungskartierung aus *Landsat*-Daten im Maßstab 1 : 100 000 vorliegen (UMWELTBUNDESAMT 1992 oder LÖFFLER 1994:199).

Für großräumige Untersuchungen finden außerdem räumlich geringer aufgelöste *NOAA*-Daten Anwendung. Sie werden für globale, verstärkt aber auch für überregionale Fragestellungen eingesetzt. Für diese überregionalen Fernerkundungsarbeiten stellt die Sahel- und Sudanzone Westafrikas sogar einen gewissen Forschungsschwerpunkt dar (MOHLER & AMSBURY 1988; LAMBIN 1996; EHRLICH et al. 1997; LAMBIN & EHRLICH 1997). LAMBIN & EHRLICH (1997: 189 bzw. 187) weisen auf den dringenden Bedarf von mühsamen regionalen Detailstudien für besonders variable Räume hin und erwähnen '*the Bornu plains in north-eastern Nigeria as one main hot spot of change in the Sahel*'.

Für aride und semiaride Räume ist die Nutzung von Fernerkundungsdaten auf regionaler Ebene viel weniger intensiv erforscht. PRINCE et al. (1990) geben einen sehr guten Überblick über die verschiedenen Thematiken, die im Sahel-Bereich bearbeitet wurden. Der überwiegende Teil der Untersuchungen beschränkt sich allerdings auf den frankophonen Teil Westafrikas. Dies ist zum größten Teil auf die französischen Aktivitäten in Verbindung mit dem *SPOT*-Sensor zurückzuführen (vgl. dazu z. B. CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE 1989). Eine im Vergleich zu vorliegender Untersuchung ähnlich strukturierte Arbeit hat CSAPLOVIC (1992) für den Sahel Malis vorgelegt. Weitere deutschsprachige Studien auf regionaler Ebene wurden von KUSSEROW (1995) ebenfalls für Mali und von WILL (1996) für Benin erarbeitet.

Wie bereits für die Luftbildauswertung angesprochen, gibt es für Nigeria nur sehr vereinzelte Arbeiten, die auf Fernerkundungsdaten basieren. Eine Übersicht gibt ADENIYI (1986a). Die Zahl der Untersuchungen verringert sich weiter drastisch, wenn die zu Explorationszwecken der Petroleum-, Uran- oder anderen Industrien erstellten abgezogen werden (vgl. in ADENIYI 1989: 177). ADENIYI (1989: 172ff) argumentiert, daß das Fehlen einer staatlichen Koordination und klarer offizieller Ziele die Entwicklung im Fernerkundungssektor in Nigeria behindert. Der Autor beklagt ebenfalls den Mangel an nationalen Einrichtungen zur Förderung der Fernerkundung. Ein Großteil der Veröffentlichungen über Nigeria stammt vom Leiter des Fernerkundungslabors im *Department of Geography* der Universität Lagos bzw. wurde unter seiner Mitarbeit geleistet: über Anwendungen landwirtschaftlicher Landnutzungskartierungen in Nigeria allgemein (ADENIYI 1986b), über Landnutzungsveränderungen in einem Bewäs-

serungsgebiet am Sokoto-Fluß im Nordwesten Nigerias vor und nach dem Bau eines Dammes (ADENIYI et al. 1988) sowie über die Nutzung von Fernerkundungsdaten zur Bevölkerungsabschätzung (ADENIYI 1987). In Zusammenarbeit mit kanadischen Wissenschaftlern wurde aus der Kombination von *Overlay*-Technik, Klassifizierung und Maskierung eine Methode zur verbesserten Kartierung von Veränderungen entwickelt (PILON et al. 1988).

Ein Untersuchungsgebiet im Nordwesten Nigerias wurde von IGBOKWE (1994) bearbeitet. Dabei fanden multitemporale Daten zur Kartierung von Landschaftsveränderungen Anwendung. Anhand von Luftbildern haben OJANUGA & EKWOANYA (1995) Landnutzungsveränderungen in der Benue-Überflutungsebene bei Makurdi kartiert; genauere Informationen und Ergebnisse liegen zu dieser Arbeit aber leider nicht vor. Internetrecherchen ergaben außerdem Informationen über ein von der Weltbank finanziertes Projekt zu Vegetations- und Landnutzungsänderungen in Nigeria zwischen 1976/78 und 1993/95. Dazu wurden die unterschiedlichsten Satellitendaten visuell ausgewertet und digitale Vegetations- und Landnutzungskarten im Maßstab 1 : 250 000 hergestellt (<http://www.geoniger.com/luv.htm>). Versuche, die relevanten Kartenblätter zu beziehen, blieben leider bisher erfolglos.

In einem Partnerschaftsprojekt mit dem *Center of Arid Zone Studies* sowie weiteren Instituten der Universität Maiduguri in Nigeria arbeitete eine Arbeitsgruppe des *Silsoe College* aus England zusammen. Unter anderem wurden Landbedeckungskartierungen im *Yobe State* anhand von Satelliten- und Luftbildern angefertigt. Zum Teil wurden die gleichen Datenquellen für weiter nördlich im *Yobe State* liegende Untersuchungsgebiete ausgewertet, die auch in der vorliegenden Arbeit verwendet werden (vgl. Kap. 4.2). Ab 1991 wurde begonnen, GIS- und Fernerkundungseinrichtungen an der Universität Maiduguri einzurichten (UNIMAID/SILSOE LINKEAGE 1991). Jüngere GIS- und Fernerkundungsaktivitäten betrafen unter anderem Aufgaben zur Agrarstatistik, eine Datenbank für terrestrische und aquatische Ressourcen, eine Übersicht über Waldressourcen und Landdegradation sowie den Versuch *Real Time Monitoring* mit *METEOSAT*- und *NOAA*-Daten durchzuführen (UNIMAID/SILSOE LINKEAGE 1994). Während des ersten Feldaufenthaltes konnte Kontakt mit dem Koordinator des Projektes aufgenommen werden, eine engere Zusammenarbeit während des zweiten Feldaufenthaltes scheiterte aber leider aufgrund unsicherer Folgefinanzierung dieser Einrichtung.

Der Frankfurter Sonderforschungsbereich 268 setzt seit 1989 Fernerkundungsmethoden zur Erkundung des zu untersuchenden Raumes und vor allem zu kartographischen Zwecken ein. Außerdem wurden verschiedene spezielle Fragestellungen aufgegriffen: Für Nigeria wurden bei der Kartierung von Veränderungen im Zuge eines Staudammprojektes vor allem auch Fragen zur Landnutzung behandelt (DOBE 1994). SCHUCHMANN (1996) gibt anhand dreier verschiedener Arbeitsgebiete in Nordost-Nigeria einen Überblick über die verschiedenen Methoden der Fernerkundung zur Naturraumanalyse. KAWKA (1994 und 1998) widmete sich in zwei Arbeiten der Stadtentwicklung in Nigeria und Burkina Faso. In der Sudanzone Burkina Fasos wurden von SCHMID (1997) mehrere *SPOT*-Satellitenszenen aus einer Vegetationsperiode auf ihren Informationsgehalt bezüglich der Savannenvegetation untersucht. Parallel zu den Untersuchungen im Tschadbecken werden seit 1997 Fernerkundungsdaten im Atakora-Gebirge in Nord-Benin zur Beantwortung von Fragen der Landnutzung und Siedlungsdynamik ausgewertet (HAHN-HADJALI et al. 2000).

3 Untersuchungsraum

“Le bassin du lac Tchad a longtemps été le siège d’une vaste mer intérieure avant d’être en partie occupé par un désert assez inhospitalier. La région qui nous concerne semble relativement privilégiée puisque les vestiges de la mer paléotchadienne ont créé une sorte d’oasis en plein sahel. Mais n’est-ce pas qu’un sursis?” (BOUQUET 1990: 102)

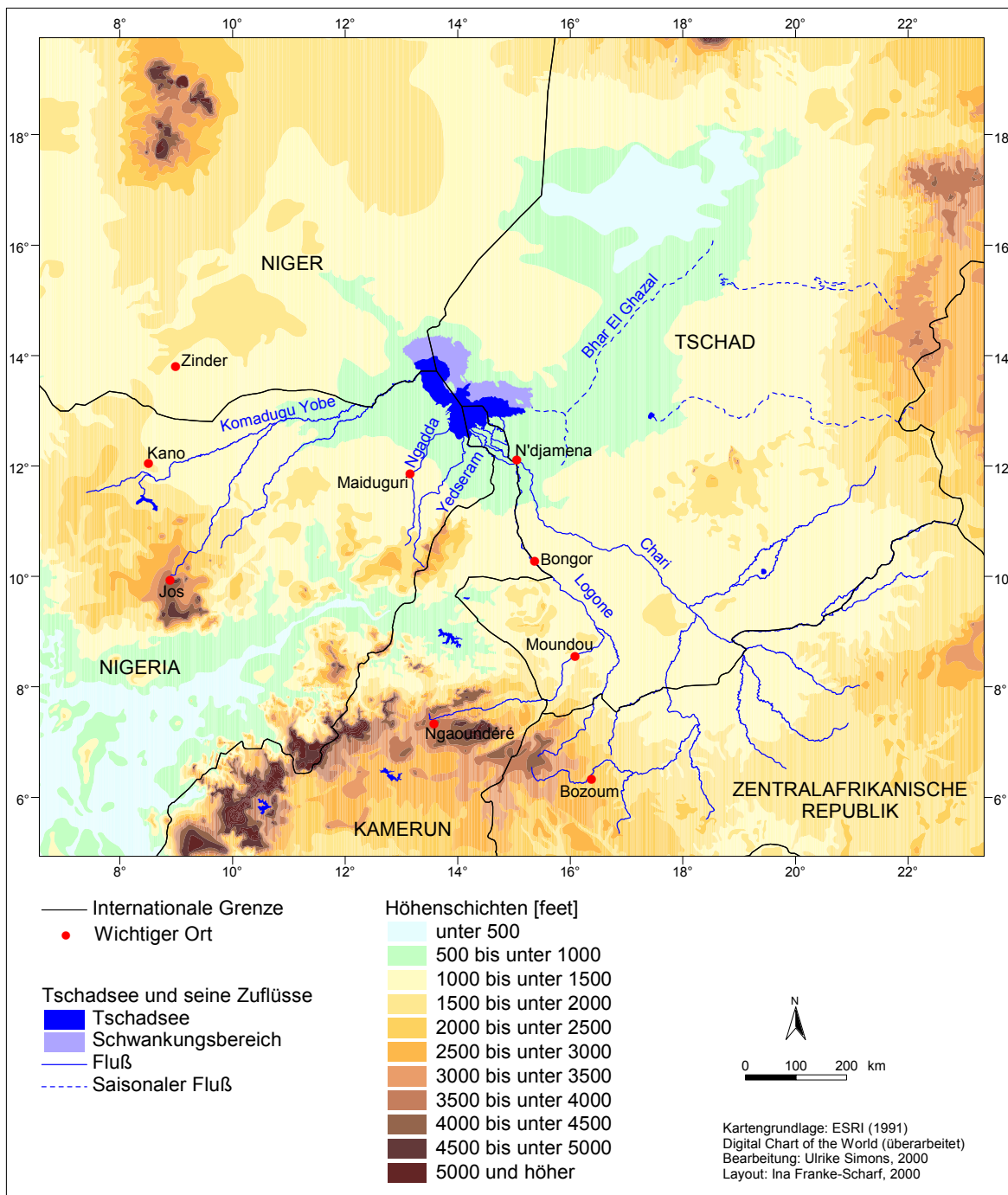


Abb. 2: Überblick über das Tschadbecken und seine Zuflüsse

Mit dem Untersuchungsraum Tschadbecken (Abb. 2) gehen zwei verschiedene Betrachtungsweisen einher. Zwar stellt das Becken mit dem See im Zentrum eine sehr markante Besonderheit in der umliegenden Sahel- und Sudanzone dar, dennoch besteht die Bestrebung, neben der Erforschung regional relevanter Phänomene mehr oder weniger gut, allgemeingültige raum-zeitliche Beziehungen der semiariden Tropen zu abstrahieren. In Anbetracht dessen, spielen folgende allgemeine Überlegungen eine wichtige Rolle:

- Aufgrund der in der Vergangenheit auftretenden starken Seespiegelschwankungen stellt die Umgebung des Tschadsees einen Raum mit extrem großen Veränderungen dar. Beispielhaft wird dies anhand einer umfangreichen überregionalen Studie von LAMBIN & EHRLICH (1997) sehr gut verdeutlicht. Mit Hilfe von NOAA-Satellitendaten haben sie saisonale und langfristige Landbedeckungsveränderungen für das gesamte subsaharische Afrika untersucht. Als Ergebnis vermerken sie eine insgesamt sehr hohe Dynamik, aber nur sehr wenige linear verlaufende Entwicklungen. Als ein Raum, der sich durch linear verlaufende Veränderungen auszeichnet, hat sich Nordost-Nigeria herauskristallisiert. Diese These muß nach Meinung der Autoren durch feinmaßstäbige Untersuchungen belegt werden.
- Besonders im nigerianischen Bereich des Tschadbeckens fehlen bisher noch Arbeiten für den größeren Maßstabbereich (vgl. Kap. 2.2). Dies gilt insbesondere für die Analyse flächenhafter Daten zur Landbedeckung und Landnutzung. Aufgrund der hohen landschaftlichen Variabilität fehlen aber auch jegliche aktuelle topographische Grundlagen, insbesondere im engeren Umfeld des Sees (vgl. Kap. 4).
- Das nigerianische Tschadbecken als ein Schwerpunktraum des Sonderforschungsbereiches 268 bietet sich auch insofern als Untersuchungsraum an, als in ihm bereits zahlreiche Detailstudien unterschiedlicher Fachdisziplinen erarbeitet worden sind. So kann zum einen auf eine grundlegende Organisationsstruktur vor Ort zurückgegriffen, und zum anderen thematisch auf die bereits durchgeführten Forschungsarbeiten aufgebaut werden. Durch die enge interdisziplinäre Zusammenarbeit lassen sich die geographischen Befunde ergänzen und die Geländearbeiten vor Ort einfacher und effizienter gestalten.
- Schließlich konnte im Rahmen des Sonderforschungsbereiches über die Finanzierung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft im geographischen Teilprojekt 'Nigerianisches Tschadbecken' neben dem Aufbau mehrerer Arbeitsplätze zur digitalen Bildverarbeitung und Geoinformationsverarbeitung ein umfangreiches und in seiner zeitlichen Tiefe bemerkenswertes Satellitendatenarchiv angelegt werden, das für viele Bereiche Nordost-Nigerias die einzige aktuelle Datengrundlage bildet.

Die Auswahl des engeren Arbeitsgebietes erfolgte nach naturräumlichen Kriterien. Der zu bearbeitende Bereich deckt die unterschiedlichen im Untersuchungsraum vorkommenden Landschaftseinheiten ab, damit das breite Spektrum von Landnutzungssystemen berücksichtigt und daraus Beziehungen abgeleitet werden können. Eine direkte Abhängigkeit besteht gezwungenermaßen zu vorhandenen bzw. verfügbaren Daten. Das aus den unterschiedlichsten Medien zusammengesetzte, in verschiedenen Maßstäben und zu sehr unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommene Datenmaterial bildet jeweils unterschiedliche

Bereiche des Tschadbeckens ab. Aus diesem Grund ist eine allgemeingültig eindeutige Abgrenzung des Arbeitsgebietes nicht für alle Auswertungen möglich. Desweiteren begrenzt der Verarbeitungsaufwand die Größe des Untersuchungsgebietes.

3.1 Naturräumlicher Überblick

Abbildung 3 gibt anhand eines Satellitenbildmosaiks einen Überblick über die Untersuchungsregion einschließlich ihrer angrenzenden Nachbargebiete in Niger, Kamerun und Tschad. Dieser Ausschnitt wird vor allem für kleinmaßstäbige Untersuchungen und das Verständnis überregionaler Prozesse, die funktional in engem Zusammenhang mit dem Untersuchungsgebiet stehen, herangezogen. Bei der Interpretation der großmaßstäbigen Daten kann hingegen nur ein Teilraum betrachtet werden, der sich auf einen südlich bis südwestlich an den heutigen Seeuferbereich angrenzenden Teil Nigerias beschränkt. Eine weitere Untergliederung in ein weiteres (relevant für die Auswertungen in Kap. 6.1) und ein engeres Untersuchungsgebiet (relevant für die Auswertungen in Kap. 6.2, 6.3 und 6.4) mußte aufgrund der Datenlage und des Auswertungsaufwandes vorgenommen werden (vgl. auch Abb. 12).

Der Naturraum des Tschadbeckens ist bereits in zahlreichen Arbeiten beschrieben worden. Die meisten Veröffentlichungen zu den Themen Meteorologie, Hydrologie, Geologie, Bodenkunde und Landwirtschaft stammen allerdings aus den frankophonen Ländern, allen voran die von *ORSTOM* (*Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer*, z. B. CARMOUZE et al. 1983; CHOURET 1977; CHANTRAINE 1978). Ergänzend kann auf Studien der länderübergreifenden LAKE CHAD BASIN COMMISSION (1987) sowie auf zahlreiche weitere Einzelstudien zurückgegriffen werden. Für den nigerianischen Teil sind dies insbesondere Projekt-Studien der CHAD BASIN DEVELOPMENT AUTHORITY (1985; 1988; 1994) und des LAKE CHAD RESEARCH INSTITUTE (1984; 1991) sowie von anderen Stellen herausgegebene Studien (FAO 1973; FEDERAL MINISTRY OF AGRICULTURE & NATURAL RESOURCES 1974; 1975; 1976; FEDERAL MINISTRY OF AGRICULTURE, WATER RESOURCES AND RURAL DEVELOPMENT 1987).

Die umfassendste Datenquelle zu den naturräumlichen Grundlagen Nordost-Nigerias bietet die von mehreren Autoren in den 1960er Jahren bearbeitete und mit zahlreichen Karten erschienene *Land Resource Study* (TULEY 1972a und D.O.S. North East Nigeria im Kartenverzeichnis). Sie gilt in den meisten Bereichen noch heute als Grundlagenwerk, und die darin veröffentlichten Karten wurden zum Teil auch im Rahmen dieser Arbeit als Ausgangskarten im geographischen Informationssystem integriert. Für einen besseren Bezug und um Verwechslungen der zum Teil sehr komplexen Landschaftseinheiten zu vermeiden, werden auch hier die in der *Land Resource Study* verwendeten Namen – zum Teil auf Englisch – verwendet.

Für räumlich und thematisch detailliertere Beschreibungen des Untersuchungsraumes können außerdem aktuelle Arbeiten zur quartären (THIEMEYER 1997) und spätpleistozänen (GUDDAT-SEIPEL, in Vorbereitung) Landschaftsentwicklung, zum Klima (TSCHIERSCHE 1997) sowie zu Vertisolböden im südwestlichen Tschadbecken (SKORUPINSKI, in Vorbereitung) des im Tschadbecken arbeitenden geographischen Teilprojektes des Sonderforschungsbereiches 268 herangezogen werden.

Im Rahmen dieser auf Landnutzungsveränderungen ausgerichteten Untersuchung soll deswegen nicht erneut eine vollständige Abhandlung über die naturräumlichen Gegebenheiten des Untersuchungsraumes gegeben werden. Stattdessen wird versucht, die naturräumlichen Gegebenheiten, soweit sie für das allgemeine Verständnis und die Landnutzungsverhältnisse eine Rolle spielen und soweit sie Erklärungen für die räumliche Verteilung der verschiedenen Nutzungsarten und deren Veränderung liefern, überblickartig zusammenzufassen.

3.1.1 Klimatische Gegebenheiten

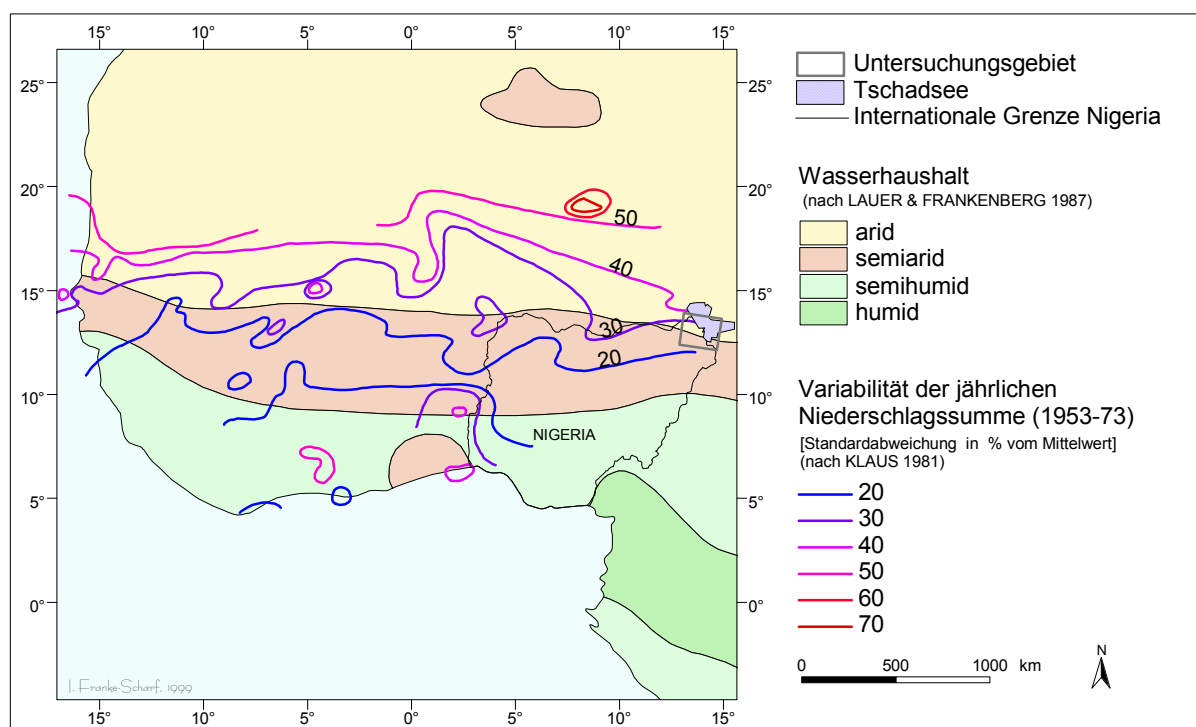


Abb. 4: Wasserhaushalt nach LAUER & FRANKENBERG und Variabilität der jährlichen Niederschläge nach KLAUS für Westafrika

Das Klima ist der am stärksten die Landschaft und deren Nutzung prägende Faktor im Tschadbecken. Innerhalb der Tropen entsteht das Klima in einem fast geschlossenen Zirkulationssystem, das durch die Eigenschaften und Verschiebungen der Innertropischen Konvergenzzone (*ITC – Inner Tropical Convergence*) geprägt ist. Die Lage des Untersuchungsgebietes zwischen 12° und 14° nördlicher Breite bedingt mit den Verlagerungen der Konvergenzzone und den damit einhergehenden Veränderungen der Luftdruckverhältnisse eine Einteilung in zwei Jahreszeiten.

Mit der Nordwanderung der *ITC*, die zeitlich verzögert dem Sonnenhöchststand folgt, bringen südwestliche Monsunwinde Niederschläge von Ende Mai bis Anfang Oktober. Infolge der Südwärtsbewegung der *ITC* im Winter herrschen hingegen von November bis April trockenkalte Nordostwinde vor. Dieser Nordost-Passat (*Harmattan*) transportiert große Mengen Staub aus der Sahara. Sowohl die häufige Bewölkung während der Regenzeit als auch die geringe Strahlendurchlässigkeit der partikelgeladenen Luft während der *Harmattan*-Saison können sich störend auf Luftbild- und Satellitenaufnahmen von passiven Systemen auswirken.

Für einen ersten Überblick läßt sich das Untersuchungsgebiet, den allgemeinen Klimaklassifikationen folgend, nach KÖPPEN & GEIGER (1928) dem trockenheißen Steppenklima (BSh) und nach TROLL & PAFFEN (1964) dem tropischen Trockenklima (V4) mit 2 bis 4,5 humiden Monaten zuordnen. Da die hygrischen Verhältnisse für Pflanzenwachstum und damit auch für die Landnutzung den bedeutendsten Faktor darstellen, wurde als Grundkarte in Abb. 4 die Klimakarte nach dem Wasserhaushalt von LAUER & FRANKENBERG (1987, Kartenverzeichnis) ausgewählt. Danach befindet sich der zentrale Teil des Untersuchungsgebietes im semiariden, der nördliche Bereich mit dem Großteil des Tschadsees allerdings schon im ariden Klimabereich. Die Zuordnung der Gebiete zu einer bestimmten Klimaregion relativiert sich allerdings mit der Einbeziehung der Variabilität der Niederschläge.

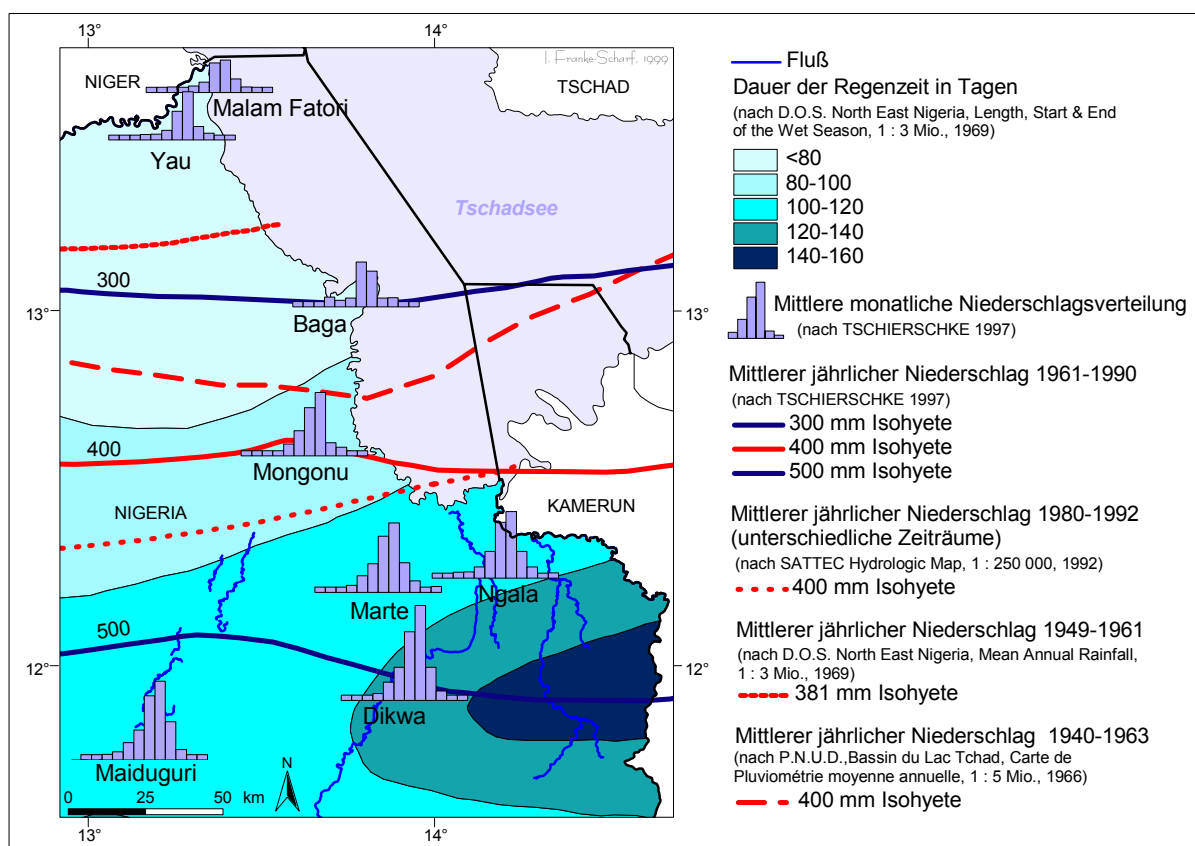


Abb. 5: Länge der Regenzeit, monatliche Niederschlagsverteilung und Isohyeten mittlerer jährlicher Niederschläge aller Stationen im Untersuchungsraum

Eine genauere Charakterisierung des Arbeitsgebietes kann anhand einzelner Klimaparameter erfolgen. Da die Temperatur im Untersuchungsraum nur relativ geringen jahreszeitlichen Veränderungen unterliegt und nicht als limitierender Faktor für das Pflanzenwachstum auftritt, soll im Rahmen dieser Arbeit nur am Rande darauf eingegangen werden. Höchste Mitteltemperaturen treten mit Beginn der Regenzeit im April und Mai (31°C) und niedrigste im Dezember und Januar mit 21°C tagsüber und 8°C nachts auf (TULEY 1972b: 13). Die hohen Temperaturen bedingen mit etwas geringeren Werten während der Regenzeit und nur geringen räumlichen Abweichungen insgesamt sehr hohe Verdunstungsraten.

Wichtigstes Klimatelement ist der Niederschlag. In Abb. 5 sind die Klimastationen des Untersuchungsraumes dargestellt, für die monatliche Niederschlagsdaten vorliegen. Die Aufnahmezeiträume unterscheiden sich stark und sind häufig unterbrochen. Für Baga, Mongonu und Dikwa sind die monatlichen Mittelwerte aus weniger als zehn Jahren berechnet. Yau und Malam Fatori weisen zwar 15 bzw. 14 Jahre auf, diese sind aber sehr unregelmäßig verteilt. Für die Stationen Marte und Ngala im engeren Untersuchungsgebiet konnten durchgängige Meßreihen ab Ende der 1970er Jahre in die Berechnung eingehen (Marte: 1979-96 außer 1985, Ngala: 1977-96). Die Station Maiduguri ($11^{\circ}51'\text{N}$) weist als einzige Station eine längere Meßreihe (1915-99 außer 1925) auf. Sie wurde trotz ihrer südlichen Lage aus diesem Grund für Vergleiche über größere Zeiträume und um einen Bezug zu den ausgewerteten Fernerkundungsdaten herstellen zu können, einbezogen (Abb. 6).

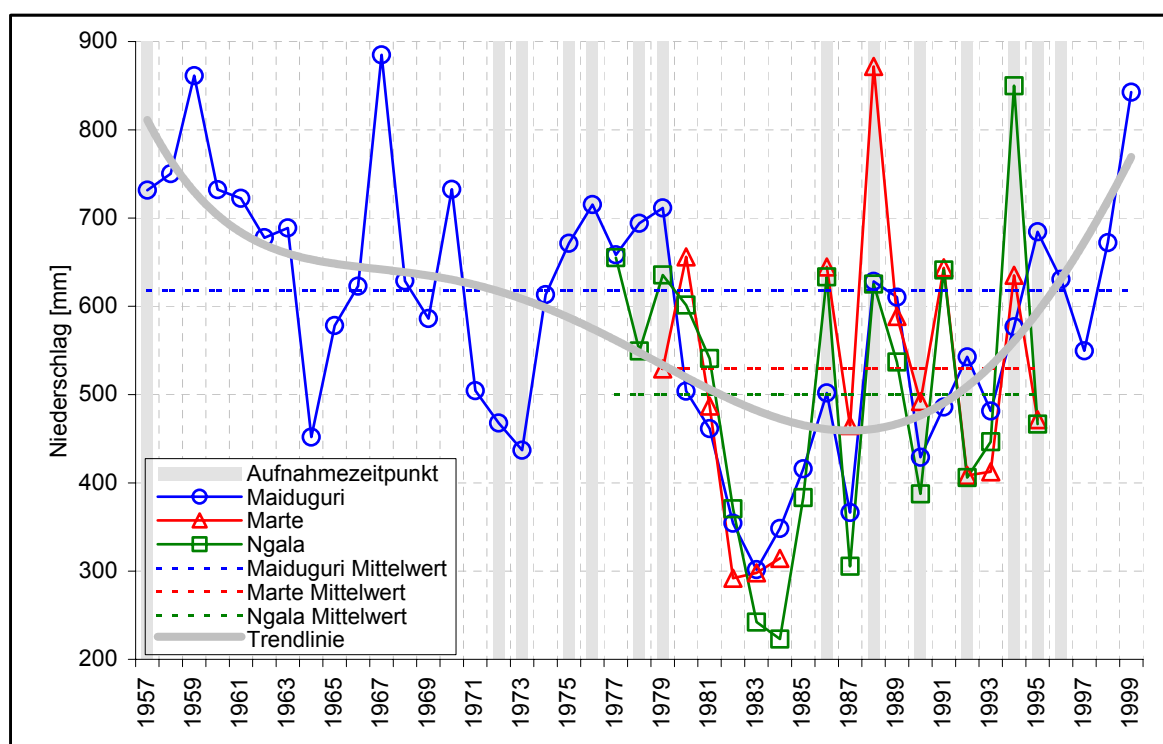


Abb. 6: Abweichungen der jährlichen Niederschläge vom Mittelwert für die Stationen Maiduguri, Marte, Ngala während der Aufnahmezeiträume der Fernerkundungsdaten

Eine ausführliche Darstellung und Auswertung der verfügbaren Temperatur- und Niederschlagsdaten für das gesamte Tschadbecken sowie die Berechnung der Isohyeten aller Stationen im weiteren Tschadbecken findet sich in TSCHIRSCHKE (1997).

Wie aus Abbildung 5 deutlich wird, nehmen Länge der Regenzeit sowie Niederschlagsmengen mit zunehmender geographischer Breite allmählich ab. Während im südlichen Bereich noch mittlere Jahresniederschläge von über 500 mm angegeben sind, sinkt dieser Wert im äußersten Norden Nigerias auf unter 200 mm. Die zeitliche Verteilung der Niederschläge im Jahresverlauf ist durch Diagramme für alle Stationen dargestellt. Sie weist für alle Stationen (außer Baga, Meßzeitraum nur 3 Jahre) ein ähnliches Muster einer unimodalen Verteilung mit allmählichem Anstieg der Niederschläge von Mai bis August, dem Monat mit den höchsten Niederschlägen, und einem anschließend rapiden Abfall auf.

Für eine räumliche Beschreibung der Niederschlagsverteilung sind die Isohyeten in Abb. 5 aus TSCHIERSCHE (1997) übernommen. Vergleichend wurden die 400 mm-Isohyeten (als Wert für die agronomische Trockengrenze) aus weiteren Arbeiten dargestellt. Während die 400 mm-Isohyeten (durch die Umrechnungen von inch in mm ist für die *Land Resource Study* die 381 mm-Isohyete dargestellt) der beiden Untersuchungen aus den 1960er Jahren (D.O.S. North East Nigeria, Mean Annual Rainfall und P.N.U.D. et al. 1966, Kartenverzeichnis) noch annähernd vergleichbar nördlich Mongonu verlaufen, findet sie sich in der Untersuchung mit Daten von 1980 bis 1992 bereits mehr als 50 km südlich. Zwischen diesen Extremen verläuft die 400 mm-Linie nach TSCHIERSCHE (1997: 17ff und 35f), die aus der längsten Datenreihe berechnet wurde.

Aufgrund der sehr inkonsistenten Meßzeiträume, dem sehr unterschiedlichen Zustand der nigerianischen Klimastationen (vgl. auch AKINTOLA 1986: 2) und der unterschiedlichen Berechnungsverfahren lassen sich diese Daten und die daraus berechneten räumlichen Verteilungen nur eingeschränkt miteinander vergleichen. Generelle Aussagen sind deswegen in solchen Räumen extrem schwierig. Angedeutet werden durch die Abbildungen aber große Schwankungen der Einzelwerte und durch die Südwärtsverschiebung der 400 mm-Niederschlagslinie in den letzten 20 Jahren eine generelle Abnahme der Niederschläge. Dieser Trend wird durch verschiedene Autoren auch für andere Regionen Westafrikas bestätigt (z. B. TAPPAN et al. 2000). TSCHIERSCHE (1997: 70) extrahierte aus dem von ihm verwendeten Datensatz für das Tschadbecken eine Abnahme der Niederschläge um 20% für den Zeitraum 1905 bis 1994 und sogar um 37% zwischen 1951 und 1994.

3.1.2 Quartäre Sedimente und Geomorphologie

Das insgesamt über 2 Millionen km² große Tschadbecken erstreckt sich vom Hoggar- und Tibestigebirge im Norden bis zur tschadischen Grenze im Osten und dem Hochland in Kamerun und Zentralafrika im Süden (Abb. 2). Etwa 1,6 Millionen km² liegen auf nigerianischem Territorium. Hier bilden die Wasserscheiden zum Niger und Benue die Grenze der flachen abflußlosen Senke. Seit dem Tertiär ist dieser Bereich Sedimentationsraum. Unter nur geringen tektonischen Aktivitäten wurden seitdem weitflächig Sedimente der *Chad Formation* abgelagert. Dabei überlagern unverfestigte, meist äolische Sande und unterschiedliche Sedimente fluviatilen und limnischen Ursprungs bereits diagenetisch verfestigte Sande und Tone (BAWDEN 1972a: 58).

Diese oberflächlichen Ablagerungen spiegeln die rezente Landschaftsentwicklung wider. Denn seit dem Pleistozän führten Klimaschwankungen mehrfach dazu, daß in diesem Raum sowohl extreme Wüstenbedingungen als auch Bedingungen einer gut bewässerten Savanne auftraten. Entsprechend war aufgrund des extrem flachen Reliefs auch die Ausdehnung des Tschadsees starken Schwankungen unterworfen (vgl. DURAND 1982; GROVE 1985; HOELZMANN 1994; THAMBYAPILLAY 1983 u. a.). Zeugen dieser unterschiedlichen Landschaftszustände lassen sich sowohl im Gelände als auch deutlicher noch im Satellitenbild erkennen (Abb. 3).

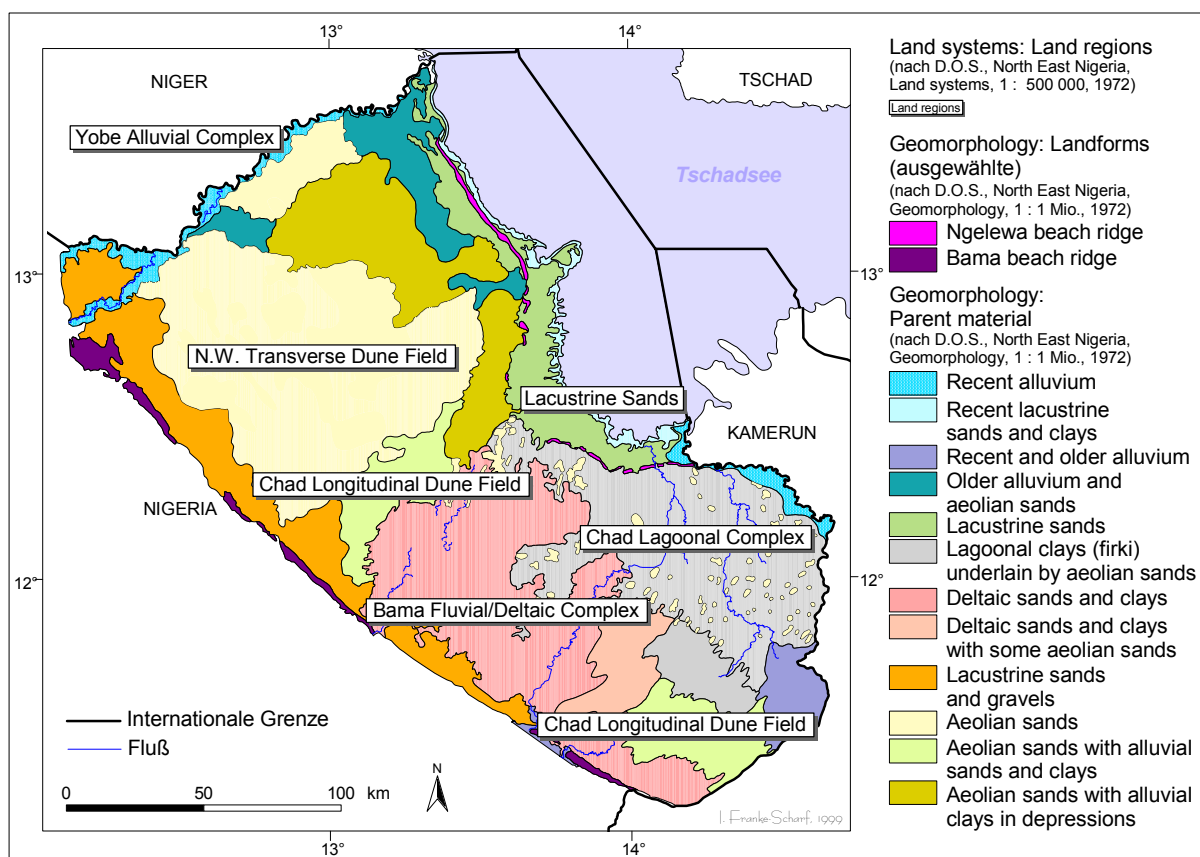


Abb. 7: Landschaftsgliederung und Substrat der oberflächennahen Sedimente im Untersuchungsraum

Abbildung 7 zeigt die geomorphologische Gliederung des Untersuchungsraumes, wie sie in der *Land Resource Study* (D.O.S. North East Nigeria Geomorphology - Kartenverzeichnis) vorgenommen wurde. Für vorliegende Arbeit sind nur die Bereiche nordöstlich des *Bama Ridge* von Interesse. Denn der Damm, der als ehemaliger Strandwall eines damals viel weiter nach Südwesten ausgedehnten Tschadsees interpretiert wird, markiert dessen größte Ausdehnung. Südlich davon wurden keine vom See abgelagerten Sedimente gefunden (vgl. THIEMEYER 1997: 4 und 7). Ein weiterer kleinerer reliktscher Strandwall ist der *Ngelewa Ridge*, der im Nordosten ein jüngeres Seerückzugsstadium anzeigt. Die beiden Strandwälle sind aus unterschiedlichen Sanden und Kiesen aufgebaut und heben sich um bis zu 12 m aus der sie umgebenden Landschaft hervor. Beide sind im Satellitenbild deutlich als lineare Strukturen zu erkennen (Abb. 3). Vom *Bama Ridge* fällt das sehr ebene Gelände allmählich von über 300 m ohne größere Höhenunterschiede bis zur aktuellen Seeuferlinie auf etwa

280 m ab. Beim Vergleich der Karte (Abb. 7) mit dem Satellitenbild (Abb. 3) wird deutlich, daß der Seestand seit den 1970er Jahren weiter erheblich zurückgegangen ist.

Nordöstlich des *Bama Ridge* schließt sich die ausgedehnte flache Ton- und Sandebene des *Bama Fluvial/Deltaic Complex* an. Dieser Bereich baut sich aus einer komplizierten Abfolge und Zusammensetzung von Sanden und Tonen aus dem Deltabereich der in den damaligen See mündenden Flüsse auf. Die komplexen Strukturen dieser Landschaft lassen sich mit Hilfe des Satellitenbildes (Abb. 3) noch weiter untergliedern: Jüngere Schwemmfächer wie auch jüngere Flußverläufe fallen durch hellere Farben wegen ihrer geringeren Vegetationsbedeckung auf. Ob die Flüsse zum Zeitpunkt der Satellitenaufnahme (in Abb. 3) tatsächlich Wasser führen, läßt sich nicht immer eindeutig festlegen. Ihren Verlauf kann man jedoch gut an den typischen mäandrierenden linearen Strukturen erkennen. Häufig treten in ihrer direkten Nähe sehr dunkle Bereiche auf, die mit hohen Absorptionswerten, auf höhere Feuchtigkeit in den Tiefenlinien und eine deswegen stärkere Vegetationsentwicklung hinweisen. Sehr gut verfolgen lassen sich die sehr stark verzweigten Strukturen im Bereich des Yedseram-Flußlaufes.

Mit weiter abfallendem Gelände gehen die Deltasande allmählich in die dunklen Tone des *Chad Lagoonal Complex* über, die im vorgelagerten Flachwasserbereich des ehemals bis zum *Ngelewa Ridge* ausgedehnten Sees abgelagert wurden. Die Sedimentation hält in diesem lokal als *firgi* bezeichneten Bereich durch Flußüberflutung rezent an (BAWDEN 1972b: 44). Im Satellitenbild (Abb. 3) lassen sich die dunkleren tonigen Sedimente deutlich von den helleren sandigen Bereichen unterscheiden. Die tonigen limnischen, aber auch die fluviatilen und deltaischen Sedimente im Süden haben teilweise ältere darunter liegende Dünen überdeckt. Zum Teil treten diese aber auch inselartig über die Tonfläche heraus. Stärker treten sie randlich nach Nordwesten und Südosten im *Chad Longitudinal Dune Field* auf und weisen damit auf eine ehemals viel südlichere Ausdehnung der Wüstenbedingungen hin. Der NE-SW-Verlauf dieser Longitudinaldünen läßt sich auch in den meisten Abflußbahnen der fluviatilen und deltaischen Sedimente auf dem Satellitenbild weiterverfolgen (Abb. 3).

Die Grenzen Nigerias zu Kamerun und Niger werden von den Flüssen El Beid und Yobe gebildet. Wie auch der Yedseram haben sie ältere Flußläufe mit Sedimenten zurückgelassen. Diese sind teilweise äolisch überprägt und von rezenten Flußsedimenten überlagert (BAWDEN 1972b: 43ff). Auf kamerunischer Seite verschieben Logone und Chari ihr Delta weiter in den See. Dieses wie auch die älteren und jüngeren Mäander des El Beid sind auf dem Satellitenbild deutlich zu erkennen (Abb. 3).

Das Seeufer hat sich in den letzten Jahrzehnten insgesamt weiter nach Norden bzw. Osten zurückgezogen. Verschiedene parallel verlaufende flache Wälle zeigen unterschiedlich alte Seestände an. Die im ehemaligen Seebereich zurückgelassenen Sedimente bestehen aus mittleren bis feinen Sanden, den *Chad Lacustrine Sands* nach der *Land Resource Study* (BAWDEN 1972b: 44). Sie nehmen heute eine viel größere Fläche ein als auf der Karte in Abbildung 7 dargestellt. Das Satellitenbildmosaik von 1988 zeigt auf den ersten Blick, daß nur ein kleiner Teil des Tschadsees, der nicht mehr auf nigerianischem Territorium liegt, noch über eine offene Wasserfläche verfügt (blaugrün eingefärbt in Abb. 3). Ein größerer Bereich, in der ausgewählten Farbkombination (R/G/B: 3/2/1) schwarz dargestellt, weist zwar noch Wasser auf, ist aber fast komplett mit Pflanzen bedeckt. Das nördliche Becken des

Sees weist keine größere offene Wasserfläche mehr auf. Stattdessen treten hier, wie auch nördlich des Sees, weitere Dünensysteme hervor. Diese verlaufen NW-SE in transversaler Ausrichtung. Gleiche Ausrichtung haben die Dünen, die sich als *North West Transverse Dune Field* im Nordwesten an das Untersuchungsgebiet anschließen (vgl. Abb. 3 und 7).

3.1.3 Böden

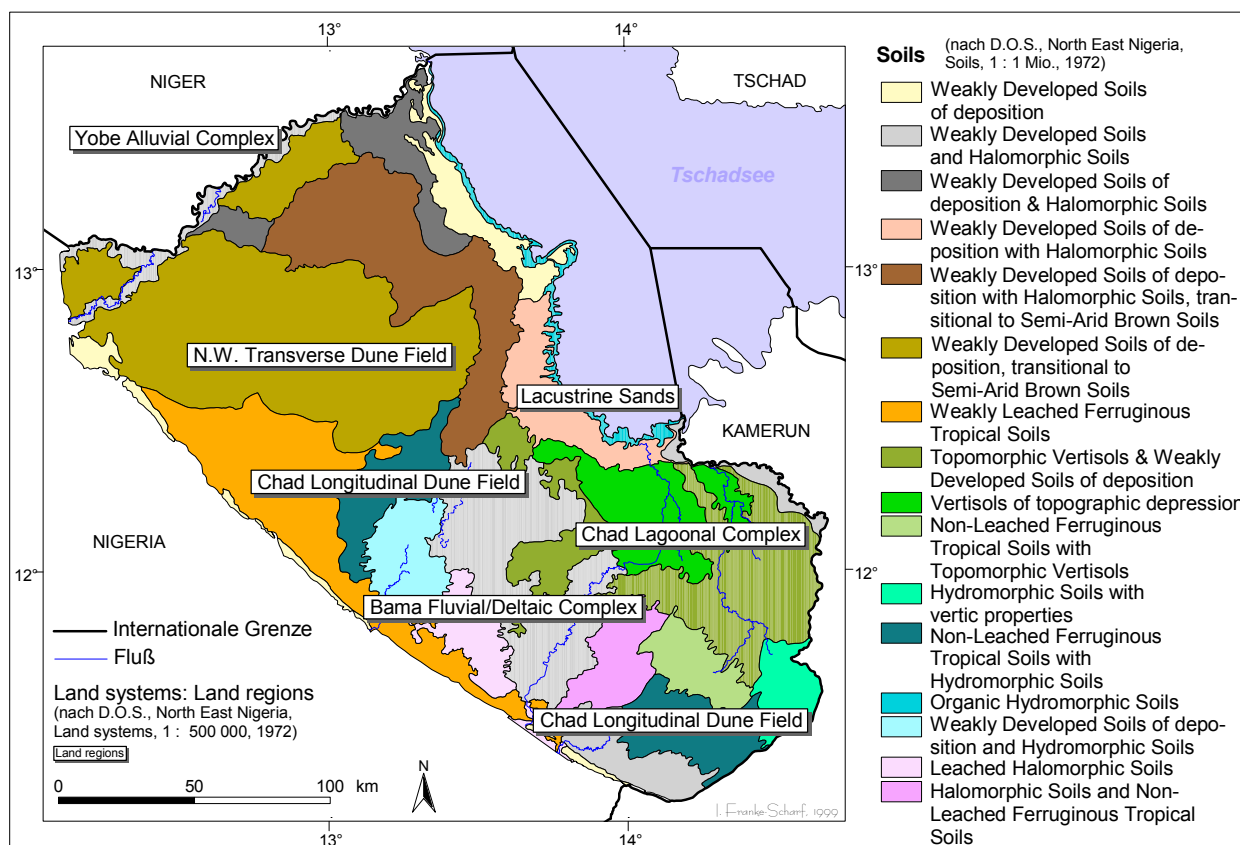


Abb. 8: Verbreitung der Böden im Untersuchungsraum

Wie Abb. 8 (im Vergleich mit Abb. 7) verdeutlicht, steht die Verteilung der Böden im Tschadbecken in enger Beziehung zum Substrat einerseits und zur Reliefposition andererseits. Obwohl nur Höhenunterschiede von wenigen Metern auftreten, prägen sie, den Wasserhaushalt repräsentierend, die Bodenentstehung. So lassen sich überblicksartig drei Gruppen unterscheiden:

- Auf den Dünen, Strandwällen und in den sandigen Bereichen dominieren – je nach Alter und Mächtigkeit der Sedimente – im Norden unter geringeren Niederschlägen schwach entwickelte Böden, weiter südlich Braunerden. In den Depressionen, wo feinere Sedimente abgelagert sind, treten auf feuchteren Standorten hydromorphe, teilweise auch carbonatische und halomorphe Eigenschaften hervor.

- Auf den tonigen Sedimenten des *Chad Lagoonal Complex* haben sich bei sehr hohem Tongehalt nährstoffreiche Vertisole gebildet. Sie sind anhand ihrer dunklen Färbung, die durch den höheren Feuchtigkeitsgehalt verstärkt wird, auf dem Satellitenbild auszugliedern (Abb. 3). Diese Böden weisen aufgrund ihres Gefüges eine sehr hohe Wasserspeicherkapazität auf und sind während der Regenzeit zum Teil mehrere Monate überschwemmt. Bei geringeren Tongehalten haben sich in den Übergangsbereichen zu den sandigeren Substraten leichtere vertisolähnliche Böden entwickelt. Sie sind zwar weniger nährstoffreich, aber dafür leichter zu bearbeiten. In Richtung höherer Reliefpositionen findet ein fließender Übergang zu den oben beschriebenen sandigen Böden statt.
- Eine dritte Gruppe bilden die in den holozänen Ablagerungen der Flüsse und des Tschadsees entstandenen hydromorphen Böden. Sie entwickeln sich meist unter saisonaler Überflutung. Vor allem am Rand des Tschadsees weisen sie größere Anteile organischer Komponenten auf. Je nach Substrat bilden sich in dieser Gruppe sehr unterschiedliche dichtere und weniger dichte Böden aus, die auch Übergänge zu den Vertisolen und schwach entwickelten sandigen Böden darstellen (CARROLL & KLINKENBERG 1972: 87ff).

3.1.4 Hydrographie

Da das Niederschlags-Verdunstungsverhältnis außerhalb der relativ kurzen Regenzeit ausgeglichen oder sogar defizitär ist, findet im überwiegenden Teil des Tschadbeckens nur geringer lokaler Oberflächenabfluß statt. Alle Entwässerungssysteme beziehen ihr Wasser aus den Niederschlägen der das Becken umgebenden Hochländer, die in deutlich feuchteren Klimazonen liegen (Abb. 2). Daraus resultiert zum einen aufgrund der im Süden länger andauernden Regenperiode und zum anderen wegen des sehr großen Einzugsgebietes ein Wasserhöchststand des gesamten Tschadsees etwa zu Jahresende – verzögert zur lokalen Regenzeit.

Den größten Einzugsbereich im nigerianischen Becken weist das Yobe-Entwässerungssystem auf. Vom Jos-Plateau im Süden kommend und damit stark abhängig von den dort fallenden Niederschlägen, fließt der Yobe entlang der Grenze zu Niger in den Tschadsee. Allerdings verliert er aufgrund hoher Verdunstung und Infiltration unterwegs große Wassermengen und trägt nur zu 1% am gesamten Seewassereintrag bei. Die ebenfalls auf nigerianischer Seite im Mandara-Gebirge entspringenden Flüsse Yedseram und El Beid tragen durchschnittlich 4% zum Tschadseezufluß bei. Der durch Maiduguri fließende Ngadda erreicht den Tschadsee nicht und versickert auf seinem Weg nach Norden in einem verzweigten Gewässerrinnensystem (vgl. Abb. 3).

Ungefähr 95% des Tschadseewassers entstammen den außerhalb Nigerias einmündenden Zuflüssen Logone und Chari, die ihr Wasser aus dem Adamaoua-Hochland in Kamerun bzw. dem zentralafrikanischen Hochland beziehen und nach ihrer Vereinigung an der Kamerun-Tschad-Grenze in einem riesigen Delta in Nord-Kamerun in den See münden. Sie sind sehr markant auf dem Satellitenbild (Abb. 3), auf den nigerianischen Karten aber nicht zu finden (BAWDEN 1972c: 71ff).

3.1.5 Vegetationsüberblick

Einen ersten Überblick über die Vegetationsverbreitung in Westafrika gibt die bereits 1900 von CHEVALIER aufgestellte Savannengliederung Westafrikas. Sie unterscheidet von Norden nach Süden die Sahel-, Sudan- und Guinea-Zone und ist mit nur geringen Modifikationen in den meisten jüngeren Arbeiten aufgegriffen worden. Für die großräumige Einordnung des Untersuchungsraumes sind in Abb. 9 die bioklimatischen Grenzen Westafrikas nach AUBRÉVILLE (1950, Kartenverzeichnis), eine aktuellere Gliederung von WHITE (1986, Kartenverzeichnis) sowie die einzige Vegetationsgliederung für ganz Nigeria nach KEAY (1959, Kartenverzeichnis) zusammen dargestellt.

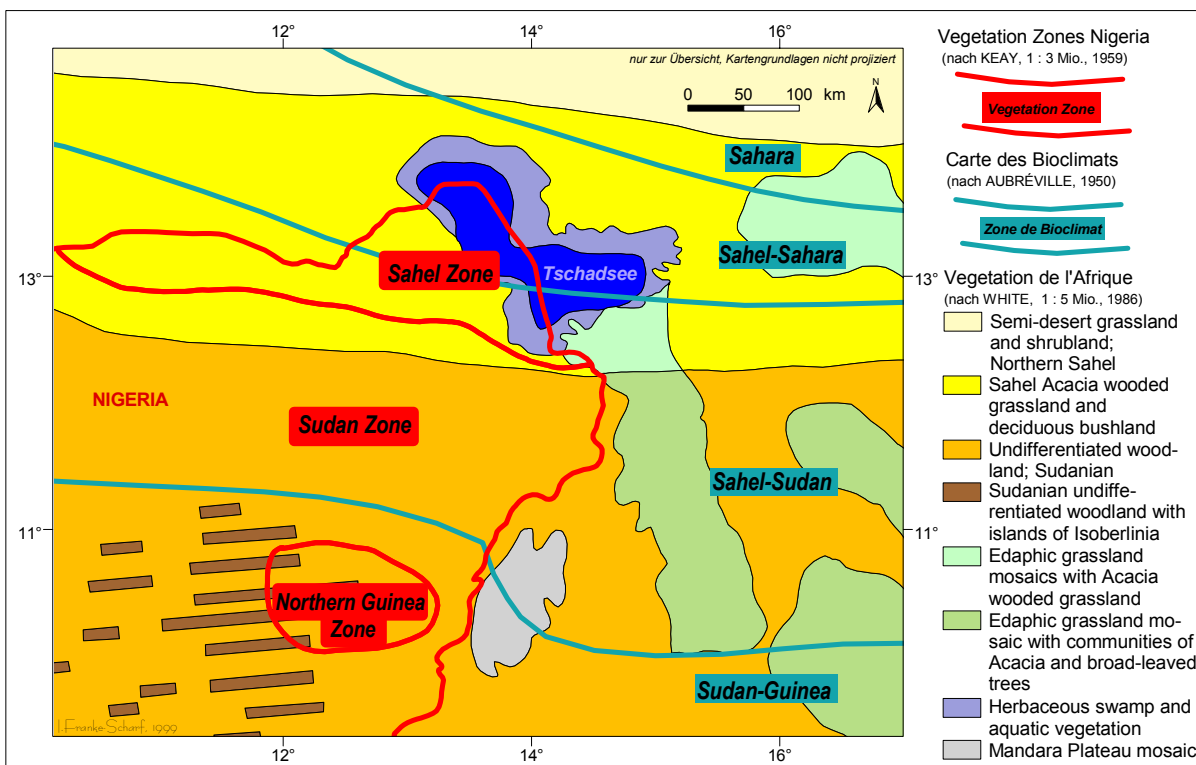


Abb. 9: Gliederung des Untersuchungsraumes gemäß Klima und Vegetation nach AUBRÉVILLE, KEAY und WHITE

Wenn auch je nach Klassifizierungssystem die Benennungen zum Teil anders sind und die Grenzverläufe der vom Maßstab sehr unterschiedlichen Karten voneinander abweichen, so hat der hier untersuchte Raum in allen dargestellten Systemen immer Anteil im Süden an der Sudan- und im nördlichsten Bereich an der Sahelzone. Im deutschen Sprachgebrauch werden den Begriffen Sudan Trockensavanne und Sahel Dornsavanne zugeordnet (vgl. u. a. KNAPP 1973; WALTER & BRECKLE 1984).

Nach KNAPP (1973: 131) kommen im Bereich der Sahel- und Sudanzone Trockensavannen, Trockenwälder und Trockengebüsche, aber auch reines gehölzfreies Grasland vor, das zu verschiedenen Zeiten des Jahres ein sehr gegensätzliches Aussehen aufweist. Während der Regenzeit zeigen Gehölze frische Belaubung, Gräser können mehrere Meter hoch aufschließen. In der Trockenzeit dagegen sterben die oberflächlichen Teile der Gräser ab oder werden durch Brand vernichtet, Gehölze erscheinen zum Teil kahl.

Primären Einfluß auf das Pflanzenwachstum nehmen in den Tropen die Niederschläge. Dabei sind Extremwerte und die Häufigkeit ihres Auftretens von größerer Bedeutung als langjährige Mittelwerte (WHITE 1986: 25). Mit den von Süden nach Norden abnehmenden Niederschlägen ändert sich die Vegetation entsprechend den unterschiedlichen Wasserbedürfnissen von Wald über Baum-, Strauch- und Buschsavanne zu Grasland. Höhere Grasländer gehen über in niedrigeren und spärlicheren Grasbewuchs. In der nördlichen Sahelzone tritt Pflanzenwuchs nur noch konzentriert an Gunststandorten auf (WALTER & BRECKLE 1984: 194f). Auch die Artenanzahl nimmt nach Norden ab (KNAPP 1973: 11).

Für die Vegetationsausbreitung im einzelnen spielen aber auch die Bodenverhältnisse eine wichtige Rolle. Wichtigster Faktor ist dabei der Bodenwasserhaushalt. Bei gut drainierten Böden besteht eine engere Abhängigkeit zwischen dem Niederschlag und der Vegetation, während auf undurchlässigeren feuchteren Böden ähnliche Vegetation in einem größeren klimatischen Spektrum auftritt (LEEUW & TULEY 1972: 122).

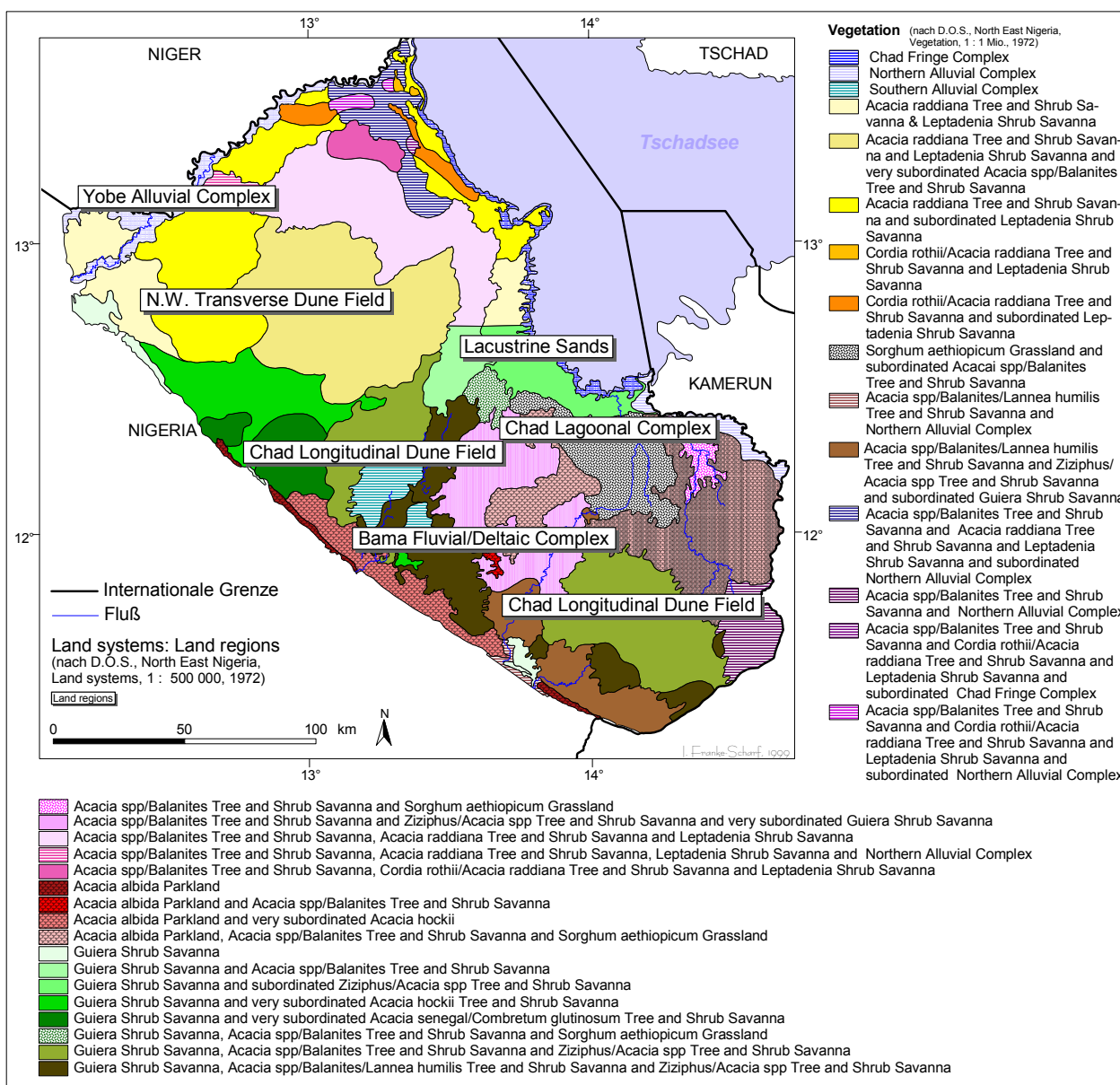


Abb. 10: Verbreitung der Vegetation im Untersuchungsraum

Der Ausschnitt aus der komplexen Vegetationskarte der *Land Resource Study* (Abb. 10) zeigt ein sehr differenziertes Bild:

- Auf den sandigen besser drainierten Böden der Dünen, Strandwälle und Deltabereiche finden sich Baum- oder Strauchsavannen mit unterschiedlicher Grasbedeckung. Nach der *Land Resource Study* dominieren im südlichen Bereich hauptsächlich aus *Guiera senegalensis*, und *Acacia albida* zusammengesetzte Gesellschaften (grüne und rosa Farben in Abb. 10). Im Sahelbereich treten dagegen *Acacia raddiana* und *Leptadenia pyrotechnica* hervor (gelbe Farben in Abb. 10).
- Auf den schlechter durchlässigen Böden im Bereich zwischen den Dünen und im Bereich der Alluvien kommen verstärkt verschiedene Akazienarten (*A. senegal*, *A. seyal*, *A. nilotica*) sowie *Balanites aegyptiaca* vor. Nach WHITE (1986: 105) haben die meisten Baumarten der Sudan- und Sahelzone aber breite ökologische Toleranzen und somit einen sehr großen Verbreitungsraum.
- In den Tonebenen des *Chad Lagoonal Complex*, die während der Regenzeit länger überflutet sind, sind Grasland mit *Sorghum aethiopicum* und untergeordnet *Acacia spp./Balanites*-Strauch- und Baumsavannen ausgebildet (LEEUEW & TULEY 1972: 123ff).
- Am Tschadseeufer und in den Abflußrinnen hat sich aquatische Vegetation angesiedelt: *Cyperus papyrus*, *Phragmites communis* und *Typha australis* im Randbereich und auf den Inselbänken, *Vossia cuspidata* und Wildreisarten (*Oryza sp.*) in länger unter Wasser stehenden Bereichen (BOUQUET 1990: 130; KNAPP 1973: 235ff).

Die Sudan- und Sahelzone ist seit vielen Jahrhunderten ein stark besiedelter Raum. Anbau, Viehhaltung, Abholzen und Feuer haben deswegen die ursprüngliche Vegetation stark modifiziert (KEAY 1959: 25). Starker anthropogener Einfluß resultiert in einem hohen Anteil an Anbau- und Brachflächen und damit einer starken Zurückdrängung von Baum- und Strauchschicht bzw. einer teilweise völligen Vernichtung der Vegetation. Selektive Nutzung, Brand und Viehhaltung führen außerdem zur Förderung bestimmter Arten und Formen. Werden nützliche Gehölze durch den Menschen gefördert und selektiv erhalten, entsteht sogenanntes Parkland: Grasland mit einzelnen erhaltenen Nutzbäumen (in Abb. 10 in Rottönen dargestellt) (KEAY 1959: 6 und 25; WHITE 1986: 103 und 106).

3.2 Kulturräumliche Aspekte

Obwohl Nigeria das bevölkerungsreichste Land Afrikas ist, weist der Norden außerhalb der größeren Städte eine relativ geringe Bevölkerungsdichte auf. Genaue Zahlen sind nur sehr schwierig und meist ohne direkten Flächenbezug zu finden. Aktuelle Bevölkerungsdaten werden zudem oft unter Verschuß gehalten, da sie häufig politisch brisant erscheinen. Deswegen sind die meisten Angaben bei Erscheinen schon veraltet. Durch die sehr zahlreichen Änderungen der administrativen Grenzen seit der Unabhängigkeit haben sich außerdem die Bezugsflächen stark verändert. Ein Vergleich der statistischen Werte ist damit nicht gewährleistet. Zusätzlich ist nicht auszuschließen, daß die veröffentlichten Zahlen aus politischen und ökonomischen Gründen manipuliert werden (FRICKE & MALCHAU 1994).

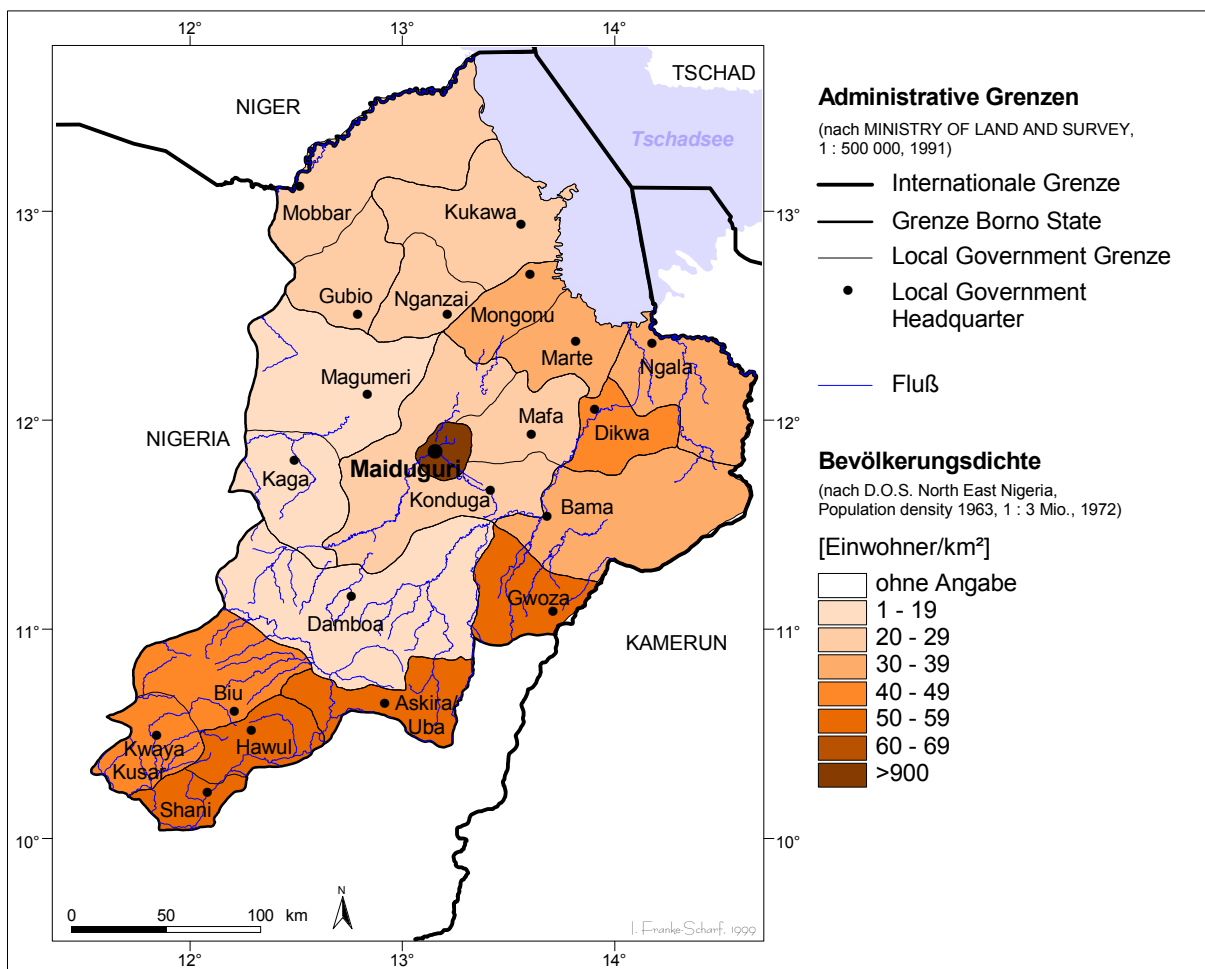


Abb. 11: Administrative Grenzen und Bevölkerungsdichte von Borno State/Nordost-Nigeria

Flächenbezogene Zahlen für den Untersuchungsraum basierend auf der Zählung von 1963 liefert die Bevölkerungsdichtekarte der *Land Resource Study* (D.O.S. North East Nigeria Population, Kartenverzeichnis). Der Ausschnitt in Abb. 11 zeigt, daß die größten Bevölkerungsdichten – abgesehen von den größeren Städten – mit 60 bis 99 Einwohnern pro km² südöstlich Maiduguris sowie mit 40 bis 59 Einwohnern pro km² am südwestlichen Ufer des Tschadsees zwischen Marte und Mongonu zu finden sind. Alle anderen Bereiche haben eine geringere Bevölkerungsdichte als 40 Einwohner pro km². Auch nach den neueren Zählungen von 1991 (mit geringerer räumlicher Differenzierung) liegt die Bevölkerungsdichte für Borno State mit weniger als 49 Einwohnern pro km² (nach FEDERAL REPUBLIC OF NIGERIA 1991 in FRICKE & MALCHAU 1994: 173) deutlich unter dem Landesdurchschnitt. Aus den Angaben zur digitalen Karte (ESRI 1996, Kartenverzeichnis) ergibt sich aus den Flächen- und Bevölkerungszahlen für Borno State sogar nur eine Dichte von 39,7 Einwohnern pro km². Im Vergleich zu anderen Regionen im Tschadbecken weisen jedoch die *Local Government Areas* Marte, Mongonu und Ngala nach BOUQUET (1990: Fig. 50) mit über 30 Einwohnern pro km² die höchste Bevölkerungsdichte um den gesamten Tschadsee auf.

Auch die Zahlen für das Bevölkerungswachstum schwanken je nach Quelle und Bezugszeitraum stark. Für Nigeria insgesamt wird ein Wachstum von 3% zwischen 1980 und 1992 angegeben (BARRATA 1994: 459). Der Norden Nigerias weist allerdings zwischen 1952 und 1973 mit über 5% die größte Wachstumsrate nach Lagos auf. Erstaunlich erscheint, daß sich

diese Entwicklung ab 1973 völlig umdreht und ein Bevölkerungswachstum von 0,5% – noch unter dem nigerianischen Durchschnitt – angegeben wird. Die genauen Angaben und Erklärungsansätze finden sich bei FRICKE & MALCHAU (1994: 166ff).

Daß diese Zahlen auch kleinräumig stark schwanken, zeigt eine Studie zum Bewässerungsanbau im östlichen Teil des hier vorgestellten Untersuchungsraumes. Dort wird neben einer durchschnittlichen Wachstumsrate von 6,5% (1967-74) in der Gesamtregion, für permanente Orte ein Wachstum von 3% entsprechend dem Landesdurchschnitt, für saisonale Orte eine um zwei Zehntel geringere Wachstumsrate und für Gambaru, den durch Zuwanderung stark wachsenden Grenzort zu Kamerun, eine 13%ige Zunahme angegeben (vgl. u. a. FEDERAL MINISTRY OF AGRICULTURE & NATIONAL RESOURCES 1974: 3-14 und 1975: VII). Eine Interpretation bleibt mangels genauer vergleichbarer Zahlen mit eindeutigem Raumbezug schwierig. Die regional sehr verschiedenartigen Prozesse der Bevölkerungsentwicklung lassen sich nur schwer abschätzen.

Neben den absoluten Zahlen der Bevölkerung und des Wachstums spielt die ethnische Zusammensetzung für Landnutzungsuntersuchungen eine nicht zu unterschätzende Rolle. Die Kanuri stellen als Nachfahren der ursprünglichen Bewohner der Königreiche Kanem und Bornu die demographisch und auch politisch bedeutendste Gruppe im Untersuchungsraum. Ihr Anteil wird unterschiedlich mit ca. 50% (TULEY 1972c: 164) bzw. 70% (KINDLER et al. 1990: 103) angegeben. Sie betreiben neben dem Ackerbau auch Viehzucht. Nach GROVE (1985: 173) besitzen die Kanuri etwa zwei Drittel des gesamten Viehbestandes im Raum. Die meisten Tiere des restlichen Teils gehören den mit etwa 5 bzw. 8% (TULEY 1972c: 111 bzw. KINDLER et al. 1990: 103) vertretenen, ursprünglich aus dem Niltal stammenden Shuwa-Arabern. Viele der ursprünglich nomadisch lebenden Rinderhirten sind inzwischen sesshaft geworden oder wandern nur noch saisonal und bauen neben der Viehhaltung auch an. Hauptsächlich während der Trockenzeit kommen zusätzlich Fulbe-Rindernomaden mit ihren Herden zur Trockenzeitweide in den Raum südwestlich des Tschadsees (5% nach KINDLER et al. 1990: 103). Mit ca. 6% (TULEY 1972c: 111) stellen die im Nordwesten Nigerias stärker vertretenen Hausa noch eine größere Gruppe dar. Sie sichern ihren Lebensunterhalt außer durch Ackerbau häufig mit Fischfang am Tschadsee. In den Orten direkt am See sind außerdem auch Jukun und andere aus dem Süden stammende Ethnien vertreten.

4 Datengrundlage

"One of the main impediments to improved environmental management is the lack of reliable and up-to-date information. Systematic collection and analysis of environmental and natural resources data over the large areas of terrain covered by the Sahelian countries is costly and time consuming and is often, of necessity, a low priority for most countries." (PRINCE et al. 1990: 16)

Obwohl sich die Beschaffung von Arbeitsmaterial in und über Nigeria im Vergleich zu europäischen Verhältnissen sehr unübersichtlich und damit extrem schwierig gestaltet hat, konnten im Rahmen der Aufgabenstellung zahlreiche verschiedene Datengrundlagen erworben und ausgewertet werden. Einige dieser Materialien, insbesondere Luftbilder, wurden mehr oder weniger zufällig unter großem Aufwand und teilweise abenteuerlichen Bedingungen beschafft. Zu einem großen Teil wurde aber auch auf Material zurückgegriffen, das bereits von anderen insbesondere ehemaligen Mitgliedern des Projektes zusammengetragen worden war. Folgendes Kapitel gibt einen Überblick über das sehr heterogene Datenspektrum.

4.1 Karten

Karten, als bereits fertige Ergebnisse unterschiedlichster Themenstellungen, ermöglichen direkte und damit am einfachsten zu handhabende Aussagen über klar definierte Räume. Wichtige Kriterien zur Beurteilung der Karten sind zum einen der Aufbau der Legende, aus dem sich der Karteninhalt ergibt und zum anderen das räumliche System, in dem dieser Inhalt dargestellt ist. Ersteres bestimmt, inwieweit verwertbare Information für die jeweilige Fragestellung extrahiert werden kann. Das zweite Kriterium spielt vor allem dann eine wichtige Rolle, wenn Daten unterschiedlicher Karten miteinander oder auch Karten mit anderen Daten verglichen werden sollen. Unterschiedliche räumliche Systeme, vor allem aber abweichende Maßstäbe können bei exakter digitaler Bearbeitung der Daten erhebliche Probleme mit sich bringen (vgl. z. B. PRINCE et al. 1990: 35 und Kap. 5.3.2).

4.1.1 Topographische Karten

Topographische Karten liegen für den Untersuchungsraum flächendeckend im Maßstab 1 : 50 000 in Transversaler Mercatorprojektion vor (FEDERAL SURVEYS 1965, Kartenverzeichnis). Sie wurden in den 1960er Jahren herausgegeben und spiegeln damit die Situation Ende der 1950er Jahre wider. Die topographischen Karten zeigen neben Orten (die meisten ohne Benennung), Straßen, Wegen und Flüssen auch flächenhafte Elemente. Diese beschreiben Überflutungsgebiete (*'Areas liable to flood'*) wie auch verschiedene Vegetation (*'Forest'*, *'Light forest'*, *'Scrub'*, *'Grassland'* und einige andere nicht im Untersuchungsraum vorkommende Typen). Flächen mit ständigem Anbau (*'Permanent cultivation'*) sind im gesamten Untersuchungsraum nicht ausgewiesen, stattdessen Flächen mit anderem Anbau (*'Other cultivation'*).

Insgesamt sind die punkt- und linienhaften Elemente als recht detailliert anzusehen. Differenzierte Angaben zur Landnutzung im engeren Sinne des Wortes fehlen allerdings. Die verschiedenen Vegetations- und Landnutzungseinheiten lassen sich – wenn überhaupt

möglich – nur sehr schwer abgrenzen. Ein räumlicher wie auch zeitlicher Vergleich ist damit kaum gewährleistet. Die verschiedenen Kartenblätter zeigen außerdem sehr unterschiedliche Qualität. Insbesondere fällt die unterschiedliche Gewichtung des Inhaltes auf. Vereinzelt scheinen geplante Objekte angegeben zu sein: Eine Straße von Marte in Richtung Osten nach Bida konnte z. B. auch im Luftbildvergleich für keinen Zeitpunkt bestätigt werden. Auch Flüsse sind sehr unterschiedlich kategorisiert. Während sich punkt- und linienhafte Informationen noch recht einfach überprüfen lassen, fällt ein Vergleich der Landnutzungseinheiten viel schwerer. Höhenangaben sind der Karte nicht zu entnehmen.

Auf den oben beschriebenen topographischen Karten basieren, aktualisiert mit Material aus den 1970er Jahren, russische Karten im Maßstab 1 : 200 000 (ASISOV 1981, Kartenverzeichnis). Sie enthalten außer einzelnen Höhenpunkten in einigen Ortslagen keine zusätzliche Information. Die Höhenangaben schwanken im Untersuchungsraum nur zwischen 280 und 295 m.

Für einen Teilbereich des Untersuchungsraumes, der mit Bewässerungsanlagen ausgebaut werden sollte, existieren noch aktuellere Karten im Maßstab 1 : 50 000 (LAKE CHAD BASIN COMMISSION 1978, Kartenverzeichnis). Sie sind aus Luftbildern von Mai bis Juli 1973 im ungefähren Maßstab 1 : 42 000 im UTM-Koordinatensystem (Universale Transversale Merkatorprojektion) erstellt worden. Die Unterlegung mit der Textur der Luftbilder sowie die farbige Ausgestaltung der verschiedenen Landschaftseinheiten ermöglichen einen schnellen Überblick über die dargestellte Landschaft und damit eine deutlich bessere Orientierung als die überwiegend schwarz-weißen topographischen Karten. Landnutzungseinheiten sind allerdings mit Ausnahme schwer zu lokalisierender Bereiche des Anbaus ('*Cultivation*'), die alle innerhalb der Tonebenen liegen sollen, nicht kartiert.

4.1.2 Thematische Karten

Die thematischen Karten, die den Untersuchungsraum abdecken, liegen fast alle in Maßstäben kleiner als 1 : 500 000 vor. Teilweise wurden sie bereits zur Beschreibung des Untersuchungsraumes herangezogen. Diese und einige weitere Karten ermöglichen zum einen die Einordnung des Untersuchungsraumes in einen größeren räumlichen Zusammenhang, zum anderen geben sie zusätzliche Interpretationshilfen. Aus diesem Grund wurden ausgewählte Karten digital bearbeitet und im geographischen Informationssystem integriert (vgl. Kap. 5.3 und Kap. 5.7). Im Anhang 1.2 sind die Eckdaten der wichtigsten digitalisierten Karten zusammengestellt.

Die Mehrzahl der thematischen Karten gehört der umfangreichen *Land Resource Study* an, die ganz Nordost-Nigeria abdeckt (D.O.S. North East Nigeria, Kartenverzeichnis; vgl. auch Abb. 5, 7, 8, 10 und 11). In Kapitel 2.1 wurde bereits die Karte zur Landnutzung vorgestellt. Sie weist für den nordwestlichen Bereich des Untersuchungsgebietes Regenzeitweideland ('*Wet season rangeland*') und sehr untergeordnet Regenzeitanbau ('*Arable cultivation in areas with low rainfall*') aus. Am Tschadseeufer und im Bereich der Tonebenen ist Trockenzeitweide ('*Dry season rangeland*'), im letzteren Gebiet mit unterschiedlich intensivem Anbau ('*Arable farming on heavy clays*') vermischt, angegeben. Am intensivsten ist der Anbau ('*Settled, largely arable farming*') im Bereich des *Bama Ridge* (D.O.S. North East Nigeria, Present Landuse, Kartenverzeichnis). Die Karte weist zwar sehr differenzierte Land-

nutzungseinheiten aus, kann aber aufgrund ihres Maßstabes mit den anderen Daten nur sehr eingeschränkt verglichen werden.

4.1.3 Digitale Karten

Einige Daten sind bereits als digitale Karten erhältlich. Im Falle der hier durchgeführten Untersuchung handelt es sich hauptsächlich um die Kartenwerke *ArcWorld* und *Digital Chart of the World* sowie weitere Einzeldaten aus dem Internet (ESRI 1992; 1991; 1996 und jünger, vgl. Kartenverzeichnis und genaue Quellenangaben im Anhang 1.1). Die rasante Weiterentwicklung und Bereitstellung neuer elektronischer Medien wird es aber ermöglichen, weitere Karten und Zusatzdaten zu verwenden (vgl. Kap. 5.7).

Aus den beiden Kartenwerken wurden für einen schnelleren Zugriff die jeweils für die Fragestellung relevanten Daten aufbereitet (vgl. Kap. 5.3). Für *ArcWorld* handelt es sich dabei um die gesamte Region Westafrika. Es sind damit auch Vergleichsdaten für die anderen Länder, die innerhalb des Sonderforschungsbereiches behandelt werden, gegeben. Bedeutende Einschränkung ist allerdings, daß die Karten nur auf Länderebene im Maßstab 1 : 3 Mio. vorliegen. Eine weitere Ebene innerhalb der kartographischen Datenbasis stellt zwar administrative Untereinheiten der Länder dar, hierzu sind aber keine Namen und statistischen Werte vorhanden. Die Daten sind auch nicht auf dem neuesten Stand, so sind z. B. die seit 1991 in Nigeria geltenden neuen *State*-Grenzen nicht berücksichtigt. Neben den kartographischen sind umfangreiche statistische Informationsebenen und auch sogenannte geographische Referenzen und Indizes – das sind Kartenverzeichnisse und auch Satellitenszenenübersichten – erfasst. Die statistischen Daten sind in 7 verschiedene Themengruppen gegliedert. Teile einzelner Themengruppen von besonderem Interesse wurden aufbereitet: *'Food production and nutrition'* (u. v. a. Angaben zu Landwirtschafts-, und Waldflächen), *'Natural resources and environment'* (Informationen zu Bodengüte, Abholzung, Aufforstung, Schutzgebieten u. a.) sowie *'Population characteristics'* (mit Zahlen zum Bevölkerungswachstum allgemein, urbanem und ruralem Wachstum etc.).

Die Daten der *Digital Chart of the World* sind anders strukturiert und orientieren sich an der *Operational Navigation Chart* im Maßstab 1 : 500 000 (geographische Koordinaten, *WGS - World Geodetic System - 84*). Sie sind räumlich in einzelne Kacheln von jeweils 5x5° gegliedert. Die Kachel, die eine sinnvolle Abdeckung des Untersuchungsraumes gewährleistet, wurde wiederum aufbereitet und integriert (vgl. Anhang 1.1). Thematisch ist neben den üblichen Karteninhalten und zusätzlichen Merkmalen zur Luftnavigation u. a. eine Ebene *'Landcover area'* enthalten. Sie weist für die ausgewertete Kachel vier verschiedene Flächenattribute auf (nördlich des Tschadsees eine Fläche mit *'Distorted surface area'*, südlich daran anschließend mehrere Inseln mit *'Unconsolidated surface area'*, sowie um den Tschadsee *'Undifferentiated wetland'* und südlich davon, im Yobe-Gebiet und entlang anderer Flüsse *'Inundated area'*). Andere vorgesehene Attribute dieses Themas (z. B. *'Rice field'* oder *'Cultivated area'*) tauchen im Ausschnitt nicht auf. Aus der gleichen Datengrundlage, allerdings vielen verschiedenen Kacheln, ist die Höhenschichtenkarte des Untersuchungsraumes in Abb. 2 generiert.

Ebenfalls digital liegt die Bodenkarte der *FAO (Food and Agricultural Organisation)* für Afrika im Maßstab 1 : 5 Mio. in geographischen Koordinaten vor (UNESCO 1978, Kartenverzeichnis). Sie wurde aufbereitet und digital im geographischen Informationssystem zur Verfügung gestellt, aufgrund ihres kleinen Maßstabs bei den weiteren Untersuchungen letztendlich aber nicht berücksichtigt.

4.2 Luftbildmosaike

Luftbildmosaike, wie sie für das Untersuchungsgebiet beschafft werden konnten, nehmen eine Zwischenposition zwischen Karte und Luftbild ein und vereinen damit Vorteile beider Medien: Wie die Karte sind sie eindeutig geographisch im Raum definiert und weisen einen einheitlichen Maßstab auf. Bei den vorliegenden Mosaiken ist dies durch jeweils 4 bekannte Eckkoordinaten in geographischer Länge und Breite sowie durch die Maßstabsangabe 1 : 25 000 gewährleistet. Abgebildet sind aber, im Gegensatz zur Karte, zusammengefügte fotografische Abzüge von schwarz-weiß-Senkrechtluftbildern im ungefähren Maßstab 1 : 25 000 (vgl. Kap. 4.3). Bei genauer Betrachtung der Luftbildmosaike lassen sich allerdings deutlich die Abgrenzungen der einzelnen Teile, die mosaikiert wurden, erkennen. Zwischen diesen treten verschieden große Versätze auf (vgl. dazu Kap. 5.4.3 und 7.2.3.).

Tab. 1: Übersicht über die bearbeiteten Luftbildmosaike

Luftbildmosaik-Nr.	Aufnahmedatum	Maßstab	Vorlage	Qualität
68NW2	November/Dezember 1990	1 : 25 000	Fotoabzug	mittel
68NW3	November/Dezember 1990	1 : 25 000	Blaupause	schlecht
68NW4	November/Dezember 1990	1 : 25 000	Fotoabzug	gut
68NE1	November/Dezember 1990	1 : 25 000	Fotoabzug	mittel
68NE2	November/Dezember 1990	1 : 25 000	Fotoabzug	mittel
68NE3	November/Dezember 1990	1 : 25 000	Fotoabzug	gut
68NE4	November/Dezember 1990	1 : 25 000	Fotoabzug	gut
68SW1	November/Dezember 1990	1 : 25 000	Fotoabzug	mittel
68SW2	November/Dezember 1990	1 : 25 000	Blaupause	schlecht
68SE1	November/Dezember 1990	1 : 25 000	Fotoabzug	schlecht
68SE2	November/Dezember 1990	1 : 25 000	Fotoabzug	mittel
69NW1	November/Dezember 1990	1 : 25 000	Fotoabzug	mittel
69NW2	November/Dezember 1990	1 : 25 000	Blaupause	schlecht
69NW3	November/Dezember 1990	1 : 25 000	Fotoabzug	mittel
69NW4	November/Dezember 1990	1 : 25 000	Fotoabzug	mittel
69NE3	November/Dezember 1990	1 : 25 000	Fotoabzug	mittel
69SW1	November/Dezember 1990	1 : 25 000	Fotoabzug	mittel
69SW2	November/Dezember 1990	1 : 25 000	Fotoabzug	gut
69SE1	November/Dezember 1990	1 : 25 000	Fotoabzug	mittel

Die Auswertung der Luftbildmosaike (Kap. 5.4) wird neben den räumlichen Versätzen zusätzlich durch die sehr unterschiedliche Qualität des Papiers und der Verarbeitung erschwert. Nur ein Teil liegt als fotografischer Abzug in ähnlich guter Qualität wie die Luftbilder selber, ein Teil in erheblich schlechterer Qualität und ein weiterer nur als Blaupause mit noch einmal deutlich geringeren Kontrasten vor. In Tabelle 1 sind alle bearbeiteten Luftbild-

mosaiken mit zusätzlichen Vermerken über Art der Vorlage und deren Qualität aufgeführt. Die Blattaufteilung ist angelehnt an die topographische Karte Nigeria 1 : 50 000. Durch den größeren Maßstab enthalten alle Luftbildmosaikblätter neben der Nummer und Lage der entsprechenden topographischen Karte außerdem eine Nummer für den Quadranten (1, 2, 3, 4). Leider liegen weder zu den Luftbildmosaikblättern noch zu den Luftbildern zusätzliche Informationen vor, die Aufschluß über Aufnahmeparameter und Verarbeitungsweise liefern könnten. Auf einer Ausgabe der Mosaiken ist lediglich 'semi controlled' vermerkt und 'not to be used for precise measurement of distances'.

Die für diese Untersuchung verwendeten Luftbildmosaikblätter wurden aus Luftbildbefliegungen im Rahmen des *North East Arid Zone Development Programme* im November-Dezember 1990 gewonnen. Dafür wurde das gesamte Gebiet NE-Nigerias nördlich des 12. Breitengrades aufgenommen. In Abb. 12 ist die räumliche Lage aller ausgewerteten Luftbildmosaikblätter in Zusammenhang mit den in den folgenden Kapiteln beschriebenen Fernerkundungsdaten dargestellt.

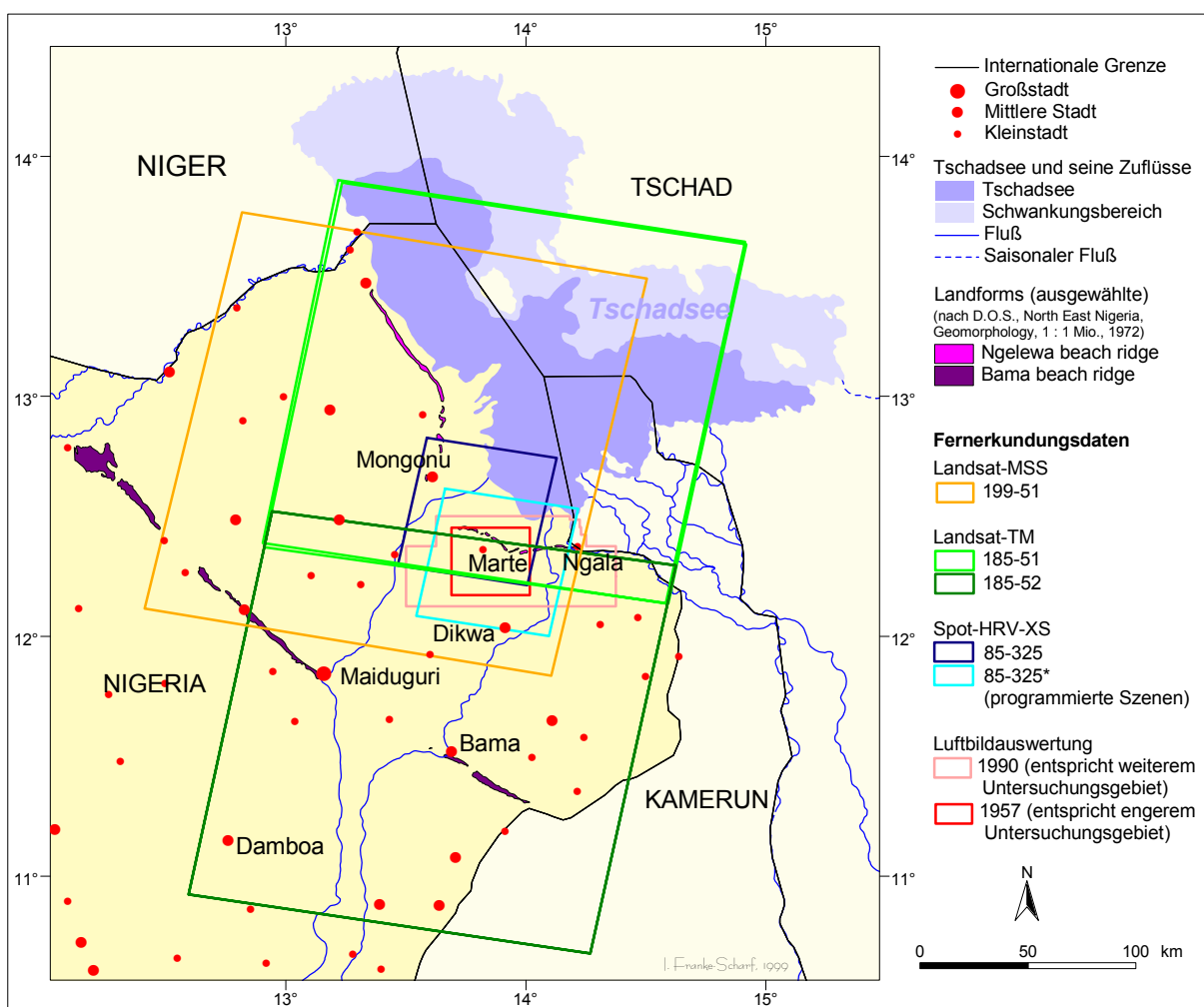


Abb. 12: Räumliche Abdeckung der bearbeiteten Fernerkundungsdaten

4.3 Luftbilder

Für einen Teil der oben beschriebenen Luftbildmosaike konnten zusätzlich Luftbilder der gleichen Befliegung als schwarz-weiße Fotoabzüge in die Untersuchungen einbezogen werden (vgl. Tab. 2 und ausführliches Luftbildverzeichnis in Kap. 10.3). Gegenüber den Mosaiken haben sie den Vorteil, daß sie stereoskopisch auswertbar sind. Außerdem ist die Qualität der originalen Luftbilder deutlich besser als die der bearbeiteten Mosaike. Etwa 24 Luftbilder decken ein Luftbildmosaik komplett mit jeweils ungefähr 50% Überlappung ab.

Tab. 2: Übersicht über die bearbeiteten Luftbildserien

Befliegung	Aufnahmedatum	Maßstab
BORNO STATE GOVERNMENT, NIGERIA North East Arid Zone Development Programme,	November-Dezember 1990	ca. 1 : 25 000
unbekannt (LAND AND SURVEY MAIDUGURI)	Oktober 1957	ca. 1 : 25 000

Neben den aktuellsten Luftbildern konnten Fotoabzüge der Luftbilder von Oktober 1957 im selben ungefähren Maßstab 1 : 25 000 bezogen werden. Die Abdeckung ist sehr unterschiedlich. Da weder Überfliegungspläne noch andere Zusatzdaten zugänglich waren, erwies sich die Auswahl der relevanten Ausschnitte als extrem schwierig und aufwendig. Je älter die Bilder, um so weniger Infrastruktur als markante Merkmale zur Verortung in der sonst sehr einförmigen Landschaft sind vorhanden. Abb. 13 stellt für einen Ausschnitt im Tschadbecken die Luftbilder von 1957 und 1990 gegenüber.

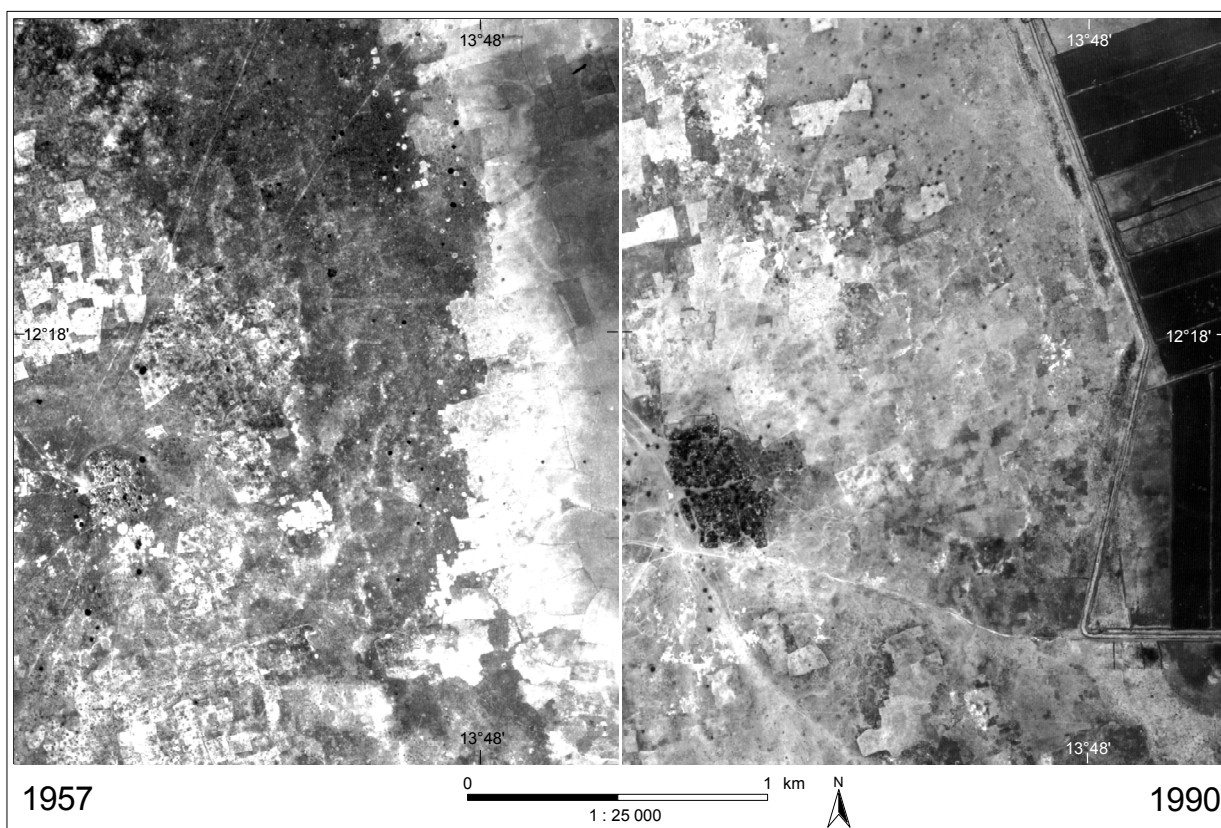


Abb. 13: Gegenüberstellung Luftbildausschnitt 1957-1990

Mit dem Alter nimmt auch die Qualität der Bilder ab. Dies ist weniger auf schlechtere fotografische Entwicklung als auf unsachgemäße Lagerung der Bilder zurückzuführen. Intensive Sonneneinstrahlung, *Harmattan*-Sedimente wie auch Termitenfraßspuren machen einen Großteil der Bilder fast unbrauchbar. Andererseits weisen aber die Bilder von 1957 deutlich weniger Bewölkung und daraus resultierend auch homogenere Grautöne auf. Die aktuellen Bilder, die aufgrund teilweiser Bewölkung stärkere unerwünschte Kontraste enthalten, wurden zudem sehr unterschiedlich entwickelt, was zu Fehlinterpretationen führen kann.

Da die Auswertung der Luftbilder von 1957 insbesondere wegen des Fehlens von Mosaiken deutlich aufwendiger ist als die Bearbeitung der aktuelleren Bilder, konnte nur ein Teilausschnitt von diesen aufbereitet und ausgewertet werden. Im Luftbildverzeichnis (Kap. 10.3) sind alle ausgewerteten Luftbilder aufgelistet. Die Lage und Ausdehnung des für 1957 kartierten Teilgebietes läßt sich aus Abb. 12 entnehmen.

4.4 Satellitenszenen

Satellitenszenen in ihren verschiedenen Ausprägungen sind die in sich komplexeste der hier vorgestellten Datenarten. Der Informationsgehalt dieser aus dem Weltraum aufgenommenen Daten leitet sich aus dem spezifischen Reflexionsverhalten der auf der Erde vorkommenden Objekte in verschiedenen Wellenlängenbereichen des elektromagnetischen Spektrums ab. Passive Sensoren, von denen alle in diese Untersuchung eingegangenen Szenen aufgenommen wurden, können dabei Strahlungsintensitäten im sichtbaren und infraroten Bereich des Spektrums registrieren. In diesem kurzweiligen Abschnitt hängt die reflektierte Energiemenge hauptsächlich vom Mineral- und Feuchtegehalt der Böden, vom Schwebstoffgehalt des Wassers und von Feuchtigkeitsgehalt, Zusammensetzung der Blattpigmente sowie Zellstruktur der Vegetation ab (RICHARDS & JIA 1999: 2). Für ausführlichere Darstellungen dazu wird an dieser Stelle auf die ein- und weiterführende Fernerkundungsliteratur verwiesen (z. B. COLWELL 1983a; KRAUS & SCHNEIDER 1988; KRONBERG 1985; LILLESAND & KIEFER 1991; SWAIN & DAVIS 1978; speziell auf Anwendungen für agrarische Landnutzung zugeschnitten ist z. B. MYERS 1983).

Der große Vorteil der Scannerdaten gegenüber der Luftbildfotografie liegt neben der Aufnahme eines größeren Spektralbereiches vor allem darin, daß die von den Detektoren aufgezeichneten Signale während des Scanvorgangs durch gleichzeitige Registrierung von Referenzquellen kalibriert werden können (KRONBERG 1985: 108). Dennoch ist zu bedenken, daß die aufgezeichneten Grauwerte nicht direkt mit den tatsächlichen Reflexionseigenschaften einzelner Objekte korrelieren. Um absolute Reflexionswerte zu erhalten oder um Reflexionswerte verschiedener Aufnahmezeitpunkte oder -orte absolut miteinander vergleichen zu können, müssen Parameter der Aufnahmesituation und des Sensors sowie die daraus resultierenden Eigenschaften der Daten berücksichtigt werden (vgl. QUIEL 1986: 18). Da im Rahmen dieser Arbeit nicht ausführlicher auf diesen sehr umfangreichen Themenbereich eingegangen werden kann, wird an dieser Stelle auf einige Quellen allgemeiner Information (ERDAS 1997: Kap. 3; KRONBERG 1985: 75ff; LÖFFLER 1994; RICHARDS & JIA 1999: *Chapter* 1) und in den Unterkapiteln auf spezielle Information zu den unterschiedlichen Sensoren hingewiesen.

Im folgenden sind die in die Untersuchung eingegangenen Satellitenszenen der unterschiedlichen Sensoren und Aufnahmezeitpunkte im Überblick dargestellt. Dabei konnte zum überwiegenden Teil auf bereits vorhandene Archivszenen zurückgegriffen werden. Um den aktuellen Landschafts- und Landnutzungszustand zu erfassen, wurden zusätzlich aktuelle Szenen hinzugezogen. Sie gewährleisten auch einen direkten Vergleich mit den Geländeaufnahmen und erlauben deswegen eine viel detailliertere Auswertung.

4.4.1 Landsat-MSS

Die amerikanischen Satelliten *Landsat-1*, -2 und -3 waren die ersten, die seit 1972 – im Abstand von jeweils drei Jahren gestartet – eine regelmäßige, sich alle 18 Tage wiederholende globale Aufnahme der Erdoberfläche aus einer Höhe von 920 km ermöglichten. Zunächst registrierten bis 1983 zwei Instrumente, der *Return Beam Vidicon (RBV)* und der *Multispectral Scanner (MSS)* die von der Erdoberfläche reflektierte Strahlung. Die hier verwendeten Aufnahmen stammen vom *MSS*-Sensor, der Szenen mit einer Abmessung von ungefähr 185x185 km aufnimmt. Diese Größe ergibt sich aus dem mechanischen Scannen von gleichzeitig jeweils 6 Linien quer zur Überflugrichtung. Dabei wird von den Detektoren jeweils die integrierte Strahlungsintensität eines 79x56 m großen Ausschnittes der Erdoberfläche gemessen und aufgezeichnet. Die Detektoren des *MSS* nehmen die Strahlung gleichzeitig in vier verschiedenen Spektralbereichen (Grün: 0,5-0,6 μm ; Rot: 0,6-0,7 μm ; nahes Infrarot: 0,7-0,8 μm und 0,8-1,1 μm) auf. Dabei werden die gemessenen Intensitäten in den jeweiligen Wellenlängenintervallen in 128 Unterscheidungsstufen (Grauwerte; 6 bit) aufgelöst (ERDAS 1997: 57ff; RICHARDS & JIA 1999: 9ff; vgl. für ausführlichere Angaben auch EOSAT 1985 oder COLWELL 1983a).

Die im Rahmen dieser Arbeit ausgewerteten *Landsat-MSS*-Szenen wurden zu 6 verschiedenen Zeitpunkten aufgenommen. Die Lage der Szenen ergibt sich aus der Szenen-Nummer, die dem *World Reference System* entspricht, und lässt sich aus Abb. 12 in Kapitel 4.2, die wichtigsten Parameter aus Tab. 3 entnehmen.

Tab. 3: Übersicht über die bearbeiteten *Landsat-MSS*-Szenen

Satellit	Sensor	Szenen-Nr.	Aufnahmedatum
<i>Landsat-1</i>	<i>MSS</i>	199/51	08.12.1972
<i>Landsat-1</i>	<i>MSS</i>	199/51	18.02.1973
<i>Landsat-2</i>	<i>MSS</i>	199/51	07.03.1975
<i>Landsat-2</i>	<i>MSS</i>	199/51	19.03.1976
<i>Landsat-3</i>	<i>MSS</i>	199/51	13.12.1978
<i>Landsat-3</i>	<i>MSS</i>	199/51	13.03.1979

4.4.2 Landsat-TM

Der ersten *Landsat*-Generation folgten 1982 bzw. 1984 *Landsat-4* und *Landsat-5*. Der Unterschied zu den ersten drei Satelliten lag in einer geringeren Flughöhe von 705 km und einer daraus resultierenden geringeren Dauer bis zur Wiederholung des gleichen Streifens von nur 16 Tagen. Die Reihenfolge, in der die Streifen aufgenommen wurden, sowie der

eigentliche Aufnahmevorgang veränderten sich geringfügig. Entscheidend auf die Daten wirkte sich ein zusätzlich installiertes Instrument, der *Thematic Mapper (TM)*, aus. Mit einer geometrischen Auflösung von 28,5x28,5 m, einer radiometrischen Auflösung von 256 Graustufen (8 bit) und 7 verschiedenen Spektralkanälen (Blau: 0,45-0,52 μm ; Grün: 0,52-0,6 μm ; Rot: 0,63-0,69 μm ; nahes Infrarot: 0,76-0,9 μm ; mittleres Infrarot: 1,55-1,75 μm und 2,08-2,35 μm ; thermales Infrarot: 10,4-12,5 μm) zeichnet sich der *TM* durch deutlich verbesserte Eigenschaften gegenüber dem *MSS* aus. Der zusätzliche Kanal im thermalen Infrarot deckt den Wellenlängenbereich ab, in dem die Erdoberfläche ihr Strahlungsmaximum hat, und ermöglicht damit die Aufzeichnung von Oberflächentemperaturen. Die räumliche Auflösung liegt in diesem Kanal allerdings nur bei 120x120 m, die radiometrische bei 128 Graustufen (ausführlichere Hinweise findet man in der gleichen Literatur wie in Kap. 4.4.1 für *Landsat-MSS* genannt).

1996 wurde *Landsat-6* gestartet, kurz nach dem Start aber die Kontrolle darüber verloren. Momentan nimmt *Landsat-5* Daten auf, teilweise aber in sehr schlechter Qualität. Ein weiteres Problem besteht darin, daß es keine Bodenempfangsstation für den östlichen Bereich Westafrikas für die Übertragung der Daten vom Satelliten gibt. *Landsat-5* hat zudem keine Möglichkeiten, Daten an Bord zu speichern (LÖFFLER 1994: 57). Aus diesem Grund war es nicht möglich, aktuellere Szenen zu erhalten. Möglicherweise verbessert sich mit dem Start von *Landsat-7*, der seit Mitte 1999 Daten aufnimmt, die Aufnahmesituation für Nigeria. Bisher gelang es allerdings nicht, Daten von *Landsat-7* vom Tschadbecken zu beziehen.

Es liegen zwei *TM*-Archivszenen vor, die zwar fast den gesamten Tschadsee, allerdings nicht den südlichen Bereich des Untersuchungsgebietes abdecken. Für den südlich anschließenden Bereich, der Maiduguri und den *Bama Ridge* einschließt, liegen sogar drei Szenen in dichter zeitlicher Folge vor, allerdings konnten sie bis auf eine (vgl. Tab. 4) aufgrund der abweichenden Aufnahmetermine (7. November 1987, 4. Dezember 1991 und 22. Dezember 1992) nicht sinnvoll mit den nördlich anschließenden Szenen kombiniert werden. Die Nummer 185/51 (*path/row*) nach dem *World Reference System (WRS)* entspricht dabei der Nummer 199/51 bei *MSS*. Demnach beschreibt 185/52 die südlich anschließende Szene, die nur einen kleinen Teil des weiteren Untersuchungsraumes abbildet (vgl. Abb. 12). Alle *Landsat*-Szenen liegen auf *Computer Compatible Tape (CCT)* vor.

Tab. 4: Übersicht über die bearbeiteten *Landsat-TM*-Szenen

Satellit	Sensor	WRS-Nr.	Aufnahmedatum
<i>Landsat-4</i>	<i>TM</i>	185/51	27.02.1988
<i>Landsat-4</i>	<i>TM</i>	185/51	04.11.1992
<i>Landsat-4</i>	<i>TM</i>	185/52	27.02.1988

4.4.3 SPOT-HRV

Zusätzlich zu den amerikanischen Satelliten registrieren seit 1986 Sensoren des französischen *SPOT*-Satelliten (*Système Pour l'Observation de la Terre*) die Reflexion der Erdoberfläche. Mit einem optoelektronischen Abtastsystem nehmen die je zwei an Bord befindlichen *HRV*-Sensoren (*Haute Resolution Visible*) je einen Streifen von 60 km Breite in wahlweise zwei unterschiedlichen Modi auf. Durch die gleichzeitige Aufnahme einer gesamten Zeile mit den in einer Reihe angeordneten Detektoren bei der Vorwärtsbewegung (*Pushbroom Scanner*) ist eine höhere geometrische Lagegenauigkeit und eine größere Auflösung möglich. Sie beträgt 20 m im multispektralen Modus (*XS*) und sogar 10 m im panchromatischen (*PAN*) Breitbandspektrum (0,57-0,73 μm Wellenlänge). Nachteilig wirkt sich die neue Technik allerdings durch geringere spektrale Auflösung von nur 3 Kanälen (Grün: 0,5-0,59 μm ; Rot: 0,61-0,68 μm ; nahes Infrarot: 0,79-0,89 μm) bei gleicher radiometrischer Umsetzung wie beim *TM* aus. Weitere interessante Aufnahmemöglichkeiten ergeben sich mit dem Kippen der Spiegel der Aufnahmesensoren. Dadurch können entweder breitere Streifen aufgenommen, und damit die Wiederholungsrate deutlich erhöht, oder sich überlappende Streifen abgebildet werden, um stereoskopische Betrachtung zu ermöglichen (CNES 1988; ERDAS 1997: 60f; KRONBERG 1985: 139ff; RICHARDS & JIA 1999: 14f).

Drei *SPOT*-Satelliten mit gleichen Eigenschaften sind im Umlauf. Die Aufnahmequalität ist deutlich besser als die der *Landsat*-Satelliten. Auch ist die Datenbeschaffung einfacher. Für das Untersuchungsgebiet und umliegende Räume lagen bereits *SPOT*-Szenen aus dem Jahre 1986 und für das engere Untersuchungsgebiet auch vom Januar 1995 vor. Um eine direkte Vergleichsmöglichkeit mit den Geländeuntersuchungen zu ermöglichen und um detailliertere aktuelle Kartierungen zu erstellen, wurden weitere multitemporale *SPOT*-Szenen in Auftrag gegeben. Die Verwendung mehrerer Szenen aus einer Vegetationsperiode soll außerdem zu Aussagen über saisonale Veränderungen führen. Die in Tab. 5 mit * markierten Aufnahmen entsprechen nicht dem Standard-Aufnahmesystem, sie wurden speziell programmiert. Die Lage der Szenen ist in Abb. 12 dargestellt. Bis auf die Szenen von 1986, die noch auf *CCT* vorliegen, wurden alle jüngeren auf *CD-ROM* geliefert. Die Daten sind bereits bezüglich Erdrotation und Aufnahmewinkel korrigiert (*Level 1B*).

Tab. 5: Übersicht über die bearbeiteten *SPOT*-Szenen

Satellit	Sensor	Modus	Szenen-Nr.	Aufnahmedatum
<i>SPOT-1</i>	<i>HRV-1</i>	<i>XS</i>	85/325	09.04.1986
<i>SPOT-3</i>	<i>HRV-2</i>	<i>XS</i>	85/325*	15.01.1995
<i>SPOT-3</i>	<i>HRV-2</i>	<i>XS</i>	85/325*	06.09.1995
<i>SPOT-3</i>	<i>HRV-2</i>	<i>XS</i>	85/325*	08.10.1995
<i>SPOT-3</i>	<i>HRV-2</i>	<i>XS</i>	85/325*	29.11.1995
<i>SPOT-3</i>	<i>HRV-2</i>	<i>XS</i>	85/325*	16.01.1996
<i>SPOT-1</i>	<i>HRV-1</i>	<i>XS</i>	85/326	09.04.1986
<i>SPOT-1</i>	<i>HRV-2</i>	<i>XS</i>	86/325	09.04.1986

4.5 Sonstiges

Neben der Datengrundlage im engeren Sinn sind verschiedene Formen weiterer Zusatzinformationen in die Untersuchungen eingeflossen. Dazu gehören Berichte, Statistiken und auch Skizzen unterschiedlicher Quellen wie z. B. die *Feasability Reports* mit Anbauflächenplanung der *Chad Basin Development Authority* (siehe Literaturliste). Einen wichtigen Aspekt stellen auch Bevölkerungszahlen, Klimadaten im allgemeinen und z. B. Daten zu Seespiegelschwankungen des Tschadsees im besonderen dar. Auch sie sind bereits oder sollen noch strukturiert in Datenbanken des regionalen geographischen Informationssystems übernommen werden. Alle bereits in die räumlichen Datenbank integrierten Informationen sind im Anhang A.1.3 aufgenommen.

Ebenfalls für die Interpretation insbesondere der Satellitendaten wurde eine große Anzahl Fotografien verwendet, die im Untersuchungsgebiet zu verschiedenen Zeiten aufgenommen wurden. Sie stellen gescannt, aufbereitet und mit ihrem über *GPS*-Messungen gewährleisteten direkten Ortsbezug eine sehr wichtige punkthafte Vergleichsinformation dar.

Angestrebt ist weiterhin, historische Daten und Informationen zu integrieren. Dazu gehören z. B. die Reiserouten und Skizzen von Barth, die in der Einleitung schon gewürdigt wurden und die sogar einen gewissen Raumbezug enthalten und wichtige – weil einzige – Quelle aus dieser Zeit sind.

5 Methodik

"Traditionelle Verfahren der Geographie (...) werden zunehmend durch computergestützte Verfahren modifiziert oder ersetzt. Diese Entwicklung hat inzwischen dazu geführt, daß in vielen neueren geographischen Arbeiten nicht mehr die eigentlichen Forschungsgegenstände wie Klima, Vegetation etc. den Schwerpunkt des Interesses bilden, sondern daß technische Aspekte der Prozessierung von Datensätzen in den Vordergrund rücken. Andererseits bieten moderne Verfahren zahlreiche neue Ansatzpunkte für Problemlösungen." (NÜSSER & SCHICKHOFF 1996: 93)

Mit Bedacht auf das oben angegebene Zitat sollen im folgenden Kapitel die verwendeten Arbeitsmethoden soweit vorgestellt werden, wie es für das allgemeine Verständnis und eine kritische Beurteilung der Untersuchung nötig ist. Um dabei den eigentlichen Forschungsgegenstand – die Untersuchung von Veränderungen – nicht aus den Augen zu verlieren, sollen sich die Ausführungen sehr eng an die im vorigen Kapitel beschriebenen Daten halten. Nach einer kurzen allgemeinen Übersicht über die verwendeten Geräte und Programmsysteme werden die für die einzelnen Medien durchgeführten Arbeitsschritte dokumentiert. Allgemeine Theorien und Methoden lassen sich durch angefügte Literaturverweise nachvollziehen.

Gearbeitet wurde zunächst auf einer *Sparc-10-Workstation* unter *UNIX*, später auf *Pentium-I-, -II- und -III-PC's* unter *Windows NT 4.0*. Desweiteren standen ein Bandlesegerät (*Cipher*) für *CCT- (Computer Compatible Tapes-)* Bänder, ein A4-Scanner (*EPSON-GT9500*), später auch ein A3-Scanner (*Umax-Mirage II*), ein A0-Digitalisierbrett (*Digis-386S*) sowie ein schwarz/weiß-Laserdrucker (*HP-Laserjet*) und Farbtintenstrahldrucker (*EPSON-Stylus* und *HP-Designjet*) im Format A4, A3 bzw. A1 zur Verfügung. Während der Geländearbeit konnte ein *Global Positioning System (GPS)*-Empfänger (*Trimble-Pathfinder*) eingesetzt werden. Die stereoskopische Auswertung der Luftbilder erfolgte an einem Stereointerpretationsgerät (*Aviopret WILD APT2*).

Im überwiegenden Fall wurden digitale Techniken angewendet. Neben Textverarbeitungs- (*Word* für *Windows*), Tabellenkalkulations- (*Excel*) und Datenbankprogrammen (*d-Base* und *Access*) kamen dabei verschiedene Zeichenprogramme bzw. geographische Informationssysteme (*AutoCAD*, *AtlasGIS* und *ARC/INFO*, *ArcView*) sowie ein digitales Bildverarbeitungsprogramm (*ERDAS* bzw. *ERDAS Imagine*) zum Einsatz. Die Verarbeitung der Rasterdaten wurde hauptsächlich in *ERDAS* (Versionen 7.5, 8.2, 8.3 und 8.4), die Verarbeitung der Vektordaten zum allergrößten Teil in *ArcInfo* (Versionen 3.5, 7.1 bzw. 7.2) und nur in geringem Maße mit *AutoCAD* (Release 12) und *AtlasGIS* (Version 3.01) realisiert (zur Definition und Unterscheidung von Raster- und Vektordatenmodell vgl. ESRI 1994: 1-11 bis 1-32). Die gemeinsame Auswertung der Raster- und Vektordaten sowie die Repräsentation wurde überwiegend in *ArcView* (Versionen 2.0, 3.0 und 3.1) vorgenommen. Aufbau und Organisation der Datenbanken erfolgte zum Teil innerhalb von *ArcInfo*, aber auch extern in *Excel* (Version 97).

5.1 Entwicklung eines Klassifizierungsschemas

Unabdingbare Vorbedingung für die Datenauswertung ist der Aufbau eines Auswerteschemas, das sowohl auf die Zielsetzung als auch auf die zu bearbeitenden Daten zugeschnitten ist. Zusätzliche Forderungen an solch ein System sind möglichst weite räumliche und zeitliche Übertragbarkeit und Vergleichsmöglichkeiten, weitestgehende Unabhängigkeit von der Datengrundlage und dem Auswerter sowie eine möglichst hohe und gleichmäßige Genauigkeit der erfassten Objekte. Eine Aufschlüsselung in zusätzliche Unterkategorien bzw. die mögliche Zusammenfassung zu übergeordneten Kategorien kann unterschiedlicher Detailgenauigkeit, z. B. aufgrund unterschiedlicher Maßstäbe, Rechnung tragen und trotzdem Vergleiche zulassen (vgl. ANDERSON et al. 1976 in SABINS 1987: 358f).

Zur Kartierung von Landbedeckung und Landnutzung wurden bereits zahlreiche Klassifizierungsschemata entwickelt. Dabei existieren allerdings bei den beiden Begriffen sehr unterschiedliche Definitionen (vgl. u. v. a. ALBERTZ 1989: 57, EDEN 1986: 5). Im deutschen Sprachgebrauch wird meist keine Differenzierung der beiden Begriffe vorgenommen, stattdessen beides unter Landnutzung zusammengefaßt. Im englischen Sprachgebrauch, insbesondere im Zusammenhang mit der Verwendung von Fernerkundungsdaten, wird jedoch meist zwischen 'Land cover' und 'Land use' unterschieden (SABINS 1987: 357). Da diese Aufgliederung wichtige Aspekte der unterschiedlichen hier verwendeten Auswerteverfahren sprachlich festhält, erscheint es sinnvoll, für das allgemeine Verständnis im Rahmen dieser Arbeit beide Begriffe 'Landbedeckung' wie auch 'Landnutzung' zu verwenden. In Anlehnung an die überwiegend englischsprachige Fernerkundungsliteratur wird unter 'Landbedeckung' die (physikalisch bedingte) Beschaffenheit der Landoberfläche bzw. die Art der dort befindlichen Objekte – beispielsweise Gestein, Vegetation, Bebauung – verstanden. Mit dem Begriff 'Landnutzung' kommt – wie das Wort direkt impliziert – eine zusätzliche funktionale, anthropogene Komponente hinzu (vgl. z. B. SABINS 1987: 357). So kann die Nutzung einer mit Bebauung 'bedeckten' Fläche entweder Straße, Wohngebiet oder auch Industriefläche sein.

Im Kapitel zum Forschungsstand (2.2) wurden bereits einige Untersuchungen vorgestellt, die mit unterschiedlicher Datengrundlage und Zielsetzung Landbedeckungs- und/oder Landnutzungsgliederungen vorgenommen haben. Für Fernerkundungsanwendungen am verbreitetsten ist das amerikanische Klassifizierungssystem des *U.S. Geological Survey* (nach ANDERSON et al. 1976 in SABINS 1987). Dieses System gliedert sich in vier Detailstufen, denen entsprechende Maßstabsebenen bzw. unterschiedliche Datengrundlagen entsprechen. Da es bisher noch immer kein international anerkanntes einheitliches Klassifizierungsschema gibt und das amerikanische die meisten der oben genannten Forderungen erfüllt, lehnt sich das in dieser Arbeit verwendete Klassifizierungssystem so eng wie möglich an das in ANDERSON et al. (1976) publizierte Schema. Modifizierungen müssen vorgenommen werden, um dieses System an die Tropen anzupassen.

Tab. 6: Klassifizierungsschema Landbedeckung und Landnutzung im Tschadbecken

Ebene	I	II	III	IV	Code				
Maßstab	<= 1 : 250 000	~ 1 : 100 000	~ 1 : 25 000 – 1 : 50 000	> 1 : 25 000					
Datenquelle	kleinmaßstäbige Karten, <i>Landsat MSS</i>	<i>Landsat TM, SPOT</i>	Karten mittleren Maßstabs, Luftbilder, <i>SPOT</i>	Geländeaufnahmen					
Grobgliederung der Landbedeckung nach vorherrschendem Sediment:	Gewässer	stehend	permanent	a) natürlich	111				
			periodisch bzw. episodisch (Feuchtgebiet)	b) anthropogen	112				
			perennierend (Fluß)		121				
			periodisch/episodisch (Gewässerrinne)		122				
		Sand	Bebauung	Siedlung	permanent (traditionell)	Ethnische Zusammensetzung:	123		
					saisonal, verlassen (traditionell)		a) Kanuri b) Shuwa c) Kanuri und Shuwa d) Hausa e) gemischt f) Sonstige sowie Zusatzdaten	211 212	
				Übergangszone		Verkehr	moderne Anlage	Institution	213
							Projektfläche		214
							Straße (befestigt)		221
							Piste, Weg, Viehweg		222
Ton	Landwirtschaft	Regenzeitanbau	aktuell		311				
			Brachfläche		312				
		Trockenzeit-anbau	aktuell	a) deutlich b) mitteldeutlich c) undeutliche Dämme	321				
			Brachfläche		322				
		Sonstiger Anbau	Reis		331				
			Flußbewässerung		332				
			'Flutfolge'		333				
			Bewässerungs-anbau (großflächig)	Fläche nur mit Kanälen überbaut		341			
		Weide	Bewässerungsfeld (nutzbar)		342				
			Bewässerungsfeld (vorbereitet)		343				
Regenzeitweide			351						
Trockenzeitweide			352						
(fluviale Sedimente)	Vegetation Bedeckungsgrad	Gehölze	dicht	Formation/ Pflanzen- gesellschaften/ dominante Arten	411/421				
			mitteldicht		412/422				
		Gräser	vereinzelt		413/423				
	Sonstiges	Deflationswanne			510				
		Brandfläche			520				

Die in Tabelle 6 vorgestellte Gliederung zur Kartierung von Landbedeckung und Landnutzung im Tschadbecken stellt eine Übersicht dar; sie kann allerdings nicht für alle Datenquellen uneingeschränkt angewendet werden. Unterschiede ergeben sich hauptsächlich aufgrund der verschiedenen Auswertemethoden (visuell/automatisch) und durch die dabei Anwendung findenden unterschiedlichen Datenmodelle (Vektor/Raster) bei sehr unterschiedlichen Auflösungen (Luftbilder, *SPOT*-, *Landsat-TM*- und *-MSS*-Satellitenszenen). Einzelheiten dazu finden sich in den Kapiteln zur Verarbeitung der verschiedenen Datenquellen (5.3 bis 5.6).

5.2 Geländeuntersuchungen

Für eine Beurteilung und exakte Auswertung von Fernerkundungsdaten ist es unerlässlich, neben den auszuwertenden Bilddaten Geländevergleichsinformationen zu erheben. Während für einige Untersuchungen diese Aufnahmen unbedingte Grundlage darstellen (vgl. Kap. 5.6.2 oder 5.6.5.2), verbessern sie auch in den anderen Fällen die Auswertung beträchtlich und ermöglichen außerdem eine Verifizierung der Ergebnisse (vgl. z. B. TOWNSHEND 1981: 38ff). Zusätzlich zu den für die Fernerkundungsdatenauswertung nötigen Grundlagen konnten im Gelände Hintergrundinformationen zur Interpretation der Ergebnisse zusammengetragen werden.

5.2.1 Allgemeine Beobachtungen

Im Rahmen dieser Arbeit konnten zwei Geländeaufenthalte durchgeführt werden. Der erste fand während und nach der Regenzeit von August bis Oktober 1995 und der zweite während der Trockenzeit im Februar 1997 statt. Leider konnte aus politischen Gründen nicht – wie geplant und durch die Satellitenszenen abgedeckt – die gesamte Vegetationsperiode 1995/96 verfolgt werden. Erschwerend wirkte sich auch aus, daß keine der aktuellen Satellitenszenen früh genug aufgenommen und geliefert werden konnte, um sie im Gelände im direkten Vergleich einzusetzen. Deswegen mußte auf ältere bereits vorliegende Szenen zurückgegriffen werden (vgl. zu dieser Problematik auch FULLER & PARSELL 1990: 1911).

Von den bereits vorliegenden *Landsat-TM*- und besonders *SPOT*-Szenen wurden stark vergrößerte Ausdrücke in unterschiedlichen Kanalkombinationen angefertigt und als Kartier- und Orientierungsgrundlage im Gelände verwendet. Neben verschiedenen Kanalkombinationen fanden auch Ausdrücke von unterschiedlichen Vorab-Klassifizierungen und verschiedene Ratio-Berechnungen Anwendung (vgl. Kap. 5.6). Erste Überblicksbegehungen wurden zur Korrelierung der im Gelände vorkommenden Landschaftseinheiten mit ihren spektralen Signaturen auf den Satellitenszenen genutzt. Dabei konnten sowohl unterschiedliche Kanalkombinationen wie auch die verschiedenen Sensoren verglichen werden. Besonderes Interesse galt dabei den saisonalen Veränderungen im Reflexionsverhalten der verschiedenen Landschaftseinheiten. Zusätzlich wurden auf Grundlage von Vorab-Klassifizierungen (vgl. Kap. 5.6.5) und Ratio-Berechnungen (vgl. Kap. 5.6.4.1) auffällige Bereiche im Gelände aufgesucht, um Erklärungen für deren spektrale Ausprägung zu gewinnen.

Die Ausdrücke der *SPOT*-Szenen haben sich im stark gegliederten westafrikanischen Gelände aufgrund der besseren Auflösung als günstiger erwiesen. Zum direkten Vergleich der

Spektraleigenschaften unterschiedlicher in der Landschaft vorkommender Objekte wurde meist auf die Kanalkombination 3, 2, 1 im RGB-Modus (RGB: Rot-Grün-Blau) zurückgegriffen (vgl. ERDAS 1997: Chapter 4). Für diese Darstellungsform des nahen Infrarot, Rot und Grün in den Bildschirmfarben Rot, Grün und Blau wurde ein erster Kartierschlüssel durch visuelle Interpretation erstellt. Diese Kombination hat ähnlich wie die *TM*-Kombination aus den vergleichbaren Kanälen 4, 3, 2 und der *MSS*-Kombination 4, 2, 1 den Vorteil, daß Reflexionseigenschaften bestimmter Objekte in einzelnen Spektralbereichen und ihre Darstellung in oben angegebener Kanalkombination direkt nachvollzogen werden können. Denn die besprochenen Kanalkombinationen, die für die visuellen Auswertungen in dieser Untersuchung herangezogen wurden, entsprechen ähnlichen Wellenlängenintervallen und haben sich zu einem Standard herausgebildet. Ihre Anwendung erweist sich somit auch als sinnvoll für eine gewisse Vergleichbarkeit von Szenen unterschiedlicher Gebiete.

5.2.2 Befragungen

Während der Geländeuntersuchungen wurden neben den allgemeinen Beobachtungen auch Befragungen der vor Ort lebenden Bevölkerung durchgeführt. Dabei wurden keine strukturierten Interviews verwendet, sondern in einfachen Gesprächen, die sich an fast jedem Standort ergaben, Themen zur Landnutzung angeschnitten. So konnten nach Wohnort und ethnischer Zugehörigkeit kategorisiert, Aussagen zu Alter und Art der aktuellen und verlassenen Siedlungen, Anbauflächen, -systemen und -kulturen, Ernteerträgen sowie Brachezeiten, anderen Landnutzungsmöglichkeiten und zeitlichen Veränderungen, Bevölkerungszahl, Viehzahl, saisonalen Wanderungen, Katastrophen u. a. aufgenommen werden. Auch sehr subjektive Einschätzungen der jeweiligen Befragten wurden registriert. Konkrete Rückfragen zu bestimmten Gebieten oder Phänomenen (z. B. Buschbrände und deren Entstehungsursachen oder größere Überschwemmungen), die auf den Satellitenbildern aufgefallen waren, konnten so zum Teil beantwortet werden.

Die Ergebnisse der Befragungen wurden zugehörig zum jeweiligen Ort notiert. In den Orten, in denen längere Aufenthalte stattfanden (Old Marte, New Marte, Musene, Ngala, Gambaru), konnten intensivere Interviews, die allgemeiner die Anbausysteme und das Verhalten der Menschen im Gesamtraum betrafen, geführt werden. Ausführlichere und vor allem systematischere Befragungen wurden von Ethnologen im gleichen Raum durchgeführt. Diese Ergebnisse lassen sich mit den gewonnenen räumlichen Daten verknüpfen (dazu und auch zur weiteren Nutzung der aus den Befragungen gewonnenen Informationen vgl. Kap. 5.7).

5.2.3 GPS-Messungen

Neben den vergleichenden Beobachtungen wurden zur Navigation und exakten Positionsbestimmung Messungen auf Grundlage der Satellitennavigation mittels *GPS* (*Global Positioning System*) durchgeführt. Im Handbuch TRIMBLE NAVIGATION (1992: 17 insbesondere) und vertiefend in BAUER (1992) lassen sich die wichtigsten Grundlagen zur Ortsbestimmung mit Satelliten nachlesen. Das eingesetzte Gerät wurde je nach Bedarf im Auto mit einer auf dem Dach angebrachten externen Antenne oder portabel über die interne Antenne betrieben.

5.2.3.1 Aufnahme von Paßpunkten

Paßpunkte sind eindeutig im Gelände und auf den Fernerkundungsdaten zu identifizierende Punkte, mit deren Hilfe eine genaue Lageeinordnung der Datenquellen vorgenommen werden kann. In Verbindung mit den Übersichtsbegehungen im Gelände wurden solche eindeutig zu identifizierenden Punkte gesucht, im Satellitenbildausdruck markiert und deren genaue Position bestimmt. Diese Herangehensweise war im Untersuchungsgebiet sehr gut möglich, da genügend Punkte sowohl im Gelände als auch auf dem Satellitenbild gefunden werden konnten. Gerade im engeren Untersuchungsgebiet bieten die zahlreichen Infrastruktureinrichtungen ausreichend Anhaltspunkte.

Dabei liefern kleinere Objekte, die durch einen einzelnen Bildpunkt dargestellt sind, wie Wege, Feldränder, einzelne Hütten oder Wasserstellen genauere Ergebnisse als größere Objekte wie zum Beispiel breite Straßen oder Straßenkreuzungen, die meist durch mehrere Bildpunkte dargestellt sind. Im Gegensatz zu letzteren verändern viele kleinere Objekte ihre Lage häufiger. Da jedoch mit relativ aktuellen Satellitenszenen gearbeitet wurde, konnten Veränderungen sehr gut abgeschätzt und bei der Punktbestimmung ausgeschlossen werden. Schwierigkeiten bereiteten lediglich abgelegene Gebiete mit geringerer anthropogener Prägung, wie vor allem die weiter nördlich liegenden und stärker von Tschadsee-schwankungen beeinflussten Regionen. Als problematisch für das weitere Untersuchungsgebiet erwies sich die Tatsache, daß Paßpunkte nur innerhalb des nigerianischen Staatsgebietes und auch nicht auf der Seefläche erfasst werden konnten.

5.2.3.2 Aufnahme von Vergleichsflächen

Neben der Aufnahme eindeutig identifizierbarer Punkte, mit denen die genaue Festlegung der absoluten Lage der verschiedenen Fernerkundungsdaten vorgenommen werden sollte, wurden Flächenaufnahmen gemacht (vgl. Tab. 7). Auch die Flächen (Mittel-, Eckpunkte oder andere markante) wurden zunächst durch die Satellitennavigation in ihrer Lage bestimmt (vgl. Spalten 7-10 in Tab. 7). Zusätzlich wurden aber auch Verteilung und Form im Satelliten- und teilweise im Luftbild (Spalte 11 in Tab. 7) sowie weitere Beschreibungen (Spalte 4) dazu festgehalten. Diese Beschreibungen waren sehr unterschiedlicher Natur. In den meisten Fällen handelte es sich um Informationen zur Landbedeckung und -nutzung. Soweit möglich wurden Merkmale zum Untergrund, zu Böden, zur Vegetation aber auch zu anderen Aspekten aufgenommen. Die Information aus den Vergleichsflächen wurde hauptsächlich für Trainingsgebiete in überwachten Klassifizierungen (vgl. Kap. 5.6.5), aber auch zur allgemeinen Beurteilung des Untersuchungsgebietes verwendet.

Zum Teil konnten die Geländearbeiten in direkter Zusammenarbeit mit Kollegen anderer Fachbereiche (Bodenkunde, Botanik, Ethnologie) unternommen werden. Durch die unabhängige Vermessung der untersuchten Standorte mittels *GPS* können auch zu anderen Zeiten aufgenommene Merkmale integriert werden (vgl. Kap. 5.7). Neben der Einbeziehung der durch andere Fachdisziplinen bearbeiteten Standorte wurde außerdem angestrebt, ein breites Spektrum an Vergleichsflächen aufzunehmen. Das heißt: zum einen wurden möglichst alle im Arbeitsgebiet vorkommenden Landbedeckungs- und Landnutzungskategorien in Form von möglichst mehreren Vergleichsflächen aufgenommen, zum anderen wurde auf eine optimale Verteilung dieser Flächen über den gesamten Untersuchungsraum geachtet.

Nur in ihrer Gesamtheit repräsentative Vergleichsflächen ermöglichen eine gute digitale Klassifikation (vgl. Kap. 5.6.5.2).

Für viele der aufgenommenen Vergleichsflächen wurden zusätzlich fotografische Aufnahmen gemacht (Spalte 12 in Tab. 7). Einige der Standorte konnten sowohl während der Regenzeit als auch noch einmal während des anschließenden Trockenzeitaufenthaltes aufgenommen werden. Dadurch lassen sich Einflüsse saisonaler Dynamik auf unterschiedlichen Standorten ableiten und vergleichen. Tabelle 7 zeigt beispielhaft einen kleinen Ausschnitt aus der Paßpunkt- und Vergleichsflächendatei.

Tab. 7: Ausschnitt aus der Paßpunkt- und Vergleichsflächendatei

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Nr.	dd x	dd y	Beschreibung	WP	Datum	Lat N	Lon E	h[m]	SV	Lb	Dia
39	13,87239	12,247167	Gaddadai, W Ortseingang, Ende Teer- straße	96	8.9.95	12 14 49,8	13 52 20,6		6	M4/5	
40			1. Guesthouse New Marte, Hauptstraße 1. Haus links	97	8.9.95	12 14 54,8	13 52 00,3			M4/5	
41			DURA01: N Dura, Cesa, Brachiaria dominiert, Calotropis 5%, Zornia gloschi- diata teilweise	-98	8.9.95	12 18 12,8	13 47 01,9	250	7	M3/3	D2/36 D3/0 D3/1

Insgesamt wurden 652 Punkte und Vergleichsflächen aufgenommen, 376 davon während bzw. nach der Regenzeit 1995, die restlichen in der Trockenzeit 1997. Diejenigen Positionen, die keinen exakt auf dem Satellitenbild erkennbaren Punkt, sondern Vergleichsflächen darstellen, sind in Spalte 5 (*WP - Waypoint*) mit einem '-' gekennzeichnet. Außerdem sind in der Tabelle eine laufende Nummer (Spalte 1), geographische Länge und Breite in Dezimalgrad (Spalten 2 und 3), eine Beschreibung (Spalte 4), die zunächst vergebene und im *GPS* gespeicherte Nummer als Wegpunkt (Spalte 5), das Aufnahmedatum (Spalte 6), die Lage in Grad, Minuten, Sekunden (Spalten 7 und 8), soweit gemessen die Höhe (Spalte 9) wie auch die Anzahl sichtbarer Satelliten während der Messung (Spalte 10, *SV - Satellite Visibility*) angegeben. Die Spalten 11 und 12 benennen das zugehörige Luftbild bzw. Dokumentations-Foto.

5.2.3.3 Weiterverarbeitung der Geländeerhebungen

Nach den Geländeaufenthalten wurden die aufgenommenen Daten aus dem *GPS* zum Teil automatisch und zum anderen Teil per Hand in eine einheitliche Datei übertragen. Jedem Punkt wurde eine eindeutige Nummer zugewiesen und die zugehörigen geographischen Koordinaten in Dezimalgrad für die Bearbeitung im geographischen Informationssystem

ArcInfo umgewandelt. Aus der Datei wurde anschließend ein Punkt-Coverage (thematische Ebene unter *ArcInfo*, vgl. ESRI 1994: 2-3 bis 2-8 und *Chapter 3*) aus allen Paßpunkten und Vergleichsflächen erstellt. Alle Zusatzinformationen werden in einer zugehörigen Attribut-Datenbank verwaltet. Diese Datenbank läßt sich beliebig ausdehnen und mit anderen verknüpfen.

Die Höhendaten wurden nicht in das geographische Informationssystem integriert, denn es konnten nicht genügend Werte mit ausreichender Genauigkeit gemessen werden. Da die Höhenunterschiede im Untersuchungsraum 15 m nicht überschreiten und die Meßfehler deutlich darüber liegen, ist eine Darstellung in Form eines dreidimensionalen Geländemodells nicht sinnvoll. Noch vor der Übernahme der Positionsdaten wurde eine Genauigkeitsabschätzung der gemessenen Werte vorgenommen (vgl. Kap. 7.2.3).

5.3 Bearbeitung der Karten

Wie bereits in Kap. 4.1 beschrieben, wurden zum einen topographische und thematische Karten und zum anderen bereits digital vorliegende Kartenwerke in die Untersuchungen einbezogen.

5.3.1 Extraktion der relevanten Information und Digitalisierung

Alle in Kap. 4.1.3 vorgestellten Karten liegen bereits digital vor. Sie können zum größten Teil direkt im geographischen Informationssystem geladen oder müssen importiert werden (vgl. Kap. 5.7). Es erschien allerdings sinnvoll, auch diese Daten für die vorgesehenen Bearbeitungen aufzubereiten, denn so brauchten nur die für die jeweiligen Anwendungen relevanten Daten ausgewählt werden, wodurch Speicherplatz gespart werden kann und sich die Zugriffszeiten erheblich verringern. Im vorliegenden Fall wurden von den vorgestellten Kartenwerken nur die Daten für Nigeria, Borno *State* bzw. das Tschadbecken (je nach Auflösung) aufgearbeitet. Desweiteren wurden thematisch nur die für Landbedeckungs- und Landnutzungsuntersuchungen relevanten Themen selektiert. Es hat sich außerdem als günstig erwiesen, die Datenstruktur innerhalb des geographischen Informationssystems möglichst einheitlich zu gestalten und deswegen die bereits digital vorliegenden Daten strukturell anzupassen (vgl. Kap. 5.7.1).

Die Karten, die noch nicht digital vorlagen, aber auch digital verarbeitet werden sollten, mußten zunächst für die Bearbeitung im Rechner umgesetzt werden, wobei schon vor der Digitalisierung eine räumliche und thematische Selektion vorgenommen wurde. Zwei Methoden der Digitalisierung kamen dabei zur Anwendung: Kleine, insbesondere thematische Karten und Karten mit sehr kleinräumigen Einheiten wurden gescannt und am Bildschirm digitalisiert. Automatische Vektorisierungsverfahren wurden getestet, aber wegen ihrer ungenauen Umsetzung und der deswegen nötigen aufwendigen Nachbearbeitungen verworfen. Größtes Problem war dabei der schlechte Zustand der meisten Karten, wodurch zu vernachlässigende Hintergrundinformationen nicht von den eigentlichen Themenebenen getrennt werden konnten. Insbesondere Flächenobjekte konnten nur sehr schlecht vektorisiert werden. Für größere aufwendigere Karten, die nicht komplett gescannt werden konnten, wurde am Digitalisierbrett gearbeitet. Unterschiedliche Themen wurden in getrennten

Dateien abgelegt, unterschiedliche Merkmale durch spezifische Kodierungen vermerkt (vgl. zur weiteren Erläuterung des Digitalisierungsvorganges ESRI 1997: 4-1ff).

5.3.2 Transformation und Projektion

Für die Bearbeitung von verschiedenen Daten innerhalb eines geographischen Informationssystems ist es notwendig, daß alle Daten in einem einheitlichen Bezugssystem vorliegen. Für die gemeinsame Verwendung von Satellitendaten und Luftbildmosaiken sowie aufgrund der Tatsache, daß sehr viele der verwendeten Datenmaterialien keine Angaben zu Projektion oder Bezugssystem enthalten, wurden zunächst alle Daten mittels geographischer Koordinaten definiert. Auch Karten, die in bekannten Projektionen vorliegen, wurden dazu zunächst in geographischen Längen- und Breitenangaben vorgehalten. Karten, denen keine Projektion zugeordnet werden konnte, oder denen Angaben zu einzelnen Parametern fehlten, wurden anhand der zur Verfügung stehenden Angaben in geographische Koordinaten linear transformiert. Einige Karten enthielten überhaupt keine oder offensichtlich unstimulige Angaben zum Raumbezug; sie wurden dann über einzelne bekannte Punkte (z. B. Ortsmittelpunkte oder markante Straßenkreuzungen) auf andere Bezugsquellen transformiert (zur allgemeinen Vorgehensweise vgl. ESRI 1997: 7-1ff). Da für alle Daten genaue Angaben zur Georeferenzierung gespeichert werden, können daraus resultierende eventuelle Fehlerquellen zumindest nachvollzogen, wenn auch nicht immer beseitigt werden. Die durch unterschiedliche bzw. unbekannte Projektionen auftretenden Ungenauigkeiten wurden allerdings zugunsten einer gemeinsamen digitalen Bearbeitung akzeptiert.

Zusätzlich zur Haltung aller Daten in geographischen Koordinaten wurden die Daten, aus denen Flächenberechnungen abgeleitet werden sollten, zu diesem Zweck projiziert. Als Standard wurden die Projektionseigenschaften der neuesten Karten der LAKE CHAD BASIN COMMISSION (vgl. Kap. 4.1.1, Kartenverzeichnis und Anhang 1) festgesetzt. In ihnen werden Meter als Maßeinheit verwendet im Gegensatz zu *feet* bei den älteren topographischen Karten (vgl. auch Tab. 8 im Kap. 5.7.2.4).

5.3.3 Attributierung

Neben der Digitalisierung der geographischen Objekte müssen auch die zugehörigen Sachdaten aus den Karten als Attributdateien in digitale Form umgesetzt werden. Eine erste Gliederung der digitalisierten geographischen Objekte ergibt sich über die Gliederung in verschiedene Themenebenen (*Layer* bzw. *Themes*). Themenebenen können bei gleichem geographischen Bezug beliebig miteinander kombiniert und verarbeitet werden. Weitere Informationen sowie sachliche Verknüpfungen werden über Attributdateien durch entsprechende Kodierungen realisiert. Verknüpfungen sind auch zwischen unterschiedlichen Attributdateien über Verweise möglich. Zusätzlich lassen sich den geographischen Objekten aber auch Texte oder weitere Daten zuordnen (dazu in Kap. 5.7.1, für ausführlichere Beschreibungen vgl. auch ESRI 1997: 6-1ff). Dabei wurde versucht, eine möglichst einfache und einheitliche Struktur zu entwickeln, die auch einen Vergleich der unterschiedlichen Datentypen ermöglicht.

Als problematisch erwies sich die Verknüpfung von Sachdaten aus unterschiedlichen Datenquellen. Der Forderung nach eindeutiger Zuordnung der Datenquellen einerseits aber auch einer möglichst idealen Verknüpfung der unterschiedlich strukturierten Informationen aus verschiedenen Quellen andererseits konnte nur mit Einschränkungen nachgekommen werden. Als außerordentlich wichtig hat sich die Dokumentation der zugehörigen Information in Metadaten wie auch die Organisation der Gesamtdatenstruktur herausgestellt.

5.4 Bearbeitung der Luftbildmosaike

Während für die Übertragung der Karten in digitale Form lediglich eine Selektion und teilweise Umstrukturierung der Karteninhalte erfolgen muß, kann der Inhalt der Luftbildmosaike erst durch intensive Interpretation erschlossen werden. Deswegen muß der Digitalisierung eine sowohl an die Zielsetzung der Untersuchung als auch eine an die Datenbasis angepaßte Definition der zu kartierenden Einheiten (wie in Kap. 5.1 geschehen) und deren Umsetzung in digitale Einheiten in Form eines Interpretationsschlüssels vorausgehen.

5.4.1 Erstellung eines Interpretationsschlüssels und visuelle Kartierung

Die Auswertung der verschiedenen Luftbildmosaike und Luftbilder wurde gemäß dem in Tab. 6 erstellten Klassifizierungsschema vorgenommen. Da visuell interpretiert wurde, konnte gleichzeitig die funktionale Gliederung der Kartiereinheiten nach Tab. 6 vorgenommen und vermerkt werden. Die Kartierung erfolgte auf Transparentfolie auf räumlicher Grundlage der Luftbildmosaike (vgl. Kap. 4.2). Für jede der Kartiereinheiten wurde eine Objektart (Punkt, Linie oder Fläche) festgelegt, die die Eigenschaften am sinnvollsten repräsentiert (vgl. ESRI 1994: 1-11ff). Da vorab nicht alle Kartiereinheiten bekannt waren, wurden die in Tab. 6 dargestellten Einheiten während der Auswertungsphase mehrfach umstrukturiert und ergänzt.

Am einfachsten gestaltete sich die Markierung aller Linienelemente. Straßen, Wege, Flüsse, Gewässerrinnen und Kanäle konnten direkt aus dem Luftbildmosaik abgelesen werden. Lediglich für die Unterscheidung zwischen geteerten Straßen und Kanälen sowie zwischen wasserführenden und trockenliegenden Gewässerrinnen mußte auf die qualitativ besseren Einzelluftbilder zurückgegriffen werden. Auch für die Ausgrenzung der Dämme der Trockenzeitfelder wurden die Einzelluftbilder stereoskopisch betrachtet.

Neben den linearen Strukturen konnten aus den Luftbildern und Luftbildmosaik im Maßstab 1 : 25 000 besonders gut kleinräumig strukturierte Flächen, wie bewohnte und verlassene Siedlungen und anderweitig bebaute Gebiete entnommen werden. Sie zeichneten sich durch deutliche Ballung von Baumgruppen und Behausungen aus. Durch stereoskopische Auswertung konnte zusätzlich die Art der Siedlung festgestellt werden. Waren keine intakten Häuser mehr erkennbar, wurden die Siedlungsplätze als saisonal oder verlassen vermerkt. In den meisten Fällen konnten sogar die Siedlungen der Kanuri, die sich durch ihre Größe und die rechteckige Form der Lehmbauten von den kleineren runden strohbedeckten und vereinzelter stehenden Behausungen der Shuwa abheben, differenziert werden. Allerdings konnte diese Unterscheidung nicht für das gesamte Untersuchungsgebiet verallgemeinert

werden; ethnische Unterschiede wurden deswegen aus den Luftbildmosaiken nicht systematisch erfasst.

Besonderes Interesse galt Lage und Art aller landwirtschaftlichen Anbauflächen. Deutlich – allerdings weniger durch charakteristische Grautöne als durch ihre anthropogenen klaren Abgrenzungen gegen ihr Umfeld – heben sich die Anbauflächen des Regenzeitanbaus ab. Sie wurden in ihrer Gesamtfläche, nicht als Einzelfelder, kartiert. Schwieriger gestaltete sich die Aufnahme der brachliegenden Anbauflächen. Sie weisen noch stärker als die aktuell genutzten Flächen von Feld zu Feld sehr unterschiedliche Grautöne auf. Über ihre Struktur, vor allem aber durch meist rechteckig homogen gefärbte Formen ohne klaren Kontrast zu ihrer Umgebung und durch stärkeren Bewuchs mit Gehölzen lassen sie sich dennoch in den meisten Fällen sicher kartieren. Entscheidungshilfe gibt zusätzlich die Lage der Brachflächen in Gesellschaft mit aktuellen Anbauflächen in nicht zu großer Entfernung von Siedlungen und Verkehrswegen. Eine zunächst angestrebte Gliederung der ehemaligen Anbauflächen in jüngere und ältere Brachen ließ sich nur in Ausnahmefällen sicher durchführen und wurde deswegen nicht realisiert.

Ergänzend zur Landnutzung wurden naturräumliche Einheiten anhand der Sedimentverteilung sowie der Vegetationsverbreitung ausgegliedert. Die Abgrenzung dieser flächenhaften Elemente gestaltete sich schwierig. Am einfachsten ließen sich die Gewässerflächen aufgrund ihrer typischen, sehr homogenen Grauwerte kartieren. Probleme traten nur auf, wenn Wolken oder Wolkenschatten ähnliche Grauwerte zeigten. Die Differenzierung der unterschiedlichen Sedimente aus den Luftbildmosaiken und Luftbildern erfolgte über unterschiedliche Grautöne. Dabei wiesen generell die fluvialen Ablagerungen die hellsten Farben, die sandigen leicht dunklere und die tonigen die dunkelsten Farben auf. Außerdem sind die Tonflächen homogener und deutlich weniger strukturiert als Sand- und Flußsedimente. Die flächendeckende eindeutige Kartierung stellte sich jedoch als schwierig heraus, da insbesondere die neueren Luftbilder fototechnisch sehr unterschiedlich entwickelt sind und zudem teilweise starke Bewölkung einschließlich Wolkenschatten aufweisen.

Am kritischsten muß die Kartierung der unterschiedlichen Gehölzflächen angesehen werden. Insbesondere die Ausgrenzung von Flächen gleicher Bestandsdichte stellte sich als sehr schwierig heraus, da sehr unterschiedliche Verteilungen im Untersuchungsraum auftraten. Schlecht vergleichbar zeigten sich die Gehölze auf den unterschiedlichen Sedimenten. Zudem war eine Unterscheidung zwischen Sträuchern und Bäumen für eine großflächige Bearbeitung nicht möglich. Dichtere Strauchbedeckung wurde deswegen mit weniger dichter Baumbedeckung gleichgesetzt. Nach Ausweisung der Flächen mit homogener Gehölzdichte wurde eine Dichtebewertung in drei Klassen vorgenommen.

5.4.2 Digitalisierung und Import

Die als Ergebnis der visuellen Auswertung vorliegende Transparentfolie wurde anschließend am A0-Digitalisierbrett digitalisiert. Die Aufnahme der unterschiedlichen Objekte erfolgte in den verschiedenen thematischen Ebenen getrennt nach den unterschiedlichen Attributen. Jede Attributgruppe wurde über die entsprechende Themenebene und innerhalb über eine Kodierung eindeutig definiert. Der eindeutige Raumbezug wurde durch die Übertragung der 4 Eckpunkte aus den Luftbildmosaiken auf die Folie übernommen.

Aus Kapazitätsgründen mußte ein Großteil der Luftbildmosaike mit dem Programm *AtlasGIS* digitalisiert werden. Da die Struktur der geographischen Informationssysteme *AtlasGIS* und *ARC/INFO* sehr unterschiedlich ist und in der Version *AtlasGIS* 3.01 keine direkte Exportfunktion zu *ARC/INFO* 3.5 vorhanden ist, mußten die Daten aufwendig konvertiert werden. Nicht möglich war der Import von Sachdaten. Jede Objektart mußte einzeln selektiert und konvertiert werden (STRATEGIC MAPPING 1992a). Die Konvertierung erfolgte mit Hilfe eines externen Umwandlungsprogramms auf *DOS*-Ebene (STRATEGIC MAPPING 1992b: 5). Die daraus entstandenen Dateien im *BNA*-Format wurden in *ARC/INFO* importiert (ESRI 1990a: *ATLASARC*) und anschließend wieder eindeutig kodiert und zusammengefügt. Mit der Übernahme neuerer Programmversionen haben sich die Dateiformate geändert und die Import- und Exportfunktionen wurden erweitert. Statt der aufwendigen Konvertierung können Dateien nun meist direkt importiert werden, auch das Lesen externer Dateiformate ist möglich.

5.4.3 Transformation, Mosaikierung und Anpassung

Wie auch bei den digitalisierten Karten müssen die in Digitalisierkoordinaten vorliegenden Luftbildmosaikkartierungen auf das gemeinsame Koordinatensystem transformiert werden. Als Bezugspunkte dienen jeweils die 4 Eckpunkte, die auf den Luftbildmosaikern bereits in geographischen Koordinaten angegeben sind. Damit ist außerdem ein paßgenaues Gitternetz für alle der insgesamt 19 bearbeiteten Luftbildmosaiken gegeben. Nach dem Zusammenfügen der 19 einzelnen Luftbildmosaiken stellte sich jedoch heraus, daß eine interne räumliche Übereinstimmung nicht immer gegeben war. An den Rändern traten im Originalmaßstab Versätze bis zu 1 cm auf. Eine Genauigkeitsüberprüfung zeigte, daß die Fehler in dieser Größenordnung bereits in den Originalquellen auf den Luftbildmosaikern und Blaupausen vorhanden waren und nur geringfügig durch ungenaues Zeichnen und Digitalisieren sowie durch Verzug der Folien verstärkt wurden (vgl. Kap. 4.2). Es zeigte sich, daß die nur teilentzerrten Luftbildmosaiken bereits so große Versätze aufweisen, daß eine paßgenaue Überlagerung mit anderen Daten nicht möglich war.

Um dennoch den Vergleich mit anderen Karten zu ermöglichen, wurde eine sehr aufwendige Nachbearbeitung vorgenommen. Dazu wurde mit Hilfe von aus der Satellitenreferenzszenen abgelesenen Paßpunkten durch erneute lineare Transformation versucht, die Luftbildmosaikkartierung auf die anhand von *GPS*-Koordinaten registrierte Referenzsatellitenszene anzupassen (vgl. dazu Kap. 5.6.2). Da es sich in den meisten Fällen um systematische lineare Verschiebungen handelte, konnte durch geeignetes Setzen entsprechend vieler Paßpunkte trotz der großen Maßstabsunterschiede zwischen Referenzsatellitenszene und Luftbildmosaik eine zufriedenstellende Angleichung erfolgen. Für Vergleiche mit anderen großmaßstäbigen Karten und für die Flächenberechnungen wurden die Luftbildkartierungen in die Standardprojektion umgerechnet (vgl. Tab. 8).

5.5 Bearbeitung der Luftbilder

Die älteren Luftbilder von 1957 liegen nur als originale Fotoabzüge vor. Da weitere Befliegungsparameter fehlen, besitzen die Bilder keinen exakten räumlichen Bezug. Vor einer Auswertung muß also zunächst ein Raumbezug hergestellt und damit eine andere Vorgehensweise als bei den Luftbildmosaiken gewählt werden.

5.5.1 Scannen

Für die digitale Bearbeitung der Luftbilder wurden diese zunächst über einen Scanner digitalisiert. Da die Standard-Luftbilder nicht vollständig auf einem A4-Scanner erfasst werden können, muß zunächst der entsprechende Ausschnitt festgelegt werden. Dies ist leicht möglich, denn die stereoskopisch auswertbaren Bilder weisen eine etwa 30%ige Überlappung zwischen den verschiedenen Flugstreifen und sogar eine 50%ige Überlappung zwischen zwei Bildern eines Streifens auf. So wurden die jeweils größtmöglichen zentralen Ausschnitte eines jeden Bildes gescannt. Das hat den Vorteil, daß hier auch die geringsten Verzerrungen aufgrund der zentralperspektivischen Aufnahme vom Flugzeug aus zu verzeichnen sind.

Bereits beim Scannen wurde auf entsprechende Helligkeits- und Kontrasteinstellungen geachtet, da beim Scanvorgang verlorene Information durch die beste Nachbearbeitung nicht mehr zu rekonstruieren ist. Optimalerweise wurde durch manuelle Kontrasteinstellungen versucht, den gesamten Grauwertebereich von 0-255 auszuschöpfen. Insbesondere bei den aktuellen Luftbildern kommt es dabei aber häufig zu übersteuerten Bildbereichen, da einerseits die fototechnische Entwicklung weniger optimal war und andererseits Wolkenbedeckung extreme Werte verursacht. Die Kontrastanpassung innerhalb des Scanprogrammes erwies sich als sehr umständlich, da keine Histogrammfunktionen implementiert sind. Als Skalierung wurde ein Kompromiß zwischen sehr guter Auflösung und nicht handhabbarer Dateigröße mit 600 *dpi* erzielt. Dennoch sind für jeden einzelnen Luftbildausschnitt mit Überlappungen zu den Nachbarbildern zwischen 8 und 10 MB Speicherplatz vorzusehen. Die gescannten Luftbildausschnitte wurden im *TIFF5.0*-Format gespeichert und anschließend direkt in *ERDAS Imagine* importiert.

5.5.2 Relative Entzerrung

Da keine Angaben zu den Aufnahmeparametern der Luftbilder und auch keine photogrammetrischen Programme (bzw. im *ERDAS Imagine* keine entsprechenden Module) zur Verfügung standen, erfolgte die Entzerrung der Luftbilder polynomial relativ auf die bereits über *GPS*-Messungen in geographische Koordinaten registrierte Satelliten-Referenzszene (vgl. Kap. 5.6.2). Diese für Luftbilder ungebräuchliche Vorgehensweise wurde trotz des relativ großen Maßstabsunterschiedes wegen mangelnder Alternativen angewandt. Für das Verfahren spricht, daß einerseits nur die zentralen Ausschnitte der einzelnen Luftbilder verwendet wurden und zum anderen im Untersuchungsgebiet keine größeren Höhenunterschiede zu Verzerrungen beitragen.

Aufgrund der Ähnlichkeit der Daten (*SPOT*-Satellitenszene von Oktober 1995 – Luftbilder von November/Dezember 1990 bzw. Oktober 1957) konnten insbesondere bei den jüngeren Luftbildausschnitten gute Paßpunkte gefunden werden. Probleme traten bei den Luftbildern von 1957 in Gebieten mit geringer anthropogener Überprägung auf.

Insgesamt hat sich herausgestellt, daß eine gleichmäßige Verteilung der zur Entzerrung herangezogenen Punkte über den gesamten Bildausschnitt – insbesondere in den Randbereichen – eine weitaus wichtigere Rolle spielt als eine sehr genaue Lage der Punkte bei den unterschiedlichen Maßstäben der Ausgangs- und Zieldatei. Versuche mit verschiedenen parametrischen Voreinstellungen vor der Entzerrung wurden verworfen, da auch bei dieser Vorgehensweise der Erfolg der Entzerrung sehr stark von der Anzahl, der Qualität und der Verteilung der gewählten Paßpunkte abhängt. Für die Luftbildserie von 1990 konnten pro Luftbildausschnitt jeweils 9 bis 26 eindeutige Paßpunkte markiert und davon wieder zwischen 2 und 4 Punkte verworfen werden. Bei den Bildern von 1957 lag die Anzahl je nach Gebiet nur zwischen 4 und 15, aber meist bei etwa 8 Punkten.

Über den im Entzerrungsprogramm von *ERDAS* angegebenen *RMS (Root Mean Square)* - Fehler kann eine Überprüfung der Qualität der Paßpunkte erfolgen. Neben der Eliminierung von qualitativ geringerwertigen Paßpunkten (es ist zu unterscheiden, ob der Punkt wirklich schlecht gesetzt ist, oder ob die Verzerrung an der entsprechenden Stelle besonders groß ist!) kann über die Wahl der Transformationsparameter Einfluß auf das Entzerrungsergebnis genommen werden. Generell liegt der Gesamt-*RMS*-Fehler bei Transformationen mit Polynomen niedriger Ordnung höher als bei Polynomen höherer Ordnung. Es hat sich aber über die Überprüfung mit Hilfe von unabhängigen Testpunkten herausgestellt, daß eine tatsächliche Verbesserung des Entzerrungsergebnisses über höhere Polynome nur durch entsprechend zahlreichere und gut gesetzte Paßpunkte zu erzielen ist. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit nur linear transformiert. Werden dabei die Paßpunkte gut verteilt positioniert, bietet diese Vorgehensweise ausreichende Genauigkeiten für die angestrebten Verwendungszwecke. Photogrammetrische Messungen sollten anhand der entzerrten Luftbildausschnitte allerdings nicht vorgenommen werden (vgl. *ERDAS* 1997: 314-330).

Nach Evaluierung der Paßpunkte mittels *RMS*-Fehler und evtl. Eliminierung ungenauer Paßpunkte und Festlegung des Transformationsgrades wird die Transformationsgleichung berechnet. Anschließend werden im *Resampling*-Verfahren den einzelnen Bildpunkten im Ergebnisbild neuberechnete Grauwerte zugewiesen. Dabei wurde die Methode der *Cubic Convolution*, bei der die Neuberechnung der Punkte aus den 16 umliegenden Nachbarpixeln exponentiell gemittelt wird, angewandt (vgl. *ERDAS* 1997: 331-340). Diese Vorgehensweise liefert für die visuelle Auswertung die brillantesten Bilder. Die längere Rechenzeit im Verhältnis zu den anderen *Resampling*-Verfahren fällt kaum ins Gewicht. Da nur Dateien gleicher Auflösung miteinander mosaikiert werden können, muß auf eine einheitliche Pixelgröße geachtet werden. Um die hohe Auflösung des Scanvorganges für die Auswertung zu erhalten, wurde eine quadratische Bildpunktgröße von $0,00001842^\circ$ angegeben. Dies entspricht einer Pixelgröße von ca. 2x2 m.

5.5.3 Kontrastverbesserung und -anpassung, Mosaikierung

Vor der Mosaikierung der einzelnen entzerrten Luftbildausschnitte zu einem Gesamtbild wurde versucht, die einzelnen Bilder bezüglich des Kontrastes anzupassen. Dabei hat sich herausgestellt, daß automatische Kontrastanpassungsverfahren wenig geeignet sind, die verschiedenen Ausschnitte aneinander anzugleichen. Deswegen erfolgte für alle Bildausschnitte einzeln eine manuelle Kontrast- und Helligkeitseinstellung. Relativ wenig Aufwand erforderte die Anpassung der älteren Luftbilder, die keine größeren Kontrastschwankungen aufwiesen. Besonders schwierig war dagegen die Angleichung der Luftbilder von 1990. Extreme Kontraste in einigen Bildbereichen ermöglichten nur eine sehr grobe Anpassung der Ausschnitte. Bei der Interpretation und insbesondere bei einer automatischen Auswertung der Bilder muß dies beachtet werden (vgl. Kap. 5.5.4).

Beim Mosaikieren wurde versucht, durch geeignete Reihenfolge der Ausschnitte und durch sinnvolles Ausschneiden bewölkter und beschatteter Bereiche eine optimale Abbildung der Landschaft zu erzielen. Da im Mosaikier-Modul der *ERDAS Imagine*-Version 8.2 noch keine Möglichkeiten für unregelmäßiges Ausschneiden und Anpassen einzelner Ausschnitte bestanden, gestaltete sich dieser Prozeß sehr zeitaufwendig und unkomfortabel. Eine Bearbeitung ab der Version 8.3 hätte eine deutlich einfachere Handhabung und damit besser angepaßte Mosaikie ermöglicht.

5.5.4 Versuche digitaler Bildverarbeitung der panchromatischen Daten

Der größte Vorteil digital vorliegender Daten besteht in der Möglichkeit, automatische oder teilweise automatisierte Auswertungsverfahren anwenden zu können. Nachdem geeignete Verfahren ausgewählt und getestet sind, können größere Bereiche nach gleichen Methoden und objektiv nachvollziehbaren Kriterien bearbeitet werden. Neben dem damit geringeren Aufwand vermindern sich auch Einflüsse durch subjektive Entscheidungen bei der visuellen Auswertung.

Für die Interpretation von Landschaftszuständen wurden anhand von Ausschnitten der Luftbilder von 1957 und 1990 einfache unüberwachte Klassifizierungsverfahren getestet. Zur Erfassung von Veränderungen fanden verschiedene Darstellungsverfahren (z. B. unterschiedliche Farbzweisungen der einzelnen Zeitpunkte, die eine Hervorhebung von Bereichen starker zeitlicher Veränderungen ermöglichen) wie auch unterschiedliche Ratio-Bildungen Anwendung (vgl. detailliertere Beschreibung der digitalen Bildverarbeitung für die Satellitendaten in Kap. 5.6.4).

Wie sich bereits bei der Herstellung und Anpassung der Mosaikie aus den Einzelluftbildern (Kap. 5.5.3) und den auf Basis der Luftbildmosaikie erfolgten visuellen Auswertungen gezeigt hat, weisen insbesondere die jüngeren Luftbilddaten Eigenschaften auf, die eine automatische Vorgehensweise sehr erschweren. Vor allem die unterschiedlichen Darstellungsverfahren ermöglichen zwar eine Hervorhebung von Gebieten großer Veränderungen, geben aber keine Hilfestellung für die inhaltliche Interpretation. Aus diesem Grund wurden für die Interpretation der panchromatischen Luftbilddaten keine systematischen automatischen Verfah-

ren angewandt. Lediglich bei Unklarheiten konnte zusätzlich auf die beschriebenen Darstellungen zurückgegriffen werden.

Als eine vielversprechende Vorbereitung für die visuelle Interpretation hat sich die Kombination von räumlich hochauflösenden panchromatischen mit spektral hochauflösenden Daten gezeigt. Die in *ERDAS Imagine* implementierte Funktion *Resolution Merge* (vgl. ERDAS 1997: 149f) bietet zwei der zahlreichen möglichen Verfahren an. Die Kombination aus hochaufgelöster räumlicher Information der Luftbilder von 1990 mit der Spektralinformation des multispektralen *SPOT*-Satellitendatensatzes liefert sehr scharfe und detailgenaue informationsreiche Farbbilder. Da allerdings die Aufnahmezeitpunkte beider Datengrundlagen nicht übereinstimmen, wird die Interpretation durch zeitliche Unstimmigkeiten erschwert.

5.5.5 Visuelle Auswertung mittels Bildschirmdigitalisierung und Attributierung

Die Erfassung der in den Luftbildern abgebildeten Landbedeckungs- und Landnutzungseinheiten erfolgte analog den Beschreibungen zur Auswertung der Luftbildmosaiken (vgl. Kap. 5.4.1 bis 5.4.2). Das digitale Vorliegen der Luftbildausschnitte ermöglicht allerdings die direkte digitale Erfassung am Bildschirm. Als vorteilhaft stellte sich dabei das beliebige Wechseln der Ausschnitte und Vergrößerungsstufen heraus. Außerdem konnten die für die jeweilige Kartierung besten Bildschirmdarstellungen verwendet werden.

Bei Unklarheiten konnte auf die stereoskopische Betrachtungsweise der Original-Abzüge zurückgegriffen werden. Die Attributierung erfolgte direkt mit der Eingabe ähnlich wie bei den Luftbildmosaikern. Neben einer genaueren Erfassung war diese Methode auch wesentlich weniger zeitaufwendig. Zudem lagen die Kartierungen gleich im richtigen Bezugssystem vor und mußten nicht mehr nachträglich angepaßt werden. Ein Vergleich mit den Satellitenbildern zeigte befriedigende Genauigkeiten (vgl. Kap. 7.2.3).

5.6 Bearbeitung der Satellitendaten

Satellitendaten sind neben den wenigen digitalen Karten die einzigen direkt digital vorliegenden Daten. Für die Auswertung müssen die Daten jedoch zunächst aufbereitet werden. Neben diesen unabdingbaren Einlese- und Vorverarbeitungsverfahren, nach denen bereits eine visuelle Auswertung erfolgen kann, bietet die digitale Bildverarbeitung ein sehr breites Spektrum an Optimierungs- und Prozessierungsmöglichkeiten. In diesem Kapitel wird zunächst die Vorverarbeitung der Daten, anschließend die visuelle Auswertung beschrieben, um dann auf die wichtigsten der verwendeten automatischen Prozessierungsverfahren einzugehen.

5.6.1 Einlesen und Aufbereitung

Die neueren Satellitendaten (ab 1995) wurden auf *CD-ROM* geliefert und lassen sich direkt durch automatische Routinen in *ERDAS-Imagine* einlesen. Die älteren *Landsat*- und *SPOT*-Szenen liegen auf *CCT*-Bändern vor. Existieren entsprechende Formatbeschreibungen, können die Bänder über das Bandlesegerät entweder automatisch oder etwas aufwendiger

über manuelle Eingabe eingelesen werden. Insbesondere das Einlesen der ältesten *MSS*-Szenen, die zum Teil keine Dokumentation beinhalten, gestaltete sich äußerst schwierig. Dazu mußte zudem auf eine ältere *ERDAS*-Version (7.5) zurückgegriffen werden.

Während mit den *Landsat-TM*- und *SPOT*-Daten direkt nach dem Einlesevorgang weitergearbeitet werden konnte, mußten insbesondere die sehr alten *Landsat-MSS*-Daten weiteren Vorverarbeitungsschritten unterzogen werden. Über die *Deskew*-Routine (vgl. *ERDAS* 1991: 33f) wurde der Einfluß der Erdrotation während des Satellitenüberfluges ausgeglichen. Zudem wurden die zunächst rechteckigen Aufnahmeflächen auf quadratische Bildpunkte umgerechnet (vgl. Kap. 4.4.1).

Besonders die alten *MSS*-, aber auch die *TM*-Daten weisen aufnahmebedingte Störungen auf. Meistens treten durch ungenaue Sensorkalibrierung regelmäßige Streifen, Versätze sowie Fehlzeilen auf. Soweit möglich wurden diese Beeinträchtigungen durch bereits in *ERDAS Imagine* implementierte Lösungen (vgl. z. B. *Striping* und *Line Dropout*, *ERDAS* 1997: 129f) oder aber durch einfaches Ersetzen der fehlerhaften Abschnitte durch umliegende Bildwerte oder durch Mittelwertbildung behoben.

Für den Vergleich und die Interpretation aller hier verwendeten Satellitendaten ist zu beachten, daß die vom Sensor gemessenen Strahlungsintensitäten keine absoluten Reflexionswerte der Erdoberfläche darstellen (vgl. Kap. 4.4). Für die Ableitung absoluter Strahlungswerte wären aufwendige radiometrische Korrekturen nötig, für die wiederum genaue Parameter der Aufnahmesituation sowie Sensoreinstellungen berücksichtigt werden müßten (vgl. z. B. HILL & STURM 1991). Annähernde Korrekturen des Atmosphäreneinflusses werden häufig über den Vergleich unveränderlicher Flächen wie z. B. Wasserflächen innerhalb des Untersuchungsgebietes vorgenommen (z. B. LO et al. 1986: 536). Da im vorliegenden Fall aber keine größeren homogenen und unveränderlichen Flächen über das Untersuchungsgebiet verteilt auftreten, mußte auf eine radiometrische Korrektur verzichtet werden.

5.6.2 Georeferenzierung

Der größte Aufwand unter den Schritten der Datenvorverarbeitung mußte für den Aufbau eines einheitlichen räumlichen Bezugssystems betrieben werden. Da keine geeigneten Raumbezugsquellen vorlagen, wurde auf ein selbstdefiniertes System bzw. auf die Verwendung von geographischen Längen- und Breitengraden zurückgegriffen. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, daß Bezugspunkte direkt gemessen und aufgenommen werden konnten (vgl. Kap. 5.2.3 und ausführlicher zur Vorgehensweise *ERDAS* 1997: 307ff).

Die räumliche Anpassung der Satellitenszenen wie auch der Luftbilder und Luftbildmosaike erfolgte über relative Entzerrung auf eine Referenz-Satellitenszene. Als Referenz wurde die *SPOT*-Szene vom Oktober 1995 ausgewählt. Sie vereint vorteilhaft eine hohe räumliche Auflösung und eine aktuelle Abbildung der Landschaft. Außerdem fand die Aufnahme genau zu der Zeit statt, zu der auch die Positionsbestimmungen im Gelände durchgeführt wurden. Die absolute Entzerrung der Referenz-Szene erfolgte mit Hilfe von 37 Paßpunkten, die aus einer deutlich größeren Anzahl von Positionen ausgewählt wurden.

Da Fehler bei der Bestimmung (vgl. Kap. 7.2.3) und Festlegung von Paßpunkten auch bei sorgfältigster Arbeitsweise unvermeidbar sind, empfiehlt es sich, möglichst viele Punkte, mehr als für die anschließende Transformation nötig sind, zu bestimmen. Meßfehler bei der Positionsbestimmung im Gelände und bei der Paßpunktmarkierung aufgetretene Fehler können so minimiert und durch die Verwendung von Ausgleichsrechnungen aufgedeckt werden (vgl. ERDAS 1997: 314). Nach genauer Prüfung wurden 4 Punkte mit hohen *RMS*-Fehlern eliminiert und eine Transformation mit einem Interpolationspolynom erster Ordnung (ERDAS 1997: 320ff, vgl. auch Kap. 5.5.2) gerechnet. Aus der Ausgleichsrechnung ergibt sich ein *RMS*-Gesamtfehler von 2,3 Bildpunkten in Zeilen- und von 1,6 Punkten in Spaltenrichtung. Daraus läßt sich ein allgemeiner Lagefehler von 2,8 Bildpunkten und entsprechend der 20 m Auflösung des *SPOT*-Sensors von 57 m ableiten.

Die Größe des allgemeinen Lagefehlers ist im Kontext der Genauigkeitsüberlegungen zu sehen. Da bereits für die Postitionsbestimmung im Gelände höhere Fehler angegeben wurden (vgl. Kap. 7.2.3), kann die absolute Entzerrung des Satellitenbildes auf Grundlage dieser Daten keine höheren absoluten Genauigkeiten liefern. Da wiederum nur ein relativer Vergleich von Landschafts- und Landnutzungseinheiten angestrebt wird, spielen die absoluten Genauigkeiten nur eine sehr untergeordnete Rolle. Sie treten dann in den Vordergrund, wenn exakte absolute Positionsbestimmungen oder geodätische Messungen vorgenommen werden sollen.

Um dennoch eine von den *GPS*-Messungen unabhängige Genauigkeitsabschätzung – also ohne sogenannte *Check*-Punkte – vornehmen zu können, wurde die Entzerrungsgüte der Satellitenszene an den vorhandenen Karten im Maßstab 1 : 50 000 gemessen. Dazu wurden 5 verschiedene Punkte auf unterschiedlichen Kartenblättern zum einen auf der topographischen Karte (FEDERAL SURVEY, Kartenverzeichnis) und zum anderen auf der Karte der LAKE CHAD BASIN COMMISSION ausgemessen und deren Lage aus dem Satellitenbild abgelesen. Der Vergleich dieser Lagekoordinaten ergab ein interessantes Ergebnis: In 4 von 5 Fällen liegen die Werte des entzerrten Satellitenbildes für die geographische Breite zwischen den Werten der *Federal Survey*- und der *Lake Chad Basin Commission*-Karte und in einem Fall um eine Sekunde darüber. Für die geographische Länge liegen die Satelliten-szenenwerte in zwei Fällen zwischen, in einem Fall um eine Sekunde und einem anderen um eine Zehntelsekunde neben den Kartenwerten sowie in einem Fall genau bei den Werten der Karte. Dabei ist zu beachten, daß die beiden Karten in der geographischen Länge um bis zu 3 und bei der Breite sogar bis über 6 Sekunden voneinander abweichen. Eine exakte Abschätzung der Genauigkeit ist somit nicht durchführbar, da keine Information über eine genaue Kartengrundlage vorliegt. Die Entzerrungsgüte liegt auf jeden Fall im Rahmen der Genauigkeiten der vorhandenen Karten, bietet eine gute Grundlage als relative Referenzszenen für die anderen Fernerkundungsdaten und kann auch für einen Vergleich mit dem Kartenmaterial im Maßstab 1 : 50 000 herangezogen werden.

Nach diesen Genauigkeitsüberlegungen wurden zunächst die anderen *SPOT*-Satellitenszenen relativ auf die Referenz entzerrt. Wie bei der Referenzszenen wurde dabei mit einem Polynom 1. Ordnung auf eine Pixelgröße von 20x20 m transformiert und mit dem *Nearest Neighbour*-Verfahren *resampelt* (vgl. ERDAS 1997: 331). Bei dieser Vorgehensweise werden die Pixelwerte nicht verändert bzw. es entstehen keine neuen zusätzlichen Werte wie es bei anderen Verfahren der Fall ist. Dies erschien sinnvoll, da die Satellitenszenen – im

Gegensatz zu den Luftbildern, die nur visuell interpretiert wurden – auch automatisch verarbeitet werden sollten. Für die *SPOT*-Szenen stellte sich aufgrund der schon vor der Lieferung stattgefundenen Prozessierung (*Level 1B*), wegen der gleichen räumlichen Lage (bis auf die 1986er Szene) und der nur geringen zeitlichen Abweichung von vornherein eine recht hohe geometrische Übereinstimmung heraus. Für den ca. 60x60 km großen Ausschnitt konnten jeweils zwischen 39 und 51 Paßpunkte bestimmt werden. Bei der Transformation traten in allen Fällen Fehler unter einem Pixel auf.

Schwieriger gestaltete sich die Entzerrung der flächenmäßig größeren, aber räumlich geringer aufgelösten *Landsat-TM*-Szenen. Zunächst wurde die Aufnahme von 1992 auf die Referenz-*SPOT*-Szene entzerrt. Dafür wurden Punkte für den Ausschnitt, den beide Satellitenszenen abdecken, festgelegt und zusätzlich Punkte aus den *GPS*-Messungen für den Bereich, den die Referenz-Szene nicht abdeckt, hinzugenommen. Für die Gesamtfläche von ca. 185x185 km wurden auf diese Weise 100 Punkte festgelegt, 8 davon wieder eliminiert und mit einem Gesamtlagefehler von 0,5 Pixeln, also 15 m, auf eine Bildpunktgröße von 30 m transformiert. Die Lagegenauigkeit ist in dem Bereich, den auch die Referenz-Szene abdeckt, deutlich höher als außerhalb. Das liegt vor allem in der Tatsache begründet, daß in den äußeren Bereichen bedeutend weniger bzw. in den Gebieten außerhalb Nigerias und in den unzugänglichen Bereichen des Tschadsees überhaupt keine Paßpunkte vermessen werden konnten.

Auf die nun in geographischen Koordinaten vorliegende Szene konnte die *TM*-Szene des gleichen Ausschnittes von 1988 angeglichen werden. Hier lag unter Verwendung von 94 Punkten, von denen 6 wieder eliminiert wurden, der Gesamtlagefehler bei etwas mehr als einem halben Pixel.

Die räumlich südlich anschließenden *TM*-Satellitenszenen mit der *WRS*-Nummer 185/52 konnten nur in einem kleinen Überlappungsbereich im Norden relativ auf die oben beschriebenen Szenen entzerrt werden. Für den größeren südlichen Anschlußbereich mußte auf Positionsangaben aus der Topographischen Karte zurückgegriffen werden. Diese Bereiche werden allerdings nur für Übersichtszwecke verwendet und finden keinen Eingang in die detaillierteren Untersuchungen.

Als letztes mußten die *MSS*-Szenen auf die gemeinsame räumliche Basis angepaßt werden. Das Vorgehen wurde durch den größeren Aufnahmezeitunterschied und die geringere räumliche Auflösung nochmals deutlich erschwert. Deswegen wurde zunächst die *MSS*-Szene von 1979 auf die bereits registrierte *TM*-Szene von 1992 entzerrt und alle weiteren *MSS*-Szenen dann auf die so entstandene *MSS*-Referenzszene angepaßt. Dabei konnte im ersten Fall eine Genauigkeit von etwas mehr als einem und in den anschließenden Entzerrungen von im Durchschnitt einem Pixel (60 m) erzielt werden. Als gemeinsame Pixelgröße wurde 60x60 m angegeben.

Mit der Georeferenzierung liegen alle in die Untersuchung einbezogenen Fernerkundungsdaten in einem einheitlichen Bezugssystem - hier zunächst in geographischer Länge und Breite mit *WGS 84*-Spheroid vor. Das *World Geodetic System 1984* hat sich als Referenzsystem insofern angeboten, als es meist für die *GPS*-Messungen in Längen- und Breitenangaben, aber auch von der *NASA* für Satellitenanwendungen (vgl. *ERDAS 1997*: 418 und

427f) benutzt wird. So entfallen zusätzliche Umrechnungsschritte vor der Interpretation. Für weitere Auswertungs- und Darstellungsschritte insbesondere in Zusammenhang mit den verschiedenen Vektordaten müssen die Original- oder Ergebnisrasterdaten projiziert werden (vgl. dazu Kap. 5.3.2 und 5.7.2.4). Daten des gleichen Bezugssystems können temporär beliebig miteinander verknüpft dargestellt und ausgewertet werden. Eine dauerhafte räumliche Verknüpfung wird durch Mosaikieren hergestellt (vgl. Mosaikierung von Luftbildern in Kap. 5.5.3). Beispiele zusammengesetzter Satellitenszenen finden sich in Abb. 3 für zwei *Landsat-TM*-Szenen und in Abb. 35 für Ausschnitte aus drei verschiedenen *SPOT*-Szenen.

5.6.3 Visuelle Auswertung

Den ersten und häufig sogar einzigen Schritt bei der Interpretation von Fernerkundungsdaten stellt die visuelle Auswertung dar. Eng verbunden mit der visuellen Auswertung ist die Beurteilung der Originaldaten auf Grundlage statistischer Analysen, die ebenfalls in diesem Unterkapitel angesprochen wird. Neben einer allgemeinen Einschätzung der Daten liefern die zu beschreibenden statistischen Parameter auch die Grundlage für unterschiedliche Operationen der digitalen Bildverarbeitung (vgl. Kap. 5.6.4).

5.6.3.1 Darstellung und Bildverbesserung

Die Darstellung von Satellitenszenen am Bildschirm und die sich daraus ableitenden Interpretationsmöglichkeiten sind sehr vielseitig. Die einfachste Abbildung der in den Satellitenszenen registrierten Strahlungsintensität der Erdoberfläche entspricht dem einkanaligen Grauwertbild. Je nach radiometrischer Auflösung (256 Graustufen bei *SPOT* und *Landsat-TM* bzw. 128 Graustufen bei *Landsat-MSS* und dem Thermalkanal von *TM*) erfolgt die Bildschirmdarstellung in bis zu 256 verschiedenen Grautönen, wobei dem Wert 0 schwarz, dem Wert 255 weiß und den dazwischenliegenden Werten entsprechende Graustufen zugeordnet werden. Geringe Strahlungsintensitäten erscheinen somit in dunklen und hohe Intensitäten in hellen Tönen. Da in den meisten Fällen bei der Aufnahme nicht alle möglichen Grauwerte ausgeschöpft werden, lassen sich zur Darstellung kontrastreicherer Bilder unterschiedliche Bildverbesserungsverfahren anwenden. Für die hier verwendeten Abbildungen wurden hauptsächlich lineare Kontraststreckung bis zur zweifachen Standardabweichung, in Einzelfällen ein Histogrammausgleich oder *Level Slice Stretch* genutzt (ERDAS 1997: 133-136; RICHARDS & JIA 1999: 90ff).

Informationsreichere – sehr komplexe Darstellungen – ergeben sich aus der Kombination von bis zu drei Spektralkanälen in einem Farbkomposit nach dem RGB-System (ERDAS 1997: 99). Analog zur Kombination von bis zu drei Spektralkanälen lassen sich innerhalb des gleichen geographischen Bezugssystems auch verschiedene Kanäle unterschiedlicher Zeitpunkte oder Sensoren darstellen. Durch die Zuweisung einzelner originaler Spektralkanäle verschiedener Zeitpunkte auf jeweils eine RGB-Bildschirmfarbe lassen sich zeitliche Veränderungen visualisieren, aber auch Rückschlüsse aus den Farbwerten auf die entsprechend reflektierenden Objekte ziehen. Die verschiedenen Spektralkanäle – auch verschiedener Sensoren – eignen sich unterschiedlich gut für Multitemporalkombinationen. Generell sind die Kanäle aus dem sichtbaren Spektralbereich untereinander sehr ähnlich, während Kanäle aus dem Infrarot stärker auf Feuchtigkeitsschwankungen oder z. B. Brandeinflüsse reagieren. Die Rückstrahlung in den längeren Wellenlängenbereichen zeigt meist auch Einflüsse

des Untergrundes, erschwert aber dadurch auch die Interpretation. Die Darstellungsmöglichkeiten vervielfältigen sich weiterhin durch die Überlagerung mehrerer Farbkomposite mit Vektordaten.

5.6.3.2 Statistische Analysen

Zur Beurteilung des Informationsgehaltes von Satellitenszenen können statistische Parameter der einzelnen Spektralkanäle herangezogen werden. Histogramme geben ein umfassendes Bild über die Grauwertverteilung in verschiedenen Spektralkanälen zu verschiedenen Zeitpunkten. Einzelne daraus abgeleitete Parameter wie Minimal-, Maximal- und Mittelwerte sowie Standardabweichung und Varianz charakterisieren den Bildinhalt und geben Anhaltspunkte für die Interpretation. Unter Anwendung dieser einfachen Bildparameter arbeiten die meisten der Bildoptimierungen für die Darstellung (vgl. 5.6.3.1).

Die Beziehung zweier Spektralkanäle eines Bildes zueinander läßt sich im zweidimensionalen Merkmalsraum visuell über sogenannte *Feature Space Images* (ERDAS 1997: 454) untersuchen. Annähernd linear verlaufende Grauwertverteilungen weisen dabei hohe Korrelationen im bivariaten Merkmalsraum auf. Multivariate Verteilungen lassen sich nicht umfassend visuell betrachten, aber mit Hilfe von Kovarianzen, Kovarianzmatrizen und Korrelationskoeffizienten beschreiben und beurteilen (ERDAS 1997: 446ff; ausführlicher in BAHRENBURG et al. 1992). Die Berechnung und Darstellung dieser nicht direkt im Bildverarbeitungsprogramm implementierten Funktionen erfolgte über einfache graphisch erstellte Modelle im ERDAS *Image Model Maker* (ERDAS 1997: 367f).

Eine größere Bedeutung erlangen die statistischen Analysen im Rahmen der digitalen Weiterverarbeitung der Daten. Kovarianzen und Korrelationskoeffizienten z. B. stellen die Grundlage für die komplexeren Bildoptimierungs- und Auswerteverfahren dar (z. B. Hauptkomponentenanalyse) und werden dann auch für Teilbereiche der Szenen relevant (z. B. bei der Trainingsgebietsauswahl für überwachte Klassifizierungen – vgl. Kap. 5.6.5, oder für selektive Hauptkomponenten – vgl. Kap. 5.6.4.2). Aufgegriffen werden diese Verfahren bei der Ergebnisdarstellung in Kap. 6.2 und 6.3.

5.6.4 Digitale Bildverarbeitung

Unzählige Verfahren der rechnerischen Weiterverarbeitung und Umwandlung digital vorliegender Bilder zum Zweck der Bildoptimierung sind entwickelt und ausführlich beschrieben worden (u. a. SWAIN & DAVIS 1978; BÄHR & VÖGTLE 1991; HABERÄCKER 1991; RICHARDS & JIA 1999). Im folgenden werden nur die für das Verständnis der Auswertungen unabdingbar wichtigen Verfahrensschritte kurz dargelegt. Eine Zusammenfassung über die verwendeten Verfahren bzw. die in die Auswertung eingegangenen Daten und transformierten Daten einschließlich Bewertung liefert Tab. 10 in der Diskussion am Ende dieser Arbeit (Kap. 7.2.2). Ausführlichere speziell auf das verwendete Programmsystem ausgerichtete Informationen zu den einzelnen Funktionen lassen sich im ERDAS *Field Guide* nachvollziehen (ERDAS 1997).

5.6.4.1 Ratios, Indizes, Differenzen

Zwei Hauptüberlegungen spielen für den Einsatz von zusätzlich rechnerisch erstellten Bildkanälen eine Rolle: Zum einen werden je nach Berechnungsverfahren und Eingabekanälen unterschiedliche Aspekte der einzelnen Szenen hervorgehoben. Diese Betonungen bestimmter Bildinhalte können im Idealfall sowohl für die visuelle Interpretation als auch für die Klassifizierungsverfahren einen hohen Informationsgewinn darstellen. Zum anderen enthalten insbesondere multitemporale Satellitendatensätze fast immer hochkorrelierte Spektralkanäle (vgl. Kap. 5.6.3.2). Durch die unterschiedlichen Transformationen einzelner oder mehrerer Kanäle können häufig redundante bzw. störende Bildinhalte unterdrückt bzw. eliminiert werden (ERDAS 1997: 152).

Das größte Problem in diesem Zusammenhang besteht allerdings darin, daß die Ergebnisse der Transformationen stark abhängig vom jeweiligen Bildinhalt sind und sich damit nur sehr schwer generell geeignete und übertragbare Verfahren festlegen lassen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zahlreiche Vorgehensweisen getestet. Ihr Nutzen kann und muss immer in engem Zusammenhang mit der Fragestellung bewertet werden. Nur die wenigsten der sehr unterschiedlichen Ergebnisse zeigen allgemeine Verbesserungen für die Darstellung und Auswertung. In vielen Fällen erscheinen lediglich ausgewählte Objekte oder Objektgruppen optimiert (vgl. Zusammenstellung der Verfahren allgemein in Tab. 10 und zu den Auswertungen z. B. Kap. 6.2.2).

Einfachste Transformationen originaler Satellitenszenen lassen sich aus der Ratiobildung einzelner Kanäle gewinnen. Ratios werden unterschiedlich definiert. Im engeren Sinne gehören nur Divisionen zweier Kanäle, im weiteren auch kompliziertere Operationen dazu. So kann insbesondere für mehr als dreikanalige Bilder die Information auf die darstellbaren Kanäle konzentriert werden. Außerdem können auf diese Weise Störeinflüsse wie z. B. Dunst oder Beleuchtungseffekte, die in beiden Kanälen Einfluß zeigen, reduziert und gewünschte Information hervorgehoben werden. Basierend auf diesen Überlegungen wurden die unterschiedlichsten Ratios entwickelt und Zusammenhänge getestet. Für *Landsat-TM* ist in *ERDAS Imagine* neben unterschiedlichsten Gesteinsindizes auch ein Tonmineralindex, der sich aus dem Ratio der beiden mittleren Infrarotkanäle berechnet (vgl. ERDAS 1997: 9ff und 164), implementiert.

Die häufigste Anwendung finden Ratios bei der Berechnung von sogenannten Vegetationsindizes. Sie stellen alle unterschiedliche Kombinationen aus Differenzen bzw. Summen und/oder Quotienten des sichtbaren roten und des nahen infraroten Spektralkanals dar. Die Vegetationsindizes sind zunächst einkanalige Grauwertbilder, die nach zahlreichen Untersuchungen mit Vegetations- und Pflanzeigenschaften, wie Biomassenanteil, prozentuale Bodenbedeckung und Blattflächenindex, hoch korreliert sind (vgl. u. v. a. COLWELL 1983b: 2150ff; TUCKER 1979 oder Zusammenstellung für Sahel in CSAPLOVIC 1992: 69f). Eine anschließende Farbkodierung von bestimmten Grauwertbereichen führt zu einem aussagekräftigen Bild.

In ERDAS *Imagine* sind fünf verschiedene Vegetationsindizes direkt integriert (ERDAS 1997: 164). Anhand von Beispielberechnungen für die verschiedenen verwendeten Sensorsysteme wurden die verschiedenen Formen der Vegetationsindizes miteinander verglichen und ihre Aussagekraft hinsichtlich verschiedener Objektklassen bewertet. Dabei hat sich herausgestellt, daß alle getesteten Vegetationsindizes im visuellen und statistischen Vergleich sehr ähnliche Ergebnisse liefern. Unterschiede treten hauptsächlich im Wertebereich und nur geringfügig in der Werteverteilung auf. Während zum Beispiel der einfache Vegetationsindex (nahes Infrarot / Rot) eine etwas höhere Differenzierung im mittleren Histogrammbereich aufweist, zeichnet sich der *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)* (nahes Infrarot - Rot / nahes Infrarot + Rot) durch eine insgesamt höhere Varianz aus. Letzterer bildet zudem Brand- und Wasserflächen deutlicher ab und wird allgemein am häufigsten verwendet. Aus diesen Gründen wurde für die weiterführenden Interpretations- und Verarbeitungsschritte nur der *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)* verwendet. LYON et al. (1998) kamen in ihren Untersuchungen zu Kartierungen von Veränderungen mit Vegetationsindizes zu dem Ergebnis, daß der *NDVI* unter allen getesteten die besten Ergebnisse zeigt. Sie zitieren auch die wichtigsten Arbeiten zu Vegetationsindizes.

Aus den jeweils einkanaligen Vegetationsindizes lassen sich wiederum multitemporale Kombinationen darstellen. Ergänzend zu den aus drei Kanälen unterschiedlicher Zeitpunkte zusammengesetzten Multitemporal-Kombinationen, die für die visuellen Auswertungen eine entscheidende Rolle spielen, lassen sich insbesondere über Differenzberechnungen neue transformierte Kanäle erstellen, die implizit Informationen über zeitliche Veränderungen enthalten. Sinnvollerweise kombiniert man dabei Kanäle des gleichen Spektralbereiches, um Rückschlüsse auf das Reflexionsverhalten ziehen zu können. Zu- oder Abnahmen der Rückstrahlung unterschiedlicher Objekte zu unterschiedlichen Zeitpunkten können so aufgedeckt werden, die Interpretation ist für viele Objektklassen allerdings sehr komplex. Führt man die Differenzbildungen mit vorher berechneten Vegetationsindizes durch, erleichtert sich dank der Normierung dieser Werte die Interpretation deutlich. Zu betonen ist jedoch nochmals: die Anwendung aller hier beschriebenen mathematischen Operationen beruht auf radiometrisch unkorrigierten Satellitenszenen; dies ist bei der anschließenden Interpretation unbedingt zu berücksichtigen. Die unterschiedlichen Aufnahmeparameter lassen trotz Normierung über Indizes eindeutige Wertungen nur eingeschränkt zu.

5.6.4.2 Hauptkomponenten

Ein weiteres insbesondere für mehrkanalige Daten sinnvoll verwendbares Bildoptimierungsverfahren ist die Hauptkomponentenanalyse. Für multitemporale Daten ist sie ein geeignetes Mittel der Datenreduktion, aber auch der Betonung bestimmter Bildinformationen, z. B. zeitlicher Veränderungen. Am wirkungsvollsten erfolgt die Unterdrückung redundanter Information, wenn die Eingangsdaten hoch korreliert sind (vgl. Kap. 5.6.3.2). Die Berechnung der Hauptkomponenten erfolgt über die Kalkulation der Kovarianzmatrix aller Eingabekanäle und daraus anschließend der Eigenwerte und Eigenvektoren (HABERÄCKER 1991: 224).

Graphisch entspricht die Hauptkomponententransformation einer Drehung des Koordinatensystems des Merkmalsraumes derart, daß die erste Achse in Richtung der größten Varianz und die zweite Achse senkrecht dazu die nächst größere Streuung aufweist. Die Eigenwerte spiegeln dabei über die Varianz den Informationsgehalt der Hauptkomponenten wider, während die Eigenvektoren die Achsen der größten Varianz markieren. Klarzustellen ist, daß nach der Umordnung der Information keine Rückschlüsse auf das Reflexionsverhalten der abgebildeten Objekte mehr gezogen werden können (BAHRENBERG et al. 1992: 214; HABERÄCKER 1991: 224; RICHARDS & JIA 1999: 138; ERDAS 1997: 152ff).

Die Beurteilung der Hauptkomponentenbilder läßt sich über die Bildschirmdarstellung und den Vergleich der einzelnen Grauwertbilder untereinander realisieren. Zusätzliche Angaben über den Informationsgehalt der Komponenten liefern die jeweiligen Eigenwerte und über die Herkunft der Information die Eigenvektoren. In einem anschließenden Schritt lassen sich die für die Aufgabenstellung unwichtigen Kanäle eliminieren bzw. die relevanten Kanäle extrahieren und gegebenenfalls zu Farbkompositen beliebig kombinieren.

Für multitemporale Datensätze lassen sich Hauptkomponenten aus den Kanälen der Einzeltermine oder aus der Gesamtheit der Kanäle aller Termine bilden. Weitere Differenzierungen, die insbesondere bei sehr spezialisierten Fragestellungen günstig erscheinen, ergeben sich, wenn Hauptkomponentenberechnungen sich nur auf ausgewählte Bildbereiche und deren statistische Parameter beziehen (vgl. z. B. FRANKE 1994: 46ff). Da im vorliegenden Fall das gesamte sehr breite Spektrum von Landschafts- und Landnutzungseinheiten erfasst werden soll, erschien letztere Anwendung wenig sinnvoll. Ein weiterer Grund für die Nichtberücksichtigung selektiver Hauptkomponenten lag in der nur geringen methodischen Übertragbarkeit der angewandten Verfahren.

5.6.5 Digitale Klassifizierungen

Das Erkennen von Mustern und die darauf basierende Segmentierung von Fernerkundungsdaten ist der wohl bedeutendste, wenngleich komplexeste Anwendungsbereich digitaler Bildverarbeitung. Zahlreiche Schriften beschäftigen sich mit diesem Thema. Als hervorragende detaillierte Ausführungen zu Klassifizierungen seien hier nur SWAIN & DAVIS 1978: 136ff; RICHARDS & JIA 1999: 173ff sowie ERDAS 1997: 213ff für spezielle Angaben zu Klassifizierungen mit *ERDAS Imagine* genannt. Die für die Beurteilung der Ergebnisse wichtigsten Grundlagen der verwendeten Verfahren sind im Anschluss kurz zusammengefaßt.

5.6.5.1 Klassifizierungsansätze und Zuweisungsregeln

Grundsätzlich werden zwei rechnergestützte Klassifizierungsansätze unterschieden. Überwachte Klassifizierungen erfordern Vorinformation über die zu unterscheidenden Objekte. Dieses in Form von spektralen Merkmalen (Signaturen) ausgedrückte a priori-Wissen wird zunächst aus sogenannten Trainingsgebieten (vgl. die dafür aufgenommenen Vergleichsflächen in Kap. 5.2.3.2) über deren Spektraleigenschaften ermittelt. Anschließend erfolgt, auf Grundlage der in den Signaturen bestimmten Eigenschaften der verschiedenen Trainingsgebiete, die Zuweisung der einzelnen Bildpunkte zu den vorher definierten Ergebnis-klassen nach festgelegten Zuweisungsregeln. Überwachte Verfahren ermöglichen ein hohes Maß an individueller Beeinflussung des Klassifizierungsvorganges. Jedoch haben die Qua-

lität der vorab nötigen Information und die Festlegung auf bestimmte Ergebnisklassen (vgl. Tab. 6 in Kap. 5.1) vor der Segmentierung entscheidenden Einfluß auf den Klassifizierungserfolg (ERDAS 1997: 213). In Kap. 6.2.7 ist die Anwendung überwachter Klassifizierungen für unterschiedliche Objektklassen beschrieben.

Unüberwachte Klassifizierungen finden dann Anwendung, wenn entweder wenig Information über den Datensatz bzw. das abgebildete Gelände vorhanden ist, oder wenn vor der Klassifizierung eine Festlegung auf definierte Ergebnisklassen nicht gewünscht oder nicht möglich ist. Die Interpretation und Benennung der Ergebnisklassen erfolgt in solchen Fällen nach dem Klassifizierungsprozess. Nicht immer ist eine sinnvolle Bedeutung und eindeutige Zuweisung zu gewünschten Objektklassen gegeben. Die Gruppierung der Bildelemente in Klassen erfolgt bei der unüberwachten Klassifizierung mit Hilfe unterschiedlicher Verfahren. Der in *ERDAS Imagine* für unüberwachte Klassifizierungen verwendete Algorithmus nennt sich *ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique)*, wobei die Zuweisung zu den Klassen aufgrund der spektralen Distanz zu den jeweiligen Klassenmittelpunkten erfolgt. Diese entsprechend der Anzahl der Eingabekanäle meist mehrdimensionalen Mittelwerte werden in den verschiedenen Durchläufen iterativ angepasst. Beeinflussung des Verfahrens ist über die vorzugebende Zahl der Ergebnisklassen, die Angabe einer maximalen Iterationszahl sowie über einen Konvergenz-Schwellwert, der den Prozentsatz der bei den Durchläufen unverändert gebliebenen Bildelemente angibt, gewährleistet (ERDAS 1997: 225ff). Neben reinen überwachten und unüberwachten Klassifizierungen können auch beide Ansätze miteinander kombiniert werden (ERDAS 1997: 214; vgl. auch Anwendungen in Kap. 6.2.7).

Insbesondere bei überwachten, aber auch bei den unüberwachten Klassifizierungsansätzen beeinflussen die Zuweisungsregeln, die in den Klassifikationsalgorithmen Verwendung finden, entscheidend die Resultate. Grundsätzlich unterschiedlich verhalten sich parametrische und nicht-parametrische Kriterien. Letztere beruhen lediglich auf Schwellwerten und sind damit unabhängig von den Eigenschaften der Daten. Als nicht-parametrischer Klassifikator fand der *Parallelepiped-* oder *Quaderklassifikator* testweise Anwendung, bei dem die Abgrenzung über mehrdimensionale Schwellwerte im entsprechend mehrdimensionalen Merkmalsraum erfolgt. Dem Vorteil der schnellen und einfachen Klassifizierung steht dabei aber das Problem nicht eindeutiger Zuordnung im Überschneidungsbereich gegenüber (ERDAS 1997: 215, 233, 241-251).

Parametrische Zuweisungsregeln beruhen hingegen auf statistischen Parametern. Der dem *ISODATA*-Algorithmus zugrundeliegende *Minimum-Distance*-Klassifikator ist ein Beispiel für die Verwendung von Entfernungen zu den mehrdimensionalen Mittelwerten im multispektralen Merkmalsraum (ERDAS 1997: 248f). Der für überwachte Klassifizierungen am häufigsten verwendete Algorithmus ist der *Maximum Likelihood*-Klassifikator. Unter der wichtigen Bedingung der Normalverteilung der Trainingsgebietsdaten im Merkmalsraum ist es das genaueste der hier verwendeten Verfahren, denn unter Verwendung von Kovarianzmatrizen gehen die meisten Variablen in die Berechnung ein. Die Zuordnung der Bildelemente zu den potentiellen Klassen erfolgt aufgrund der Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Klasse (ERDAS 1997: 250f). Beide parametrischen Verfahren wurden für die Klassifizierung in Kap. 6.2.7 verwendet.

5.6.5.2 Vorgehensweise und Beurteilungskriterien

Die Beeinflussung der Ergebnisse unüberwachter Klassifizierungen ist, wie bereits im letzten Kapitel dargelegt, sehr beschränkt. Eine Beurteilung des Datensatzes bzw. des Ergebnisses kann nur über die Beurteilung des klassifizierten Ergebnisses an sich oder rückschließend über die Beurteilung der den Ergebnisklassen zugrundeliegenden spektralen Eigenschaften (Signaturen) für die den jeweiligen Klassen zugeordneten Bildbereiche erfolgen. Die aus einer unüberwachten Klassifizierung gewonnenen Signaturen können allerdings anschließend als Ausgangsbasis in überwachte Klassifizierungen eingebracht werden.

Im Rahmen überwachter Klassifizierungen gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Vorgehensweisen und Beeinflussungsmöglichkeiten. Die Herangehensweise muss jeweils an Ziel und Datensatz ausgerichtet werden und ist nur in sehr geringem Umfang auf unterschiedliche Anwendungsgebiete übertragbar. Daraus ergibt sich, daß gute Klassifizierungen nur durch ausreichende Erfahrung des Auswerters und/oder langwierige Evaluierungsprozesse und auf jeden Fall gute Referenzinformation erzielt werden können. Letztgenanntem wurde in dieser Arbeit Rechnung getragen, indem eine sehr große und gut verteilte Anzahl von Geländevergleichspunkten und -flächen in Form von Trainingsgebieten in die Untersuchungen einbezogen wurden. Anhand dieser bekannten Flächen kann eine Klassifizierungsmethode entwickelt, geeicht und anschließend überprüft werden. Zur Beurteilung stehen dabei je nach Bildverarbeitungsprogramm unterschiedliche Werkzeuge zur Verfügung (vgl. ERDAS 1997: 220ff allgemein zur Vorgehensweise und Kap. 6.2.1 bis 6.2.6).

Erste Anhaltspunkte liefern Trainingsgebietsstatistiken, die analog der Statistiken gesamter Szenen (Kap. 5.6.3.2) Aussagen über die spektralen Eigenschaften hier einzelner bekannter und definierter Bildbereiche ermöglichen. Der Vergleich von Minimal-, Maximal- und Mittelwerten sowie Standardabweichungen von Trainingsgebieten gleicher aber auch unterschiedlicher Ergebnisklassen läßt erste Aussagen über die zu wählende Vorgehensweise bei der Klassifizierung zu (vgl. Kap. 6.2.1 bis 6.2.6). Für Klassen mit sehr unterschiedlichen Mittelwerten und nur geringen Standardabweichungen lassen sich gute Ergebnisse mit parametrischen Klassifizierungen erwarten. Liegen im gesamten Wertebereich der verschiedenen Klassen (aus Minimal- und Maximalwerten ablesbar) keine Überschneidungen vor, reichen sogar nichtparametrische Zuweisungsregeln für die Trennung aus. Grauerthistogramme einzelner oder auch aus mehreren Flächen zusammengefaßter Trainingsgebiete lassen eine Überprüfung hinsichtlich der Normalverteilung der Daten im Merkmalsraum als wichtige Voraussetzung für die *Maximum Likelihood*-Zuweisungsregel zu (Kap. 5.6.5.1). Bei multitemporalen Datensätzen mit einer extrem großen Anzahl von Eingabekanälen und zahlreich auftretenden Überschneidungsmöglichkeiten wie im vorliegenden Fall, bieten einkanalige Histogramme unterschiedlicher Klassen nur wenig Unterstützung für die Auswahl der geeigneten Klassifizierungsmethode.

Bessere Beurteilungskriterien ergeben sich deswegen aus der Verteilung einzelner aber auch mehrerer Trainingsgebiete im bivariaten Merkmalsraum (jeweils zwei auszuwählende Eingabekanäle) in Form von Scattergrammen (vgl. *Feature space images* analog zu den in Kap. 5.6.3.2 für eine Gesamtzene beschriebenen). Da Scattergramme nur zweidimensionale Interpretationen zulassen, muß für die integrative Beurteilung mehrdimensionaler

Daten (wie in vorliegender Auswertung multispektraler und -temporaler Daten) aber auf noch andere Darstellungsweisen zurückgegriffen werden.

Unter Berücksichtigung aller gewünschten Eingabekanäle bilden sogenannte Spektralprofile mittlere Grauwerte einzelner oder mehrerer Trainingsgebiete ein und derselben oder unterschiedlicher Ergebnisklassen als Kurven ab (vgl. Abbildungen 39 bis 41 und 43). Wünschenswert wäre zusätzlich eine automatische Einbeziehung der zugehörigen Standardabweichungen, denn Mittelwerte allein ermöglichen keine Aussagen über Überschneidungen einzelner Trainingsgebietssignaturen.

Mit Hilfe der oben beschriebenen Funktionen (statistische Parameter, Grauerthistogramme, zweidimensionale Scatterplots und vor allem Spektralprofile) müssen relevante Signaturen für die zu klassifizierenden Ergebnisklassen durch Veränderung, Eliminierung oder Zusammenfassung einzelner Trainingsgebietsflächen aus den ständig neu gewonnenen Erkenntnissen entwickelt werden. Bereits die Auswahl, Markierung und Beurteilung der Trainingsgebiete und die Ableitung von Signaturen daraus ist ein iterativer, sehr langwieriger hochkomplexer Prozeß.

Parallel zur Entwicklung von Signaturen aus den Trainingsgebieten muß bereits die Auswahl der für die jeweilige Fragestellung geeigneten Eingabekanäle erfolgen. Je mehr potentielle Eingabekanäle, um so umfangreicher sind die statistischen Parameter der Trainingsgebiete und um so unübersichtlicher deren Beurteilung. Für die hier durchgeführten Untersuchungen erschwert sich die Beurteilung der Trainingsgebiete bzw. Eingabekanäle insofern, als sowohl unterschiedliche Spektralkanäle als auch unterschiedliche Zeitpunkte in die Klassifizierung einfließen. Da beides in den Spektralprofilen darstellbar ist, wurde hauptsächlich auf ihrer Grundlage die Auswahl der Eingabekanäle für die spezifischen Ergebnisklassen getroffen. Wenig Aussagekraft wurde den unterschiedlichen Trennbarkeitsmaßen beigemessen (*Signature separability*, ERDAS 1997: 236ff), denn hohe Abstände der Signaturen garantieren nicht, daß auch alle zu einer bestimmten Objektklasse gehörenden Bildbereiche in dieser Klasse mit der entsprechenden Signatur erfasst werden. Außerdem hat die Wahl der Zuweisungsregel in der Klassifizierung bzw. die Wahl des spezifischen Trennbarkeitsmaßes großen Einfluß auf das Ergebnis und verliert seine Aussagekraft, wenn beide nicht übereinstimmen.

Neben Spektralprofilen wurden zusätzlich Kontingenzmatrizen zur Beurteilung von Überschneidungen zwischen den Ergebnisklassen und zur Auswahl der Eingabekanäle herangezogen (vgl. Kap. 6.2.7). Dazu wird eine bestimmte Auswahl an Trainingsgebieten, eine spezifische Zuweisungsregel und eine Kombination von Eingabekanälen gewählt. Anhand dieser Parameter erfolgt eine Test-Klassifizierung, nach der ausschließlich die Trainingsgebietspixel segmentiert werden. Als Ausgabe erhält man eine Fehlermatrix, die Auskunft gibt über alle der richtigen Klasse zugewiesenen Pixel sowie über Menge und Art der Fehlzuweisungen. Der Vergleich von aus unterschiedlichen Parameterkombinationen errechneten Kontingenzmatrizen ermöglicht so – unter der Voraussetzung repräsentativer Trainingsgebiete – am besten die Auswahl der optimalen Kanalkombination und Zuweisungsregel. Kontingenzmatrizen können auf diese Weise auch zu Genauigkeitsüberprüfungen von Klassifizierungen herangezogen werden (vgl. Kap. 5.6.5.3 und *Contingency matrix*, ERDAS 1997: 236).

Unabhängig von der Art der Klassifizierung und der Zuweisungsregel kann die Einhaltung einer bestimmten Reihenfolge bzw. eine schrittweise Vorgehensweise bei der Klassifizierung erfolgsentscheidend sein. Hilfreich ist dabei, daß Klassifizierungsparameter auch nur auf definierte Bildausschnitte angewendet bzw. Bildbereiche komplett ausmaskiert werden (vgl. Masken aus verschiedenen Sedimenten in Kap. 6.2.7). So lassen sich unterschiedliche Bildbereiche nach verschiedenen Parametern segmentieren, bzw. Klassifizierungen schwierig zu differenzierender Klassen bauen auf vorangegangenen Klassifizierungsergebnissen auf (hierarchische oder baumartige Klassifizierungsverfahren) (ERDAS 1997: 217).

5.6.5.3 Genauigkeitsüberprüfungen und Vergleichsmöglichkeiten

Unabdingbar für jede automatische computergestützte Klassifikation ist eine Beurteilung des Ergebnisses mit einer Genauigkeitsabschätzung. Dafür gibt es unterschiedliche Vorgehensweisen. Für Klassifizierungen, die in einem Durchlauf erstellt wurden, werden idealerweise unabhängige Testgebiete, die analog zu den Trainingsgebieten im Gelände oder anderweitig erhoben wurden, herangezogen. Sie ermöglichen mit Hilfe von Kontingenzmatrizen eine quantitative Abschätzung der Gesamtgenauigkeit, der Einzelgenauigkeiten aller Objektklassen sowie eine Beurteilung der Fehlzusweisungen. Wie auch eine überwachte Klassifizierung extrem abhängig ist von repräsentativen Trainingsgebieten, steht und fällt eine Genauigkeitsüberprüfung mit der Repräsentativität der Testgebiete. Erste Anhaltspunkte über Genauigkeiten von Klassifikationen liefern in Ermangelung von Testflächen auch die Trainingsgebiete, allerdings als abhängige Variablen.

Unüberwachte Klassifizierungen werden meist gewählt, wenn eine eindeutige Bestimmung von Trainings- bzw. Testflächen nicht möglich ist. Damit fällt eine Beurteilung der Klassifizierungsgüte auf dieser Grundlage weg. Außerdem ist eine Genauigkeitsüberprüfung nach der oben beschriebenen Methode nicht anwendbar auf komplexe hierarchische Klassifizierungsverfahren. Dies ist der Grund, warum für die Klassifizierung in Kap. 6.2.7 keine auf Testflächen basierende Genauigkeitsanalyse erfolgen konnte. Hier bieten sich lediglich eine visuelle Beurteilung der Ergebnisse oder ein Vergleich mit anderen – wenn vorhandenen – Daten an. Da im vorliegenden Fall die Datenlage extrem schwierig ist und so gut wie keine verlässlichen Vergleichsdaten vorliegen, konnte eine Genauigkeitsabschätzung nur durch einen visuellen Vergleich mit den der Klassifizierung zugrundeliegenden Geländeinformationen bzw. anderen Fernerkundungsdaten (z. B. Luftbildern) erfolgen. Ein anschließender Vergleich mit anderen Ergebnissen ist allerdings durch die Datenhaltung und weitere Bearbeitung innerhalb des geographischen Informationssystems idealerweise gewährleistet.

5.7 Integration im regionalen Geoinformationssystem FirGIS

Nach der Aufbereitung der sehr unterschiedlichen Daten in den jeweils dafür am besten geeigneten Programmen erfolgte die gemeinsame Auswertung der Daten durch Integration im regionalen geographischen Informationssystem FirGIS. Der Name leitet sich ab aus dem lokalen Namen *firgi*, für die Tonebene südlich des Tschadsees, die den Kernraum der Untersuchungen darstellt, sowie aus der Ergänzung der fehlenden Buchstaben des Wortes GIS, der allgemein üblichen Abkürzung für geographische Informationssysteme. Im Anschluß sollen nur kurz die wichtigsten Charakteristiken des Systems sowie die Vorgehensweise bei der Auswertung erläutert werden. Die Tabellen im Anhang 1 geben einen

Überblick über den bisher in FirGIS integrierten Datenbestand. Nicht vollständig aufgenommen sind die Ergebniskarten, sie werden beispielhaft in Kapitel 6 unter den verschiedenen Themenstellungen vorgestellt.

5.7.1 Struktur

FirGIS ist ein offenes System, das im Rahmen dieser Arbeit aufgebaut wurde und ständig erweiterbar ist. Damit sind auch schon die wichtigsten Anforderungen angesprochen: Zum einen wurde auf eine möglichst einfache Struktur geachtet, damit Ein- und Ausgang verschiedenster Datentypen und -formate gewährleistet ist. Dieser Anforderung kommt zugute, daß die Eingangsdaten bereits aus den unterschiedlichsten Programmsystemen zusammengefügt wurden. Moderne Systeme können eine ständig steigende Zahl unterschiedlicher Dateiformate direkt lesen, teilweise sogar direkt bearbeiten oder importieren. So ist es möglich, das System fortlaufend zu erweitern und zu verändern. Für die Kontinuität von Arbeiten, die sich mit langfristigen Veränderungen beschäftigen, ist es wichtig, auch zukünftige Informationen integrieren und auswerten zu können. Zum anderen können aber die integrierten Daten auch in anderen Systemen speziell bearbeitet werden, wie es bei der Auswertung der Satelliten- und Luftbilder mit Hilfe der Rasterbildverarbeitung bereits beschrieben wurde. Diesem Bestreben kommt die schnelle Weiterentwicklung im Datenaustausch vor allem zum Ende dieser Untersuchungen sehr entgegen.

5.7.1.1 Datenformate

Die Daten gliedern sich über ihre Formate in Raster- und Vektordaten (für genauere Beschreibung vgl. ESRI 1994: 1-11 bis 1-34 oder ERDAS 1997: *Chapter 1-3*). Erstere bestehen aus den gescannten Luftbildern, den originalen und modifizierten Satellitenszenen und den daraus durch Bildverarbeitung erzeugten Ergebniskarten. Dazu gehören aber auch gescannte Karten und Fotos. Vorherrschende Dateiformate für die Rasterdaten sind *IMG*, *LAN*, verschiedene *TIF*, *JPG* und *GIF*. Die Einbindung dieser unterschiedlichen Formate ist über dynamisch verbindbare Bibliotheken gewährleistet. Alle anderen räumlichen Daten liegen als Vektordaten vor: digitale und digitalisierte Karten sowie digitalisierte Luftbildauswertungen. Integrierbar sind fast alle Vektorformate, verwendet werden hauptsächlich *ARC/INFO-Coverages* sowie *ARCView-Shapefiles*.

5.7.1.2 Datenbanksysteme

Während Rasterdaten nur einfach über einen Wert für jeden Bildpunkt definiert sind, gehören zu Vektordaten zum Teil sehr komplexe Zusatzinformationen. Diese Sachdaten, die die beschreibenden Attribute zu den dargestellten Objekten enthalten, können aus sehr umfangreichen Tabellen bestehen. Als relationale Datenbanken sind sie eindeutig mit den dargestellten geographischen Objekten und häufig auch mit anderen Daten verknüpft (vgl. ESRI 1994: 1-36 bis 1-39). Da der in FirGIS integrierte Datenbestand sehr umfangreich und sehr heterogen ist, wurden die Attributdaten in den meisten Fällen nur direkt mit den zugehörigen Objekten verknüpft. Für spezielle Untersuchungen lassen sich temporäre Verknüpfungen auch zu anderen Themenebenen mit ihren zugehörigen Objekten herstellen, ohne den Originaldatenbestand bei der Auswertung zu verändern (vgl. ESRI 1994: 1-38).

Für einige wenige Themen (z. B. Siedlungen) wurde begonnen, komplexere Datenbanken anzulegen. Dabei wurde versucht, neben den räumlichen und zeitlichen Dimensionen auch unterschiedliche Datenquellen mit jeweils unterschiedlichen Angaben zu berücksichtigen. Diese Datenbanken stellen die Grundlage für Verknüpfungen dar, die mit anderen Fachbereichen innerhalb des Sonderforschungsbereiches angelegt wurden. Dafür wurden umfangreiche Kodierungen entwickelt.

Bei Anlage der Datenbanken, wie auch bei der Verwaltung der umfangreichen und heterogenen Datenstruktur, wurde ein durchgehend einheitliches und schlüssiges Benennungssystem sowohl für Ausgangs- wie Ergebnisdaten angestrebt. Außerdem wurden Dokumentationen in Metadaten als Texte oder Tabellen angelegt.

5.7.2 Datenbearbeitung und -auswertung

Der einfachste, dabei aber ein durchaus effektiver Weg der Datenauswertung beginnt mit der Interpretation verschiedener Darstellungen. Im Gegensatz zu analog vorliegenden Karten können bei der Visualisierung innerhalb eines geographischen Informationssystems einzelne Themenebenen hervorgehoben oder sogar allein dargestellt werden. Die verschiedenen Themen können sodann beliebig miteinander kombiniert und bei gleichen Projektionseigenschaften auch mit Themen aus anderen Karten verglichen werden. Ebenso ergeben sich aufschlußreiche Interpretationen aus der Überlagerung von Raster- und Vektordaten. Bei zeitlichen Veränderungen, denen hier das Hauptinteresse gilt, lassen sich allein durch sinnvolle Überlagerung und Darstellung der verschiedenen Zeitpunkte umfangreiche Schlüsse ziehen.

5.7.2.1 Abfragen und Statistik einzelner und mehrerer Themen

Weitere Auswertungen wurden mit Hilfe der zahlreichen Abfragemöglichkeiten vorgenommen. Eine Auswahl kann sowohl räumlich über die Objektdaten, als auch inhaltlich über die Attributdatenbank erfolgen. Durch Kombination der Abfragemöglichkeiten über verschiedene Themenebenen lassen sich neben der räumlichen Verteilung von Objekten eines Themas auch Beziehungen verschiedener Themenebenen untereinander aufdecken. Über quantitative Angaben lassen sich hier präzise und vor allem übertragbare Angaben machen. Unterschiedliche statistische Berechnungen sowie logische Operationen bieten ein weiteres breites Interpretationsspektrum (vgl. ein- und weiterführend 'Querying data' in ESRI 1996: 177-244). Zahlreiche Anwendungsbeispiele finden sich in den Kapiteln 6.2 und 6.4.

5.7.2.2 Physische Verschneidungen

Neben der reinen Interpretation der Daten, wobei die Originaldatenquellen nicht verändert werden, lassen sich neben den obengenannten alle GIS-Operationen auch so anwenden, daß neue Themen – kombiniert aus verschiedenen Originaldaten – berechnet werden. Die neu entstandenen Themen bilden dann Grundlage für komplexere Abfragen (z. B. für die Untersuchung der Lage der Trockenzeitanbauflächen bezüglich der naturräumlichen Gegebenheiten) (vgl. ESRI 1990b).

5.7.2.3 Pufferbildung zur Flächenerzeugung

Aufgrund der Abbildungsverhältnisse im Luftbild war es nicht möglich, alle flächenhaften Objekte auch flächenhaft zu kartieren. Die Trockenzeitanbauflächen konnten z. B. nur anhand der die Felder umgebenden Dämme aufgenommen werden (vgl. Kap. 5.1 und 5.4.1). Linienhafte Objekte und Themen ermöglichen keine Flächenberechnungen und lassen sich auch nicht mit anderen Themen flächenhaft verknüpfen oder verschneiden. Eine Möglichkeit, um dennoch Flächenabschätzungen vornehmen und automatische Verschneidungsfunktionen anwenden zu können, liegt in der Pufferung linienhafter Elemente (vgl. 'Buffer' in ESRI 1990b). Dazu werden um die digitalisierten Linien Flächen mit definierten Eigenschaften angelegt. Die wichtigste Eigenschaft stellt die Pufferdistanz dar, denn sie bestimmt direkt den Flächeninhalt. Im Fall der Trockenzeitanbauflächen wurde über den Vergleich mit durchschnittlichen Feldgrößen eine Pufferdistanz von 50 m als gute Beschreibung der tatsächlichen Feldflächen bestimmt (vgl. Kap. 6.1.4.2). Automatische Pufferungen erfolgen mit gleichen Werten über den gesamten Arbeitsbereich und dürfen deswegen nicht zum Vergleich von Flächen innerhalb dieses Ausschnittes herangezogen werden, ermöglichen aber einen Vergleich oder eine Verschneidung mit anderen linien- oder flächenhaften Themen.

5.7.2.4 Projektion und Flächenberechnung

Wie bereits im Kap. 5.3.2 für die digitalisierten Karten ausgeführt wurde, ist es nötig, daß alle in die Auswertung eingehenden Karten bzw. Themen im gleichen Bezugssystem vorliegen. Die sehr heterogenen bereits vorhandenen wie auch die neu aus den Fernerkundungsdaten gewonnenen Themenebenen werden zunächst in geographischen Koordinaten vorgehalten. Damit ist eine gemeinsame Darstellung und ein visueller Vergleich aller im Geoinformationssystem enthaltenen Daten möglich. Da die Datenlage generell und die Angaben zu Abbildungseigenschaften im besonderen für das nigerianische Tschadbecken sehr unzureichend sind, treten bereits bei der Darstellung deutliche Fehler auf. Ungenauigkeiten ergeben sich auch bei der Verknüpfung von Daten sehr unterschiedlicher Originalmaßstäbe. Zwar sind der Darstellung im geographischen Informationssystem bezüglich Maßstab keine Grenzen gesetzt, jedoch zeigen Karten unterschiedlicher Maßstäbe unterschiedliche Generalisierungsstufen. Eine kompetente Kombination und Verarbeitung ist deswegen umso mehr gefordert.

Für Flächenberechnungen und -vergleiche verschiedener Daten untereinander, insbesondere der multitemporalen, müssen die Karten projiziert werden (vgl. 'Project' und 'Transform' in ESRI 1990c). Als Standard wurde die UTM-Projektion mit den Parametern in Tab. 8 festgelegt. Abstands- und Flächenmaße können dann direkt über die Attributtabelle der einzelnen Ebenen für die verschiedenen Objekte abgerufen, verglichen oder komplexeren Operationen unterzogen werden.

Tab. 8: Parameter der als Standard festgelegten Projektion für die im FirGIS erfassten Daten

Projection	Transverse Mercator
Grid	UTM Zone 33
Spheroid	Clarke 1880
Units of Measurement	Meter
Meridian of Origin	15°E
Latitude of Origin	Equator
Scale Factor at Origin	0,9996
False Coordinates of Origin	500 000 m Easting, Nil Northing
Datum	Adindan (30th Arc, 12th Parallel)

5.7.2.5 Komplexe räumliche GIS-Analysen

Die bis hierher und auch im folgenden Kapitel beschriebenen GIS-Funktionen für die Datenintegration (vorangegangene Unterkapitel) und digitale Kartenerstellung (folgende Unterkapitel) stellen nur einen untergeordneten Aspekt geographischer Informationssysteme dar. Die eigentliche Stärke – Verknüpfung der integrierten Daten sowie die Durchführung komplexer räumlicher Analysen – beruht auf diesem ersten Schritt der Datenintegration. Im Umfang dieser Arbeit, die auf keiner vorhandenen Datenbasis aufbauen konnte, konnte nur ein geringer Teil aller Möglichkeiten ausgeschöpft werden. Einzelne Ansätze in diese Richtung wurden aber bereits in gesonderten Veröffentlichungen verfolgt (SKORUPINSKI & FRANKE-SCHARF 1997; FRANKE-SCHARF 2000; FRANKE-SCHARF & SKORUPINSKI 2000, FRANKE-SCHARF im Druck) bzw. werden im Ergebniskapitel (z. B. Kap. 6.1 und 6.4) behandelt.

5.7.3 Ergebnisdarstellung

Ein großer Vorteil der Dateninterpretation mit einem geographischen Informationssystem ist die Möglichkeit der vielseitigen und flexiblen Datenausgabe. Dabei muß unterschieden werden zwischen analogen Darstellungsformen, wie sie für die gedruckte Fassung dieser Arbeit angewendet werden und digitalen Darstellungsformen. Letztere bieten viel weitreichendere Möglichkeiten, nicht zuletzt durch interaktive Auswahl- und Verknüpfungsmöglichkeiten.

5.7.3.1 Analoge Darstellungsformen

Aus den unterschiedlichen Auswertemethoden ergeben sich auch unterschiedliche Darstellungsmöglichkeiten der Ergebnisse. Die Ausgabe der Ergebnisse im Rahmen dieser Arbeit erfolgt entweder mit Hilfe einzelner Werte, in Form von Tabellen und Graphiken oder aber – in den meisten Fällen – als Karte. Zusätzlich können die verschiedenen Ausgabeformen miteinander kombiniert werden (vgl. z. B. Abb. 5). Wie bei der Darstellung am Bildschirm können separate Raster-, separate Vektor- oder aber kombinierte Karten aus beiden Datenformen erstellt und gedruckt werden. Dabei gelten zwar generell die gleichen Darstellungsmöglichkeiten wie für den Bildschirm, häufig werden aber durch das jeweilige Programm, den Drucker, die zugehörigen Treiber oder die Ausgabemedien Grenzen bei der Ausgabeform und -qualität gesetzt.

5.7.3.2 Digitale Darstellung

Aus den oben beschriebenen Gründen ergibt sich sehr häufig der Fall, daß eine analoge Ausgabe der Ergebnisse hinter den Darstellungsformen am Bildschirm zurückbleibt. Zudem ermöglichen gut aufbereitete digitale Präsentationen den individuellen Eingriff in die Darstellungsform. So können ohne großen Aufwand z. B. Maßstab, Ausschnitt, Symbole, Farben und Signaturen individuell ausgewählt und verändert werden. Der Zugriff auf zusätzliche erklärende Daten kann meist schnell und einfach über entsprechende Verknüpfungen realisiert werden. Im Rahmen der hier vorgelegten Arbeit kann nur eine kleine Auswahl analoger Abbildungen präsentiert werden. Parallel dazu sind aber neben den hier dargestellten alle verwendeten Daten sowie die daraus gewonnenen Informationen in Form von Texten, Tabellen, Grafiken sowie Karten digital aufbereitet und einsehbar.

6 Ergebnisse

oder: Die Anstrengung aus Daten Information zu machen..

Die Ergebnisdarstellung ist durch die verschiedenen zeitlichen Dimensionen in vier Themenkomplexe gegliedert. Diese Gliederung entspricht nur zum Teil den in Kapitel 4 vorgestellten Datenformen und den in Kapitel 5 beschriebenen Methoden und Vorgehensweisen. Begonnen wird im ersten Unterkapitel mit der detaillierten Beschreibung eines – aktuellen – **Zeitpunktes**, im zweiten und vierten werden Veränderungen im **Zeitverlauf unterschiedlicher Dimensionen** beleuchtet, während im dritten Unterkapitel der **Vergleich** mehrerer **Zeitpunkte** erfolgt.

6.1 Aktuelle Landbedeckung und Landnutzung

In Beilage 1 ist eine aus den in Kapiteln 4.2 und 4.3 beschriebenen Basisdaten erstellte aktuelle Landbedeckungs- und Landnutzungskarte zusammengestellt. Die aus Luftbildern und Luftbildmosaiken abgeleitete Karte spiegelt die Landschaftssituation des Jahres 1990 nach dem Ende der Regenzeit wider. Sie ist damit die aktuellste und in ihrer maßstäblichen (Kartiermaßstab 1 : 25 000) und thematischen Genauigkeit (vgl. Kartiereinheiten in Tab. 6) einzige mir bekannte Darstellung der Landbedeckung und Landnutzung im nigerianischen Tschadbecken. Die gewählte Ausgabekarte (Beilage 1) gibt als ein Beispiel der umfangreicheren digitalen Karte nur eine von vielen Darstellungsformen wieder und liefert flächendeckend qualitative und quantitativ vergleichbare Informationen zur Landbedeckung und Landnutzung des Untersuchungsraumes. Die Karte deckt in 19 Einzelkartenblättern eine Gesamtfläche von mehr als 3500 km² ab. Die Interpretation erfolgt in den folgenden Kapiteln thematisch aufgeschlüsselt. Dazu werden im Text zwar einzelne thematische Karten zusätzlich hervorgehoben, dennoch ist es sinnvoll, zum Vergleich von Ortsnamen auf die herausnehmbare ausführlichere Beilagenkarte zurückzugreifen.

6.1.1 Sediment

Wichtigstes Merkmal der Landbedeckung ist die Sedimentverbreitung. Wie in Kap. 5.4.1 beschrieben, lassen sich allgemeingültig bis zu drei verschiedene Kategorien der Sedimentausprägung unterscheiden – in kleineren Ausschnitten teilweise noch mehr. Für die stark verkleinerte Darstellung in Abb. 14 wurden allerdings nur zwei Klassen dargestellt, nämlich die, für die allein durch Luftbildinterpretation für die gesamte Fläche eindeutige Aussagen getroffen werden konnten. Um eine Bezugnahme bei der Interpretation zu ermöglichen, sind die einzelnen Kartenblätter unterteilt und mit Namen versehen.

Der größere Anteil des Untersuchungsgebietes, fast 60% der Gesamtfläche, wird von tonigen Sedimenten eingenommen. Räumlich läßt sich dieser Bereich auf den südöstlichen Bereich (Blätter 68NE4, 69NW3 und 69NW4, 69SW1 und 69SW2, sowie 69NE3 und 69SE1) festlegen. Hier kommen vorwiegend reine Tonflächen vor. In Richtung Westen und insbesondere Nordwesten hin zieht sich ein Streifen der Tonflächen, der von zahlreichen Sandflächen unterbrochen ist (hauptsächlich Blätter 68NW2, 68NE3, 68SE2 und ein Großteil

des Blattes 68NE1). Diese Ausprägung findet man auch auf kleineren Ausschnitten der Blätter 69SW1, 69NW4 und 69SE1. Gerade bei den letztgenannten läßt sich eine vorherrschende NW-SE-Ausrichtung der sandigen Strukturen erkennen. Dies könnte auf ehemalige Dünenverläufe hinweisen, sich aber auch um Strukturen handeln, die im Zuge der Schwemmfächerbildung der Flüsse (insbesondere El Beid und Chari-Logone-System) herauspräpariert wurden (vgl. auch Kap. 3.1.2).

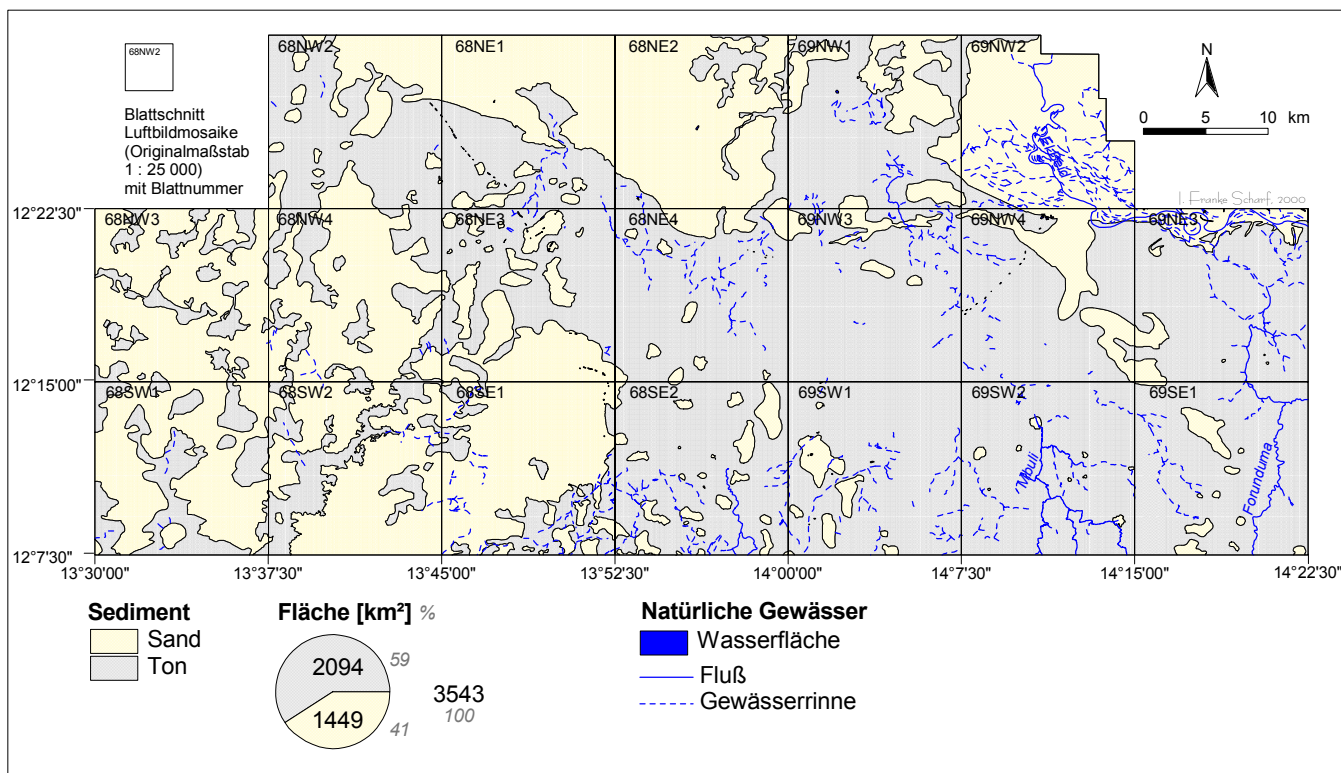


Abb. 14: Landbedeckungs- und Landnutzungskarte 1990: Sediment und natürliche Gewässer

Die Kartierung der Sedimente stimmt mit den Karten der viel stärker generalisierten *Land Resource Study* (in Abb. 3 dem Satellitenbild überlagert) überein. Der Bereich der reinen tonigen Sedimente wird in der Karte der *Land Systems* als '*Ngala Plains*' bezeichnet, die einen undeutlichen Übergang zu den '*Marte Plains*' bilden, den Bereichen, in denen häufiger Sandinseln an die Oberfläche treten. Die unterschiedliche Mächtigkeit der Sedimente spiegelt sich auch in der Bodenausprägung wider. Während die '*Ngala Plains*' fast überwiegend Vertisole aufweisen, die in den Luftbildern eine dunklere Farbe haben, wechseln sich in den '*Marte Plains*' je nach Sediment Vertisole mit in den sandigeren Bereichen schwach entwickelten Böden ab, die in den Luftbildern differenzierter und insgesamt heller erscheinen (Abb. 8). Anders jedoch als in den Karten der *Land Resource Study* lassen sich hier diese für die Landnutzung so entscheidenden, sehr kleinräumig wechselnden Sedimentunterschiede deutlich ablesen.



Abb. 15: Blick über die ehemals vom Tschadsee überflutete flache Tonebene zwischen Kajere und Sugume (Oktober 1995)

Der Weg links im Vordergrund zeigt den vegetationsfreien Tonboden, während im rechten Bildbereich unterschiedlich weit abgetrocknete Gräser die baumlose Tonebene bedecken. Zum Bildmittelgrund fällt das Gelände sanft ab. Feuchtere Bereiche weisen dort nach Ende der Regenzeit noch dunklere Farben und weniger weit abgetrocknete Vegetation (grüner) auf. Links im Hintergrund läßt sich auf einer sandigen Erhöhung anhand der Bäume die Siedlung Ngubdori ausmachen.

Auf etwas über 40% der Fläche treten sandige Sedimente an die Oberfläche. Außer in den bereits beschriebenen Bereichen ist dies vor allem in den nördlichen Bereichen des Untersuchungsgebietes, jenseits einer klaren Linie, die die Nordgrenze der Tonverbreitungsgebiete bildet, der Fall (Blätter 68NE2, 69NW2 sowie die nordöstlichen Bereiche der Blätter 68NW2 und 68NE1). Diese zunächst NW-SE- und weiter östlich E-W-verlaufende Trennungslinie entspricht dem in der *Landforms*-Karte der *Land Resource Study* ausgewiesenen 'Ngelewa Beach Ridge' (Abb. 7). Teile dieses Strandwalls konnten auch in der stereoskopischen Luftbildauswertung anhand höher gelegener Sandbereiche ausgewiesen werden. Auf eine Darstellung wurde jedoch verzichtet, da eine konsequente Trennung von den anderen sandigen Sedimenten nicht überall möglich ist. Aus den Luftbildern geht allerdings sehr deutlich hervor, daß die nördlich des Strandwalles gelegenen Bereiche eine größere Reliefierung und stärkere Gliederung aufweisen als das extrem flache Relief der Tonebenen. Nach der *Land Systems*-Karte wird dieser Bereich mit 'Mongonu Plain' bezeichnet und als sanft wellige Ebene aus heterogenen Seesedimenten beschrieben.



Abb. 16: Blick von der erhöht liegenden Siedlung Bula Cesabe nach Norden über die mächtige vegetationsbestandene Sandfläche im Umkreis der Siedlung (Oktober 1995)

Außer dem von der Siedlung kommenden Weg ist die gesamte Sandfläche mit dichter Vegetation bedeckt. Wildes Pennisetum im ortsnahen Bereich wechselt sich mit anderen für die Sandflächen typischen Gräsern und vereinzelt stehenden Bäumen und Büschen ab. Im Hintergrund ist der allmähliche Übergang zur flachen Tonebene zu erkennen.

Der südwestliche Bereich des Untersuchungsgebietes (Blätter 68NW3 und 68NW4, 68SW1 und 68SW2 sowie 68SE1) fällt durch besonders starke Wechsel in der Sedimentausprägung auf. Aus der Anordnung der tonigeren Sedimente (lineare Ausrichtung NW, N und NE) und den umgebenden, etwas höher gelegenen und stärker reliefierten sandigeren Sedimenten läßt sich ein fluvialer Einfluß ableiten. Die Sedimentausprägung ist hier infolgedessen sehr heterogen und durch zwei Kategorien nur tendenziell fassbar. Dieser Bereich wird in der *Land Systems*-Karte als 'Yedseram Delta' ohne weitere Untergliederung angegeben (Abb. 3). Auch hier ermöglichen die kleinräumig getroffenen Unterscheidungen in der Landbedeckung eine deutlich bessere Beurteilung der Landschaftssituation und damit verbunden auch der Landnutzung.

Ebenso als rezent von Flüssen überprägt fallen der äußerste Nordosten des Untersuchungsgebietes (Blatt 69NW2 und die äußersten nördlichen Bereiche von 68NW4 und 68NE3) auf. Diese Bereiche werden von rezenten und ehemaligen Flußläufen des Grenzflusses El Beid eingenommen. Aufgrund der starken anthropogenen Überprägung konnte für diesen Teilbereich keine stärkere Differenzierung der Sedimente vorgenommen werden. Durch die gleichzeitige Darstellung der Sedimentverteilung mit der Ebene der Gewässer (wie

in Abb. 14) ist unter Berücksichtigung der zahlreichen Gewässerrinnen auch hier eine Ableitung der Geländesituation möglich.



Abb. 17: Wasserflächen im nordöstlichen Bereich des Untersuchungsgebietes nördlich der Siedlung Jillam (Oktober 1995)

Im nordöstlichen Bereich des Untersuchungsgebietes wechseln die Sedimente sehr kleinräumig. Etwas erhöht liegende sandige Flächen, wie im Bildvordergrund, tragen meist eine dichte Gras- und dichtere Gehölzvegetation als südlich des Ngelewa-Strandwalles. In den tieferliegenden tonigen Bereichen hält sich Regenwasser und vom Tschadsee oder Flüssen herantransportiertes Wasser noch lange nach der Regenzeit. Nach dem Austrocknen zieht sich die Vegetation auch auf den Tonflächen allmählich zurück. Teilweise wird am Rand der Wasserflächen auch angebaut (vgl. Flutfolgeanbau in Kap. 6.1.4.3)

Unbefriedigend bleibt in der Luftbildkartierung lediglich die Abbildung des Blattes 69NW1. Die angewandten Methoden und eine Untergliederung in nur zwei Sedimentkategorien lassen keine sinnvolle Beschreibung der Landschaftssituation in diesem Ausschnitt zu. Es handelt sich hier um den Bereich des Untersuchungsgebietes, der den stärksten natürlichen Veränderungen unterworfen ist, denn im nördlichen Bereich des Blattes fand der Tschadsee noch bis Anfang der 1960er Jahre seine südlichste Ausdehnung. Die hier als tonige Sedimente kartierten Bereiche sind Depressionen, in denen sich Tschadseewasser in feuchten Jahren länger hält. Exakte Rückschlüsse auf die Zusammensetzung des dabei sedimentierten Materials sind – ähnlich wie bei den durch rezente fluviale Prozesse überprägten Gebieten – aus den Luftbildern kaum möglich. In der Karte der *Land Systems* der *Land Resource Study* aus den 1970er bzw. 1960er Jahren ist dieser Bereich als 'Lake Chad Edge' mit tonigen und schluffigen Sedimenten und der nördlich anschließende Bereich als See ausgewiesen (Abb. 3). Als 'Parent material' sind 'Recent lacustrine sands and clays' angegeben (Abb.

7). Gerade in diesem Bereich zeigen sich allerdings extreme Veränderungen gegenüber dem auf den älteren Karten dargestellten Zustand der 1960er Jahre.

Für einen Teilbereich kann die digitale Luftbildkarte mit den 1 : 50 000er Karten der *Lake Chad Basin Commission* (D.O.S. 1978, vgl. Kap. 4.1.1 und Kartenverzeichnis) verglichen werden. Unter Berücksichtigung des Erscheinungsjahres 1978 ergibt sich für die gemeinsam abgedeckten Ausschnitte eine gute Übereinstimmung. Der Bereich des Blattes 69NW1 ist dabei als '*Lake Flood Zone*', die sandigen Bereiche sind '*Desert and Sand Dune*' und die tonigen '*Clay Plain*' benannt. Aber auch auf diesen Karten ist die kleinräumige Differenzierung der Sedimentausprägung deutlich geringer.

6.1.2 Gewässer

6.1.2.1 Stehende Gewässer

Im ehemals vom Tschadsee überfluteten Untersuchungsgebiet gibt es heute nur noch sehr wenige natürliche Oberflächengewässer. Stehende Gewässer konnten in größerem Umfang gar nicht mehr kartiert werden. Der Tschadsee hatte am Ende der Regenzeit 1990 keine Ausdehnung in die dargestellten Blätter. Lediglich 95 kleinere Restwassertümpel waren von den Niederschlägen der Regenzeit noch mit Wasser gefüllt und ergeben insgesamt eine knapp 1 km² große, als stehende Gewässer kartierte Fläche (vgl. Beilage 1 und auch Abb. 17).

Die Betrachtung der Verteilung der Wasserflächen in Beilagenkarte 1 ergibt, daß ein Großteil in einer Reihe entlang der zwei großen asphaltierten Straßen liegt (vgl. Blätter 68NW2, 68NE1 und 68NE3, 68SE1 sowie 69NW4 und 69SW1). Sie dürfen im engeren Sinne nicht als natürliche Gewässer bezeichnet werden, denn ihre Entstehung hängt mit dem Straßenbau zusammen. Das Wasser hält sich in diesen Bereichen aus zwei Gründen länger: Zum einen wirkt die auf einem Damm errichtete Straße als Abflußhindernis, und zum anderen wurde höchstwahrscheinlich für die Aufschüttung des Dammes Material aus in der Nähe der Straße gelegenen Gruben entnommen. Während starker Regenfälle können sich diese kleinen Wasserflächen im sehr ebenen Gelände schnell zu riesigen Überflutungsflächen ausdehnen.

Nicht mit dem Straßenbau zusammenhängende Wasserstellen finden sich nur auf den Blättern 69NW1 und 69SW1, beides feuchtere Bereiche des Untersuchungsgebietes. Während ersteres mit der Ausweitung des Tschadsees nach Süden zusammenhängt, versickert in letzterem Wasser aus den von Süden kommenden Flüssen. Auch Standorte von Tiefbrunnen bilden häufig länger überflutete Bereiche.

6.1.2.2 Fließende Gewässer

Fließgewässer bzw. deren Abflußrinnen bilden im Untersuchungsgebiet insgesamt ein Netz von 869 km Länge. Allerdings waren zum Zeitpunkt der Kartierung davon nur knapp ein Fünftel (17%) wasserführend. Sie sind in Beilage 1 und Abb. 14 blau dargestellt, die nicht

Wasser führenden aber deutlich erkennbaren Abflußlinien blau gestrichelt. Die räumliche Verteilung sowie die Ausprägung sind sehr ungleich.

Der größte noch wasserführende Bereich findet sich im äußersten Nordosten des Untersuchungsgebietes. Die nördlich des Ngelewa-Strandwalles stark mäandrierenden Fluß- und Altarmabschnitte sowie tieferliegende feuchtere Rinnen gehören zum Gewässernetz des Grenzflusses El Beid (Blätter 69NE3, 69NW4 und 69NW2) und stellen die am weitesten südwestlich liegenden Ausläufer des riesigen Chari-Deltas dar (vgl. dazu Kap. 6.1.1).

Im äußersten Südosten treten weitere in der Hauptabflußlinie wasserführende Rinnen auf, sie gehören zum Forunduma-System (69SE1 und 69NE3). Weiter westlich und vor allem nach Norden zeigen sich nur noch sehr wenige wasserführende Abschnitte. Eine Ausnahme bildet der Mbuli, der ebenfalls von Süd nach Nord durchgehend wasserführend ist (Blatt 69SW2). Der größte Teil der weiter westlich liegenden Fluß- und Rinnensysteme versickert in den flachen Tonebenen, sie gehören meist zum Yedseram-System.

Aus Abbildung 14 geht hervor, daß in der westlichen Hälfte des Untersuchungsgebietes überhaupt keine Flüsse und auch kaum Gewässerrinnen vorkommen. Aber auch für diesen Bereich zeigen die Verteilung der Sedimente und die Geländebefunde, daß größere Wassermengen im Sediment versickern. Im Gegensatz zu den weiter östlich gelegenen sehr ebenen Gebieten bilden sich aber in den sandigeren Bereichen weniger akzentuierte Abflußrinnenabschnitte heraus. Es zeigt sich auch, daß Abflußrinnen verstärkt südlich des Ngelewa-Strandwalles, der ein Hindernis in der nördlichen Gefällerrichtung darstellt, auftreten. An zwei Stellen (Blätter 68NE1 und 69NW1) gelangen natürliche Abflußbahnen – zumindest in besonders feuchten Jahren – weiter Richtung Tschadsee. Die letztgenannten Bereiche stellen in der Regenzeit schwer zugängliche Areale dar und können deswegen zu dieser Zeit nicht genutzt werden.

Sedimentverteilung und natürliche Gewässer sind in Abb. 14 dargestellt. Das im Rahmen des *South Chad Irrigation Project* angelegte Kanalsystem ist jedoch zusammen mit der Bebauung in Abb. 19 im folgenden Kapitel abgebildet. Mit der Anlage der Bewässerungskanäle wurden gleichzeitig weite Abschnitte der natürlichen Fließgewässer begradigt und kanalisiert (vgl. auch Abb. 29). Die mit Bewässerungseinrichtungen ausgestattete Fläche bedeckt den zentralen Bereich des Untersuchungsgebietes südlich des *Ngelewa Beach Ridges*. Die von der *Chad Basin Development Authority (CBDA)* in den 1960er Jahren geplanten Anlagen wurden während der 1970er und 1980er Jahre erbaut. Die für drei Gebiete (Stadien) in der Tonebene geplanten Kanäle wurden aber bis heute nur im zentralen Teil (*Stage I*, Blätter 68NE3, 68NE4, 68SE2) vollständig und im östlichen Bereich (*Stage II*, 69NW3, 69NW4 und 69SW1, 69SW2) teilweise realisiert. Der westliche Teil (*Stage III*) war für den auf den Blättern 68NW2 und 68NW4 sowie einem Teil von 68NE1 und 68NE3 dargestellten Bereich geplant, wurde aber bisher nie begonnen.

Versorgt werden die Kanäle mit Wasser aus dem Tschadsee, das über den Kirenowa-Zufuhrkanal (Blatt 68NE2) mittels mehrerer Pumpstationen (Kirenowa, New Marte, Logomani, Gilioa/bzw. Gulua – vgl. Orte in Beilagenkarte 1) über Kanäle verschiedener Ordnung auf die Felder geleitet wird. Überschüssiges Wasser gelangt über zwei Entwässerungsleitungen (69NW1) wieder zurück in Richtung Tschadsee. In Abb. 19 kann man die beiden

ersten Stadien mit unterschiedlich dicht ausgebauter Kanaldichte erkennen. Daraus läßt sich auch ableiten, daß nur ein sehr kleiner Teil der gesamten Anlage genutzt werden kann (vgl. Kap. 6.1.4.4). Restriktiver wirkt sich allerdings die Lage des Wasserzufuhrkanals nördlich des Blattes 68NE2 aus (Anfangspunkt außerhalb der Karte). Die Anfangspunkte der Kanalzu- und -abflüsse korrespondieren sehr gut mit dem Tschadseestand während der 1960er Jahre (vgl. D.O.S. North East Nigeria und D.O.S. Nigeria, Kartenverzeichnis). Aufbauend auf diesen Grundlagen und auf den bis zu dieser Zeit vorhandenen Klimadaten fand Anfang der 1970er Jahre die Planung des Bewässerungsprojektes statt (vgl. u. a. FAO & UNDP 1973; FEDERAL MINISTRY OF AGRICULTURE & NATURAL RESOURCES 1974 und 1975). Mit dem seit etwa der gleichen Zeit stattfindenden Zurückweichen des Sees in Richtung Norden werden die Kanäle aber nicht mehr vom Wasser erreicht und eine Bewässerung mit Seewasser wird dadurch zumindest zeitweise – wenn nicht sogar ganz – unmöglich.



Abb: 18: Blick von der Pumpstation Kirenowa nach Norden entlang des Hauptzufuhrkanals vom Tschadsee (September 1995)

6.1.3 Bebauung

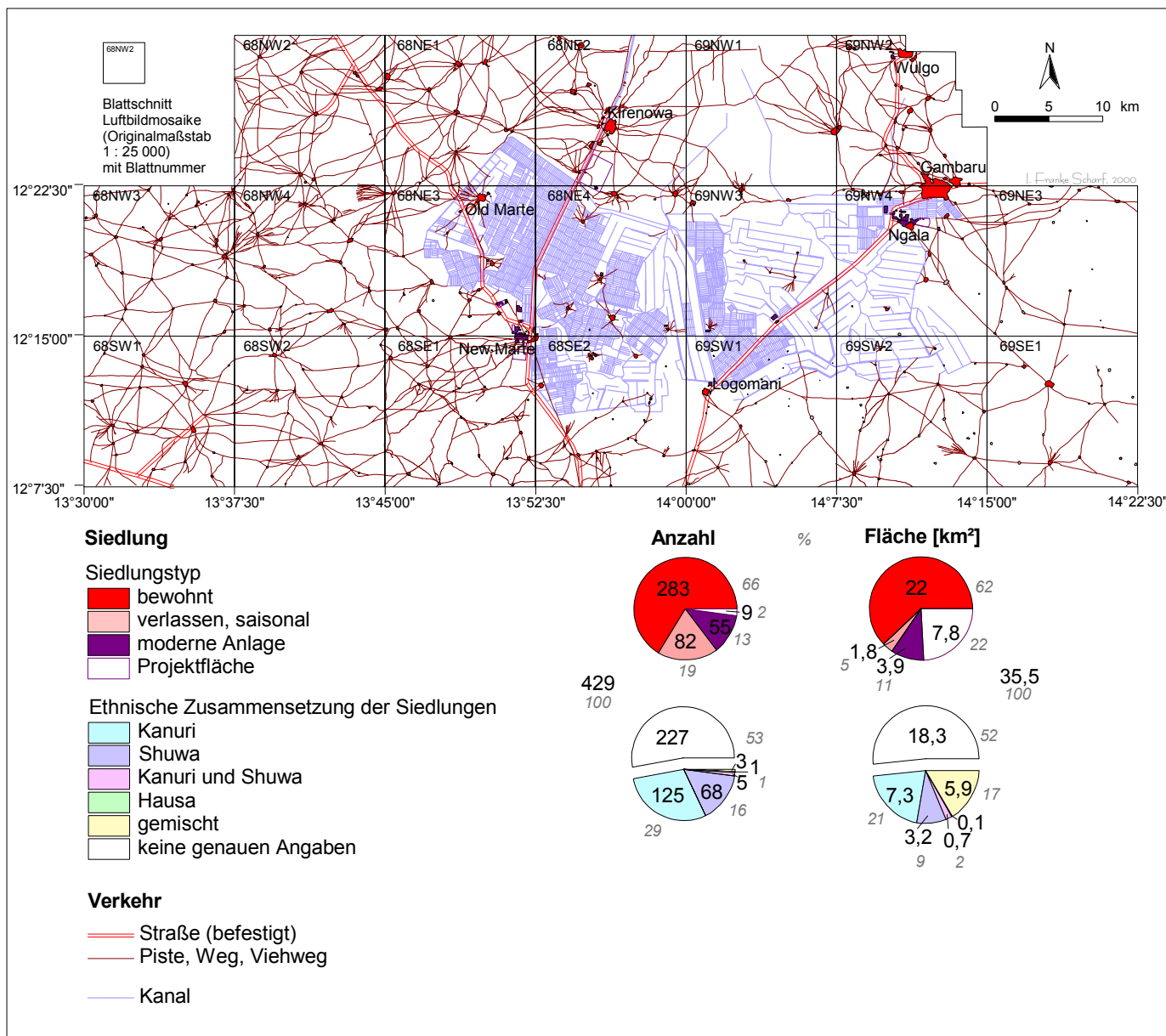


Abb. 19: Landbedeckungs- und Landnutzungskarte 1990: Bebauung und Bewässerungskanäle

6.1.3.1 Siedlungen

Das Untersuchungsgebiet ist im Vergleich zu anderen Gebieten im äußersten Nordosten Nigerias sehr dicht besiedelt (vgl. Abb. 11) und weist bis auf den zentralen nördlichen Bereich, mit einer etwas geringeren Dichte, eine gleichmäßige Verteilung der Siedlungsflächen auf. Insgesamt wurden 429 Siedlungen mit einer Gesamtfläche von fast 36 km² kartiert, das entspricht etwa 1% des gesamten Untersuchungsgebietes oder im Durchschnitt einer Siedlung pro 8 km².

Die größte Regelhaftigkeit weist die räumliche Verteilung der Siedlungen im Verhältnis zu den natürlichen Gegebenheiten auf (vgl. Beilage 1). Mehr als 82% aller Ansiedlungen sind auf sandigen Sedimenten angelegt. Von den restlichen sind zwei Drittel verlassene und saisonale Siedlungsplätze (12%) und nur ein sehr geringer Anteil aktuell bewohnt (knapp 5%) bzw. zum Bewässerungsprojekt gehörig (4 CBDA-Anlagen).

Auffallend ist, daß in den stärker sandigen Bereichen (nördlich des Strandwalles und im Westen) die Siedlungsdichte geringer ist, dafür aber deutlich mehr überdurchschnittlich große Siedlungen auftreten. In vielen Fällen korreliert dies, nach Aussagen der Bewohner, mit einem hohen Alter der Siedlungen. Die flächenmäßig größten Siedlungen sind heute auch die bedeutendsten: Gambaru als internationaler Ort an der kamerunischen Grenze nimmt mit Abstand die größte Fläche ein (4 km²). Kirenowa im zentralen nördlichen Bereich, Wulgo im äußersten Nordosten, sowie Old und New Marte im zentralen und Ngala ebenfalls im nordöstlichen Untersuchungsbereich sind weitere wichtige Orte. Alle letztgenannten sind aus ethnisch gemischter Bevölkerung zusammengesetzt und haben insbesondere im Zusammenhang mit dem Bewässerungsanbau ihre Bedeutung verstärken können. Außerdem stellen sie die Orte mit der stärksten Zuwanderung dar (vgl. auch Diagramme der Siedlungsfläche von ethnisch heterogenen Siedlungen in Abb. 19).



Abb. 20: Verlassene Kanurisiedlung Mulje auf einer sandigen Erhebung innerhalb der Tonebene (Oktober 1995)

Für die Darstellung in Beilage 1 und Abb. 19 wurden die Siedlungsflächen zusätzlich aufgeschlüsselt in aktuell permanent bewohnte Siedlungen (Anzahl 283, 66% aller Siedlungen), verlassene oder saisonale Siedlungsplätze (82, 19%) und in moderne Siedlungsanlagen (55+9, 15%). Letztere werden zum überwiegenden Teil von den seit Mitte der 1970er Jahre

von der *Chad Basin Development Authority (CBDA)* gebauten Anlagen des *South Chad Irrigation Project (SCIP)* gebildet. Bei diesen Flächen wurde nochmals eine Unterteilung in tatsächlich bebaute Flächen (lila dargestellt) und in für das Projekt reservierte, aber nicht bebaute Flächen (nur lila umrandet) vorgenommen. Im Flächenvergleich weisen die von den unterschiedlichen Projekten genutzten Flächen gegenüber den anderen mit 22% an der Gesamtsiedlungsfläche einen überproportional großen Anteil auf. Die verlassenen oder saisonal bewohnten Siedlungen nehmen erwartungsgemäß nur sehr kleine Flächen ein (5% der Gesamtsiedlungsfläche, vgl. Abb. 20 und Diagramme in Abb. 19).

Neben der Aufnahme der Siedlungsart, die direkt aus der Luftbildinterpretation abgeleitet werden konnte, wurde – sofern möglich – eine weitere Untergliederung der Siedlungen nach ethnischer Zusammensetzung vorgenommen. Diese Angaben konnten nur in wenigen Fällen aus den Luftbildern abgeleitet werden. Die Ergebnisse stammen deswegen aus Befragungen bei der Geländebegehung. Aufgrund der Größe des Untersuchungsgebietes und auch infolge vieler widersprüchlicher Aussagen ergab sich hier ein hoher Prozentsatz ohne bzw. mit unsicheren Angaben (weiße Flächen in den Diagrammen in Abb. 19). Das gilt insbesondere für die verlassenen Siedlungen, für die zu 60% keine Angaben vorliegen, im Vergleich zu 30% bei den aktuellen Siedlungen.



Abb. 21: Kanurisiedlung Aja Gana südlich Old Marte (Oktober 1995)

In Abbildung 19 ist neben der räumlichen Verteilung die Zusammensetzung der Siedlungen in Form von Kreisdiagrammen aufgeschlüsselt nach Siedlungsart und ethnischer Zugehörigkeit dargestellt. Von den bekannten Siedlungen (ausgenommen die *CBDA*-Anlagen) sind etwa zwei Drittel der Siedlungen von Kanuri (62%), etwa ein Drittel von Shuwa (34%) und nur eine Siedlung von Hausa bewohnt. 4% der Siedlungen sind von gemischt ethnischer

Zusammensetzung. Verwunderlich ist, daß die Verhältnisse ähnlich sind für die saisonalen und verlassenen Siedlungen. Demnach würden keine großen Unterschiede in der Mobilität der verschiedenen Ethnien bestehen. Die Zahlen verschieben sich nur absolut durch einen höheren Anteil unbekannter Angaben. Daß nicht mehr Shuwa-Siedlungen unter den saisonalen und verlassenen Ansiedlungen auftreten, könnte ein Hinweis dafür sein, daß auch immer mehr Angehörige dieser Ethnie sesshaft werden bzw. seltener Siedlungsplätze gewechselt werden.



Abb. 22: Shuwasiedlung Dubua (Oktober 1995)

Die Flächenbilanzierung im geographischen Informationssystem zeigt, daß die aus mehreren Ethnien gemischten Siedlungen deutlich größer sind als die Siedlungen, in denen Kanuri und Shuwa gemeinsam leben, und diese sind im Durchschnitt mehr als doppelt so groß wie die Siedlungen, in denen entweder Kanuri oder Shuwa allein leben. Die Kanuri-Siedlungen sind durchschnittlich etwas größer als die Shuwa-Ansiedlungen (vgl. Flächengrößen der Siedlungen aufgeschlüsselt nach Ethnien in Abb. 19 Kreisdiagramm unten rechts). Diesen Eindruck gewinnt man auch im Gelände. Allerdings ergeben sich bei der Kartierung dieser Siedlungen Schwierigkeiten bei der exakten Abgrenzung, denn häufig bestehen Siedlungen der Shuwa aus mehreren vereinzelt stehenden Ortsteilen (*Wards*) und die Ortsstruktur ist weniger dicht. Größere unbebaute Flächen werden für die Viehhaltung genutzt und auch die Behausungen nehmen häufig einen kleineren Raum ein. Die Kartierungen werden außerdem durch die häufiger auftretenden Shuwa-typischen Stroh Häuser erschwert (Abb. 22), die sich auf dem Luftbild weniger deutlich aus der umgebenden Landschaft abheben als die größeren eckigen Lehmgebäude der Kanuri, von denen die moderneren sogar mit Blechdächern versehen sind (Abb. 21).

Erstaunlicherweise beschränken sich die Shuwa-Ortschaften nicht auf den östlichen Bereich des dargestellten Ausschnittes, der im allgemeinen immer als Verbreitungsgebiet dieser Ethnie angegeben wird. Sie sind auf allen Kartenblättern zu finden. Im nördlichen Teil der Blätter 68NW3 und 68NW4, im südlichen Teil von 68NW2 sowie auch auf 68NE1 und 68NE2 finden sich auffällig viele und relativ große Shuwa-Ansiedlungen. Eventuell läßt sich für diese sehr sandigen Gebiete eine geringere Bodenfruchtbarkeit ableiten, die die stärker von Viehzucht lebenden Shuwa-Araber begünstigen würde.

Betrachtet man in der Kartierung die Verteilung der unterschiedenen Siedlungsarten im Untersuchungsgebiet, findet man eine Häufung der verlassenen Siedlungen im Südosten, nur sehr vereinzelt sind Wüstungen im Westen und Norden anzutreffen. Dabei ist davon auszugehen, daß die Kartiermöglichkeiten verlassener Siedlungsplätze im unruhigeren Gelände der Sandgebiete schlechter sind. Die Erklärung für die Häufung verlassener und saisonaler Siedlungen im Südosten (Blätter 69SW1, 69SW2 und 69SE1) ist aber sicherlich in der größeren Überflutungsgefahr in den flachen Tonebenen zu finden. Dies trifft sich mit Aussagen der befragten Bevölkerung, nach denen Siedlungen in sehr niederschlagsreichen Perioden immer wieder verlassen werden müssen. Im Gegensatz dazu werden in den westlichen und nördlichen sandigeren Bereichen des Untersuchungsgebietes hauptsächlich Trockenheit und Wassermangel als Gründe für die Siedlungsaufgabe angegeben. Dies unterstreicht einmal mehr einerseits die starke Abhängigkeit der anthropogenen Merkmale von den natürlichen Gegebenheiten des jeweiligen Raumausschnittes, andererseits aber, daß auf relativ kleinem Raum gegensätzliche Ursachen zu gleichen Handlungsabläufen führen können. Es ist deswegen sehr schwierig, von Einzelbeispielen auf allgemeingültige Aussagen für größere, insbesondere naturräumlich heterogene Gebiete zu schließen.

6.1.3.2 Verkehr

Die größten und bedeutendsten Siedlungen des Untersuchungsgebietes sind durch asphaltierte Straßen mit einer Länge von insgesamt etwa 150 km angebunden. Eine gut erhaltene Straße verläuft von Süden kommend von Maiduguri über Dikwa, mit kurzen Abzweigen nach Ngala und Wolgo, bis nach Gambaru zur kamerunischen Grenze. Ein weiterer Abzweig von dieser Straße kurz hinter Dikwa führt unter sehr schlechten Straßenbedingungen nach New Marte und von dort weiter nach Norden bis Kirenowa und nach Nordwesten an Old Marte vorbei Richtung Mongonu. Weitere kurze Straßenabschnitte führen nach Mintar (Blatt 68NW2) und Gumna (68SW1). 95% des über 3000 km langen Wegenetzes setzt sich aus Pisten, Wegen und Viehspuren zusammen.

Hinsichtlich der räumlichen Verteilung der Wege zeigt sich ein dichteres Netz in den sandigen Bereichen im Norden und Westen und zum Teil nur sehr spärliche Wege in den reinen Tongebieten. Eine Ursache dafür ist, daß während der mehrere Monate dauernden Regenzeit die Mobilität innerhalb der dann überschwemmten Tongebiete stark eingeschränkt ist. Häufig gibt es – wenn überhaupt – nur eine Möglichkeit, die Orte in den Tongebieten zu erreichen. Dafür müssen auch lange Umwege in Kauf genommen werden. Auffallend ist, daß im zentralen Untersuchungsgebiet kaum Wege und Viehspuren, und wenn, dann nur in direkter Umgebung der Siedlungen erkennbar sind, denn seit der Konstruktion der Bewässerungskanäle verlaufen Pisten und Wege fast immer auf den für die Kanäle aufgeschütteten Dämmen. Da die Pisten somit etwas höher liegen, hat sich die Erreichbarkeit vieler in der

Tonebene liegender Orte während der Regenzeit deutlich verbessert. Es lassen sich also bereits aus der Dichte des Wegenetzes Aussagen zum einen über die Erreichbarkeit (insbesondere während der Regenzeit), zum anderen aber auch grob über die Nutzungsdauer der Siedlung (permanent oder saisonal) treffen.

6.1.4 Landwirtschaft

In Abbildung 23 sind alle landwirtschaftlich genutzten Flächen des Untersuchungsgebietes entsprechend der Kartierung aus den Luftbildmosaiken und Luftbildern dargestellt. Die verschiedenen Anbauformen sind in den folgenden Unterkapiteln erläutert. Im Vordergrund stehen dabei die Merkmale, die direkt aus der Kartierung ableitbar sind; zusätzliche Informationen aus den Geländebefunden, die zum größten Teil in die Attributtabelle integriert wurden, fließen zur Erklärung ein.

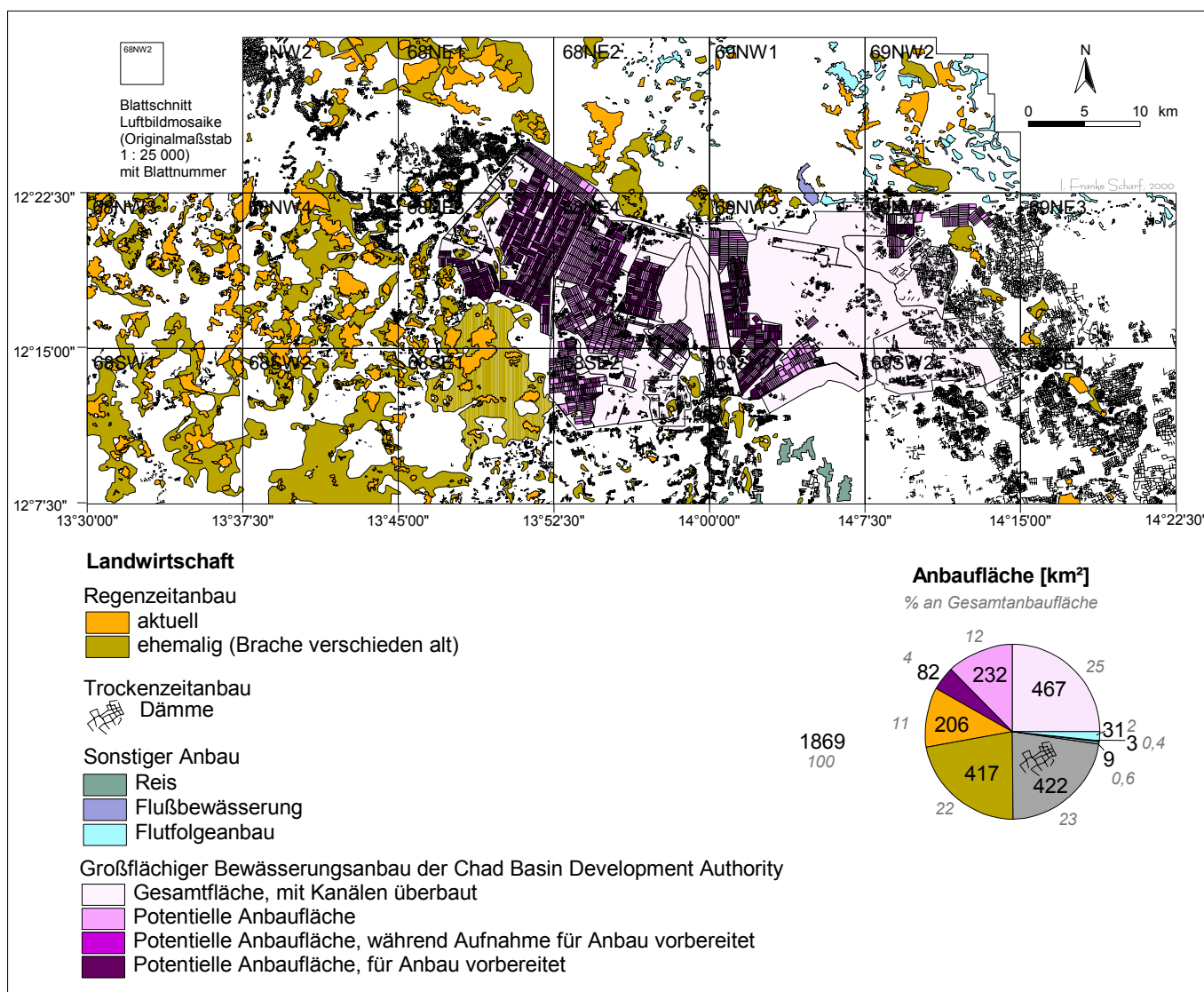


Abb. 23: Landbedeckungs- und Landnutzungskarte 1990: Landwirtschaft

6.1.4.1 Regenzeitbau

Nach Einsetzen der ersten Regenfälle im Frühjahr werden auf den sandigen Böden, auf denen das Wasser schnell versickert, neben den Hauptanbaukulturen Rispenhirse (*Sorghum bicolor*) und auf den stärker sandigen Bereichen Kolbenhirse (*Pennisetum americanum* oder *typhoides*) sowohl einzeln als auch in Mischkultur Mais (*Zea mais*), Bohnen (*Vigna unguiculata*), Erdnuß (*Arachis hypogaea*), Bambaranuß (*Voandzeia subterranea*), Ochra (*Hibiscus esculentus*) und auf kleineren Feldern vor allem in Hausnähe auch andere Gemüse wie Tomaten (*Lycopersicum esculentum*), Paprika (*Capsicum annuum*) oder Zwiebeln (*Allium cepa*) angepflanzt. Diese für den traditionellen Regenzeitbau genutzten Flächen nehmen mit insgesamt über 600 km² fast ein Fünftel (18%) der Gesamtfläche bzw. fast die Hälfte (43%) der Sandfläche ein. Sie sind in Beilage 1 und Abb. 23 in Orangetönen dargestellt.



Abb. 24: Rispenhirse im Regenzeitbau bei Old Marte (September 1995)

Der Bewuchs ist sehr inhomogen. Insbesondere in der Mitte fällt ein Bereich auf, in dem Bohnen im Mischanbau gepflanzt wurden.

Der Regenzeitbau wird ausschließlich auf den sandigen Sedimenten betrieben. Die Hauptanbauggebiete liegen damit im Westen des Untersuchungsgebietes (Blätter 68NW3, 68NW4, 68NE3, 68SW1, 68SW2 und 68SE1) und nördlich des Ngelewa-Strandwalles (Blätter 68NW2 und 68NE1 nordöstliche Bereiche, 68NE2, 69NW1, 69NW2). Weitere Regenzeitbauflächen folgen dem sandigeren Substrat auf der Linie Ngala-Kirzakata-Ndufu (Blätter 69NW4 und 69SE1) und Bula Cesabe-Logomani-Angawa (Blätter 68SE2 und 69SW1) sowie weiteren kleinen Sandflächen (auf den Blättern 68SE2, 69SW1 und 69SE1).

Auffallend ist, daß die beiden erstgenannten Gebiete in einer NW-SE (transversal) verlaufenden Linie liegen, während sich alle anderen Flächen – wenn eine allgemeine Ausrichtung erkennbar ist – dem NE-SW-Verlauf der Longitudinaldünenstrukturen anschließen, denen auch die fluviatilen Sedimente folgen (insbesondere im südwestlichen Untersuchungsgebiet, vgl. Beilage 1 und auch Kap. 3.1.2 und 6.1.1). Wenige Regenzeitanbauflächen finden sich auf den sandigen Sedimenten innerhalb der CBDA-Bewässerungsprojekfläche (um die Siedlungen bei Old Marte, Goniri und Njine im westlichen und südwestlichen Randbereich auf Blatt 68NE3 und bei Gumshe im zentralen südlichen Teil auf Blatt 68SE2).

Betrachtet man die räumliche Lage der während der Regenzeit bebauten Felder detaillierter, so fällt zunächst auf, daß die meisten und vor allem größten zusammenhängenden Anbauflächen in der Nähe der Siedlungen angelegt sind. Meist sind im direkten Umkreis um die Siedlung keine kultivierten Flächen zu finden (vgl. u.v.a. Dura und Wulwa auf Blatt 68NE3). Diese Bereiche sind laut Aussagen der Bewohner nicht bestellt, weil die Gefahr von Vieh zerstört zu werden, das sich in der Nähe der Siedlungen unbeobachtet bewegt, auf diesen ortsnahen Flächen sehr groß ist. Im Gelände erschienen gerade die Ringe um die Ortschaften stark degradiert.



Abb. 25: Frauen mahlen Kolbenhirse auf einem frisch geernteten Feld bei Wulwa (Oktober 1995)

Kolbenhirse wurde gemischt mit Bohnen angebaut. Nach der Ernte der Hirse bleiben nur die Bohnen (grün) auf dem Feld zurück

Extrem sandige Bereiche zeichnen sich durch größere Bestände an anspruchsloserer Kolbenhirse im Verhältnis zur Rispenhirse aus (z. B. in der Nähe der Ortschaften Yedi, Kulli, Wulwa, Bula Cesabe – vgl. auch Ortsname: Cesa [Kanuri] = Sand – u. a.). Allerdings sind während der Geländeaufenthalte häufig Gebiete vorgefunden worden, in denen Schäden durch Vogelfraß insbesondere an den Kolben der *Pennisetum*-Pflanzen aufgetreten waren.

Diese Probleme verstärken sich in Richtung Norden, wo sich zwar die Bedingungen zugunsten von Kolbenhirse verschieben (geringere Wasseransprüche), aber auch aufgrund des Tschadsees und vor allem in Gebieten mit höherer Baumdichte größere Vogelpopulationen anzutreffen sind. Abgesehen von den Hirsen konnten keine weiteren allgemeingültigen Unterschiede in der Verbreitung der Anbaufrüchte festgestellt werden. Da eine exakte Kartierung einzelner Anbaufrüchte aus den Luftbildern nicht möglich ist, ließen sich diese Informationen nur aus den Befragungen ableiten. Lediglich fielen noch Präferenzen für den Bohnenanbau in den nördlichen sandigeren Bereichen des Untersuchungsgebietes auf (z. B. bei Kirenowa und westlich davon, Blätter 68NW2, 68NE1, 68NE2). Außerdem fanden sich regionale Besonderheiten wie z. B. der Anbau und die Verarbeitung von Kalebassen bei Dagila (Blatt 69NW4).

Ein Drittel der kartierten Regenzeitbauflächen wurden 1990 aktuell genutzt (206 km², 33% der gesamten Regenzeitbaufläche). Auf der Karte in einem helleren orange-ocker sind Flächen abgehoben, die keinen aktuellen Anbau, aber Spuren ehemaliger Nutzung aufweisen (vgl. Kap. 5.1 und 5.4.1). In diese Klasse fallen verschieden alte Brachflächen mit einer Gesamtfläche von 417 km², also zwei Drittel der gesamten Regenzeitbaufläche (67%). Für einige dieser Flächen läßt sich die Brachedauer aus dem Luftbild abschätzen, eine allgemein anwendbare und eindeutige Klassifizierung ist aber nicht möglich. Aus diesem Grund erfolgt für die Darstellung keine weitere Differenzierung, wenn auch zum Teil genauere Angaben in der Datenbank gespeichert sind. Unter der Annahme, daß das Jahr 1990 einen durchschnittlichen Anbau aufweist und daß mit der Luftbildkartierung alle Brachflächen erfasst wurden, läßt sich für das Untersuchungsgebiet eine durchschnittliche Brachedauer von 2 Jahren ableiten. Da das Jahr 1990 aber unterdurchschnittliche Niederschläge aufweist (vgl. Abb. 6), ist eher mit noch kürzeren Brachedauern zu rechnen.

Fast die Hälfte der gesamten Sandfläche (43%) wird von Regenzeitbaufeldern eingenommen. Dabei treten kaum größere ungenutzte Bereiche auf. Lediglich im Süden an der Grenze zum großen Tongebiet (Blatt 68SE1, nördlich Kariari und östlich Gamala) befindet sich eine größere nicht genutzte Fläche auf sandigem Untergrund. Kleinere Bereiche finden sich im äußersten Westen des Untersuchungsgebietes (Südteil von Blatt 68NW3) sowie nördlich des Ngelewa-Walles westlich Kirenowa (Blatt 68NE1 und 68NE2). Auch weiter östlich treten als 'Sand' kartierte ungenutzte Bereiche auf, die jedoch eine Sonderstellung einnehmen (vgl. Flutfolgeanbau in Kap. 6.1.4.3 und auch Kap. 6.1.1).

6.1.4.2 Trockenzeitanbau

Während die Ernte auf den Regenzeitbauflächen – nach Anbaufrucht differenziert – am Ende der Regenzeit bzw. zu Anfang der Trockenzeit (September/Okttober) stattfindet, sind viele der tonigen Bereiche des Untersuchungsgebietes zu diesem Zeitpunkt noch nicht zugänglich. Das während der Regenzeit gefallene Niederschlagswasser kann in den Tonen aufgrund sehr geringer Infiltrationsraten nur sehr langsam versickern. Die Tongebiete können dafür in der darauffolgenden Trockenperiode kultiviert werden. Mit einer diesen besonderen Umständen angepaßten Technik werden auch die besonders nährstoffreichen Flächen auf den Vertisolen oder vertisolartigen Böden mit *Sorghum*-Hirse bestellt. Diese Anbaumethode der während der Trockenzeit wachsenden und ohne weitere Wasserzufuhr reifenden Pflanzen wird von den Bauern als *masakwa* bzw. die Pflanzen als *ngauwuli* oder

auch *ngauwuli firgibe* (*Firgi*-Hirse, Hirse oder *Sorghum* des Tons) bezeichnet. Die Namen und Bezeichnungen sind nicht immer eindeutig (vgl. z. B. KOLAWOLE et al. 1994).



Abb. 26: Familie auf dem Weg zum Umpflanzen der Trockenzeithirse (Oktober 1995)

Nach dem Ende der Regenzeit ist das Gras in den Tonebenen weitestgehend abgetrocknet. Im Hintergrund ist anhand der leichten sandigen Erhebung und der Bäume die Siedlung Shuare zu erkennen. In der Nähe der Siedlungen waren die Hirsepflanzen vorgezogen worden, die nun auf dem Esel zu den tonigen Feldern transportiert werden. Der Mann hält den Pflanzstock, mit dem die Pflanzlöcher angelegt werden und die Frau trägt Wasser zum Angießen der Pflanzen. Sie benötigen dann bis zur Ernte im Januar/Februar keine weitere Feuchtigkeit. Ein Trockenzeithirsefeld kurz vor der Ernte ist auf dem Titelbild dargestellt. Es unterscheidet sich nur durch seinen tonigen Untergrund von der Regenzeithirse.

Die Vorbereitung der Trockenzeitfelder und der Saatpflanzen findet bereits während der Regenzeit statt. Dazu werden an den jeweils tiefsten Seiten der Felder aus dem Bodenmaterial ungefähr 20 bis zu 100 cm hohe Dämme als Feldbegrenzungen angelegt bzw. ausgebessert. Sie halten das Wasser länger auf den Feldern und bewirken somit eine höhere Feuchtigkeitsspeicherung. Das während der Regenperiode fallende und anschließend noch längere Zeit stehende Wasser verhindert in vielen Fällen die übermäßige Ausbreitung von Unkraut. Wo dies nicht der Fall ist, muß es durch Abschneiden und/oder Brennen beseitigt werden. Die Sorghumpflanzen, die es in verschiedenen Varietäten gibt, werden vor dem Aussetzen in Saatbeeten nahe der Siedlungen vorgezogen. Diese Beete sind sandiger und liegen innerhalb der Regenzeitbauflächen. Von dort erfolgt mit dem Ende der letzten Regenfälle (September/Oktober) das Umsetzen auf die von Unkraut bereinigten und mit Dämmen umgebenen tonigen Trockenzeitfelder. Die Zeit des Umpflanzens wie auch die Auswahl der zu bepflanzenden Felder in der entsprechenden Saison wird von den Bauern

sorgfältig festgelegt und richtet sich nach den spezifischen Bodengegebenheiten und räumlichen wie auch zeitlichen Niederschlagsverhältnissen.

Ausführlichere Erläuterungen von Seiten unterschiedlicher Fachdisziplinen des Sonderforschungsbereiches 268 zu diesem Thema finden sich bei ZACH et al. 1996; PLATTE 1998: 105-109; KIRSCHT 1999: 147ff, 170ff, 194ff; sowie KAHLHEBER & NEUMANN (im Druck) (vgl. darin auch FRANKE-SCHARF, mit Karten speziell zum Trockenzeitanbau).

Die Kartierung der Trockenzeitanbauflächen konnte zunächst nur über das Nachzeichnen der Feldbegrenzungsdämme als Linien erfolgen, da am Ende der Regenzeit zum Aufnahmezeitpunkt der Luftbilder noch keine Pflanzen oder andere Merkmale erkennbar sind (vgl. Tab. 6 in Kap. 5.1). Aus der Gesamtlänge von über 5000 km Feldbegrenzungsdämmen lassen sich aber weder Bezüge zu den anderen Anbauformen noch flächenhafte Vergleiche ableiten. Aus diesem Grund wurde versucht, aus den linienhaften Objekten durch Nachbearbeitung Flächen abzuleiten (vgl. Kap. 5.7.2.3). Die unter Berücksichtigung von durchschnittlichen Feldgrößen und im Vergleich mit den Luftbildern vollzogene Auswertung ergab, daß eine Gesamtfläche von ungefähr 422 km² mit Trockenzeitdämmen versehen ist. Dies entspricht fast 12% der gesamten kartierten und 20% der tonigen Fläche.

Die Trockenzeitfelder weisen unterschiedliche Form, Größe und Ausrichtung auf, da sie sich sowohl den naturräumlichen Faktoren wie Relief, Bodenart und Bodentyp als auch den anthropogenen Gegebenheiten anpassen. Sie befinden sich ebenso wie die der Regenzeitanbauflächen bevorzugt in Dorfnähe, allerdings auf den tonigen Sedimenten (vgl. z. B. Saleri auf Blatt 69SW2). Da die Siedlungen fast immer etwas höher auf den sandigeren Bereichen angelegt sind, folgen die Dämme der Trockenzeitfelder meist ringförmig um die Siedlungen. Bei Siedlungen in größeren Sandbereichen gelangt man vom Dorf kommend zunächst zu den auf den Sanden angelegten Regenzeitanbaufeldern und anschließend an der Übergangszone zu den Tonen zu den Trockenzeitanbaufeldern (vgl. z. B. Gumshe oder Bula Cesabe, Blatt 68SE2). Dabei wird durch die Ausrichtung der Felddämme das zu den Tonen hin abfallende Relief gut nachgezeichnet. Es zeigt sich, daß in direkter Nähe zu den Flüssen (vgl. z. B. den Verlauf des Forumduma auf Blatt 69SE1) keine und nur selten in den Tiefenlinien der Gewässerrinnen (z. B. aber in der Umgebung von Duwa, Blatt 68NE1) Trockenzeitanbaudämme errichtet werden. An diesen grundwassernahen Standorten hält sich das Wasser auch ohne stauende Dämme lange genug, um Trockenzeitanbau betreiben zu können.

Die Feldgrößen schwanken zwischen sehr kleinen Feldern von ungefähr 600 m² (z. B. bei Kamzamo, 68SE2 oder südöstlich Logomani, 69SW1) und sehr großen Feldflächen von mehr als 4 ha (z. B. im östlichen Untersuchungsgebiet bei Ndufu, 69SE1). Die angegebenen Größen beziehen sich auf die von Dämmen umgebenen Flächen. KIRSCHT (1999: 223) gibt für die von Dämmen umschlossenen Areale – sogenannte *fangal* – eine durchschnittliche Größe von 5000 m² und für die Felder, die sich aus mehreren *fangal* zusammensetzen können Größen bis zu 14 000 m² an. Die kleineren Felder finden sich häufig in abgelegenen Gebieten, in denen der Trockenzeitanbau aufgrund ungünstigerer Boden- oder Wasserhältnisse ein größeres Risiko darstellt. In Gebieten, in denen der Trockenzeitanbau eine größere Bedeutung einnimmt, treten deutlich größere Felder auf (z. B. nordwestlich von Old Marte, 68NW2 oder östlich von Kuzuma, 68SW2). Die überdurchschnittlich großen Felder

werden meist nicht vollständig bzw. nur in sehr günstigen Jahren (bei ausreichend Regen und genügend Arbeitskräften) von einer Gruppe genutzt.

In den Luftbildern sind die Dämme der Trockenzeitfelder mit unterschiedlicher Deutlichkeit zu erkennen. Sie sind deswegen zunächst in drei Kategorien kartiert worden (vgl. Tab. 6 in Kap. 5.1). Da die Dämme vor fast jeder Pflanzsaison wieder aufgebaut oder zumindest repariert werden müssen, ist versucht worden, aus den Erhaltungszuständen der Dämme auf das Alter und die Nutzungsdauer der Felder zu schließen. Allgemeingültige Aussagen ließen sich aber nicht treffen, denn der Erhaltungszustand ist – stärker als vom Alter – abhängig von der Zusammensetzung des Bodens. In Gebieten mit größeren Tongehalten erhalten sich die Dämme länger als in den etwas sandigeren Bereichen. Zudem sind auch Dämme eindeutig lange nicht genutzter Flächen (z. B. innerhalb der *CBDA*-Bewässerungsflächen bei Old Marte) noch deutlich im Luftbild erkennbar.

Die Verbreitung der Trockenzeitanbauflächen richtet sich in erster Linie nach dem Sediment, denn die nötige Wasserspeicherkapazität für die viermonatige Reifezeit ohne weitere Niederschläge weisen nur die Tone auf. Aber auch innerhalb der Tonflächen läßt sich ein Verteilungsmuster erkennen. Trockenzeitanbauflächen werden bevorzugt in den Übergangsbereichen zu den herausragenden Sanddünen oder -inseln angelegt (vgl. z. B. um Wulwa, Blatt 68NE3), in denen neben ausreichenden Wasserverhältnissen auch die Bearbeitungsbedingungen günstiger sind (vgl. auch KIRSCHT & SKORUPINSKI 1996 und SKORUPINSKI im Druck). Dies bestätigt sich auch im Vergleich der Landnutzung mit der Bodenkarte der *Land Resource Study* (D.O.S. North East Nigeria, Soils, Kartenverzeichnis; vgl. auch Abb. 8), nach der die dichteste Verbreitung der Trockenzeitanbauflächen nicht auf den reinen Vertisolen ('*Vertisols of topographic depressions*') vorkommt, sondern deutlich mit den Übergangsböden aus Vertisolen und schwach entwickelten Böden ('*Topomorphic vertisols and weakly developed soils of deposition*') korreliert. Insbesondere sind dies die Hauptanbaugebiete westlich der Straße bei Mintar, die sich weiter nach Westen verstärkt fortsetzen auf Blatt 68NW2, der NE-SW verlaufende ungefähr 5 km breite Streifen von Burniski über Duwa, Miburta, Muum Gana bis Wubsa und Maoli auf den Blättern 68NE1, 68NE3 und 68NW4 sowie das größte geschlossene Trockenzeitanbaugebiet im Untersuchungsgebiet auf den Blättern 69NW4, 69NE3, 69SW2 und 69SE1.

Gemäß der räumlichen Verteilung der Trockenzeitanbauflächen gliedert sich das Untersuchungsgebiet in vier Regionen: Nördlich des Ngelewa-Strandwalles wird kein Trockenzeitanbau betrieben (Blätter 68NW und 68NE1 nordöstliche Bereiche sowie 68NE2, 69NW1, 69NW2 gesamt). Nur sehr vereinzelt treten Trockenzeitanbaufelder in den Sandflächen im südwestlichen Bereich der Karte auf. Sie sind nur sehr kleinräumig auf den zwischen den Sanden verlaufenden Tonestreifen zu finden. Interviews in dieser Region haben gezeigt, daß die Ernte der Trockenzeitanbaufelder nur einen kleinen Beitrag zur Subsistenzsicherung beisteuert, insbesondere dann, wenn die Erträge der Regenzeitanbaufürchte nicht ausreichend waren.

Das große geschlossene Tongebiet zwischen den beiden oben beschriebenen Regionen weist die größte Verbreitung der Trockenzeitanbauflächen auf. Allerdings muß man unterscheiden zwischen dem Bereich außerhalb des Bewässerungsprojektes der *Chad Basin Development Authority*, wo die großen zusammenhängenden Hauptanbaugebiete zu finden

sind (nordwestlich des Bewässerungsgebietes bzw. Old Marte auf den Blättern 68NW2, 68NW4 und 68NE1, 68NE3 sowie südöstlich des Projektbereiches bzw. südöstlich von Ngala auf den Blättern 69NW4, 69NE3, 69SW2 und 69SE1) und dem Bereich innerhalb des Projektbereiches, in dem nur sehr eingeschränkt Dämme für den Trockenzeitanbau zu finden sind. Denn mit Anlage der Bewässerungskanäle in den 1970er Jahren mußte eine große Anzahl von Trockenzeitanbauflächen aufgegeben werden.

Nach KOLAWOLE et al. (1994: 5) wurde 1973 von Regierungsseite geplant, 1000 km² des zuvor für den Trockenzeitanbau genutzten Landes zu erwerben und 55 000 Menschen umzusiedeln. Erst in letzter Zeit haben die Bauern wieder begonnen, auf Flächen innerhalb der Kanalsysteme zurückzugreifen. Die innerhalb des CBDA-Gebietes für den traditionellen Trockenzeitanbau genutzten Felder (92 km², nur 21% der gesamten Trockenzeitfelder) liegen zum größten Teil in den Bereichen, die nur mit Hauptkanälen überbaut sind (78 km², 19% der Trockenzeitfelder z. B. bei Ngala, Fuye, Sinnebago und Rego auf den Blättern 69NW3 und 69NW4 bzw. bei Logomani, Saula und Kamzamo auf 68SE2 und 69SW1). Nur 13 km² Trockenzeitanbaufläche (2% der gesamten Trockenzeitanbaufläche) wurde auch in Bereichen, die für den Bewässerungsanbau potentiell nutzbar sind, angelegt (z. B. südlich Bula Butube, bei Musune und Muga auf Blatt 68NE4 sowie bei Old Marte und Bulawo auf Blatt 68NE3 bzw. 68NE4 – hier liegen auch Felder innerhalb der 1990 für den Bewässerungsanbau vorbereiteten CBDA-Flächen – 0,4% aller Trockenzeitanbauflächen).

Zwei Gebiete innerhalb der eben beschriebenen zentralen Tonregion fallen heraus, da sie keine Dämme des Trockenzeitanbaus aufweisen. Das kleinere der beiden liegt im nordwestlichen Bereich des Untersuchungsgebietes südlich der Straße nach Mongonu in der Nähe von Mintar (Blatt 68NW2), das größere im zentralen südlichen Kartenabschnitt östlich der Straße Dikwa-Logomani (Blatt 69SW1). Bei beiden handelt es sich um stärker tonige und deutlich tiefer liegende Gebiete, die während der Regenzeit besonders lange überflutet sind. Zum Teil kann in diesen Gebieten, in denen Wasser auch ohne Dämme ausreichend lange auf den Feldern steht, ebenfalls in der Trockenzeit *Sorghum* kultiviert werden. Kleinflächig treten solche Bereiche, in denen ohne Dämme Trockenzeitsorghum angebaut wird, je nach Niederschlagsverhältnissen auch in anderen Tiefenbereichen des Untersuchungsgebietes auf; sie können aber durch die Luftbildkartierung nicht erfasst werden (vgl. SKORUPINSKI 2000).

6.1.4.3 Sonstige Anbauformen

Das soeben erwähnte Tongebiet im südlichen zentralen Kartenabschnitt stellt das weitverzweigte Überflutungs- und Versickerungstal des Yedseram-Flusses dar. In ihm, wie auch in den weiter südlich liegenden Bereichen, wird Reis (*Oryza sativa*) kultiviert (in Abb. 23 und in Beilage 1 blaugrün dargestellt). Mit einem Flächenanteil von 8,5 km² (0,2% der Gesamtfläche bzw. 0,4% der Tonfläche) hat der Reisanbau nur untergeordnete Bedeutung im Untersuchungsgebiet, erlangt aber etwas weiter südlich in der Umgebung von Dikwa als sogenannter 'Dikwa-Reis' eine größere wirtschaftliche Bedeutung.

Ebenfalls eine untergeordnete Rolle spielt eine Anbaukategorie, bei der entlang des in Richtung Tschadsee verlaufenden Entwässerungskanals nördlich Wurge (Blätter 69NW1 und 69NW3) Gemüse mit kleinflächiger traditioneller Bewässerungstechnik produziert wird

(Abb. 27). Die Wasserzufuhr erfolgt aus dem Kanal selbst oder aus dem zum Teil noch wasserführenden Fluß und benachbarten Gewässerrinnen über kleine Gräben oder durch manuelle Bewässerung. Hauptanbaukulturen sind Tomaten, Paprika und Zwiebeln. Die mit 2,6 km² recht große, aber einzige Fläche im Untersuchungsgebiet liegt ebenfalls auf tonigem Sediment und ist in Beilage 1 und Abb. 23 in blau-lila dargestellt.



Abb. 27: Flußbewässerungsfelder bei Wurge (Februar 1997)

Nicht dem Regenzeitbau im engeren Sinne zugeordnet wurden einige wenige Flächen, die während, aber vor allem auch – je nach Wasserdargebot – am Ende der Regenzeit bis weit in die Trockenzeit hinein genutzt werden. Die Anbaufrüchte der als Flutfolgeanbau bezeichneten Kategorie unterscheiden sich kaum von denen des Regenzeitbaus, es dominieren jedoch nach Aussagen der Bauern Mais und Bohnen. Der große Unterschied zum Regenzeitbau im engeren Sinne liegt in der zeitlich wie räumlich sehr flexiblen Reaktion auf die Bodenwasserverhältnisse. Außerdem unterscheiden sich die Flächen aufgrund ihrer Größe und Struktur deutlich im Luftbild. So werden vor allem geringfügige Reliefunterschiede (z. B. in Gewässerrinnen und an deren Ufern) und damit zusammenhängend steigende bzw. fallende Grund- und Oberflächenwasserstände für die meist sehr kleinflächige und sich räumlich stark ändernde Anlage von Feldern ausgenutzt.



Abb. 28: Flutfolgeanbaufelder in der Nähe von Wulgo (Februar 1997)

Im Hintergrund ist der sich nun allmählich wieder zurückziehende Tschadsee zu erkennen. Ihm folgen die Felder, auf denen hauptsächlich Bohnen und Mais angebaut werden. Grün zeigen sich Bohnen, die bereits aufgegangen sind. Im Vordergrund ist noch altes Maisstroh zu erkennen.

Der Großteil dieser Flächen liegt im nordöstlichen Bereich des Untersuchungsgebietes (Blätter 68NE2, 69NW1, 69NW2, 69NW3), aus dem sich der Tschadsee erst in den letzten Jahren zurückgezogen hat und wo infolgedessen die Bodenwasserverhältnisse kleinräumig sehr stark wechseln. Aber auch über das gesamte Gebiet verteilt treten kleinflächig Flutfolge-Anbauflächen auf, wobei die Flächengrößen meist für eine exakte Kartierung im Luftbild nicht ausreichen. Etwa 30 km² wurden als Flutfolgeanbau kartiert, weniger als 1% der Gesamtfläche (hellblau dargestellt in Abb. 23 und Beilagenkarte 1). Die zu dieser Kategorie gehörenden Felder liegen zum größten Teil im Bereich toniger Sedimente, da sich in diesen das Wasser nach der Regenzeit länger hält. Nur im Bereich von Blatt 69NW2 finden sich auch Felder auf den als 'Sand' kartierten Gebieten. Es handelt sich in fast allen Fällen aber um Senken und Gewässerrinnen, die hauptsächlich mit fluvialen Sedimenten gefüllt sind (vgl. Probleme der Sedimentkartierung von Blatt 69NW2 in Kap. 6.1). Eindrucksvoller noch läßt sich diese Anbauform weiter nördlich in direkter Nähe der Tschadseewasserfläche beobachten. Dem sich zurückziehenden See folgen die neuangelegten Felder Meter für Meter und Woche für Woche. Aus diesem Grund wurde auch hier der Begriff Flutfolgeanbau verwendet (Abb. 28). Die Erträge dieser Felder spielen häufig eine sehr wichtige Rolle in den Übergangszeiten, wenn die alte Ernte aufgebraucht und die neue noch nicht eingebracht ist.

6.1.4.4 Großflächiger Bewässerungsanbau



Abb. 29: Großflächiger Bewässerungsanbau der *Chad Basin Development Authority* (Februar 1997)

Sowohl die großen als auch die untergeordneten Bewässerungskanäle führen bei Gambaru Wasser. Im rechten Bildbereich sind Weizenanbauflächen zu erkennen. Teilweise sind die Kanäle undicht und führen zu überschwemmten Bereichen, wie im Vordergrund des Bildes.

Mit der Anlage von Bewässerungskanälen durch die *Chad Basin Development Authority* (CBDA) war geplant, innerhalb von 5 Jahren eine Gesamtfläche von fast 1200 km² (290 000 acres, nach FAO & UNDP 1973: Key Plan 2) für Bewässerungsanbau von vor allem Weizen, Reis und Baumwolle verfügbar zu machen (vgl. Abb. 29). Dies hätte einer Fläche von über einem Drittel des gesamten Untersuchungsgebietes (34%) bzw. von mehr als der Hälfte der Tonflächen (57%) entsprochen. Für den Zeitpunkt der vorliegenden Datengrundlage 1990 waren demgegenüber nach eigenen Kartierungen und Berechnungen ungefähr 470 km² (knapp 40% der geplanten Bewässerungsfläche) nur mit Hauptkanälen überbaut, also ohne nutzbare Einzelparzellen. Lediglich eine Fläche von 314 km² (unter 30% der geplanten Fläche) war bis zum Endstadium ausgebaut und damit potentiell als Bewässerungsland nutzbar (hell- und dunkelviolette Flächen innerhalb der Kanalsysteme in Abb. 23 und Beilagenkarte 1). Während der Saison 1990/91 wurden von dieser potentiell nutzbaren Fläche wiederum weniger als ein Drittel (82 km², 26% der potentiellen Nutzfläche) für den Anbau durch Bodenbearbeitungsmaschinen vorbereitet. Aufgrund dunklerer Grautöne im Luftbild lassen sich diese Flächen deutlich ausgliedern (dunkelviolett in Beilage 1). Welche Flächen letztendlich auch bepflanzt wurden bzw. ob in der Saison 1990/91 überhaupt bewässert und angebaut werden konnte, läßt sich anhand der Luftbilder vom Ende der Regenzeit nicht

aussagen. Anfragen bei der CBDA-Verwaltung (1995 und 1997) über die bewässerten und bepflanzten Anbauflächen sowie Ernteerträge gestalteten sich schwierig und ergaben sehr widersprüchliche Aussagen. Sie konnten deswegen nicht sinnvoll ausgewertet werden (vgl. PLATTE 1998: 112f; KIRSCHT 1999: 248ff).

Trotz aufwendiger Planung, kostspieliger Baumaßnahmen und großflächiger Landschaftseingriffe spielt das Bewässerungsprojekt – wenn überhaupt – nur eine sehr untergeordnete Rolle bei der Versorgung der Bevölkerung. Haupteinkommensquelle ist weiterhin der traditionelle Anbau auf kleinen Flächen wie er oben in seinen verschiedenen Kategorien beschrieben ist.

6.1.5 Vegetation

Die exakte Kartierung von Vegetationseinheiten aus panchromatischen Luftbildern im Maßstab 1 : 25 000 gestaltete sich relativ schwierig. Gut erkennbar sind Bäume und Büsche auf den Luftbildvorlagen, ihre Gliederung in entsprechend ihres Bedeckungsgrades homogene Flächen ist jedoch als sehr kritisch zu beurteilen. Noch weniger Information ist über Flächen mit inhomogener Gras- und Krautbedeckung abzuleiten. Damit ist auch die Ausweisung und Beurteilung von Weideflächen nur sehr eingeschränkt möglich. Sowohl Gras- und Krautbedeckung wie auch die Weidenutzung bestimmter Flächen ist nur aus dem Kontext mit dem Hintergrund der Geländeinformation erkennbar. Kartiert wurde aus den Luftbildern deswegen nur die Gehölzdichte.

6.1.5.1 Gehölze

Wie in Kap. 5.4.1 bereits beschrieben, wurde bei der Kartierung der Gehölze keine Differenzierung von Bäumen und Sträuchern vorgenommen. Aufgenommen wurden 807 mit Gehölzen bestandene Flächen, die insgesamt ungefähr 970 km² (27%) des kartierten Gebietes bedecken (hell-, mittel- und dunkelgrün schraffiert dargestellt in Abb. 30 und Beilage 1).

Allgemein läßt sich feststellen, daß Gehölze im gesamten Untersuchungsgebiet verteilt auftreten. Am stärksten vertreten sind sie jedoch nördlich des Ngelewa-Strandwalles (Blätter 68NW2, 68NE1 nordöstliche Teile, 68NE2, 69NW1, 69NW2) und im äußersten Nordosten des Kartiergebietes (v.a. Blatt 69NE3). Der westliche Bereich (Blätter 68NW3, 68NW4, 68NE3, 68SW1, 68SW2 und 68SE3) weist geringere gehölzbestandene Bereiche auf. Im Bereich des Bewässerungsprojektes und auch südöstlich davon (Blätter 68NE4, 68SE2 und 69NW3, 69NW4, 69SW1, 69SW2 und 69SE1) treten fast gar keine bzw. nur äußerst kleinflächig Gehölze auf. Eine Ausnahme bilden Teile der Blätter 69SW1 und 69NW4, wo auf dem bereits mehrfach beschriebenen NW-SE verlaufenden Streifen größere gehölzbestandene Flächen auftreten.

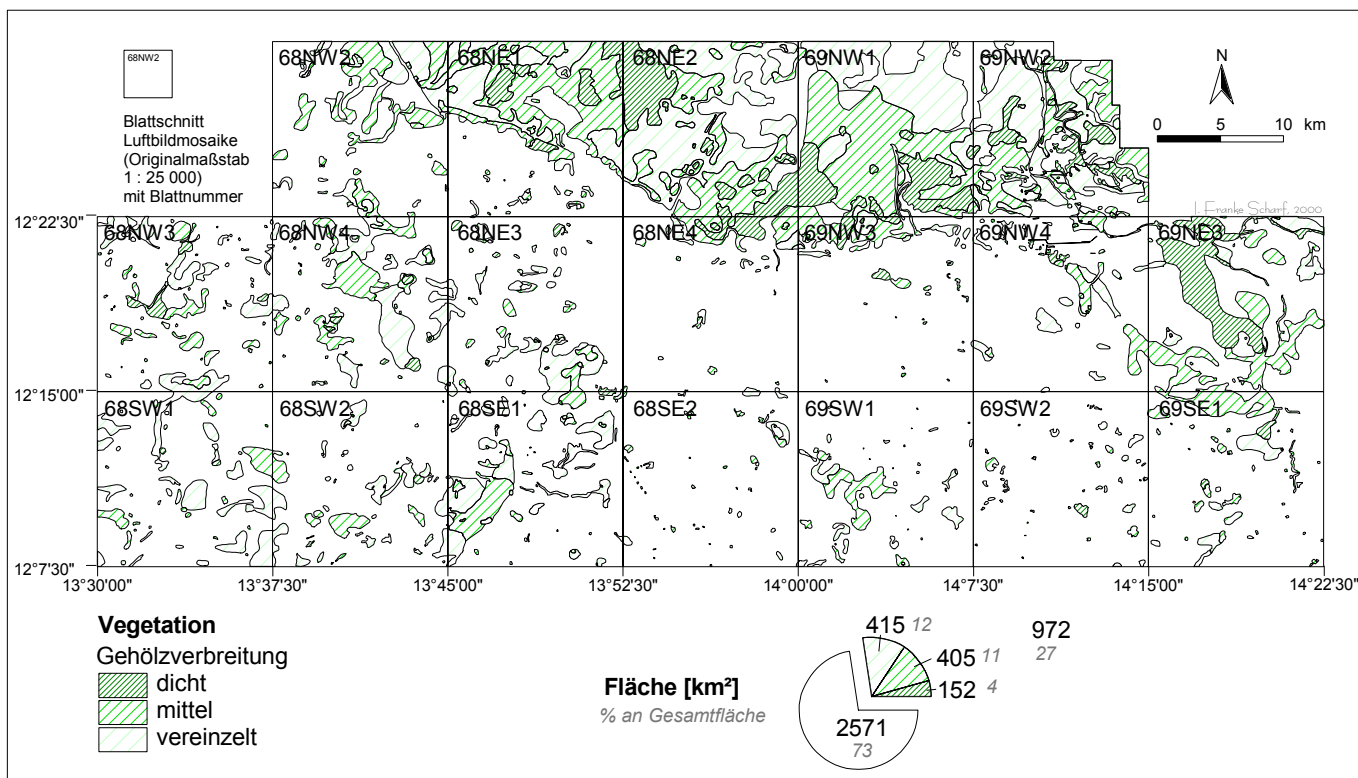


Abb. 30: Landbedeckungs- und Landnutzungskarte 1990: Gehölzverbreitung

Die eben beschriebene Ausrichtung wie auch die gesamte Verteilung der Gehölzflächen im Untersuchungsgebiet weist auf einen deutlichen Zusammenhang mit der Sedimentverteilung hin. So treten 70% aller Gehölzflächen auf sandigem Substrat auf und damit ist fast die Hälfte der Sandflächen (47% des mit sandigen Sedimenten bedeckten Untersuchungsgebietes), aber nur ein sehr kleiner Teil der Tonflächen (14% der tonigen Sedimente im Untersuchungsgebiet) mit mindestens vereinzelt auftretenden Gehölzen bestanden. Lokal müssten die Zahlen noch drastischer aussehen, da der Großteil der auf Tonen vorkommenden Gehölzflächen im Blatt 69NW1 liegt, für das die als tonig angegebene Sedimentverbreitung (vgl. Kap. 3.1.2 und 6.1.1) kritisch zu sehen ist. Auch das im äußersten Nordwesten des Untersuchungsgebietes liegende Blatt 69NW3 stellt mit seiner fast flächendeckend dichten Gehölzbedeckung einen noch genauer zu untersuchenden Sonderfall dar.

Interessanterweise stehen die Bäume und Sträucher auf den seltener gehölzbestandenen Tonflächen dichter als auf den häufiger gehölzbestandenen Sandflächen. Denn obwohl sich nur ein knappes Drittel der Gehölzflächen auf tonigem Substrat (30%) befindet, sind mit nur einem Fünftel unterdurchschnittlich viele der vereinzelt mit Gehölzen bestandenen Areale (20% aller vereinzelt mit Gehölzen bestandenen Flächen), dafür aber überdurchschnittlich viele Flächen mit mittlerer (36%) und noch mehr mit dichter Gehölzverbreitung (39%) auf den Tonen vertreten. Zu dieser Bilanz tragen vor allem wieder die Blätter 69NW1 und 69NW3 bei. Eine zusätzliche Ursache für die geringe Gehölzbedeckung auf den Tonen ist im Bewässerungsprojekt zu suchen, welches ja hauptsächlich im von Tonen bedeckten Bereich liegt. Mit der Installation der Anlagen und teilweiser Enteignung der Flächen wurde ein Großteil der noch vorhandenen Gehölzbedeckung vernichtet: nur knapp 5% der gesamten

überbauten und nur unter 1% der potentiellen Bewässerungsfläche sind mit Gehölzen bestanden.



Abb. 31: Typischer baumloser Ausschnitt aus der Tonebene bei Missini (Februar 1997)

Der weit und breit letzte Baum wird für Brennholz verwendet.

Aber auch die wenigen anderen mit Gehölzen bestandenen tonigen Areale passen in das oben skizzierte Bild. Sie liegen, abgesehen von den Siedlungsbereichen, fast ausschließlich in abgelegeneren weniger besiedelten Gebieten (so in der weiteren schwerer zugänglichen Umgebung von Mintar auf Blatt 68NW2, entlang des Ngelewa-Strandwalles zwischen Yedi, Zaga und Burniski auf Blatt 68NE1 und ebenso bei Dubua, Jillam, Bula Butube, Wofio auf den Blättern 68NE4, 69NW3 wie auch im Bereich der schwer erreichbaren Reisanbaugebiete auf Blatt 69SW1 und vereinzelt auftretend in den abgelegenen südöstlichen Tongebieten auf den Blättern 69SW1, 69SW2 und 69SE1). Häufig haben diese Wäldchen eine religiöse oder vergleichbare Bedeutung oder aber sie werden von der Bevölkerung aus Angst vor Überfällen gemieden. Der seltenere, aber dichtere Gehölzbewuchs auf den Tonflächen im Untersuchungsgebiet scheint mit den ungünstigeren und damit langsameren Wachstumsbedingungen zusammenzuhängen. Häufig werden auch Bäume und Büsche in der Nähe von Trockenzeitanbau Feldern gezielt gefällt, um zu vermeiden, daß Vögel dort landen und die Ernte zerstören (KIRSCHT 1999: 198).

Bei der flächenhaften Kartierung der Gehölze aus den Luftbildern war es zunächst nicht möglich, Aussagen über Arten und Pflanzengesellschaften zu treffen. Erhebungen hierzu wurden allerdings in Zusammenarbeit mit den Botanikern des Sonderforschungsbereiches im Gelände durchgeführt. Dem ersten Überblick soll aber noch eine detailliertere Auswertung

folgen, die unterschiedlichen Aspekten der Gehölzverteilung im Zusammenhang mit den naturräumlichen Faktoren nachgeht (vgl. STURM et al. 1996; STURM & ATALOHO 1995 unveröffentlichte Geländebefunde).

Neben der Korrelation von Gehölzbestand und Sedimentverbreitung besteht ein sehr auffälliger Zusammenhang auch zwischen dem Gehölzbestand und Siedlungsflächen. Generell wirken Siedlungen schützend auf Bäume und Sträucher im Untersuchungsgebiet. Insbesondere in den sehr alten Siedlungen auf den Sanden treten größere, ältere und dichtere Baumbestände auf. Auffällig wenige Siedlungen weisen keinen Baumbestand auf (die zwei Straßendörfer von Mushilla Gana und das Shuwa-Dorf Burta auf Blatt 68NW2, ein Teil der Siedlungsfläche von Old Marte auf Blatt 68NE3, die Kanuriorte Garno und Ka auf Blatt 68SE1, 68SE2 sowie Fuye und ein weiterer großer Ort auf Blatt 69NW4 bzw. 69SW2).

Im Vergleich dazu, daß nur etwas mehr als ein Viertel (27%) des gesamten kartierten Bereiches mit Gehölzen bestanden ist, sind mit 28 km² fast 80% der Siedlungsflächen baumbewachsen. Bei detaillierter Betrachtung ergibt sich sogar für die permanent bewohnten Siedlungen eine Gehölzbedeckung von 90% der Flächen und für die neuangelegten Projektsiedlungen von 92%. Nur die verlassenen oder saisonal bewohnten Orte weisen mit 64% gehölzbestandener Siedlungsfläche einen geringeren, aber immer noch überdurchschnittlichen Baumbestand auf. Die abgeleiteten Zahlen decken sich mit den Erfahrungen bei der Kartierung sowie den Befragungen und Beobachtungen im Gelände. Ehemalige Siedlungsplätze erkennt man häufig an einem kleinflächig auftretenden, sich von der Umgebung abhebenden Baumbestand (vgl. Abb. 20). Beobachtet wurde aber auch, daß die Bäume in den Wüstungen vor allem in den an Brennholz knapperen Regionen schnell abgehackt werden und häufig nur Stümpfe erhalten bleiben.

Weitere Zusammenhänge bestehen zwischen Gehölzflächen und Anbauflächen. Bereits angedeutet wurde im Zusammenhang mit den Untersuchungen zum Sediment, daß die Bewässerungsflächen der *CBDA* neben allen anderen starken landschaftsverändernden Eingriffen auch weitgehend frei von holziger Vegetation sind. Bemerkenswerterweise zeigen die für kleinflächige Bewässerung genutzten Felder bei Wurge einen mit 21% fast durchschnittlichen Baumbestand. Die Flächengröße wurde möglicherweise bei der Kartierung etwas überbewertet, denn es handelt sich um schwer zu kartierende fluß- und kanalbegleitende Ufervegetation, die aber mittel bis dicht und unter ökologischen Gesichtspunkten sehr wertvoll ist. Im Kontrast dazu finden sich im riesigen von Kanälen zerschnittenen *CBDA*-Gebiet nur minimale Reste solcher Ufervegetation (südlich Jillam und Bula Butube auf Blättern 68NE4 und 68NW3 sowie entlang des kanalisierten Mbuli bzw. seiner Altarm-Gewässerrinnen ebenfalls auf 69NW3). In diesem Zusammenhang sind noch einigermaßen erhaltene Bestände von Ufervegetation entlang des Forunduma und der El Beid-Zuflüsse und Gewässerrinnen zu nennen (69NW2, 69NE3 und 69SE1).

Was die Verbreitung von Bäumen und Sträuchern auf den Regenzeitbauflächen betrifft, läßt sich festhalten, daß auf 250 km² von insgesamt 623 km² Gehölze vorkommen. Das entspricht 40% aller während der Regenzeit genutzter Parzellen. Das zeigt, daß auch die sandigen Anbauflächen erhaltend auf Gehölzbestände (durchschnittliche Gehölzdichte 27%) wirken. Auffallenderweise treten auch auf den als Brache kartierten Flächen nicht mehr gehölzbestandene Flächen auf. Lediglich weisen die nicht aktuell genutzten Bereiche

geringfügig mehr dichtere (2% gegenüber 1,5%) und mitteldichte (16% gegenüber 9%) Gehölzbestände und etwas weniger vereinzelt stehende (23% gegenüber 29% auf den aktuell genutzten) auf. Auch dies könnte als ein Hinweis auf sehr kurze Brachezeiten gedeutet werden, denn je kürzer die Brachezeit, desto geringer ist die Regeneration des Baumbestandes. Allerdings kann auch eine während der Brachedauer anderweitig stattfindende Nutzung, z. B. Brennholzgewinnung, den Wiederbewuchs behindern.

Während die auf den häufig überfluteten Tonflächen lokalisierten Reisanbaugebiete so gut wie keine Gehölzbedeckung aufweisen (unter 3%), zeigen die in der Kategorie Flutfolgeanbau kartierten Anbauflächen die stärkste Gehölzbedeckung (44% aller Flutfolgefelder). Dies ist auf deren ausschließliche Lage zum einen in den sandigeren Gebieten nördlich des Ngelewa-Strandwalles und zum anderen auf die abgelegeneren und weniger dicht besiedelten Regionen zurückzuführen.

6.1.6 Sonstiges

Im Rahmen der sehr zeitaufwendigen Luftbildkartierungen konnte nur einer der unter Sonstiges zusammengefaßten Aspekte, die Deflationswannen und diese auch nur in einem kleinen Ausschnitt kartiert werden. Bereiche, für die keine Original-Luftbilder sondern nur die qualitativ schlechteren Luftbildmosaiken vorlagen, ließen keine zuverlässige Kartierung dieser kleinräumigen Strukturen zu. Noch mehr gilt dies für Brandflächen. Unterschiedliche Entwicklungsqualität sowie Störungen durch Wolken auf den panchromatischen Luftbildern ermöglichen keine eindeutige Ausweisung von Brandflächen.

6.1.6.1 Deflationserscheinungen

Als eine Form von Desertifikationserscheinungen fallen innerhalb des kartierten Gebietes Deflationswannen sehr deutlich auf (Abb. 32). Als meist runde, mehrere Meter große Vertiefungen, aus denen Sand ausgeblasen wurde und vegetationsfreie unfruchtbare Bereiche zurückbleiben, sind sie bei der visuellen Auswertung und anschließenden Digitalisierung am Digitalisierbrett zwar auf den originalen Luftbildern gut erkennbar, aber aufgrund ihrer geringen Größe nur sehr mühsam kartierbar und deswegen nicht vollständig, sondern nur für die Blätter 68SW1, 68SW2 und 68SE1 aufgenommen. Deflationswannen treten im Untersuchungsgebiet in den Bereichen mit größeren Sandmächtigkeiten auf, in denen fluviatile Abtragungs- und Formungsprozesse zurücktreten.

Der in Abb. 33 dargestellte Ausschnitt zeigt den Kernbereich des Vorkommens der Deflationswannen, der sich allerdings noch weiter nach Nordwesten fortsetzt. Für den Bereich der drei Kartenblätter wurden insgesamt etwa 600 Deflationswannen mit einer Gesamtfläche von etwas über 2,5 km² erfasst. Über 70% (1,8 km²) der von Deflation betroffenen Standorte befinden sich in den ehemals landwirtschaftlich genutzten Bereichen und bieten meist keine Nutzungsmöglichkeit mehr. Mit einem Anteil von unter 1% der Sandfläche der drei Blätter, ist die durch Deflation geschädigte Fläche allerdings nicht erheblich. Da für den in der Beilagenkarte 1 verwendeten Maßstabsbereich keine sinnvolle und vor allem keine flächenhafte Ausweisung der von Deflation betroffenen Areale möglich ist, wurde dort auf eine Darstellung verzichtet. Für Ausschnitte des Untersuchungsgebietes wurden detailliertere Auswertungen zu Desertifikationserscheinungen auf Grundlage visueller Luftbilddauswertungen

(SKORUPINSKI & FRANKE-SCHARF 1997) und automatischer Satellitenbildklassifizierungen (FRANKE-SCHARF & SKORUPINSKI 2000) durchgeführt. In den beiden zitierten Arbeiten sind Beschreibungen der von den Umlagerungsprozessen betroffenen Bodenprofile ausgeführt.



Abb. 32: Deflationswanne westlich Dura (November 1995, T. Skorupinski)

Deflationswannen entstehen, wenn äolische Umlagerungsprozesse den grauen tonigeren Unterboden freilegen. Vegetationsbedeckte Flächen sind vor Ausblasung geschützt. Zum Teil lagert sich an ihnen Sand horstartig an. Viehspuren, wie sie im Vordergrund erkennbar sind, zerstören häufig zunächst die Vegetationsdecke und sind dann Ansatzpunkte für Deflation.

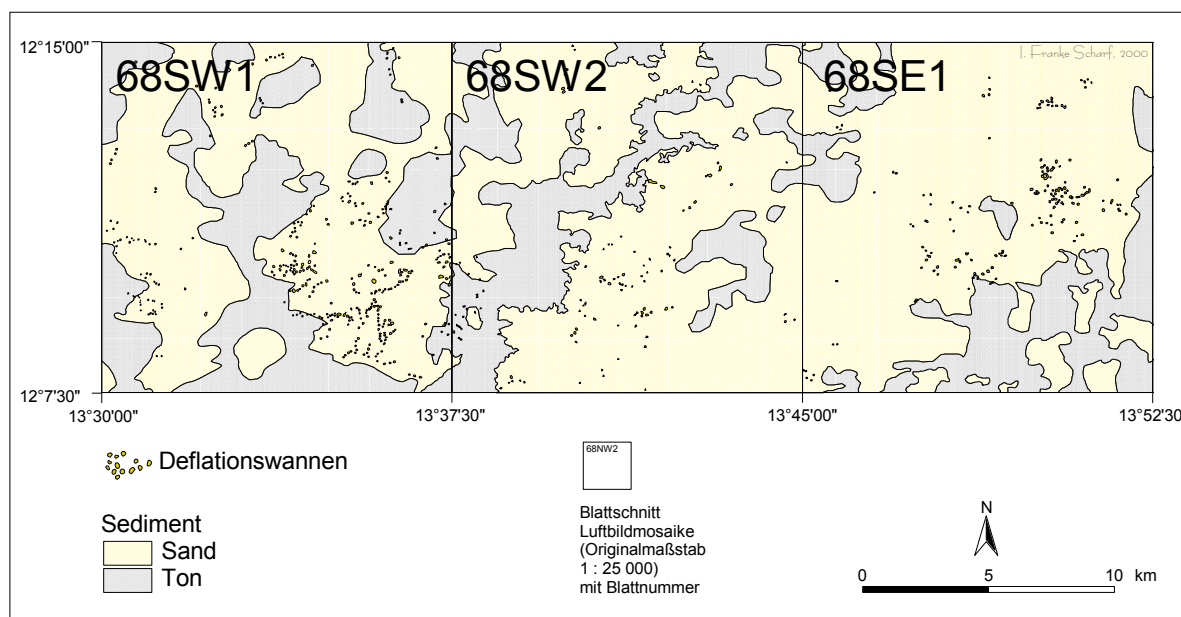


Abb. 33: Landbedeckungs- und Landnutzungskarte 1990: Deflationswannen im Bereich der Kartenblätter 68SW1, 68SW2 und 68SE1

6.1.7 Zusammenfassung der aktuellen Flächenverteilung

In den vorangegangenen Unterkapiteln sind die Ergebnisse der Luftbild- und Luftbildmosaikauswertung für das Jahr 1990 in Einzelheiten, zunächst für jedes Thema separat, als auch in Relation zu thematisch verknüpften Themen dargestellt. Die Vorstellung erfolgte in Form von thematischen Detailkarten, um über räumliche Verteilungen Auskunft zu geben und in Form von Diagrammen, um qualitative und quantitative Aspekte hervorzuheben. Die Zusammenstellung aller Themen (bis auf Deflationswannen und zusätzliche Attributinformation) ist mit Beilagenkarte 1 gegeben. In Abbildung 34 wurde der Versuch unternommen, in Ergänzung zur Landbedeckungs- und Landnutzungskarte eine zusammenfassende Beschreibung des Untersuchungsgebietes für das Jahr 1990 zu liefern. Die für die Untersuchung angewendete Darstellungsweise ermöglicht neben dem räumlichen Abbild durch die Karten so auch einen direkten qualitativ-quantitativen Vergleich unterschiedlicher Regionen bzw. gleicher Regionen zu unterschiedlichen Zeitpunkten (vgl. auch Abb. 46 in Kap. 6.2.7 und Abb. 59 in Kap. 6.4.7).

Abbildung 34 setzt sich aus zwei überlagerten Kreis- und einem Balkendiagramm zusammen. Erstere Diagrammform wird für die flächenhaften und letztere für die linienhaften Elemente verwendet (vgl. Tab. 6 in Kap. 5.1). Dabei zeigt der äußere Ring über die Landbedeckung die natürliche Ausgangslage im Untersuchungsgebiet. Wasserflächen fanden allerdings aufgrund ihres sehr geringen Flächenanteils, die Gehölzbedeckung aufgrund ihrer Komplexität keinen Eingang in die Graphik. Der innere Kreis spiegelt in seiner absoluten Größe die Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes mit den verschiedenen Landnutzungseinheiten wider (im Vergleich dazu die Teiluntersuchungsgebiete in Abb. 46 und 59, Ausgangspunkt für beide Kreisdiagramme ist bei 90°).

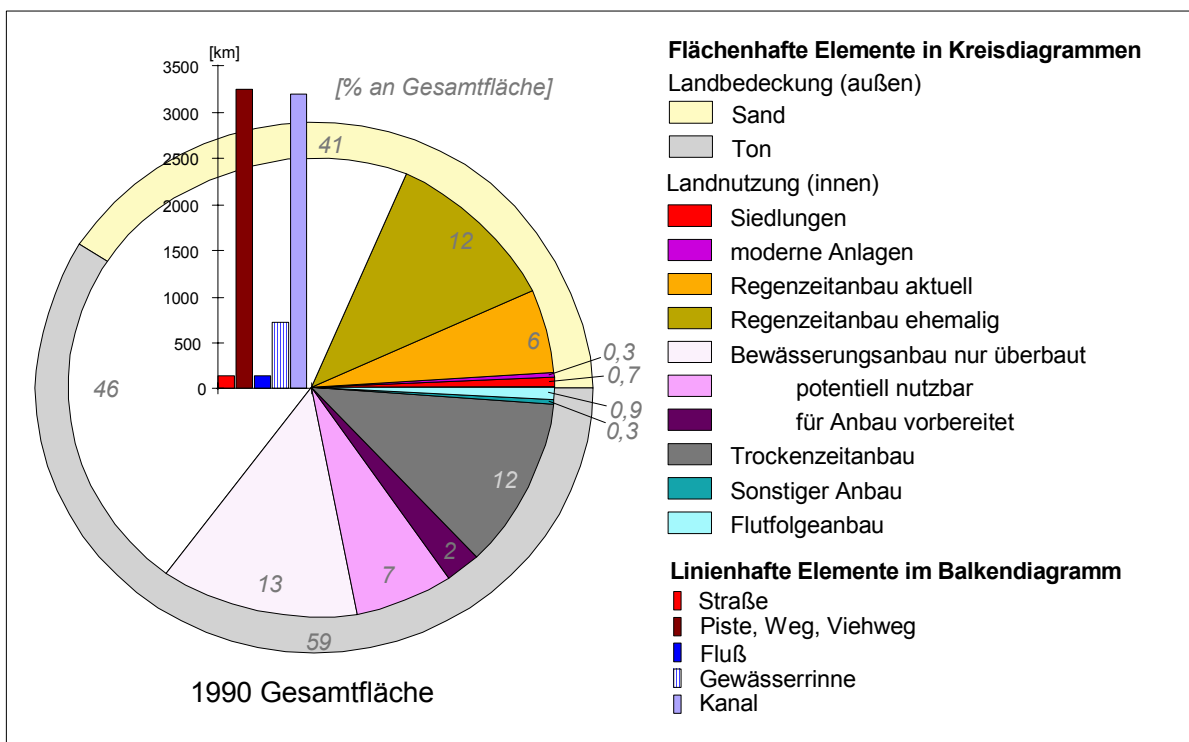


Abb. 34: Zusammenfassung Landbedeckung und Landnutzung 1990 für das gesamte Untersuchungsgebiet

Unter Berücksichtigung der flächenhaften Themen ergibt sich daraus folgendes Gesamtbild: Siedlungen bzw. bebaute Flächen nehmen einen Anteil von 1% (rote und lila Flächen) und landwirtschaftliche Nutzflächen von fast 53% des Untersuchungsgebietes ein. Während sich die Siedlungen fast ausschließlich auf die Sandgebiete verteilen, findet die landwirtschaftliche Nutzung auf beiden Substraten statt (vgl. Lage im Verhältnis zum äußeren Ring). Insgesamt ist der tonige Bereich entsprechend seiner größeren Verbreitung (59% der gesamten Fläche) stärker genutzt: zum einen für den traditionellen Trockenzeitanbau (in grau dargestellt) auf 12% und zum anderen für den großflächigen Bewässerungsanbau (in verschiedenen lila Farbtönen) auf 22% der Gesamtfläche (mit nur geringfügigen Überlappungen). Auf 18% der sandigen Substraten (41% der Gesamtfläche) wird Regenzeitanbau (orange und ocker) betrieben (allerdings wurde nur ein Drittel davon aktuell (orange) im Jahr der Kartierung bestellt). Zu ungefähr 1% treten noch die sonstigen Anbauformen auf beiden Sedimentbereichen auf.

Nicht in Abb. 34 dargestellt, aber ebenfalls abhängig vom Sediment ist die Gehölzverbreitung bzw. die Gehölzdichte. Insgesamt ist mit 27% nur etwas mehr als ein Viertel der Gesamtfläche mit Gehölzen bestanden. Hauptsächlich handelt es sich um Flächen mit vereinzelt stehenden Bäumen und Sträuchern. Die Sandflächen weisen zu 41% eine deutlich stärkere Baumbedeckung auf als die Tonflächen mit nur 14%.

Weniger als 1% ist als Wasserfläche ausgewiesen. In den von Deflation betroffenen Bereichen des Untersuchungsgebietes treten Schädigungen an 1% der Sandflächen auf. Bei Bezugnahme auf die Gesamtfläche würden diese Bereiche ein noch deutlich geringeres Gewicht erhalten. Nicht berücksichtigt werden können bei der Flächenverteilung die linienhaften Elemente wie Verkehrswege, Flüsse und Kanäle, die allerdings auch keine größeren Flächen bedecken. Um sie dennoch für Vergleiche mit anderen Regionen oder mit anderen Zeitpunkten heranziehen zu können, wurden sie in Form eines Balkendiagrammes in Abb. 34 integriert.

6.2 Saisonale Dynamik

Die im vorangegangenen Unterkapitel (6.1) wie auch die im letzten Ergebniskapitel (6.4) dargestellten Beschreibungen der Landschafts- und Landnutzungssituation sind jeweils abgeleitet aus Luftbildbefliegungen, die innerhalb weniger Tage durchgeführt worden sind, sich also auf nur einen Zeitpunkt beziehen. Da der Zustand einer Landschaft und die damit direkt zusammenhängende Landnutzung zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Jahresverlauf sehr variabel sein kann, ist es für das Verständnis dieser punktuellen Zustandsbeschreibungen unabdingbar, sie unter Einbeziehung der saisonal ablaufenden Dynamik zu verstehen. Dieser Forderung kommt eine noch höhere Bedeutung in semiariden und damit extrem veränderlichen Landschaften zu.

Im folgenden sollen deswegen anhand mehrerer Satellitenszenen, die zu verschiedenen Jahreszeiten aufgenommen worden sind, die unterschiedlichen phänologischen Zustände im Untersuchungsgebiet beleuchtet und interpretiert werden: ausgehend vom allgemeinen Gesamteindruck der zu bestimmten saisonalen Zeitpunkten im Satellitenbild wiedergegebenen Landschaft und vertiefend in der Darstellung der unterschiedlichen Landschafts- und Landnutzungseinheiten (Kap. 6.2.1 bis 6.2.7). Die Auswertung beschränkt sich auf die in Kapitel 4.4.3 beschriebenen *SPOT*-Satellitenszenen, da nur diese Daten momentan eine zeitlich dichtere Abdeckung ermöglichen. Ein für das Verständnis wichtiger Bezug besteht zu den unter Kapitel 5.6 zusammengestellten Methoden und Vorgehensweisen. Regional wird das Gebiet eingegrenzt auf den engeren Untersuchungsbereich (vgl. Abb. 12), für den im Anschluß auch interannuelle Unterschiede (Kap. 6.3) und langfristige Veränderungen (Kap. 6.4) kartiert und interpretiert sind. Wie bereits in den Betrachtungen zum Stand der Forschung (Kap. 2.2) angedeutet, lassen sich die Erkenntnisse aus den Untersuchungen zu saisonalen Veränderungen zusätzlich nutzen, um verbesserte automatische Landschafts- und Landnutzungsklassifizierungen durchzuführen. Die dazu erzielten Ergebnisse sind in Kapitel 6.2.7 zusammengefasst.

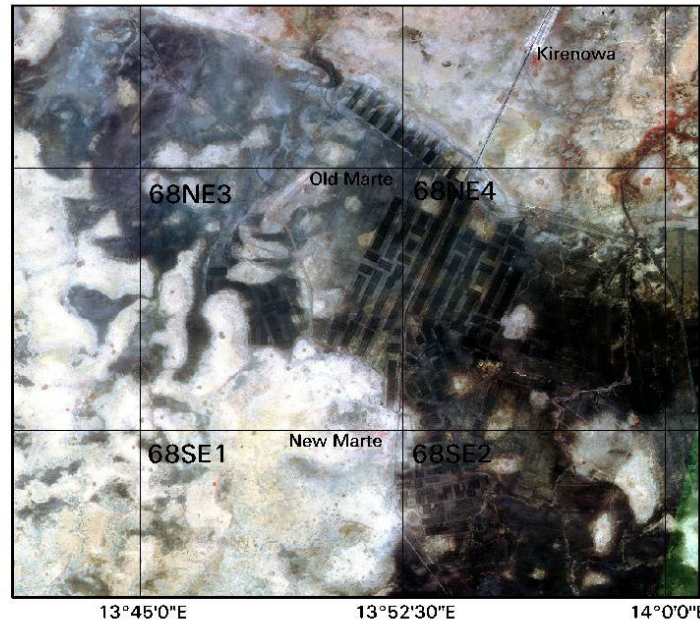
Fünf verschiedene Szenen unterschiedlicher Zeitpunkte wurden in die Untersuchungen zur saisonalen Dynamik einbezogen. Sie sind in Abb. 35a dargestellt. Vier der Ausschnitte konnten während einer Vegetationsperiode in der Saison 1995/96 aufgenommen werden – leider nicht in der gewünschten zeitlichen Verteilung. Ein zu Beginn der Regenzeit im Juni bestelltes Bild konnte aufgrund von Wolken erst am 6. September (allerdings auch nur mit Wolken) realisiert werden. Der Aufnahmezeitpunkt der zweiten Szene (8. Oktober) zum Ende der Regenzeit ist für sich gesehen ideal – direkt mit dem Ende der Niederschläge –, liegt aber nur einen Monat nach dem der vorherigen Szene. Die dritte Szene vom 29. November spiegelt die Landschaft etwa 6 Wochen nach Ende der Niederschläge wider, während die vierte Szene am 16. Januar aufgenommen ist und vor allem zur Beschreibung der Landnutzung in der Trockenzeit Verwendung findet. Günstig ist dieser Zeitpunkt zusätzlich zum Vergleich mit einer bereits in einem ähnlichen Ausschnitt vorliegenden *SPOT*-Szene vom 15. Januar 1995 (vgl. Kap. 6.3). Da eine Szene vom Ende der Trockenzeit (9. April 1986) – wenn auch aus einer anderen Saison – bereits vorhanden war, wurde auf eine Neuaufnahme verzichtet. Die Aprilszene ist im Gegensatz zu allen anderen eine Standardaufnahme (vgl. Tab. 5 und Kap. 4.4.3), der Ausschnitt des Untersuchungsgebietes deswe-

gen nicht komplett abgedeckt. Deswegen mußte vor der Bearbeitung mit den südlich und östlich anschließenden Szenen gleichen Datums ein Mosaik erstellt werden.

Wie Abb. 35 zeigt, decken nach der Mosaikierung der April-Szene aus drei Einzelszenen die Ausschnitte sämtlicher Zeitpunkte das etwa 1100 km² große Teiluntersuchungsgebiet (vgl. Abb. 12) ab. Mit Ausnahme des Septemberbildes liegen alle Ausschnitte in der vorliegenden Darstellung in zufriedenstellender Qualität vor. In der Septembereaufnahme stören jedoch vor allem im Nordwesten und Südosten des Bildes zahlreiche Wolken (weiß) mit ihren Wolken-schatten (schwarz, aufgrund der Beleuchtung westlich versetzt) und im Nordosten und Süd-westen unregelmäßig starke Dunstschleier. Die Verteilung dieser atmosphärischen Störeinflüsse ermöglicht zwar eine generelle Beurteilung der Landschaftssituation in der Regenzeit (vgl. Abb. 35a) und läßt auch bedingt Aussagen zu den meisten Landschafts- und Nutzungseinheiten zu (Abb. 35b), verhindert aber eine sinnvolle Verwendung dieser Daten in automatischen Bildverarbeitungsverfahren. Störungen dieser Größenordnung, die in allen Wellenlängenbereichen auftreten, lassen sich auch durch aufwendige Korrekturverfahren nicht beheben.

Auf den ersten Blick fällt eine Gliederung der fünf Szenen in zwei Gruppen auf. Während April-, November- und Januarszene generell ähnliche, eher gedämpfte Farbtöne (bläulich-grau-braun und hellere) aufweisen, dominieren in den beiden Regenzeitszenen (September und Oktober) intensivere Farben, vor allem Rottöne und in zweiter Linie intensivere Blau-, aber auch Grün-Braun-Töne. Dieser erste Eindruck gibt die generelle Situation der abweichenden Reflexionseigenschaften aufgrund unterschiedlicher phänologischer Zustände sehr gut wieder. Ausgehend vom Höhepunkt der Regenzeit (vgl. Abb. 5) – repräsentiert durch September- und Oktoberbild – stellen sich die vegetationsbestandenen Flächen mit einer extrem hohen Reflexion vor allem im Infrarot-Wellenlängenbereich dar (rote Farben in Abb. 35). In Bildbereichen, in denen durch Überflutung der wassergesättigten Tone keine Vegetation gedeihen kann, dominiert die Reflexion im grünen sichtbaren Wellenlängenspektrum (blaue Farben in Abb. 35). In der Trockenzeit hingegen – sichtbar im April-, November- und Januarbild – gleichen sich die Reflexionswerte in den verschiedenen Wellenlängenbereichen generell an und bilden sich in Mischfarben ab.

9. April 1986



Ausschnitte der SPOT-XS-Satellitenszenen
RGB-Darstellung: 3, 2, 1 (kontrastgestreckt)

68NE3 Blattschnitt Luftbildmosaik
(Originalmaßstab 1 : 25 000)
mit Blattnummer

0 10 km

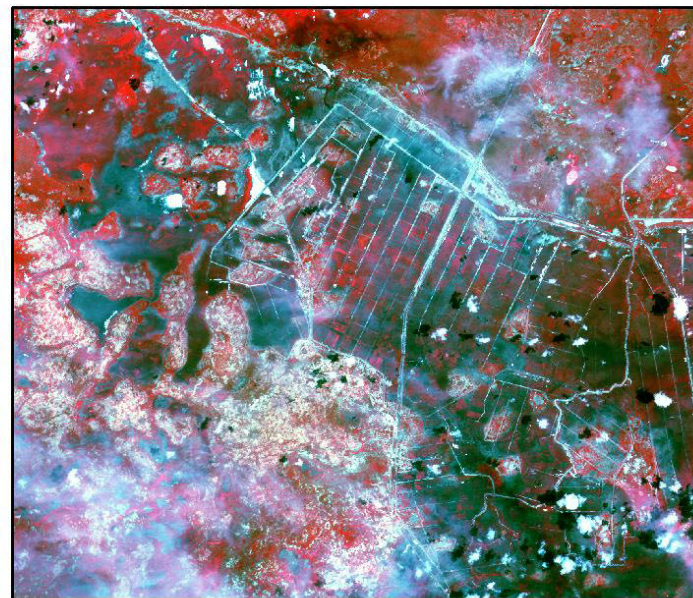
Bildverarbeitung und Layout: I. Franke Scharf, 2000

rechts: Legende (ausklappbar)

Ausgewählte Landschafts-
und Landnutzungseinheiten
im saisonalen Verlauf

0 1 km

6. September 1995



8. Oktober 1995



29. November 1995



16. Januar 1996



9. April 1986

6. Sept. 1995

8. Okt. 1995

29. Nov. 1995

16. Januar 1996

Siedlung
(Old Marte)



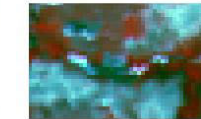
Straße
Weg



Temporäre
Wasserfläche



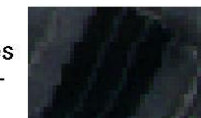
Fluß bzw.
Gewässerrinne



Kanal
geflutet



Kanalsystem
mit Flächen des
Bewässerungs-
anbaus



Regenzeit-
anbau



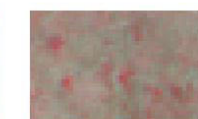
Trockenzeit-
anbau



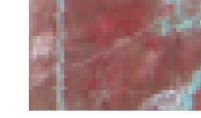
Ton
(ohne Anbau)



Sand
(ohne Anbau):
Gehölze
vereinzelt



Gehölze
mittel



Gehölze
dicht



Deflations-
erscheinungen



Abb. 35: Saisonale Veränderungen anhand von 5 SPOT-XS-Satellitenszenenausschnitten (a) mit Beispielen verschiedener Landschafts- und Landnutzungseinheiten als Legende (b - ausklappbare Rückseite)

Die für den Gesamtausschnitt gültigen Beschreibungen lassen sich durch statistische Analysen der multitemporalen Szenen belegen. In Abbildung 36 sind die wichtigsten Merkmale der Grauwertverteilungen in Abhängigkeit vom Spektralbereich und Aufnahmezeitpunkt aufgetragen. Vor allem die Mittelwerte der einzelnen Spektralkanäle geben die oben erläuterten Zusammenhänge gut wieder. Die Standardabweichung liefert neben Minimal- und Maximalwerten ein Maß für die Streuung der Grauwerte über den Wertebereich und damit einen Anhaltspunkt über den Informationsgehalt. Höhere Minimalwerte treten mit größeren Streueinflüssen durch die Atmosphäre auf, die sich bei höheren Wellenlängen reduzieren.

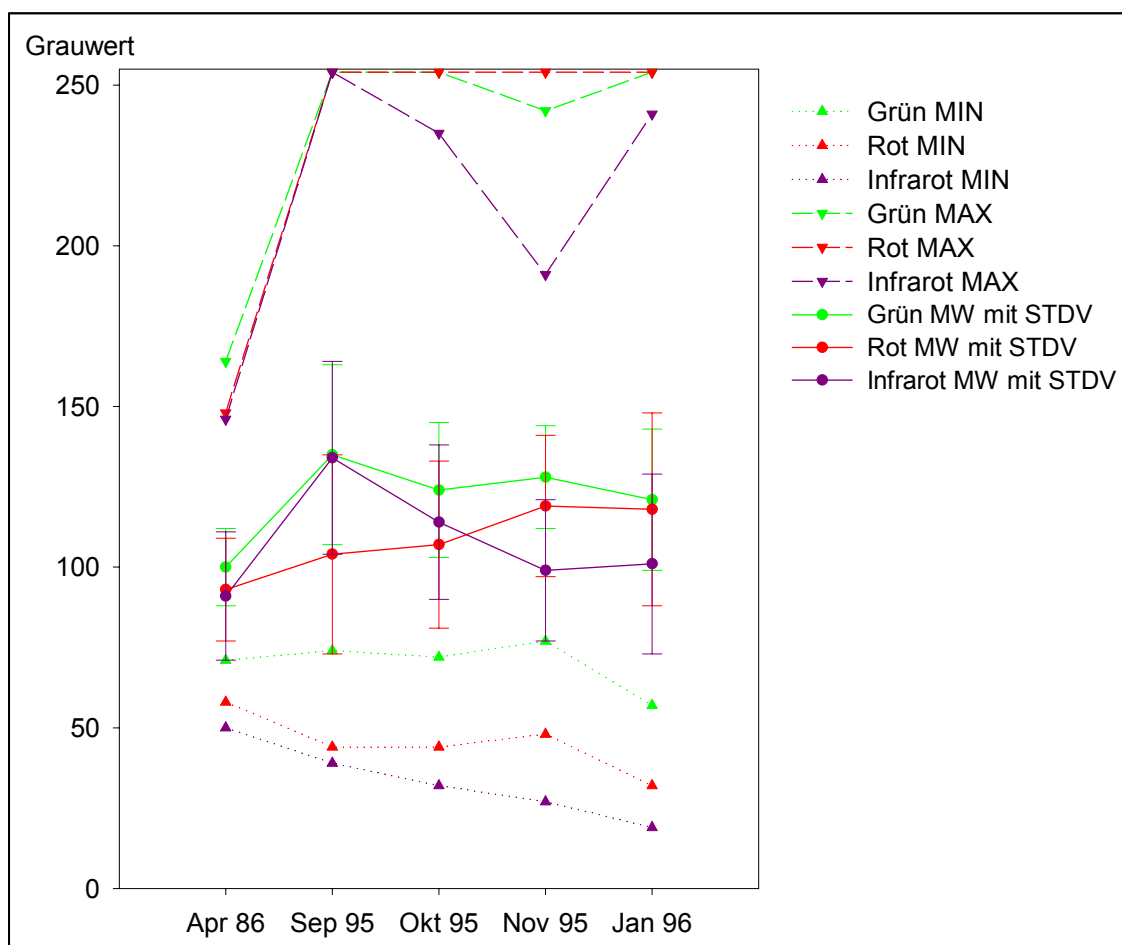


Abb. 36: Wichtigste statistische Parameter der Grauwertverteilung in den drei Spektralbereichen des SPOT-XS-Satelliten in Abhängigkeit vom Aufnahmezeitpunkt

Trägt man andersherum die statistischen Merkmale der verschiedenen Zeitpunkte gegen die Wellenlänge auf (nicht dargestellt), so wird deutlich, daß mit größerer Wellenlänge die saisonale Differenzierung stärker wird. Während sich in den kürzeren Wellenlängen eher die unveränderlichen Objekte (z. B. Boden, anthropogene Strukturen) abbilden, erscheinen im Infrarotkanal überproportional die stark veränderlichen Objekte. Diese Betonung im Infrarotkanal deutet bereits die hohe Empfindlichkeit dieses Wellenlängenbereichs gegenüber unterschiedlichen Feuchtigkeitszuständen einerseits und der Biomasse andererseits an.

Neben diesen wellenlängenspezifischen Unterschieden ergeben sich aber bei Betrachtung und Vergleich einzelner Kanäle hohe Übereinstimmungen zwischen den jeweils drei vom SPOT-HRV-Sensor gleichzeitig registrierten Spektralkanälen. Systematische Darstellungen und Vergleiche im bivariaten Merkmalsraum (sogenannte 'Feature space images' in ERDAS Imagine, vgl. Kap. 5.6.3.2) belegen durch Grauwertkonzentrationen auf der Diagonalen, daß generell sehr starke Abhängigkeiten zwischen allen Kanälen auftreten. Höchste Übereinstimmungen finden sich zwischen den beiden sichtbaren Kanälen, geringste zwischen dem grünen sichtbaren und dem nahen Infrarot. Über die visuelle Interpretation hinausgehende Beurteilungen der Abhängigkeit der Kanäle untereinander liefern Kovarianzmatrizen. Werden diese über Korrelationskoeffizienten zusätzlich normiert, lassen sich Korrelationen sowohl verschiedener Spektralkanäle als auch verschiedener Aufnahmezeitpunkte untereinander aufdecken.

Tab. 9: Korrelationskoeffizienten der Originalkanäle und der NDVI der verschiedenen Aufnahmezeitpunkte

Korrelationskoeffizienten	Apr 86:				Sep 95:				Okt 95:				Nov 95:				Jan 96:			
	1	2	3	NDVI	1	2	3	NDVI	1	2	3	NDVI	1	2	3	NDVI	1	2	3	NDVI
Apr86: 1	1,00																			
2	0,98	1,00																		
3	0,96	0,99	1,00																	
NDVI	0,70	0,75	0,84	1,00																
Sep95: 1	0,30	0,29	0,27	0,16	1,00															
2	0,33	0,33	0,31	0,19	0,97	1,00														
3	0,60	0,62	0,63	0,57	0,51	0,47	1,00													
NDVI	0,13	0,15	0,19	0,26	-0,55	-0,61	0,39	1,00												
Okt95: 1	0,45	0,43	0,40	0,22	0,56	0,63	0,31	-0,41	1,00											
2	0,53	0,52	0,49	0,31	0,55	0,62	0,37	-0,36	0,98	1,00										
3	0,69	0,72	0,73	0,63	0,40	0,44	0,68	0,10	0,63	0,66	1,00									
NDVI	0,09	0,14	0,19	0,31	-0,24	-0,30	0,31	0,59	-0,51	-0,51	0,30	1,00								
Nov95: 1	0,61	0,58	0,56	0,36	0,48	0,53	0,44	-0,20	0,72	0,75	0,67	-0,20	1,00							
2	0,67	0,67	0,66	0,47	0,40	0,45	0,53	-0,04	0,63	0,69	0,74	-0,03	0,96	1,00						
3	0,72	0,73	0,74	0,62	0,36	0,39	0,60	0,07	0,55	0,62	0,80	0,11	0,86	0,94	1,00					
NDVI	0,43	0,46	0,52	0,63	0,07	0,07	0,43	0,28	0,10	0,15	0,50	0,37	0,20	0,31	0,62	1,00				
Jan96: 1	0,69	0,69	0,68	0,52	0,42	0,46	0,51	-0,07	0,61	0,66	0,70	-0,05	0,90	0,92	0,88	0,34	1,00			
2	0,74	0,75	0,75	0,59	0,36	0,40	0,57	0,05	0,55	0,62	0,75	0,06	0,86	0,92	0,92	0,43	0,97	1,00		
3	0,77	0,79	0,80	0,69	0,32	0,35	0,62	0,13	0,48	0,56	0,78	0,16	0,78	0,88	0,95	0,60	0,92	0,97	1,00	
NDVI	0,40	0,45	0,51	0,65	0,01	0,00	0,43	0,36	-0,01	0,05	0,44	0,43	0,07	0,20	0,47	0,84	0,19	0,30	0,52	1,00

Aus Tab. 9 (grau hinterlegte Zellen zeigen Abhängigkeiten innerhalb eines Zeitpunktes) läßt sich direkt entnehmen, daß die mit Abstand höchste Korrelation der Spektralkanäle untereinander im April (Mittelwert der Korrelationskoeffizienten von 0,98), sowie ebenfalls starke Korrelationen im Januar und November auftreten. Vor allem September- aber auch Oktoberkanäle zeigen insgesamt geringere Korrelationen (durchschnittlich 0,65 bzw. 0,75), wobei dies vor allem auf die beiden sichtbaren Kanäle jeweils mit dem Infrarot-Kanal zutrifft. Interessanterweise zeigt das Novemberbild die geringste Korrelation der sichtbaren Kanäle untereinander. Dies spiegelt die gute visuelle Einschätzung dieses Zeitpunktes vor allem für anthropogene, aber auch Bodenstrukturen wider.

Im multitemporalen Vergleich (weiße Zellen in Tab. 9) zeigen November und Januar die höchsten Übereinstimmungen. Relativ hohe Korrelationen weist aber auch die Januar- mit der 10 Jahre älteren Aprilszene auf (durchschnittlich 0,74). Dem stehen sehr geringe Abhängigkeiten zwischen einer Regenzeit- und einer Trockenzeitszene gegenüber (z. B. 0,44 für Januar/September) aber auch geringe Korrelationen der Regenzeitszenen untereinander (0,50 für September/Oktober). Damit bestätigt sich die bereits bei der visuellen Beobachtung gewonnene Gliederung der zu unterschiedlichen Zeiten im Jahresverlauf aufgenommenen Satellitenszenen. Selbst bei der undifferenzierten Betrachtung des Gesamt-

ausschnittes deutet sich der starke Einfluß saisonaler Schwankungen auf das Spektralsignal an. Zusätzlich sind in Tab. 9 die Korrelationen der Vegetationsindizes mit den Originalkanälen des gleichen Zeitpunktes (hellgrün), im multitemporalen Vergleich (mittelgrün) sowie der multitemporalen Vergleich der Vegetationsindizes untereinander (dunkelgrün) dargestellt. Letzterer betont durch geringe Korrelationen die gute Eignung der Vegetationsindizes zur Visualisierung von zeitlichen Veränderungen.

Eine gegenüber der in Abb. 35 gewählten Darstellungsform (fünf Zeitpunkte vergleichend nebeneinander) deutlich bessere Visualisierung der saisonalen Dynamik kann mit Hilfe multitemporaler Darstellungen realisiert werden. Gut gewählte Multitemporal-Kombinationen ermöglichen bessere räumliche und zeitliche Interpretationen. Dazu wurden zahlreiche Bildverarbeitungsverfahren (vgl. Kap. 5.6.4) getestet und evaluiert.

Bei der Bewertung der aus den unterschiedlichen Verfahren resultierenden Multitemporalkombinationen ergaben sich zwei generelle Probleme: Obwohl die Septemberszene vom Zeitpunkt her das am besten geeignete Regenzeitbild darstellen würde, sind alle Multitemporalkombinationen mit dieser Szene durch Wolken und Dunst stark – und vor allem zum Teil nicht nachvollziehbar – verfälscht. Weiterhin eignen sich Kombinationen mit der Aprilszene nicht zur Darstellung saisonaler Veränderungen, da die Szene aus dem Jahr 1986 zusätzlich interannuelle und langfristige Veränderungen abbildet. Auf die Aprilszene kann im Vergleich zur Septembereaufnahme leichter verzichtet werden, da aus den vorangegangenen Überlegungen deutlich wurde, daß abgesehen von der übergreifend stattfindenden fortschreitenden Austrocknung bereits von der November- zur Januar- und erst recht zur Aprilszene keine größeren saisonalen Veränderungen mehr stattfinden. Für die weitere Vorgehensweise werden September- und Aprilszene für visuelle Beurteilungen und daraus abzuleitende generelle Aussagen berücksichtigt, in die automatischen Auswerteverfahren aber nicht einbezogen.

Für die Darstellung von Multitemporalkombinationen (drei mögliche Eingabekanäle) muß eine deutliche Datenreduktion bzw. -selektion durchgeführt werden. Dafür eignen sich die in Kap. 5.6.4.1 und 5.6.4.2 beschriebenen Verfahren. Aus den Überlegungen zu Korrelationen der einzelnen Spektralkanäle untereinander zu Beginn dieses Kapitels würde sich die **Ratio-Bildung** der am wenigsten miteinander korrelierten Spektralkanäle empfehlen. Dies wären Divisionsbilder aus Kanal 3 (infraroter Spektralbereich) und Kanal 1 (sichtbarer grüner). Aufgrund der hohen Korrelation der beiden sichtbaren Kanäle (1 und 2) untereinander sind die Ergebnisse den **Vegetationsindex**-Bildern (Ratios aus Kanälen 3 und 2) sehr ähnlich. Wegen der Normierung der Vegetationsindizes in Bezug auf Biomasse und andere Pflanzenparameter und der allgemein viel häufigeren Anwendung wurden die Vegetationsindizes (3/2-Ratios) den 3/1-Ratios vorgezogen.

Die Kombination der *NDVI*-Kanäle vom Oktober, November und Januar stellt eine der am besten für saisonale Veränderungen geeigneten Grundlagen dar und bildet die Basis der speziellen Untersuchungen zur Veränderung der Vegetation (Abb. 42 in Kap. 6.2.5). In der dreikanaligen Kombination sind über die *NDVI*- Berechnung jeweils die Kanäle des roten sichtbaren und des infraroten Spektralbereiches der drei Termine Oktober (R), November (G) und Januar (B) eingegangen. Die multitemporale Kombination der *NDVI*-Bilder stellt einen deutlichen Informationsgewinn gegenüber nur jeweils einem Zeitpunkt (wie in Abb. 35)

dar und ermöglicht zudem einen relativen Vergleich aufgrund der Normierung. Noch informationsreicher würde die Kombination unter Einbeziehung des Septembertermins erscheinen. Zwar gehen mit der Berechnung des *NDVI* aus dieser Szene auch Verbesserungen hinsichtlich des Dunstes einher, Wolken und Wolkenschatten führen aber immer noch leicht zu Fehlinterpretationen. Die ausführliche Interpretation erfolgt mit der Beschreibung der saisonalen Vegetationsveränderungen in Kapitel 6.2.5.

Weitere, hinsichtlich saisonaler Dynamik sehr aussagekräftige Bilder liefern **Differenzen** gleicher Spektralkanäle aus zwei verschiedenen Zeitpunkten. Sie zeigen direkt auf, in welchen Räumen Veränderungen zwischen den einzelnen Aufnahmetermen auftreten und in welche Richtung die Veränderungen gehen. Ableitbar sind Aussagen über Zu- oder Abnahme der Rückstrahlung. Die Differenzbilder sind somit ein sehr gut geeignetes Mittel, Bereiche saisonaler Veränderungen zu lokalisieren. Eine Interpretation der Art der Veränderungen ist allerdings mangels Normierung deutlich schwieriger als bei den Vegetationsindizes.

Der Vergleich von Differenzbild-Farbkompositen der unterschiedlichen Zeitabschnitte (zwischen September und Oktober – nicht dargestellt –, zwischen Oktober und November und zwischen November und Januar) belegt den Zeitraum der allgemein größten Veränderungen zwischen Oktober und November. Insbesondere Regen- (intensiv rotbraun) und Trockenzeitanbauflächen (intensiv rot) – aber auch Brand- und Wasserflächen (blau bis schwarz) – heben sich am deutlichsten hervor (Abb. 37 oben). Der Zeitraum November bis Januar zeigt bis auf zusätzliche kleinere Brandflächen (schwarz) die wenigsten Veränderungen. Die Differenzbilder zwischen Oktober und November und zwischen der längeren Zeitspanne von Oktober bis Januar (letzteres nicht dargestellt) zeigen kaum Unterschiede. Damit wird deutlich, daß Differenzbilder eindrücklich Bereiche hoher saisonaler Dynamik von Bereichen gleichbleibender Spektraleigenschaften im Jahresverlauf, aber auch Zeiten hoher Dynamik von Zeiten mit wenigen Veränderungen trennen können. Detailliertere Interpretationen und vor allem auch Klassifizierungen mit Differenzbildern sind allerdings sehr komplex. Eine Verwendung als Zusatzeingabekanal für multitemporale Klassifizierungen ist dann sinnvoll, wenn hochvariable bzw. auch vollkommen unveränderliche Objekte, die sich aber zu einzelnen Zeitpunkten nicht von anderen unterscheiden, differenziert werden sollen.

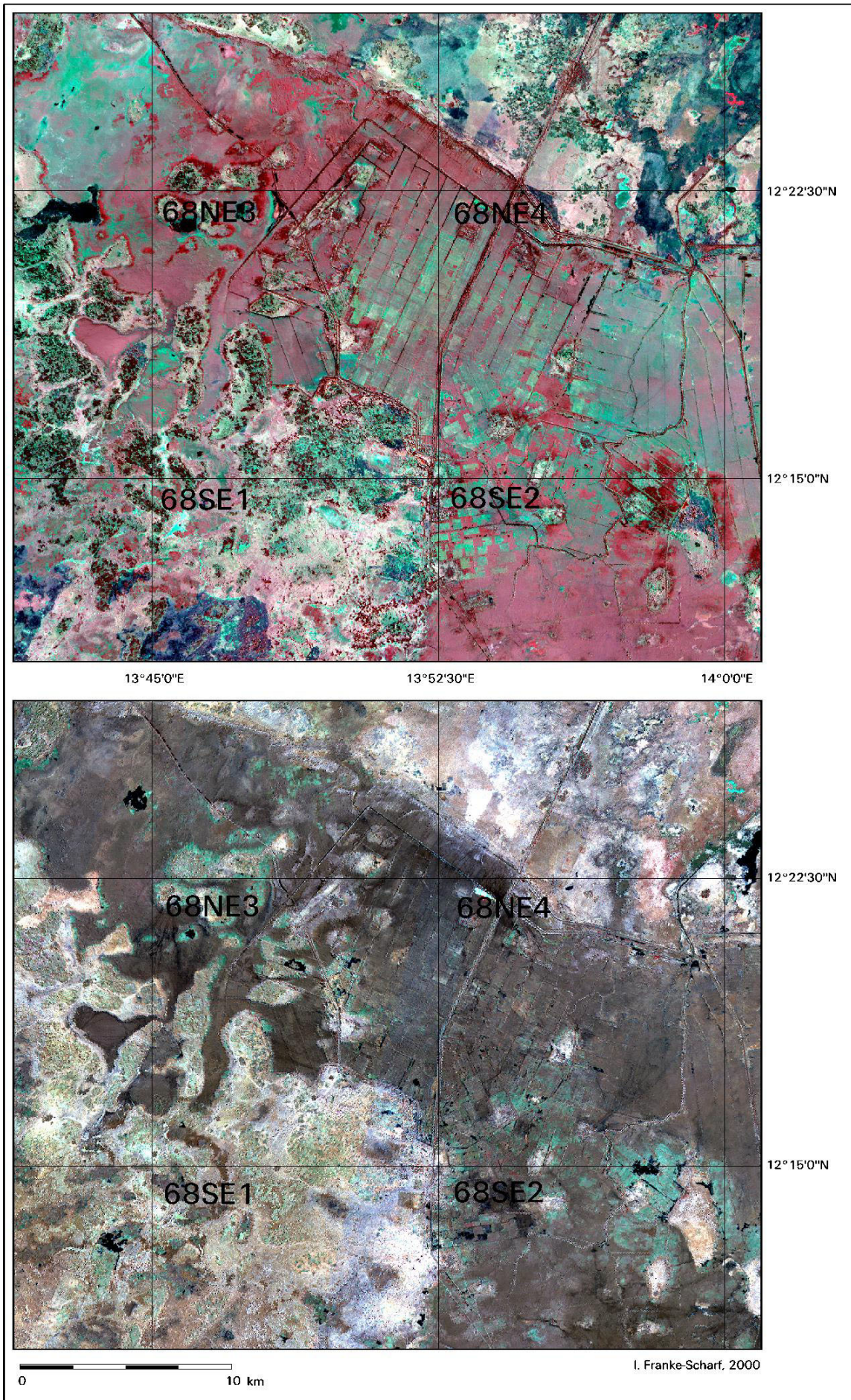


Abb. 37: Betonung saisonaler Veränderungen durch Vergleich zweier Differenzbilder aus den jeweils drei Spektralbereichen (oben: November minus Oktober, unten: Januar minus November; jeweils R/G/B-Zuordnung: Differenzen der Infrarot-/Rot-/Grün-Kanäle)

Die brillantesten Bilder aus Multitemporalkombinationen liefern **Hauptkomponenten**, da sie rechnerisch die höchsten Varianzen aufweisen (vgl. Kap. 5.6.4.2). Sie sind jedoch noch schwieriger als die Differenzbilder zu interpretieren. In den verschiedenen Hauptkomponenten werden aber unterschiedliche Aspekte der saisonalen Dynamik hervorgehoben. Dabei zeigen die multitemporalen Hauptkomponenten (gleichzeitige Berechnung der Hauptkomponenten für die Zeitpunkte Oktober, November und Januar) stärker saisonale Varianzen auf als Kombinationen monotemporaler Hauptkomponenten (jeweils nur Berechnung aus einem Termin).

Generell bildet fast jede der ersten Hauptkomponenten bestimmte Objektklassen optimiert ab, während in den letzten verstärkt systematische Bildstörungen akkumuliert sind. So zeigen z. B. die jeweils dritten monotemporalen Hauptkomponenten zusätzlich zu den atmosphärischen Störungen im Septemberbild, daß die April- und die Januarszene Streifen im Bild aufweisen, die wahrscheinlich auf Unregelmäßigkeiten in der Sensorkalibrierung zurückzuführen sind. Diese großflächig und objektunabhängig auftretenden Bereiche mit generell höheren bzw. niedrigeren Reflexionswerten verfälschen natürlich die Ergebnisse automatischer Bildauswerteverfahren, insbesondere Klassifizierungen. Ebenso treten in der 3. Hauptkomponente des Aprilbildes die Einzelteile des Mosaiks sowie Streifen in Aufnahme-richtung von etwa einem Viertel der Gesamtbreite auf. Die Qualität der Aufnahmen des ersten *SPOT*-Satelliten bleibt damit deutlich hinter denen des dritten zurück. Die Hauptkomponenten verdeutlichen zudem, daß die beiden Sensoren des *SPOT*-1 (*HRV*-1 und 2) sehr schlecht untereinander kalibriert sind. Benachbarte Szenen, die beim gleichen Überflug von den zwei Sensoren aufgenommen wurden, zeigen sehr unterschiedliche Grauwerte.

Für spezielle Objektklassen und sehr differenzierte Auswertungen stellen ausgewählte Hauptkomponenten eine deutliche Steigerung des Informationsgehaltes dar. So wird z. B. die saisonale Dynamik vor allem von der 2. multitemporalen Hauptkomponente der Oktober-, November- und Januar-Spektralkanäle wiedergegeben. Sie enthält etwa gleichverteilt Informationen aus den drei Zeitpunkten und aus den drei Spektralbereichen. Somit schlagen sich Feuchtigkeitsänderungen und Brandspuren in Abb. 38 vor allem in unterschiedlichen Blautönen nieder. Speziell werden z. B. Gehölze gut in der 4. Hauptkomponente, die hauptsächlich Information aus dem Infrarotkanal des Januarzeitpunktes bezieht, abgebildet (Grüntöne in Abb. 38). In Konflikt dazu stehen die ebenfalls anhand grüner Farben – allerdings etwas intensiver – dargestellten Wasserflächen. Sie konzentrieren sich auch in der 4. Hauptkomponente. Entsprechend erscheinen Trockenzeitanbauflächen, die sich vor allem in der 6. Hauptkomponente wiederfinden, was vor allem auf den roten Spektralbereich des Novembertermins zurückzuführen ist, in der Spektralkombination in Abb. 38 in kräftigen Rottönen.

Kombiniert man aber z. B. diese drei besonders für saisonale Veränderungen günstig erscheinenden Kanäle miteinander (Abb. 38), findet man auch zahlreiche Differenzierungen im Bild betont, die sich nicht mit den gewünschten Objektklassen decken (z. B. starke Differenzierung innerhalb der Tonflächen). Eine umfassende Gesamtbeurteilung fällt insbesondere im Bereich der Hauptkomponenten sehr schwer. Es erscheint unmöglich, einzelne Hauptkomponenten allgemeingültig hervorzuheben. Bis auf wenige Ausnahmen und solange es keine Beschränkung bei der Anzahl der zur Interpretation zu verwendenden Kanäle gibt, kann – vor allem in sehr heterogenen Landschaften und für umfassende Klassifizierungen –

also besser auf die Originalkanäle zurückgegriffen werden. Diese bieten gegenüber den umstrukturierten Hauptkomponenten zudem den Vorteil, daß eine relativ sichere Interpretation anhand der Reflexionseigenschaften der Objekte erfolgen kann.

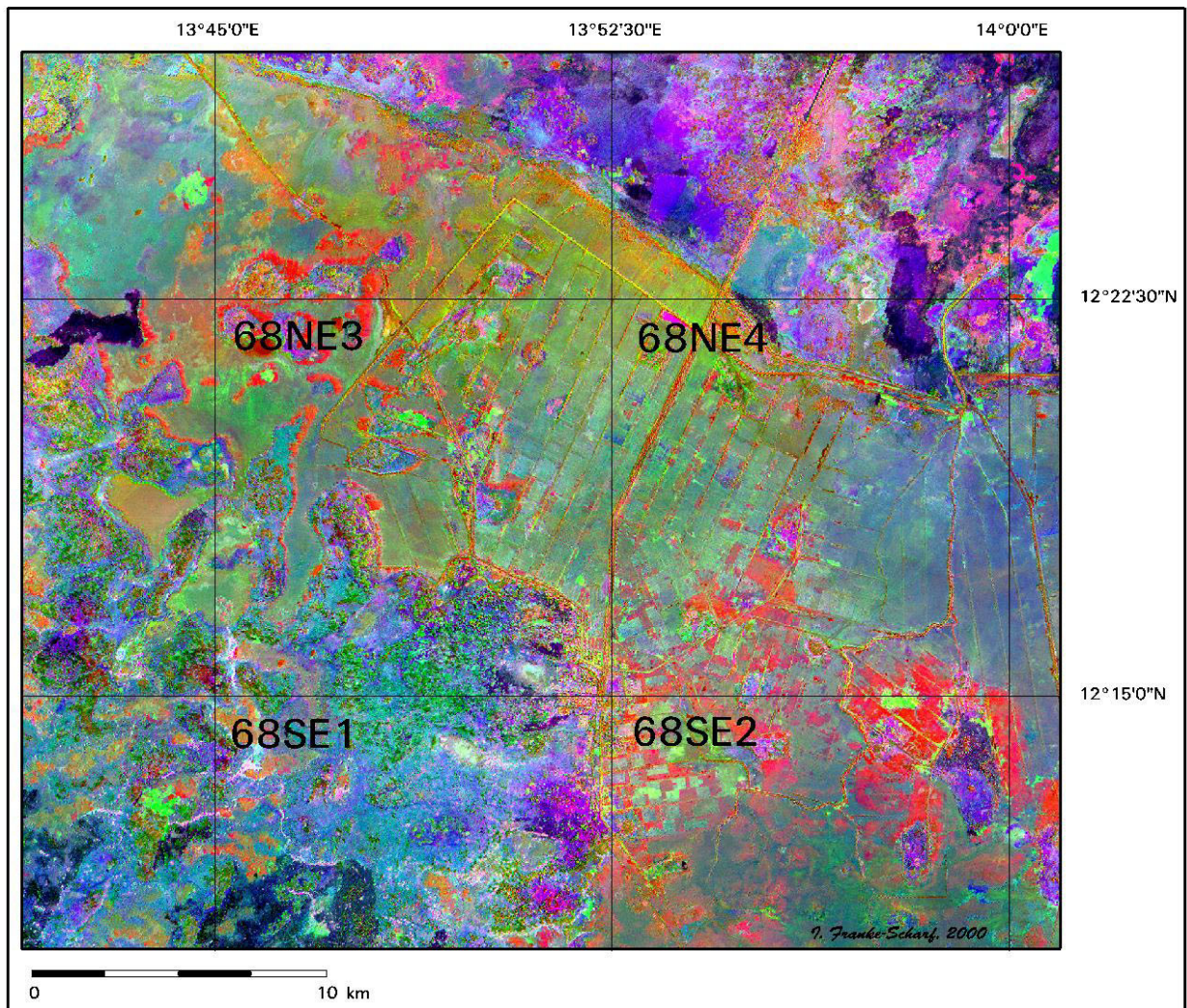


Abb. 38: Ausgewählte multitemporale Hauptkomponenten (Hauptkomponentenberechnung aus Oktober, November und Januar, Darstellung R/G/B 6/4/2) zur Betonung saisonaler Landbedeckungs- und Landnutzungsveränderungen

Da die unterschiedlichen phänologischen Zustände und saisonalen Veränderungen einen sehr wichtigen Einflußfaktor für Landbedeckungs- und Landnutzungskartierungen insbesondere bei der Auswertung multispektraler Satellitendaten darstellen und außerdem für die verschiedenen Kartiereinheiten sehr unterschiedlich sein können, erfolgt im Anschluß eine differenzierte, detaillierte Beurteilung. Die Beschreibung der Landbedeckungs- und Landnutzungstypen lehnt sich an die in Kap. 5.1 entwickelte Gliederung an und wird – wo es nötig scheint – für die multitemporale Satellitenbildauswertung modifiziert.

6.2.1 Sediment

Die Zusammensetzung der die Landoberfläche im Untersuchungsgebiet bedeckenden Sedimente und ihre Verteilung im Raum verändern sich, abgesehen von äußerst geringen Verlagerungsprozessen, im Jahresverlauf nicht. Jedoch weisen die verschiedenen Sedimente unterschiedliche physikalische Eigenschaften auf, die sehr wohl unter exogenen Einflüssen variieren. Generell zeigen Sedimente bzw. Böden ohne zusätzliche Bedeckung vergleichsweise hohe Reflexionswerte sowie einen gleichmäßigen Anstieg mit zunehmender Wellenlänge (RICHARDS & JIA 1999: 3). Zwei Faktoren bestimmen dabei hauptsächlich das Rückstrahlungsvermögen spezifischer Sedimente bzw. Böden: die mineralische Zusammensetzung und der Feuchtigkeitsgehalt. Erstere bleibt zumindest über kürzere Zeiträume unveränderlich und ermöglicht die Differenzierung verschiedener Sedimente bzw. Bodenarten im Untersuchungsgebiet. Letzterer ändert sich in Abhängigkeit von den Niederschlägen und beeinflusst das Spektralverhalten der verschiedenen Sedimenttypen damit unterschiedlich stark (vgl. auch Kap. 6.2.2 Gewässer).

Die Situation hinsichtlich der für die Landnutzung entscheidenden Sedimentunterschiede stellt sich im Untersuchungsgebiet vergleichsweise einfach dar: Sandige Sedimente zeichnen sich aufgrund ihrer mineralischen Zusammensetzung durch ein deutlich höheres Reflexionsvermögen aus. Daraus resultiert auch eine hellere Farbe im Falschfarbenkomposit (vgl. Abb. 35b 'Sand ohne Anbau Gehölze vereinzelt'). Im Gegensatz dazu absorbieren die Tone im Untersuchungsgebiet wegen ihres spezifischen Mineralgehaltes den größten Teil des Sonnenlichtes und zeigen deswegen sehr dunkle Farben (vgl. Abb. 35b 'Tone ohne Anbau'). Zur Verbreitung von Sand- und Tonflächen sei auf die detaillierten Darstellungen in Kap. 6.1.1 verwiesen.

Ergänzend zur bildlichen Darstellung (z. B. in Abb. 35), bei der immer nur bis zu drei Spektralkanäle gleichzeitig berücksichtigt werden können, demonstrieren Spektralprofile (vgl. Kap. 5.6.5.2) einzelner Landbedeckungs- und Landnutzungstypen das Rückstrahlverhalten in unterschiedlichen Wellenlängen, in spezifischen Zusatzkanälen (z. B. *NDVI*) und vor allem zu unterschiedlichen Zeitpunkten. So zeigt Abb. 39 die Spektralprofile für einige der untersuchten Sediment-Referenzflächen: zum einen zu einer Gesamtsignatur zusammengefaßt (fett gedruckte Signatur) und zum anderen aufgeschlüsselt nach zusätzlichen Merkmalen. Aufgetragen sind die mittleren Grauwerte der Flächen in den je drei Originalkanälen für die Zeitpunkte April, September, Oktober, November und Januar (Apr, Sep, Okt, Nov, Jan jeweils 1, 2, 3) und die Vegetationsindizes der fünf Zeitpunkte (*NDVI* Apr, Sep, Okt, Nov, Jan). Als zusätzliche Beurteilungskriterien wurden auch die Differenzen aus November und Oktober sowie aus Januar und November (jeweils Kanäle 1, 2, 3) berücksichtigt, ebenso wie die mono- und multitemporalen Hauptkomponenten. Sie fanden aber bei der späteren Klassifizierung keine Berücksichtigung und sind daher in keinem der Profile dargestellt.

Vergleicht man zunächst nur die Kurven für die Gesamtflächen der Sedimente (gelb für Sand, dunkelgrau für Ton) so lassen sich die Sedimentunterschiede aufgrund spezifischer Mineralgehalte in allen Original- und *NDVI*-Kanälen gut nachvollziehen. Die Sandkurve weist überall höhere Mittelwerte auf als die Tonkurve. Die Unterschiede sind zu allen Zeitpunkten

sichtbar, wenn auch während der Trockenzeit (Apr, Nov und Jan) viel deutlicher als in der Regenzeit (Sep und Okt). Eine positive Rückkopplung ergibt sich durch Feuchtigkeitsunterschiede in den Sedimenten. Die Tone absorbieren aufgrund ihrer höheren Wasserspeicherkapazität zusätzliche Strahlung vor allem im infraroten Abschnitt des Spektrums (vgl. auch KRONBERG 1985: 35-48; SWAIN & DAVIS 1978: 245). Daraus resultiert die deutlichste Trennung der beiden Sedimentarten im Infrarot zu allen Zeitpunkten (Apr, Sep, Okt, Nov und Jan jeweils Kanal 3).

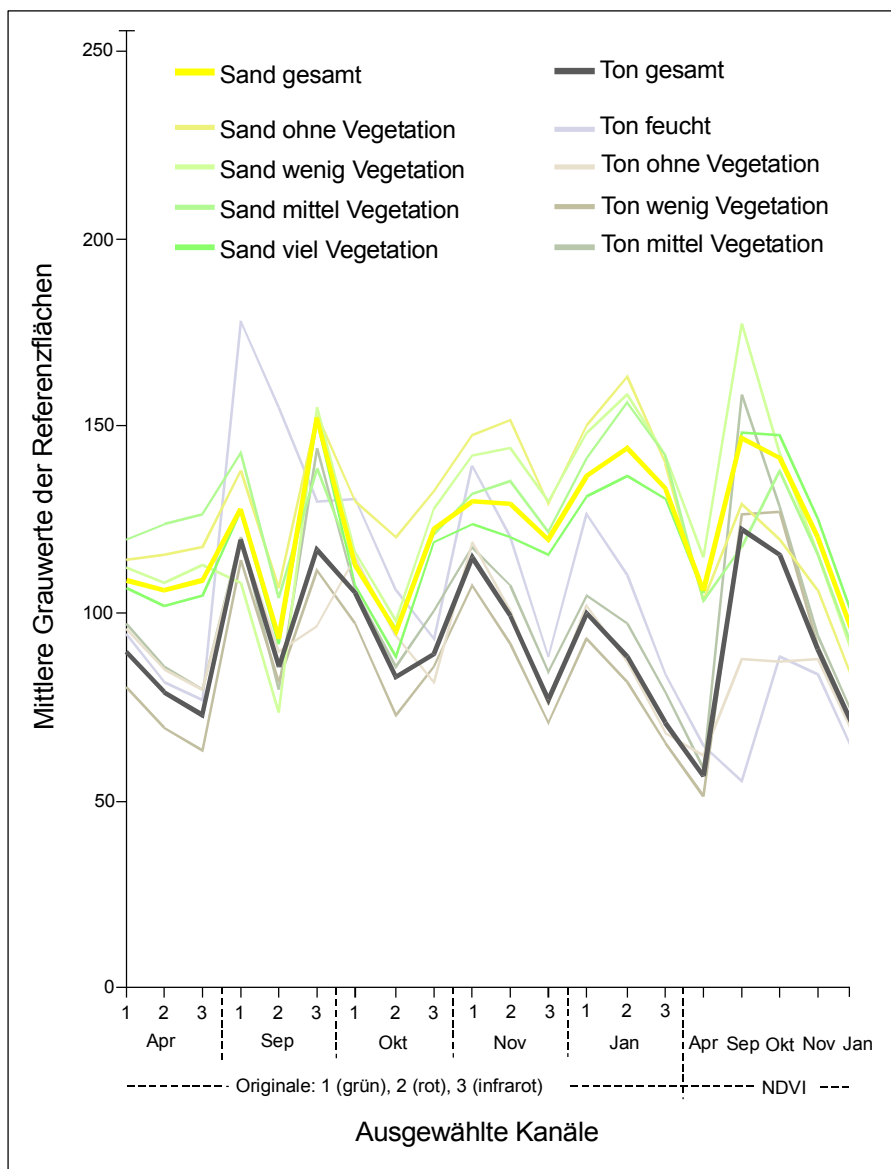


Abb. 39: Reflexionsverhalten der Sedimente im Untersuchungsgebiet

Das wellenlängenspezifische Verhalten der Sedimente entspricht in keiner der Kurven dem oben beschriebenen generell typischen Reflexionsanstieg mit höherer Wellenlänge. In den Trockenzeitszenen ist stattdessen für beide Sedimentarten ein Absinken mit größerer Wellenlänge zu verzeichnen, lediglich die Sande zeigen im November und Januar einen leichten Anstieg im sichtbaren Spektralbereich. Im infraroten Kanal absorbieren während der Trockenzeit (außer April) beide Sedimenttypen stark. Möglicherweise ist der im November

und Januar noch höhere Grundwasserstand dafür verantwortlich (vgl. die Ausführungen zu den Gewässern unter Kap. 6.2.2). Ein gleichmäßiges, wenngleich wiederum untypisches Muster zeigen beide Kurven auch während der Regenzeit: Maxima im Infrarot und Minima im roten Kanal. Dies ist eigentlich das für Vegetation zu erwartende Spektralsignal und weist auf eine Überlagerung durch Pflanzenbewuchs vor allem während der feuchten Jahreszeit hin. Dafür sprechen auch die hohen Werte der September-, Oktober- und November-Vegetationsindizes (*NDVI* Sep, Okt, Nov) für die Sedimente. Aber auch sonst finden verschiedene Überlagerungsprozesse statt. Es gibt nahezu keinen Zeitpunkt, zu dem sich nur die Böden mit ihren spektralen Eigenschaften abbilden (deswegen Berücksichtigung der Ausführungen zur Vegetation in Kap. 6.2.5).

Bezieht man nun zusätzlich die unterschiedlichen Einzelsignaturen in die Betrachtungen mit ein, ergibt sich ein noch komplexeres Bild. Versucht wurde, durch die innerhalb einer Objektklasse vorkommenden sehr heterogenen Flächen – in diesem Fall Sedimentflächen ohne Anbau – den Einfluß von sich überlagernden Faktoren abzuschätzen. Erwartungsgemäß sind die Schwankungen im Spektralverhalten aufgrund des Einflusses unterschiedlicher Bodenbedeckungstypen wie vor allem Vegetation und Wasser enorm. Diese Schwankungen zeigen wiederum große saisonale Unterschiede. Während der Regenzeit, wenn fast das gesamte Untersuchungsgebiet vegetationsbedeckt ist, erfolgt die stärkste Überdeckung der Bodeneigenschaften (vgl. ungeordneten Verlauf der Sand- und Tonkurven bei den September- und Oktobervegetationsindizes – *NDVI* Sep und Okt in Abb. 39), am Ende der Trockenzeit sind sie am geringsten (*NDVI* Apr in Abb. 39). So verursacht hauptsächlich der wechselnde Pflanzenbewuchs das saisonal unterschiedliche Reflexionsverhalten der Sedimente.

Einfacher als die unregelmäßig verlaufenden Spektralprofile zeigt der in Abb. 35b ausgewählte Beispielausschnitt für den 'Sand mit vereinzelt Gehölzen' eindrucksvoll die Vegetationsüberlagerung. Im September bewirkt eine dichte Grasbedeckung im gesamten Ausschnitt eine starke Infrarotrückstrahlung (rote Farbtöne im Infrarot-Falschfarbenbild). Zu dieser Zeit können keine direkten Rückschlüsse auf die Böden gezogen werden (sehr ungeordnete Kurvenverläufe der Einzelsignaturen in Abb. 39). Bereits mit dem Nachlassen der Niederschläge im Oktober trocknen die Gräser schnell ab. Ab November und verstärkt im Januar treten Sedimentunterschiede innerhalb der Sande hervor (linke Hälfte höhere Sandmächtigkeit im Siedlungsbereich), die im Aprilbild wieder verwischen (Abb. 35b). Im April zeigen die Ausschnitte größte Unterscheidung zwischen Sand und Ton, Differenzierungen innerhalb der zwei Sedimenttypen treten dagegen zurück (die Spektralkurven zeigen allerdings in allen Trockenzeitbildern eine gute Trennung der Sande und Tone bei deutlicher Differenzierung von zusätzlichen Eigenschaften, Abb. 39).

Für die Beurteilung der Sediment- und Bodenverhältnisse im Untersuchungsgebiet eignet sich deswegen am besten die April- bzw. Januarszene und dabei jeweils der Infrarot-Spektralkanal. Sehr gute Differenzierung verspricht auch der Vegetationsindex im April (der folglich auch keine reinen Vegetationsverhältnisse widerspiegelt). Während die Sande mit fortschreitender Trockenzeit eine Reflexionszunahme aufweisen, die sich mit Vegetationsabnahme und Austrocknung erklären lässt, zeigen die Tone vor allem im grünen sichtbaren Spektralbereich gegensätzliches Verhalten. Eine Erklärung liefert der aufgrund der im Januar

maximalen Flußpegelstände und wegen der langen Wasserspeicherefähigkeit höhere Feuchtigkeitsgehalt der Tonböden im Untersuchungsgebiet.

Die genaue Einbeziehung der Bodenbedeckungsverhältnisse ist bei der differenzierten Beurteilung von Sediment- und Bodenunterschieden – insbesondere bei Verwendung von Regenzeitszenen – unabdingbar (vgl. Ausführungen zur Vegetation in Kap. 6.2.5 und zu Anbauflächen in Kap. 6.2.4 aber auch zu allen anderen Landbedeckungen). Folglich ergeben sich für sehr heterogen strukturierte Gebiete, die z. B. von spontaner Vegetation bedeckt sind, große Schwierigkeiten für eine repräsentative Auswahl von Referenzflächen und damit für eindeutige überwachte Klassifizierungen.

6.2.2 Gewässer

Wasser zeigt in der Regel ein ganz spezifisches Reflexionsverhalten unter den Landbedeckungstypen und damit ein klar von allen anderen Objekten abzugrenzendes Spektralprofil. Am markantesten äußert sich die vollständige Absorption der Sonnenstrahlung in klarem Wasser im infraroten Bereich des Spektrums. Aber auch im grünen und roten sichtbaren Wellenlängenbereich liegt die Reflexionsrate unter 10% (RICHARDS & JIA 1999: 3). Dieses Verhalten bestätigt sich im Untersuchungsgebiet kaum. Nur selten (aber zum Beispiel im erweiterten Kirenowa-Zuflußkanal für die Zeitpunkte Oktober, November, Januar und eingeschränkt auch im Apriltermin) zeigt sich aufgrund hoher Absorption in allen drei Spektralkanälen die typische schwarze Farbe im Infrarot-Falschfarbenbild (vgl. Abb. 35b 'Kanal geflutet').

Wie bereits für die Sedimente beschrieben, ist auch das Wasser nur in den seltensten Fällen ohne Überlagerung durch andere Objekte auf den Satellitenszenen abgebildet. Die Rückstrahlung wird zusätzlich beeinflusst von der Gewässertiefe, den im Wasser enthaltenen mineralischen und pflanzlichen Schwebstoffen sowie möglicherweise aufliegender aquatischer Vegetation. Insbesondere flache Gewässer können einen erheblichen Anteil gelösten Sediments enthalten, welcher das Spektralsignal stark abwandelt. Zudem hat bei seichten Wasserkörpern auch der Gewässerboden einen hohen Anteil an der Rückstrahlung. Im engeren Umfeld des Tschadsees, aber auch an verschiedenen Stellen im Nordwesten und -osten des Untersuchungsausschnittes sind Wasserflächen häufig zu einem großen Teil oder völlig mit Vegetation bedeckt (vgl. Abb. 3).

Als gutes Beispiel für ein sehr flaches, mit gelöstem und aufgeschwemmten Bodenmaterial versehenes Gewässer kann die in Abb. 35b angeführte Wasserfläche dienen. Sie enthält im September und Oktober stehendes Wasser, das auf den übersättigten Tonflächen nicht sofort versickern kann. Tone mit ihrer geringen Partikelgröße verlagern sich schnell über das Transportmittel Wasser. Sie tragen so zu einer erheblichen Trübung bei, die in allen drei Spektralkanälen eine extreme Reflexionssteigerung hervorruft (weiße Farbtöne in Abb. 35b 'Wasserfläche' und hohe Mittelwerte in Abb. 40 für September und auch noch Oktober).

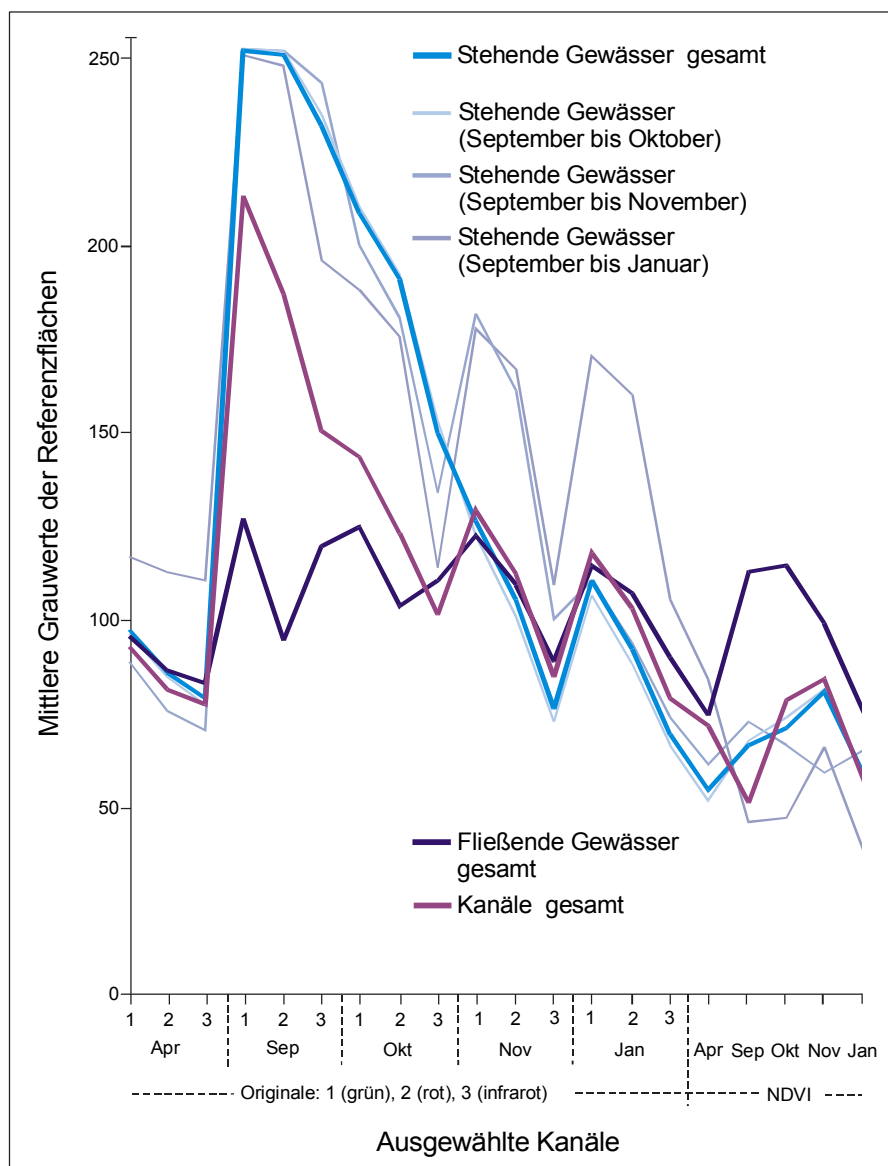


Abb. 40: Reflexionsverhalten der Gewässer im Untersuchungsgebiet

Permanente Gewässer treten im Satellitenbildausschnitt so gut wie gar nicht auf. Fast alle stehenden wie auch fließenden Gewässer führen nur periodisch Wasser (vgl. auch Kap. 6.1.2). Sie sind somit aufgrund unterschiedlicher Wasserfüllung und vor allem Verweildauer sehr variabel im Jahresverlauf. Dies äußert sich im ungeordneten Kurvenverlauf der Einzelsignaturen (Kurven in hellen Blautönen in Abb. 40). Dabei markieren in diesem Falle – entgegen des sonst vorherrschenden Reflexionsverhaltens für Wasserflächen – die Hochstände der Einzelsignaturen die Zeiten und Dauer der Wasserbedeckung. Alle der dargestellten Wasserflächen sind im September und etwas weniger stark im Oktober mit Wasser gefüllt. Zwei der Referenzflächen sind noch im November und nur noch eine auch im Januar wassergefüllt (Abb. 40, Maxima der Einzelsignaturen für stehende Gewässer in den Kanälen 1 und 2 der Zeiten mit Wasserfüllung).

Mit dem Verschwinden der Wasserbedeckung breitet sich meist ein mehr oder weniger starker Pflanzenbewuchs auf den noch feuchten Standorten aus (vgl. kontinuierlichen Anstieg des Mittelwertes der Gesamtsignatur in den Vegetationsindizes von September bis November (Abb. 40). Das starke Absinken des Reflexionsvermögens mit dem Nachlassen der Niederschläge und die anschließende Austrocknung spiegeln sich gut im Spektralprofil wider. Die Flächen mit temporär auftretenden Seen zeigen das von allen Objektklassen saisonal variabelste Verhalten. Sie hängen zum größten Teil direkt von den Niederschlägen vor Ort ab, entstehen schnell nach heftigen zum Teil lokal sehr begrenzt auftretenden Niederschlägen und verdunsten meist relativ schnell wieder.

Dem stehen die nicht direkt aus den lokalen Niederschlägen gespeisten, meist fließenden Gewässer (dunkelblau in Abb. 40) gegenüber. Ihre Wasserfüllung gelangt aus niederschlagsreicheren Gebieten im Süden in das Tschadbecken. Die maximale Wassermenge trifft meist erst verzögert nach der Regenzeit ein. Zwischen November und Januar kurz vor Tschadseehöchststand treten im Regelfall die höchsten Pegelstände im Untersuchungsgebiet auf. Im Ausschnitt in Abb. 35 sind allerdings keine stärker wasserführenden Flüsse vorhanden. Lediglich anhand ansteigender Grundwasserstände in den Gewässerrinnen, die häufig das Zentrum kleinerer Feuchtgebiete bilden, läßt sich eine Abgrenzung der Gewässerrinnen nachvollziehen (vgl. Abb. 35b 'Fluß bzw. Gewässerrinne'). Die Spektralprofile der Abflußlinien markieren deswegen auch keinen ausgeprägten Jahresgang (vgl. in Abb. 40 Gesamtkurve für Gewässerrinnen in dunkelblau).

Anders als das wellenlängenspezifische Verhalten der stehenden Gewässer äußert sich das der Fließgewässer. Während die Trockenzeitszenen entsprechend dem typischen Verhalten für Wasser höhere Absorptionswerte mit steigender Wellenlänge verzeichnen, weisen die beiden Regenzeitszenen starke Minima im roten sichtbaren Spektralbereich auf. Dies spricht wiederum für eine Vegetationsbedeckung zu dieser Zeit. Denn auch bei den Gewässerrinnen beruht die Abgrenzung zur Umgebung im Satellitenbild vor allem darauf, daß sich feuchtere Gebiete indirekt durch stärkere Vegetationsbedeckung (rote und rotbraune Farbtöne in Abb. 35b und hohe Mittelwerte der Vegetationsindizes im September und Oktober – Abb. 40) von der im Vergleich trockeneren und kahlen Umgebung abheben. Im November und Januar gleichen sich die Strahlungsverhältnisse der ausgetrockneten Gewässerrinnen dann mehr oder weniger schnell an. Für die Gewässerrinnen wurde in Abb. 40 nur eine Gesamtsignatur dargestellt. Auch in diesem Fall würden die Einzelsignaturen ein sehr heterogenes Bild ergeben. Dabei bestimmt geringfügig das Sediment, in dem die Rinne angelegt ist, stärker aber der Grundwasserstand und damit verknüpft der Bewuchs der Abflußlinie das spektrale Erscheinungsbild.

Eine dritte Gruppe der Gewässer bilden die kanalisierten Flüsse und künstlich angelegten Bewässerungskanäle. Sie werden, wie für den Hauptzufuhrkanal bei Kirenowa schon beschrieben, anthropogen gesteuert. Dabei spielen zum einen als limitierende Größe der Seespiegelstand des Tschadsees und zum anderen die Regulierung über Pumpen und Stausysteme für Wasserstände und Flutungszeiträume eine Rolle. Das Nebeneinander wassergefüllter und leerer Kanalabschnitte in einer Objektklasse bedingt das inhomogene Spektralprofil (lila in Abb. 40). Eine klare Abgrenzung zu anderen Objektklassen ist aus diesem Grund nicht zu erwarten.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die im Regelfall eindeutige Klassifizierung von Gewässern im Untersuchungsgebiet mit zwei Hauptproblemen konfrontiert ist. Erstens erschweren Schwebstoffe im und aquatische Vegetation auf dem Wasser die eindeutige Identifizierung wasserbedeckter Oberflächen. Zweitens wird die Auswertung von der bei Gewässern in semiariden Räumen extrem hohen saisonalen Veränderlichkeit sehr erschwert. Für multitemporale Auswertungen kann eine erfolgreiche Klassifizierung also nur unter Einbeziehung der Dauer der jeweiligen Wasserstände erwartet werden. Nach den oben dargelegten Überlegungen müßte die Klassifizierung der im Untersuchungsgebiet vorhandenen Wasserflächen unter Verwendung der beiden Regenzeitszenen vorgenommen werden. Dabei ist aus der Septemberszene aber keine eindeutige Klassifizierung zu erwarten, da Konfusionen mit Wolken und Dunst, die ebenfalls hohe Wassergehalte aufweisen, auftreten. Eine Differenzierung zwischen länger stehendem Wasser läßt sich über noch höhere Reflexionswerte im November bzw. Januar vornehmen. In einigen Fällen kann die Einbeziehung der Vegetationsindizes eine weitere Unterscheidung zu anderen Landbedeckungstypen, vor allem aber eine Differenzierung unterschiedlicher Gewässerflächen erbringen.

Die Klassifizierung der linearen Gewässerstrukturen ist noch komplizierter als die der flächigen. Zum einen ist der überwiegende Teil nur kurzfristig überhaupt wassergefüllt und zum anderen überlagert die Vegetation und ihre eng mit dem Wasserhaushalt zusammenhängende Ausprägung das Spektralsignal. So lassen sich über diesen Zusammenhang visuell zwar recht gute Aussagen über z. B. die Grundwasserstände ableiten, für eine multitemporale eindeutige Klassifizierung erscheinen die Eigenschaften aber zu variabel. Hinzu kommt außerdem, daß Flußläufe und Gewässerrinnen in ihrer Breite meist unter der Pixelauflösung (20m) auf dem Satellitenbild liegen. Damit ergeben sich schon allein durch die Auflösung und die damit zusammenhängende Überlagerungsungenauigkeit der Zeitpunkte Grenzen für eine exakte Klassifizierung. Dies erklärt zum größten Teil auch, warum die Gewässerrinnen als eine solch breite Spektralsignatur mit sehr hohen Standardabweichungen auftreten (vgl. hohe Abweichungen der Kurven untereinander in Abb. 40).

6.2.3 Bebauung

Der Beispielausschnitt für Siedlungen in Abb. 35b stellt Old Marte, die als *Local Government Headquarter* bedeutendste Ortschaft im Untersuchungsgebiet dar. Deutlich zeigt sich zu allen Zeitpunkten die kompakte runde Form der Siedlung mit relativ dichter Bebauung (in blauen bzw. türkisen Farbtönen). Bei genauerer Betrachtung lassen sich vor allem im Januarbild anhand der sehr hellen Bildpunkte Freiflächen bzw. Wege erkennen. Während sich der Ort im September und Oktober sehr deutlich von seiner vegetationsbedeckten Umgebung (rote Farbtöne) abhebt, treten in den Trockenzeitbildern insbesondere im Januar die Bäume einzeln hervor.

Für Siedlungsflächen äußert sich der Gegensatz zwischen funktionalen Objektklassen und physikalisch bedingten Spektralklassen am stärksten. Siedlungen definieren sich über ihre Funktion, weisen aber sehr unterschiedliche Strahlungseigenschaften auf. Die Ortschaften im Untersuchungsgebiet setzen sich zu verschiedenen Anteilen aus bebauter, freier und bewachsener Fläche zusammen. Je nach ethnischer Zusammensetzung ihrer Bewohner

unterscheidet sich zudem die Dichte (z. B. sehr disperse Siedlungen nomadischer Shuwa gegenüber dichter Bebauung der Kanuri) und Art der Siedlung insgesamt (z. B. Anordnung der Bauten) sowie die Baumaterialien (Lehm- oder Stroh Häuser mit Wellblech- oder Strohdach). Alter und Lage der Orte haben Einfluß auf den Baumbestand. Außerdem paust sich über die Freiflächen das Substrat, auf denen die Siedlungen errichtet wurden, durch. Aus diesen Tatsachen leitet sich die Schwierigkeit ab, allgemeingültige repräsentative Referenzflächen für Siedlungen zu definieren.

Das Reflexionsverhalten der Siedlungen, das aufgrund der Zusammensetzung aus den verschiedenen physikalischen Spektralklassen am wenigsten repräsentativ von allen Gesamtsignaturen ist, zeigt folgenden Verlauf in Regen- und Trockenzeit: im September, Oktober aber auch April treten Minimalwerte im roten und hohe Werte im grünen und infraroten Bereich des Spektrums auf. Im November und Januar bilden die Infrarot-Werte das Minimum. Dabei zeigen sich keine Unterschiede im Spektralprofil zwischen der September- und Oktober- sowie zwischen der November- und Januarkurve, was sich auch in dem Siedlungsbeispiel in Abb. 35b bestätigt. Der April weist insgesamt die niedrigsten Reflexionswerte und auch die größten Abstände zu den anderen Objektklassen auf. Was die Vegetationsindizes betrifft, findet man den niedrigsten Wert im Januar, gefolgt vom September, hohe Werte im April, Oktober und November. Dies kann nur auf die spezifische Zusammensetzung der extrem heterogenen Trainingsgebiete zurückgeführt werden.

Unter Hinzunahme ausgewählter unterschiedlicher Referenzflächen für Siedlungen ergibt sich ein äußerst komplexes Bild. Hohe Standardabweichungen drücken die hohen Abweichungen einzelner Siedlungsflächen von der Gesamtsignatur aus. Die Abweichungen sind am stärksten in den Regenzeitszenen und vor allem in den Vegetationsindizes. Dies ist ein Hinweis darauf, daß wiederum der Pflanzenbewuchs den größten Einfluß auf das Spektralsignal hat. Deutlich heben sich die Siedlungen mit höherem Baumanteil, die häufig älter sind und auf sandigerem Substrat liegen, von den baumärmeren und baumfreien Ortschaften ab. Hohe Werte bei den Vegetationsindizes, aber auch niedrige Mittelwerte in den roten Kanälen sind dafür ein klarer Anhaltspunkt. Der Vergleich der Ortschaften mit geringem Bewuchs auf unterschiedlichem Substrat führt demgegenüber zu keinen größeren Grauwertabweichungen.

Entsprechend der internen Zusammensetzung weisen Siedlungen unterschiedlich stark saisonale Veränderungen auf: solche mit hohem Baumanteil und Wasserflächen sind am dynamischsten (vgl. entsprechende Bereiche von Old Marte in Abb. 35b), andere, die nur aus Gebäuden und Freiflächen bestehen, weisen so gut wie keine saisonal bedingten Unterschiede auf (vgl. größten Teil der Siedlung Old Marte in Abb. 35b). Diese in allen Siedlungen immer vorhandenen Bereiche führen dazu, daß man Siedlungen in den meisten Multitemporal-Kombinationen auch an den für saisonal unveränderliche Objekte typischen Grautönen erkennt (vgl. Abb. 37 und 38).

Aufgrund der Heterogenität und wegen der zum Teil sehr geringen Flächenausdehnung ist es äußerst schwierig, automatische Klassifizierungen für Siedlungen durchzuführen. Aussagen über die am besten für Siedlungsflächen zu verwendenden Kanäle gestalten sich zudem schwierig. Am ehesten lassen sich die Siedlungen in den Trockenzeiterminen erkennen,

dabei insbesondere in den beiden sichtbaren Kanälen des Januar- und Aprilbildes. Mit Zuweisungsfehlern ist aber auch dann zu rechnen.

Die Verkehrswege im Untersuchungsgebiet gliedern sich in wenige asphaltierte Straßen und ein großes Netz unbefestigter Pisten, Wege und Viehpfade. Gemäß ihrer physikalischen Ausprägung entsprechen die asphaltierten Straßen im Reflexionsverhalten weitestgehend den bebauten Flächen und die Wege und Viehpfade den Freiflächen innerhalb der Siedlungen. Beide Ausprägungen zeigen die mit Abstand größte Konstanz im Jahresverlauf. Die zu allen Zeiten vegetationsfreien und auch durch Wasser bzw. Feuchtigkeit nur geringfügig beeinflussten Elemente zeigen einen recht geregelten Verlauf des Spektralprofils. Mit Ausnahme des Apriltermins treten die höchsten Reflexionswerte im roten sichtbaren Spektralbereich auf – typisch für vegetationsfreie Flächen. Insgesamt nehmen die Werte von der Regenzeit zur Trockenzeit hin ab, was auf generelle Austrocknungsprozesse zurückzuführen ist. Die Vegetationsindizes zeigen recht unterschiedliche, aber alle minimale Werte.

Ausgehend von Abb. 35b ('Straße, Weg') ist die beste Trennung der Straßen und Wege von ihrer Umgebung während der Regenzeit insbesondere für den Oktobertermin zu erwarten, da sich dann die vegetationsbedeckte Umgebung noch deutlich abhebt. Allerdings zeigt der Bildausschnitt bereits die Ähnlichkeit zu Kanälen und Siedlungsflächen, die in bebauten und freien Flächen die gleichen physikalischen Eigenschaften aufweisen. Weiterhin zeigen Teile der Siedlungs- und Verkehrsflächen spektrale Ähnlichkeiten zu Deflationsstandorten, deren Vorstufe sie häufig darstellen (vgl. Kap. 6.2.6).

Insgesamt sind für Verkehrswege trotz der relativ homogenen Signaturen keine zufriedenstellenden Klassifizierungserfolge zu erwarten. Neben dem Problem des Unterschiedes funktionaler Objekt- und physikalischer Spektralklassen treten wiederum vor allem aufgrund der linienhaften Struktur der Verkehrswege Schwierigkeiten auf. Während sich befestigte Straßen im Satellitenbild noch recht gut erkennen lassen (vgl. Abb. 35, 'Straße, Weg'), treten die kleinen, sich häufig räumlich verlagernden Wege und Viehpfade kaum hervor.

6.2.4 Landwirtschaft

Die landwirtschaftlichen Anbauflächen weisen im Untersuchungsgebiet neben den Wasserflächen und der Vegetation die stärksten saisonalen Schwankungen auf. Da sie anthropogen beeinflusst sind, zeigen sie im Jahresverlauf extrem unterschiedliches Spektralverhalten. Generell ist bei Agrarflächen das spezifischste Rückstrahlungssignal zum Höhepunkt der Anbauphase, wenn die größte und homogenste Bodenbedeckung auftritt, zu erwarten. Je nach Frucht kann dies direkt vor, oder bei Anbaufrüchten, die noch einige Zeit austrocknen, länger vor der Ernte sein. Schon während der Phase des Trocknens der Pflanzen, aber vor allem nach der Ernte, bleiben die Felder meist ohne Vegetationsbedeckung zurück und ändern ihr Spektralverhalten grundsätzlich. Häufig ist dieser völlig vegetationslose Zustand der Felder nach der Ernte noch repräsentativer als der Zeitpunkt des Wachstumshöhepunktes der Anbaupflanzen. Im semiariden Untersuchungsgebiet ist diese Phase die längste im Jahresverlauf. Verstärkt außerhalb, aber durchaus auch während des Anbauzyklus haben Unkrautbewuchs und auf den Feldern vorkommende quasi-natürliche Vegetation Einfluß auf das Rückstrahlungsvermögen. Vor der erneuten Bestellung müssen die Felder in

den meisten Fällen vorbereitet werden, indem Unkraut entfernt und eventuell der Boden bearbeitet wird. Drei verschiedene Anbausysteme unterscheiden sich im Untersuchungsausschnitt (vgl. ausführlich dazu Kap. 6.1.4). Sie gliedern sich sowohl über den Zeitpunkt der Bestellung und damit über den Zeitraum der Wachstumsphase als auch räumlich gemäß der vorkommenden Böden.

Zu Beginn der Regenzeit findet die Feldvorbereitung und das Säen der Regenzeitfrüchte statt. Hauptsächlich Rispen- und Kolbenhirse, aber auch Kulturen gemischt mit Mais, Bohnen, Erdnüssen und anderen Früchten gedeihen während der gesamten Regenzeit (vgl. Abb. 25). Die Reife ist zum Ende der Regenzeit mit dem Austrocknen der Fruchtstände erreicht. In Abb. 35b zeigt das Beispiel zum 'Regenzeitbau' im September, daß noch einige getrocknete Pflanzenreste auf den Feldern vorhanden sind (bläulich-grünliche Farbtöne innerhalb der hellen Feldflächen). Im Oktober bescheinigen die stark reflektierenden und damit weiß erscheinenden Felder das Fehlen von Pflanzenresten. Im Gegensatz dazu erscheint die Vegetation am Rand der Anbauflächen im Oktober ausgeprägter als noch im September. Dies ist auch auf atmosphärische Störungen im Septemberbild zurückzuführen. Die zwischen und an den Rändern wachsende Vegetation trocknet zum November hin schnell ab und ist in Brauntönen zu erkennen. Sowohl im Oktober als auch November heben sich die Regenzeitbauflächen am deutlichsten von der Umgebung ab. Im Januar hingegen verwischen die Unterschiede wieder. Umgebende Gräser und Büsche trocknen mit fortschreitender Trockenzeit weiter aus und auf den Feldern wächst geringfügig Gras bzw. Unkraut nach. Im Aprilbild haben sich Anbau- und ungenutzte Flächen im Spektralverhalten so gut wie vollständig angeglichen.

Entsprechend der saisonal sehr unterschiedlichen Ausprägung der Regenzeitbauflächen verläuft auch die Gesamtspektralkurve. Die teilweise Pflanzenbedeckung im September äußert sich in niedrigen Rot- und hohen Infrarotwerten, im Oktober gleichen sich diese Werte an, da der Großteil der Felder nun abgeerntet ist und höchstens getrocknete Pflanzenreste auf den Feldern verblieben sind. Im November und Januar erscheinen die beiden Werte invers. Insgesamt hebt sich das Spektralprofil der Regenzeitbauflächen am stärksten durch hohe Reflexionswerte von allen anderen Objektklassen ab. Daher sind generell gute Klassifizierungsergebnisse zu erwarten. In Abb. 41 sind ausgewählte Beispielflächen für den Regenzeitbau als Spektralprofil abgebildet. Sie zeigen mit Ausnahme der brachliegenden Regenzeitbauflächen einen recht homogenen Verlauf und eine im Jahresverlauf ziemlich eindeutige Signatur. Die Brachflächen weisen erwartungsgemäß einen ähnlichen Verlauf wie die natürliche Vegetation auf (geringe Rot- und hohe Infrarotwerte und höhere Vegetationsindizes für September und Oktober). Im November und Januar ist ein ähnlicher Verlauf wie bei den aktuell genutzten Flächen zu verfolgen. Beste Abgrenzung der während der Regenzeit genutzten Anbauflächen ist also zum Oktober- und bedingt zum Novemberzeitpunkt zu erwarten. Die eindeutige Abgrenzung von Brachflächen verspricht aufgrund ähnlichen Spektralverhaltens zu quasi-natürlicher Vegetation nur geringen Erfolg.

Im Gegensatz zu den Regenzeitbauflächen erfolgt die Hauptwachstumsperiode der auf den Tonen kultivierten Trockenzeithirse erst nach dem Nachlassen der Niederschläge. Die Vorbereitung der Felder wird zum Ende der Regenzeit vorgenommen. Da viele der für den Anbau vorgesehenen Flächen während der Regenzeit überflutet sind, bildet sich nicht zuviel störender Pflanzenbewuchs aus. Ansonsten muß gejätet werden. Deswegen erscheinen die

Trockenzeitfelder im September- und Oktobersatellitenbild ähnlich dem vegetationsfreien Tonboden. In Abb. 35b überwiegen für den 'Trockenzeitbau' türkis-bläuliche Farbtöne, die keine Abgrenzung zu den unbestellten Tonböden oder auch Siedlungsflächen, Wegen und Kanälen zulassen.

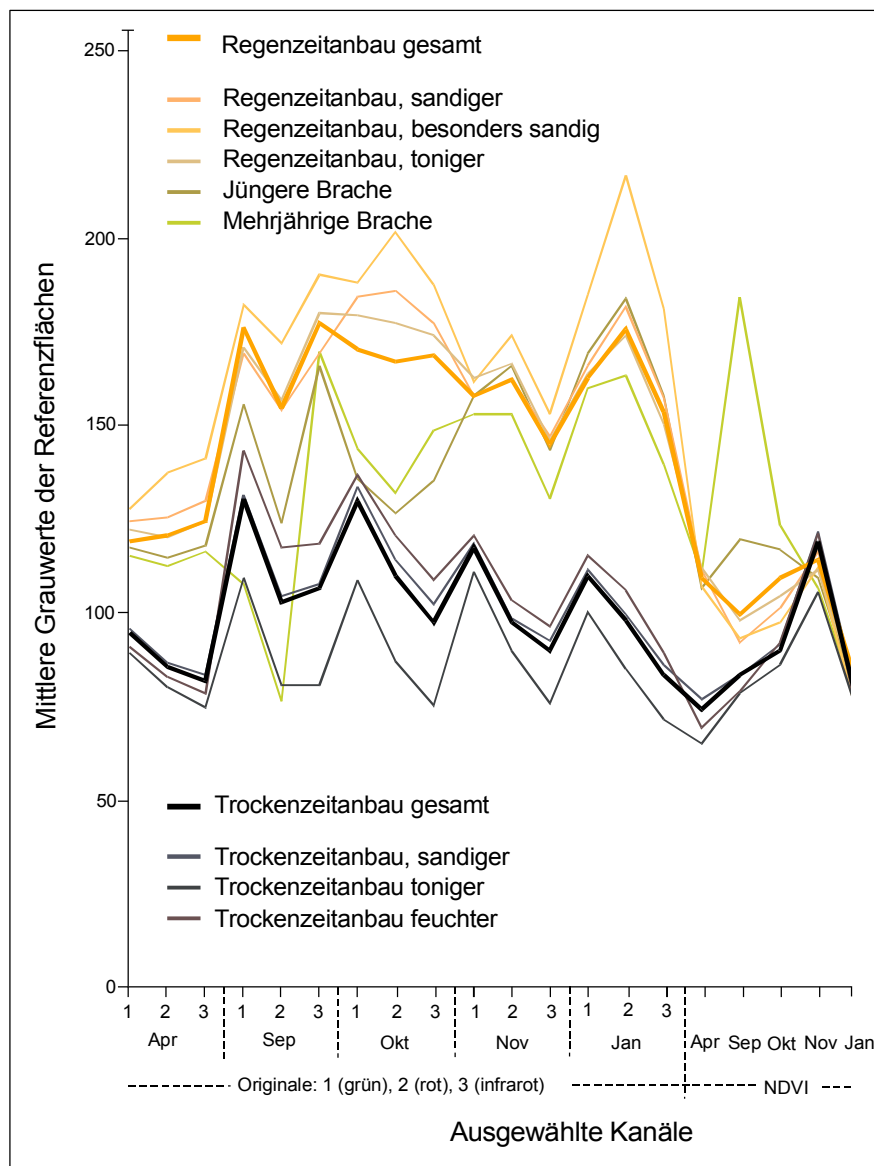


Abb. 41: Reflexionsverhalten der Regen- und Trockenzeitbauflächen im Untersuchungsgebiet

Erst im November tritt mit dem Wachstum der Hirsepflanzen das typische Spektralverhalten hervor (vgl. das markante Rot der Trockenzeitfelder aufgrund der vegetationsstypischen Rückstrahlung im Infrarot-Wellenlängenbereich in Abb. 35b). Allerdings entwickeln sich auf vielen Trockenzeitbauaufeldern die Pflanzen noch später, was dazu führt, daß sich der Vegetationsbewuchs im Infrarotkanal des Novembers noch nicht niederschlägt. Im Spektralprofil äußert sich die Vegetationsbedeckung der Felder im November nur im November-Vegetationsindex, wo die Einzelsignaturen zwar einen homogenen Gipfel beschreiben, aber auch Überschneidungen mit Regenzeitbauflächen vorkommen. Für eine eindeutige Kartierung sind also die originalen Novemberkanäle noch besser als der Vegetationsindex desselben Zeitpunktes zu empfehlen.

Im Januar bieten die Trockenzeitanbauflächen ein sehr heterogenes Bild. Je nach Reifezustand und Erntezeit ist ein Teil der Hirsepflanzen noch auf den Feldern (rote Farbtöne im 'Trockenzeitanbau'-Ausschnitt in Abb. 35b), anderswo sind nur noch getrocknete Pflanzen bzw. Streu anzutreffen (bräunliche Farbtöne im Falschfarbeninfrarotbild). Ein kleinerer Teil der abgeernteten Felder wird im Januar gebrannt und zeigt dann sehr dunkle Farbtöne (Abb. 35a).

Der zu bestimmten Zeiten ebenfalls auf den Tonflächen betriebene großflächige Bewässerungsanbau (vgl. Kap. 6.1.4.4) kann anhand der aus der Vegetationsperiode 1995/96 stammenden Satellitenszenen nicht kartiert werden, da bis zum Januar keine Bewässerung erfolgt ist. Wie bereits beschrieben, läßt sich lediglich im Tschadseezuflußkanal bis Kirenowa Wasser erkennen. Das in Abb. 35 abgebildete Kanalsystem mit den eingeschlossenen potentiellen Bewässerungspartellen zeigt Veränderungen im Jahresverlauf aufgrund unterschiedlicher Feuchtigkeitsbedingungen und teilweiser Vegetationsbedeckung. Im Satellitenbild vom April 1986 weisen die drei mittleren Partellen aufgrund ihrer dunkleren Farbe auf eine Bodenbearbeitung hin (vgl. Abb. 35b). Möglicherweise wurden die Partellen also 1986 genutzt. Daß zu dieser Jahreszeit, zwei bis drei Monate nach dem größten Wasserangebot, keine Pflanzen auf den Flächen zu erkennen sind, spricht allerdings dagegen.

Keine der sonstigen Anbauformen kann klassifiziert werden, denn Reisanbau und Flußbewässerung finden im engeren Untersuchungsausschnitt nicht in kartierbarer Größenordnung statt. Einige wenige Felder, die dem Flutfolgeanbau zugerechnet werden können, finden sich im äußersten Nordwesten des Ausschnittes. Diese Felder sind sehr kleinräumig und schwierig zu kartieren, da die Anbauzeiten mit dem zurückweichenden Wasser räumlich und zeitlich stark variieren.

6.2.5 Vegetation

Wie bereits in den vorangegangenen Unterkapiteln beschrieben, läßt sich eine getrennte Betrachtung der meisten Landbedeckungs- und Landnutzungseinheiten nicht realisieren, da sie sich spektral überlagern und gegenseitig beeinflussen. So wurde bei vielen Einheiten bereits auf die Beeinflussung durch die Vegetation hingewiesen. Auch bei der Betrachtung der Vegetation selber müssen der die Pflanzen unterlagernde Boden, die Bodenfeuchte und viele andere Faktoren immer berücksichtigt werden (vgl. dazu z. B. das Spektralprofil unterschiedlich mit Vegetation bedeckter Sedimente in Abb. 39). Andererseits lassen sich aus der Vegetationsverbreitung und -zusammensetzung Rückschlüsse auf andere Standortparameter ziehen.

Während bei der Ausgrenzung von Vegetationseinheiten aus panchromatischen Luftbildern nur auf dunklere Grautöne (insgesamt hohe Absorption im sichtbaren Spektrum) und auf Texturparameter zurückgegriffen werden kann und aus diesem Grund nur eine Kartierung der Gehölze in drei Klassen vorgenommen wurde, erscheint Vegetation in multispektralen und erst recht multitemporalen Satellitenszenen äußerst komplex.

Unterschiedliche Vegetationsbedeckungen verursachen ein sehr differenziertes Reflexionsverhalten. Bestimmend wirken dabei die starke Abhängigkeit der Rückstrahlung von der

Wellenlänge einerseits und die im Jahresverlauf sehr unterschiedliche Bedeckung der Oberfläche mit Vegetation andererseits. Grüne Pflanzen, die mit dem Beginn der Regenzeit einen großen Teil des Untersuchungsgebietes bedecken, zeigen im sichtbaren Bereich des Spektrums (0,4-0,7 μm) nur geringes Reflexionsvermögen mit einem kleinen relativen Maximum im sichtbaren grünen Spektralbereich (0,55 μm). Vor allem im roten (0,6-0,7 μm) Bereich des sichtbaren Spektrums wird die Strahlung durch Blattpigmente (v. a. Chlorophyll) absorbiert. Dem steht ein starker Anstieg der Reflexion im nahen Infrarot (0,7-1,3 μm) gegenüber. Je nach Pflanzenart sind interne Gewebestrukturen und die Zellorganisation für die hohe Rückstrahlung verantwortlich (SWAIN & DAVIS 1978: 232f; KRONBERG 1985: 50ff). Mit dem Nachlassen der Niederschläge und dem Abtrocknen der Vegetation (schon ab dem Oktoberbild nachvollziehbar) nimmt die Reflexion im Infrarot stark ab, während im sichtbaren Rot ein Anstieg der Rückstrahlung zu verzeichnen ist.

Dieses spezifische Verhalten der Vegetation im Untersuchungsgebiet läßt sich anhand der Vegetationsindizes-Multitemporalkombinationen nachvollziehen (nicht dargestellt). Bei der Zuordnung der drei Zeitpunkte zu jeweils einer Bildschirmfarbe (z. B. Oktober-NDVI in rot, November-NDVI in grün und Januar-NDVI in blau) wäre in Rottönen unterschiedlicher Intensität die Vegetationsbedeckung im Oktober, in Grüntönen die im November u.s.w. dargestellt. Bis auf wenige Ausnahmen ist der gesamte Untersuchungsausschnitt während der Regenzeit und noch im Oktober vegetationsbedeckt. Vor allem in den Tonbereichen zeigt sich während der Regenzeit ein starker Bewuchs. Dabei handelt es sich meist um Pflanzen, die im stehenden Wasser gedeihen. Nur sehr wenige Bereiche zeigen im November eine stärkere Vegetationsbedeckung (z. B. aber die Trockenzeitanbauflächen). Sehr wenige und kleine Bereiche weisen eine stärkere Vegetationsbedeckung im Januar gegenüber den Vormonaten auf. Dies kommt durch geringfügige Wiederbegrünung von Brandflächen oder durch Austreiben bestimmter Gehölzarten, z. B. entlang der Kanäle östlich Dura. Die Interpretation der multitemporalen Vegetationsindizes ergibt jedoch ein kleinräumig sehr differenziertes Bild der saisonalen Veränderungen. Um eine einfachere Lesbarkeit zu ermöglichen, ist in Abb. 42 statt der multitemporalen Vegetationsindizes eine daraus abgeleitete klassifizierte und stark generalisierte Karte beigelegt. Sie ist durch einen einfachen *Level Slice Stretch* mit 5 Klassen (vgl. Kap. 5.6.3.1) jeweils aus den multitemporalen Vegetationsindizes hervorgegangen.

Knapp die Hälfte des Bildes (47%) weist keine oder nur sehr geringfügige zeitliche Veränderungen des Spektralverhaltens insbesondere der Vegetation zwischen Oktober und Januar auf. Dieser große Anteil unveränderlicher Bildbereiche ist vor allem darauf zurückzuführen, daß der Septembertermin als Zeitpunkt der größten Unterschiede zu allen anderen nicht integriert werden konnte. Die unveränderlichen Bereiche erscheinen in Abb. 42 in den verschiedenen Graustufen. Dabei sind die weiß dargestellten Flächen zu keiner der abgebildeten Zeiten vegetationsbedeckt (z. B. der äußerste südöstliche Tonbereich sowie ein Großteil der Tonflächen auf den Kartenblättern 68NE2, 68NE3 und 68NW4, aber auch die kleinen Wasserflächen entlang der Straße von New Marte nach Mongonu). Hellgrau abgebildete Flächen weisen kontinuierlich eine vereinzelt, mittelgraue eine mittlere Vegetationsbedeckung auf (z. B. die Siedlungsflächen mit nicht zu starker Gehölzbedeckung wie Old Marte oder Kirenowa). Dunkelgraue Bildbereiche, die zu allen Zeiten mit dichter Vegetation bestanden sind, finden sich in dieser semiariden Landschaft nur sehr begrenzt. Siedlungsbereiche mit ganzjährig grünen Gehölzen (wie z. B. die weit verbreiteten *Neem*-Bäume, vgl.

wiederum Teilbereiche von Old Marte und Kirenowa aber auch Jillam im Nordosten von Blatt 68NE4) oder Plantagen (z. B. bei New Marte auf 68NE3/68SE1 oder am Tschadseezuflußkanal bei Kirenowa) sind Ausprägungen dieser anthropogenen Vegetationsinseln. Wenige kleine Abschnitte mit Bäumen finden sich noch entlang von Straßen oder Kanälen ähnlich einem Alleenbewuchs (z. B. entlang der Straße nach Mongonu auf 68NE1 oder entlang des Kirenowa-Kanals auf 68NE2), aber auch im ganzjährig feuchten und unzugänglicheren Bereich der Tschadseeabflußrinnen, wo noch unbedeutende Reste eines Waldes zu finden sind (Blatt 68NE2).

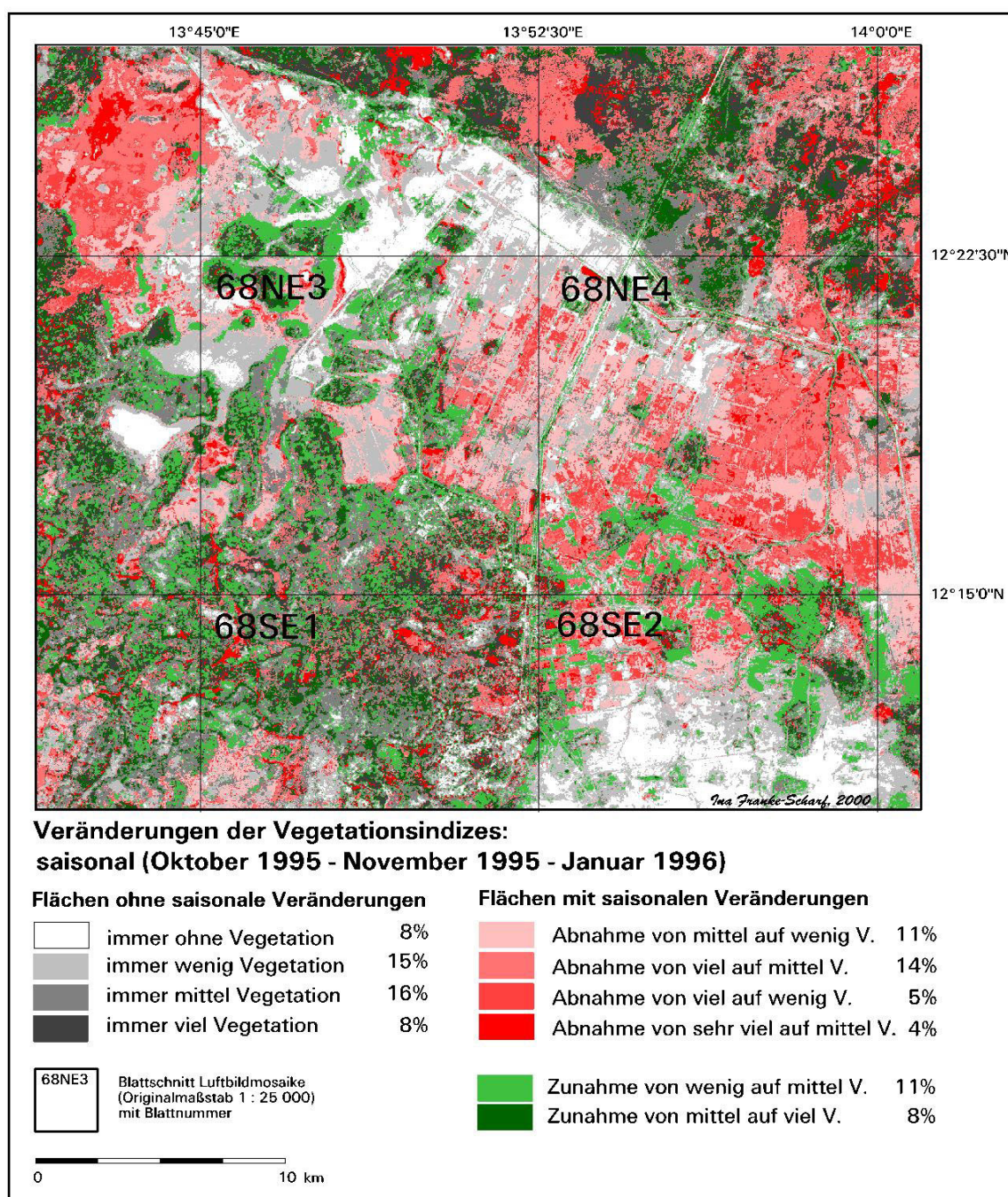


Abb. 42: Veränderungen der Vegetationsbedeckung saisonal 1995/96

Der größere Teil des Untersuchungsgebietes (53%) hebt sich durch rote und grüne Farben ab. Auf diesen Flächen finden mehr oder weniger starke saisonale Veränderungen statt. Eine Bewertung kann sowohl nach der Stärke der Veränderungen als auch nach der Zeit erfolgen. Je intensiver die jeweiligen Farbtöne sind, um so stärker verändert sich die Landschaft im Jahresverlauf. Stark veränderliche Bereiche sind über das gesamte Bild verteilt. Es handelt sich vor allem um feuchtere Gebiete, in denen die Veränderung in Form von Austrocknung stattfindet, um Anbauareale sowie um Brandflächen. Aus dem originalen *NDVI*-Bild ließe sich über die RGB-Farbzunordnung der Zeitpunkt der stärksten Vegetationsbedeckung ableiten, in der generalisierten Karte der saisonalen Veränderungen (Abb. 42) wurde allerdings nach Zu- (grün) bzw. Abnahme (rot) des Vegetationsbestandes zusammengefaßt. Dies ist möglich, da die Entwicklung zwischen Oktober und Januar fast ausschließlich linear erfolgt. Die zwischen Oktober und November festgestellten Trends setzen sich im Regelfall bis Januar fort.

Dabei erscheint eine interessante räumliche Differenzierung: Abgesehen von den unveränderlichen Flächen weist der Großteil des Untersuchungsgebietes (34%) – wie es nach dem Nachlassen der Niederschläge zu erwarten ist – abnehmende Biomassewerte auf (rote Flächen). Ein kleiner Anteil (19%) verzeichnet aber noch mehrere Monate nach Abklingen der Regenzeit eine Zunahme der Biomasse (grün dargestellt). Die Gebiete mit abnehmender bzw. zunehmender Vegetationsbedeckung gliedern sich im saisonalen Verlauf sehr deutlich entsprechend den Sediment- bzw. Bodenverhältnissen. Während auf den Tonen in fast allen Fällen Vegetationsbedeckung nur während und kurz nach der Regenzeit auftritt und dann rasch abtrocknet, schiebt sich der Höhepunkt des Pflanzenbewuchses auf den Sandflächen bis weit in die Trockenzeit hinaus. Dabei spielen mehrere Faktoren eine Rolle. Der schnell aufkommende und schnell wieder verschwindende Bewuchs auf den Tonen setzt sich hauptsächlich aus Gräsern und wassertoleranten Pflanzen zusammen. Lediglich die Tonbereiche, in denen Trockenzeitanbau betrieben wird, zählen zu den Zunahmegebieten. Dem steht ein zu einem größeren Anteil aus Büschen und Bäumen bestehender Bewuchs auf den Sanden gegenüber. Diese Lebensformen können mit ihren Wurzeln im sandigen Substrat auf tieferliegendes Wasser und vor allem ausdauernder zugreifen. Viele der Gehölze treiben zu einem späteren Zeitpunkt auch neu aus. Zudem bleiben auf den sandigen Regenzeitanbauflächen häufig genutzte (z. B. Bohnen und Hirsestreu) und ungenutzte Pflanzenteile zurück, die bei der *NDVI*-Berechnung Einfluß nehmen.

Abbildung 42 hat gezeigt, daß sich aus einem multitemporalen Datensatz bei entsprechender Aufbereitung sehr gut die saisonalen Veränderungen nachvollziehen und räumliche Beziehungen aufdecken lassen. Deutlich schwieriger stellt sich allerdings eine eindeutige Klassifizierung der Vegetation dar. Größtes Problem dabei ist die extrem große zeitliche Variabilität der Vegetationseinheiten und die demgegenüber sehr geringe spektrale Differenzierung der vom *SPOT-XS*-Sensor aufgezeichneten nur dreikanaligen Szenen. Eine Unterscheidung auf der Ebene von Pflanzenarten ist mit nur einem Infrarot-Kanal und zwei Kanälen aus dem sichtbaren Bereich nicht möglich. Indirekt lassen sich vereinzelt Rückschlüsse auf Artenvorkommen ziehen, indem man zeitliche Aspekte berücksichtigt. Auch die Unterscheidung quasi-natürlicher, spontan nachwachsender Vegetation von Anbaukulturen kann nicht allein über spektrale Merkmale erfolgen. In vielen Fällen (vgl. Ausführungen zur Landwirtschaft in Kap. 6.2.4) ermöglicht die Einbeziehung unterschiedlicher phänologischer

Zustände eine Differenzierung. Zudem ist die Gliederung der natürlichen Vegetation in unterschiedliche Lebensformen nur in wenigen Bereichen eindeutig möglich.

Der hier betrachtete Untersuchungsraum stellt in dieser Beziehung eine sehr günstige Konstellation dar, da er zum einen sehr flach und zum anderen vom Untergrund her recht klar gegliedert ist. Die Ausprägung der natürlichen Vegetation und der angebauten Kulturen ist zudem stark abhängig von bzw. angepaßt an die natürliche Ausstattung, insbesondere den Bodenwasserhaushalt. Außerdem ist der Untersuchungsraum stark anthropogen überprägt und weist so gut wie keine dichteren und artenreicheren Gehölzformationen auf.

An den Beispielen zur Vegetationsbedeckung in Abb. 35b läßt sich das oben Dargelegte nachvollziehen. Anhand des Ton- und Sandausschnittes ohne Anbau zeigt sich die differenzierte spektrale Ausprägung vegetationsbedeckter Flächen auf unterschiedlichem Sediment. Vegetationsaufnahmen vor Ort zeigen ein Artenspektrum, das allerdings nur selten direkt und eindeutig mit spektralen Merkmalen korreliert. Boden- bzw. Sedimentmerkmale überwiegen innerhalb der Spektralsignatur. Allerdings zeigen Standorte mit gleichen Boden- bzw. Sedimenteigenschaften und ähnlicher Vegetationsbedeckung weitestgehend vergleichbare Spektralausprägungen. Eine Klassifizierung 'nach Standorten' mit anschließender Zuordnung typischer Artenzusammensetzung ist dadurch weitgehend möglich (vgl. dazu STURM et al. 1996).

Vergleicht man weiterhin die sandigen Standorte mit nur wenigen Gehölzen im Jahresverlauf, so zeigt sich, daß eine Unterscheidung von Formationen in der Regenzeit nicht möglich ist. Die Grasbedeckung dominiert im September, erst ab Oktober mit dem nun sehr schnellen Abtrocknen der Grasschicht setzen sich einzelne Gehölze gut sichtbar durch. Während nur im Oktober und teilweise im November die abgetrocknete Grasschicht noch durch helle Brauntöne im Falschfarbenbild zu erkennen ist, lassen sich Bäume erst ab Oktober, besser sogar noch im November und Januar erkennen, da sie sich in der Trockenzeit deutlich von der ansonsten völlig trockenen Umgebung abheben (vgl. auch 'Siedlung', 'Kanal geflutet', 'Sand vereinzelt Gehölze' und 'Gehölze mittel' in Abb. 35b). Im Beispiel 'Gehölze sehr dicht' ist ein Bereich dargestellt, der noch ein kleineres dichtes Waldstück darstellt. Es fällt durch bräunlichere Rottöne auf, im Oktober allerdings werden diese überlagert durch stehendes Wasser mit Vegetation.

Zusammenfassend läßt sich über die Darstellung vegetationsbedeckter Standorte anmerken, daß über die gute visuelle Einschätzung des Satellitenbildes hinaus, eine automatische Klassifizierung auf Grundlage spektraler Information nur auf der Ebene von Vegetationsformationen bzw. teilweise sogar nur von Bedeckungsgraden vornehmen läßt. Zusätzliche Aussagen lassen sich in günstigen Fällen, wie sie im vorliegenden Untersuchungsgebiet gegeben sind, aus phänologischen Unterschieden ableiten. Darüber hinausgehende Interpretationen sind nur durch die Korrelation und Verallgemeinerung von im Gelände aufgenommenen typischen Artenzusammensetzungen für spezifische Standorteigenschaften realisierbar. Da es im betrachteten Untersuchungsgebiet einen sehr starken Zusammenhang zwischen Standorteigenschaften (hauptsächlich Sediment: Sand oder Ton und wiederum damit verknüpft Feuchtigkeitsgradient) gibt, lassen sich entsprechende Schlüsse sehr zutreffend ziehen.

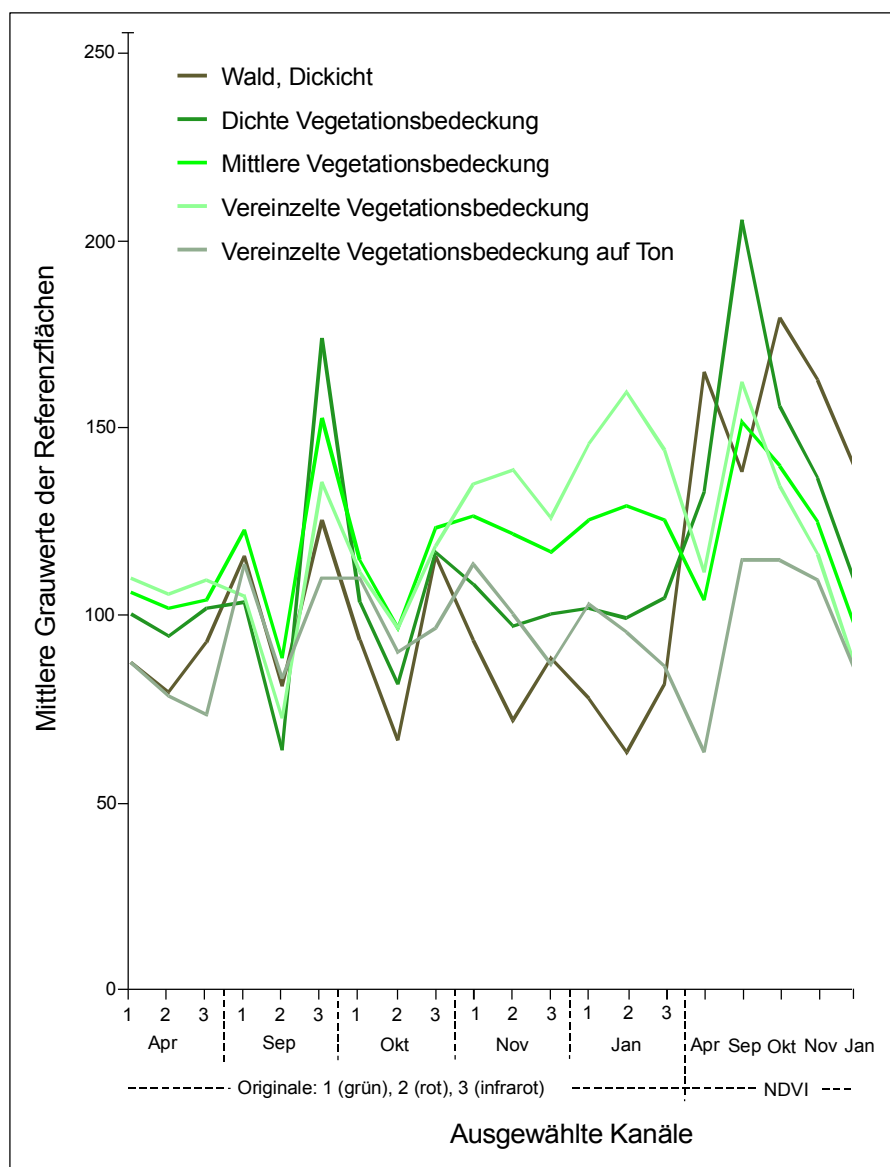


Abb. 43: Reflexionsverhalten vegetationsbedeckter Flächen im Untersuchungsgebiet

In Abb. 43 ist zusammengefaßt, welche Spektralkanäle zu welchen Zeitpunkten die besten Voraussetzungen zur Gliederung in verschiedene Bedeckungsklassen liefern. Dafür wurden etwa 20 verschiedene Referenzflächen in Bedeckungsklassen gruppiert und ihre Spektralsignaturen zusammengefaßt (vgl. Legende von Abb. 43). Generell zeigen fast alle Signaturen das typische Spektralverhalten von Vegetation mit minimalen Werten im sichtbaren roten Bereich des Spektrums und maximalen Werten im infraroten. Lediglich die gering vegetationsbedeckten Bereiche weichen von diesem Idealbild ab, da Bodeneinflüsse stärker zum Tragen kommen. Außerdem läßt sich zu fast allen Zeitpunkten eine geordnete Abstufung der Bedeckungsgrade in den Grauwerten erkennen. Vernachlässigt man die Tone in diesem Fall aus obengenannten Gründen, so bildet sich die Vegetationsdichte in allen Spektralkanälen besonders gut in den Nachregenzeitszenen (November, Januar und auch April) ab. Dem steht ein ungeordneter Verlauf der Kurven während der Regenzeit gegenüber. Dieses Phänomen ließ sich bereits anhand der Beispielausschnitte in Abb. 35b darlegen. Lediglich

der Infrarotkanal des Septembertermins zeigt höhere Werte bei höherer Bedeckung – mit Ausnahme des Waldes.

Analog zu den Originalkanälen verhalten sich die Vegetationsindizes. Maximale *NDVI*-Werte treten im September auf. Lediglich die Waldflächen zeigen geringere Werte, was höchstwahrscheinlich auf Störungen im Septemberbild, aber auch auf die Lage der meisten Waldflächen in Feuchtgebieten und damit verbundenem stärkeren Absorptionsverhalten zurückzuführen ist. Während der Regenzeit lassen sich aus den Vegetationsindizes keine eindeutigen Bedeckungsgrade ablesen, erst in der November- und besser noch in der Januarszene ist eine Differenzierung der Vegetationsflächen entsprechend ihrer Bestandsdichte eindeutig möglich. Zusätzlich ordnen sich die tonigen Flächen mit geringeren *NDVI*-Werten gut ein.

6.2.6 Sonstiges

Im Gegensatz zur visuellen Auswertung der panchromatischen Luftbilder (Kap. 6.1 und 6.4) müssen bei der automatischen Auswertung multitemporaler Satellitenszenen auch Erscheinungen berücksichtigt werden, die nicht direkt kartiert werden sollen, aber deutliche Einflüsse auf die Klassifizierung haben. Dazu gehören z. B. Brandflächen, die nur zu bestimmten Zeiten ein extrem abweichendes Spektralverhalten aufweisen, aber auch kleinflächige Objekte mit extremen Reflexionseigenschaften wie Deflationsstandorte.

6.2.6.1 Deflationserscheinungen

Deflationserscheinungen zeichnen sich durch ganzjährige Vegetationsfreiheit aus und sind damit auf den Satellitenszenen ausgrenzbar. Mit Ausnahme sehr weniger Flächen, die saisonal während der Regenzeit mit Wasser gefüllt sein können, treten keine jahreszeitlich bedingten Schwankungen auf. Die beste Klassifizierung von Deflationsschäden ist trotz ihrer geringen Variabilität aber aus den Regenzeitszenen bzw. Vegetationsindizes ableitbar, da sie dann die größten Kontraste zu der vegetationsbedeckten Umgebung zeigen.

Konflikte bei der Klassifizierung können jedoch mit anderen Freiflächen auftreten wie Teilen von Siedlungen, Verkehrswegen oder vegetationsfreien Landwirtschaftsflächen. Da alle diese genannten Flächen Ausgangspunkte für Deflationserscheinungen sein können, sollten die Grenzen zwischen ihnen durchaus als fließend betrachtet werden. Weiterhin wird eine automatische Klassifizierung für sehr kleine Deflationsschäden je nach räumlicher Auflösung der Daten erschwert (vgl. ausführliche Darstellungen zur Kartierung von Deflationsschäden in SKORUPINSKI & FRANKE-SCHARF 1997 und FRANKE-SCHARF & SKORUPINSKI 2000).

6.2.6.2 Brandflächen

Gesondert betrachtet werden müssen Flächen, die zu bestimmten Aufnahmezeitpunkten gebrannt worden sind. Brand vernichtet zum einen die Grasdecke, hinterläßt meist – aber nicht immer – die Baumschicht unversehrt und führt zu verkohlten Flächen, die dann in allen, insbesondere aber im infraroten Spektralbereich extreme Absorptionsmaxima aufweisen. In den Szenen verdecken die Brandspuren jegliche oder teilweise weitere Information, entscheidend ist dabei vor allem der Brandzeitpunkt. Im Untersuchungsgebiet treten die ersten

Brände in der November-, weitere neue in der Januarszene auf. Sie sind in Abb. 35a durch schwarze Färbung zu erkennen.

Obwohl visuell eine sehr eindeutige Ausgrenzung der Brandflächen möglich erscheint, sind bei einer automatischen Klassifizierung Konflikte mit Wasserflächen (vgl. gefüllten Kirenowa-Kanal in Abb. 35b) wie auch mit vegetationsfreien sehr tonigen Böden zu erwarten. Die später gebrannten Flächen grenzen sich eindeutiger durch sehr niedrige Januar-Infrarot- und *NDVI*-Werte ab. Auch liegen alle drei Januar-November-Differenzwerte weit unter allen übrigen. Vorsicht ist also insbesondere bei den früh und nur schwach oberflächlich gebrannten Flächen geboten, die sich schwerer automatisch erkennen lassen und zudem im Januarbild teilweise wieder vegetationsbedeckt sind. Sie können zu Fehlinterpretationen führen.

Gebrannt werden im Untersuchungsgebiet hauptsächlich dicht bewachsene, außerhalb der Anbauflächen liegende Sandgebiete. Mit einigen wenigen kleinräumigen Ausnahmen wird auf den Tonflächen nicht gebrannt. Flächenhaft, wenn auch nur schwach, wurde vor allem nördlich des Ngelewa-Strandwalles und im äußersten Südwesten des Untersuchungsgebietes gebrannt. Eine auf dem Novemberbild stark verkohlte Fläche hat sich genau bis zur Tongrenze ausgebreitet (Blatt 68NW4, nördlich Wubsa). Im Januar sind größere Brände vor allem im Feuchtgebiet nordöstlich Jillam, auf einer Sandinsel innerhalb der Tonfläche bei dem verlassenen Ort Belase sowie in der Nähe der Trockenzeitanbauflächen östlich Musune hinzugekommen. Gleichzeitig sind durch verstärkte Wasserzufuhr aus den Tschadzufüssen größere feuchtere Gebiete im Südosten und Nordosten des Untersuchungsgebietes im Falschfarbenbild nur schwer von den Brandflächen zu unterscheiden (vgl. Abb. 35a).

6.2.7 Zusammenfassung der saisonalen Veränderungen und multitemporale Klassifizierung

In den vorangegangenen Unterkapiteln sind die phänologischen Zustände im Jahresverlauf und die zugehörigen spektralen Eigenschaften für alle Objektklassen im Untersuchungsgebiet detailliert erörtert worden. Als wichtigste saisonal variabel wirkende Einflußfaktoren haben sich dabei Wasser und Vegetation herausgestellt. Beide Faktoren beeinflussen so gut wie alle Objektklassen, wenn auch unterschiedlich stark, und verursachen die verschiedenen Ausprägungen im Spektralverhalten. Starke Einwirkung auf das Spektralsignal haben zudem die zu verschiedenen Zeiten auftretenden Brände, die zum Teil bewußt gelegt sind, aber auch als spontane Buschfeuer auftreten können.

Als Zusammenfassung der vorangegangenen Ausführungen sind in Abb. 44 alle phänologischen Phasen der Objektklassen im Untersuchungsgebiet und entsprechend die Zeiten bester allgemeiner Differenzierung dargestellt. Aus der phänologischen Ausprägung und den zugehörigen Reflexionseigenschaften der verschiedenen Objektklassen zu bestimmten Zeitpunkten sowie unter der Berücksichtigung verschiedener Gliederungsebenen ergeben sich sehr differenzierte Ansatzpunkte für Klassifizierungen, die unterschiedlichen Fragestellungen bzw. vor allem Detaillierungsgraden entsprechen.

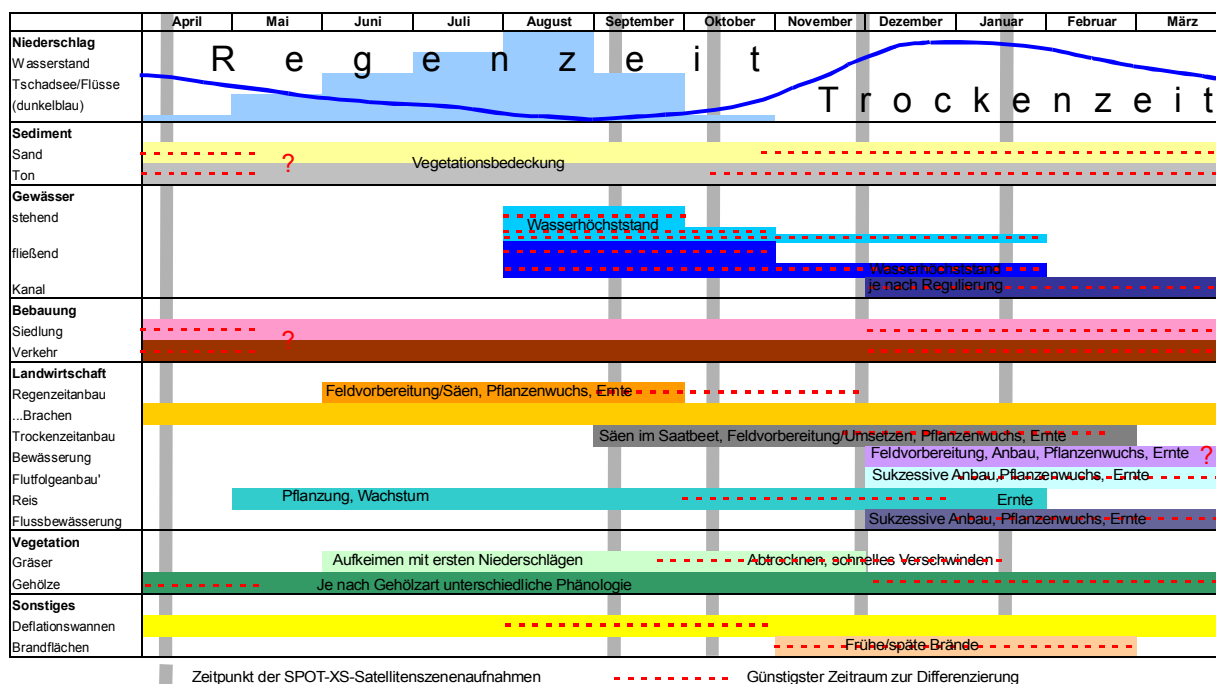


Abb. 44: Zusammenfassung der phänologischen Zustände im Jahresverlauf für alle Landbedeckungs- und Landnutzungsklassen im Untersuchungsgebiet und Markierung der Zeiten bester allgemeiner Differenzierung

Es müssen dabei drei Differenzierungsstufen unterschieden werden: Übergeordnet spielt die Trennung der einzelnen Objektklassen voneinander die wichtigste Rolle (Kategorie I in Tab. 6, z. B. Trennung bebauter Flächen von Gewässern). In einer darunterliegenden Ebene wurde die Aufspaltung in verschiedene Ausprägungen dieser übergeordneten Kategorie beleuchtet (Kategorie II in Tab. 6, z. B. Gliederung der Landwirtschaftsflächen in Regenzeit-, Trockenzeit- oder sonstigen Anbau). In einigen Kategorien ist unter Umständen eine weitere Differenzierung möglich (z. B. Ausgliederung von Standorten unterschiedlicher Bodenart, Feuchtigkeit bzw. Vegetationsbedeckung innerhalb der Sandflächen). Nur in den seltensten Fällen lassen sich alle dieser Detailstufen innerhalb eines Klassifizierungsvorganges berücksichtigen. Aufgrund der Komplexität dieses Themas kann hier nur ein kleiner Teilaspekt ausgeführt werden. Ziel soll dabei sein, eine umfassende, also möglichst alle Objektklassen des Untersuchungsgebietes erfassende und gleichzeitig soweit als möglich detaillierte und ganzjährig repräsentative Klassifizierung des Untersuchungsgebietes vorzustellen.

In Abb. 45 ist das Ergebnis der multispektralen und -temporalen SPOT-XS-Satellitenbildklassifizierung dargestellt. Dabei sind, soweit möglich, die gleichen Klassen wie für die visuellen Luftbildauswertungen (Kap. 6.1 und 6.4) berücksichtigt und farblich analog dargestellt. Unterschiede ergeben sich zwingend aus der sehr unterschiedlichen Datengrundlage sowie aus abweichenden Methoden und Herangehensweisen. Das Klassifizierungsergebnis wurde in einem schrittweisen hierarchischen Verfahren mit jeweils unterschiedlichen Klassifizierungsparametern generiert.

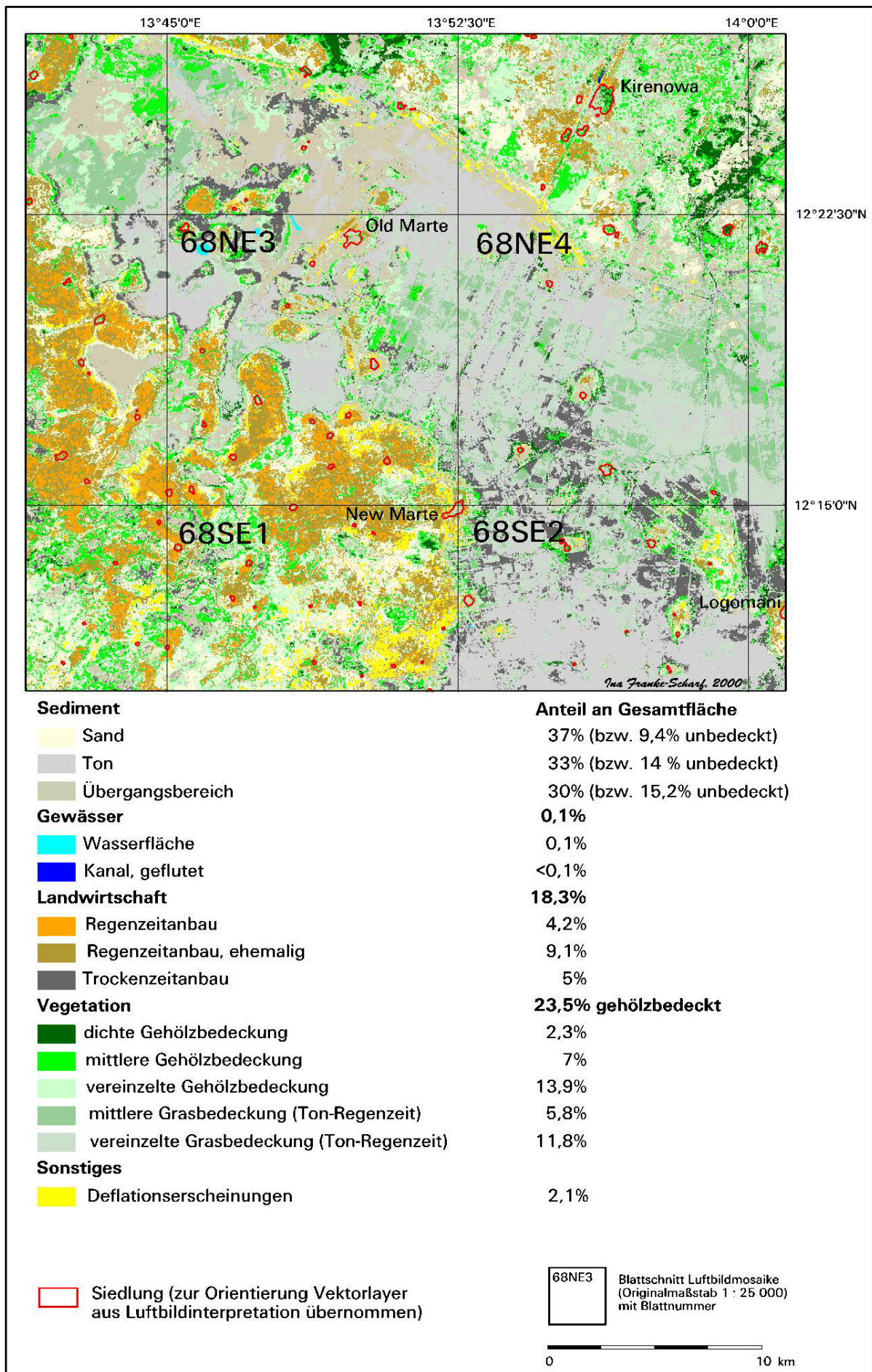


Abb. 45 : Landbedeckungs- und Landnutzungsklassifizierung der Vegetationsperiode 1995/96 aus multitemporalen SPOT-XS-Satellitenszenen

Begonnen wurde mit der Gliederung des Untersuchungsgebietes bezüglich der übergeordneten naturräumlichen Gegebenheiten, da sich gezeigt hat, daß das Spektralverhalten stark von diesen geprägt ist und sich die Landbedeckung zudem recht einfach segmentieren läßt. Außerdem ermöglicht die Gliederung in die unterschiedlichen Landbedeckungsklassen (**Sedimente**) gleichzeitig eine nahezu eindeutige Zuordnung sehr vieler Landnutzungsklassen. Diese Vorgehensweise bietet sich weiterhin an, da sie für das Untersuchungsgebiet eine einfache Überblicksgliederung liefert. Das Fehlen jeglicher Festgesteine sowie die sehr klare spektrale Differenzierung der sandigen von den tonigen Sedimenten bildet eine gut geeignete Ausgangsbasis für weitere Segmentierungsschritte. Wie bereits im Unterkapitel 6.2.1 ausführlich dargestellt, verwendet man für die Klassifizierung der Sedimente sinnvollerweise einen extremen Trockenzeitpunkt, zu dem Beeinflussungen durch Vegetation und Landnutzungseinheiten minimiert sind. Da die Sedimentverteilung im Untersuchungsgebiet keinen kurzfristigen Schwankungen unterliegt, kann in diesem Fall auf die April-Satellitenszene von 1986 zurückgegriffen werden. Sie ist vom phänologischen Zustand für eine generelle Gliederung der Sedimente noch geeigneter als die Januarszene von 1996. Klassifiziert wurde mit allen drei Originalkanälen der Aprilszenenach dem unüberwachten *ISODATA*-Verfahren, weil so alle Differenzierungen in den Daten im Klassifizierungsprozess berücksichtigt werden konnten. 18 Klassen wurden vorgegeben, die nach der Klassifikation im visuellen Vergleich zu sinnvollen Landbedeckungsklassen aggregiert wurden. Die multispektrale automatische Satellitenbildklassifikation ermöglicht im Gegensatz zur visuellen Luftbildinterpretation eine Klassifizierung der Sedimente in deutlich mehr Klassen entsprechend der Sand- und Tongehalte. Für die Darstellung in Abb. 45 und die weitere Berücksichtigung wurde allerdings nur mit drei Klassen (Sand, Ton und Übergangsbereich) gearbeitet und diese drei Bereiche entsprechend als Masken angelegt. Die Klasse ‚Übergangsbereich‘ wurde im Gegensatz zur Luftbildkartierung aufgenommen, um bei folgenden Klassifizierungsschritten darauf zurückgreifen zu können.

In einem zweiten Schritt erfolgte die Klassifizierung der **Landwirtschaftsflächen**. Durch die vorangegangene Gliederung der übergeordneten Landbedeckungseinheiten wurde der potentielle Bereich der unterschiedlichen Anbausysteme bereits räumlich eingegrenzt. **Regenzeitbauflächen** konnten somit aus der Teilmenge 'Sand' ausgegliedert werden, wobei 'Ton-' und 'Übergangsbereich' bei der Klassifizierung maskiert blieben. Diese Vorgehensweise hatte neben der Verringerung der Gefahr von Fehlklassifikationen den entscheidenden Vorteil, daß der Klassifizierungsalgorithmus speziell auf die in den Sandbereichen vorkommenden spektralen Signaturen ausgerichtet und damit spezialisiert werden konnte. Ebenso wie bei den Landbedeckungsklassifizierungen zeigte sich, daß eine monotonale Klassifizierung in diesem speziellen Fall die besseren Ergebnisse liefert. Für die Klassifizierung der Regenzeitbauflächen und die aktuell nicht genutzten Felder wurde auf den Oktoberzeitpunkt zurückgegriffen. Denn kurz nach der Ernte (Ende September/Anfang Oktober) entstehen die markantesten Spektralsignale (vgl. Kap. 6.2.4). Klassifiziert wurden alle drei originalen Oktoberkanäle wiederum unüberwacht mit 18 Klassen.

Die **Trockenzeitbauflächen** befinden sich zum weitaus größten Teil im Übergangsbereich zwischen Sand und Ton, allerdings dort, wo keine größeren Sandinseln auftreten, auch im eigentlichen Tonbereich. Obwohl damit ein räumlich recht großer und spektral heterogener Bereich als Klassifizierungsgrundlage diente, konnte unter Maskierung des Sandbereiches ein gutes Ergebnis erzielt werden. Entgegen der Feststellungen zur optimalen Klassifizierung

der Trockenzeitanbauflächen mit dem Novembertermin (Kap. 6.2.4) und entgegen der visuellen Beurteilung reicht allerdings eine monotemporale unüberwachte Klassifizierung für eine eindeutige Differenzierung nicht aus. Konflikte treten mit den gehölzbestandenen Feuchtgebieten auf, die nördlich des Ngelewa-Strandwalles kleinräumig vorkommen. Eine getrennte Betrachtung dieses Bereiches, in dem kein typischer Trockenzeitanbau sondern nur kleinräumig Flutfolgeanbau auftritt, wäre eine sinnvolle Alternative gewesen. Zufriedenstellend konnten die Trockenzeitanbauflächen mit einer multitemporalen Kanalzusammensetzung aus Oktober-, November- und Januartermin klassifiziert werden. Eingebracht wurden alle Original- und zusätzlich die *NDVI*-Kanäle in eine überwachte *Maximum-Likelihood*-Klassifizierung. Die Signaturen wurden aus den Evaluierungsprozessen (vgl. Kap. 6.2.1 bis 6.2.6) übernommen. Auf dieses aufwendigere Verfahren mußte zurückgegriffen werden, da alle Versuche mit unüberwachten Verfahren Konflikte mit anderen Objekten aufwiesen: monotemporal wie bereits beschrieben mit den Gehölzen, die im November frisches Grün aufweisen, und multitemporal mit Siedlungs- und anderen Freiflächen, die ähnlich reflektieren wie die unbewachsenen Trockenzeitanbauflächen.

Im dritten Schritt wurden Sand- und Übergangsbereich getrennt vom Tonbereich gemäß ihrer quasi-natürlichen **Vegetationsbedeckung** klassifiziert. Ausmaskiert wurden dabei jeweils die Anbauflächen, da für Rasterdaten keine gleichzeitige Darstellung sich überlagernder Objektklassen möglich ist (vgl. Darstellung der Gehölzflächen durch Vektordaten in transparenten Schraffuren z. B. in Beilagenkarte 1 und 2). Die besten Klassifizierungsergebnisse lieferten dabei multitemporale Ansätze mit unüberwachter *ISODATA*-Klassifizierung der Oktober-, November- sowie Januar-Zeitpunkte zusammen mit den *NDVI*-Kanälen. Ebenso wie für die Sedimentgliederung ist es möglich, für die Vegetationsbedeckung differenziertere Abstufungen gemäß der Bedeckung zu bilden. Die multispektrale Auswertung der *SPOT*-Szenen läßt neben der Beurteilung der Gehölzbedeckung auch eine Einschätzung des Grasbewuchses während der Regenzeit zu. Allerdings überlagern bei gleichzeitigem Vorhandensein beider Lebensformen die Gehölze das Spektralsignal. Aus diesem Grund wurde eine im Gegensatz zur Luftbildauswertung leicht veränderte, etwas differenziertere Gliederung der Vegetationsklassen vorgenommen (vgl. Legende in Abb. 45).

Die gleichen Kanalkombinationen wie für die Vegetation wurden auch für die Klassifizierung der **Wasserflächen** im Untersuchungsgebiet verwendet. Der für diese Objektklasse wichtige September-Termin konnte nicht eingebracht werden, da Konfusionen mit den ebenfalls wasserhaltigen Wolken, Dunst sowie den wie tiefe Wasserflächen reflektierenden Schatten auftraten. Aufgrund der sehr heterogenen spektralen Eigenschaften sowie der äußerst starken saisonalen Dynamik zeigten unüberwachte Klassifizierungsansätze keinen Erfolg. Die visuell deutlich abgrenzbaren Flächen dieser Klasse stehen in Konflikt zu den sehr tonigen Landoberflächen, zu Brandspuren sowie zu trockengefallenen Rinnen und Kanalabschnitten. Bestes Ergebnis lieferte wiederum eine überwachte *Maximum-Likelihood*-Klassifizierung mit sehr vielen Klassen aus verschiedenen Einzel-Wassersignaturen. Lediglich die temporären Wasserflächen im Bereich des Kartenblattes 68NE3 und einige wenige sehr kleine Tümpel im südöstlichen Untersuchungsgebiet wurden wiedergegeben. Noch schwieriger war die Diskriminierung der linearen Wasserelemente, von denen als einziger der Kirenowa-Zufuhrkanal – wenn auch unvollständig – ausgewiesen ist.

Einfach gestaltete sich die Ausweisung der **Deflationsstandorte** im Untersuchungsgebiet. Die höchste Trefferquote wurde durch eine *Maximum-Likelihood*-Klassifizierung mit 18 aus dem Evaluierungsprozeß abgeleiteten Klassen erzielt. Eingabekanäle waren Oktober-, November- und Januar-Originalkanäle. Aufgrund der eindeutigen Spektralsignatur, die durch das durchgehende Fehlen von Vegetation und starke Reflexion der Sandfläche hervorgerufen wird, war eine Beschränkung auf die Sandareale nicht nötig.

Die größten Probleme ergaben sich bei den Klassifizierungsversuchen zur **Bebauung**. Weder für Siedlungen noch für Verkehrslinien konnten umfassend geeignete Verfahren gefunden werden. In der Satellitenbilddauswertung (Abb. 45) konnten deshalb die linear und kleinräumig auftretenden Elemente der Bebauung nicht berücksichtigt werden. Die Umrisse der Siedlungen wurden zur Orientierung aus der Luftbildkartierung übernommen.

Eigentlich sollten **Brandflächen** nicht als Objektklasse ausgewiesen werden. Aber ihre markante Abbildung im November- und Januartermin verursachen starke Fehlklassifikationen in den von Bränden beeinflussten Bereichen. Um diese zu markieren und die Aussage des Klassifikationsergebnisses an diesen Stellen zu relativieren, wurden Brandflächen dennoch klassifiziert und als Folie (Abb. 45f) dem Klassifikationsergebnis überlagert. An diesen Stellen treten also Mehrfachzuweisungen auf. Die Klassifizierung erfolgte unabhängig von allen vorher gebildeten Objektklassen durch *Maximum-Likelihood*-Zuweisungsregeln. Die dazu notwendigen Signaturen wurden wiederum aus dem Evaluierungsprozess gezogen. Die Klassifizierung war aufgrund der markanten Brandsignaturen eindeutig. Beste Ergebnisse lieferten dabei die Original- und *NDVI*-Kanäle des November- und Januartermins.

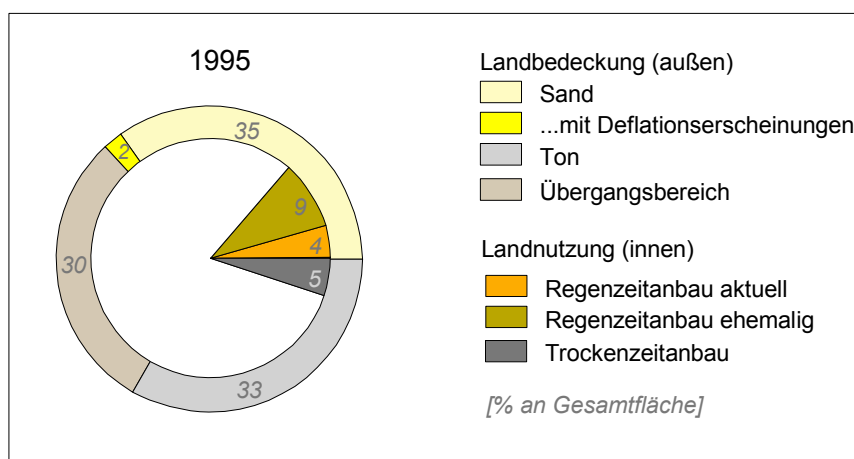


Abb. 46: Zusammenfassung der Landbedeckung und Landnutzung für die Saison 1995/96 (nur flächenhafte Elemente)

Das kombinierte normierte Kreisdiagramm in Abb. 46 faßt die aus der multitemporalen und multispektralen *SPOT*-Satellitenszenen-Klassifizierung erzielten Ergebnisse zusammen und gibt gleichzeitig eine direkte qualitative und quantitative Vergleichsmöglichkeit zu den Ergebnissen aus den Luftbilddauswertungen (Abb. 34 und 59) sowie den Satellitenbilddauswertungen anderer Zeitpunkte (Kap. 6.3). Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse erfolgt in Kap. 7.1.1.

6.3 Abschätzung des Einflusses interannueller Schwankungen

Ausgehend von den Ergebnissen zur saisonalen Dynamik, die sehr starke Variationen vor allem während und kurz nach der Regenzeit ergeben haben, sollen nun in einem nächsten Schritt Veränderungen unterschiedlicher Jahre zu möglichst ähnlichen saisonalen Zeitpunkten und damit phänologisch vergleichbaren Zuständen untersucht und bewertet werden. Dabei ist insbesondere im Hinblick auf die Kartierung langfristiger Veränderungen von Interesse, inwieweit interannuelle Schwankungen im Vergleich verschiedener Jahre auftreten, wie sie sich in den Spektraleigenschaften niederschlagen und wie stark diese Unterschiede sind. Unter Hinzunahme von Klimadaten soll weiterhin erörtert werden, welche Ursachen die interannuellen Schwankungen haben und inwieweit zuverlässige Korrelationen mit Niederschlagsdaten gegeben sind.

In Konsequenz zu den zusammenfassenden Feststellungen zur saisonalen Dynamik (in Kap. 6.2.7) konzentrieren sich die Untersuchungen der interannuellen Unterschiede auf die Differenzierungen in der Vegetationsbedeckung, da sie zum einen der variabelste Faktor und zum anderen mit Hilfe von Vegetationsindizes relativ gut aus Satellitenszenen ableitbar ist. Vegetationsindizes bieten sich zudem an, da sie sich aus Daten aller verwendeten unterschiedlichen Sensoren (hier *SPOT-XS*, *Landsat-TM* und *Landsat-MSS*) ableiten lassen und damit eine weitgehend sensorunabhängige Vergleichbarkeit gewährleisten. Der hier angewendete *Normalized Difference Vegetation Index* (vgl. Kap. 5.6.4.1) reagiert sowohl auf den Bedeckungsgrad und die Menge aktiver Biomasse als auch am unteren Ende der Skala ebenso sensibel auf Feuchtigkeitsunterschiede und Brandflächen und gibt damit umfassend Auskunft über alle hochvariablen Elemente. Die beiden letzten Merkmale werden aber in den folgenden Ausführungen nur am Rande berücksichtigt.

Die interannuellen Unterschiede werden beispielhaft – ausgehend von dem in Kap. 6.2 ausführlich analysierten multitemporalen Datensatz der Vegetationsperiode 1995/96 – anhand der darüber hinaus verfügbaren multitemporalen und multisensoralen Satellitenszenen vorgenommen (vgl. Übersichten in Kap. 4.4.1, 4.4.2 und 4.4.3). Sie beschränken sich regional, ebenso wie die Auswertungen zur saisonalen Dynamik und zu langfristigen Entwicklungen, auf das engere Untersuchungsgebiet (vgl. Abb. 12). Die dabei verwendeten Methoden und theoretischen Grundlagen sind in Kap. 5.6 erläutert. Detailliertere Auswertungen und insbesondere Klassifizierungen der multisensoralen Satellitendaten, die einen Überblick auch über alle anderen Landbedeckungs- und Landnutzungselemente geben würden, können im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden. Auch beschränken sich die Auswertungen wegen der direkten Vergleichbarkeit nur auf die von allen drei Sensoren gemeinsam abgedeckten Spektralbereiche (sichtbarer grüner, roter und naher infraroter Bereich des Spektrums). Interessante Aspekte würden sich durch die zusätzliche Einbeziehung weiterer Spektralkanäle aus dem nahen Infrarot (bei *Landsat-MSS*) bzw. dem mittleren und thermalen Infrarot (bei *Landsat-TM*) ergeben.

Die Auswahl und Zusammenstellung der in den folgenden Unterkapiteln beschriebenen Datensätze ist zunächst einmal durch das vorhandene Datenmaterial vorgegeben. Die Kombination der Datensätze miteinander wurde dann sinnvoll nach den Aufnahmezeitpunkten im

Jahresverlauf zusammengestellt. Dabei sollte möglichst die gesamte durch Satellitenszenen abgedeckte Zeitspanne berücksichtigt werden, um im Anschluß an die Einzelbetrachtungen (Kap. 6.3.1 bis 6.3.5) eine Zusammenstellung und Bewertung langfristiger Veränderungen zu ermöglichen (vgl. Kap. 6.3.6 und 6.4).

Zusätzlich zu den (in Kap. 6.2) ausführlich untersuchten vier *SPOT-XS*-Satellitenszenen der Vegetationsperiode 1995/96 sowie der *SPOT*-Szene vom April 1986 stand eine weitere vom Januar 1995 zur Verfügung. Letztere bot sich für einen direkten interannuellen Vergleich mit der Januarszene von 1996 idealerweise an, denn beide Datensätze stammen vom gleichen Sensor und liegen exakt ein Jahr auseinander (Kap. 6.3.1).

Weiterhin konnten *Landsat-Thematic Mapper(TM)*-Aufnahmen vom November 1992 sowie vom Februar 1988 in die Untersuchungen einbezogen werden. Erstere Szene deckt allerdings nur einen Teilbereich des Untersuchungsgebietes ab und enthält in geringem Maße atmosphärische Störungen in Form von Dunstschleiern. Sie konnte jedoch in ihrem Ausschnitt zum Vergleich mit der *SPOT*-Szene vom November 1995 herangezogen werden (Kap. 6.3.2). Die Unterschiede in der geometrischen Auflösung (20 m bei *SPOT-XS* gegenüber 30 m bei *Landsat-TM*) sollten bei sehr ähnlicher spektraler und gleicher radiometrischer Auflösung kein Hindernis darstellen.

Die *Landsat-TM*-Szene vom Februar 1988 konnte mit einer zum gleichen Zeitpunkt aufgenommenen südlich anschließenden Szene mosaikiert werden und deckt so das gesamte engere Untersuchungsgebiet ab. Zu einem bereits fortgeschrittenen Trockenzeitpunkt aufgenommen, konnte das Mosaik vom Februar 1988 dem Apriltermin 1986 des *SPOT*-Satelliten gegenübergestellt werden. Weitere Trockenzeitszenen liegen vom mit 79 m geometrisch und 128 Graustufen radiometrisch deutlich geringer auflösenden *Landsat-Multispectral Scanner (MSS)* vor. Ein Vergleich mit den *SPOT*- und *TM*-Daten wurde anhand der Februarszene von 1973 gewagt. Sie paßt insofern gut zu den eben vorgestellten Trockenzeitszenen von 1986 und 1988, als sie ebenso wie diese in einem extremen Trockenjahr aufgenommen wurde (Kap. 6.3.5).

Sehr gut untereinander vergleichbar sind die übrigen *MSS*-Trockenzeitszenen, die 1975, 1976 und 1979 jeweils im März mit nur wenigen Tagen Unterschied aufgenommen worden sind (Kap. 6.3.3). Leider enthält die *Landsat-MSS*-Szene von 1976, zusätzlich zu den in allen *MSS*-Szenen alle 6 Zeilen auftretenden Streifungen, Störungen durch falsche Sensorkalibrierung in allen Spektralbereichen. Diese wirken sich als zusätzliche sehr breite Streifen mit unterschiedlichen Grauwerten aus und sind so groß, daß sie auch über automatische oder manuelle Korrekturverfahren nicht zufriedenstellend eliminiert werden konnten (siehe Abb. 49).

Für die Jahre 1972 und 1978 liegen zwei *Landsat-MSS*-Szenen von Anfang Dezember vor, die aufgrund dieses Aufnahmetermins noch Einflüsse der vorangegangenen Regenzeit abbilden. Sie werden gesondert (in Kap. 6.3.4) miteinander verglichen. Zusätzliche Bedeutung erlangen diese beiden Zeitpunkte vor dem Hintergrund der häufig diskutierten Sahel-Dürre, die Anfang der 1970er Jahre durch deutlich niedrigere mittlere Jahresniederschläge gekennzeichnet war. Ein zusätzlicher Vergleich mit den in Kap. 6.3.3 untersuchten Satelli-

tenszenen der 1970er Jahre ermöglichte umfassende Aussagen über diese häufig diskutierte Dekade.

Eine abschließende Zusammenfassung der interannuellen Unterschiede mit einem Ausblick auf langfristige Vergleiche erfolgt in Kapitel 6.3.6, bevor dann in Kapitel 6.4 die Ausführungen zu den langfristigen Entwicklungen beginnen.

6.3.1 Vergleich Januar 1995 - Januar 1996

Die beiden im Abstand von genau einem Jahr vom gleichen Sensor aufgenommenen störungsfreien *SPOT*-Satellitenszenen bieten eine ideale Grundlage für einen interannuellen Vergleich. Die Januarszene von 1996 wurde im Rahmen der Untersuchungen zur saisonalen Dynamik bereits ausführlich analysiert und interpretiert und stellt damit einen gut geeigneten Ausgangspunkt für die Beschreibung interannueller Unterschiede sowie die Ableitung von Ursachen dar.

Bereits die visuelle Beurteilung (Abb. 47) beider etwa 3 Monate nach Ende der Regenzeit aufgenommenen Szenen zeigt Unterschiede. So wird auf den ersten Blick deutlich, daß die 1995er Szene eine deutlich stärkere Vegetationsbedeckung aufweist (rote Farbtöne – starke Reflexion im infraroten Bereich des Spektrums). Am auffälligsten äußert sich dies in den sandigen Gebieten, in denen die Vegetation nach der Regenzeit weniger stark abgetrocknet ist als im Folgejahr zu selben Zeit.

Auch die Tongebiete weisen 1995 eine stärkere Vegetationsbedeckung auf, erkennbar an den braunen Farbtönen (abgetrocknete Grasbedeckung) und an den rötlichen Farbtönen (Trockenzeitbauflächen) vor allem im Nordwesten des Untersuchungsgebietes. Trockenzeitbau erfolgte 1995 in stärkerem Maße sogar auf den extrem tonigen Böden und ist nicht nur auf die Übergangsböden zwischen Sand und Ton beschränkt wie 1996.

Erkennbar an den sehr dunklen Farbtönen und klar abgegrenzten rechteckigen Formen sind außerdem die nur 1995 auftretenden vorbereiteten Felder im Bewässerungsgebiet. Auf der 1996er Szene finden sich deutlich mehr Brandflächen als auf der älteren Szene. Weitere Unterscheidungsmerkmale zeigen sich am Bewässerungszuleitungskanal bei Kirenowa, der 1995 vollständig wassergefüllt ist (schwarze Farbe), im Bereich um Kirenowa aber stark mit aquatischer Vegetation (rote Farbe) bedeckt ist. 1996 endet die Wasserfüllung bereits an der Pumpstation bei Kirenowa, neben dem Fehlen vorbereiteter Bewässerungsfelder ein weiteres Zeichen dafür, daß nicht ausreichend Wasser für Bewässerungsanbau zur Verfügung gestanden hat.

Ebenfalls unterschiedlich stellen sich die Bereiche um den Entwässerungskanal im äußersten Nordosten der Untersuchungsregion dar. Während 1995 eine größere und mehrere kleine offene Wasserflächen (hellblau) mit zum Teil aquatischer, aber auch die Wasserflächen umgebender Vegetation auftreten, ist dieser Bereich 1996 deutlich trockener. Offene Wasserflächen finden sich 1995 auch entlang der Straße nach Mongonu und eine sehr große südlich Bula Cesabe im südöstlichen Bereich des Ausschnittes. Außerdem zeigt die

Szene von 1995 im Gegensatz zur jüngeren viele Bereiche, in denen Flutfolgenanbau betrieben wird (v. a. nordöstlich Kirenowa).

Vergleicht man die wichtigsten statistischen Kennwerte der beiden *SPOT*-Ausschnitte, so lassen sich nur geringe Unterschiede feststellen. Die jüngere Szene bestätigt mit etwas höheren Reflexionswerten und geringeren *NDVI*-Werten den in der visuellen Beurteilung gewonnenen Eindruck geringerer Vegetationsbedeckung. Die Januaraufnahme von 1995 zeigt im Vergleich zur Aufnahme von 1996 etwas geringere Korrelationen der Spektralkanäle untereinander. Das gilt sowohl für den roten mit dem infraroten (0,91 gegenüber 0,97) als auch noch stärker für den grünen mit dem infraroten Spektralbereich (0,85 gegenüber 0,92). Aber auch die um ein Jahr auseinanderliegenden Satellitenszenen zeigen mit Korrelationskoeffizienten zwischen 0,73 und 0,83 relativ große Übereinstimmungen.

Wie in der Einführung zu Kapitel 6.3 bereits erwähnt wurde, lassen sich interannuelle Unterschiede am besten unter Verwendung der Vegetationsindizes verfolgen und interpretieren. Analog zur Darstellung der saisonalen Veränderungen in Abb. 42 sind in Abb. 47 neben den beiden Vergleichsszenen die Veränderungen bezüglich der Vegetationsbedeckung zwischen Januar 1995 und Januar 1996 dargestellt. Flächenanteile, bezogen auf die Gesamtfläche des engeren Untersuchungsgebietes, geben quantitative Auskunft über die Veränderungen, die anhand der Karte auch lokalisiert werden können.

So zeigt sich, daß der größere Teil des Untersuchungsgebietes zwischen 1995 und 1996 keine interannuellen Unterschiede aufweist (57%). Etwa die Hälfte des Ausschnittes – in etwa der gesamte Tonbereich – ist im Januar beider Jahre vegetationsfrei (weiß dargestellt). Weitere 8% zeigen zu beiden Zeitpunkten eine unveränderliche unterschiedlich dichte Vegetationsbedeckung. Nur 1% der Fläche ist dauerhaft mit dichter Vegetation bedeckt, dies sind neben einigen Siedlungsbereichen (vgl. z. B. Kirenowa und Jillam) und Arealen mit angepflanzten Bäumen (z. B. bei New Marte) nur kleinere dichte Gehölzbereiche im Feuchtgebiet im Nordosten des Ausschnittes.

Etwas über 43% des Untersuchungsgebietes weisen mehr oder weniger starke interannuelle Veränderungen auf (farbig dargestellt in Abb. 47). Dabei zeigen nur etwa 5% der Flächen 1996 eine stärkere Vegetationsbedeckung als 1995 (Grüntöne). Dies sind sehr häufig Bereiche, die 1995 Wasser enthielten bzw. noch zu feucht für eine Vegetationsbedeckung waren (z. B. im östlichen Bereich von Kartenblatt 68NE4 oder entlang der Sand-Ton-Übergänge im zentralen Bereich).

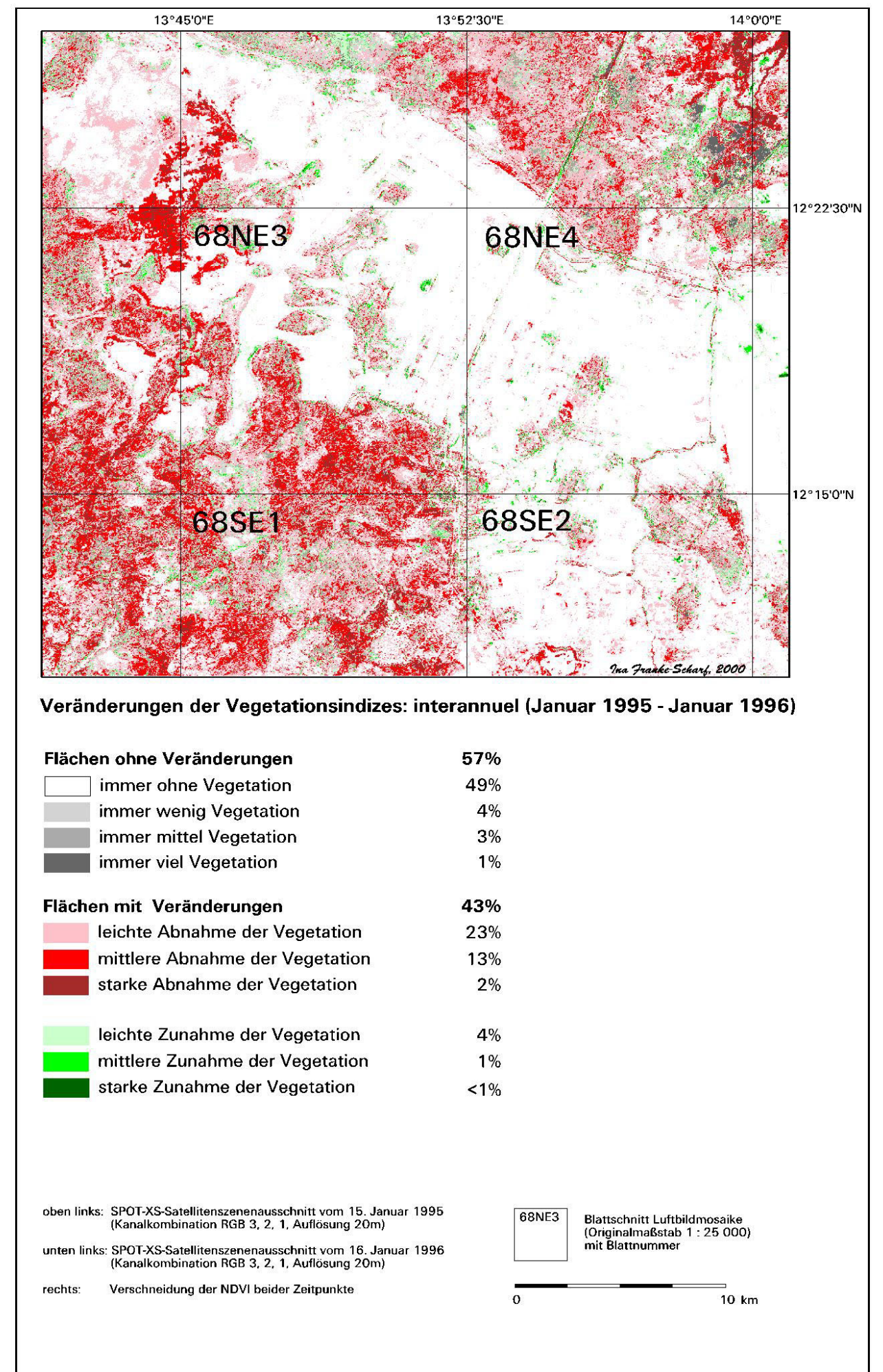
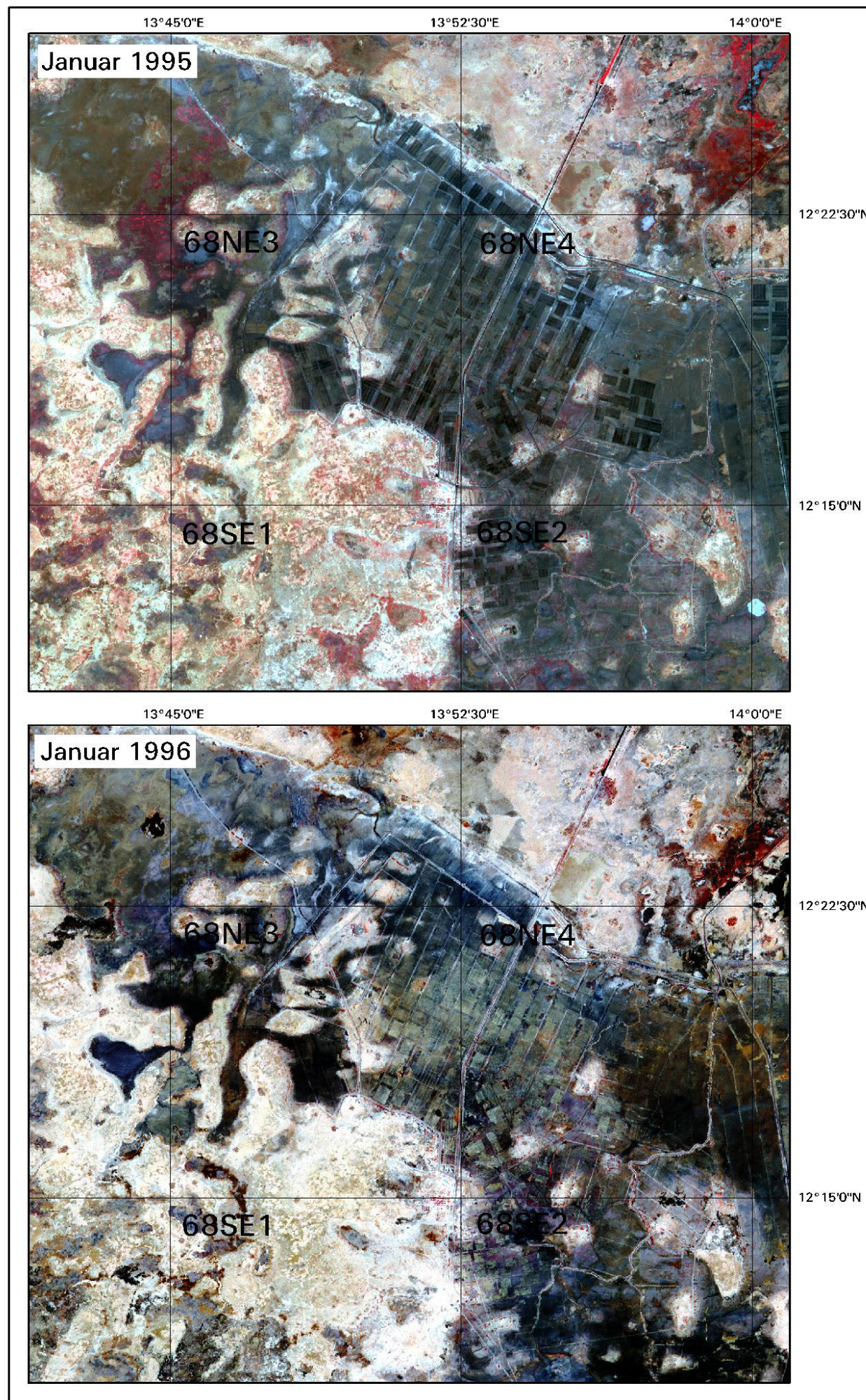


Abb. 47: Interannueller Vergleich der Vegetationsbedeckung 15. Januar 1995 und 16. Januar 1996

Diesen wenigen Gebieten mit Vegetationszunahme steht eine Fläche von 38% gegenüber, auf der im Vorjahr eine dichtere Vegetationsdecke zu verzeichnen war (Rottöne). Wie bereits im visuellen Überblick festgestellt, ist fast der komplette Sandbereich 1995 noch deutlich stärker vegetationsbedeckt als ein Jahr später. Auffällig ist, daß die Bereiche stärkster Vegetationsabnahme zwischen den ein Jahr auseinanderliegenden Szenen häufig linear miteinander verbunden sind und an einigen Stellen zusammengeballt auftreten. Diese Verteilung folgt zu einem sehr großen Teil den Tiefenlinien und spiegelt die Abflußbahnen der von Süden kommenden und im Januar maximal gefüllten Flüsse wider. 1995 haben demnach deutlich größere Wassermengen über die Flüsse das Untersuchungsgebiet und anschließend den Tschadsee erreicht als genau ein Jahr später. Die größten Abnahmen zeigen sich deswegen auch im Feuchtgebiet im äußersten Nordosten, das dem Tschadsee am nächsten liegt. Ein weiteres durch seine starke Vegetationsabnahme auffallendes Gebiet ist der sehr tonige Bereich im Schnitt der Kartenblätter 68NW2 und 68NW4 sowie 68NE1 und 68NE3. Hier wurde im Unterschied zu 1996 ein großer Bereich zusätzlich im Trockenzeitanbau kultiviert. Dies passiert nur in Jahren stärkerer Niederschläge, die auch eine Bewirtschaftung der mächtigeren Tone ermöglicht. Abnehmende Vegetation zeigt sich ebenfalls auf Flächen, die 1996 gebrannt wurden und auf denen deswegen in diesem Jahr keine Vegetation mehr zu erkennen ist (z. B. westlich der eben erwähnten Trockenzeitanbauflächen).

Die aus den beiden exakt um ein Jahr auseinanderliegenden *SPOT*-Satellitenszenen quantitativ abgeleiteten Flächenanteile sowie die räumliche Verteilung läßt sich sehr gut mit den in beiden Vorjahren registrierten Niederschlagsdaten erklären. Während die 471 mm vom 26. April bis 13. Oktober 1995 in Marte bzw. die 466 mm vom 8. Mai bis 13. Oktober 1995 in Ngala gefallenen Niederschläge leicht unter den Mittelwerten (529 mm für Marte und 500 mm für Ngala) liegen, weist die Regenzeit von 1994 extrem hohe Niederschlagsmengen auf. In Marte sind vom 27. April bis 22. Oktober 1994 635 mm und in Ngala sogar vom 24. Juni bis 17. Oktober 1994 850 mm Niederschläge gefallen. Für Ngala ist dies der höchste Wert seit Beginn der Aufzeichnungen 1977. Hinzu kommt, daß durch die zeitweise sehr heftigen Niederschläge der Alau-Damm südöstlich Maiduguri 1994 brach und große Teile der Stadt während der Regenzeit überflutet waren. Als Auswirkungen dieser Flut müssen auch die stärkere Wasserführung der Flüsse und die längere Überflutung, die auf der Januar-Szene von 1995 zu erkennen sind, gedeutet werden.

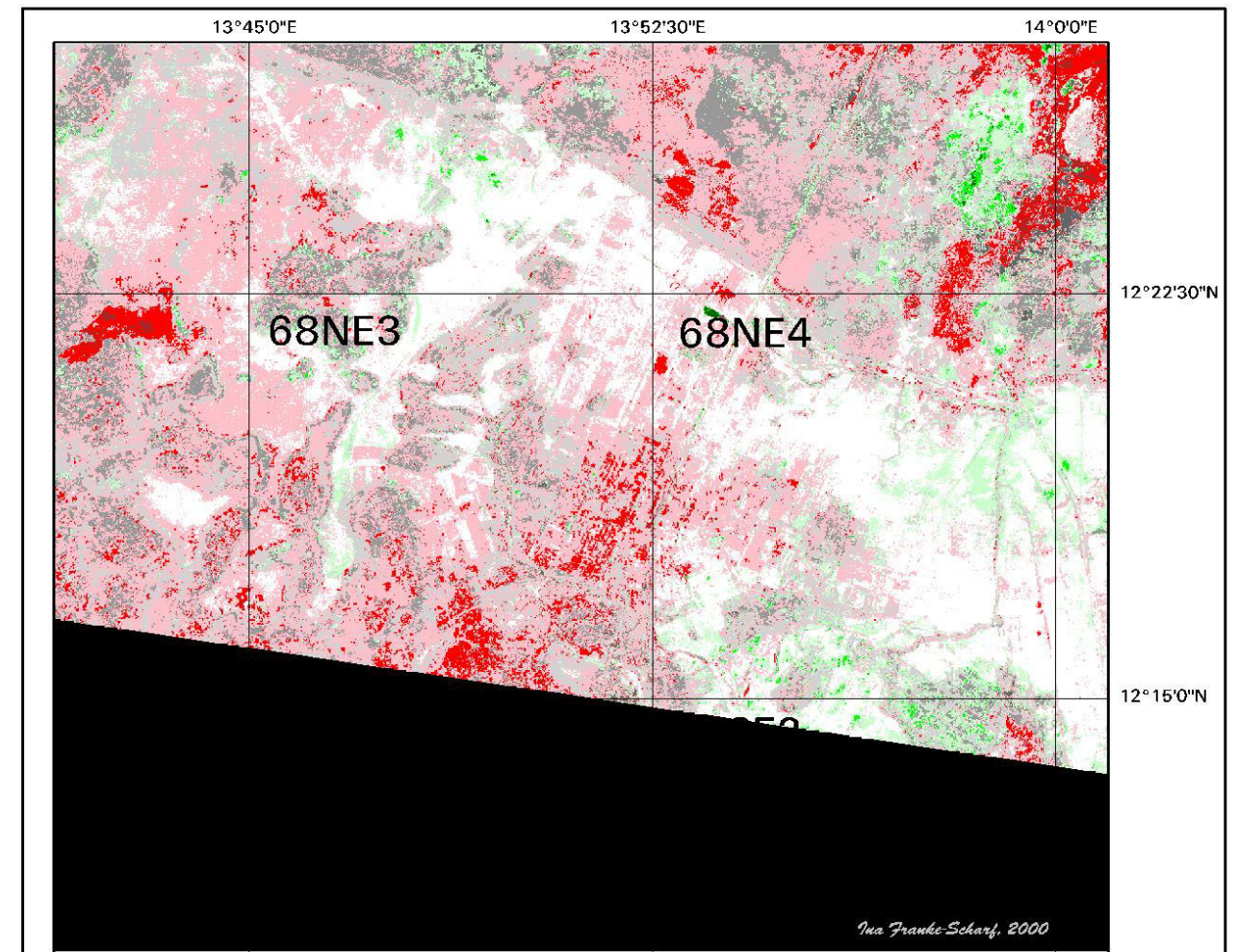
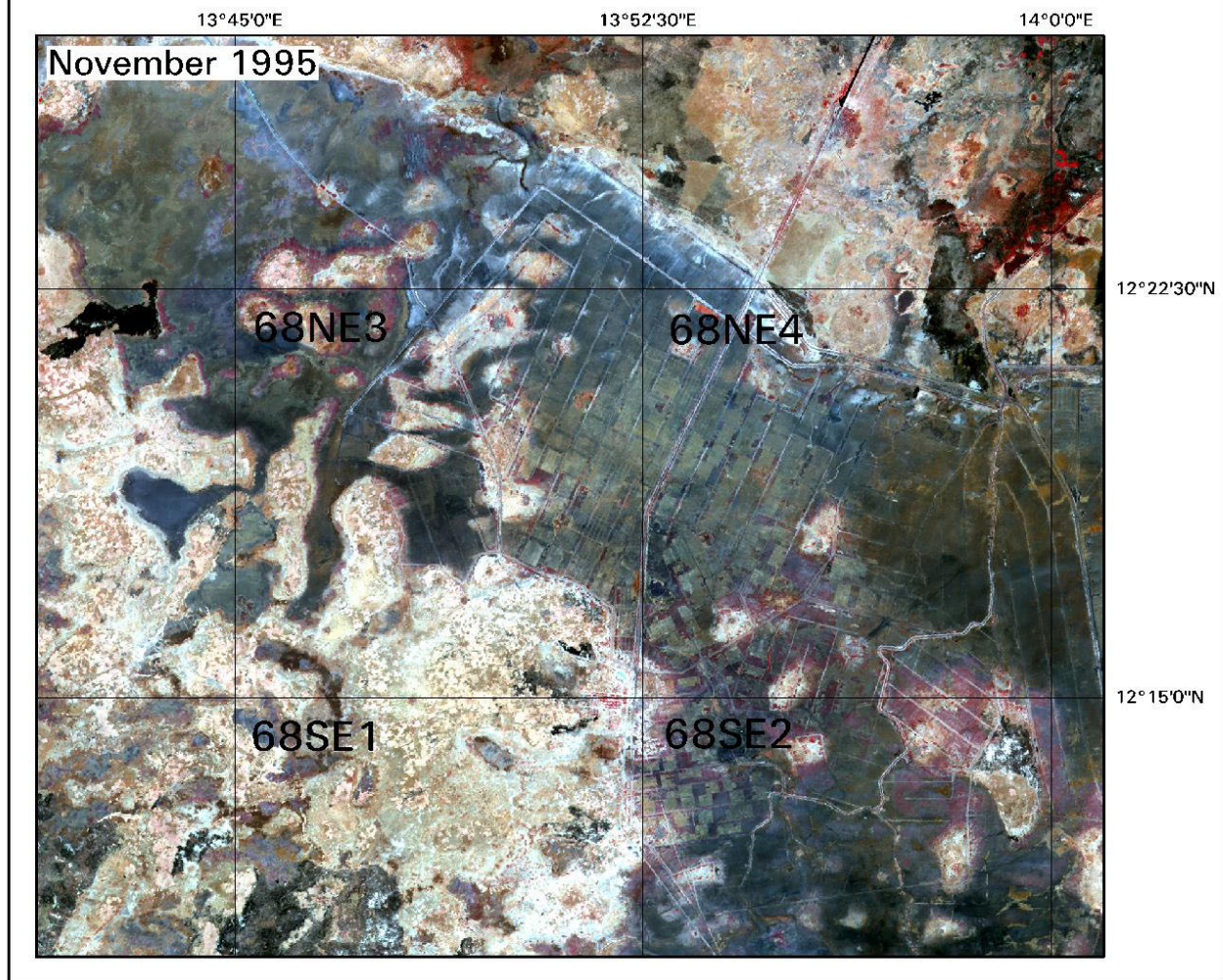
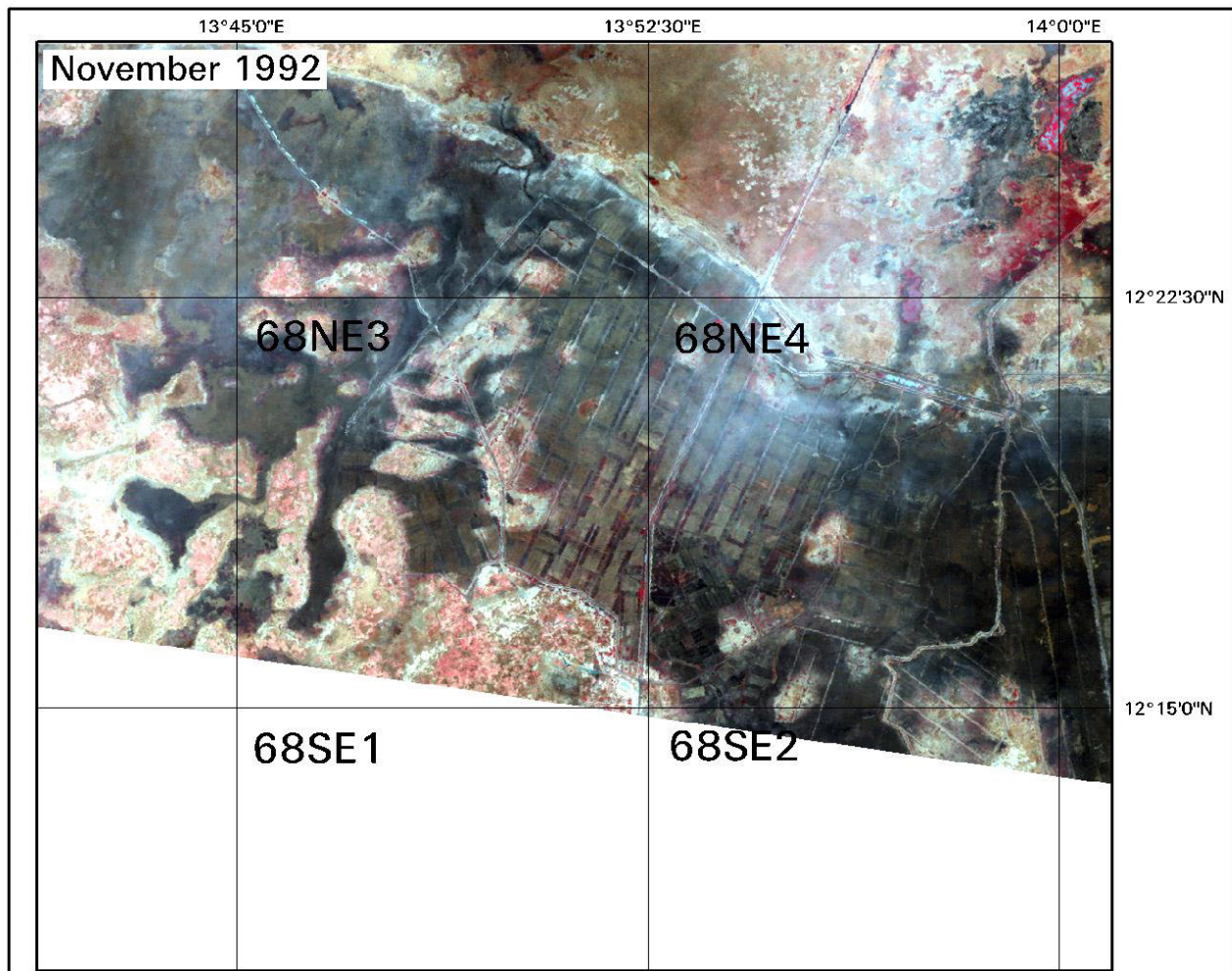
Zusammenfassend läßt sich also feststellen, daß die sich in den Vegetationsindizes widerspiegelnden Unterschiede der um ein Jahr auseinanderliegenden *SPOT*-Satellitenszenen gut mit den interannuellen Unterschieden – nämlich unterschiedlich starken Niederschlägen während der vorangegangenen Regenzeit – erklären lassen.

6.3.2 Vergleich November 1992 - November 1995

Eine weitere Vergleichsmöglichkeit für interannuelle Unterschiede bieten die beiden Satellitenszenen vom November. Für den 4. November 1992 ist ein Teil des Untersuchungsgebietes mit einer *Landsat-TM*-Szene abgedeckt. Ihr kann die ausführlich analysierte *SPOT-XS*-Szene vom 29. November 1995 gegenübergestellt werden, die für die gemeinsame Auswertung auf den gleichen Ausschnitt wie die 1992er Szene reduziert wurde. Trotz unterschiedlicher räumlicher Auflösung und der leicht abweichenden abgebildeten Spektralbereiche war ein visueller wie auch quantitativer Vergleich der individuell klassifizierten Vegetationsindizes gut möglich. Der Vergleich der beiden Szenen wird jedoch durch den Dunst erschwert, der die ältere Szene im zentralen Bereich verschleiert.

Die visuelle Interpretation der drei *SPOT*-Kanäle (3, 2, 1) mit den entsprechenden *Landsat-TM*-Kanälen (4, 3, 2) (vgl. Abb. 48 links) ergibt wiederum für die ältere Szene eine stärkere Vegetationsbedeckung insbesondere in den Sandbereichen. Der Tonbereich weist geringere Unterschiede auf, aber 1995 sind die Trockenzeitanbauflächen in ihren Rottönen innerhalb der Tone deutlicher zu erkennen (v. a. westlich Old Marte und südöstlich Musune). Demgegenüber erscheinen innerhalb der Bewässerungsflächen 1992 mehr Felder bzw. Feldabschnitte bewirtschaftet als 1995. Auffällig ist aber auch, daß häufig die gleichen Bereiche bearbeitet sind, nämlich meist in direkter Nähe zu den Hauptkanälen (z. B. nördlich New Marte). Weiterhin erkennt man anhand der dafür charakteristischen Brauntöne 1995 größere Tonbereiche mit einer abgetrockneten Vegetationsdecke (v. a. im zentralen östlichen und im nordwestlichen Bereich der Tone), möglicherweise Nachwirkungen der starken Flut von 1994. Analog den Beschreibungen der beiden Januar-Szenen zeigt auch hier die ältere Szene mehr Wasserflächen. Das betrifft insbesondere wiederum den äußersten Nordosten des Untersuchungsgebietes. In dieser Region findet man zu beiden Zeitpunkten größere Brandspuren. Auf der 1995er Szene sind aber zusätzlich in vielen weiteren Bereichen abgebrannte Sandflächen auszumachen. Eine besonders große Fläche tritt im westlichen Teil des Ausschnittes markant auf; sie folgt in ihrer Begrenzung direkt der Sandausdehnung. Ebenfalls große Ausdehnung hat das Feuer in der Südwestecke des Untersuchungsgebietes (Blätter 68SW2 und SE1) gehabt.

Die Einbeziehung statistischer Parameter und deren schlüssige Interpretation fällt bei der Verwendung von Daten verschiedener Sensorsysteme mit abweichender Aufnahmetechnik deutlich schwerer. So zeigen die Grauwerte der drei betrachteten *Thematic Mapper*-Kanäle trotz gleicher radiometrischer Auflösung und trotz der atmosphärischen Störungen einen viel geringeren Wertebereich sowie deutlich geringere Standardabweichungen als die entsprechenden *SPOT*-Kanäle. Dies ist wahrscheinlich auf die geringere räumliche Auflösung der *SPOT*-Kanäle und damit auf einen geringeren Anteil von Mischpixeln zurückzuführen. Die drei betrachteten Spektralkanäle des *TM* sind untereinander sogar noch um ein Zehntel höher korreliert als die *SPOT*-Kanäle untereinander. Im multitemporalen Vergleich zeigen sich zwischen entsprechenden Spektralkanälen der unterschiedlichen Sensoren mit Werten zwischen 0,68 und 0,77 ebenfalls erstaunlich hohe Übereinstimmungen.



**Veränderungen der Vegetationsindizes:
interannuell (November 1992 - November 1995)**

Flächen ohne Veränderungen	50%
□ immer ohne Vegetation	24%
□ immer wenig Vegetation	16%
□ immer mittel Vegetation	9%
□ immer viel	1%
Flächen mit Veränderungen	50%
□ leichte Abnahme der Vegetation	36%
□ mittlere Abnahme der Vegetation	6%
□ starke Abnahme der Vegetation	<1%
□ leichte Zunahme der Vegetation	8%
□ mittlere Zunahme der Vegetation	<1%
□ starke Zunahme der Vegetation	<1%
□ unklassifiziert	

oben links: Landsat-TM-Satellitenszenenausschnitt vom 4. November 1992 (Kanalkombination RGB 4, 3, 2, Auflösung 30 m)
 unten links: SPOT-XS-Satellitenszenenausschnitt vom 29. November 1995 (Kanalkombination RGB 3, 2, 1, Auflösung 20 m)
 rechts: Verschneidung der NDVI beider Zeitpunkte



Abb. 48: Interannueller Vergleich der Vegetationsbedeckung 4. November 1992 und 29. November 1995

In Anbetracht der stark abweichenden Wertebereiche wurde besonderes Augenmerk auf die Klassifizierung der Vegetationsindizes gerichtet, indem die Interpretation der Vegetationsindizes für jede Szene einzeln auf visueller Basis erfolgte. Das heißt, die Klasseneinteilung bestimmter Bedeckungsgrade und Biomassen wurde für jede der beiden Szenen individuell festgelegt, bevor sie im Anschluß systematisch dem Vergleich mit den anderen Daten unterzogen wurden. Die für jeden Einzelfall andere Klassifizierung stellt zwar einen sehr aufwendigen Zwischenschritt dar und erfordert außerdem Erfahrung bei der visuellen Interpretation der Daten, gewährleistet aber nur so einen sinnvollen Vergleich der Vegetationsindizes nicht radiometrisch korrigierter Daten und Daten unterschiedlicher Sensoren und Aufnahmesysteme. Abbildung 48 zeigt die Ergebnisse der Verschneidung der beiden klassifizierten NDVI-Bilder vom November 1992 und 1995.

Der Vergleich der drei Jahre auseinanderliegenden Novemberszenen zeigt in dem Bereich, der von beiden Szenen abgedeckt ist, ein genau ausgeglichenes Verhältnis an interannuel unveränderlichen und veränderlichen Flächen. Die unverändert gebliebenen Bildbereiche gliedern sich in die zu beiden Zeitpunkten vegetationsfreien Areale (weiß) und in Gebiete mit gleichbleibender aber unterschiedlich dichter Vegetationsbedeckung (graue Farben). Die vegetationsfreien Stellen beschränken sich wiederum auf die Tone. Ihr Flächenanteil ist mit 24% der klassifizierten Fläche um etwa die Hälfte geringer als bei den im vorherigen Unterkapitel (6.3.1) beschriebenen Januarszenen. Da es sich bei jeweils einer Szene der beiden Vergleichssituationen (Novemberszene 1995 und Januarszene 1996) um Aufnahmen aus der gleichen Vegetationsperiode handelt, sind diese Abweichungen als verschiedene phänologische Zustände zu deuten. Etwa einen Monat nach der Regenzeit (November-Zeitpunkte) läßt sich auf noch deutlich mehr Flächen eine regenzeitliche Vegetationsbedeckung nachweisen und auch klassifizieren als weitere 2 Monate später (Januar-Zeitpunkte). So nehmen auch die wenig und in mittlerer Dichte bewachsenen Flächen mit 16% bzw. 9% sogar drei bis vier Mal so große Flächen ein wie auf den Januarszenen.

Die zwischen 1992 und 1995 veränderlichen Areale gliedern sich sehr deutlich zugunsten der Vegetationsabnahme (insgesamt 42% der klassifizierten Fläche). Bereiche starker und mittlerer Abnahme (braun und rot) sind zum einen die im November 1995 gebrannten Flächen, wiederum der Feuchtbereich im Nordosten des Ausschnittes, wie aber auch einige sandige und tonige über das ganze Untersuchungsgebiet verteilte Areale. Die Flächen mit stärkerem Vegetationsrückgang werden umrahmt von solchen, auf denen ein leichter Vegetationsrückgang (rosa) zu verzeichnen ist. Mit insgesamt 36% nimmt diese Klasse den überwiegenden Anteil des Untersuchungsgebietes ein und schlägt sich auch deutlich in der Karte nieder. Räumlich konzentrieren sich diese Flächen vorwiegend auf den sandigen, aber durchaus auch auf den tonigen Sedimenten (z. B. im westlichen Ton-Abschnitt) und gut erkennbar auch auf den zentralen Feldern des Bewässerungsprojektes.

Dem sehr großen Anteil rückläufiger Vegetationsentwicklung stehen nur 8% der Flächen mit zwischen 1992 und 1995 zunehmender Vegetation gegenüber (grüne Farben). Diese sind zu einem großen Teil mit 1992er Bränden zu erklären (z. B. im nordwestlichen Anschluß an das Feuchtgebiet). Eine Vegetationszunahme weisen viele Trockenzeitanbauflächen in den Tönen auf. Sie kommen in der räumlich besser aufgelösten November-Szene von 1995 viel besser zur Geltung als drei Jahre vorher. Im zentralen westlichen Untersuchungsausschnitt erscheinen außerdem einige zusätzliche Bereiche leichter Vegetationszunahme in den Ton-

gebieten. An diesen Stellen waren 1995 größere Mengen abgetrockneter Vegetation nachzuweisen. Im nordwestlichen Winkel des Blattes 68NE4 ist ein dreieckiges Feld in dunkelgrün zu finden. Dort wurde im Rahmen des Bewässerungsprojektes testweise Reis angebaut.

Der Vergleich der beiden Novemberszenen von 1992 und 1995 läßt sich zwar recht einfach zusammenfassen und verallgemeinern, eine Interpretation hinsichtlich interannueller Unterschiede fällt jedoch schwer. Wie aus Abbildung 48 und dem Text hervorgeht, ist der überwiegende Teil des Untersuchungsgebietes durch eine Vegetationsverringerung im Laufe der drei Jahre geprägt. Nur sehr wenige kleine Ausschnitte zeigen einen Zugewinn an Vegetation. Abgesehen von Brandflächen, liegen diese bis auf wenige Ausnahmen vor allem im Bereich der Trockenzeitanbauflächen. Beides, sowohl die allgemein deutlich geringere Vegetationsbedeckung als auch die deutlichere Ausprägung der Trockenzeitanbauflächen, läßt sich damit erklären, daß die Satellitenszenen zwar beide im November, aber mit einem Unterschied von mehr als drei Wochen aufgenommen worden sind. Die 1992er Aufnahme zeigt etwa 4 Wochen nach Ende der Niederschläge noch deutlichere Nachwirkungen der Regenzeit. Dem steht die bereits 7 Wochen nach Ende der Niederschläge aufgenommene 1995er Szene gegenüber, die auf der einen Seite deutlichere Austrocknungserscheinungen, auf der anderen Seite aber auch eine fortgeschrittenere Entwicklung der Trockenzeitanbaukulturen zeigt.

Eine andere Erklärung lassen auch die Niederschlagsdaten für die beiden Jahre nicht zu. Vergleichbare Daten liefert nur die Station Marte. Dort sind 1992 vom 12. Mai bis 3. Oktober an 33 Regentagen 408 mm Niederschlag gefallen. Drei Jahre später fielen, wie schon in Kap. 6.3.1 erläutert, während einer etwas längeren vom 26. April bis 13. Oktober dauernden Regenzeit an 38 Tagen mit 471 mm etwas mehr Niederschläge. Für Maiduguri liegt nur ein leicht unterdurchschnittlicher Niederschlagswert von 543 mm für 1992 vor. Demgegenüber ist von der Station Ngala nur 1995 abgedeckt. Es fielen vom 8. Mai bis zum 13. Oktober mit 466 mm etwas weniger als durchschnittliche Niederschläge. Aus den vorhandenen Daten lassen sich also für beide Jahre etwas geringere als durchschnittliche Niederschläge ableiten. Außerdem läßt sich feststellen, daß die Regenzeit 1995 etwas länger und ergiebiger war als die von 1992. Auch diese Tatsachen sprechen dafür, daß die bei der Satellitenbildauswertung herausgefundenen Abweichungen zu einem großen Teil auf phänologische Unterschiede aufgrund der um mehr als drei Wochen auseinanderliegenden Aufnahmezeitpunkte zurückzuführen sind. Die aus den saisonalen Untersuchungen gewonnenen Erfahrungen indizieren, daß sich die beiden November-Satellitenszenen, da sie relativ kurz nach Ende der Regenzeit aufgenommen wurden, nicht uneingeschränkt für den Vergleich interannueller Unterschiede heranziehen lassen.

6.3.3 Vergleich März 1975 - März 1976 - März 1979

Sollen weiter zurückliegende Zeitpunkte in die Untersuchungen einbezogen werden, muß auf Daten des seit 1972 operierenden *Landsat*-Multispektralscanners zurückgegriffen werden. Wegen der deutlich geringeren räumlichen und nur halb so differenzierten radiometrischen Auflösung sind die Bilder zwar weniger scharf und kontrastärmer, erlauben aber einen interessanten Rückblick auf die Situation der 1970er Jahre. Zunächst sollen drei *Landsat*-MSS-Aufnahmen aus der extremen Trockenzeit miteinander verglichen werden. In Abb. 49 sind die drei fast zum gleichen Zeitpunkt im Jahresverlauf aufgenommenen Ausschnitte vom 7. März 1975, vom 19. März 1976 und vom 13. März 1979 dargestellt.

Wie unschwer zu erkennen ist, weist die Szene von 1976 sehr starke Störungen in Form von breiten Streifen durch Sensorfehler auf. Die fehlerhaften Pixel treten in allen vier Spektralbereichen unterschiedlich stark auf. Aufgrund ihrer weiten Ausdehnung konnte der Fehler nicht zufriedenstellend korrigiert werden. Im dargestellten Maßstab nicht erkennbar sind die in jeder der drei Szenen regelmäßig alle 6 Zeilen auftretenden Streifen, die auf die abweichende Sensorkalibrierung für die zur gleichen Zeit gescannten Zeilen zurückzuführen sind. Mit Hilfe der Hauptkomponentenanalyse lassen sich in der jeweils 1. Komponente jedes Zeitpunktes störungsfreie Extrakte erstellen, die auch eine informationsreiche und damit kontraststarke Multitemporalkombination ergeben. Anhand dieser können Bereiche starker interannueller Veränderungen besser lokalisiert werden als anhand der originalen Kanäle, eine Interpretation und vor allem systematische quantitative Bewertung ist allerdings nicht möglich. Aus diesem Grund müssen durch die Streifen hervorgerufene Fehler für die quantitativen Analysen wie auch für die Karte (vgl. insbesondere im unteren Bereich der Blätter 68NE3 und 68NE4 in Abb. 49 links) und der Sachverhalt bei der Bewertung der Ergebnisse berücksichtigt werden.

Die drei MSS-Szenen geben außerdem einen sehr unterschiedlichen Gesamteindruck, der ebenfalls auf die Streifung in der 1976er Szene zurückgeht und bei der Kontraststreckung entstanden ist. Bei Betrachtung der originalen ungestreckten Ausschnitte stellen sich zunächst alle Szenen als sehr kontrastarm dar. Außerdem zeigen die 1975er und 1976er Szenen auffällig höhere Werte in den beiden sichtbaren Spektralkanälen (rot und grün). Demgegenüber finden sich in der 1979er Szene höhere Grauwerte im infraroten und roten Abschnitt des Spektrums. Diese Unterschiede sind höchstwahrscheinlich mit unterschiedlichen Einstellungen oder Parametern bei den verschiedenen *Landsat*-Satellitengenerationen zu erklären. Die beiden früheren Szenen stammen vom *Landsat-2*, letztere vom 1978 gestarteten *Landsat-3*-Satelliten. Alle der beschriebenen systembedingten Unregelmäßigkeiten erfordern wiederum eine auf den Einzelfall abgestimmte Analyse, die nur auf visueller Ebene erfolgen kann.

Unter Berücksichtigung der oben beschriebenen Einschränkungen fällt ein visueller Vergleich der drei im Abstand von einem bzw. drei Jahren aufgenommenen Trockenzeitszenen nicht leicht. Generell wirken alle drei – mehr noch die nur ein Jahr auseinanderliegenden Aufnahmen – nur wenig verändert. Eine Rolle dabei spielt die deutlich geringere räumliche Auflösung gegenüber den *SPOT*- und *Landsat-TM*-Aufnahmen, die kleinräumige Unter-

schiede in größeren Mischpixeln ausgleicht. Die interannuellen Veränderungen lassen sich am besten mit Hilfe der Multitemporalkombination der jeweils ersten Hauptkomponenten aufdecken (nicht dargestellt). Eine RGB-Kombination nach Zeitpunkten (1975/1976/1979 – jeweils 1. Hauptkomponenten) zeigt, daß die markantesten Unterschiede auf die in den verschiedenen Jahren in unterschiedlicher Intensität und an wechselnden Orten stattgefundenen Brände zurückzuführen sind. Türkise Farbtöne (Absorption im roten Kanal und Reflexion im grünen und blauen) beschreiben die 1975 gebrannten, lila Farbtöne die 1976 gebrannten und gelbe Farben die 1979 gebrannten Flächen. Hinzu kommt ein großer Bereich in blauen Farbtönen insbesondere in der Nordostecke des Untersuchungsgebietes. Er markiert Brandflächen, die sowohl 1975 als auch 1976 vorhanden waren. Etwa ein Viertel der Gesamtfläche ist durch Brände zu mindestens einem Zeitpunkt geprägt. Dabei wurde 1975 am großflächigsten, 1976 ebenfalls recht stark und 1979 nur lokal begrenzt Vegetation durch Feuer vernichtet. Räumlich befinden sich die Mehrzahl und vor allem die großflächigen Brandflächen nördlich des Ngelewa-Strandwalles, insbesondere in der Nähe zum östlich gelegenen Feuchtgebiet.

Im nordöstlichen Feuchtgebiet finden sich, abgesehen von den Brandspuren, die größten Unterschiede zwischen den drei Szenen. Dabei lassen sich 1975 die meisten Wasserflächen und die weiteste Ausdehnung von Flutfolgeanbauflächen feststellen. Bereits innerhalb eines Jahres finden sich deutlich weniger Wasser- und Anbauflächen im gleichen Bereich. Weitere drei Jahre später zeigen sich wieder zusammenhängende Wasserflächen, aber kaum noch Flutfolgeanbau. Auch insgesamt hat sich die Vegetation innerhalb eines und noch viel stärker innerhalb der folgenden drei Jahre verringert.

Die einschneidendste Veränderung im Untersuchungsgebiet ist die Anlage des weitflächigen Kanalsystems nach 1976. 1979 ist bereits der gesamte östliche Tonbereich mit Kanälen überzogen. Auch in diesem Bereich zeigt die geringere Ausdehnung bräunlich gefärbter Flächen einen Rückgang in der Vegetationsbedeckung auf den Tonflächen. Auf sandigem Substrat fällt die Abschätzung der Vegetationsdichte im visuellen Vergleich viel schwerer. Eine Beurteilung kann durch individuelle Klassifizierung der Vegetationsindizes der Einzeltermine und anschließende Verschneidung erfolgen. Bereits die Klassifizierungen der Vegetationsindizes der Einzeltermine deuten einen eindeutigen Trend allgemeiner Vegetationsabnahme an. Von 65% in 1975 über 67% in 1976 und gar 74% in 1979 nimmt der Anteil völlig vegetationsfreier Flächen stark zu. Eine ähnliche Entwicklung läßt sich bei den mehr oder weniger dicht vegetationsbestandenen Arealen beobachten. Dichte Vegetation findet sich zu allen Zeitpunkten nur zu unter 1% im Untersuchungsgebiet, aber mit ebenfalls abfallender Tendenz. Die Klasse der Vegetation mittlerer Dichte verzeichnet den größten Rückgang. Innerhalb nur eines Jahres findet eine Verringerung um fast die Hälfte von 13% auf 7% und bis 1979 nochmals auf 5% statt. Die Flächen mit vereinzelter Vegetationsbedeckung bleiben über den Gesamtzeitraum relativ konstant. Hier handelt es sich meist um die während jeder Regenzeit neu austreibenden Gräser bzw. deren abgetrocknete Reste. Detaillierter ist die Entwicklung der Karte in Abb. 49 zu entnehmen.

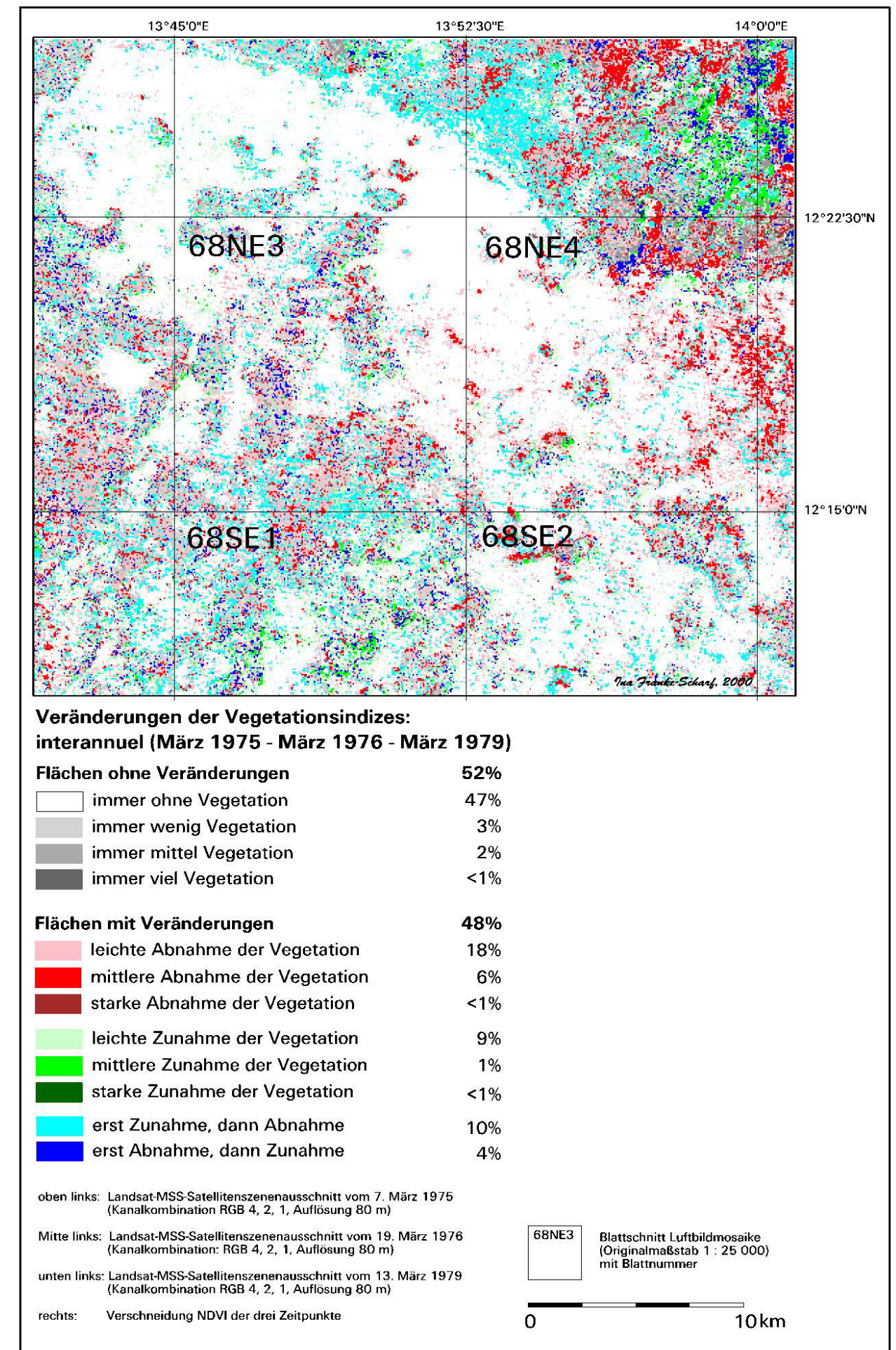
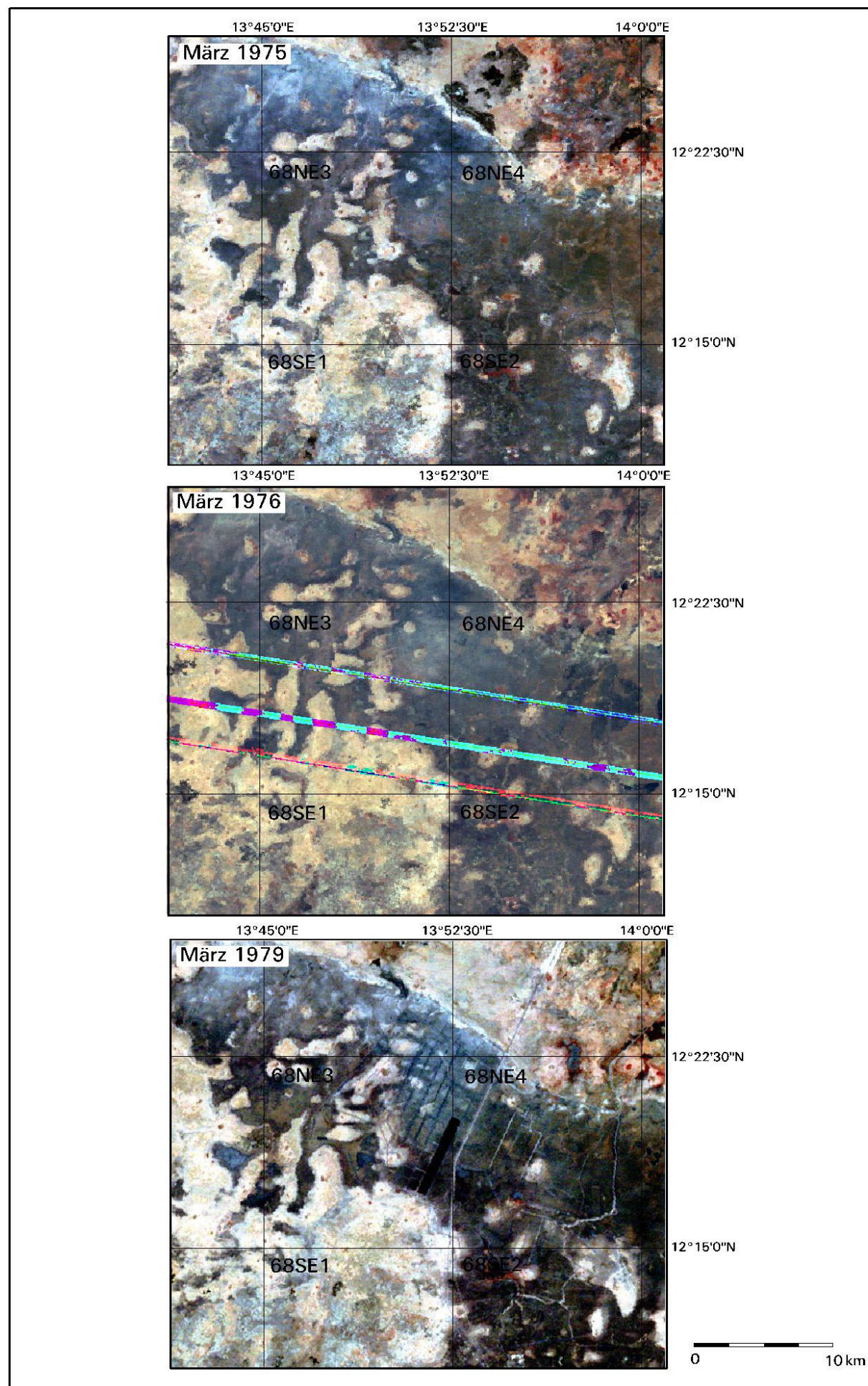


Abb. 49: Interannueller Vergleich der Vegetationsbedeckung 7. März 1975, 19. März 1976 und 13. März 1979

Da in diesem Fall drei Zeitpunkte miteinander verglichen werden und nicht alle Entwicklungen einen eindeutigen Verlauf einnehmen, wurden in blauen Farben zusätzlich jene Flächen markiert, die entweder erst eine Vegetationszunahme mit anschließendem Rückgang (hellblau) oder zunächst Vegetationsrückgang mit anschließender Zunahme (dunkelblau) verzeichnen. In diese Klasse fallen viele Bildelemente, die in der 1976er Aufnahme Streifen enthalten bzw. innerhalb recht homogener Landschaftsbereiche liegen, in denen die generelle Streifung deutlicher auffällt. In ersterem Fall wurde versucht, das Verschneidungsergebnis stärker auf den Vergleich des 1975er mit dem 1979er Bild auszurichten. Eine solche Vorgehensweise verhindert erfolgreich eine allzu starke Streifung des Ergebnisbildes. Größere Probleme bereitet die über das gesamte Bild verteilte regelmäßige Streifung. Auf sie ist ein Großteil der Bildbereiche zurückzuführen, die keine eindeutige Entwicklung aufweisen. Diese Klasse, die 14% der Gesamtfläche einnimmt, ist demnach mit gewisser Vorsicht zu interpretieren. In ihr finden sich zusätzlich viele der hochvariablen Brandgebiete wieder.

Im übergeordneten Vergleich ergibt sich für die Märztermine von 1975, 1976 und 1979, daß mit 52% geringfügig mehr Flächen im Untersuchungsgebiet keine interannuellen Veränderungen bezüglich der Vegetationsindizes aufweisen. Dies sind zum überwiegenden Teil die komplett vegetationsfreien Areale auf den tonigen Sedimenten (47%). Nur 3% der Gesamtfläche weisen zu allen drei Zeitpunkten eine vereinzelt, nur 2% eine mitteldichte und gar nur unter 1% eine dichte Vegetationsbedeckung auf.

Die restlichen 48% des Untersuchungsgebietes unterliegen mehr oder weniger starken interannuellen Veränderungen. Läßt man die bereits erwähnten Flächen mit nicht eindeutiger Entwicklung einmal außen vor, so gliedert sich der Rest in einen größeren Teil (24%) mit Vegetationsrückgang und in einen kleineren Teil (10%), auf dem eine Zunahme der Vegetationsbedeckung zu erkennen ist. Die Entwicklungen in beide Richtungen erfolgen in dem einen bzw. in den vier Jahren recht moderat. Stärker ist wiederum die Tendenz abnehmender Vegetation, wie sich aus den differenzierten Anteilen (leichte 18%, mittelstarke 6% und starke Abnahme <1%) ablesen läßt. Während leichte Zunahmen noch in 9% aller Fälle zu verzeichnen sind, treten mittlere (1%) und vor allem starke (<1%) Vegetationszunahmen nur äußerst selten auf. Gerade letztere Flächen finden sich vor allem dort, wo eine vorangegangene Wasserbedeckung eine Vegetationsausprägung verhindert bzw. auf die trockeneren Zeitpunkte verzögert hat (z. B. recht großflächig im nordöstlichen Feuchtgebiet und kleinflächig in den in die Sande eingeschalteten Tonvertiefungen – Blatt 68SE1).

Die Flächen mit Vegetationsrückgang sind über das gesamte Untersuchungsgebiet ohne erkennbare Beeinflussung durch die unterlagernden Sedimente verteilt. Konzentrationen lassen sich wiederum im äußersten Nordosten des Untersuchungsgebietes und vereinzelt an den Sand-Ton-Übergängen erkennen. Vor allem erstere Flächen sind möglicherweise auf die Kanalisierung der fluvialen Abflußlinien zurückzuführen. Im Nordosten macht sich aber auch das Absinken des Grundwasserspiegels infolge des weiteren Zurückweichens des Tschadsees in Richtung Nordosten bemerkbar. Diese Prozesse lassen sich allerdings nur unter Einbeziehung weiter nördlich liegender Landschaftsbereiche detailliert verfolgen.

Die soeben beschriebenen – insbesondere die als letztes erwähnten – Entwicklungen stehen im Kontrast zu den aus den Klimadaten ableitbaren Schlüssen. Für die untersuchten Jahre

kann allerdings nur auf Daten der weiter südlich liegenden Klimastation Maiduguri zurückgegriffen werden. Jährliche Niederschlagswerte zeigen eine ansteigende Tendenz ausgehend von einem genau durchschnittlichen Wert 1974 (618 mm) über einen leicht überdurchschnittlichen 1975 (671 mm) bis zu einem noch höheren Wert 1978 (694 mm). Analysiert wurden jeweils die Werte der vorangegangenen Regenzeit, die sich in den Niederschlagsdaten der Vorjahre abbilden. Hinzugefügt werden kann noch der Wert für 1978 für die Station Ngala. Mit 549 mm Niederschlag gegenüber einem Durchschnittswert von 500 mm zeigt er ebenso überdurchschnittliche Tendenz. Aus für 1974 und 1975 vorhandenen täglichen Niederschlagswerten kann eine Regenzeitdauer vom 26. April bis 2. Oktober für die früheste der drei Aufnahmen und eine vom 23. April bis 18. Oktober etwas länger andauernde Regenzeit für die Aufnahme ein Jahr später angegeben werden. Als Hintergrund sollte ergänzt werden, daß seit den genau durchschnittlich hohen Niederschlägen während der Regenzeit 1974 ein kontinuierlicher Anstieg der Niederschlagswerte von Maiduguri bis 1979 zu verzeichnen ist. Dabei fielen in der Regenzeit 1976 sowie 1979 sogar mehr als 700 mm Niederschlag (vgl. Abb. 6).

Zusammenfassend muß man feststellen, daß die Einbeziehung der Niederschlagssituation Mitte und Ende der 1970er Jahre gegensätzliche Entwicklungen erwarten läßt, als sie aus der Interpretation der Satellitendaten abgeleitet wurden. Trotz überdurchschnittlicher und kontinuierlich ansteigender Niederschläge seit 1974 bis 1979 ist ein Rückgang an Wasserflächen und Vegetationsbeständen zu verzeichnen. Besonders gegensätzlich sind die Entwicklungen im sehr variablen Nordosten des Untersuchungsgebietes. Diese Tatsache legt nahe, daß insbesondere diese Region stark vom Seespiegel des Tschadsees und weniger stark von den während der Regenzeit fallenden Niederschlägen abhängig ist. Das trifft auf jeden Fall für die Trockenzeit zu, da auch der Höchststand des Sees und der in ihn entwässernden Flüsse in diese Zeit fällt. Offensichtlich verzögern sich die Auswirkungen vorangegangener trockener Perioden, wie sie zu Beginn der 1970er Jahre aufgetreten sind, um einige Jahre.

Zusätzliche Ursachen für die Austrocknung und den Vegetationsrückgang müssen sicherlich in anthropogenen Einflüssen gesucht werden. Sie sind damit nicht als interannuelle Unterschiede zwischen einzelnen Jahren zu deuten, sondern stellen längerfristige Entwicklungen dar, die sich in der abgedeckten Zeitspanne konzentrieren. Die drei analysierten Satellitenszenen wurden zu einer Zeit aufgenommen, in der drastische Landschaftsveränderungen im Zusammenhang mit der Realisierung des Bewässerungsprojektes in weiten Teilen des Untersuchungsgebietes stattfanden. Kanalisierung, Holzeinschlag, Limitierung von Anbauflächen, weiterer Bevölkerungszuzug können zu dem oben erläuterten Ergebnis führen. Die genauen Ursachen lassen sich nur schwer aus den grob auflösenden MSS-Satellitenszenen ablesen. Neben einer detaillierten Kartierung aus höherauflösenden Daten müßte die Ausdehnung des Untersuchungsraumes auf den aktuellen Seebereich belegen, wie stark die Abhängigkeiten zwischen Seespiegel bzw. Klimaparametern sind.

6.3.4 Vergleich Dezember 1972 - Dezember 1978

Während im vorangegangenen Unterkapitel (6.3.3) zunächst die auf die Dürre zu Beginn der 1970er Jahre folgende Phase wieder durchschnittlicher bzw. bis überdurchschnittlich ansteigender Niederschläge betrachtet wurde, soll hier nun ein direkter Vergleich einer Szene aus der Dürre- und einer aus der Feuchtphase danach vorgenommen werden. Die beiden dazu in Frage kommenden Satellitenszenen wurden am 8. Dezember 1972 und am 13. Dezember 1978 vom Landsat-MSS aufgenommen. Sie sind damit ideal vergleichbar, denn etwa zwei Monate nach Ende der Regenzeit bilden sich die verschiedenen Landschaftselemente insgesamt am besten ab. Es lassen sich Rückschlüsse auf die Regenzeit ziehen, ohne daß aber die Vegetationsbedeckung alle anderen Objekte überlagert.

Der visuelle Vergleich (Abb. 50) zeigt neben größeren übereinstimmenden Bereichen auch deutliche Unterschiede. Erstere finden sich vor allem in den Tonflächen. Sowohl 1972 wie auch 1978 ist der überwiegende Teil der tonigen Sedimente völlig vegetationsfrei. Nur in den etwas feuchteren Bereichen hat sich eine abgetrocknete Grasdecke gehalten. Dies ist allerdings auf dem früheren Bild weniger stark als auf dem späteren der Fall. Die durch dunklere bläulich-graue Farben 1972 auffallenden besonders tonigen und feuchten Bereiche sind sechs Jahre später zu einem großen Teil mit einer leichten im Dezember allerdings bereits abgetrockneten Grasdecke überzogen. Als weitere Unterschiede auf den tonigen Sedimenten stellen sich die Anbauflächen dar. 1978 treten die an den Rändern zu den sandigen Sedimenten angelegten Trockenzeitfelder in größerer Anzahl und auch intensiver hervor (v. a. am Blattschnitt 68NW2/68NW4 sowie 68NE1 und 68NE3). Auch der gesamte südöstliche Tonbereich zeigt durch seine starke Lila-Rot-Färbung intensive Anbauaktivitäten (Blatt 68SE2 und südlicher Teil des Blattes 68NE4). Weiterhin heben sich die im Südwesten des Untersuchungsgebietes vereinzelt auftretenden tonigeren Tiefenlinien durch höhere Feuchtigkeit und dichte Vegetationsbedeckung vom älteren Bild ab. 1972 sind die in den Tönen angelegten Anbauflächen viel begrenzter. Demgegenüber weist aber noch 1972 der Großteil der innerhalb der Tone aufragenden Sandinseln, insbesondere die unbesiedelten, eine mittlere bis sogar dichte Gehölzbedeckung auf.

Ähnlich ist die Situation auf den Sanden. Sie erscheinen zwar 1972 aufgrund höherer Reflexionswerte insgesamt trockener als zur selben Jahreszeit 1978, weisen aber an vielen Stellen noch eine dichtere Gehölzbedeckung auf. Im Gegensatz dazu zeigen die auf den Sanden liegenden Anbauflächen 1978 noch rosa Farbe. Diese deutet daraufhin, daß die Felder entweder zum Teil noch nicht geerntet, die Ernte zum Trocknen auf den Feldern zurückgelassen wurde oder daß die Grasdecke länger aktive Vegetation aufweist als auf der 1972er Szene. Noch stärker als im Sandgebiet südwestlich der Tone (Blätter 68NW2, 68SW2 und 68SE1) zeigt sich der Gegensatz nordöstlich des zentralen Tongebietes jenseits des Ngelewa-Strandwalles (vorwiegend 68NE2). Hier ist fast flächendeckend eine um einiges intensivere Rotfärbung auf dem früheren Bild auszumachen. Besonders markant tritt der noch dichtere Bewuchs in den Abflußlinien der Flüsse und den sie umgebenden kleinen Feuchtgebieten auf (Blatt 68NE1, sowie im Übergang von Blatt 68NE4 zu 68NE2 und auch weiter nach Osten hin). Die Struktur dieser intensiv roten Bereiche zeigt an, daß es sich

hauptsächlich um Anbauflächen handelt, die der auf- und dann wieder absteigenden Flut des Tschadsees folgen.

Nur sehr wenige kleine Areale weisen 1978 eine dichtere Vegetationsbedeckung auf als 1972. Sie konzentrieren sich vor allem entlang des neuangelegten Abflußkanals im Nordosten des Untersuchungsgebietes. Er ist ein Teil des großen Bewässerungssystems, dessen lineare Strukturen nur im jüngeren Bild auszumachen sind. Mit Anlage der Kanäle am Ende der 1970er Jahre wurden auch die letzten Reste der flußbegleitenden Ufervegetation vernichtet (vgl. rötlich linear verlaufende Strukturen im östlichen Blattbereich von 68NE4). Ebenso ändern sich auch die Wegverläufe im Untersuchungsgebiet. Die noch 1972 zu erkennenden Pfade und Viehwege z. B. ausgehend von Old Marte verwischen auf der späteren Aufnahme. Weitere Unterscheidungen auf den beiden Szenen treten durch Brandflächen hervor. Der visuelle Vergleich ergibt für 1978 deutlich mehr und größere Brandflächen als für 1972. Ungewöhnlich erscheint eine 1972 in den Tönen liegende Brandfläche (Blatt 68NW4). Ein weiteres kleines Brandgebiet ist nördlich des Ngelewa-Strandwalles zu erkennen. Dem stehen zahlreiche in den Sanden auftretende Brandspuren 1978 gegenüber. So wurde auch ein großer Ausschnitt des nordöstlichen Feuchtgebietes durch Feuerspuren geprägt.

Neben großen Bereichen mit gleichbleibenden Eigenschaften lassen sich durch Betrachtung auch sehr gut die wesentlichen Veränderungen der beiden Szenen ableiten. Die Beurteilung der statistischen Parameter der beiden Szenen kann dem nur sehr wenig hinzufügen, zeigen doch beide Szenen des gleichen Satellitentyps (aber unterschiedlicher Generationen) generell sehr ähnliche Eigenschaften. Die vom *Landsat-1* aufgenommene Szene von 1972 weist höhere Werte im blauen Bereich des Spektrums auf im Gegensatz zu höheren Werten im grünen Bereich bei der Szene von 1978, die von *Landsat-3* registriert wurde. Im Vergleich der originalen Grauwertverteilungen verzeichnet der 1972er Ausschnitt in allen Spektralkanälen höhere mittlere Grauwerte, im infraroten Bereich des Spektrums fallen diese Unterschiede nur minimal auf. Stärkere Austrocknung verbunden mit nur geringfügig weniger Vegetationsbedeckung könnte eine Erklärung für diese Tatsache sein. Aus der Hauptkomponentenanalyse läßt sich entnehmen, daß die jüngere Szene sogar eine stärkere der für *MSS*-Szenen typischen Streifung aufweist als die ältere.

Für die genaueren quantitativen Analysen wurden für beide Szenen Vegetationsindizes kalkuliert. Der *NDVI*-Mittelwert der 1972er Szene liegt sogar höher als der der 1978er. Auch nach der Klassifizierung ergibt sich ein interessantes Bild. Den überwiegenden Teil beider Szenen nehmen die vegetationslosen Flächen ein: 1972 fast 70% und 1978 fast 60% der Gesamtfläche. Stärker treten 1978 vereinzelt mit Vegetation bestandene Flächen auf (32% gegenüber 19% in 1972). Im vermeintlichen Widerspruch dazu stehen die Flächen mitteldichter und dichter Vegetationsbedeckung. Sie verringern sich deutlich innerhalb von sechs Jahren (von 10% auf 6% bei der mittleren und von 3% auf deutlich unter 1% bei der dichten Vegetationsbedeckung). Dies verwundert nicht, spiegeln die schwach vegetationsbedeckten Flächen doch fast vollständig die nach den Niederschlägen saisonal auftretende schnell abtrocknende Grasdecke wider, während die Klasse der mittleren und starken Vegetationsbedeckung hauptsächlich dauerhaft vegetationsbestandene Gehölzflächen beinhaltet. Der direkte Vergleich der klassifizierten Vegetationsindizes zusammen mit der Verteilung im Raum, die der Abbildung 50 entnommen werden kann, bestätigt diese Annahme.

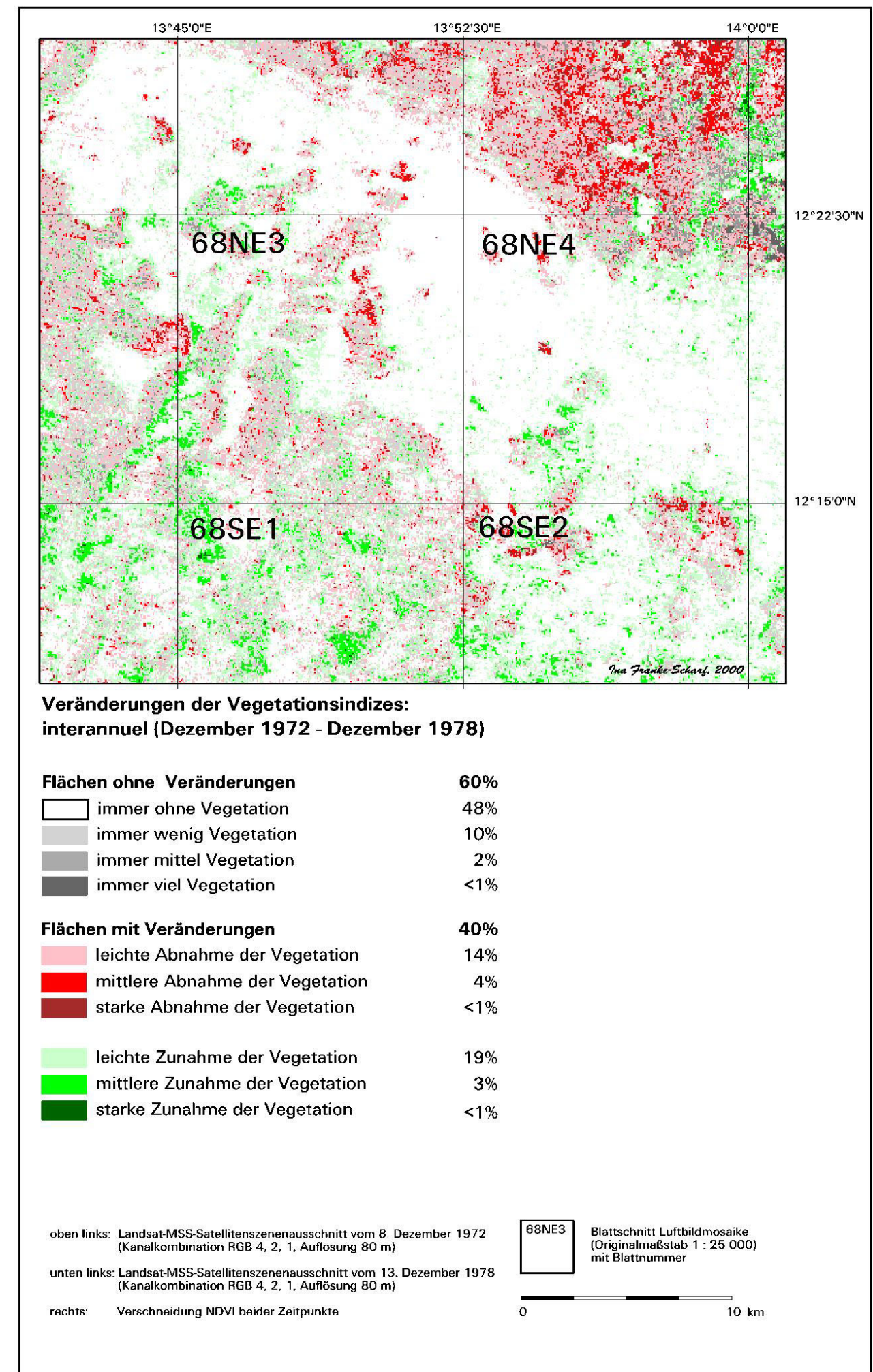
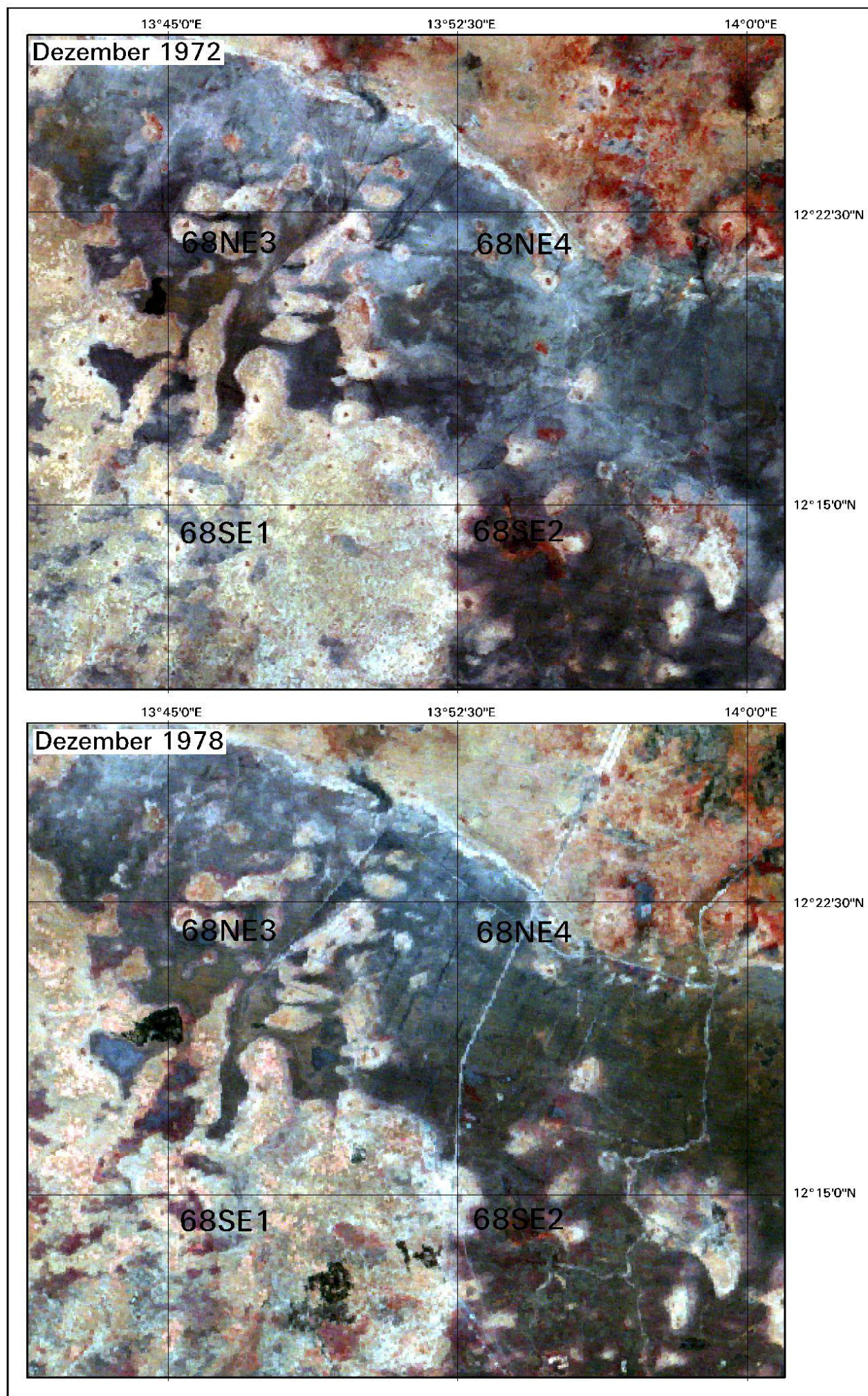


Abb. 50: Interannueller Vergleich der Vegetationsbedeckung 8. Dezember 1972 und 13. Dezember 1978

Mit 60% Flächenanteil zeigt der überwiegende Teil des Untersuchungsgebietes keine Veränderungen hinsichtlich der Vegetationsbedeckung zwischen 1972 und 1978. Allerdings weist knapp die Hälfte der insbesondere auf den tonigen Sedimenten liegenden Flächen im Dezember der Vergleichsjahre keinerlei Vegetationsbedeckung auf. Die restlichen unveränderlichen Flächen verteilen sich zu 10% auf vereinzelt mit Vegetation bestandene, zu 2% mit mitteldichter und zu unter 1% mit dichter Vegetation bestandene Standorte. Letztere finden sich ausschließlich im nordöstlichen Feuchtgebiet am äußersten Rand des Untersuchungsausschnittes (dunkelgrau dargestellt). Alle anderen unveränderlichen mehr oder weniger vegetationsbestandenen Flächen verteilen sich ohne Auffälligkeiten über die Sande des gesamten Untersuchungsausschnittes.

Ebenfalls deutlich auf die sandigeren Sedimente konzentriert erscheinen die veränderlichen Flächen. Wie sich bereits aus der visuellen Interpretation angedeutet hat, findet sich im Übergang der trockenen Phase am Beginn der 1970er Jahre zur sehr feuchten Periode am Ende des gleichen Jahrzehnts erstmals ein größerer Anteil Flächen mit Vegetationszunahme (insgesamt 22% gegenüber 18% mit abnehmender Vegetation). Auch dieser Befund wurde im Rahmen der visuellen Auswertungen sogleich wieder relativiert, zeigt sich doch die Zunahme der Vegetation extrem geballt in den nur schwach vegetationsbedeckten Flächen, in den Sanden südwestlich der zentralen Tonebene. Hinzu kommt die Konzentration der Areale mit mittlerer Zunahme auf die tonigeren Tiefenlinien des Untersuchungsgebietes. Beides sind Indikatoren für eine feuchtere und saisonal länger anhaltende Regenzeit. Zudem sind in den Zunahmeflächen die 1978 weiträumiger kultivierten Trockenzeitanbauflächen subsummiert. Diesen Gebieten mit sich wahrscheinlich nur kurzfristig mehr oder weniger saisonal bedingter Vegetationsverdichtung stehen die Flächen gegenüber, die eine deutliche Vegetationsabnahme verzeichnen. Abgesehen von den durch Brand beeinflussten Flächen, fallen dabei vor allem mehrere kleinere Ballungen in den Tonflächen auf. Es sind dies die bereits erwähnten meist unbesiedelten Sandinseln, die 1972 noch kleinere Wäldchen trugen, welche 1978 so gut wie vollständig abgeholzt sind. Gleiches gilt für die Galeriewälder entlang der damals noch nicht kanalisierten Flüsse. Diese sehr kleinräumig linearen aber ökologisch sehr wertvollen Abschnitte werden allerdings aufgrund der groben Auflösung der MSS-Szenen nur sehr schlecht wiedergegeben bzw. tauchen überhaupt nicht auf (vgl. z. B. Blatt 68NE4). Überwiegend flächenhaften Rückgang vegetationsbestandener Flächen erkennt man überall nordöstlich des Ngelewa-Strandwalles. Der Rückgang ist sowohl mit größeren Brandflächen in 1978 aber auch durch einen deutlichen Rückgang von Flutfolgeanbauflächen sowie von quasi natürlichen Gehölzen zu erklären.

Im vorangegangenen Kapitel (6.3.3) ist bereits auf die Niederschlagsituation der 1970er Jahre eingegangen worden. Für die hier behandelten Zeitpunkte 1972 und 1978 können nur Werte von zwei verschiedenen Stationen in Maiduguri für Vergleiche herangezogen werden. 1972 verzeichnen diese Meßstellen 468 bzw. 428 mm Niederschlag in einer vom 4. Mai bis 16. Oktober dauernden Regenzeit. Für 1978 liegen nur jährliche Werte von 694 bzw. 652 mm ohne detailliertere Angaben vor. Die Station Ngala kann für 1978 noch einen überdurchschnittlichen Niederschlagswert von 549 mm für eine vom 9. Mai bis 26. Oktober dauernde sehr lange Regenzeit beisteuern. Vergleicht man also allein diese Niederschlagsdaten miteinander, ergibt sich eine Steigerung um die Hälfte. Betrachtet man die Auswertungen zusätzlich vor dem Hintergrund der Niederschlagsituation der gesamten 1970er Jahre, verstärkt sich das Ergebnis nochmals. Trotz um die Hälfte ergiebigerer Niederschläge und

einer sich insgesamt deutlich entspannenden Niederschlagssituation ab 1973 zeigt die vergleichende Satellitenbildinterpretation nur geringfügig größere Flächen, bei denen eine Vegetationszunahme auftritt. Es handelt sich zudem vor allem um nur kurzzeitig, also saisonal bedingte Anbauflächen bzw. durch die Niederschläge hervorgerufene schnell wieder abtrocknende Grasvegetation in den sandigen Bereichen. Im deutlichen Gegensatz dazu steht die fast vollständige Abholzung der Gehölzvegetation auf den die Tone durchragenden Sandinseln und entlang der kanalisierten Flüsse. Besorgniserregend wirkt auch der gesamte hochvariable Ausschnitt nördlich des Ngelewa-Strandwalles. Zeigt das insgesamt älteste Satellitenbild noch relativ starken Baum- und Strauchbewuchs zusammen mit weit verbreiteten Flutfolgeanbauflächen, erscheinen diese Flächen nur sechs Jahre später stark dezimiert. Die starke Vegetationsabnahme verbunden mit Austrocknung kann also auch in diesem Vergleich nicht als interannuelle Schwankung infolge unterschiedlicher Niederschlagsverhältnisse bezeichnet werden, sondern muß als langfristige, zu einem großen Teil anthropogene Entwicklung gedeutet werden.

6.3.5 Vergleich Februar 1973 - (April 1986) - Februar 1988

Drei der vorhandenen Szenen aus der Trockenzeit bieten sich insofern für einen Vergleich an, als sie alle während niederschlagsärmerer Perioden aufgenommen wurden: eine Landsat-MSS-Szene vom 18. Februar 1973 während der dreijährigen Dürrephase zu Beginn der 1970er Jahre, eine SPOT-Szene vom 9. April 1986 während der noch länger andauernden Trockenphase von Beginn bis fast zum Ende der 1980er Jahre sowie eine Landsat-TM-Szene vom 27. Februar 1988, zum Ende dieser Zeitspanne unterdurchschnittlicher Niederschläge. Der Vergleich fällt trotz der ähnlichen Niederschlagssituation schwer, da zum einen jede Szene von einem anderen Sensor mit abweichender Auflösung aufgenommen wurde und zum anderen nicht alle den Gesamtuntersuchungsausschnitt abdecken. Der ältesten der drei Satellitenaufnahmen (MSS) fehlt die südwestliche Ecke, sie enthält außerdem regelmäßige Streifen wie alle anderen MSS-Szenen. Zusätzlich weist sie eine breite Gruppe von Störungszeilen im unteren Bildbereich auf, was allerdings aufgrund der nur geringen Auflösung in Abb. 51 nicht erkennbar ist.

Während für 1973 nur eine einzige Aufnahme vorlag, konnten sowohl die 1986er SPOT-Szene mit zwei Nachbarszenen des gleichen Datums bzw. die 1988er TM-Szene mit der südlich anschließenden Szene vom gleichen Überflug mosaikiert werden. Beide decken so zwar das gesamte Untersuchungsgebiet ab, enthalten aber infolge der Mosaikierung aus unterschiedlichen Szenen Störeinflüsse. Das trifft stärker noch für die SPOT-Szenen zu, die von verschiedenen HRV-Sensoren des SPOT aufgenommen wurden und deswegen eine abweichende Kalibrierung aufweisen. Außerdem erkennt man unterschiedliche Aufnahmeeigenschaften für die verschiedenen Bildviertel innerhalb der nordwestlichen Haupt-Szene (vgl. dazu auch Kap. 6.2).

Im visuellen Vergleich (Abb. 51) ähneln sich die beiden jüngeren, nur zwei Jahre auseinanderliegenden Szenen, während sich die ältere stärker hervorhebt. Im Februar 1973 war die Vegetation der Sande noch feuchter und weiter verbreitet. Die Bäume der Siedlungen stehen trotz der viel geringeren Auflösung stärker hervor. Auf der anderen Seite erscheinen einige Siedlungen – am besten erkennt man dies anhand der noch zweigeteilten Siedlung

Kirenowa im zentralen Norden (Blatt 68NE2) – deutlich kleiner als 13 bzw. 15 Jahre später. Am deutlichsten äußern sich die Unterschiede wiederum nordwestlich des Ngelewa-Strandwalles. In diesem Bereich findet sich zu allen drei Trockenzeitpunkten die stärkste Vegetationsbedeckung. Für 1973 trifft das in besonderem Maße zu, die Abflußbahnen der Flüsse, die Sandinseln innerhalb der Tonebene wie auch die Randbereiche der südwestlichen Sandfläche zeigen für diesen Zeitpunkt in der Trockenzeit eine ungewöhnlich dichte Vegetationsdecke. Auf den Szenen der 1980er Jahre treten demgegenüber fast nur noch die Bäume der Siedlungen als Inseln aktiver Vegetation hervor. Dabei erscheint der April 1986, trotz seines saisonal später liegenden Aufnahmetermins, noch ein wenig feuchter und vegetationsreicher als der Februar 1988. Alle drei Szenen weisen relativ wenige Brandflächen auf, 1973 und 1986 sind sie sogar erstaunlich ähnlich in ihrer Lage, vor allem nördlich des Tongebietes, verteilt. Auffällig für 1988 ist, daß einige Brände direkt um Siedlungen herum stattfanden.

Während 1973 größere Flächen östlich Kirenowa dem Flutfolgeanbau gewidmet waren, treten diese auf der 1986er stark und auf der 1988er Szene fast vollständig zurück. Dafür bot sich ab Ende der 1970er Jahre die Möglichkeit, über die Bewässerungskanäle zusätzliches Wasser in das Untersuchungsgebiet zu leiten. So ist der Zufuhrkanal vom Tschadsee 1986 bis New Marte mit Wasser gefüllt, 1988 allerdings nur noch bis Kirenowa. Auch sind zu beiden Zeitpunkten Felder für den Bewässerungsanbau vorbereitet, erkennbar an den dunkleren rechteckig abgesetzten Parzellen. Im April 1986 handelt es sich um deutlich mehr Flächen als zwei Jahre später. 1988 sind nur im nördlich gelegenen Abschnitt vorbereitete Parzellen zu erkennen. Das deutet zusammen mit der zu diesem Zeitpunkt geringeren Kanalfüllung auf einen Wassermangel hin. Was das Wasser betrifft, hebt sich die Szene zu Beginn der 1970er Jahre durch noch kleinere Bereiche offenen Wassers im Nordwesten von den beiden anderen ab.

Aufgrund der unterschiedlichen geometrischen und auch radiometrischen Auflösung erscheint ein Vergleich der statistischen Parameter der drei Szenen nicht sinnvoll. Auch muß bei der Klassifizierung der Vegetationsindizes wieder jeder der drei Zeitpunkte für sich genauestens visuell geprüft und getrennt differenziert werden. In Abb. 51 ist das Ergebnis der Verschneidung der individuell klassifizierten Vegetationsindizes-Bilder zu sehen. Dabei ergibt sich, wie auch beim Vergleich der drei MSS-Szenen (Abb. 49) die Frage, wie uneindeutige Entwicklungen dargestellt werden. Anders als dort, wo versucht wurde, Störungen der einen Szene auszugleichen, sollen die uneindeutigen Entwicklungen hier nicht dargestellt werden. Da der visuelle Vergleich der beiden Szenen der 1980er Jahre nur geringe Unterschiede aufgedeckt hat, beide Szenen nur zwei Jahre auseinanderliegen, und außerdem die mittlere Szene einen anderen phänologischen Zustand widerspiegelt, wurde der Vergleich auf die langfristigeren Unterschiede beschränkt. Demzufolge gehen in Abb. 51 nur die beiden Februarszenen als Verschneidungsergebnis ein.

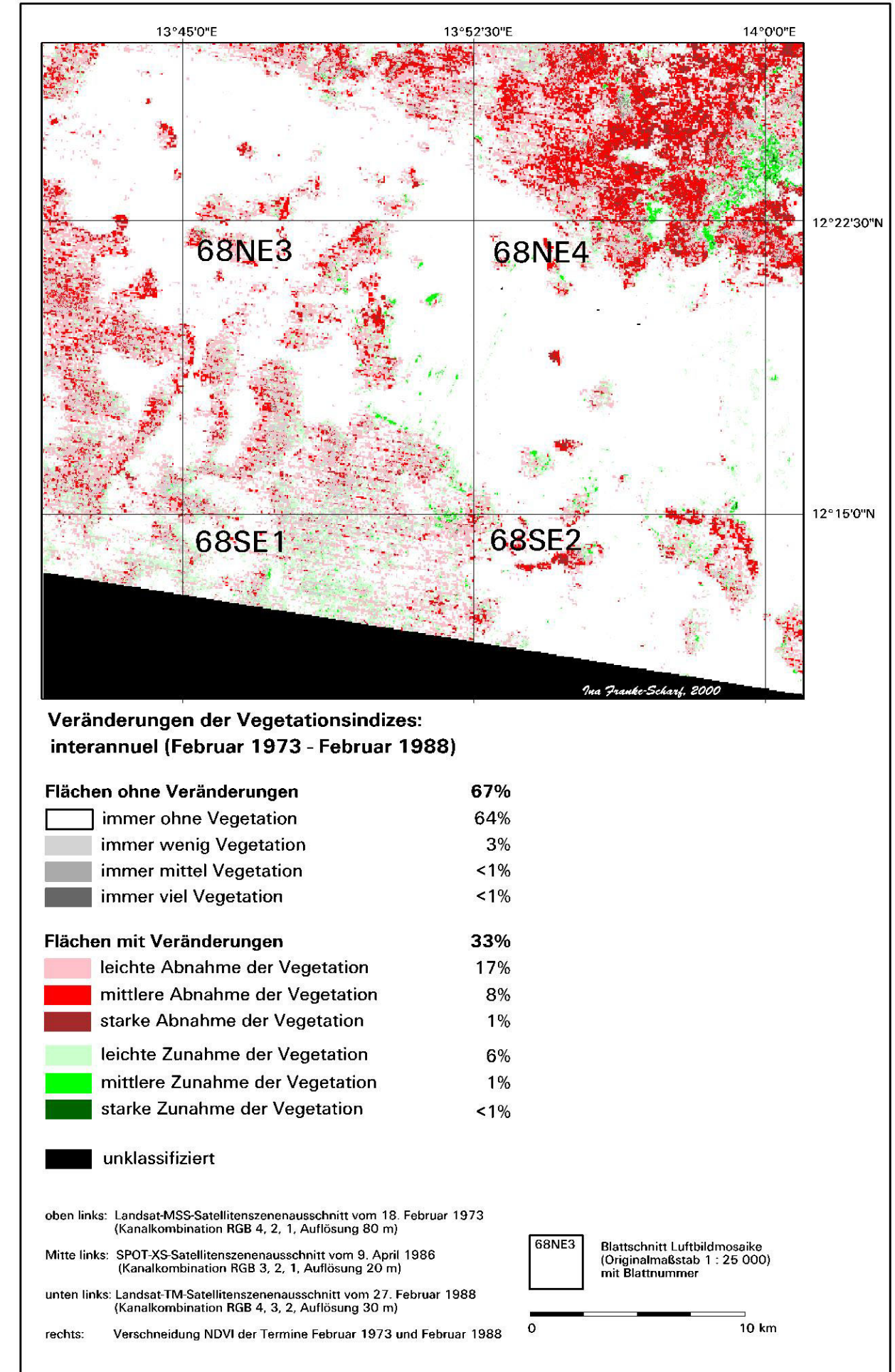
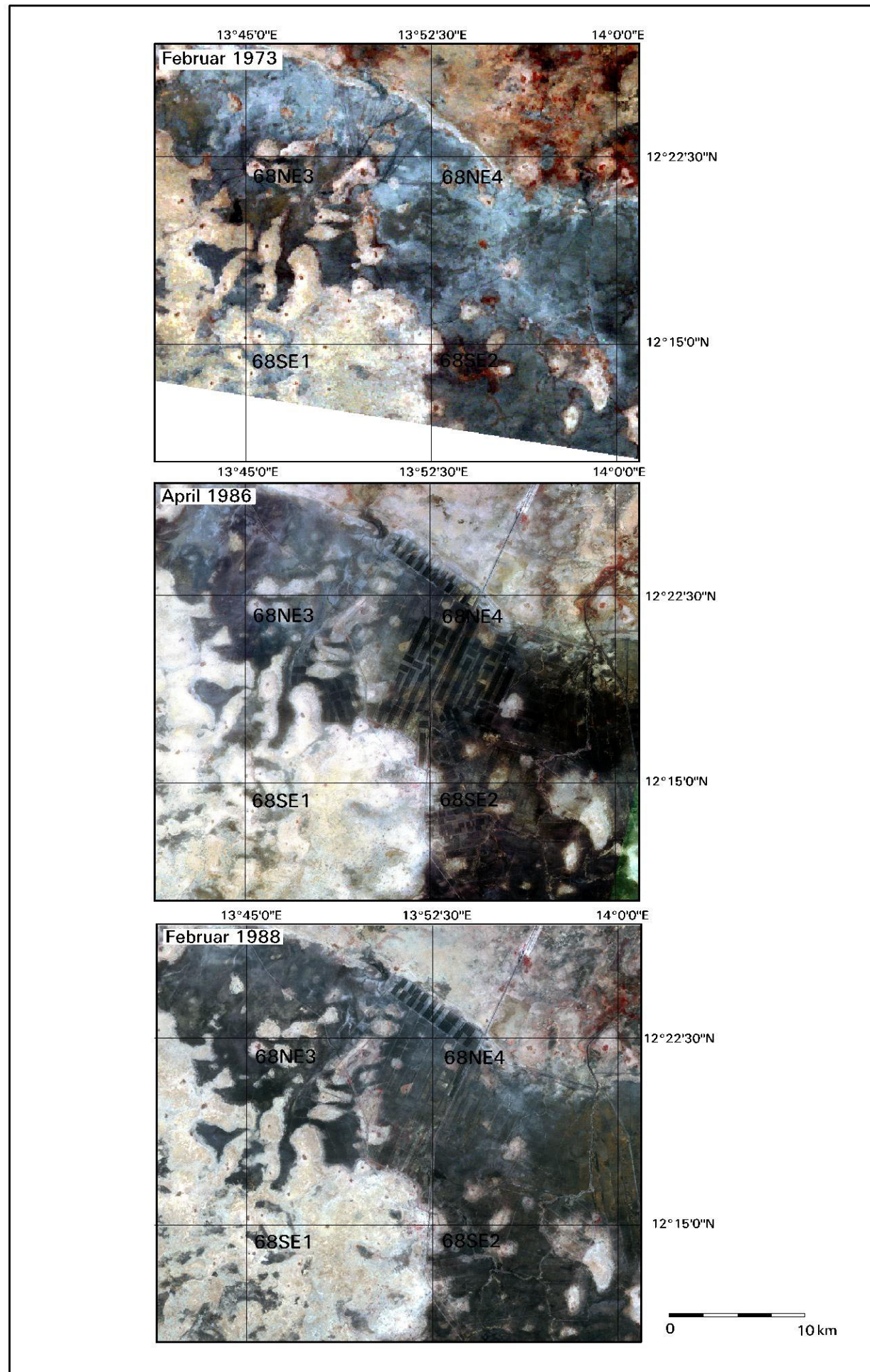


Abb. 51: Interannueller Vergleich der Vegetationsbedeckung 18. Februar 1973, (9. April 1986), 27. Februar 1988

Die Verschneidung der Klassifizierungen der 15 Jahre auseinanderliegenden Szenen ergab ein ziemlich klares Ergebnis, das mit Sicherheit nicht nur interannuelle Schwankungen, sondern vielmehr deutliche langfristige Entwicklungen widerspiegelt. Im Vergleich der Trockenzeitszenen zeigen nur etwa ein Drittel der Flächen Veränderungen zwischen den verschiedenen Zeitpunkten (33%). 67% der Flächen verändern sich nicht, wobei der weitaus größte Teil (64%) zu beiden Zeiten überhaupt keine Vegetationsbedeckung trägt. Wie in allen Vergleichen sind dies vor allem die Tonflächen, aber hier auch Teile der sandigeren Flächen.

Die veränderlichen Regionen im Untersuchungsgebiet gliedern sich sehr eindeutig in eine Überzahl an Flächen mit Vegetationsabnahme (26% der Gesamtfläche) und nur etwa einem Viertel Flächen mit zunehmender Vegetationsdichte (7%). Fast der gesamte Anteil der Zunahmeflächen verzeichnet nur leichten Anstieg (6% der Gesamtfläche), nur 1% mittleren und deutlich unter 1% starken Anstieg. Stärkere Vegetationszunahme findet man im Bereich der neu angelegten Abflußkanäle im nordöstlichen Blattbereich, ebenfalls in dieser Region um die austrocknenden Wasserflächen, im zentralen Bereich am Rand der Kanalanlagen, sowie kleinflächig an mehreren Stellen im Sandbereich. Bei letzteren handelt es sich höchstwahrscheinlich um Anpflanzungen im Zuge der Neuanlage von Siedlungen im Rahmen des Bewässerungsprojektes. Sehr deutlich kann man dies anhand von New Marte verfolgen, wo ein ganzer Siedlungsteil mit neugepflanzten Bäumen angelegt worden ist. Geringfügig mehr Vegetation ist in den 1980er Jahren auch auf den Sanden in den Blattbereichen 68SW2 und SE1 zu verzeichnen.

Den deutlicher hervortretenden größeren Anteil stellen allerdings die Flächen mit Vegetationsabnahme. 17% der Gesamtfläche, das ist neben den dauerhaft vegetationslosen der größte Anteil, zeigen einen leichten Rückgang der Vegetation. Ihr Vorkommen liegt überwiegend im südwestlichen Sandbereich, geringfügiger auch nordwestlich des Ngelewa-Uferwalles. Auffälliger noch ist die Menge der Flächen mit mittlerer Abnahme, ihr Flächenanteil ist mehr als halb so groß (8%) wie der Teil mit nur leicht abgenommener Vegetationsbedeckung. Zusammen mit den Flächen stark abnehmender Vegetation (1%) konzentrieren sie sich auffällig in der Nordost-Ecke des Untersuchungsausschnittes. In diesem noch am längsten vom Tschadsee überfluteten Gebiet hat sich die Vegetation trotz des Wasserrückzuges stark dezimiert.

Wie bereits angedeutet, spielen die Niederschlagsdaten der drei Zeitpunkte nur eine untergeordnete Rolle, da durch den 15jährigen Abstand der Aufnahmedaten zu einem großen Anteil langfristige Veränderungen abgebildet sind. Die Einbeziehung der jährlichen Niederschläge paßt jedoch gut zur Auswertung. Von bereits unterdurchschnittlichen 468 mm für die Station Maiduguri in 1972 nehmen die Niederschläge nach einer zwischenzeitlichen Erholung (vgl. Kap. 6.3.3) weiter ab auf 416 mm in 1985 und nur 366 mm in 1987. Für die Station Ngala sind Werte von 383 mm in 1985 und 305 mm in 1987, für die Station Marte von relativ hohen 464 mm für 1987 aufgezeichnet. Im Vergleich zur relativ kurzen Trockenphase zu Beginn der 1970er Jahre verringern sich die Niederschläge dramatisch in der fast die gesamten 1980er Jahre andauernden Dürrezeit. In die gleiche Periode fallen die mit dem Aufbau der Bewässerungsanlagen einhergehenden drastischen Landschaftseingriffe.

6.3.6 Zusammenfassung zu den interannuellen Schwankungen und Vergleich in einer Zeitreihe

In den fünf vorangegangenen Unterkapiteln wurde die Beeinflussung durch interannuelle Unterschiede bezüglich Landschaftsausprägung und Landnutzung in den Satellitenszenen diskutiert und abgeschätzt. Anhand der Vegetationsbedeckung, die sowohl quasi-natürliche wie auch Anbaupflanzen einbezieht, wurde versucht, Unterschiede zwischen Jahren möglichst gleicher saisonaler Zustände aufzudecken und zu interpretieren. Sehr gut gelingt dies anhand des ersten Beispiels mit monosensoralen Daten, die in genau Jahresdifferenz Mitte der 1990er aufgezeichnet wurden (Kap. 6.3.1). Die festgestellten Unterschiede lassen sich mit den unterschiedlichen Niederschlagsverhältnissen erklären.

Von atmosphärischen Störungen beeinflusst wurde der Vergleich der drei Jahre auseinanderliegenden Novemberszenen in den 1990er Jahren (Kap. 6.3.2). Hinzu kommen außerdem ganz klar saisonale Einflüsse, denn die Regenzeit liegt 1992 noch nicht so lange zurück wie zum Aufnahmezeitpunkt 1995. Die Ergebnisse des Satellitenbildvergleiches korrelieren deswegen nicht mit den Niederschlagsdaten und zeigen stattdessen eine noch stärkere saisonal bedingte Vegetationsbedeckung für 1992. Wie bereits die Untersuchungen zu den saisonalen Veränderungen gezeigt haben (Kap. 6.2), sind Vergleiche zwischen Satellitenszenen, die während oder kurz nach der Regenzeit aufgenommen wurden, deswegen mit ganz besonderer Vorsicht zu ziehen.

Der Vergleich der drei Trockenzeitermine Mitte bzw. Ende der 1970er Jahre (Kap. 6.3.3) zeigt ebenfalls eine kontroverse Entwicklung zu den Niederschlagsdaten. Trotz kontinuierlich ansteigender Niederschläge ist ein Rückgang der Vegetation im Vergleich der Trockenzeitbilder festzustellen. Da sich die Niederschlagsverhältnisse, wie eben erwähnt, direkt während und relativ kurz nach der Regenzeit stärker abbilden und mit dem Fortschreiten der Trockenzeit immer weiter abschwächen, schlagen sich die Niederschlagsverhältnisse und damit saisonale Charakteristiken in den Märzterminen kaum nieder. Aus diesem Grund müssen die Entwicklungen zu weniger dichter Vegetationsbedeckung entgegen den Niederschlagsverhältnissen als eine längerfristige Tendenz innerhalb der vier Jahre angesehen werden. Erklären läßt sich diese Entwicklung mit anthropogenen Eingriffen, die in dieser Zeitspanne einen Höhepunkt hatten.

In Übereinstimmung mit dem Niederschlagsverhalten stehen die Ergebnisse des MSS-Szenen-Vergleichs zwischen 1972 und 1978 (Kap. 6.3.4). Es zeigt sich eine etwas dichtere Vegetation 1978, als deutlich mehr Niederschläge gefallen waren im Vergleich zum Dürrejahr 1972. In Anbetracht der Tatsache, daß der quantitative Vergleich nicht so deutlich ausfällt, wie hinsichtlich der Niederschlagssituation zu erwarten wäre, muß auch hier unter Berücksichtigung der räumlichen Gliederung der Zunahme- und Abnahmeflächen neben interannuellen Unterschieden eine starke Beeinflussung durch langfristige Tendenzen angenommen werden. Dies trifft in noch stärkerem Maße für die Untersuchung der weit auseinanderliegenden extremen Trockenzeitszenen der 1970er und 80er Jahre zu (Kap. 6.3.5).

Zusammenfassend muß man festhalten, daß – wenn überhaupt – mit Ausnahme des ersten Vergleiches in keinem Fall nur interannuelle Unterschiede dargestellt sind. In allen Satellitenszenen überlagern sich interannuelle Unterschiede mit saisonalen Effekten, die vor allem bei Regenzeit- und Nachregenzeitsszenen eine enorme Bedeutung haben, und langfristige Tendenzen, die besonders bei weit auseinanderliegenden Aufnahmezeitpunkten und während Phasen großer Wandlungen eine stärkere Bedeutung einnehmen. Deswegen dürfen bei einer synoptischen Auswertung die einzelnen Ebenen von Veränderungen nie isoliert betrachtet werden. Dennoch soll in Abb. 52 eine Zusammenstellung aller untersuchten Satellitenszenen in ihren unterschiedlichen saisonalen Zuständen im Verlauf von 24 Jahren gegeben werden. Dargestellt sind die einzeln visuell klassifizierten Vegetationsindizes, die Grundlage der Verschneidungen der vorangegangenen Unterkapitel waren.

Wie die vorangegangenen Ausführungen gezeigt haben, ist eine vom jeweiligen genauen Aufnahmezeitpunkt unabhängige Interpretation kaum möglich. Es sei noch einmal besonders darauf hingewiesen, daß vor allem die Zeitpunkte November 1992 und September 1995 mit besonderer Vorsicht zu betrachten sind, da beide eine stärkere Wolkenbedeckung aufweisen. Wichtig zur Vermeidung vorschneller Schlüsse ist auch die kritische Auseinandersetzung mit der diskontinuierlichen Zeitachse, die sich insbesondere in der Betonung saisonaler Effekte in der gesamten unteren Zeile äußert sowie mit der ungleichmäßigen Verteilung der Datenquellen in dieser Zeitachse, nämlich einer Konzentration ungenauerer Auflösung zu Beginn in den 1970er Jahren und dreimal so guter Auflösung zum Ende der Untersuchungsreihe in den 1990er Jahren. Weiterhin sollten die Angaben, die zu Brandflächen gemacht wurden, unbedingt in die Betrachtungen einbezogen werden.

Wagt man dennoch, als Vorwegnahme langfristiger Entwicklungen, eine Interpretation, so gliedern sich die klassifizierten Vegetationsindizes-Bilder in drei Gruppen: Die *MSS*-Szenen, die die 1970er Jahre fast vollständig gleichmäßig abdecken, zeigen eine schwache allgemeine Vegetationsabnahme auf. Dabei lassen sich keine größeren Unterschiede zwischen der niederschlagsärmeren Periode zu Beginn und der feuchteren Phase am Ende der Dekade ausmachen. Einen deutlichen Einschnitt stellen dann die beiden Trockenzeitszenen der 1980er Jahre dar. Sie repräsentieren mit ihrer sehr geringen Vegetationsbedeckung diese insgesamt extrem niederschlagsarme Dekade. Leider liegen aus dieser Dekade überhaupt keine Szenen aus oder nach der Regenzeit vor. Alle folgenden Bilder vermitteln den Eindruck einer neuerlich feuchteren Periode in den 1990er Jahren, die aber – wenn überhaupt – tatsächlich erst ab 1997 eingesetzt hat. Dieser Eindruck entsteht, weil alle *SPOT*- und *TM*-Szenen der 1990er Jahre Regenzeit- bzw. Nachregenzeitsszenen darstellen. Tatsächlich schwanken am Anfang und in der Mitte der 1990er Jahre die Niederschläge jährlich stark. 1994 war ein Jahr überdurchschnittlich starker, die Saison 1995/96 eher durchschnittlicher bzw. leicht unterdurchschnittlicher Niederschlagsverhältnisse. So täuschen die saisonalen Einflüsse in diesen Bildern am Ende der Untersuchungsreihe eine Entwicklung zu wieder feuchteren Jahren nur vor. Jedoch bestätigen sowohl aktuellste Niederschlagswerte für Maiduguri für die letzten Jahre des 20. Jahrhunderts als auch Berichte über einen wieder ansteigenden und sich ausdehnenden Tschadsee diesen hier entstandenen Eindruck einer neuerlichen Feuchtperiode.

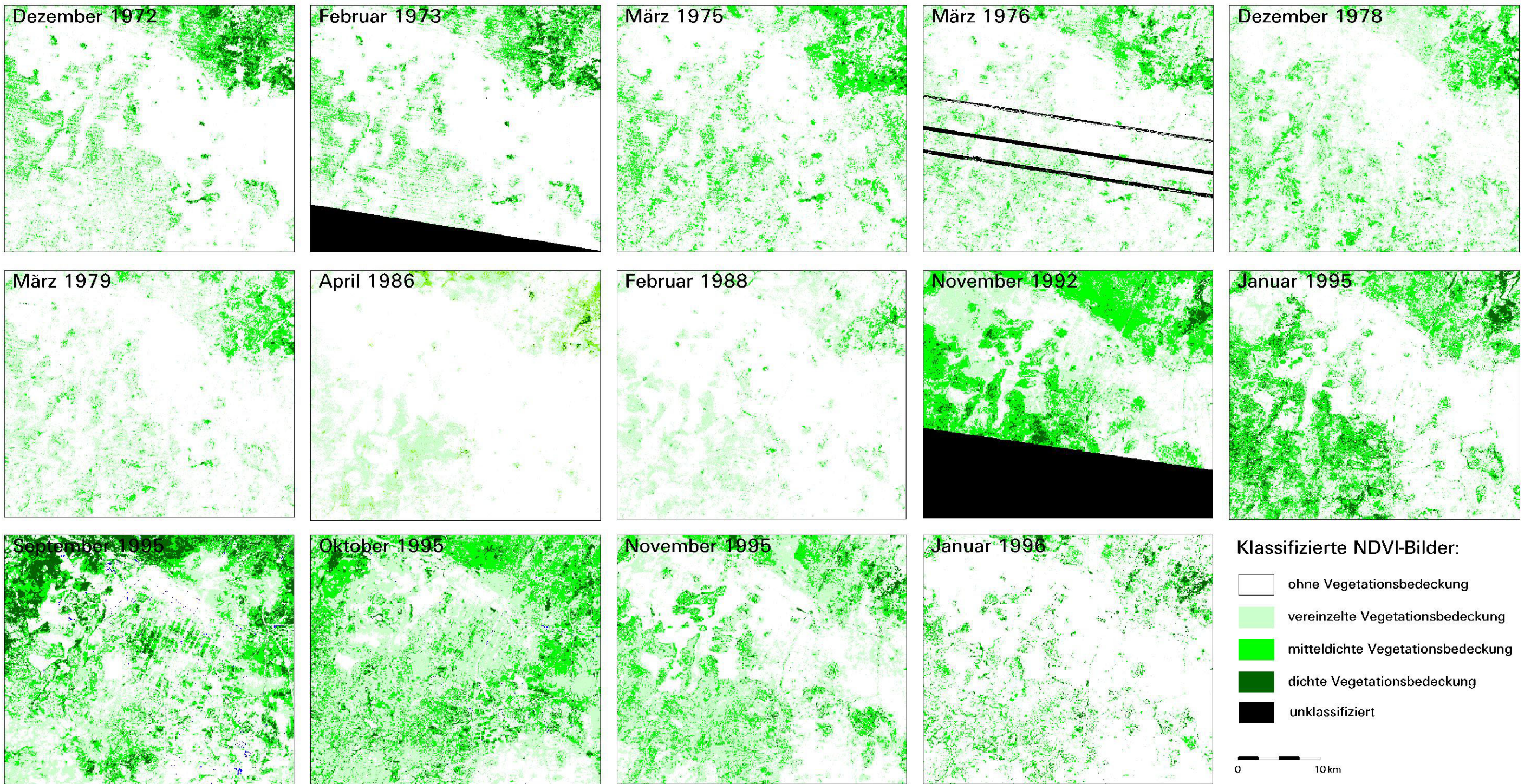


Abb. 52: Zeitreihe der Vegetationsbedeckung aus allen verfügbaren Satellitenszenen im Untersuchungsgebiet über 24 Jahre

Anzumerken bleibt, daß die räumliche Verteilung in allen Bildern eine Konzentration der Vegetation auf den Sandflächen zeigt, wobei der äußerste nordöstliche Bereich einerseits die stärkste Vegetationsbedeckung, andererseits aber auch die stärksten Veränderungen aufweist. Dadurch deutet sich insbesondere für die nähere Umgebung des Tschadsees an, daß neben den regionalen Niederschlagsverhältnissen in den entsprechenden Jahren und neben der allgemeinen Situation in der entsprechenden Dekade der Einfluß des Sees bzw. die durch ihn ausgedrückten Grundwasserstände eine nicht zu vernachlässigende Rolle spielen. Problematisch dabei ist, daß das Verhalten des Sees durch eine hochkomplexe Kombination von Faktoren gesteuert ist, die zum größten Teil außerhalb des weiteren Untersuchungsgebietes liegen (vgl. Kap. 8).

6.4 Langfristige Entwicklungen

Die im Rahmen dieser Arbeit ausgewerteten Luftbilder im Maßstab 1 : 25 000 ermöglichen nicht nur die detaillierteste Abbildung der untersuchten Landschaft, sie liefern auch die am weitesten zurückreichende flächenbezogene Information über den Raum. Anhand der hier verfügbaren im Abstand von 33 Jahren aufgenommenen Luftbildserien lassen sich Landschafts- und Landnutzungsveränderungen bis 1957 zurückverfolgen. Da Aufnahmeart und Saisonzeitpunkt der beiden Luftbildserien fast identisch sind (vgl. Kap. 4.3) und die visuelle Auswertung soweit als möglich nach den gleichen Vorgehensweisen und Kriterien stattgefunden hat (vgl. Kap. 5.4 und 5.5 bzw. auch 5.7), können sowohl Gemeinsamkeiten der beiden Zeitpunkte als auch Veränderungen zwischen diesen direkt abgeleitet werden.

Eine Einordnung in die klimatische Gesamtsituation ergibt für 1957 deutlich überdurchschnittliche Niederschläge, die mit einigen Ausnahmejahren bis zum Ende der 1960er Jahre anhalten. Für 1990 sind der Grafik in Abb. 6 unterdurchschnittliche Niederschläge zu entnehmen. Der Vergleich der beiden spezifischen Jahre 1957 und 1990 spiegelt demnach gut die allgemeine Situation langfristig relativ kontinuierlich abnehmender Niederschläge wider (vgl. Kap. 3.1.1).

Analog zu der in Kapitel 6.1 vorgestellten digital vorliegenden Landbedeckungs- und Landnutzungskarte von 1990 (Beilagenkarte 1) wurde die Luftbildserie von 1957 ausgewertet (Gesamtdarstellung in Beilagenkarte 2). Da allerdings die vorliegenden älteren Luftbilder eine geringere Abdeckung aufweisen und für ihre Auswertung viel aufwendiger zu bearbeiten waren (insbesondere wegen der zusätzlich nötigen geometrischen Entzerrung der Daten), konnte nur das engere Untersuchungsgebiet (vgl. Abb. 12) mit einer Fläche von etwas über 1100 km² bearbeitet werden. Die Ergebnisse der historischen Luftbildauswertung und vor allem die sich aus dem Vergleich beider Zustandskarten ergebenden Landschafts- und Landnutzungsveränderungen werden in den folgenden Unterkapiteln vorgestellt. Um eine neutrale Vergleichsmöglichkeit zu gewähren, wird zunächst die bereits in Kapitel 6.1 vorgestellte Reihenfolge, Vorgehensweise wie auch Kartendarstellung soweit wie möglich beibehalten. Die anschließende Interpretation der Veränderungen bezieht sich nur auf den von beiden Karten abgedeckten Ausschnitt.

6.4.1 Sediment

Die in Abb. 53 dargestellte Karte bildet einen repräsentativen Ausschnitt aus der aktuelleren und gliedert sich zu fast gleichen Teilen in Sand (46%) und Ton (54%) auf. Geringfügig auftretende regionale Abweichungen in der Sedimentkartierung sind auf Unterschiede bei der Interpretation zurückzuführen und wurden bewußt nicht angeglichen. Wie unter 4.3 bereits beschrieben, sind die älteren Luftbilder stärker ausgeblüht und die jüngeren aufgrund von Wolken und fotoqualitativen Unterschieden von sehr unterschiedlichem Kontrast. Dies erschwert insbesondere die Grenzziehung bei der Kartierung der Sedimentunterschiede. So konnten in den gleichmäßiger kontrastierten 1957er Luftbildern kleinere Sandinseln innerhalb der großen Tongebiete besser ausgegliedert werden (vgl. z. B. im Bereich des Kartenblattes 68SE2). Im Gegenzug dazu fiel insbesondere die Kartierung der Sedi-

mente nordöstlich des Ngelewa-Strandwalles bei den historischen Bildern deutlich schwieriger aus. Für diese Gebiete wurde im Gegensatz zu den 1990er Bildern keine zusätzliche Differenzierung vorgenommen. Dies bedeutet allerdings nicht, daß hier tatsächlich keine Landschaftsunterschiede auftreten, denn im Bereich der Kartenblätter 68NE2 und 69NW1 ist die Landschaft sehr jung vom Tschadsee überprägt und damit schwerer eindeutig zu kartieren. Auf der anderen Seite deuten die in der Karte von 1990 kartierten tonigeren Rin- nen auf den Blättern 68NE1, 69NE2 und 69NW1 auch auf neu entstandene bzw. verlegte Abflußbahnen hin, die im Hinblick auf die riesigen Landschaftseingriffe durch das Bewäs- serungsprojekt zu deuten sind (vgl. dazu auch die Ausführungen unter 6.1.1).

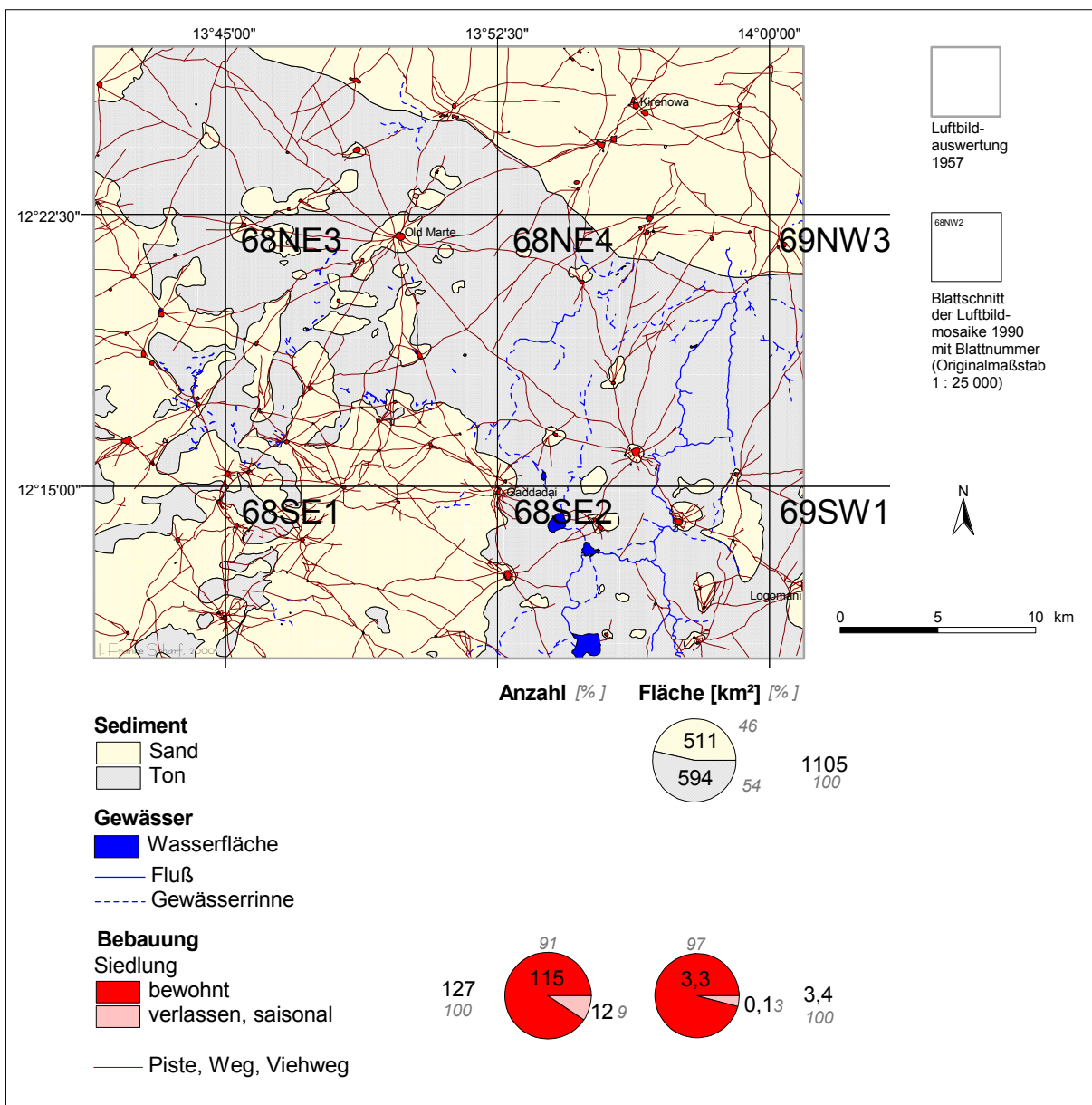


Abb. 53: Landbedeckungs- und Landnutzungskarte 1957: Sediment, Gewässer und Bebauung

6.4.2 Gewässer

In Abb. 53 sind zusammen mit der Sedimentverteilung die Gewässer dargestellt. Den auffälligsten Unterschied zu den aktuellen Luftbildern bilden die stehenden Gewässer, aber auch bei den Fließgewässern sind deutliche Unterschiede auszumachen.

6.4.2.1 Stehende Gewässer

Während 1957 auf gleicher Fläche 17 Wasserstellen im Vergleich zu 57 für 1990 auftreten, ist die Fläche offenen Wassers insgesamt von 2,5 auf nur 0,5 km² zurückgegangen. Hinzu kommt, daß die 1990er Flächen fast alle im Zusammenhang mit dem Straßen- und Dammbau entstanden sind. 1957 treten hingegen noch größere überschwemmte Bereiche auf, die nicht allein auf den etwas früheren Aufnahmezeitpunkt zurückgeführt werden können – zumal sie im südlichen Bereich des Untersuchungsgebietes (68SE2 und 68NE4) und nicht im aktuellen Einflußbereich des Tschadsees liegen. Während auf den topographischen Karten von 1961 der äußerste nordöstliche Ausschnitt als See kartiert wurde, können auch auf der 1957er Luftbildkartierung keine offenen mit dem Tschadsee in Verbindung stehende Flächen erkannt werden. Das für 1957 kartierte Gebiet reicht allerdings weniger weit nach Norden und Osten. Die größte Stelle offenen Wassers im Süden der Kartierung nimmt eine Fläche von über 1 km² ein. Neben den drei größeren Wasserstellen im Überflutungsbereich des Yedseram treten weitere hauptsächlich in den Tönen aber zum Teil auch in den Sanden der Blätter 68NW4, 68NE3, 68NE4 und 68SE1 auf. Zwischen den aktuell und historisch kartierten Flächen der stehenden Gewässer bestehen keine Übereinstimmungen, was die Vermutung bestärkt, daß die Wasserflächen von 1990 zum allergrößten Teil zu einem späteren Zeitpunkt anthropogen entstanden sind.

6.4.2.2 Fließende Gewässer

Eine ähnliche Entwicklung zeichnet sich bei den Fließgewässern ab. Von einem Gewässerrinnennetz von insgesamt fast 220 km 1957 konnten für 1990 nur noch knapp 140 km (64%) kartiert werden. Vergleicht man nur die zum Aufnahmezeitpunkt wasserführenden Rinnenabschnitte, so ist der Unterschied noch gravierender. Von den einst 162 km wasserführenden natürlichen Abflurrinnen, die sich über die Blätter 68NE4 und 68SE2 verteilen, ist 1990 nur noch ein 2,5 km langer Abschnitt (4% von 1957) im äußersten Süden übriggeblieben. Ein Großteil der Abflußbahnen wurde für das Bewässerungsprojekt kanalisiert. Innerhalb des Bewässerungsprojektes erkennt man 1990 so gut wie keine Abflurrinnen mehr (68NE3 und 68NE4), was sicher auch damit zusammenhängt, daß nur in sehr wenigen Jahren tatsächlich ausreichend Wasser über die Kanäle in die Felder geleitet werden konnte.

Auf der anderen Seite haben sich außerhalb des Bewässerungsprojektes an dessen Rändern gegenüber 1957 neue Abflußbahnen herausgebildet (z. B. im südlichen Bereich von Blatt 68NE1, auf 68NE4 und 68SE2). Der deutlichen Abnahme an Gewässerrinnen stehen die generell konstant gebliebene Verbreitung im Raum und auch die Verläufe der einzelnen Fließgewässer gegenüber. Die Abnahme wasserführender Gewässer ist neben Unterschieden in der Niederschlagszufuhr (vgl. auch Abb. 6) vor allem auf die Kanalisierung großer Flußabschnitte im Zusammenhang mit dem in den 1970er Jahren begonnenen Bewäs-

serungsprojekt zurückzuführen. Bewässerungskanäle wurden für das '*South Chad Irrigation Project*' erst ab Mitte bzw. Ende der 1970er Jahre angelegt (vgl. Kap. 6.3.3 bzw. 6.3.4).

6.4.3 Bebauung

Die in den beiden folgenden Abschnitten beschriebenen Elemente der Bebauung sind ebenfalls in Abb. 53 zusammen mit den Landbedeckungseinheiten dargestellt.

6.4.3.1 Siedlungen

Der für 1957 kartierte Ausschnitt (Abb. 53) stellt den dichtest besiedelten Teil des gesamten Untersuchungsgebietes dar. Wie bereits unter 6.1.3 für die Kartierung 1990 beschrieben, lagen auch 1957 fast alle Siedlungen in Gebieten mit sandigen Sedimenten. Lediglich eine permanent bewohnte Siedlung (Blatt 68SE2) sowie 3 saisonale oder verlassene Siedlungen sind im Tongebiet kartiert. Ebenso konzentrieren sich die großen Siedlungen auf den Bereich nördlich des Ngelewa-Strandwalles. Vor allem im Südwesten der Karte treten nur kleine Ortschaften auf. Fast alle der bereits 1957 großen und bedeutenden Orte konnten ihre Bedeutung erhalten (z. B. als Markttorte) bzw. sogar ausbauen (v. a. als Stützpunkte des Bewässerungsprojektes, vgl. die fünf größten Orte mit Größen über 100 000 m²: Old Marte auf 68NE3, Musune auf 68NE4, Ala Lawanti auf 68NW4, Ala auf 68SE2 und Kirenowa auf 68NE2).

Im Vergleich der Siedlungen zu beiden Aufnahmezeitpunkten in Abb. 54 lassen sich zwei gegenläufige Trends aufzeigen: Die Anzahl der Siedlungen hat sich im dargestellten Ausschnitt zwischen 1957 und 1990 von insgesamt 127 auf 96 Siedlungsplätze (75% von 1957) verringert. Dabei ist der Anteil verlassener oder saisonaler Orte zu beiden Zeiten mit knapp 10% an der Gesamtzahl (1957: 12, 1990: 9) gleichgeblieben. Flächenmäßig war allerdings der Anteil verlassener oder saisonal genutzter Siedlungen 1957 noch doppelt so hoch (3% der Gesamtsiedlungsfläche) wie 1990 (nur noch 1,5% der Gesamtsiedlungsfläche), woraus möglicherweise eine vorher höhere Mobilität der Bevölkerung abgeleitet werden könnte.

Der Abnahme der Siedlungsanzahl im Untersuchungsgebiet steht eine extreme Zunahme der Siedlungsfläche gegenüber. Waren 1957 nur 3,4 km² (0,3% der Gesamtfläche) von traditionellen Siedlungen bedeckt, lag die Flächensumme 1990 mit 6,1 km² fast doppelt so hoch (Zunahme um 85% gegenüber 1957). Zieht man zusätzlich die neuangelegten modernen Siedlungen hinzu, erhöht sich die Siedlungsfläche auf 8,1 km² (Zunahme um 138% gegenüber 1957) und unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Projektflächen auf sogar 15,1 km² (Zunahme um 344% im Vergleich zu 1957). Da es für das untersuchte Gebiet keine nach Orten aufgeschlüsselte und vor allem auch keine zeitlich differenzierten Bevölkerungsdaten gibt, stellen die hier gewonnenen Ergebnisse über Ortsflächenveränderungen aus den Luftbildkartierungen die einzig mögliche Interpretationsgrundlage dar. Inwieweit zunehmende Ortsgrößen allerdings mit Bevölkerungszuwachs korreliert werden können, sollte jedoch zunächst untersucht werden.



Abb. 54: Vergleich der Siedlungsflächen 1957-1990 (Siedlungen mit aktuellen Ortsnamen)

Betrachtet man in Abb. 54 genauer den Zusammenhang zwischen Abnahme der Siedlungsanzahl bei gleichzeitig starker Flächenzunahme, so zeigt sich folgendes Bild: Etwa ein Drittel

der Siedlungsfläche von 1957 (1 km² insgesamt) ist für 1990 nicht mehr als Siedlungsfläche ausgewiesen. Ein Großteil dieser Siedlungen wurde aufgegeben (z. B. bei Kirenowa auf Blatt 68NE2, bei Wubsa und Maoli auf 68NW4). Häufig wurden aber diese Siedlungen nicht wirklich aufgegeben, sondern mehrere dicht beieinanderliegende kleine Siedlungen von 1957 wurden 1990 zu einer großen Siedlung zusammengefaßt (z. B. Kirenowa selber und die umliegenden Orte auf 68NE2, Burniski auf 68NE1 und Dubua auf 68NE4). Auffälligerweise fand dieser Konzentrationsprozeß – weniger aber dafür größere Siedlungen – stärker im nördlichen Bereich des Untersuchungsgebietes statt. Auch dies könnte als ein Anzeichen für die verstärkte Seßhaftigkeit in einem dauerhaft vom Tschadsee freigegebenen Siedlungsraum gedeutet werden. Ein Teil der 1990 offen gelassenen Flächen kann aber auch durch Kartierungenaugigkeiten zustande kommen. Wenn nämlich die Lage des Ortes 1990 gegenüber 1957 leicht verschoben ist, handelt es sich in den seltensten Fällen um tatsächliche Ortsverlegungen (vgl. z. B. Maje Turmani auf 68SE1, Mormo Kura auf 68NW4). Teilweise können derartige Fehler auch auftreten, wenn Orte (insbesondere Shuwa-Orte mit ihrer dispersen Siedlungsstruktur) zu einem Zeitpunkt als zwei Ortsteile, zum anderen aber als nur ein Ort kartiert wurden (vgl. z. B. Duwa). Nur in sehr wenigen Fällen haben sich Orte tatsächlich 1990 gegenüber 1957 verkleinert (z. B. aber Mormo Gana – südöstlich Mormo Kura auf Blatt 68NW4).

Mit 2,1 km² an Siedlungsfläche blieb ein Großteil (62%) der 1957 angelegten Siedlungen 1990 bestehen. Fast alle dieser kontinuierlich genutzten Orte haben sich aber bedeutend vergrößert. Dies entspricht dem Hauptanteil der 1990 neu hinzugekommenen Siedlungsfläche (4 km²). Die größten Siedlungsausdehnungen haben die Orte Kirenowa (68NE2), Old Marte (68NE3), Gaddadai bzw. New Marte (hauptsächlich auf 68NE3 und 68SE1) und Logomani (69SW1) erfahren. Echte Siedlungsneugründungen – sieht man einmal von der Hausa-Siedlung Sabon Gari gegenüber Kirenowa (68NE2) ab – haben bis 1990 nur in kleinem Rahmen und nur am südlichen Rand der abgebildeten Karte (68SW2 und 68SE1) stattgefunden.

6.4.3.2 Verkehr

Von den Elementen, die unter dem Begriff 'Bebauung' zusammengefaßt wurden, ist auf der historischen Karte, abgesehen von den Siedlungen, lediglich das Wegenetz bereits vorhanden. Straßen wurden im Untersuchungsgebiet erst mit Beginn der 1960er Jahre angelegt bzw. asphaltiert. Dennoch gab es in der *Firgi*-Region schon Ende der 1950er Jahre Anzeichen hoher Mobilität. Ein weitverzweigtes Wegenetz mit sogar einer etwas größeren Gesamtlänge als für den vergleichbaren Ausschnitt von 1990 (1297 km für 1957 gegenüber 1237 km in 1990) durchzieht das Untersuchungsgebiet (Abb. 53 und Beilagenkarte 2).

Ähnlich wie 1990, wenn auch nicht ganz so auffällig, erscheint das Wegenetz in den Tongebieten weniger dicht als in den Sandgebieten. Als wichtigste, das gesamte Untersuchungsgebiet diagonal durchziehende Verbindungslinie fällt der Weg zwischen Logomani über Musune nach Old Marte und weiter Richtung Nordwesten auf. Die Bedeutung bzw. der Verlauf dieser Verbindung ist gegenüber 1990 mit Anlage der Bewässerungskanäle und dem Straßenbau deutlich zurückgegangen. Generell fällt 1957 eine stärkere Konzentration des Wegenetzes auf Old Marte auf. Diese Ausrichtung hat sich mit Anlage des Kanalnetzes sowie durch die Tatsache, daß Old Marte heute nur über eine Stichstraße mit der Haupt-

straße verbunden ist, deutlich verringert. Die zweite wichtige Verbindungslinie im Untersuchungsgebiet stellt die später von der Straßentrasse verfolgte Strecke von Dikwa über Ala, Gaddadai bzw. später New Marte nach Old Marte dar. Die bereits wieder völlig zerstörte Straße verläuft allerdings etwas weiter westlich als in der topographischen Karte der 1960er Jahre vermerkt und wird heute im Abschnitt zwischen New und Old Marte aufgrund des schlechten Zustands meist über die traditionellen Wege umfahren. Während sich also das Wegenetz von 1957 bis 1990 innerhalb des neu angelegten Kanalsystems verringert hat bzw. durch Verläufe entlang der etwas höher liegenden Kanäle ersetzt wurde, hat es sich in den Sandgebieten 1990 deutlich verdichtet (v. a. südwestlich von New Marte auf Blatt 68SE1 sowie im gesamten sandigen Norden auf 68NW2, 68NE1 und 68NE2).

6.4.4 Landwirtschaft

In Abbildung 55 sind die für 1957 kartierten Anbauflächen dargestellt. Sie nehmen insgesamt eine Fläche von 321 km² (entsprechend 29% der Gesamtfläche) ein. Ebenso wie für 1990 bereits (in Kap. 6.1.4.1 bis 6.1.4.4) beschrieben, wurden sowohl die Sand- als auch die Tonflächen kultiviert.

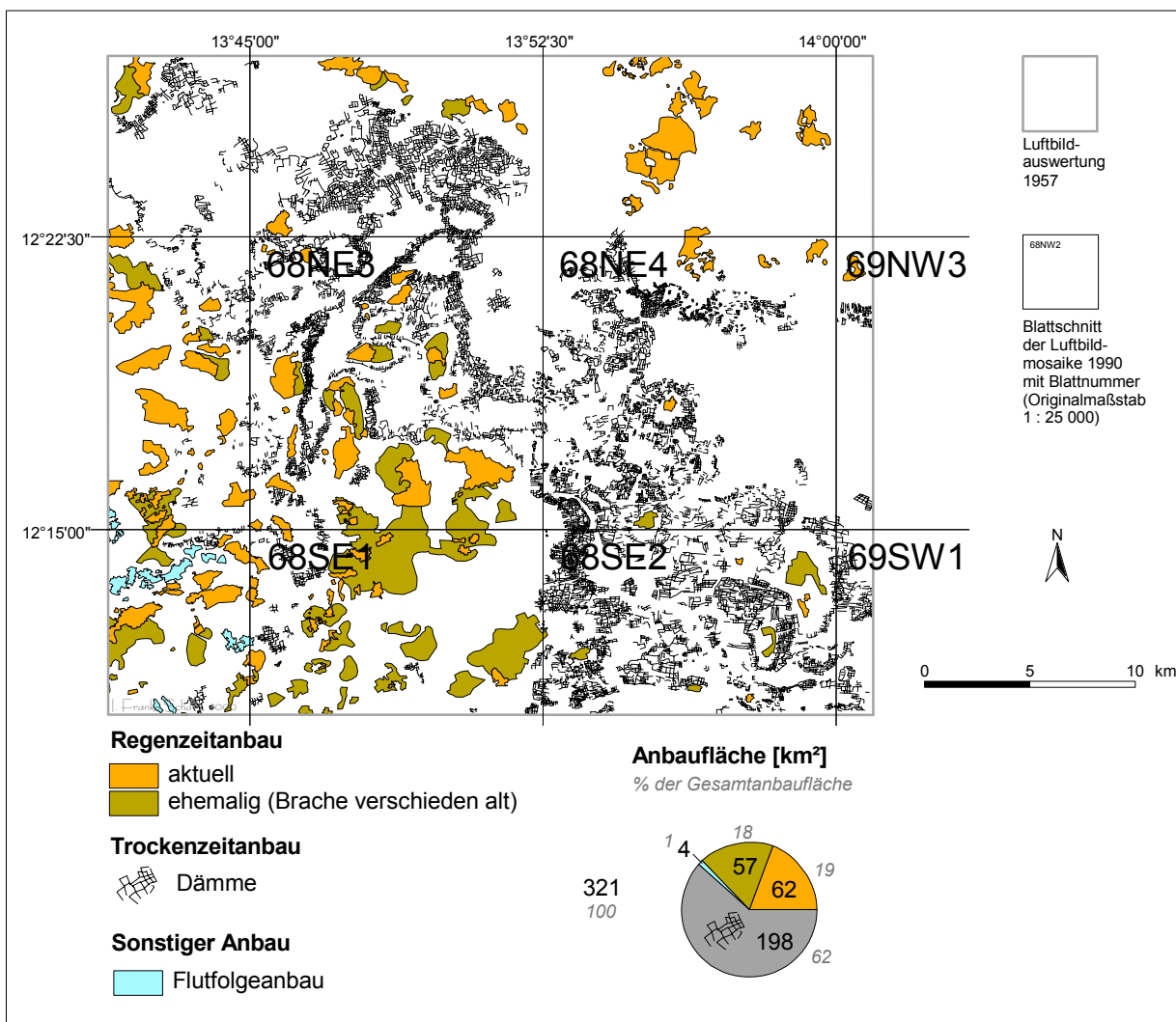


Abb. 55: Landbedeckungs- und Landnutzungskarte 1957: Anbauflächen

6.4.4.1 Regenzeitanbau

Etwas über ein Drittel (37%) der gesamten Anbaufläche (23% der mit sandigem Substrat bedeckten Fläche) wird in der Regenzeit bewirtschaftet (119 km²). Diese Fläche teilt sich etwa gleichmäßig in die in der Saison 1957 aktuell bestellten Felder (62 km²) und in Felder, die zwar nicht 1957 aber in den Jahren davor bepflanzt waren (57 km²). Wie auch auf der aktuellen Karte konzentrieren sich die Regenzeitanbauflächen mit sehr wenigen kleinflächig vorkommenden Ausnahmen auf zwei große Bereiche: zum einen auf den Sandbereich im Südwesten und zum anderen auf den Bereich nördlich des Ngelewa-Strandwalles. Zusätzliche kleinere Anbaugelände liegen auf den Sandinseln innerhalb des zentralen und südöstlichen Tongebietes.

Auffällig ist, daß nördlich des Strandwalles besonders im äußersten Nordosten fast nur aktuelle und kaum ehemalige Anbauflächen kartiert wurden. Diese Beobachtung gilt auch für andere Bereiche, die in der Nähe der ehemaligen Tschadseeausbreitung liegen. Zwei Erklärungsansätze kommen in Frage: entweder werden diese Flächen ständig genutzt oder – was wahrscheinlicher ist – diese Flächen sind erst vor kurzer Zeit vom Tschadsee freigegeben und in Nutzung genommen worden.

Die Kartierung der Anbauflächen von 1957 in Abb. 55 zeigt mehrere größere sandige Bereiche, in denen keine Regenzeitfelder vorkommen. Sehr extensiv genutzt ist der Bereich nördlich des Ngelewa-Strandwalles, insbesondere nordöstlich Kirenowa, mit Ausnahme der näheren Siedlungsbereiche sowie westlich Kirenowa (Blätter 68NE1 und 68NE2). Weitere ungenutzte sandige Areale befinden sich südwestlich Gaddadai (68SE1) und am äußersten südlichen (68SE1) und westlichen (68NW4) Rand der Kartierung. Mit Ausnahme des erstgenannten Gebietes zeichnen sie sich durch eine dichte Gehölzbedeckung aus (vgl. Kap. 6.4.5).

6.4.4.2 Trockenzeitanbau

Wie dem Diagramm in Abb. 55 zu entnehmen ist, wurde 1957 im Tongebiet auf einer Fläche von fast 200 km² (18% der Gesamt- bzw. 33% der Tonfläche) im Trockenzeitanbau *Sorghum* kultiviert. Damit sind die Tonflächen deutlich intensiver genutzt als die flächenmäßig gleichen Sandflächen. Der Anbau in der Trockenzeit erfolgt auf fast doppelt so großer Fläche wie der in der Regenzeit.

Die Anbaugelände sind auf der Karte in Abb. 55 durch die typischen Dämme gekennzeichnet. Für die räumlichen und zeitlichen Vergleiche wurden jedoch analog zu 1990 Flächen durch Pufferung berechnet und zur flächenhaften Auswertung verschnitten (vgl. Diagramme in Abb. 55 und 56 und zur Pufferung und Projektion Kap. 5.7.2.3 und 5.7.2.4).

Die in der Trockenzeit genutzten Felder befinden sich – wie auch schon für 1990 beschrieben – vor allem in den Übergangsbereichen von den Sanden zu den Tonen (gut sichtbar z. B. um die Sandgebiete bei Wulwa oder Old Marte auf Blatt 68NE3), da hier die günstigsten Wasserverhältnisse auftreten. Aber die Feldbegrenzungsdämme ziehen sich auch weit bis in die reinen Tongebiete und bilden große geschlossene Areale (v. a. im südlichen Bereich des Blattes 68NE1 und auf 68SE2 bzw. auch 68NE4).

Interessanterweise umschließen die Dämme sehr unterschiedlich große Felder. So fallen z. B. nordwestlich Old Marte oder nordöstlich von Gaddadai (68NE3 bzw. 68NE4) außergewöhnlich kleine, bei Duwa (68NE3) oder im äußersten Südosten der Karte (68SE2) sehr große Felder auf. Dies hängt sicherlich vorrangig mit den Boden- bzw. Wasserverhältnissen zusammen (vgl. Ausführungen dazu in Kap. 6.1.4.2). Am Beispiel von Gaddadai kann man (v. a. in Beilagenkarte 2) aber auch sehen, daß für einige Orte die tonigen Anbauflächen schon fast ausgeschöpft sind. Vom auf dem Sand liegenden Ort bis zu einer nordwestlich davon verlaufenden dicht bewaldeten Gewässerrinne sind die klein parzellierten Anbauflächen komplett genutzt. Sie gehen direkt über in die zu Ala gehörigen Anbauareale.

Diesen sehr intensiv genutzten Arealen, die sich fast alle in der Nähe von Sandbereichen bzw. in Tongebieten mit größerem Sandanteil befinden, stehen aber auch große Flächen ohne Feldbegrenzungsdämme gegenüber. Sie treten alle in größerer Entfernung zu den Sandflächen und -inseln auf. Das flächenhaft größte befindet sich nordwestlich von Musune (68NE4 und 69NW3) und wird von zwei Gewässerrinnen durchzogen. Ein fast ebenso großes Gebiet ohne Dämme liegt im äußersten Nordwesten der Karte südöstlich von Mintar (Blatt 68NW2). Weitere kleinere Gebiete befinden sich z. B. südöstlich Maoli (68NW4), südlich Njine und südöstlich wie auch nordwestlich im weiteren Umfeld von Old Marte (68NE3). Ein Teil dieser Flächen, vor allem die in den Tiefenlinien liegenden Areale, werden auch ohne Dämme für den Trockenzeitanbau genutzt, denn das Wasser versickert in den Tiefenlinien nur sehr langsam.

6.4.4.3 Sonstige Anbauformen

Ebenfalls hauptsächlich auf den Tongebieten erkennt man durch ihre abweichende Struktur im Südwesten der Karte die Felder des sogenannten Flutfolgeanbaus. Sie nehmen lediglich eine Fläche von 4 km² bzw. 1% der gesamten 1957 bewirtschafteten Anbaufläche ein. Diese Anbauform beschränkt sich fast vollständig auf den Bereich des Kartenblattes 68SW2 und konzentriert sich in den etwas tonigeren Tiefenlinien des südwestlichen Sandgebietes.

6.4.4.4 Veränderungen der Anbauflächen

Vergleicht man die Anbauformen der Kartierungen von 1957 und 1990 (Abb. 55 und 23), so fällt auf, daß eine Diversifizierung stattgefunden hat. Für das zu beiden Zeiten abgedeckte Gebiet kommt 1990 der durch die *Chad Basin Development Authority* wenig erfolgreich betriebene großflächige Bewässerungsanbau hinzu. Die anderen Anbauformen Flußbewässerung und Reisanbau liegen in Bereichen außerhalb der Kartierung von 1957.

Insgesamt hat sich zwischen den beiden 33 Jahre auseinanderliegenden Aufnahmetermen die Gesamtanbaufläche (bei Nichtbetrachtung des Bewässerungsanbaus) im von beiden Kartierungen abgedeckten Gebiet von 1957 bis 1990 geringfügig vergrößert (15% Zunahme von 321 auf 368 km² der zu beiden Zeitpunkten kartierten Gesamtfläche). Würde man den Bewässerungsanbau hinzuzählen bzw. die Flächen die dafür reserviert sind, müßte eine extrem höhere Zuwachsrate der Anbauflächen angerechnet werden (vgl. aber die unter Kap. 6.1.4.1 beschriebenen Probleme bei der Abschätzung der Bewässerungsflächen).

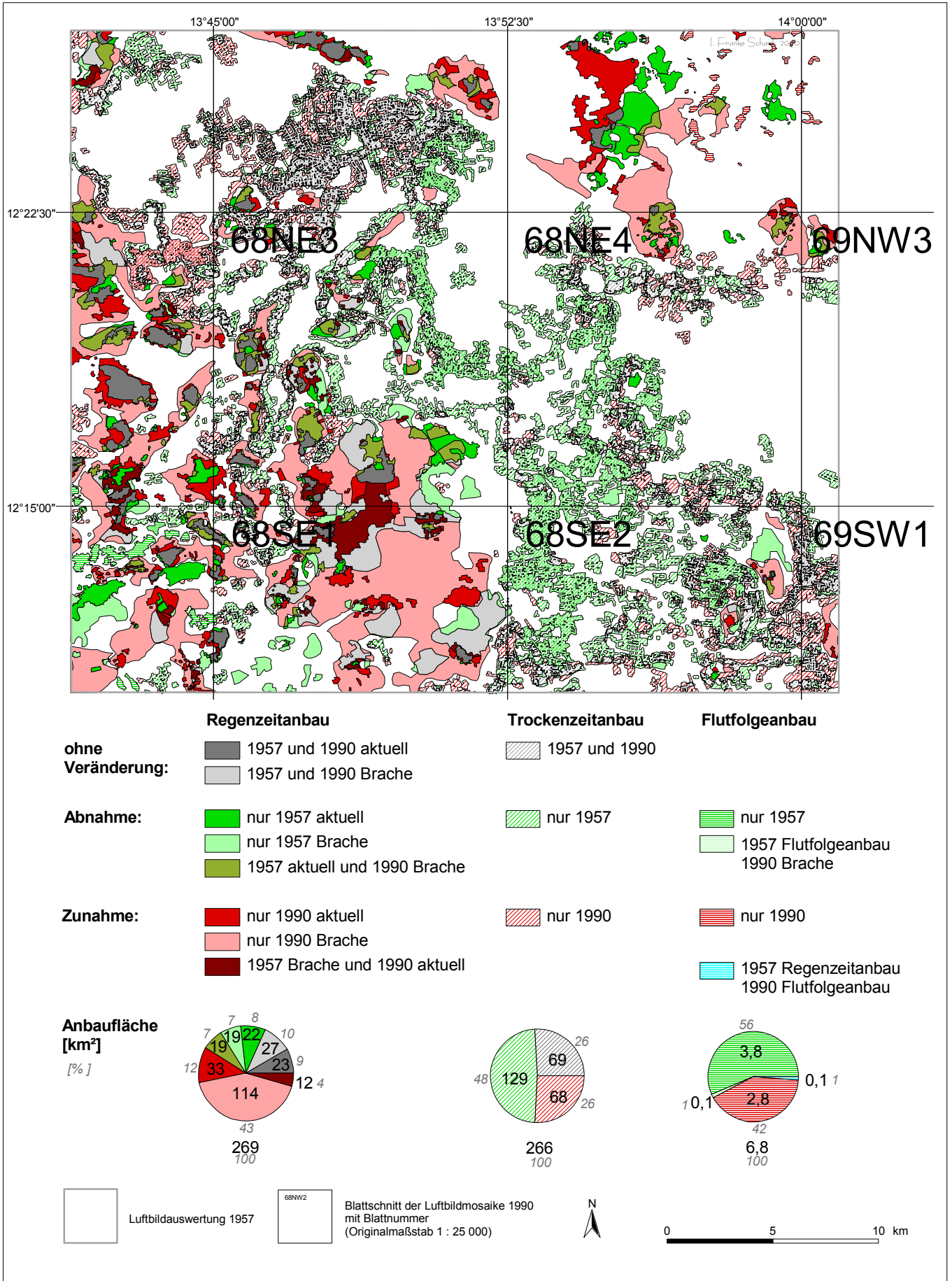


Abb. 56: Vergleich der Anbauflächen 1957-1990

Betrachtet man jedoch die Flächenunterschiede zwischen 1957 und 1990 aufgeschlüsselt nach den einzelnen Anbauformen, so ergibt sich ein differenzierteres Bild. Denn die Regenzeitanbaufläche hat sich von 1957 bis 1990 fast verdoppelt (Zunahme um 91% von 119 auf 227 km²). Damit ist die Nutzung der Sandflächen 1990 gegenüber 1957 deutlich intensiviert worden (Nutzung von 23% der Sandflächen 1957 gegenüber 44% 1990). Die deutliche Ausdehnung der Anbaufläche kommt allerdings hauptsächlich durch eine Zunahme der Flächen zustande, die zwar eine ehemalige Nutzung anzeigen, aber nicht aktuell bewirtschaftet werden. Sie verzeichnen innerhalb von 33 Jahren eine Zuwachsrate von 180% (von 57 km² Brachland auf 160 km²). Dem steht bei den aktuell genutzten Flächen eine geringe Zunahme von nur 8% (62 km² auf 67 km²) gegenüber.

Ein anderes Bild zeigt sich bei den beiden Anbauformen, die hauptsächlich auf den Tonen angewendet werden. Entgegen dem allgemeinen Trend weisen die Trockenzeitanbauflächen abnehmende Bedeutung auf. Von einer 1957 insgesamt fast 200 km² großen Trockenzeitanbaufläche (62% aller Anbauflächen 1957, 33% der Tonfläche, 18% der Gesamtfläche) bleiben 1990 lediglich 138 km² (nur noch 38% der Anbauflächen 1990, 23% der Tonfläche, 12% der Gesamtfläche). Dies ist ein deutlicher Rückgang um 30% gegenüber 1957. Betrachtet man nur die Flächenentwicklung, ergibt sich für den Flutfolgeanbau ein ähnliches Bild. Die mit dieser Anbauform bestellte Fläche verringert sich von 1957 (4 km²) bis 1990 (3 km²) um 25%. Die sowieso geringe Bedeutung innerhalb der Anbauformen (um 1% zu beiden Zeitpunkten) nimmt damit nochmals geringfügig ab.

Die im letzten Absatz aufgeführten Zahlen spiegeln die allgemeinen und nach Anbauformen aufgeschlüsselten Entwicklungen bzw. Veränderungen der Anbauflächen wider. Sie ermöglichen aber keine räumlich differenzierten Aussagen. Dazu sind in Abb. 56 alle jemals als Anbauflächen genutzten Bereiche dargestellt. Durch die Farbgebung lassen sich Bereiche ohne Veränderungen (in Grautönen) von im Laufe der 33 Jahre aufgelassenen (in Grüntönen) sowie von neu hinzugekommenen Anbauflächen (Rottöne) unterscheiden. Durch die Schraffur sind die 3 zu beiden Zeitpunkten vertretenen Anbauformen gegliedert (Vollfarbe für den Regenzeitanbau, diagonale Schraffur für den Trockenzeitanbau und waagerechte Schraffur für den Flutfolgeanbau). Die Karte im oberen Bereich der Abbildung gewährleistet eine räumlich differenzierte Beurteilung der Veränderungen der Anbauflächen. Die Diagramme im unteren Teil der Abbildung, für die gleiche Farben und Schraffuren verwendet wurden, fassen die verschiedenen Anbauformen mit Flächenangaben noch einmal zusammen.

Die rötlichen Farbtöne dominieren in der Karte und den Diagrammen der Abbildung 56. Dies entspricht der generellen Zunahme der Anbauflächen. Über 42% der Flächen aller Anbauformen sind 1990 neu hinzugekommen. Die grünen Farbtöne wurden für 36% der Anbauflächen, die nur 1957 und nicht mehr 1990 genutzt wurden, verwendet. Nur etwa ein Fünftel (22%) der Felder sind in grauen Farbtönen dargestellt. Sie stehen für die sowohl 1957 als auch 1990 genutzten Flächen. Der mit Abstand geringste Anteil unverändert genutzter und die hohen Zahlen der aufgegebenen bzw. neu hinzugekommenen Areale belegen eine hohe Variabilität in der Landnutzung. Dabei sind die Trockenzeitanbauflächen trotz der Überschneidung mit den in den 1970er Jahren großflächig angelegten Bewässerungsflächen am beständigsten. Größere Flächenverlagerungen wurden in den Sandgebieten für die Regen-

zeitanbaufelder vorgenommen und völlig unbeständig zeigen sich die Felder des Flutfolgeanbaus.

Betrachtet man die Verteilung der Flächen im Raum, so zeigen sich neben der Verteilung in Abhängigkeit vom Sediment Bereiche unterschiedlicher Landnutzungsentwicklungen. Für den Regenzeitanbau, der zusätzlich nach aktuellen und ehemaligen Anbauflächen aufgeschlüsselt ist, treten Flächen ohne Veränderungen im Laufe der Zeit zu 19% im Untersuchungsgebiet auf. Sie teilen sich etwa gleich auf in Areale, die 1957 und 1990 aktuell genutzt (dunkelgrau) und die zu beiden Zeiten Brachflächen waren (hellgrau). Erstere finden sich vor allem in der Nähe der auf den Sanden liegenden Ortschaften, aber nicht unmittelbar an sie anschließend. Beispiele dafür sind Zaga und Gumaa Kura auf bzw. nördlich des Ngelewa-Strandwalles (68NE1 bzw. 68NE2), Wubsa, Maoli, Mormo Gana, Sugume, Ala Lawanti, Ala Jiddari (68NW4), Wulwa, Ngubdori, Shuare, Maje Sheruri (68NE3) sowie Lumshe (68SE1). Jeweils wie auch insgesamt etwas größer sind die Brachflächen, die sich neben den bereits erwähnten Orten zusätzlich beispielsweise auch bei Mintar (68NW2), Maje Malori (68NE3), Alamatar und Gamala (68SE1) finden. Auffällig erscheint, daß nordöstlich des Ngelewa-Strandwalles mit Ausnahme von Zaga und einigen sehr kleinen Flächen keine kontinuierlich genutzten Felder auftreten.

Ebenfalls über das gesamte Untersuchungsgebiet verteilen sich Flächen, die eine Abnahme in der Nutzungsintensität aufweisen (22% der Regenzeitflächen). Von diesen sind wiederum 8% 1957 aktuell genutzt und dann aufgegeben worden. Die größten zusammenhängenden Flächen dieser Art (dunkelgrün) finden sich bei Kirenowa und Umgebung (68NE2), bei Wubsa und Runde (68NW4), bei Aja Kura, Njine und Aliye (68NE3) sowie auf Blatt 68SW2. Bis auf die letztgenannten lassen sich diese Flächen zwei verschiedenen Kategorien zuordnen. Besonders die kleineren Flächen liegen in direktem Umkreis der Siedlungen (z. B. bei Aja Kura, Dura, Wulwa und Wubsa). Wie bereits in der Kartierung von 1990 aufgefallen ist, wurden die Bereiche im engeren Umkreis um die Siedlungen nicht bzw. nicht mehr genutzt. Als Begründung wurden Tiere angegeben, die sich in Siedlungsnähe unbeobachteter bewegen und die Felder zerstören könnten. Auffällig ist aber auch, daß die Böden in Siedlungsnähe häufig stark verfestigt und degradiert sind und für eine Nutzung nicht mehr in Frage kommen. Der zweiten Kategorie zuzuordnen sind die größeren Flächen (z. B. bei Kirenowa und Aliye bzw. New Marte). Sie gingen im Zuge der Einrichtung der Bewässerungskanäle bzw. der zugehörigen Infrastruktur für die Bewirtschaftung verloren. Ebenso abnehmende Nutzungsintensität weisen die Flächen auf, die 1957 bereits Brachflächen waren (hellgrün) und die, die 1957 noch genutzt, aber 1990 Brachflächen sind (olivgrün). Erstere finden sich bevorzugt in den Übergangsbereichen zu den Tongebieten und auf den in den Tonen isolierten Sandhügeln, letztere noch stärker auf einem Nordwest-Südost verlaufenden Streifen südwestlich der Tonebene. Eine Erklärung für diese Brachen könnte sein, daß in der Nähe des Bewässerungsprojektes zusätzliche Einkommensquellen außerhalb der Landwirtschaft möglich sind, eine andere allerdings die, daß durch Zuwanderung, vor allem auch wegen des Bewässerungsprojektes, die Böden stärker – über ihre Regenerationsfähigkeit hinaus – genutzt worden sind und nun ausgelaugt nur noch mit hohem Aufwand bewirtschaftet werden können. Die als Brachen ausgewiesenen Felder stimmen auch recht gut mit den Bereichen größerer Sandmächtigkeiten überein, auf denen möglicherweise höhere Niederschläge für die Nutzung nötig sind.

Auf 58% der Regenzeitanbauflächen im Untersuchungsgebiet hat sich die Nutzung verstärkt. Sie verteilen sich über die gesamte mit Sanden bedeckte Fläche. Die 1957 noch ungenutzten und 1990 aktuell genutzten Flächen treten zu 12% auf (rot). Die größte Fläche befindet sich bei Kirenowa, dort hat sich ein Anbauareal komplett nach Westen verlagert. Weitere kleinere Flächen befinden sich bei fast allen in den Sandbereichen liegenden Siedlungen. In den meisten Fällen haben sich die ständig genutzten Anbauflächen nach außen vergrößert (z. B. bei Mormo Gana, Wubsa, Maoli auf Blatt 68NW4 oder Runde, Shuare und Maje Sheruri auf 68NE3). Den größten Anteil (42% der Regenzeitanbauflächen) zeigen die 1990 als Brache ausgewiesenen Flächen (rosa). Auch sie stellen eine nach außen gerichtete Ausdehnung der älteren und auch jüngeren Nutzflächen dar. Zum Teil mag eine Überbetonung dadurch zustande gekommen sein, daß Flächen nicht für den Anbau, sondern als Viehweide genutzt wurden. Durch Einzäunung und geringeren Bewuchs gegenüber dem Umfeld können dadurch Verwechslungen mit den eigentlichen Anbauflächen aufgetreten sein. Zusätzlich zeigen Flächen, die im Rahmen des Bewässerungsprojektes verändert wurden, häufig Anzeichen ähnlich denen landwirtschaftlicher Nutzung (z. B. im weiteren Umfeld von New Marte, Kirenowa). Nur 4% der Regenzeitfläche wurden nach einer Brachezeit 1990 wieder in Nutzung genommen (braun). Flächen dieser Art finden sich westlich New Marte (68NE3 und 68SE1) sowie bei Ala Jiddari (68NW4). Auch diese wieder intensiver genutzten Felder befinden sich in den Bereichen mit größeren Sandmächtigkeiten. Einerseits sind dies zwar im Regelfall die nährstoffärmeren Böden, andererseits sind sie aber auch weniger stark desertifikationsgefährdet als die geringermächtigen Sandbereiche im Übergang zu den Tonen (vgl. dazu SKORUPINSKI & FRANKE-SCHARF 1997).

Im Untersuchungsgebiet klarer räumlich gegliedert sind die unterschiedlichen Formen der Trockenzeitanbauflächen (diagonal schraffiert). Die unverändert gebliebenen Felder (grau diagonal schraffiert) gruppieren sich vor allem um Duwa und Muum Gana (68NE1), in einem Bogen um Dubua (68NE4) sowie weniger dicht entlang von Streifen im Südosten des kartierten Ausschnittes (68NE4, 68SE2 und 69SW1). Neben diesen Hauptstandorten finden sich kleinere kontinuierlich genutzte Areale überall über die Tongebiete verteilt (beispielsweise um Maoli auf 68NE1, Wulwa und Old Marte auf 68NE3). Insgesamt sind Verlagerungen bei den Trockenzeitanbauflächen seltener als bei den in der Regenzeit genutzten. Etwa ein Viertel (26%) aller Trockenzeitfelder wurden sowohl 1957 als auch 1990 bewirtschaftet. Es ist allerdings einzuräumen, daß sich die Trockenzeitfelder durch die Feldbegrenzungsdämme deutlicher und länger auf dem Luftbild abzeichnen als die unbegrenzten Regenzeitanbauflächen. Auch bedingt die durch den spezifischen Aufnahmetermin nur indirekt mögliche Kartierung (Ausgrenzung der Dämme statt tatsächlich bestellter Flächen), daß möglicherweise kartierte Felder nicht tatsächlich in der darauffolgenden Trockenzeit genutzt werden (vgl. dazu die bereits unter Kap. 6.1.4.2 gemachten Anmerkungen). Beides kann also zu Kartierungsfehlern im Sinne einer Überbewertung von Trockenzeitanbauflächen führen.

Fast die Hälfte der Trockenzeitfelder (48%) wurden im Laufe der 33 Jahre aufgegeben (grün diagonal schraffiert). Diese aufgegebenen Felder liegen fast alle innerhalb der für das Bewässerungsprojekt mit Kanälen überbauten Fläche (nordöstlicher Teil des Blattes 68NE3, 68NE4 und nördlicher Teil von 68SE2). Aber auch außerhalb ist die Trockenzeitanbaufläche zurückgegangen, nämlich in größerem Maße im südöstlichsten Kartenausschnitt (68SE2), bei Mintar (68NW2), zwischen Kajere und Dura (68NE3) und in weiteren kleineren Arealen in den kleineren Tongebieten zwischen den Sanden im Südwesten der Karte.

Den vielen aufgelassenen Trockenzeitfeldern steht eine Flächensumme von 26% der Regenzeitanbauflächen gegenüber, die neu in Nutzung genommen wurden (rot diagonal schraffiert). Das größte zusammenhängende Gebiet befindet sich im Westen zwischen Wubsa und Muum Kura (68NW4), kleinere über das ganze Untersuchungsgebiet verteilt, konzentrierter auch südlich entlang des Ngelewa-Strandwalles und entlang eines Streifens auf den Blättern 68NE4, 68SE2 und 68SW1.

Für den Flutfolgeanbau konnten überhaupt keine zu beiden Zeitpunkten genutzten Felder aufgenommen werden. Sie haben sich vollständig verlagert. Während 1957 der äußerste Südwesten für dem Wasser folgende Anbaufelder genutzt wurde (grün quer gestreift), fand die Nutzung 1990 im äußersten Nordosten der Karte statt (rot quer gestreift). Die generelle Abnahme und auch die Verlagerung der Flutfolge-Anbauflächen könnte mit dem Rückweichen des Tschadsees und den damit verbunden weniger vorkommenden Überflutungsflächen erklärt werden. Nur ein vernachlässigbarer Anteil der Fläche wurde von Regenzeitanbaufläche in Flutfolgeland umgewidmet.

6.4.5 Vegetation

6.4.5.1 Gehölze

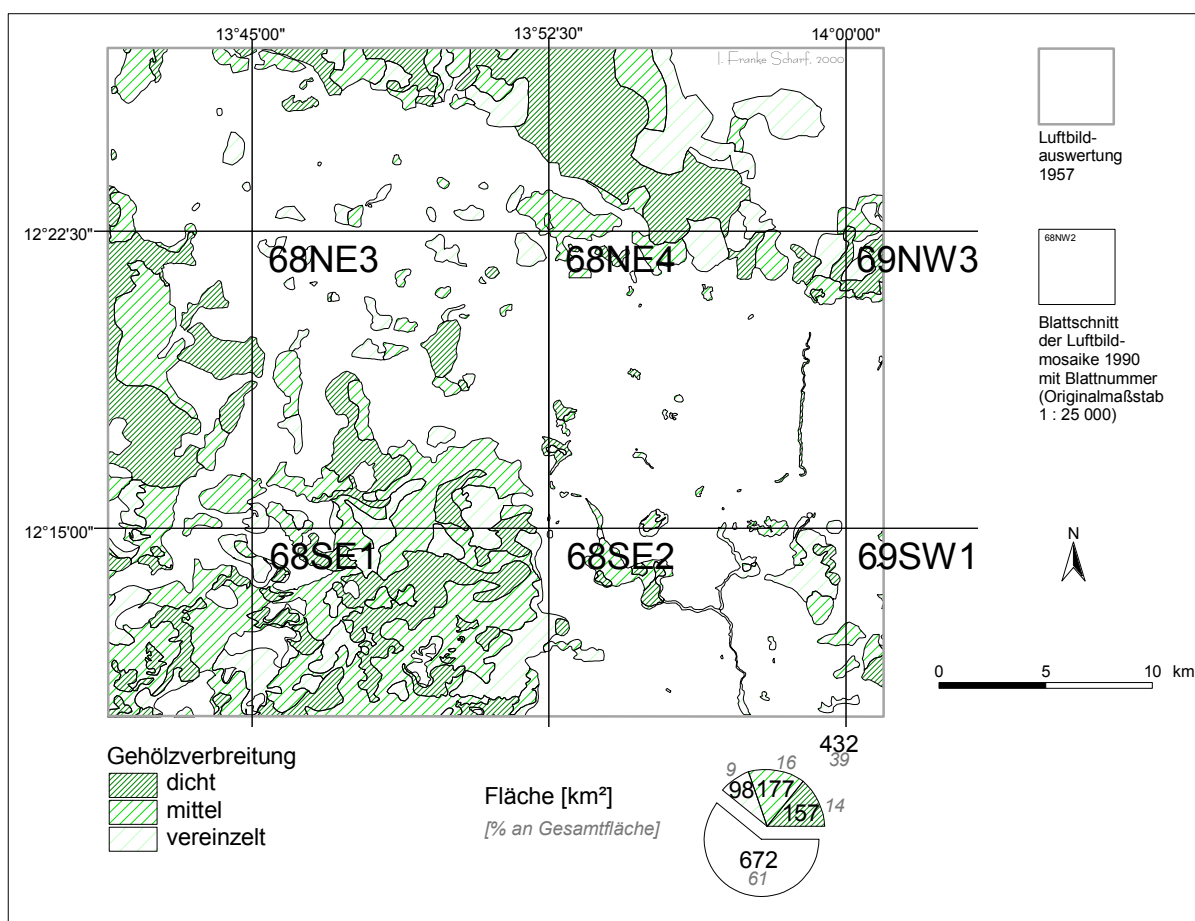


Abb. 57: Landbedeckungs- und Landnutzungskarte 1957: Gehölze

In Abbildung 57 sind alle 1957 gehölzbestandenen Flächen im Untersuchungsgebiet dargestellt. Insgesamt sind auf fast 40% der Gesamtfläche (entsprechend einer Fläche von 432 km²) Bäume und Sträucher zu finden. Sie gliedern sich in Bestände mit hoher (14% der Gesamtfläche, dunkelgrün dicht schraffiert), mittlerer (16%, mittelgrün mitteldicht schraffiert) und geringer Dichte (9%, hellgrün weit schraffiert).

Aus der vorgestellten Klassifizierung ergibt sich zusätzlich, daß über drei Viertel aller gehölzbestandenen Flächen (77%) mindestens mittlere Dichten und zu fast 40% sogar hohe Dichten aufweisen. Für 1957 ist also insgesamt durchaus eine hohe Gehölzdichte im untersuchten Ausschnitt festzustellen.

Ähnlich wie bereits für 1990 beschrieben (Kap. 6.1.5), sind aber Unterschiede in der räumlichen Verteilung auszumachen. Die Karte zeigt zwei große Verbreitungsgebiete: zum einen nordöstlich des Ngelewa-Strandwalles und zum anderen im südwestlichen Kartenbereich. Zwischen diesen beiden Hauptverbreitungsgebieten finden sich lediglich einige kleinere inselhafte und lineare gehölzbestandene Flächen. Markant hebt sich der nordöstliche Bereich der Kartierung ohne Baumbestand ab, denn hier waren die Einflüsse des Tschad-sees lange Zeit am stärksten.

91% aller Gehölzflächen stocken auf sandigem Untergrund. Diese Areale weisen auch deutlich höhere Durchschnittsflächengrößen auf. Demgegenüber wachsen nur 10% aller Gehölze in kleineren Beständen auf tonigem Untergrund. Es ergibt sich also insgesamt das Bild, daß der allergrößte Teil der Sande, nämlich 76%, 1957 gehölzbestanden war. Für die Tonflächen ergibt sich eine Bedeckungsrate mit Gehölzen von 7%. Dabei ist allerdings interessant, daß mehr als die Hälfte der gehölzbestandenen Tonflächen (55%) mittlere Dichten und ungefähr gleichgroße Flächenanteile hohe (22%) wie geringe (24%) Dichten aufweisen.

Neben der Konzentration der Gehölze auf die Sandflächen finden sich überdurchschnittlich viele Bäume und Sträucher innerhalb der Ortschaften. 87% aller Siedlungsflächen sind gehölzbestanden, allerdings überwiegend vereinzelt (44% der Siedlungen), nur zu 33% in mittleren Dichten und gar nur zu 19% in höheren Dichten. Nur wenige Orte weisen keine Bäume in ihrem Umkreis auf (z. B. Muum Kura, Kajere und Duwa auf 68NE3 und Chima auf 68NE4). Es fällt aber ebenso auf, daß die Siedlungen – wie die Zahlen schon zeigen – selten (außer z. B. Linse, Alla Lawanti, Kamzamo) dichte Baumbestände tragen. Auch demonstrieren die Karten in Abb. 57 und besser in Beilage 2, daß bereits 1957 im Umfeld der Siedlungen die Vegetation deutlich lichter ausgeprägt war als in den siedlungsfernen Bereichen. So treten z. B. in Wubsa, Maoli, Mormo Kura und Mormo Gana (68NW4), Maje Malori, Ngubdori, Aliye (68NE3) und Gumaa Shuare (68NE2) nur mittlere Gehölzdichten im Vergleich zu ihrem dichten Umland und z. B. in Gumaa Kura, Gumaa Bulabulim, Kirenowa (68NE2), Dubua, Jillam, Bula Butube (68NE4 bzw. 69NW3), Runde, Njelte, Maje Sheruri (68NE3) und in fast allen Siedlungen auf Blatt 68SE1 gar nur vereinzelt Baumbestände im Gegensatz zur dichten Vegetation ihrer weiteren Umgebung auf.

Letztere Auffälligkeit hängt zum großen Teil mit der Lage der Anbauflächen im Umkreis der Siedlungen zusammen. Läßt man die Anbauflächen in den Tongebieten außen vor, die nur in ganz wenigen Ausnahmen in Randbereichen einige Bäume zeigen, so ergibt sich für die Regenzeitanbauflächen eine höhere Gehölzbestockung als für die unbewirtschafteten Sand-

flächen. 90% der Regenzeitanbauflächen weisen Gehölze auf. Mit 87%iger Baumbedeckung sind die aktuell genutzten Flächen 1957 geringer bestockt als die Brachflächen. Letztere sind nur zu 5% baumfrei. Betrachtet man die Baumdichten auf den bewirtschafteten Parzellen, so gilt für beide Kategorien, daß die Mehrzahl mittlere Dichten, etwa ein Drittel vereinzelt und ungefähr ein Fünftel hohe Baumdichten tragen. Bemerkenswert erscheint, daß die aktuell genutzten Flächen mit 22% einen höheren Anteil dichter Baumbestände haben als die zur gleichen Zeit brachliegenden Flächen. Dies könnte ein Anzeichen dafür sein, daß viele der aktuell genutzten Flächen vor noch nicht allzu langer Zeit urbar gemacht wurden, was aufgrund der räumlichen Verteilung aber nicht nachvollzogen werden kann, oder aber, daß der Baumbestand auf genutzten Feldern sogar besonders geschützt wird. Die dicht mit Vegetation bestandenen Anbauflächen verteilen sich in einem Streifen südwestlich an das große Tongebiet anschließend. Wahrscheinlicher läßt sich der stärkere Baumwuchs jedoch mit größeren Sandmächtigkeiten erklären. Interessanterweise liegt das größte baumfreie Sandareal ohne Nutzung im Nordosten der Kartierung sowie in den Bereichen von Old Marte und Gaddadai. Letztere Orte könnten damit zeigen, daß – wenn möglich – dem Trockenzeitanbau Vorzug eingeräumt wird. Beides sind aber auch Marktorte, die eventuell zusätzliche Möglichkeiten zur Subsistenz bieten.

Eine weitere Besonderheit in der Gehölzverbreitung 1957 zeigt sich in dichten und mitteldichten Baumbeständen entlang von Gewässerlinien (68NE4, 68SE2) und sogar im Bereich von größeren Wasserflächen bei Kamzamo (68SE2).

Abbildung 58 ermöglicht zum einen den Vergleich der Gehölzverbreitung zwischen 1957 und 1990, zum anderen lassen sich Veränderungen lokalisieren. Insgesamt hat im von beiden Kartierungen abgedeckten Raum die Fläche, die mit Gehölzen bestanden ist, stark abgenommen (um 37%). Den stärksten Verlust verzeichnen dabei die dicht bestandenen Flächen, die sich um 76% auf nur noch 3,4% der Gesamtfläche 1990 reduziert haben. Um 42% sind die mitteldichten Gehölzflächen dezimiert worden. Sie erreichen 1990 im untersuchten Gebiet noch eine 9%ige Verbreitung. Mit fast 12% liegt der Anteil der vereinzelt stehenden Gehölze 1990 noch am höchsten. Hier hat in den 33 Jahren eine Flächenzunahme stattgefunden. Neben der drastischen Verringerung der Gehölzflächen haben sich also innerhalb von 33 Jahren die Gehölzbestände extrem gelichtet. Nur noch ein ganz geringer Anteil (14%) der Gehölzflächen ist 1990 dicht, die Mehrheit stattdessen nur noch vereinzelt (48%) bzw. mitteldicht (38%) ausgebildet.

Wie Abb. 58 verdeutlicht, können solch drastische Rückgänge in der Gehölzbedeckung nicht auf Einzelbereiche beschränkt bleiben. Die Verschneidung der Gehölzverbreitungskarten beider Vergleichszeitpunkte offenbart, daß lediglich 10% aller Flächen zu beiden Zeitpunkten baumbestanden waren. Diese unveränderten Areale sind in der Karte und im Diagramm in Grautönen dargestellt. Sie verteilen sich über den gesamten Kartenausschnitt mit einer etwas stärkeren Verbreitung nordwestlich des Ngelewa-Strandwalles. Eine Differenzierung in Flächen mit unverändert hohen (dunkelgrau), mittleren (mittelgrau) und unverändert geringen Gehölzdichten (hellgrau) wurde zusätzlich vorgenommen.

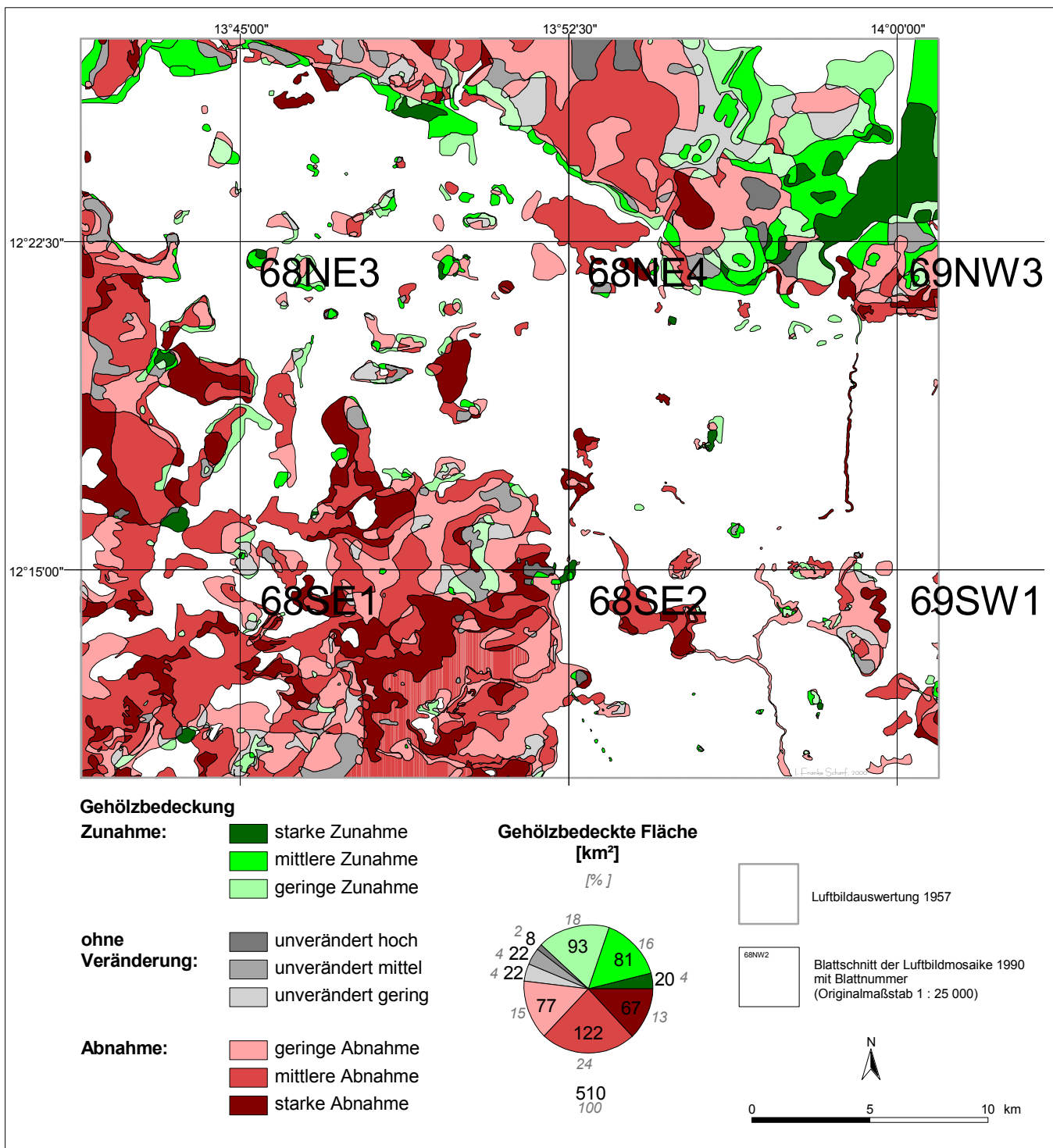


Abb. 58: Vergleich der Gehölzverbreitung 1957-1990

Mit über der Hälfte aller Flächen dominieren die Rottöne in der Karte. Durch sie werden alle Gebiete ausgewiesen, die einen Rückgang in der Gehölzbedeckung aufweisen. Rosa bzw. hellrot wurde dabei für 15% der Flächen verwandt, die nur geringe Verluste zeigen. Dabei bleibt in der Karte unberücksichtigt, ob es sich um einen Übergang von geringer Gehölzdichte zum völligen Verschwinden der holzigen Vegetationsdecke oder um eine graduelle Abnahme der Bestockungsdichte handelt. Ersteres tritt in 44% der Fälle auf, in denen ein geringfügiger Gehölzverlust kartiert ist. Der vollständige Verlust der Holzvegetation hat natürlich deutlich ungünstigere ökologische Auswirkungen als nur eine graduelle Abnahme

der Bestockungsdichte. Eine Visualisierung dieser Flächen würde vor allem die Bereiche in der Nähe der Tone, sowohl innerhalb der großen südwestlichen Sandfläche (z. B. Maje Durture, Njelte, Gaddadai auf 68NE3, südlich Ala Lawanti auf 68NW4 u. v. a.) als auch die kleinen isolierten Sandinseln inmitten der zentralen Tonebene (z. B. um Belase, Muum Gana, Maarta, Duwa auf 68NE1, bei Old Marte, Goniri, um Kajere auf 68NE3, Saula und Bela Cesabe auf 68SE2), insbesondere aber auch einen Großteil der Ufervegetation (68SE2) hervorheben. Alle diese Bereiche nehmen damit unter den zahlreichen degradierten Standorten nochmals eine Sonderstellung ein. Während von den hellroten Flächen nur ein Teil vegetationsfrei ist, sind die dunkelroten Flächen (13%) vollständig degradiert. Hier wurden dichte Gehölzbestände innerhalb von 33 Jahren vollständig vernichtet. Außer im Bereich der Sandinseln von Njine und Kamzamo und sehr kleinen Bereichen in der Nähe des Ngelewa-Strandwalles liegen diese Flächen verteilt im südwestlichen Sandgebiet. Etwas weniger stark degradiert, dafür aber mit einem deutlich größeren räumlichen Ausmaß (24% der zu beiden Zeiten gehölzbestandenen Fläche), sind die Areale, die in Abb. 58 in mittleren Rottönen dargestellt sind. Sie bilden große zusammenhängende Verbreitungsgebiete im gesamten Kartenbereich.

Dem Flächenanteil von 10%, der unverändert geblieben ist, und dem mit 52% hohem Anteil an Flächen mit mehr oder weniger großen Verlusten in der Gehölzschicht steht eine Gesamtfläche von 38% gegenüber, auf der eine Verdichtung der Gehölzschicht zu verzeichnen ist. Obwohl dieser Anteil relativ groß wirkt, relativiert er sich bei differenzierter Betrachtung. Denn nur wenige Flächen (4%) konnten stark verbuschen und bewalden, ein Großteil zeigt lediglich geringe (18%) oder mittlere (16%) Zunahmen. Interessant ist, daß der Großteil dieser Flächen neu bestockt ist. Es handelt sich vorwiegend um Randbereiche von den Sanden zu den Tonen (z. B. bei Wubsa, Maoli, Sugume auf Blatt 68NW4). Ein Grund dafür könnte die geringere Ausdehnung von saisonal überfluteten Tonbereichen und damit verbunden der höhere Grundwasserspiegel in diesen Bereichen sein. Die größten neu stockenden Flächen sind jedoch im Bereich des Ngelewa-Strandwalles und im nordöstlichen Bereich der Kartierung, der 1957 vollständig baumfrei war, hinzugekommen.

Interessanterweise zeigen auch viele Siedlungsbereiche eine Verstärkung im Baumbewuchs (vgl. z. B. Old Marte, Muum Kura, Dura, Kajere, Ngabarawa auf 68NE3, z. B. Maoli auf 68NW4, aber auch Bulawo, Large, Musune, Saula, Gumshe Gana im Tongebiet). Dies hängt sicherlich zum Teil mit dem Wachstum der Bäume in den Siedlungen zusammen (die bei der gemeinsamen Kartierung von Bäumen und Sträuchern etwas stärker ins Gewicht fallen), wohl aber durchaus auch mit dem 1990 stärkeren Schutz der Bäume innerhalb der Siedlungen in einer immer baumarmer werdenden Umgebung. Letzteres wird auch dadurch belegt, daß die modernen Siedlungen häufig direkt mit Bäumen bepflanzt werden und im Vergleich deutlich höhere Baumanteile aufweisen. Orte mit Einrichtungen der *Chad Basin Development Authority* (z. B. Kirenowa, Large) oder aber auch Old Marte als Sitz des *Local Government* verzeichnen gegenüber 1957 starke Zunahmen an Bäumen und Sträuchern. An einigen Stellen angelegte Anpflanzungen (z. B. bei New Marte) fallen allerdings so gut wie nicht ins Gewicht.

6.4.6 Sonstiges

Brandflächen konnten, wie bereits erwähnt, aus den 1957er Luftbildern noch weniger als aus den 1990er Luftbildern extrahiert werden. Damit geht aber auch einher, daß im Gegensatz zu den Satellitenszenenauswertungen Flächen durch Brandeinflüsse nicht klassifiziert worden sind. Ebensovienig wurden in den älteren Luftbildern Deflationsstandorte ausgewiesen. Langfristige Veränderungen bezüglich Deflationswannen im Untersuchungsgebiet sind in Form von Karten und Beschreibungen in FRANKE-SCHARF & SKORUPINSKI (2000) dargestellt.

6.4.7 Zusammenfassung der Veränderungen innerhalb von 33 Jahren

Analog zu den Auswertungen zur Landbedeckungs- und Landnutzungssituation von 1990, die in Kap. 6.1 ausführlich beschrieben und mit Karten und Diagrammen belegt wurden, liegt die Auswertung der Landschafts- und Nutzungssituation von 1957 in den vorangegangenen sieben Unterkapiteln vor. Mit Hilfe von Karten konnte die räumliche Verteilung der Landnutzungseinheiten für 1957 rekonstruiert und anhand von Diagrammen quantifiziert werden. Ebenso wie bereits in Kap. 6.1 verfahren, soll zur Ergänzung der räumlichen Gesamtdarstellung eine qualitativ-quantitative Zusammenstellung in Form eines komplexen Diagrammes analog zur Abb. 34 erfolgen.

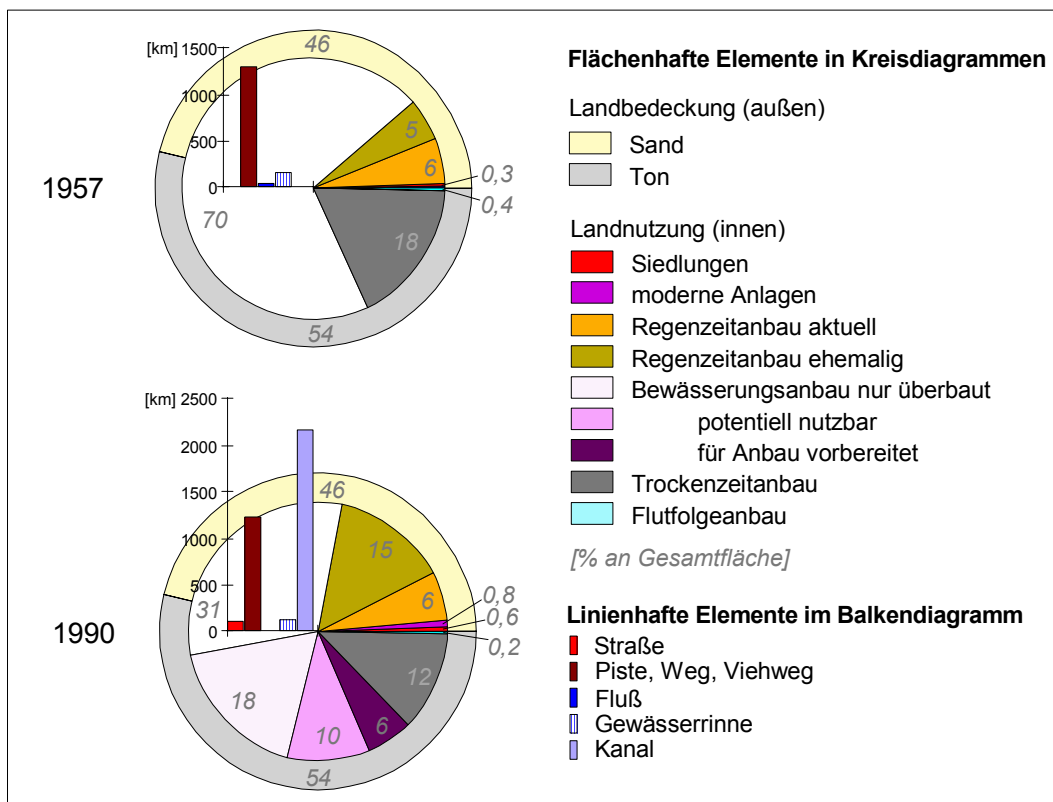


Abb. 59: Vergleich der Landnutzung 1957-1990 für das zu beiden Zeitpunkten abgedeckte Untersuchungsgebiet

Der Aufbau des Diagrammes entspricht dem in Abb. 34 (vgl. Beschreibungen zum Verständnis dort). Die etwa um ein Drittel kleineren inneren Kreisdiagramme spiegeln das ent-

sprechend kleinere Teiluntersuchungsgebiet wider. Identisch ist den beiden Kreisdiagrammen die Landbedeckungssituation, die durch den äußeren Ring mit gleicher, fast paritätischer Sand-Ton-Verteilung dargestellt ist (vgl. Anmerkungen dazu in Kap. 6.4.1). Auch in Abb. 59 wurde zugunsten der Übersichtlichkeit auf die Darstellung der Wasser- und Gehölzflächen verzichtet.

Für 1957 (oberes Diagramm in Abb. 59) läßt sich die Landnutzungssituation im Ausschnitt der Karte in Beilage 2 folgendermaßen zusammenfassen: Siedlungen, vorwiegend auf den Sandflächen, nehmen einen sehr kleinen (0,3%) Teil der Gesamtfläche ein. Knapp ein Drittel der Fläche (fast 30%) wird landwirtschaftlich genutzt. Die Nutzung teilt sich auf, zu 11% werden die Sandflächen im Regenzeitbau kultiviert. Etwas mehr als die Hälfte davon ist 1957 aktuell bestellt worden (6%). 18% der Fläche werden durch Trockenzeitanbaufelder, die in den Tonen angelegt sind, bewirtschaftet. Hinzu kommt ein geringer Anteil (0,4%) von Flächen, die im sogenannten Flutfolgeanbau bestellt werden. Der allergrößte Teil (70%) des Untersuchungsgebietes ist jedoch nicht bzw. lediglich als Weide genutzt.

Nicht in Abb. 59 dargestellt sind Wasserflächen, die eine Fläche von 0,2% des Untersuchungsgebietes einnehmen. Außerdem ergibt sich für 1957 eine recht hohe Gehölzbedeckung (39% der Gesamtfläche), die sich hauptsächlich auf die Sandbereiche konzentriert. Etwa 30% der gehölzbedeckten Bereiche sind dicht oder mindestens mitteldicht bestanden. Auffällig ist, daß die Siedlungen und vor allem auch die Regenzeitbauflächen dichter mit Gehölzpflanzen bestockt sind als deren Umgebung.

Aus dem Balkendiagramm läßt sich ablesen, daß 1957 noch keine asphaltierten Straßen und keine kanalisierten Flüsse angelegt waren. Etwa ähnlich viele Wege, Pisten und Viehwege wie 1990 verbinden die Orte untereinander und mit den Feldern. Knapp ein Drittel der Gewässerrinnen führt zum Zeitpunkt der Aufnahme Wasser.

Trotz auf den ersten Blick gleichgebliebener naturräumlicher Rahmenbedingungen, die durch die äußeren Ringe dargestellt sind, hat sich die Landnutzungssituation, visualisiert anhand der inneren Kreisdiagramme, von 1957 bis 1990 deutlich verändert: Auch wenn sie nur einen sehr geringen Anteil der Gesamtfläche darstellt, so erscheint doch sehr bedeutend, daß sich die Fläche, die von Siedlungen eingenommen wird, von 1957 bis 1990 verdoppelt hat (Zunahme von 0,3% auf 0,6% des Untersuchungsgebietes). Berücksichtigt man außerdem die 1990 neu hinzugekommenen modernen Siedlungen und Anlagen, so hat sich die Fläche sogar fast verfünffacht (Zuwachs auf 1,4%).

Im Gegensatz dazu hat sich die Landwirtschaftsfläche nicht ausgedehnt. Obwohl die Bevölkerung offensichtlich zugenommen hat, ist zu beiden Zeitpunkten der gleiche Anteil an Regenzeitbaufläche aktuell in Nutzung (6% der Gesamtfläche). Allerdings hat sich auf den Sanden die Fläche, die eine ehemalige Nutzung anzeigt, aber nicht aktuell bestellt wurde, verdreifacht (Zunahme von 5% auf 15%). Im Gegensatz dazu reduzierte sich die für den Trockenzeitanbau genutzte Fläche um ein Drittel (von 18% auf 12%). Ein Teil der ehemals im traditionellen Trockenzeitanbau kultivierten Fläche ist 1990 mit Kanälen überbaut (mehr als ein Drittel der Gesamtfläche). Davon wiederum ist nur ein sehr geringer Anteil (10%) bis zum nutzbaren Stadium ausgebaut, und ein noch geringerer Teil (6%) wurde 1990 für den Bewässerungsanbau vorbereitet. Eine tatsächliche Bestellung oder gar Ernte ist daraus

allerdings nicht abzuleiten. Der Flutfolgeanbau spielt 1990 eine noch stärker untergeordnete Rolle als schon 1957, obwohl ja eine größere Diversität bei den Anbauformen zu finden ist. Die deutlich ausgedehnten sandigen Brachflächen sowie insbesondere die von der *Chad Basin Development Authority* mit Kanälen überbauten Areale lassen den noch ungenutzten Anteil an der Gesamtfläche von 70% in 1957 auf nur 31% 1990 schrumpfen.

Bezieht man die Wasserflächen und die Vegetation in die Betrachtungen mit ein, so stellt man fest, daß auch die naturräumlichen Gegebenheiten starker Veränderung unterliegen. Die Fläche offenen Wassers hat sich auf ein Fünftel von 1957 reduziert. Die Gehölzbedeckung ist im Untersuchungsgebiet innerhalb von 34 Jahren um 37% zurückgegangen. Die dicht bestandenen Flächen und die Flächen mittlerer Dichte verzeichnen dabei den stärksten Rückgang (76% bzw. 42%).

7 Schlußfolgerungen

Die vorangegangenen Kapitel gaben Aufschluß über die der Untersuchung zugrunde liegenden Daten, die zur Auswertung verwendeten Methoden sowie die dabei erzielten Ergebnisse. Im Anschluß werden nun Datengrundlage (Kap. 7.1), Methoden (Kap. 7.2) und Ergebnisse (Kap. 7.3) insgesamt bewertet, und der Versuch einer allgemeinen Einordnung unternommen.

7.1 Beurteilung der Datengrundlage

"[...] in regions as the Sahel the lack of up-to-date topographical ordinance maps 1:200 000 or even their total lack, creates complications, no comprehensive information is available, the translation of data from remote sensing systems is a partial remedy." (TAUER & HUMBORG 1992: 15)

Wie im oben angegebenen Zitat treffend formuliert, muß auch die Datenlage, wie sie sich für die hier untersuchte Region darstellte, von zwei verschiedenen Seiten betrachtet werden. Die Datenrecherche bezüglich Karten oder in anderer Form bereits vorliegender Informationen zu Landbedeckung und erst recht Landnutzung ergibt für den afrikanischen Kontinent im allgemeinen und Nigeria im besonderen zunächst ein sehr ernüchterndes Bild. Raumbezogene aktuelle Grundlageninformation fehlt fast vollständig. Eine gewisse Ausnahme für das hier bearbeitete Untersuchungsgebiet stellt lediglich die umfangreiche, inzwischen aber veraltete Kartenserie der *Land Resource Study* im kleinen Maßstab 1 : 1 Million aus den 1960er Jahren dar. Hinzu kommt, daß die wenigsten der in dieser Arbeit aufbereiteten und zum Teil digitalisierten Grundlagenkarten vollständige und eindeutige Angaben zur Kartenerstellung (Erstellungsdatum, Kartengrundlage, Aktualität des Karteninhalts, Kartierschlüssel, Projektion u. s. w.) enthalten. Diese Angaben mögen für einzelne Auswertungen großzügig übergangen oder gar angepaßt werden, bei einer Integration im geographischen Informationssystem macht sich ihr Fehlen allerdings deutlich bemerkbar und bei der Bezugnahme für detaillierte Auswertungen stellen sie unüberwindbare Hürden dar. Ein Beispiel dafür liefern die Bevölkerungsdaten Nigerias. Ähnliches gilt aber auch für Karten mit administrativen Grenzen, insbesondere im Tschadseegebiet, und für viele andere zur umfassenden Bewertung von in dieser Arbeit erzielten Ergebnissen nötigen Hintergrundinformationen. Wie sich in Kap. 7.3 noch zeigen wird, ist eine Einordnung und sichere Interpretation der eigenen Ergebnisse damit nur eingeschränkt möglich.

Neben der unzureichenden Datenlage für Karten stellt auch das Fehlen frei zugänglicher, standardisierter und fortgeführter Datensammlungen ein großes Problem im Untersuchungsgebiet dar. Im Regelfall finden sich nur sehr vereinzelt, häufig schlecht dokumentierte und meist aus verschiedensten Gründen nicht vergleichbare Einzelangaben zu den relevanten mit Landnutzungsfragen zusammenhängenden Themen (vgl. Kap. 7.3). Die Recherche danach wird damit zu einem sehr aufwendigen Unterfangen, häufiger noch zu einer Art Glücksspiel.

Ähnliches muß man auch für die Beschaffung von Luftbildern sagen. Obwohl die Abdeckung mit Luftbildserien für den Raum nördlich des 12. Breitengrades in Nordost-Nigeria als vergleichsweise sehr gut einzustufen ist, stellt sich die Beschaffung qualitativ hochwertiger Kar-

tiergrundlagen als äußerst schwierig und unberechenbar dar. So mußte trotz eines hohen Aufwandes bei der Datenbeschaffung auf sehr verschiedene Materialien ein und derselben Luftbildserie zurückgegriffen werden. Es gibt meist keine zentralen verlässlichen Verwaltungsstellen mehr für diese Daten. In den überwiegenden Fällen liegen auch keine Überflugpläne oder sonstige Zusatzinformationen vor, und die Auswahl der Luftbilder muß allein anhand der abgebildeten Ausschnitte erfolgen. Zwar sind von den aktuellen Luftbildserien des Untersuchungsgebietes sogar Luftbildmosaiken vorhanden, sie waren aber nur in sehr unterschiedlichen Qualitäten zugänglich. Es leuchtet ein, daß Kartierungen von stereoskopisch auswertbaren brillanten Luftbildern nicht direkt vergleichbar sind mit schlecht entwickelten Luftbildmosaiken oder gar verblichenen Blaupausen. Auf der anderen Seite konnte völlig unkompliziert mit den äußerst wertvollen, anderswo unter Verschuß gehaltenen, historischen Luftbildern des Untersuchungsgebietes gearbeitet werden.

Damit kommt man zum letzten Teil der zu Beginn des Unterkapitels zitierten Aussage: Fernerkundungsdaten, die global aufgenommen werden und von unterschiedlichen Organisationen vertrieben werden, bieten insbesondere für Regionen wie das hier bearbeitete Untersuchungsgebiet die meist einzige Möglichkeit aktueller, unabhängiger und frei zugänglicher flächendeckender Information. In vielen Fernerkundungsarbeiten wird jedoch von einer äußerst schwierigen Datensituation für Westafrika aufgrund von atmosphärischen Störungen durch Wolken während der Regenzeit und durch Harmattan-Staub in den anschließenden Monaten gesprochen (z. B. DIALLO et al. 1991 in THENKABAIL & NOLTE 1996). Zusätzlich wird das Fehlen routinemäßiger Datenaufzeichnung und Archivierung für Afrika sowie der Mangel an Bodenempfangsstationen für weite Teile Westafrikas moniert (MYERS 1983: 2215). Letzteres gilt bis heute unverändert in besonderem Maße für den hier untersuchten Raum im östlichsten Westafrika hinsichtlich Daten der großräumiger aufnehmenden *Landsat*-Satelliten. Wegen fehlender Aufnahmekapazitäten an Bord und wegen der ungünstigen zu weit westlichen Lage der nächsten Empfangsstation Maspalomas konnten aktuellere Anfragen für Aufnahmen der Tschadseeregion nicht erfüllt werden. Ebenso scheiden Aufnahmen vom indischen *IRS*-Satelliten für Nigeria mangels einer nahe genug liegenden Empfangsstation aus. Archivszenen finden sich aufgrund des vergleichsweise geringen Interesses an dieser Region nur äußerst selten. Geändert hat sich die Lage erst seit kurzem durch den Start des neuen *Landsat-7* Mitte 1999. Im noch später aufgebauten Archiv sind auch wieder aktuelle Szenen vom Tschadsee verzeichnet.

In Anbetracht dieser Tatsachen ist die Datengrundlage bezüglich Fernerkundungsdaten für die hier vorgestellten Untersuchungen als ausgesprochen gut zu beurteilen. Es konnte in der nun über zehnjährigen Laufzeit des Sonderforschungsbereiches eine große Anzahl Satellitenszenen insbesondere für Nigeria angeschafft und ebenso eine außergewöhnliche zeitliche Tiefe für das hier ausgewählte Untersuchungsgebiet erzielt werden. Wenn auch nicht für den gesamten Tschadseeraum auf die gleiche hohe temporale Auflösung zurückgegriffen werden kann, ist die Abdeckung des hier behandelten engeren Untersuchungsgebietes über einen Zeitraum von Anbeginn operationeller Satellitenüberflüge bis heute, wie sogar eine multitemporale Abdeckung der Vegetationsperiode 1995/96 als ausgesprochen ideal zu beurteilen. Womit der Erfolg nur noch von der Übersetzung der Fernerkundungsdaten abhängt, wie TAUER & HUMBORG (1992) formulieren.

7.1.1 Luftbilder versus Satellitenszenen

Mangels anderer vorhandener Information waren Luft- und Satellitenbilder die Hauptinformationsquelle im Rahmen dieser Arbeit. Zum größten Teil war bereits vor der Auswertung klar, daß für beide Datenarten sowohl unterschiedliche thematische Aspekte, verschiedene Zeitebenen als auch unterschiedliche Maßstabsebenen in den Auswertungen zu berücksichtigen sind. Da ein wichtiger Aspekt dieser Arbeit aber die Vergleichbarkeit von Informationen aus unterschiedlichen Datenquellen war, sollen die Unterschiede hier nochmals konkretisiert werden.

Die Frage nach den Zeitebenen läßt sich am einfachsten beantworten. Potentiell ermöglichen Luftbilder gegenüber Satellitenszenen zunächst die Abdeckung einer weit größeren Zeitspanne, da Luftbildbefliegungen bereits seit Anfang des 20. Jahrhunderts, Satellitenüberflüge aber erst seit den 1960er Jahren möglich waren. Da Luftbildbefliegungen aber viel aufwendiger und kostspieliger sind als operationelle Satellitenumläufe, finden sie viel seltener statt. Die verfügbaren durch Luftbilder abgedeckten Zeiträume variieren demnach für die unterschiedlichen Aufnahmegebiete stark. Während in Deutschland turnusmäßig innerhalb nur weniger Jahre Wiederholungen von Luftbildbefliegungen durchgeführt werden, ist dies in den meisten afrikanischen Ländern nur äußerst selten der Fall.

Für das hier untersuchte Gebiet ist die Situation mit drei verfügbaren Luftbildsätzen von 1957, 1972 (nicht in die Untersuchungen eingegangen) und 1990 vergleichsweise günstig. Luftbildbefliegungen können allerdings aufgrund der viel geringeren Flughöhe nur deutlich kleinere Ausschnitte der Erdoberfläche abbilden als die sich viel höher bewegenden Satelliten. Hinzu kommt, daß der Überflug meist nicht am gleichen Tag beendet werden kann und dadurch, wie auch durch die unterschiedlichen Flugrichtungen, sehr unterschiedliche Aufnahmeverhältnisse herrschen können. Zusätzlich erschweren die Geometrieverhältnisse in den einzelnen Luftbildern die Auswertung. Im Gegensatz dazu ermöglichen Satellitenaufnahmen die Abdeckung größerer Gebiete zu gleicher Zeit bei weitestgehend gleichen Aufnahmebedingungen. Wiederholungsaufnahmen, wie sie für die verschiedenen multitemporalen Auswertungen herangezogen wurden, lassen sich nur durch operationell arbeitende Satelliten durchführen. Kurzfristige Wiederholungen, die z. B. für die Untersuchungen zur saisonalen Dynamik herangezogen wurden, konnten für das Untersuchungsgebiet zur Zeit nur über die Programmierung von *SPOT*-Szenen realisiert werden.

Bereits erwähnt wurde, daß die Größe des abgebildeten Ausschnittes von der Flughöhe bzw. von der Art des Satelliten abhängt. Ebenfalls abhängig davon ist der Abbildungsmaßstab bzw. die räumliche Auflösung der von den unterschiedlichen Systemen aufgenommenen Daten. Diese Problematik wurde im für diese Arbeit entwickelten Klassifizierungssystem, wie es in Tab. 6 in Kap. 5.1 dargestellt ist, aufgegriffen. Dem Tabellenkopf läßt sich entnehmen, in welchen Maßstabsbereichen gearbeitet wurde und welche Datenquellen generell dafür herangezogen werden konnten. Die Übergänge sind fließend und hängen außerdem mit der Vorgehensweise bei der Datenauswertung (vgl. Kap. 7.2.1) als auch mit den jeweiligen thematischen Aspekten zusammen.

Welche Themen mit welcher Datengrundlage zu bearbeiten sind, läßt sich nicht eindeutig und allgemeingültig beurteilen. Aber für kleinräumig gegliederte, sehr heterogen strukturierte Landschaften wie die semiariden Tropen gilt in besonderem Maße, daß die vorwiegend kleinräumig und oft linienhaft auftretenden Elemente sich fast ausschließlich aus den räumlich höher aufgelösten Luftbildern ableiten lassen. Siedlungen, Straßen, Wege, Wasserflächen und Flüsse bzw. Gewässerrinnen sowie Deflationswannen können für eine eindeutige und vor allem flächenhafte Kartierung nur in Ausnahmefällen aus Satellitenaufnahmen abgeleitet werden. Die eher flächenhaft auftretenden und meist inhaltlich stark differenzierten Landschaftseinheiten wie Sediment und Vegetation als auch die Landwirtschaftsflächen lassen sich besser aus Satellitendaten klassifizieren.

Dabei spielt die unterschiedliche Auflösung nur eine untergeordnete Rolle. Stärker zum Tragen kam der Vorteil der Mehrdimensionalität durch die multispektralen oder auch multitemporalen Satellitendaten. Zusätzlich zum sichtbaren Spektralbereich hat sich insbesondere der Bereich des Infrarot zur Kartierung jeglicher Vegetations- und Bodeneinheiten als große Bereicherung herausgestellt. Neben der Mehrdimensionalität der Ausgangsdaten sind durch die digitale Bearbeitung der multispektralen und multitemporalen Daten deutlich mehr Beurteilungskriterien für eine Interpretation gegeben. Zu unterscheiden wären weiterhin Satellitendaten unterschiedlicher Sensoren. Dazu kann aus der hier vorliegenden Untersuchung nur wenig abgeleitet werden, da die Bestrebung, vergleichbare Ergebnisse aus unterschiedlichen Datenquellen zu ziehen, dazu führte, daß überwiegend nur auf der Basis der bei allen Sensorsystemen vorkommenden Spektralkanäle ausgewertet wurde. Da allein auf dieser Grundlage umfassende und verlässliche Ergebnisse erzielt wurden, traten Untersuchungen zur Bedeutung der langwelligeren Kanäle für die Auswertungen in den Hintergrund.

Für eine umfassende thematische Kartierung von Landbedeckungs- und Landnutzungseinheiten zusammen mit den zeitlichen Veränderungen ist eine Kombination aus den beiden Datenquellen Luftbild und Satellitenszene als ideal zu betrachten. Sind die Aufnahmezeitpunkte beider Datenarten identisch, verspricht die gemeinsame digitale Auswertung eine optimale Klassifizierung.

7.2 Beurteilung der Auswertemethoden

"Konventionelle und moderne Methoden haben jeweils Stärken und Schwächen. Zur Lösung drängender (vegetationsgeographischer) Probleme in Wissenschaft und Praxis sollten die Vorteile der unterschiedlichen Ansätze konstruktiv miteinander verknüpft werden." (NÜSSER & SCHICKHOFF 1996: 108)

In Kapitel 5 sind alle in der Untersuchung verwendeten Methoden und Vorgehensweisen dargelegt. Eine Gliederung wurde nach der Art der zu bearbeitenden Daten vorgenommen. Mit einer etwas anderen Sichtweise sollen nun diese Verfahren hinsichtlich ihrer Stärken und Schwächen noch einmal kritisch beleuchtet werden. Zunächst erfolgt in Kapitel 7.2.1 eine Gegenüberstellung visueller gegenüber automatischen computergestützten Auswerteverfahren. Im Anschluß werden letztere nochmals detaillierter beurteilt (Kap. 7.2.2), um dann auf Genauigkeiten und Fehlerquellen (Kap. 7.2.3) einzugehen.

7.2.1 Visuelle versus computergestützte Auswertung

Die Wahl der generellen Vorgehensweise bei der Auswertung ergibt sich in den meisten Fällen aus der Fragestellung und den zur Verfügung stehenden Daten. Die in dieser Untersuchung vor allem für aktuelle detaillierte Kartierungen und langfristige Veränderungen verwendeten panchromatischen Luftbilder bzw. Luftbildmosaiken eigneten sich nur sehr eingeschränkt für automatische computergestützte Auswertungen (vgl. Kap. 5.5.4). Dies ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, daß die meisten Verfahren der digitalen Bildverarbeitung auf Grundlage spektraler Information arbeiten und Textur- und Kontextinformation nur sehr eingeschränkt hinzugezogen wird. Die spektral eindimensionalen Luftbilder liefern damit eine wenig aussagekräftige Grundlage. Zudem sind sie durch ihre zentralperspektivische Aufnahme und reliefbedingten Verzerrungen wesentlich aufwendiger und schwieriger exakt digital zu verarbeiten. Hinzu kommen unterschiedliche Lichteinflüsse in verschiedenen Bildbereichen. Speziell bei den Luftbildern von 1990 treten außerdem Störeinflüsse durch stark abweichende photographische Entwicklungsqualitäten hinzu.

Auf der anderen Seite liefern Luftbilder mit ihrer meist deutlich größeren Auflösung wichtige Detailinformationen, die ein themen- und ortserfahrener Auswerter visuell sehr gut erschließen kann. Wie die in dieser Untersuchung aus Luftbildern gewonnenen Ergebnisse gezeigt haben, lassen sich flächendeckende, thematisch umfassende, detaillierte Karten mittels visueller Interpretation erstellen. Neben der thematischen und regionalen Erfahrung ist allerdings ein recht großer Zeitaufwand für die visuelle Auswertung einzubringen. Im Rahmen dieser Arbeit war der Aufwand nochmals entsprechend größer, weil die Luftbilder zunächst digitalisiert und geometrisch entzerrt wurden, dann visuell am Bildschirm ausgewertet wurden und als Ergebnis dann direkt eine digitale Karte zur Verfügung stand. Wie bereits bei den Methoden in Kap. 5 beschrieben, ist die Qualität der durch visuelle Interpretation erzeugten Ergebnisse extrem abhängig vom Auswerter. Das heißt, bei der Bearbeitung einer Großregion durch unterschiedliche Interpreten muss anschließend noch eine Anpassung der Einzelteile zu einem kohärenten Ganzen erfolgen. Auf der anderen Seite ist es aber möglich, die Auswertung sehr gut auf die entsprechenden speziellen Bedürfnisse auszurichten, indem z. B. nur thematische Teilaspekte berücksichtigt werden und andere Bereiche unklassifiziert bleiben, bzw. unterschiedliche Kriterien für verschiedene Bereiche angewendet werden. Das ist bei der visuellen Auswertung im Gegensatz zu automatischen Verfahren häufig einfacher und intuitiv möglich.

Satellitenszenen, wie sie in dieser Untersuchung verwendet wurden, eignen sich ideal für automatische Auswerteverfahren. Sie bilden durch die synchrone Aufnahme recht großer Gebiete in verschiedenen Spektralbereichen eine gute Ausgangslage für computergestützte, meist auf Spektraleigenschaften beruhende Auswertungen. Satellitenszenen liegen ursprünglich direkt digital vor und ihre Geokodierung ist deutlich einfacher zu bewerkstelligen als die von Luftbildern. Ein großer Vorteil der computergestützten Auswertung liegt darin, daß alle zur Verfügung stehenden spektralen Informationen zusammen mit daraus ableitbaren Zusatzinformationen berücksichtigt werden können, während bei visueller Betrachtung immer eine Beschränkung auf höchstens drei verschiedene Spektralkanäle besteht (Kap. 5.6.3.1).

Die Objektivität bei der automatischen computergestützten Auswertung wird immer wieder als großer Vorteil gegenüber visuellen Verfahren hervorgehoben. Sie ist allerdings auch nur dort gegeben, wo im Gesamtauswerteverfahren keine subjektiven Zwischenstufen enthalten sind. Verfahren, die für ein Gebiet oder einen Zeitpunkt sichere Ergebnisse erbringen, müssen jedoch für andere Gebiete oder Zeitpunkte meist wieder völlig neu angepaßt werden. Als weiterer Vorzug wird immer wieder der geringere Zeitaufwand für die Auswertung größerer Regionen genannt. Dies ist wohl wahr, es muß aber auch der Aufwand berücksichtigt werden, der nötig ist, um die Verarbeitungsmethode auszuwählen und zu evaluieren. Dieser Aufwand kann je nach Fragestellung enorm groß sein, da meist ein Austesten nach dem Ausschlußverfahren nötig ist und nur in den seltensten Fällen bereits anerkannte allgemeingültige Methoden existieren.

Damit ist auch die Aussage zu relativieren, daß bei visuellen Verfahren die Erfahrung des Auswerters einen größeren Einfluß auf das Ergebnis nimmt als bei automatischen computergestützten Verfahren. Denn aus der unüberschaubaren Vielfalt an Computerverfahren kann nur ein sowohl regional wie thematisch erfahrener Bearbeiter geeignete Verfahren auswählen bzw. so zusammenstellen, daß die gewünschten Ergebnisse erzielt werden. Im Gegensatz zur visuellen Auswertung kann dies zunächst ein mühsamerer Prozess sein, da alle sonst intuitiv vorgenommenen Wertungen in die Sprache des Computers umgesetzt und permanent überprüft werden müssen. Erst nach der Entwicklung einer geeigneten Vorgehensweise bei der Auswertung können in sehr kurzer Zeit weitere Ergebnisse produziert werden. Die automatische Auswertung der meist multispektralen, häufig auch multitemporalen und multisensoralen Daten stellt in vielen Fällen ein äußerst komplexes Unterfangen dar und bedarf aufwendiger Prüftechniken zur Evaluierung (vgl. auch NÜSSER & SCHICKHOFF 1996: 97). Sowohl durch die Auswahl der Methoden als auch durch die Art der Prüfverfahren werden in den meisten Fällen wiederum subjektive Entscheidungen einbezogen.

Die Verwendung objektiver automatischer Verfahren zusammen mit subjektiven Entscheidungen hat sich im Rahmen dieser Arbeit als eine äußerst sinnvolle Kombination herausgestellt. Denn nur selten liefern automatische Berechnungsverfahren alleine zufriedenstellende Endresultate. Für die hier vorgestellten Ergebnisse wurden deswegen in den meisten Fällen die Stärken der visuellen Beurteilung mit den Vorteilen der computergestützten automatischen Verfahren kombiniert. Der Berechnung der Vegetationsindizes verschiedener Zeitpunkte z. B. folgte eine individuelle auf visuelle Beurteilung beruhende Schwellwertklassifizierung, der sodann wieder computergestützt die Verschneidung verschiedener Zeitpunkte folgte (z. B. in Kap. 6.3). Die abschließende Interpretation der Ergebnisse stützte sich zu einem Großteil auf visuell gewonnene Eindrücke zusammen mit den Erfahrungen aus den Geländeaufenthalten. Hervorzuheben bleibt aber noch einmal, daß bestimmte automatische Auswertungen (wie z. B. einfache unüberwachte Übersichtsklassifizierungen oder die Errechnung von Vegetationsindizes) häufig sehr schnell direkt verwertbare Ergebnisse liefern (vgl. z. B. Kap. 6.3).

Es erscheint wichtig, nach der Gegenüberstellung der beiden generellen Herangehensweisen bei der Auswertung von Fernerkundungsdaten nochmals die Unterschiede der dabei erzielten Ergebnisse zu betonen, um sie angemessen diskutieren und bewerten zu können. Es wurde versucht, für alle Auswertungen, ganz gleich welche Datengrundlage zur Verfügung stand und unabhängig von der zeitlichen Dimension, ein einheitliches Klassifizierungs-

system zu verwenden (Kap. 5.1). Die Unterschiede, die sich dennoch ergeben haben, müssen zu einem großen Teil auf die dabei verwendeten verschiedenen Datenmodelle zurückgeführt werden.

Im Vektordatenmodell, das bei der visuellen Auswertung der Luftbilder und Luftbildmosaik-Anwendung fand, wird für jede thematische Einheit des Klassifizierungssystems eine gesonderte Ebene angelegt. In ihr werden jeweils Lage, Form, Art sowie weitere Eigenschaften der entsprechenden Objekte abgelegt. Ein Eintrag erfolgt nur dort, wo auch Objekte der entsprechenden Themenebenen vorkommen. Diese Objekte können mit beliebig vielen Zusatzattributen versehen werden. Vektordaten lassen sich sehr effizient und flexibel speichern und verwalten. Aus den großmaßstäbigen Luftbildern können im Vektorformat sowohl großräumige flächenhafte Elemente (wie z. B. Landwirtschaftsflächen oder Gehölzdichten) als auch sehr kleinräumige punkt- und linienhafte Elemente (wie z. B. Einzelbäume oder Wege, Gewässerrinnen oder Erddämme der Trockenzeitanbauflächen) extrahiert werden. Allerdings muß jedes Element einzeln aufwendig digitalisiert und attribuiert werden.

Ganz anders verläuft die Datenerfassung im Rasterdatenmodell, in dem die computer-gestützte Auswertung der Satellitendaten erfolgte. Statt einer Gliederung in thematische Ebenen sind die Daten räumlich in einzelne Bildelemente unterteilt. Die Größe eines Einzelbildelementes hängt von der geometrischen Auflösung der Daten ab und beträgt bei den hier untersuchten Daten zwischen 20 m für die *SPOT*- und 60 m für die *MSS*-Daten. Daraus ergibt sich, daß Elemente kleiner als diese Pixelgröße im Regelfall nicht kartiert werden können. Ausnahmen von dieser Regel treten dann auf, wenn sich kleinere Objekte stark von ihrer Umgebung abheben und damit durch Überbetonung einen überdurchschnittlichen Anteil am entsprechenden Pixel nehmen. Dann werden auch z. B. Einzelbäume in einer sonst vegetationsfreien Umgebung oder schmale Flüsse in sonst trockenem Umfeld abgebildet. Eine flächendeckende Erfassung dieser punkt- oder linienhaft auftretenden Elemente ist jedoch meist nicht gewährleistet. Die große Stärke der automatischen Rasterdatenauswertung liegt in der Erfassung relativ großflächig auftretender Phänomene und in deren Differenzierung (z. B. Kartierung von Sedimentunterschieden oder Vegetationsdichten). Im Unterschied zu Vektordaten können Rasterdaten nur jeweils eine weitere Attributinformation, die in Form eines bestimmten Grauwertes im Wertebereich ausgedrückt wird, enthalten.

Aus diesen Ausführungen sollte klargeworden sein, daß beide Datenmodelle ihre Anwendungsbereiche haben, daß auch beide für sich genommen für Landbedeckungs- und Landnutzungsveränderungs-Analysen Stärken und Schwächen aufweisen. Sowohl Vektor- als auch Rasterdatenmodell mit ihren jeweils dahinter stehenden unterschiedlichen Datengrundlagen, nämlich Luftbilder und Satellitenszenen, ergänzen sich zu einem sinnvollen Gesamtbild (vgl. auch LÖFFLER 1994: 85). In diesem Sinne sind auch die aus den unterschiedlichen Datengrundlagen entstandenen Kartierungen aktueller Zeitpunkte (in Kap. 6.1 und 6.2.7) sowie langfristiger Veränderungen (in Kap. 6.3.6 und 6.4) zu verstehen.

Problematisch bleibt allerdings die Integration beider Datenmodelle für gemeinsame Vergleiche. Wenn auch die technischen Möglichkeiten in den Vektor- und Rasterprogrammen in letzter Zeit enorm verbessert worden sind und eine Transformation der Daten von einem Modell ins andere kaum noch Schwierigkeiten bereitet, so ist es doch nur schwer möglich, z. B. die aus den Satellitenszenen abgeleiteten Karten der Vegetationsbedeckung (Kap.

6.3.6) mit den Luftbildkartierungen der Gehölzdichten (Kap. 6.4.5.1) gleichzusetzen. Die unterschiedlichen Herangehensweisen bedingen Unterschiede in den Ergebnissen, die zum Teil aus der Art der Daten (panchromatische Luftbilder versus multitemporale multispektrale Satellitenszenen – vgl. Kap. 7.1.1) herrühren. So ist z. B. eine sichere Beurteilung der Grasbedeckung über die Gesamtfläche aus den Luftbildern nicht ableitbar. Satellitenszenen geben zwar Auskunft über die Grasbedeckung, spiegeln aber stärker den entsprechenden phänologischen Zustand des Aufnahmezeitpunktes wider und verzerren damit möglicherweise das Ergebnis. Dies sind entscheidende Unterschiede, die beim Vergleich und bei der Beurteilung von Ergebnissen, die aus unterschiedlichen Datenmodellen entstammen, berücksichtigt werden müssen.

7.2.2 Einschätzung der untersuchten digitalen Verfahren

Die Kartierung im Vektordatenmodell ist von der technischen Seite betrachtet überschaubar und meist intuitiv durchführbar. Anders sieht das bei den computergestützten Verfahren für die meist multispektralen Rasterdaten aus. Eine unüberschaubare Flut an Detailforschung und zum Teil komplizierte, nicht immer offengelegte Berechnungen machen es für jede neue Anwendung immer wieder sehr schwer abschätzbar, welche Verfahren Erfolg in Aussicht stellen. Deswegen soll im Anschluß noch einmal speziell auf die untersuchten digitalen Verfahren eingegangen werden. Vor- und Nachteile bzw. Anwendungsbereiche der einzelnen Methoden, wie sie sich für die hier durchgeführten Untersuchungen herausgestellt haben, sollen zusammenfassend aufgezeigt werden.

In Kap. 5 wurden alle verwendeten Verfahren vorgestellt. Einige von ihnen fanden zwar letztendlich bei der Generierung der Ergebniskarten keine Anwendung, haben aber dennoch, möglicherweise als visuell ausgewerteter Zwischenschritt, zu einem Erkenntnisgewinn beigetragen. Alle in Tabelle 10 dargestellten Kombinationen und Transformationen dienen entweder der Beurteilung der Datengrundlage und ermöglichen so die schrittweise Ausrichtung auf eine bestimmte Vorgehensweise oder waren Grundlage für die endgültigen Klassifizierungen. In vielen Fällen lieferten einige der vorgestellten Verfahren für spezielle Teilaspekte bessere Ergebnisse als die letztendlich ausgewählten, die aber insgesamt als geeigneter erschienen.

Tab. 10: Übersicht und Bewertung der untersuchten Datenkombinationen und -transformationen

Verfahren	Bewertung, Anwendung
I Monotemporale Spektralkombinationen	<ul style="list-style-type: none"> • größter Vorteil: bekannte Kombinationen z. B. Infrarotfalschfarben ermöglichen schnellste/konventionelle visuelle Interpretation und Vergleich • Ableitungen von Spektraleigenschaften der Objekte lassen sich direkt nachvollziehen (z. B. Abb. 35)
II Multitemporale Spektralkombinationen der Originalkanäle	<ul style="list-style-type: none"> • hauptsächlich für die schnelle visuelle Beurteilung • zeitliche Unterschiede werden einbezogen: unveränderliche Objekte erscheinen in grau und zu bestimmten Zeitpunkten stark reflektierende Objekte in spezifischer Farbe • meist komplexe Interpretation, da Objekte wellenlängenspezifisch reflektieren/absorbieren und keine Normierung gegeben ist
a) sichtbare Kanäle	<ul style="list-style-type: none"> • aufgrund der hohen Korrelationen der Originalkanäle keine relevanten Unterschiede der Multitemporalkombinationen der sichtbaren Kanäle
b) Infrarot	<ul style="list-style-type: none"> • gegenüber sichtbaren Kanälen beeinflussen und differenzieren Untergrund (v. a. im mittleren Infrarot), Wasser, Feuchtigkeitsgehalt, Vegetationseigenschaften und Brandflächen das Spektralsignal stärker
III Ratios und multitemporale Kombinationen aus Ratios	<ul style="list-style-type: none"> • Interpretationsansatz wie unter II) aber durch Reflexionsverhältnis-Werte noch komplexer • Störungen durch Dunst und Wolkenschatten etwas verringert – Wolken unverändert
a) sichtbare Kanäle	<ul style="list-style-type: none"> • untereinander hoch korreliert, zum Teil invers zum Vegetationsindex • Betonung des Bodens und anthropogener Strukturen
b) nahes Infrarot (Vegetationsindizes)	<ul style="list-style-type: none"> • Normierung über Vegetationsparameter erleichtert visuelle Interpretation (z. B. Abb. 42 und 52) und ermöglicht automatisches Vorgehen • verschiedene Vegetationsindizes sind hoch korreliert und zeigen wenig Differenzierung innerhalb der Vegetation • <i>NDVI</i> liefert die kontrastreichsten Bilder
c) mittleres, thermales Infrarot (z. B. Tonmineralindex)	<ul style="list-style-type: none"> • Eigenschaften des Untergrundes dominieren (Normierung über Mineralgehalte)
IV Differenzen und multitemporale Spektralkombinationen aus Differenzen	<ul style="list-style-type: none"> • hoch komplex für detaillierte Interpretation: unveränderte Objekte grau, Reflexionszu- und -abnahmen in spezifischen Farben • sehr gute Betonung der Zeiten hoher Variabilität • gut geeignet als Eingabekanäle für die Klassifikation zeitlich sehr variabler Objekte (z. B. landwirtschaftliche Nutzflächen), häufig aber Überschneidungen mit thematisch völlig unterschiedlichen Objektklassen
a) aus Originalkanälen	<ul style="list-style-type: none"> • weniger kontrastreiche, aber sehr plastische Bilder
b) aus Vegetationsindizes	<ul style="list-style-type: none"> • sehr kontrastreiche Bilder, über Normierung gute Interpretationsmöglichkeiten
V Hauptkomponenten und Kombinationen aus Hauptkomponenten	<ul style="list-style-type: none"> • kontraststärkste Bilder • Veränderung der Ausrichtung des Merkmalsraumes hebt bestimmte – möglicherweise erwünschte – Information hervor • keine Interpretation über spektrale Reflexionseigenschaften mehr möglich
a) monotemporal	<ul style="list-style-type: none"> • Betonung einzelner Objektklassen in bestimmten Hauptkomponenten
b) multitemporal	<ul style="list-style-type: none"> • Betonung zeitlicher Veränderungen (z. B. v. a. 2. Hauptkomponente für saisonale Veränderungen)
c) selektive Hauptkomponenten (mono-/multitemporal)	<ul style="list-style-type: none"> • Optimierung auf bestimmte Objektklassen durch gezielte Ausnutzung der Varianzen der gewünschten Objekte • Übertragbarkeit problematisch • nicht geeignet für umfassende Klassifizierungen

Zusammenfassend läßt sich sowohl für die Untersuchungen zu den saisonalen als auch zu den interannuellen Veränderungen festhalten, daß die Originalkanäle am häufigsten für Interpretationen verwendet wurden, und die Vegetationsindizes die wichtigste Beurteilungsgrundlage für die hier vorgenommenen Untersuchungen darstellten. Ein Grund dafür ist, daß für die saisonalen Anwendungen nur die drei Kanäle des *SPOT*-Satelliten zur Verfügung standen und damit alle Informationen bereits im visuellen Bild darstellbar waren.

Da die drei Spektralkanäle des *SPOT* – vor allem die beiden sichtbaren – hoch korreliert sind (vgl. Tab. 9), geht durch die Bildung von Vegetationsindizes aus nur zwei Kanälen kaum Information verloren. Über die Normierung ist damit bereits eine gute Bewertung des Datensatzes möglich. Im Laufe der Untersuchungen hat sich herausgestellt, daß Vegetation, Wasser und Brände die Elemente sind, die die größten Veränderungen im Untersuchungsgebiet hervorrufen und diese gut durch Vegetationsindizes erfasst werden. Was hier für *SPOT* angeführt wurde, ist insofern auch auf die anderen verwendeten Systeme (*Landsat-TM*, *-MSS*) übertragbar, als auch für diese aus Gründen der Vergleichbarkeit nur der sichtbare rote und grüne sowie der infrarote Spektralkanal ausgewertet wurden. Die Beurteilung der Verfahren in Tab. 10 und auch 11 im Anschluß würde sicherlich ganz andere Ergebnisse zeigen, wenn auch die bei den *Landsat*-Satelliten zusätzlich vorhandenen Spektralkanäle in die Untersuchungen einbezogen, bzw. wenn deren multitemporale Datensätze stärker ausgewertet worden wären.

In der vorangegangenen Tabelle 10 wurden alle untersuchten Verfahren für die visuelle Beurteilung bzw. relevante Eingabekanäle für die anschließend durchzuführenden Bildklassifizierungen zusammengestellt. Tabelle 11 liefert abschließend eine Zusammenstellung und Bewertung der untersuchten Klassifizierungsverfahren.

Eine weitere wichtige erfolgversprechende Herangehensweise bei der Klassifizierung von multispektralen Satellitenszenen soll hier noch erwähnt werden. Unabhängig davon, nach welchem Verfahren klassifiziert wird, erscheint eine vorherige Bildsegmentierung nach Landschaftseinheiten sinnvoll. Was bei der vorliegenden Untersuchung nur sehr grob – hauptsächlich nach Sedimenttypen – vorgenommen wurde, ermöglicht bei noch strengerer Anwendung spezifischere Klassifizierungsalgorithmen und damit genauere Ergebnisse. Insbesondere der hochvariable, landschaftlich sehr individuelle Bereich nordöstlich des Ngelewa-Strandwalles hat mehrfach zu Klassifizierungsfehlern geführt, weil er nicht separat ausgegliedert worden war.

Tab. 11: Übersicht und Bewertung der untersuchten Klassifizierungsverfahren

Verfahren	Bewertung, Anwendung
I Unüberwachte Klassifizierung (ISODATA)	<ul style="list-style-type: none"> • schneller Aufschluß über die Struktur der Daten • Überblicksgliederung ohne weitere Vorgaben möglich • nur geringe Einflußnahme möglich • gute und schnelle Klassifizierung für eindeutige Objektklassen • nicht anwendbar für Klassen, die sich stark überschneiden • als Grundlage für weitere Klassifizierungen (z. B. in A) verwendbar
II Überwachte Klassifizierung	<ul style="list-style-type: none"> • aufwendiges Verfahren, da Vorabinformationen gewonnen und Trainingsgebiete definiert und ständig optimiert werden müssen • starke Abhängigkeit von den Trainingsgebietsdaten • sehr gute Ergebnisse bei repräsentativen Trainingsgebieten • in kleinräumig strukturierten, sehr heterogenen Regionen wie den semi-ariden Tropen z. T. sehr komplex • insbesondere bei multitemporalen Datensätzen problematisch, für alle Zeiten repräsentative und ausreichend große Flächen zu finden • kaum möglich, nur einzelne Objektklassen zu klassifizieren, d. h. möglichst alle vorhandenen Objektklassen müssen über Trainingsgebiete definiert werden • Vorabbeurteilungskriterien für Klassifizierungen sind überwiegend ungeeignet, deswegen sehr aufwendige Evaluierungsprozesse • generell verbessern sich die Ergebnisse mit größerer Anzahl von Eingabezeitpunkten und -kanälen • zusätzliche Hinzunahme von Vegetationsindizes und Hauptkomponenten ergibt weitere geringfügige Verbesserung der Ergebnisse
a) <i>Minimum Distance</i>	<ul style="list-style-type: none"> • allgemein viel schlechtere Ergebnisse als c) aber geringfügig bessere Werte für Regenzeitbauflächen, Brachen und Vegetation
b) <i>Mahalanobis Distance</i>	<ul style="list-style-type: none"> • schlechteste Ergebnisse unter den überwachten Verfahren
c) <i>Maximum Likelihood</i>	<ul style="list-style-type: none"> • mit Abstand beste Ergebnisse unter den überwachten Verfahren
III Schwellwertklassifizierung	<ul style="list-style-type: none"> • systematische Einteilung der Daten sehr schnell, einfach und nachvollziehbar
a) automatisch	<ul style="list-style-type: none"> • Einteilung in regelmäßige Klassen wird evtl. der Datenstruktur nicht gerecht
b) manuell	<ul style="list-style-type: none"> • Verfeinerung der automatischen Schwellwertklassifizierung durch die Möglichkeit individuelle, unregelmäßige Klassengrenzen festzulegen (Anwendung z. B. für interannuelle Vergleiche in Kap. 6.3) • Einbeziehung visueller Interpretation liefert angepaßteres spezifischeres Ergebnis und ermöglicht Vergleich multisensoraler Daten und z. T. auch von Daten unterschiedlicher Aufnahmezeitpunkte bezüglich Phänologie • Verbindung der Vorteile automatischer und visueller Herangehensweisen (vgl. Kap. 7.2.1)
A Baumartige Klassifizierungen	<ul style="list-style-type: none"> • generelle hierarchische Herangehensweise, bei der die unter I) bis III) beschriebenen Verfahren sowie unterschiedliche Datengrundlagen kombiniert werden können • sehr komplexe angepaßte Klassifikationen möglich (z. B. multitemporale SPOT-Klassifizierung in Kap. 6.2.7 ist eine wissensbasierte baumartige Klassifizierung)
B Wissensbasierte Klassifizierungen	<ul style="list-style-type: none"> • Einbeziehung zusätzlicher Information z. B. in Form von Konditionalbeziehungen oder Maskierungen (z. B. Regenzeitbau nur auf Sanden in Kap. 6.2.7) • Einbeziehung von a priori-Wahrscheinlichkeiten (vor allem bei IIc)) • generell kombinierbar mit allen Klassifizierungen I) bis III) und A).

7.2.3 Genauigkeitsüberlegungen und Fehlerquellen

Ungenauigkeiten und Fehler können bei allen Herangehensweisen und Verfahren auftreten, sich aber zum Teil sehr unterschiedlich auf die Ergebnisse auswirken. Betrachtet man zunächst die Genauigkeit der geographischen Lage der abgebildeten Objekte, so erscheint es sinnvoll, absolute und relative Lagegenauigkeiten zu unterscheiden. Die absolute Lage der in die Untersuchung einbezogenen Daten wurde durch die Entzerrung der Referenzsatellitenszene mittels Vermessung durch das *Global Positioning System* festgelegt (vgl. Kap. 5.2.3 und 5.6.2). Sie ist damit zunächst direkt abhängig von den auf Satelliten beruhenden Messungen des *GPS*-Empfängers.

Schon im Gelände hat sich mit der Überprüfung der Sichtbarkeit der Satelliten herausgestellt, daß insbesondere über die externe Autoantenne der Empfang im Untersuchungsgebiet sehr gut war. Es traten nur sehr selten Empfangsschwierigkeiten auf, da kaum behindernde Objekte wie Geländeerhebungen, größere Gebäude oder dichtere Wälder auftraten. Es konnten für die Messungen immer zwischen 3 und 8, meistens mindestens 5 verschiedene Satelliten empfangen werden. Bei Vergleichsmessungen an verschiedenen Stellen in Deutschland konnte demgegenüber teilweise keine ausreichende Anzahl für dreidimensionale Messungen empfangen werden. In den meisten Fällen betrug die Satellitensichtbarkeit nach Anzeige des Empfängers nur 3, seltener 4.

Da keine Punkte mit bekannten Koordinaten im Untersuchungsraum vorhanden sind (Vermessungspunkte o. ä.), kann keine absolute Fehlerbestimmung für die vorgenommenen *GPS*-Messungen abgeleitet werden. Um wenigstens eine grobe Einschätzung der Messqualität zu erhalten, wurden an einigen Stellen (an 28 Punkten innerhalb des Untersuchungsraumes) bis zu jeweils 6 Vergleichsmessungen zu verschiedenen Zeiten durchgeführt. Aus diesen Werten wurden maximale, minimale und mittlere Schwankungen für geographische Länge und Breite sowie die Höhe berechnet. Tab. 12 zeigt die aus den Vergleichsmessungen hergeleiteten Schwankungen der Positionswerte in Sekunden und in Metern.

Tab. 12: Ergebnisse der bis zu jeweils 6 *GPS*-Vergleichsmessungen an 28 Punkten innerhalb des Untersuchungsgebietes

Werte für [in]	mittlere Schwankung		minimale Schwankung		maximale Schwankung	
	[""]	[m]	[""]	[m]	[""]	[m]
geographische Länge	1,3	38	0,2	6	3,8	114
geographische Breite	1,3	38	0	0	4,3	129
Höhe	/	51	/	15	/	66

Aus der Tabelle geht hervor, daß bei Positionsbestimmungen mit dem *GPS*-Empfänger mittlere Schwankungen an ein und demselben Punkt von 38 m für Länge und Breite und 51 m für die Höhe vorkommen. Es können aber durchaus noch größere Abweichungen bis über 100 m für Länge und Breite auftreten (vgl. Werte für maximale Schwankungen in Tab. 12). Für die Höhenangaben sind die minimalen Schwankungen innerhalb eines Punktes bereits so groß wie die absolute Höhendifferenz im gesamten Untersuchungsraum. Es ist aber zu beachten, daß diese Werte nicht als absolute Fehlerangaben zu verstehen sind.

Allgemein gibt es bei der Verortung durch Satellitennavigation verschiedene Fehlerquellen. Zu nennen sind Länge der Messung, Art des Empfängers sowie die Satellitenkonstellation (HURN 1989: 12). Der mit Abstand größte Fehler ergibt sich durch zeitweilige bewußte Genauigkeitsstörungen durch das amerikanische *Department of Defense*, die sogenannte *Selective Availability (SA)* im *Coarse Acquisiton*-Modus für zivile Nutzer. Dieser Fehler wird von HURN (1989: 46) mit 350 feet (ca. 107 m) angegeben. Die errechneten Schwankungen liegen demnach ungefähr in dieser Größenordnung. Diese bewußten Signalverfälschungen werden seit Frühjahr 2000 nicht mehr durchgeführt. Damit ist eine deutliche Genauigkeitsverbesserung der Messungen zu erwarten.

Durch differentielle Messung mit anschließender Fehlerkorrektur könnte diese größte Fehlerquelle ausgeschlossen werden. Allerdings war es in Nigeria außerhalb Maiduguris wegen unzureichender bzw. fehlender Stromversorgung für den Betrieb einer Basisstation nicht möglich, differentielle Ausgleichsmessungen durchzuführen. Stattdessen wurde versucht – soweit möglich – durch längere bzw. Wiederholungsmessungen und Mittelwertbildung die Genauigkeit der Positionsbestimmung zu erhöhen.

Wie bereits in Kap. 5.6.2 ausgeführt wurde, liegen die Fehler bei der Entzerrung der Referenzsatellitenszene deutlich unter der durch die *GPS*-Messungen verursachten Fehlertoleranz. Ein im selben Kapitel beschriebener Vergleich mit vorhandenen topographischen Karten zeigt überwiegend zufriedenstellende Ergebnisse, da die absolut entzerrte Satellitenszene eine Lage zwischen den Positionen der zum Vergleich herangezogenen topographischen Karten im Maßstab 1 : 50 000 einnahm.

Bereits erwähnt wurde, daß weniger Augenmerk auf die exakte absolute Lage im Raum gelegt wurde als auf die relative Übereinstimmung der in die Untersuchungen eingegangenen Daten. Dabei ist herauszustellen, daß die relative Lage stark abhängig ist von der Art der Ausgangsdaten. Satellitenszenen weisen aufgrund ihrer Aufnahmeparameter nach der relativen Entzerrung die größten Genauigkeiten auf. Beste Ergebnisse erzielten dabei die *SPOT*-Szenen, etwas weniger gute die *Landsat-TM*- und noch etwas ungenauere die *Landsat-MSS*-Daten. Insgesamt waren die Abweichungen aber nie größer als jeweils ein Bildelement, lagen also jeweils unter 20, 30 bzw. 60 m bei den unterschiedlichen Daten.

Bedeutend größere Fehler ergaben sich bei der Bearbeitung der Luftbildmosaike. Wie bereits in Kapitel 5.4.3 beschrieben, waren die Ungenauigkeiten zum allergrößten Teil bereits in den Originalluftbildmosaikien enthalten und nur geringfügig durch Abweichungen beim Interpretieren und Digitalisieren entstanden. Nur über aufwendige Nachbearbeitungen konnten die Luftbildmosaike an die Satellitenszenen angeglichen werden. Insbesondere für linienhafte Elemente und kleinräumig auftretende Strukturen ist deswegen mit Unstimmigkeiten zu rechnen.

Etwas geringer waren die Fehler bei der polynomischen Entzerrung der Luftbilder relativ auf die Referenzsatellitenszene. Aber auch hier mußten Abweichungen insbesondere an den Rändern und in Bereichen, wo nur wenig Paßpunkte gefunden werden konnten, akzeptiert werden (Kap. 5.5.2). Für die an die Entzerrung anschließende Mosaikierung wurden jeweils nur die zentralen Bildbereiche verwendet und somit eine weitere Eingrenzung der Fehler

vorgenommen. Begünstigend wirkte sich zusätzlich die Ebenheit des Tschadbeckens aus, denn Verzerrungen durch Geländeerhebungen konnten so gut wie ausgeschlossen werden. Überlagerungen und sogar Verschneidungen mit Satellitenszenenausschnitten zeigten sehr zufriedenstellende Ergebnisse. Problematischer fallen Vergleiche der Luftbilder unterschiedlicher Aufnahmetermine untereinander aus. Hier sind aufgrund der sehr hohen Auflösung von etwa 2 m größere Unstimmigkeiten beim multitemporalen Vergleich festzustellen. Es wurde versucht, dies bei der Interpretation vor allem kleinräumiger Objekte zu berücksichtigen (vgl. z. B. die Auswertungen von langfristigen Veränderungen der Siedlungen in Kap. 6.4.3.1).

Abgesehen von den räumlichen Lageungenauigkeiten treten Fehler sowohl bei visueller Auswertung als auch besonders stark bei automatischer computergestützter Auswertung dadurch auf, daß für multitemporale Auswertungen Aufnahmen unterschiedlicher Zeitpunkte mit zum Teil sehr unterschiedlichen atmosphärischen Bedingungen herangezogen werden mußten. Auch unter diesem Aspekt schneiden die Satellitenszenen am besten ab. Die gleichzeitige Aufnahme einer bis zu 185x185 km großen Fläche unter gleichen Aufnahmebedingungen immer zur gleichen Tageszeit ermöglicht zumindest vergleichbare Bedingungen während ein und desselben Aufnahmezeitpunktes. Luftbildaufnahmen können je nach Flugplan und -route weder gleiche Aufnahmezeit noch gleiche Beleuchtungsbedingungen garantieren. Auch treten durch unterschiedliche Filmentwicklung und Angleichungen beim Mosaikieren weitere Fehlerursachen hinzu. Dennoch ist es auch bei den Satellitenszenen für einen absoluten Vergleich unabdingbar, radiometrische Korrekturen vorzunehmen, die unterschiedliche Atmosphäreneinflüsse eliminieren. Bereits in Kap. 4.4 und 5.6.1 wurde darauf eingegangen, daß es mangels geeigneter Eichflächen im vorliegenden Fall nicht möglich war, atmosphärische Störungen zu korrigieren. Fehler durch atmosphärische Störungen konnten in der Auswertung insofern minimiert werden, als offensichtlich gestörte Szenen wie z. B. die September-*SPOT*-Szene nicht in die automatischen Klassifizierungen einbezogen wurden und indem durch visuelle Beurteilungen versucht wurde, die jeweiligen atmosphärischen Bedingungen zu berücksichtigen (z. B. manuelle Schwellwertsetzung der Vegetationsindizesbilder auf Grundlage visueller Interpretation, Kap. 6.3).

Ein letzter Aspekt, der hinsichtlich von Genauigkeitsüberlegungen betrachtet werden soll, ist die vierte Dimension, die Zeit. Fehler treten zum Teil durch einen nicht exakten Umgang mit zeitlichen Dimensionen auf. Häufig müssen, um überhaupt Aussagen treffen zu können Zeitverläufe als Zeitpunkte betrachtet werden (z. B. während einer größeren Zeitspanne aufgenommene Luftbilder) oder Zeitpunkte unzulässig miteinander verglichen werden (z. B. für saisonale oder interannuelle Veränderungen). Generell treten diese zeitlichen Aspekte und damit Fehlerquellen deutlich stärker bei multispektralen Satellitenszenen auf. Panchromatische Luftbilder bilden nur sehr untergeordnet saisonale Veränderungen ab und unterliegen damit zwar geringeren Fehlerquellen, erlauben aber auch keine Aussagen zu saisonalen Zuständen. Bei Satellitenbildern ist der saisonale Effekt, der je nach phänologischem Zustand der zu untersuchenden Objekte – insbesondere der Vegetation – zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen kann, der allerwichtigste Aspekt. So gut wie keine multitemporale Untersuchung kann ohne die Betrachtung saisonaler Effekte sinnvolle Ergebnisse liefern. Ebenso wie bei den radiometrischen Fehlerursachen lassen sich auch für die durch temporale Effekte verursachten Fehler keine exakten Quantifizierungen vornehmen. Aus

diesem Grund wurde verstärkt versucht, diese Fehlereinflüsse qualitativ abzuschätzen und bei den entsprechenden Ergebnissen anzugeben und zu diskutieren.

7.3 Beurteilung der Ergebnisse

Die Beurteilung der Ergebnisse soll ausgehend von den in Kap. 1.1 formulierten inhaltlich-thematischen Fragen erfolgen. Mit der Vorlage der Karten zur aktuellen detaillierten Landbedeckung und Landnutzung (Beilagenkarte 1) und den daraus abgeleiteten Interpretationen (Kap. 6.1) steht eine für diesen Raum einzigartige noch nie dagewesene umfangreiche Datengrundlage für verschiedenste Anwendungen zur Verfügung. Ihr ist eine um so größere Bedeutung beizumessen, als für diese besonders variable Region nur sehr lückenhaft Information vorhanden und diese als veraltet zu bezeichnen ist.

Aus den vorgestellten Karten mit den zugehörigen Auswertungen lassen sich die Fragen zur Landschaftsgliederung und zur Nutzung detailliert beantworten sowie räumliche Beziehungen aufdecken. Neben qualitativen konnten vor allem umfangreiche quantitative Analysen Aussagen zur momentanen Landschaftsausstattung und Nutzung beisteuern. So hat sich gezeigt, daß die Kartierung von Sedimentunterschieden auf einer relativ einfachen Ebene eine geeignete Gliederung des Landschaftsraumes liefert, an der sich die verschiedenen Nutzungsarten zum allergrößten Teil festmachen lassen. Auch haben sich mehr oder weniger enge Wechselwirkungen zwischen den anderen den Raum prägenden Elementen ergeben. So steht z. B. die Verbreitung der Gehölzvegetation ebenfalls in engem Zusammenhang mit dem Sediment, aber auch mit nutzungsbedingten Faktoren wie Siedlungen und Anbauflächen.

Auf der anderen Seite konnte gezeigt werden, daß verschiedene Nutzungstypen unterschiedlich starke Rückwirkungen auf den Raum haben. Da diese Prozesse zeitabhängig ablaufen, konnten sie hauptsächlich anhand der historischen Luftbildkartierung zur Landbedeckung und Landnutzung von 1957 (Beilagenkarte 2) bzw. im Vergleich zur aktuellen Karte festgemacht werden (Kap. 6.4). Die ausführlichen Untersuchungen zusammen mit weiteren detaillierten Raum-Zeit-Kartierungen haben verdeutlicht, daß traditionelle Nutzungsweisen hinter den neueren geplanten Großprojekten zurücktreten was die Landschaftsveränderungen betrifft. Ebenso wie die großräumige Anlage der Kanäle und Felder des Bewässerungsprojektes haben der Straßenbau und die Vermehrung der Siedlungsfläche zu schwerwiegendem, weiträumigen Landschaftsverbrauch geführt. Der langfristig deutliche Rückgang an Gehölzvegetation ist ebenfalls hauptsächlich auf die übermäßige Nutzung bzw. Zerstörung im Zuge des Bewässerungsprojektes zurückzuführen. Auf der anderen Seite war aber auch festzustellen, daß abgesehen vom wenig erfolgreichen Bewässerungsprojekt die Anbauflächen sich unter traditioneller Bewirtschaftung nicht ausgedehnt haben. Dies steht dem Trend vergrößerter Siedlungsflächen entgegen, der auch ein Bevölkerungswachstum nahelegt. Ob dabei zusätzliche Einkommensquellen im neu hinzugekommenen tertiären Sektor (Bewässerungsprojekt und *Local Government*) oder aber Bodendegradationserscheinungen, wie es für die Sande angenommen wird, eine Rolle spielen, kann ohne zusätzliche Detailinformationen oder -untersuchungen nicht eindeutig geklärt werden.

Die durchgeführten detaillierten Analysen zur momentanen und historischen Landschaftsausstattung und Nutzung in der *Firgi*-Region des Tschadbeckens bilden die Grundlage für die Ableitung weiterer komplexer Zusammenhänge sowie die Möglichkeit zu Vergleichen mit anderen Regionen und/oder Zeiten. Die zusammenfassenden Graphiken in Abb. 34 und 59 können dazu als Überblick herangezogen werden. Allerdings hat sich gezeigt, daß allein durch die systematische Kartierung von Landbedeckung und Landnutzung in Verbindung mit unstrukturierten Geländeerhebungen nur wenige weiterführende Zusammenhänge aufgedeckt werden können, da so gut wie keine verlässlichen Zusatzdaten für weiterführende Erklärungen verfügbar sind. Aussagen über Entwicklungen und Trends bzw. über Ursachen und mögliche Folgen bleiben deswegen meist in vagen Deutungsansätzen stecken. Teilweise vorhandene Informationen, die z. B. von Ethnologen in der Untersuchungsregion erhoben wurden, beziehen sich fast immer auf einzelne Ortschaften und bleiben in der Aussage auch auf diese beschränkt. Insbesondere flächenbezogene sozioökonomische Parameter sind kaum zugänglich und können deswegen nicht für Interpretationen herangezogen werden.

Ähnliches gilt für Vergleiche mit anderen Untersuchungen. Die wenigen zugänglichen Landnutzungszahlen sind entweder sehr allgemein gehalten oder, wenn speziell, meist ohne exakten räumlichen und zeitlichen Bezug. Häufig stößt man auf Angaben, die sich auf ganze Länder oder große Teile davon beziehen. MORGAN & PUGH gaben bereits 1969 (122f) an, daß der einzige statistische Überblick über Landnutzungsparameter der *Nigerian Sample Census of Agriculture* von 1950 ist und nennen anschließend Zahlen für Nord- und Nordost-Nigeria. Demzufolge ist dort (wo genau?) der Anteil an Farmland größer als der an Brachland. Im Norden findet sich außerdem ein hoher Anteil an Flutfarmland, über 60% der Fläche ist noch unkultivierter Busch und unter 3% der Fläche wird von Straßen und Ansiedlungen eingenommen. Solche Quellen eignen sich nicht für Untersuchungen im Sinne einer Analyse des Landnutzungswandels, da sie mit neueren Daten nicht vergleichbar sind.

Länderbezogene Zahlen für Nigeria liefert die FAO-Studie zum Bewässerungsprojekt im Tschadbecken (FAO 1973: 4). Die Landesfläche ist laut Entwicklungsplan 1970-74 aufgeteilt in 34% Landwirtschaftsfläche (ohne Bewässerungsanbau), 15% permanentes Weideland, 23% *Forest reserve*, 31% sonstige Wälder sowie 10% sonstige Flächen. Spezifischer sind die Angaben in derselben Studie (FAO 1973: 12) zur *Firgi*-Region. Angegeben ist, daß 45% (ca. 113 km²) des Großraums (welches?) kultivierbare Fläche ist, wovon jedes Jahr entsprechend den Überflutungsbedingungen nur ein Teil davon tatsächlich bebaut wird. Nach FEDERAL MINISTRY OF AGRICULTURE, WATER RESOURCES AND RURAL DEVELOPMENT (1987: 25) beträgt die tatsächlich kultivierte Fläche in Borno *State* 17%, wovon nur 1% Bewässerungsanbau ist. Die entsprechenden Zahlen aus der hier vorliegenden Arbeit lassen sich aus Abb. 34 bzw. 59 ablesen. Dort nehmen im Jahr 1990 im größeren Untersuchungsgebiet (Beilagenkarte 1) Regen- und Trockenzeitanbauflächen 30% der Gesamtfläche ein. Weitere 22% sind dem großflächigen Bewässerungsanbau vorbehalten. Der Anteil der Gesamtanbaufläche hat sich 1990 gegenüber 1957 nicht verändert. Zu beiden Untersuchungszeitpunkten ist die prozentuale Anbaufläche ohne den Bewässerungsanbau also um etwa ein Drittel geringer als in der FAO-Studie angegeben. Allerdings machen solche Vergleiche ohne zuverlässigen Flächenbezug und Zeitpunkt wenig Sinn.

Einige Studien liefern Zahlen zu den Trockenzeitanbauflächen in Borno *State*. GROVE (1985: 172) spricht von einer Fläche von 15 bis 35%, die im Trockenzeitanbau kultiviert wird. Eine aktuellere Studie haben KOLAWOLE et al. 1994 vorgelegt. Die darin vereinzelt enthaltenen quantitativen Angaben benennen z. B. die gesamte Trockenzeitanbaufläche in Borno mit 412 km², was 10% der Vertisole entspricht. Auch dies erfolgt jedoch ohne genauere räumliche und zeitliche Differenzierung. Vergleicht man diese Zahlen mit den aus den Luftbildern kartierten, mit Dämmen umgebenen Anbauflächen, kommt man schon allein für das im Rahmen dieser Untersuchungen kartierte Gebiet auf eine größere Fläche (422 km² bzw. 20% der tonigen Fläche in 1990 und gar 33% der Tonfläche in 1957, vgl. Kap. 6.1.4.2 und 6.4.4.2). Hinzu kämen noch die Flächen in Tiefenlinien, in denen Trockenzeitanbau ohne Dämme betrieben wird. Da auch bei KOLAWOLE et al. 1994 keine Angaben zur Herkunft der Zahlen gemacht wurden, ist ein Vergleich wieder nur schwer – wenn überhaupt – möglich.

In einer weiteren Studie zum Bewässerungsprojekt wird von einer Fläche von 267 km² gesprochen, die innerhalb der Bewässerungsfläche im Trockenzeitanbau kultiviert wird (FEDERAL MINISTRY OF AGRICULTURE & NATURAL RESOURCES 1974: 3.10). Eigene Analysen ergaben demgegenüber 92 km², was lediglich 21% der gesamten Trockenzeitanbaufelder betrifft (vgl. Kap. 6.1.4.2). Dies könnte eine Entwicklung andeuten, die sich erst nach dem Bau der Bewässerungskanäle vollzogen hat (vgl. Zeitpunkt der Untersuchung!).

Zahlen für die gesamte Sahel-Sudan-Zone liefert KAPP (1987). Danach hat die Agrarfläche einen Gesamtanteil von 13% und teilt sich auf in 23% Hirse, 12% Sorghum, 5% Mais, 4% Reis und 2% Bohnen. Es ist nicht möglich, anhand dieser Überblickszahlen einen Bezug zu den eigenen Untersuchungen aufzubauen.

Diese wenigen verfügbaren Beispiele verdeutlichen die Schwierigkeit, gewonnene Detailkenntnisse für die *Firgi*-Region des nigerianischen Tschadbeckens mit anderen Daten, Informationen oder Untersuchungen in Bezug zu setzen. Es kann daraus aber auch abgeleitet werden, daß eine Darstellung der Ergebnisse allein in Form von Zahlen nur selten den an solche Vergleiche gestellten Anforderungen gerecht wird. Idealerweise werden deswegen neben den Zahlen auch graphische Darstellungsweisen, ein Vorschlag ist mit Abb. 34 und 59 im Rahmen dieser Arbeit gegeben, bzw. noch besser Karten als Untersuchungsergebnisse vorgehalten. Bevor dieser Gedanke am Ende dieses Kapitels nochmals aufgegriffen wird, sollen noch die weiteren Ergebnisse der hier vorliegenden Studie beurteilt werden.

Die Untersuchungen zu saisonalen Veränderungen (Kap. 6.2) waren etwas stärker als die oben besprochenen methodisch ausgerichtet. Ihr Ziel war, zum einen Verständnis über die in den Satellitendaten enthaltene Information hinsichtlich Landbedeckung und Landnutzung zu erlangen und zum anderen aus multitemporalen Aufnahmen einer Vegetationsperiode eine genauere Kartierung eines Zeitpunktes abzuleiten. Die wichtigsten Erkenntnisse betrafen dabei die extrem hohe saisonale Dynamik der meisten der untersuchten Landbedeckungs- und Landnutzungseinheiten. Mit Abstand hoben sich allerdings alle Objekte, die in irgendeiner Form von Vegetation und Wasser beeinflusst sind, hervor. Sie sind den größten jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen. Festzustellen war weiterhin, daß die Veränderungen nach dem Ende der Regenzeit also im Oktober und November maximal sind und ab Ende Januar so gut wie keine saisonal bedingten Veränderungen mehr zu beobachten sind. Die Veränderungen im einzelnen und ihre Auswirkungen auf das Spektralverhalten

in Satellitenszenen unterschiedlicher Aufnahmezeitpunkte sind ausführlich beschrieben worden (Kap. 6.2).

Eine Bezugnahme zu anderen Untersuchungen dieser Art ist schwierig, da es nur sehr vereinzelt Untersuchungen mit einer so hohen zeitlichen Dichte gibt und außerdem die Ergebnisse sehr speziell für die jeweilige Untersuchungsregion mit ihren spezifischen Vegetationsausprägungen und den zugehörigen phänologischen Zuständen bleiben. Multi-temporale Untersuchungen dieser Art strebten bisher auch meist eine differenziertere Darstellung von Vegetationseinheiten an und waren weniger auf Landnutzungsaspekte ausgerichtet (vgl. z. B. SCHMID 1997 mit Verweisen zu anderen Untersuchungen).

Die Resultate bezüglich der saisonalen Dynamik waren unerlässlich, um interannuelle Schwankungen (Kap. 6.3) und langfristige Veränderungen (Kap. 6.4) herauszuarbeiten und von den jährlich wiederkehrenden saisonalen Veränderungen zu trennen. Die aus den Erkenntnissen zu interannuellen Schwankungen und den dabei untersuchten Daten abgeleitete Zeitreihe (Kap. 6.3.6) liefert einen bedeutenden Beitrag zum langfristigen Monitoring im Tschadbecken. Nur selten war es bisher möglich, in einer Untersuchungsregion mit Hilfe von Fernerkundungsdaten einen ähnlich großen Zeitraum in so hoher zeitlicher Auflösung abzudecken wie in vorliegender Untersuchung. Auch konnte durch die Verknüpfung unterschiedlicher Datenquellen (Luftbilder und Satellitenszenen) neben der zeitlichen Dichte ebenso eine außergewöhnliche thematische Detailgenauigkeit erzielt werden.

Bei der Bearbeitung der Fernerkundungsdaten verschiedener Aufnahmezeitpunkte hat sich die enorme Bedeutung zusätzlicher externer Daten, die für eine zuverlässige Interpretation hinzugezogen werden müssen, herausgestellt. Nur unter Zuhilfenahme von Klimadaten, insbesondere jährlichen Niederschlagswerten und – so weit vorhanden – Daten zur Länge der Regenzeit, konnten saisonale Einflüsse in den Daten von interannuellen klimabeeinflussten oder anthropogen bedingten Unterschieden aufgedeckt werden. Vor dem Hintergrund solcher Überlegungen erschien es erst möglich, trotz unterschiedlichster Aufnahmetermine und Systeme, alle verfügbaren Satellitenszenen in einer Zeitreihe zusammenzubringen und Aussagen über langfristige Vegetationsveränderungen daraus abzuleiten. An dieser Stelle können auch am ehesten Bezüge zu anderen Untersuchungsregionen ähnlicher Klimaausprägung ansetzen.

Häufig wird beklagt, daß Langzeit-Untersuchungen und kontinuierliche Datenauswertungen wenig Priorität haben, was besonders auch für die Sahelregion bemängelt wird (PRINCE et al. 1990:12f). Während globale oder sehr großräumige Untersuchungen fast flächendeckend – insbesondere auch für den Sahel und das Tschadbecken – mit entsprechenden Satellitensystemen durchgeführt wurden, fehlt es doch an Auswertungen, die ins Detail gehen und kleinräumige Veränderungen mit ihren entsprechenden Ursachen aufdecken, um dadurch die großräumig aufgestellten Hypothesen zu bestätigen (PRINCE et al. 1990: 23 oder LAMBIN & EHRLICH 1997). Ein Teil dieser Lücke kann durch die regionale Detailstudie der *Firgi*-Ebene und durch das langfristige Monitoring von Vegetationsveränderungen mit der hier vorgelegten Arbeit gefüllt werden. Was allerdings den Bezug zu überregionalen Gegebenheiten und Prozessen betrifft, muß mangels durchgeführter großräumiger Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit immer noch auf zukünftige Untersuchungen verwiesen werden (vgl. Kap. 8).

Die Grundlagen für einen solchen Bezug sind bereits mit dem Aufbau des Geoinformationssystems FirGIS gelegt. Neben der Bereitstellung aller bisher gesammelten Daten und erzielten Ergebnisse können dort auch alle weiteren Erhebungen eingeordnet werden. Erwähnung finden sollte deswegen an dieser Stelle nochmals die große Bedeutung digitaler geographischer Informationsverwaltung und -verarbeitung für diese Arbeit. Noch immer wird häufig kritisiert, daß digitale Karten gegenüber analogen keinen Erkenntnisgewinn darstellen. Das ist richtig, wenn der Digitalisierung von Grundlagendaten, die momentan noch einen großen Zeitanteil bei der Arbeit mit geographischen Informationssystemen einnimmt, keine weitere Analyse folgt. Dennoch sind digitale Karten analogen schon allein dadurch überlegen, daß sie äußerst flexibel sind bezüglich Maßstab und Ausschnitt, daß Teilaspekte bei der Darstellung eliminiert, andere hervorgehoben werden können, daß auch eine maßstabsabhängige Darstellung von bestimmten Objekten erfolgen kann und, ganz wichtig, daß verschiedene Datenquellen direkt miteinander verglichen werden können. Schließlich können dann alle verfügbaren GIS-Funktionalitäten auf diese digital vorliegenden Daten angewendet werden, um weiterführende Erkenntnisse zu erlangen.

Auch im Rahmen dieser Arbeit war ein großer Aufwand und der Einsatz zahlreicher Hilfskräfte nötig, um Grundlagenkarten für das nigerianische Tschadbecken digital aufzubereiten und den Aufbau eines regionalen GIS in Gang zu setzen. Aber gerade in solchen Regionen, in denen die Datenlage sehr schlecht und unüberschaubar ist, stellen regionale geographische Informationssysteme eine wertvolle, zum Teil unabdingbare Grundlage für alle weiteren Auswertungen dar. Auch kann durch den Aufbau systematischer offener geographischer Informationssysteme, wie hier angestrebt, die Kontinuität der Auswertungen eher und leichter gesichert werden. Dabei wurde nur ein äußerst geringer Teil aller potentiellen GIS-Funktionalitäten ausgeschöpft, eben weil gerade zu Beginn ein hoher Aufwand für den erstmaligen Aufbau eines Informationspools und für die Entwicklung einer geeigneten Struktur nötig ist. Der Schwerpunkt lag dabei insbesondere auf der kartographischen Darstellung und bei statistischen Abfrage- und Analyseinstrumenten, beides eigentlich nur randliche Funktionalitäten in geographischen Informationssystemen. Dennoch hätte vorliegende Arbeit in diesem Umfang ohne die Nutzung geographischer digitaler Informationsverarbeitung nicht durchgeführt werden können.

8 Ausblick

Die vorliegende Arbeit hat sich stark auf einen kleinen Landschaftsausschnitt innerhalb des nigerianischen Tschadbeckens konzentriert. Es hat sich gezeigt, daß die *Firgi*-Ebene ein hochvariabler Landschaftsraum ist und daß an ihm auch gewisse überregionale Entwicklungen abgeleitet werden können. Eine wichtige Erkenntnis ist aber auch, daß es, ausgehend von der detaillierten Kenntnis eines kleinen Ausschnittes, nötig ist, großräumiger überregional zu arbeiten, um verbindliche und umfassende Aussagen über Veränderungen oder gar zukünftige Entwicklungen ableiten zu können. Dies ist um so wichtiger, als es sich beim hier untersuchten Gebiet um einen relativ abgelegenen ländlichen Raum im Grenzgebiet Nigerias handelt. Klargestellt ist, daß der länderübergreifende Tschadsee starken Einfluß auf die Dynamik im Untersuchungsgebiet hat und daß sich in bestimmten Entwicklungen nicht unerheblicher geopolitischer Zündstoff anreichert. Eine vollständige Betrachtung muß also länderübergreifend sein und auf das gesamte Tschadseegebiet bzw. gar das gesamte Becken ausgedehnt werden.

Die große Chance, die durch die vorliegende Arbeit gegeben ist, liegt darin, daß ein Informationssystem geschaffen wurde, in dem alle bisher verfügbaren geographischen und statistischen Daten integriert sind. Es besteht nun die Möglichkeit, diesen Informationspool sowohl räumlich als auch zeitlich kontinuierlich zu erweitern. Denn aus den oben beschriebenen Gründen wird für diesen hochvariablen Natur- und Kulturraum auch zukünftig ein enormer Informationsbedarf bestehen. Dabei können weitere, sowohl historische Informationen (z. B. neuerdings frei zugängliche Satellitendaten der ersten Generation wie CORONA, ARGON u. a.) einbezogen als auch durch neuere Sensoren räumlich und spektral detailliertere Abbildungen (z. B. durch IKONOS, SPOT-4 und Landsat-7) hinzugefügt werden. Dazu ist es allerdings wichtig, weiter an der Standardisierung von Verfahren zur Aufdeckung von Veränderungen aus verschiedenen Datenquellen zu arbeiten. Ein weiterer wichtiger zukünftiger Aspekt wird außerdem die Verfügbarmachung der erzielten Ergebnisse und Informationsgrundlagen – vor allem vor Ort – sein.

9 Zusammenfassung

Die Kartierung und Analyse von Landbedeckungs- und Landnutzungsveränderungen in einem Ausschnitt des nigerianischen Tschadbeckens war Zielsetzung vorliegender Arbeit. Trotz eines recht großen allgemeinen Interesses am Tschadsee, dem größten See Westafrikas, fällt es schwer, topographische und thematische Information über diese Region zu erlangen. Viele Zusammenhänge bezüglich seiner Vergangenheit und seiner zukünftigen Entwicklung sind bis heute nicht geklärt. Ein Grund dafür ist in der vergleichsweise schlechten Datenlage zu suchen. Insbesondere Landnutzungsinformation, aber auch jegliche andere Daten befinden sich nur in Ausnahmefällen auf aktuellem Stand.

Soweit Daten oder Karten zur Landbedeckung und Landnutzung bereits verfügbar waren, wurden sie aufbereitet und im Rahmen des regionalen geographischen Informationssystems FirGIS strukturiert gegliedert aufgenommen. Als hauptsächliche Datenquelle wurde jedoch auf Fernerkundungsdaten der Region zurückgegriffen. Sie liefern meist die einzige großflächig vorhandene, aktuelle und vor allem multitemporale Information über das Untersuchungsgebiet.

Die Auswertung der sehr unterschiedlichen Fernerkundungsdaten erfolgte mit Methoden der digitalen Bildverarbeitung zum Teil visuell, zu einem größeren Teil automatisch. Die Vorgehensweise im einzelnen war vor allem von der Datengrundlage abhängig. Aktuelle und historische Luftbilder wurden visuell interpretiert und anschließend vektoriiell digitalisiert. In den meisten Fällen war jedoch eine digitale Vorverarbeitung nötig, wie Entzerrung, Kontrastverbesserung und Mosaikierung. Satellitenszenen wurden vorwiegend digital direkt im Rasterdatenmodell bearbeitet. Nach der Datenaufbereitung mit verschiedenen Techniken der Bildverarbeitung erfolgte die Auswertung mittels digitaler Klassifizierung. Weitere wichtige Bearbeitungsschritte bei der Ergebnisfindung waren unterschiedliche multitemporale Darstellungsweisen, die Berechnung von Vegetationsindizes sowie Verschneidungstechniken zur Aufdeckung von Veränderungen.

Als ein wichtiges methodisches Ergebnis hat sich herausgestellt, daß insbesondere bei der Verwendung multitemporaler Daten automatische Verfahren allein meist keine umfassend befriedigenden Lösungen liefern. Stattdessen konnte mit semi-automatischen Auswertungen, die auch spezifische visuelle Bewertungen beinhalteten, die Qualität der Ergebnisse deutlich gesteigert werden. Diese Vorgehensweise begünstigt außerdem die integrative Auswertung von Daten unterschiedlicher Fernerkundungsplattformen, wie Luft- und Satellitenbilder, als auch den Vergleich nicht atmosphärenkorrigierter Satellitenszenen unterschiedlicher Aufnahmezeitpunkte.

Die Auswertung aller Daten erfolgte nach einem einheitlichen mehrstufigen Klassifizierungssystem, das für die Verhältnisse im Tschadbecken entwickelt wurde. Die aus den Fernerkundungsdaten abgeleiteten Ergebnisse gliedern sich nach vier verschiedenen Dimensionen der Zeit.

Die Ausgangsbasis bildet eine digitale aktuelle Kartierung der Landbedeckung und Landnutzung eines mehr als 3500 km² großen Ausschnittes des nigerianischen Tschadbeckens.

Die Karte geht auf einen originalen Maßstab von 1 : 25 000 entsprechend der als Datengrundlage verwendeten Luftbilder zurück und ist in Verkleinerung dieser Arbeit beigelegt. Wichtigstes Kriterium für die Landbedeckung ist die Verbreitung der Sedimente. Etwa 40% des Untersuchungsgebietes ist mit sandigen, der restliche größere Anteil mit tonigen Sedimenten bedeckt. Wenige kleine Wasserflächen sind unter 1% vertreten. Bebaute Flächen – vorwiegend Siedlungen – nehmen 1% des Untersuchungsgebietes ein. Sie befinden sich zum überwiegenden Teil auf sandigem Substrat. Landwirtschaftliche Nutzflächen, die 53% der Gesamtfläche einnehmen, findet man sowohl auf den Sand- wie auch auf den Tonflächen. Auf letzteren wird sowohl traditioneller Trockenzeitanbau (12%) als auch großflächiger Bewässerungsanbau betrieben (22%). Der Sandbereich wird für den traditionellen Anbau zur Regenzeit genutzt (18%). Jedoch wird nur ungefähr ein Drittel dieser Flächen auch aktuell genutzt, wohingegen der größere Anteil brach liegt. Weitere Anbauformen wie Reis-, Flutfolge- und Flußbewässerungsanbau kommen noch zu 1% auf beiden Substraten hinzu. Nur etwas mehr als ein Viertel der Gesamtfläche (27%) ist mit überwiegend vereinzelt stehenden Gehölzen bestanden. Sandflächen weisen allerdings eine deutlich stärkere Baumbedeckung auf (41%) als die Tonflächen (14%). Neben den flächenhaften Elementen wurden Straßen, Wege, Flüsse, Gewässerrinnen und Kanäle detailliert erfaßt.

Aufbauend auf der aktuellen Landnutzungskartierung wurde für einen etwa 1100 km² großen zentralen Teilausschnitt aus dem Gesamtuntersuchungsgebiet das dynamische Verhalten der Landbedeckungs- und Landnutzungseinheiten im Jahresverlauf untersucht. Dazu konnten fünf *SPOT-XS*-Satellitenszenen der Vegetationsperiode 1995/96 herangezogen werden. Als wichtigste saisonal variabel wirkende Einflußfaktoren haben sich, wie zu erwarten war, die Faktoren Wasser und Vegetation herausgestellt, die ihrerseits fast alle anderen Objektklassen indirekt und unterschiedlich stark beeinflussen. Zusätzlich wandeln die zu unterschiedlichen Zeiten auftretenden Brände das Spektralverhalten in den Satellitenbildern stark. Als Zusammenfassung aus den phänologischen Analysen aller im Untersuchungsgebiet auftretenden Objekte und ihrem entsprechenden unterschiedlichen Spektralverhalten zu verschiedenen Zeitpunkten wurde eine detaillierte Landbedeckungs- und Landnutzungskartierung der Saison 1995/96 angefertigt. Sie ging aus einer komplexen hierarchischen Satellitenbildklassifizierung mit differenzierten Zuweisungsregeln hervor. Im Vergleich zu der aus Luftbildern erstellten Karte liegt die Stärke der Satellitenbildklassifizierung bei den flächenhaften Elementen wie Sediment, Landwirtschaft und Vegetation. Diese Klassen bieten aufgrund der in den Satellitenszenen enthaltenen multispektralen Information eine höhere Differenzierung und ermöglichen eine bessere automatische Erfassung. Beim Vergleich der Ergebnisse aus beiden Untersuchungen stellte sich jedoch nur eine eingeschränkte Vergleichbarkeit aufgrund unterschiedlicher Datenquellen, dem daraus resultierenden abweichenden Datenmodell und der Vorgehensweisen heraus.

Mit den Erfahrungen aus der Untersuchung zur saisonalen Dynamik wurden in einem weiteren Schritt alle für das Teiluntersuchungsgebiet zur Verfügung stehenden Satellitenszenen ausgewertet, um Erkenntnisse über interannuelle Unterschiede der zu verschiedenen Zeitpunkten aufgenommenen Satellitenszenen zu gewinnen und deren Ursachen aufzudecken. Hierbei konzentrierten sich die Auswertungen auf die Veränderungen der Vegetation. Als ideale Grundlage wurden multitemporale Vegetationsindizes verglichen, Veränderungskarten abgeleitet und Niederschlagsdaten zur Interpretation hinzugezogen. In den seltensten Fällen ließen sich interannuelle Unterschiede isoliert betrachten. Fast immer bilden die multi-

temporalen Satellitenszenen saisonale, interannuelle und langfristige Veränderungen eng miteinander verzahnt ab. Dennoch wurde versucht, eine zusammenfassende Interpretation einer 24jährigen Zeitreihe der klassifizierten Vegetationsindizes abzuleiten. Dabei läßt sich eine Gliederung in drei Zeitabschnitte ablesen: In den 1970er Jahren ist eine schwache allgemeine Vegetationsabnahme zu verzeichnen, wobei sich keine Unterschiede zwischen der niederschlagsärmeren Periode zu Beginn des Jahrzehnts und den durchschnittlich bis überdurchschnittlichen Regenmengen am Ende dieser Periode abzeichnen. Dies könnten Anzeichen für anthropogene Ursachen der Vegetationsreduzierung sein. Einen deutlichen Einschnitt stellen die Aufnahmen der 1980er Jahre dar. Sie repräsentieren mit extrem geringer Vegetationsbedeckung diese insgesamt sehr niederschlagsarme Dekade. Die Satellitenszenen der 1990er Jahre vermitteln den Eindruck wieder steigender Feuchtigkeitsverhältnisse, die aber erst zu Ende der Dekade (ohne Satellitenbildabdeckung) durch höhere Niederschlagswerte tatsächlich belegt werden können.

Die Auswertung historischer Luftbilder von 1957 und der Vergleich mit den Luftbildern von 1990 ermöglichte schließlich die Beurteilung langfristiger Entwicklungen im engeren Untersuchungsgebiet. Die Ergebnisse sind in Form einer historischen Karte, als Veränderungskarten und quantitativ festgehalten. Was die Landbedeckung betrifft, ist ein Rückgang der offenen Wasserfläche auf ein Fünftel der Fläche von 1957 zu verzeichnen. Drastisch ist auch der Rückgang der Vegetation innerhalb von 33 Jahren (um insgesamt 37%). Dabei dezimierten sich vor allem die dichten (um 76%) und mitteldichten Gehölzbestände (um 42%). Die genutzte Fläche hat sich deutlich ausgedehnt. Waren 1957 noch 70% des Teiluntersuchungsgebietes ohne Nutzung, sind es 1990 nur noch 31%. Die Siedlungsfläche hat sich dabei genau verdoppelt, bzw. unter Berücksichtigung der modernen Anlagen des Bewässerungsprojektes sogar verfünffacht. Im Gegensatz dazu erfolgte keine nennenswerte Ausdehnung der traditionell landwirtschaftlich genutzten Fläche. Die aktuell genutzte Regenzeitbaufläche nimmt zu beiden Zeitpunkten 6% der Gesamtfläche ein. Lediglich die Brachflächen haben sich verdreifacht. Die Trockenzeitbauflächen haben sich ihrerseits um ein Drittel reduziert. Stattdessen ist der nur wenige Jahre erfolgreich betriebene großflächige Bewässerungsanbau flächenwirksam hinzugekommen.

Ein wichtiges Ergebnis der vorliegenden Arbeit besteht in der Strukturierung aller verwendeten Grundlagendaten zum Thema Landbedeckung und Landnutzung im Tschadbecken einschließlich seiner Nachbargebiete innerhalb des regionalen geographischen Informationssystemes FirGIS. In ihm sind neben den Ausgangsdaten alle Ergebnisse und die zum Thema gehörigen Zusatzinformationen enthalten. Es ermöglicht damit eine zukünftige Fortschreibung durch thematische, räumliche oder zeitliche Ausdehnung. Das Geoinformationssystem FirGIS bietet außerdem die Möglichkeit, bereits vorhandene wie auch zukünftige Information anderen Interessenten vor allem auch vor Ort zur Verfügung zu stellen.

Summary

Landcover and landuse changes in the Nigerian Chad Basin

Qualitative and quantitative geographic analyses by evaluation of multi-temporal and multi-sensoral remote sensing data in the context of a regional geographic information system

The mapping and analysis of landcover and landuse changes in a part of the Nigerian Chad Basin was the target of this thesis. In spite of a considerable general interest in Lake Chad, the biggest lake of West Africa, it is difficult to obtain topographical and thematic information about this region. Until today, many interrelations regarding the past and the future of the lake remain unclear. One reason for this is the comparatively poor data situation. Most of the maps and data, particularly landuse information, are not up-to-date.

As far as data or maps of landcover and landuse were already available, they were structured and integrated into the regional geographic information system FirGIS. However, remote sensing data was used as main source for the evaluations. Image data gathered from airplanes or satellites provide the only extensively available multi-temporal up-to-date information of the research area.

The analysis of the different remote sensing data was carried out by methods of digital image interpretation, on the one hand by visual interpretation and on the other hand – to a larger portion – by automatic digital procedures. The procedures in detail depended on the question and particularly on the data base structure. Current and historical aerial photographs were visually interpreted and then digitised using the vector data model. In most cases digital pre-processing, such as geographic rectification, contrast enhancement and mosaicing, were applied. Satellite scenes, however, were predominantly processed directly in digital form using the raster data model. In addition to the data preparation by digital image interpretation techniques the evaluations were carried out by means of digital classification. Further important steps of investigation that have been applied include different visualisation techniques of multi-temporal data, the computing of vegetation indices as well as different geoprocessing techniques for change detection.

One main conclusion in respect to methodology particularly when using multi-temporal data is that automatic procedures by themselves do not provide satisfying results. Instead, semi-automatic evaluations, which include additional visual interpretations, considerably improved the quality of the results. In addition, such an approach favours the common evaluation of data of different remote sensing platforms, such as aerial photographs and satellite scenes, as well as the comparison of atmospherically non-corrected satellite scenes of different recording dates.

The classification of all data was carried out using a common multi-level classification scheme, which was specifically adapted to the conditions in the Chad Basin. The results derived from the remote sensing data were for presentation purposes subdivided according to four dimensions of time.

Starting with a current detailed digital map of landcover and landuse, a 3500 km² subset of the Nigerian Chad Basin is presented. The map originates in aerial photographs of a scale of 1 : 25 000 and is enclosed in this thesis as a hardcopy. The main criterion regarding landcover is the distribution of the sediments: About 40% of the investigation area is covered by sandy sediments, the remaining larger part by clayey sediments. Few small expanses of water cover less than 1%. Built-up areas – predominantly settlements – also take up about 1% of the research area. They are mainly located on the sandy substratum. Agriculturally productive land occupies 53% of the total area and can be found both on the sandy and on the clayey areas. On the latter, both, traditional dry season cultivation (12%) as well as large area irrigation cultivation (22%) are practised. The sandy sediments are used for the traditional rainy season cultivation (18%). However, only one third of the rainy season land is currently under use, whereas the larger part is left as fallow. Further agricultural activity, such as rice cultivation, river irrigation and the cultivation following the seasonally receding Lake Chad (1% all together) is practised on both of the two substrata. Only little more than a quarter of the investigation area (27%) is covered by a mainly sparse tree cover. Though the sand areas show a clearly denser tree cover (41%) than the clay areas (14%). Besides the two-dimensional elements also linear elements such as roads, paths, rivers, non-perennial rivers and channels were mapped in detail.

Based on the current landuse map the dynamic seasonal behaviour of the various landcover and landuse units in an approximately 1100 km² central subset of the research area was examined. For this purpose five SPOT-XS satellite scenes of the vegetation period 1995/96 were consulted. As was expected, the most essential seasonally variable influences were the factors water and vegetation. In addition bush fires which are set at different times of the year, strongly influence the spectral response. As a summary for the phenological analyses of all different objects and their corresponding spectral behaviour at different times of the year, a detailed landcover and landuse classification of the season 1995/96 was developed. The presented results were obtained from a complex hierarchical satellite image classification with differentiated assignment rules. Compared to the map made from aerial photographs, the strength of the satellite image classification lies in the mapping of two-dimensional elements like sediments, farming areas and vegetation. For these object classes a higher differentiation due to the multi-spectral information contained in the different satellite scenes is possible and therefore better results in automatic processes are delivered. The comparison of the results obtained from the two examinations, however, revealed only restricted comparability due to the different data sources and the resulting divergent approach and data model used.

With the experiences from the examination of the seasonal dynamics, in a further step, all satellite scenes available for the research area were evaluated in order to obtain knowledge about the inter-annual differences represented in the satellite scenes recorded at different times as well as about their causes. These evaluations concentrated on vegetation changes. As an ideal basis multi-temporal vegetation indices were employed for comparison and for derivation of change detection maps and precipitation data were consulted for the interpretation. Only in rare cases inter-annual differences could be looked at isolatedly. More often, inter-annual and seasonal alterations as well as long-term oscillations are combined in the satellite scenes. Nevertheless, a summarizing interpretation in form of a time series over 24 years derived from classified vegetation indices is presented. This time series can be

subdivided in three periods: During the 1970s a weak general decrease in vegetation cover has to be recorded; there are no obvious differences between the low-rainfall period at the beginning of the decade and the period at the end of the decade with rainfall at or above average. These could be symptoms for anthropogenous causes for the vegetation reduction. A clear break is represented by the satellite scenes of the 1980s. They show extremely low vegetation cover at this very low-rainfall decade. The satellite scenes of the 1990s give the impression of recently more humid conditions, which however can only be verified for the end of the decade (without satellite cover), when precipitation conditions were increasing again.

Finally, the evaluations of historical aerial photographs of 1957 enabled the analysis of long-term developments in the investigation area. The results are presented in form of a historical map (enclosed as hardcopy in this thesis), as different change maps and quantitatively in form of diagrams. As far as land cover is concerned, expanses of open water decreased to a fifth of the area of 1957 in the current maps. A drastic fall was also observed for the vegetation cover (decrease of 37% within 33 years). In this case, primarily the vegetation cover with a high (by approximately 76%) and a medium density (by approximately 42%) was decimated. The area used by man has extended clearly. In 1957 an area of 70% of the investigation area was without anthropogenous use, whereas in 1990 it decreased to 31%. The settlement area has doubled in this period; taking into account the modern plants of the irrigation project, the area is even five times greater than in 1957. Unlike for the settlements, the area used for agriculture was not extended considerably, except for the large irrigation project. The currently used area for the traditional rainy season cultivation takes 6% of the total area at both times. Only the extent of the fallow land has been tripled. The dry season acreage has been reduced by a third. Instead, the extensive irrigation cultivation, which operated successfully only during few years, has effectively gained area.

An important result of this thesis is the integration of all used data and information on landcover and landuse in the Chad Basin including its neighbouring areas within the regional geographic information system FirGIS. The information system contains all base data as well as all results and additional information relating to the topics mentioned above. Therefore, a future continuation by thematic, spatial or temporal extension is easily possible. In addition, the geographic information system FirGIS offers the possibility to make already obtained data as well as information gathered in future available for all interested parties especially in the research area itself.

10 Quellenverzeichnis

10.1 Schriftenverzeichnis

- ADENIYI, P. O. (1986a): A Brief Note on Remote Sensing Activities in Nigeria.- Geocarto International, 1: 55-57; Hong Kong.
- ADENIYI, P. O. (1986b): Agricultural Land Use Inventory and Mapping in Nigeria: the Application of Remote Sensing.- In: EDEN, M. J. & PARRY, J. T.: Remote Sensing and Tropical Land Management: 175-187; New York, London (Wiley).
- ADENIYI, P. O. (1987): Using Remotely Sensed Data for Census Surveys and Population Estimation in Developing Countries: Examples from Nigeria.- Geocarto International, 4: 11-31; Hong Kong.
- ADENIYI, P. O. (1989): Remote sensing activities in Nigeria.- In: ALBERTZ, J. & TAUCH, R. [Eds.]: Remote sensing for development. Experience with and Requirements for User Assistance and Training, Proc. Int. Conf. Sept. 1986: 177-183; Berlin.
- ADENIYI, P. O., ADALEMO, I. A., OMOJOLA, A. & AJAYI, J. A. (1988): Using Remote Sensing to evaluate the impact of dam construction in northwestern Nigeria.- Proc. 22th Int. Symp. Remote Sensing of Environment I: 281-299; Abidjan.
- ADINARAYANA, J. & RAMA KRISHNA, N. (1996): Integration of multi-seasonal remotely-sensed images for improved landuse classification of a hilly watershed using geographical information systems.- Int. J. Remote Sensing, 17(9): 1679-1688; London, New York.
- AKINTOLA, J. O. (1986): Rainfall distribution in Nigeria 1892-1983.- Ibadan (Impact).
- ALBERTZ, J. (1989): Land Using Mapping and Monitoring by Remote Sensing.- In: ALBERTZ, J. & TAUCH, R. [Eds.]: Remote Sensing for Development.- Proc. Int. Conf. Sept. 1986, Part I: 57-68; Berlin.
- ANDERSON, J. R., HARDY, E. T., ROACH, J. T. & WITMER, R. E. (1976): A Land Use and Land Cover Classification System for Use with Remote Sensor Data.- U.S. Geological Survey Professional Paper, 964; [zitiert in SABINS, F. F. (1987)].
- APT, J., HELFERT, M. & WILKINSON, J. (1997): Orbit: die Erde in spektakulären Fotografien der NASA-Astronauten.- Augsburg (Steiger) [National Geographic Society].
- AUBREVILLE, A. (1950): Flore Forestière Soudano-Guinéenne.- Soc. Editions. géogr. maritimes coloniales; Paris.
- BÄHR, H.-P. & VÖGTLE, T. [Hrsg.] (1991): Digitale Bildverarbeitung: Anwendungen in Photogrammetrie und Fernerkundung.- Karlsruhe (Wichmann).
- BAHRENBERG, G., GIESE, E. & NIPPER, J. (1992): Statistische Methoden in der Geographie, 2, Multivariate Statistik.- Stuttgart (Teubner).
- BARRATA, M. [Hrsg.] (1994): Der Fischer Weltalmanach 1995; Frankfurt (Fischer).

- BARTH, H. (1857): Reisen und Entdeckungen in Nord- und Central-Afrika in den Jahren 1849 bis 1855.- Tagebuch seiner im Auftrag der Britischen Regierung unternommenen Reise.- (5 Bände) Gotha (Perthes).
- BAUER, M. (1992): Vermessung und Ortung mit Satelliten.- Karlsruhe (Wichmann).
- BAWDEN, M. G. (1972a): Geology.- In: TULEY, P. [Ed.]: The Land Resources of North East Nigeria, 1, The Environment; Land Resource Study No. 9 (1): 46-70; Surbiton [Land Resource Division].
- BAWDEN, M. G. (1972b): Physiography.- In: TULEY, P. [Ed.]: The Land Resources of North East Nigeria, 1, The Environment; Land Resource Study No. 9 (1): 43-45; Surbiton [Land Resource Division].
- BAWDEN, M. G. (1972c): Hydrology.- In: TULEY, P. [Ed.]: The Land Resources of North East Nigeria, 1, The Environment; Land Resource Study No. 9 (1): 71-83; Surbiton [Land Resource Division].
- BILL, R. (1996): Grundlagen der Geo-Informationssysteme.- 2, Analysen, Anwendungen und neue Entwicklungen; Karlsruhe (Wichmann).
- BILL, R. & FRITSCH, D. (1991): Grundlagen der Geo-Informationssysteme.- 1, Hardware, Software und Daten; Karlsruhe (Wichmann).
- BOUQUET, C. (1990): Insulaires et riverains du Lac Tchad.- 1; Paris (L'Harmattan).
- BRAUKÄMPER, U., KIRSCHT, H., PLATTE, E. & THIEMEYER, H. (1993): Systems of Land use in the Firgi Plains of the Chad Basin.- Ber. Sonderforschungsbereich 268, 2: 43-50; Frankfurt.
- BREUNIG, P. & NEUMANN, K. (1996): Archaeological and archaeobotanical research of the Frankfurt University in a West African context.- Ber. Sonderforschungsbereich 268, 8: 181-191; Frankfurt.
- CARMOUZE, J. P., DURAND, J. R. & LÉVÊQUE, C. (1983): Lake Chad: ecology and productivity of a shallow tropical ecosystem.- Monographiae Biologicae, 53; The Hague, Boston, Lancaster (Junk).
- CARROLL, D. M. & KLINKENBERG, K. (1972): Soils.- In: TULEY, P. [Ed.]: The Land Resources of North East Nigeria, 1, The Environment; Land Resource Study No. 9 (1): 85-120; Surbiton [Land Resource Division].
- CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE (1989): Télédétection et Tiers Monde. Methodologies, Pratiques, nouveaux champs et nouveaux enjeux.- Centre d'Etudes de Géographie Tropicale (CEGET); Bordeaux-Talence.
- CHAD BASIN DEVELOPMENT AUTHORITY (1985): 12th Annual Report.- Maiduguri.
- CHAD BASIN DEVELOPMENT AUTHORITY (1988): Flooding of Farmlands and Building Structures in Local Government Areas of Borno State.- Memorandum to the National Sub-Committee on Flood and Erosion Control; Maiduguri.
- CHAD BASIN DEVELOPMENT AUTHORITY (1994): Sixth National Three-Year Rolling Plan 1995-1997.- Maiduguri.

- CHANTRAINE, J.-M. (1978): Évolution hydrochimique du Lac Tchad de Septembre 1973 à Septembre 1975 au cours d'une phase de décrue.- Cah. ORSTOM, sér. Hydrobiol., XII (1): 3-17; N'Djamena.
- CHEVALIER, A. (1900): Les zones et les provinces botanique de l'Afrique occidentale francais.- Comptes rendus de l'Acad. Scien., 13: 1205-1211; Paris.
- CHOURET, A. (1977): La Persistence des Effets de la Sécheresse sur le Lac Tchad.- N'Djamena [ORSTOM].
- CNES/SPOTIMAGE (1988): SPOT user's handbook, 1, Reference Manual.- Toulouse.
- COLWELL, R. N. [Ed.] (1983a): Manual of Remote Sensing, 1, Theory, Instruments and Techniques.- Falls Church (Sheridan Press) [American Society of Remote Sensing].
- COLWELL, R. N. [Ed.] (1983b): Manual of Remote Sensing, 2, Interpretation and Applications.- Falls Church (Sheridan Press) [American Society of Remote Sensing].
- CSAPLOVICS, E. (1992): Methoden der regionalen Fernerkundung. Anwendungen im Sahel Afrikas.- Berlin (Springer).
- DOBE, C. (1994): Multitemporale Landnutzungskartierung mit Fernerkundungsmethoden in Nordost-Nigeria am Beispiel des Alau-Damm-Projektes.- Diplomarbeit Universität Frankfurt [unveröff.].
- DURAND, A. (1982): Oscillations of Lake Chad over the past 50,000 years: new data and new hypothesis.- Palaeogeogr., Paleoclim. Palaeoecol., 39: 37-53; Amsterdam (Elsevier).
- DWIVEDI R.S., KUMAR, A. B. & TEWARI, K. N. (1997): The utility of multi-sensor data for mapping eroded lands.- Int. J. Remote Sensing, 18 (11): 2303-2318; London.
- EDEN, M. M. (1986): The Management of Renewable Resources in the Tropics: The Use of Remote Sensing.- In: EDEN, M. J. & PARRY, J. T. [Eds.]: Remote Sensing and Tropical Land Management: 3-15; New York, London (Wiley).
- EHRlich, D., LAMBIN, E. F., MALINGREAU, J.-P. (1997): Biomass Burning and Broad-Scale Land-Cover Changes in Western Africa.- Remote Sensing Environment, 61: 201-209; New York (Elsevier).
- EOSAT (Earth Observation Satellite Company) (1985): User's Guide for Landsat Thematic Mapper Computer Compatible Tapes.- Lanham.
- ERDAS (1991): ERDAS Field Guide.- Version 7.5; Atlanta.
- ERDAS (1997): ERDAS Field Guide.- Version 8.3; Atlanta.
- ESRI (1990a): PC ARC/INFO Data Conversion Users Guide.- Redlands.
- ESRI (1990b): PC ARC/INFO Overlay Users Guide.- Redlands.
- ESRI (1990c): PC ARC/INFO Starter Kit.- Redlands.
- ESRI (1994): ARC/INFO Data Management. Concepts, datamodels, database design, and storage.- Redlands.
- ESRI (1996): ArcView GIS.- Redlands.

- ESRI (1997): Understanding GIS.- The ARC/INFO Method.- Redlands.
- FAO (Food and Agriculture Organisation) (1973): Investigation and Feasibility Study of an Irrigation Project south of Lake Chad, Nigeria.- London.
- FEDERAL MINISTRY OF AGRICULTURE & NATURAL RESOURCES (1974): South Chad Irrigation Project Eastern Area Feasibility Study.- London.
- FEDERAL MINISTRY OF AGRICULTURE & NATURAL RESOURCES (1975): South Chad Irrigation Project Western Area Feasibility Study.- London.
- FEDERAL MINISTRY OF AGRICULTURE & NATURAL RESOURCES (1976): Stage II Predesign Study Report.- London.
- FEDERAL MINISTRY OF AGRICULTURE, WATER RESOURCES AND RURAL DEVELOPMENT (1987): Multi-State Agricultural Development Project II.- Borno State Final Report; Lagos.
- FEDERAL REPUBLIC OF NIGERIA (1991): Population Census of Nigeria (provisional results).- [zitiert nach FRICKE, W. & MALCHAU, G. 1994].
- FRANKE, I. (1994): Versuch einer Landnutzungskartierung durch multitemporale Landsat-TM-Auswertung.- Ein Beispiel aus dem Hessischen Ried.- Diplomarbeit Universität Frankfurt [unveröff.].
- FRANKE-SCHARF, I. (1997): Landnutzungswandel im nigerianischen Tschadbecken. Kartierungen aus Luftbildern von 1957 bis 1990.- Ber. Sonderforschungsbereich 268, 9: 35-51; Frankfurt.
- FRANKE-SCHARF, I. (2000): Integration of land use and related information within a Geographic Information System of the Chad Basin in NE-Nigeria.- Ber. Sonderforschungsbereich 268, 14; Frankfurt.
- FRANKE-SCHARF, I. (im Druck): Dry season farming areas in the Nigerian Chad Basin mapped from aerial photographs.- Ber. Sonderforschungsbereich 268; Frankfurt.
- FRANKE-SCHARF, I. & SKORUPINSKI, T. (2000): Mapping of desertification areas by satellite image interpretation and soil survey.- Ber. Sonderforschungsbereich 268, 14; Frankfurt.
- FRICKE, W. & MALCHAU, G. (1994): Die Volkszählung in Nigeria 1991 - Geographische Aspekte eines politischen Pokers.- Z. Wirtschaftsgeographie, 3: 163-178; Frankfurt.
- FULLER, R. M. & PARSELL, R. J. (1990): Classification of TM imagery in the study of land use in lowland Britain: practical considerations for operational use.- Int. J. Remote Sensing, 11(10): 1901-1917; London.
- GASTON, A., DULIEU, D., LAMARQUE, G., BOUQUET, C., CLANET, C. & SEIGNOBOS, C. (1979): Agropastoral Synthesis of the Lake Chad Basin, Agropastoral Survey, 53, Inst. d'Elevage et de Médecin Vétérinaire des Pays Tropicaux, Laboratoire de Farcha.- N'Djamena [Commission du Bassin du Lac Tchad].
- GROVE, A. T. [Ed.] (1985): The Niger and its Neighbours.- Environmental history and hydrobiology, human use and health hazards of the major West African Rivers.- Rotterdam (Balkema).

- GUDDAT-SEIPEL, M. (in Vorbereitung): Untersuchungen zur spätpleistozänen Landschaftsentwicklung in der südwestlichen Umrahmung des Tschadbeckens anhand eines Landschaftsprofils vom Biu-Plateau zum Tschadbecken.- Dissertation Universität Frankfurt.
- HABERÄCKER, P. (1991): Digitale Bildverarbeitung. Grundlagen und Anwendung.- München (Hanser).
- HAHN-HADJALI, K., BRAUN-YAO, M., FRANKE-SCHARF, I. & FRITSCHER, N. (2000): Interdépendance entre le potentiel d'exploitation et la structure d'habitat dans la région de l'Atakora.- Ber. Sonderforschungsbereich 268, 14; Frankfurt.
- HILL, J. & STURM, B. (1991): Radiometric correction of multitemporal Thematic Mapper data for use in agricultural land-cover classification and vegetation monitoring.- Int. J. Remote Sensing, 12(7): 1471-1491; London.
- HOELZMANN, P. (1993): Holozäne Limnite im NW-Sudan.- Dissertation Universität Berlin.
- HURN, J. (1989): GPS-A guide to the next utility.- [Trimble Navigation]
- IGBOKWE, I. J. (1994): Multitemporale Satellitenbild-Auswertung zur Erfassung von Landbedeckungs- und Landnutzungsänderungen in der Sahelzone in Westafrika.- Wiss. Arb. der Fachrichtung Vermessungswesen Universität Hannover, 200; Hannover.
- JEWELL, N. (1989): An evaluation of multi-date SPOT data for agriculture and land use mapping in the United Kingdom.- Int. J. Remote Sensing, 10(6): 939-951; London.
- KAHLHEBER, S. & NEUMANN, N. [Eds.] (im Druck): Man and environment in the West African Sahel – a multidisciplinary approach.- Ber. Sonderforschungsbereich 268; Frankfurt.
- KAPP, G. B. (1987): Agroforstliche Landnutzung in der Sahel-Sudanzone.- Traditionelle Bewirtschaftung, Nutzungsprobleme, Lösungsansätze durch Projekte und Forschung.- Afrikastudien, 112; München (Weltforum).
- KAWKA, R. (1994): Möglichkeiten der Fernerkundung zur Darstellung eines städtischen Gefüges – das Beispiel Maiduguri/NE-Nigeria.- Diplomarbeit Universität Heidelberg [unveröff.].
- KAWKA, R. (1998): Afrikanische Städte im Satellitenbild – die Beispiele Bobo-Dioulasso/Burkina Faso und Maiduguri/Nigeria.- Dissertation Universität Heidelberg.
- KEAY, R.W.J. (1959): An outline of Nigerian vegetation.- Lagos (Federal Government Printers).
- KINDLER, J., WARSHALL, P., ARNOULD, E. J., HUTCHINSON, C. F. & VARADY, R. (1990): The Lake Chad Conventional Basin. A Diagnostic Study of Environmental Degradation.- N'Djamena [Lake Chad Basin Commission].
- KIRSCHT, H. (1999): Ein Dorf in Nordost-Nigeria – Politische und wirtschaftliche Transformationen der bäuerlichen Kanuri-Gesellschaft.- Dissertation Universität Frankfurt.

- KIRSCHT, H. & SKORUPINSKI, T. (1996): Soils and peasants. Geographical and ethnological investigations on soil classification and land use in the southern Chad Basin.- Ber. Sonderforschungsbereich 268, 8: 269-283; Frankfurt.
- KLAUS, D. (1981): Klimatologische und klimaökologische Aspekte der Dürre im Sahel.- Erdwiss. Forsch., 16; Wiesbaden (Steiner).
- KLEMP, E. [Hrsg.] (1968): Africa auf Karten des 12. bis 18. Jahrhunderts.- Leipzig (Edition).
- KNAPP, R. (1973): Die Vegetation von Afrika.- In: WALTER, H. [Hrsg.]: Vegetationsmonographien der Großräume Bd. III; Stuttgart (Fischer).
- KÖPPEN & GEIGER (1928): Klimakarte der Erde.- Gotha.
- KOLAWOLE, A., ADEWUMI, J. K. & ODO, P. E. (1994): Firki/Masakwa cultivation in Northeast Borno, Nigeria.- Research Report for the Centre for Development Cooperation Studies, Amsterdam and the International Institute for Environment and Development, London on the Indigenous Soil and Water Conservation in Africa Research Project.
- KRAUS, K. (1990): Fernerkundung, 2, Auswertung photographischer und digitaler Bilder.- Bonn (Dümmler).
- KRAUS, K. & SCHNEIDER, W. (1988): Fernerkundung, 1, Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechniken.- Bonn (Dümmler).
- KRONBERG, P. (1985): Fernerkundung der Erde, Grundlagen und Methoden des Remote Sensing in der Geologie.- Stuttgart (Enke).
- KUSSEROW, H. (1995): Einsatz von Fernerkundungsdaten zur Vegetationsklassifizierung im Südsahel Malis. Ein multitemporaler Vergleich zur Erfassung der Dynamik von Trockengehölzen.- Wiss. Schriftenreihe Umweltmonitoring, 1; Bayreuth.
- LAKE CHAD BASIN COMMISSION (1987): International Seminar on Water Resources of the Lake Chad Basin: Management and Conservation, 3.-5. Juni 1987.- N'Djamena.
- LAKE CHAD RESEARCH INSTITUTE (1984): Annual Report.- Maiduguri.
- LAKE CHAD RESEARCH INSTITUTE (1991): Borno State Agricultural Development Programme, 3. Quartal.- Maiduguri.
- LAMBIN, E. F. (1996): Change Detection at Multiple Temporal Scales: Seasonal and Annual Variations in Landscape Variables.- Photogrammetric Engineering Remote Sensing, 62(8): 931-938; Bethesda.
- LAMBIN, E. F. & EHRLICH, D. (1997): Land-cover Changes in Sub-Saharan Africa (1982-1991): Application of a Change Index Based on Remotely Sensed Surface Temperature and Vegetation Indices at a Continental Scale.- Remote Sensing Environment, 61: 181-200; New York.
- LEEUW, P. N. & TULEY, P. (1972): Vegetation.- In: TULEY, P. [Ed.]: The Land Resources of North East Nigeria, 1, The Environment, Land Resource Study No. 9 (1): 121-155; Surbiton [Land Resource Division].
- LILLESAND, T. M. & KIEFER, R. W. (1991): Remote Sensing and image interpretation.- New York (John Wiley & Sons).

- LO, T. H. C., SCARPACE, F. L. & LILLESAND, T. M. (1986): Use of Multitemporal Spectral Profiles in Agricultural Land-Cover Classification.- Photogrammetric Engineering Remote Sensing, 52(4): 535-544; Bethesda.
- LÖFFLER, E. (1994): Geographie und Fernerkundung. Eine Einführung in die geographische Interpretation von Luftbildern und modernen Fernerkundungsdaten.- Stuttgart (Teubner).
- LUJIAJU (1988): Development of principal component analysis applied to multitemporal Landsat TM data.- Int. J. Remote Sensing, 9(2): 1895-1907; London.
- LYON, J. G., YUAN, D., LUNETTA, R. S. & ELVIDGE, C. D. (1998): A Change Detection Experiment Using Vegetation Indices.- Photogrammetric Engineering Remote Sensing, 64(2): 143-150; Bethesda.
- MANIERE, R., KHIYAR, H. & COURBOULES, J. (1991): Comparaison de différentes méthodes de traitement par analyses en composantes principales des données Thematic Mapper de LANDSAT-5 appliquées à l'inventaire forêts méditerranéennes du sud de la France.- Int. J. Remote Sensing, 12(9): 1887-1903; London.
- MOHLER, R. R. J. & AMSBURY, D. L. (1988): Extension of a Drought Monitoring and Vegetation Classification Methodology to the Western Sahel.- Geocarto International, 4: 29-36; Hong Kong.
- MORGAN, W. B. & PUGH, J. C. (1969): West Africa.- London (Methuen).
- MOUAT, D. A. & LANCASTER, J. (1996): Use of Remote Sensing and GIS to Identify Vegetation Change in the Upper San Pedro River Watershed, Arizona.- Geocarto International, 11(2): 55-67; Hong Kong.
- MOUAT, D. A., MAHIN, G. G. & LANCASTER, J. (1993): Remote Sensing Techniques in the Analysis of Change Detection.- Geocarto International, 2: 39-50; Hong Kong.
- MYERS, V. I. (1983): Remote Sensing Applications in Agriculture.- In: COLWELL, R. N.: Manual of Remote Sensing, 2, Interpretations and Applications.- Falls Church (Sheridan Press) [American Society of Remote Sensing].
- NÜSSER, M. & SCHICKHOFF, U. (1996): Traditionelle Methoden der Vegetationsgeographie im Wandel: Potentiale und Limitierungen der digitalen Verarbeitung vegetationsbezogener Datensätze.- Erde, 127: 93-112; Berlin.
- OJANUGA, A. G. & EKWOANYA, M. A. (1995): Temporal Changes in Land Use Pattern in the Benue River Floodplain and adjoining Uplands at Makurdi, Nigeria.- In: INTERNATIONAL SOIL SCIENCE SOCIETY: International Symposium on Remote Sensing and GIS as tools for monitoring soils in the environment: 80 (Abstract); Ouagadougou.
- PILON, P. G., HOWARTH, P. J., BULLOCK, R. A. & ADENIYI, P. O. (1988): An Enhanced Classification Approach to Change Detection in Semi-Arid Environments.- Photogrammetric Engineering Remote Sensing, 54 (12): 1709-1716; Bethesda.
- PLATTE, E. (1998): Amt und Würden. Frauen in der Kanuri-Ortschaft Musune (Nordost Nigeria).- Dissertation Universität Frankfurt.
- PRINCE, S. D., JUSTICE, C. O. & LOS, S. O. (1990): Remote Sensing of the Sahelian Environment. A review of the current status and future prospects.- Commission of

- the European Communities, Directorate General VIII Joint Research Centre Ispra Establishment/ CTA, Technical Centre for Agriculture and Rural Cooperation ACP/CEE Lome Convention; Varese.
- QUIEL, F. (1986): Landnutzungskartierung mit LANDSAT-Daten.- Fernerkundung Raumordnung Städtebau, 17; Bonn.
- REIKAT, A. [Hrsg.] (1997): Landnutzung in Westafrika.- Ber. Sonderforschungsbereich 268, 9; Frankfurt.
- RICHARDS, J. A. & JIA, X. (1999): Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction.- Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo (Springer).
- RINGROSE, S., MATHESON, W., TEMPEST, F. & BOYLE, T. (1990): The Development and Causes of Range Degradation Features in Southeast Botswana Using Multi-Temporal Landsat MSS Imagery.- Photogrammetric Engineering Remote Sensing, 56(9): 1253-1262; Bethesda.
- RINGROSE, S., VANDERPOST, C. & MATHESON, W. (1997): Use of image processing and GIS techniques to determine the extent and possible causes of land management/fenceline induced degradation problems in the Okavango area, northern Botswana.- Int. J. Remote Sensing, 18(11): 2337-2364; London.
- SABINS, F. F. (1987): Remote Sensing – Principles and Interpretation.- New York (Freeman).
- SCHMID, S. (1997): Untersuchungen zum Informationsgehalt von multitemporalen SPOT-Satellitendaten am Beispiel der Savannen im Süden von Burkina Faso (Westafrika).- Dissertation Universität Frankfurt.
- SCHUCHMANN, S. (1996): Der Erkenntnisfortschritt durch Methoden der Geoinformatik für die Naturraumanalyse dargestellt am Beispiel der westafrikanischen Savanne in Nordost-Nigeria.- Dissertation Universität Frankfurt.
- SINGH, A. (1989): Digital change detection techniques using remotely-sensed data.- Int. J. Remote Sensing, 10(6): 989-1003; London.
- SKORUPINSKI, T. (im Druck): Effects of microrelief on masakwa dry farming in the Chad Basin of NE-Nigeria.- Ber. Sonderforschungsbereich; Frankfurt.
- SKORUPINSKI, T. (in Vorbereitung): Bodenkundliche Untersuchungen an Vertisolen im Tschadbecken, NE-Nigeria.- Dissertation Universität Frankfurt.
- SKORUPINSKI, T. & FRANKE-SCHARF, I. (1997): Auswirkungen anthropogener Nutzung auf Böden im nigerianischen Tschadbecken. Luftbildkartierungen von Deflationsschäden im Marte Local Government.- Ber. Sonderforschungsbereich 268, 9: 53-66; Frankfurt.
- STOW, D. A. & COLLINS, D. & MCKINSEY, D. (1990): Land Use Change Detection Based on Multi-Date Imagery from Different Satellite Sensor Systems.- Geocarto International, 3: 3-12; Hong Kong.
- STRATEGIC MAPPING (1992a): Atlas GIS – Desktop Geographic Information System.- Santa Clara.
- STRATEGIC MAPPING (1992b): Atlas Import/Export – Geographic Data Conversion.- Santa Clara.

- STURM, H.-J., FRANKE, I., KIRSCHT, H., ATAHOLO, M. & SKORUPINSKI, T. (1996): Natural environment and land use in the Chad Basin, NE-Nigeria - Preliminary results of an interdisciplinary research.- Ber. Sonderforschungsbereich 268, 8: 335-348; Frankfurt.
- SWAIN, P. H. & DAVIS, S. M. [Eds.] (1978): Remote Sensing: The Quantitative Approach.- New York (McGraw-Hill).
- TAPPAN, G. G., HADJ, A., WOOD, E. C. & LIETZOW, R. W. (2000): Use of Argon, Corona and Landsat Imagery to Assess 30 Years of Land Resource Changes in West-Central Senegal.- Photogrammetric Engineering Remote Sensing, 66(6): 727-735; Bethesda.
- TAUER, N. & HUMBORG, G. (1992): Runoff Irrigation in the Sahel Zone. Remote sensing and geographical information systems for determining potential sites.- CTA Technical Centre for Agriculture and Rural Cooperation; Weikersheim (Margraf).
- THAMBYAPILLAY, G. G. R. (1983): Hydrogeography of Lake Chad and environs: contemporary, historical and palaeoclimatic.- Annals of Borno, 1: 105-145; Maiduguri.
- THENKABAIL, P. S. & NOLTE, C. (1996): Capabilities of Landsat-5 Thematic Mapper (TM) data in regional mapping and characterization of inland valley agroecosystems in West Afrika.- Int. J. Remote Sensing, 17(8): 1505-1538; London.
- THIEMEYER, H. (1997): Untersuchungen zur spätpleistozänen und holozänen Landschaftsentwicklung im südwestlichen Tschadbecken (NE-Nigeria).- Jenaer Geogr. Schr., 5; Jena.
- TOWNSHEND, J. R. G. [Ed.] (1981): Terrain analysis and remote sensing.- London (George Allen & Unwin Ltd.).
- TOWNSHEND J.R.G. (1984): Agricultural land-cover discrimination using thematic mapper spectral bands.- Int. J. Remote Sensing, 5(4): 681-698; London.
- TOWNSHEND, J.R.G. (1992): Land Cover.- Int. J. Remote Sensing, 13(6/7): 1319-1328; London.
- TRIMBLE NAVIGATION (1992): General Reference for the GPS Pathfinder System.- Sunnyvale.
- TRIPATHY, G. K., GNOSH, T. K. & SHAH, S. D. (1996): Monitoring of desertification process in Karnataka state of India using multi-temporal remote sensing and ancillary information using GIS.- Int. J. Remote Sensing, 17(12): 2243-2257; London.
- TROLL, C. & PAFFEN, K.-H. (1964): Karte der Jahreszeiten-Klimate der Erde.- Erdkunde, 18: 5-28; Bonn.
- TSCHIERSCHKE, K. (1997): Statistische Analyse und Interpretation langjähriger Niederschlags- und Temperaturdaten von Klimastationen im Tschadseegebiet.- Diplomarbeit Universität Frankfurt [unveröff.].
- TUCKER, C. J. (1979): Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation.- Remote Sensing Environment, 8: 127-150; New York.

- TULEY, P. [Ed.](1972a): The Land Resources of North East Nigeria, 1, The Environment; Land Resource Study No. 9 (1); Surbiton [Land Resource Division].
- TULEY, P. (1972b): Climate.- In: TULEY, P. [Ed.]: The Land Resources of North East Nigeria, 1, The Environment; Land Resource Study No. 9 (1): 6-42; Surbiton [Land Resource Division].
- TULEY, P. (1972c): Population.- In: TULEY, P. [Ed.]: The Land Resources of North East Nigeria, 1, The Environment; Land Resource Study No. 9 (1): 164-165; Surbiton [Land Resource Division].
- UMWELTBUNDESAMT (1992): Umweltforschungsplan des BMer für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.- Wiesbaden.
- UNIMAID/SILSOE LINKEAGE (1991): Progress Report No. 2; Maiduguri.
- UNIMAID/SILSOE LINKEAGE (1994): Progress Report No. 9; Maiduguri.
- WALTER, H. & BRECKLE, W. (1984): Ökologie der Erde, 2, Spezielle Ökologie der tropischen und subtropischen Zonen.- Stuttgart (Fischer).
- WHITE, F. (1986): La végétation de l'Afrique. Memoire.- Paris [ORSTOM-UNESCO].
- WILL, H. (1996): Fernerkundung und Weideökologie in der subhumiden Savannenzzone NW-Benins. Anwendungen der Satellitenfernerkundung (LANDSAT-TM, SPOT) im Rahmen von weideökologischen Fragestellungen.- Karlsruher Schr. Geogr. Geoökologie, 4; Karlsruhe.
- ZACH, B., KIRSCHT, H., LÖHR, D., NEUMANN, K. & PLATTE, E. (1996): Masakwa dry season cropping in the Chad Basin.- Ber. Sonderforschungsbereich 268, 8: 349-356; Frankfurt.

10.2 Kartenverzeichnis

ASISOV, S.A. (1981): Nigeria, Topographische Karte, 1 : 200 000;

Blätter: D-33-XXVI Kukawa

D-33-XXXVII Dikwa

D-33-XXXIII Makari

AUBREVILLE, A. (1950): Carte des Bioclimats; In: Flore Forestière Soudano-Guinéenne.- Soc. Ed. géogr. mar. et col.; Paris.

DEFENSE MAPPING AGENCY (1986): Tactical Pilotage Chart, Cameroon, Central African Republic, Chad, Nigeria, 1 : 500 000; TPC K-3C; St. Louis.

DEFENSE MAPPING AGENCY (1988): ONC-Chart, Cameroon, Central African Republic, Chad, Nigeria, 1 : 1 000 000; ONC K-3; St. Louis.

D.O.S. (Directorate of Overseas Survey): North East Nigeria

Geomorphology, 1 : 1 000 000, 1970; In: TULEY (1972a): Detached Map 2.

Soils, 1 : 1 000 000, 1970; In: TULEY (1972a): Detached Map 3.

Vegetation, 1 : 1 000 000, 1970; In: TULEY (1972a): Detached Map 4.

Land Systems, 1 : 500 000, 1970; In: TULEY (1972a): Detached Map 6a, b.

Present Landuse, 1 : 1 000 000, 1970; In: TULEY (1972a): Detached Map 7.

Mean Annual Rainfall, 1 : 3 000 000, 1969; In: TULEY (1972a): 11 - Text Map 3.

Length, Start & End of the Wet Season, 1 : 3 000 000, 1969; In: TULEY (1972a): 41 - Text Map 8.

Population Density, 1 : 3 000 000, 1963; In: TULEY (1972a): 167 – Text Map 12.

D.O.S. (Directorate of Overseas Survey) (1978): Nigeria, 1 : 50 000; N'Djamena [L.C.B.C. – Lake Chad Basin Commission].

Sheets: 7 Tchoukoutjany NW, Toumour/Yau SW, Yau/Bosso SE

7a SW

24 Kaririwa NE, SE

25 Chad-Baga NW, NE, SW, SE

46 Mongonu NW, NE, SE & Part of SW

47 Chad-Wulgo / Kousséri SW, SE

68 Marte NE

69 Ngala NW, NE

1a

3c Chad Wulgo NW / Kousséri

3d Kousséri

4a Kousséri / Mani

4c Djimtilo / Kousséri

ESRI (1991): Digital Chart of the World; [4 CD-Rom] [vgl. Anhang 1.1].

ESRI (1992): ArcWorld; [1 CD-Rom] [vgl. Anhang 1.1].

ESRI (1996): ESRI Maps & Data; [1 CD-Rom] [vgl. Anhang 1.1].

FEDERAL SURVEYS: Nigeria, 1 : 50 000; Lagos.

Sheets: 25 Chad-BagaSW, SE (1965)

46 Mongonu NW, NE, SW, SE (1963)

68 Marte NW, NE, SW (1965) SE (1964)

69 Ngala NW, NE, SW, SE (1965)

KEAY, R. W. J. (1953): Nigeria, Provisional Map of Vegetation Zones, 1 : 3 000 000; Lagos [Survey Department].

KLAUS, D. (1981): Karte der Variabilität der jährlichen Niederschlagssumme (1953-73); In: Klimatologische und klimaökologische Aspekte der Dürre im Sahel.- Erdwiss. Forsch., 16: 7; Wiesbaden (Steiner).

LAUER, W. & FRANKENBERG, P. (1987): Welt-Klimakarte, 1 : 90 000 000; In: Diercke Weltatlas.- Braunschweig (Westermann).

MINISTRY OF LAND AND SURVEY (1991): Borno State, Administrative Map; 1 : 500 000; Maiduguri.

P.N.U.D. – F.S. – U.N.E.S.C.O. – L.C.B.T. (1966): Bassin du Lac Tchad, Carte de Pluviométrie moyenne annuelle, 1 : 5 000 000; In: GASTON et al. (1979).

SATTEC & SATMAP (1992): Nigeria, Hydrologic Map, 1 : 250 000; Abuja, Lagos, Olpe [FEDERAL MINISTRY OF AGRICULTURE, WATER RESOURCES AND RURAL DEVELOPMENT].

Sheets: 4 Zari

5 Kaririwa

14 Gubio

15 Mongonu

16 Ngala

26 Goniri

28 Gulumba

UNESCO (1978): FAO-Soilmap of the World, 1 : 5 000 000; [10 Disketten].

WHITE, F. (1986): Carte de la vegetation de l'Afrique, 1 : 5 000 000; Paris [ORSTOM-UNESCO].

10.3 Luftbildverzeichnis

BORNO STATE GOVERNMENT NIGERIA (1990): Luftbildbefliegung vom November-Dezember 1990 im ca. Maßstab 1 : 25 000 [North East Arid Zone Development Programm].

Luftbildserien: Strip 16: 118-147, 151-199

Strip 22: 148-178

Strip 23: 225-238

Strip 27: 94-120

Strip 28: 1-6, 14-45, 69-86, 89-110, 132-148

Strip 31: 79-84, 229-239, 242-253

Strip 32: 13-37, 62-67, 76-78

daraus abgeleitete Luftbildmosaike:

68NW2, 68NW3, 68NW4, 68NE1, 68NE2, 68NE3, 68NE4, 68SW1, 68SW2, 68SE1, 68SE2, 69NW1, 69NW2, 69NW3, 69NW4, 69NE3, 69SW1, 69SW2, 69SE1

LAND AND SURVEY (1957): Luftbildbefliegung vom Oktober 1957 im ca. Maßstab 1 : 25 000; Maiduguri.

Luftbildserien: Strip 6: 70190-70204

Strip 7: 70205-70217

Strip 8: 70231-70238, 70252-70247

Strip 9: 70239-70246, 70253-70260

Strip 10: 70299-70312

Strip 11: 71367-70378

Strip 12: 71354-71366

10.4 Satellitenszenenverzeichnis

Landsat-1(Multispektralscanner)-Satellitenszene 199/51 vom 08.12.1972

Landsat-1(Multispektralscanner)-Satellitenszene 199/51 vom 18.02.1973

Landsat-2(Multispektralscanner)-Satellitenszene 199/51 vom 07.03.1975

Landsat-2(Multispektralscanner)-Satellitenszene 199/51 vom 19.03.1976

Landsat-3(Multispektralscanner)-Satellitenszene 199/51 vom 13.12.1978

Landsat-3(Multispektralscanner)-Satellitenszene 199/51 vom 13.03.1979

Landsat-4(*Thematic Mapper*)-Satellitenszene 185/51 vom 27.02.1988

Landsat-4(*Thematic Mapper*)-Satellitenszene 185/51 vom 04.11.1992

Landsat-4(*Thematic Mapper*)-Satellitenszene 185/52 vom 27.02.1988

SPOT-1(*HRV-1-XS*)-Satellitenszene 85/325 vom 09.04.1986

SPOT-3(*HRV-2-XS*)-Satellitenszene 85/325* vom 15.01.1995 [programmiert]

SPOT-3(*HRV-2-XS*)-Satellitenszene 85/325* vom 06.09.1995 [programmiert]

SPOT-3(*HRV-2-XS*)-Satellitenszene 85/325* vom 08.10.1995 [programmiert]

SPOT-3(*HRV-2-XS*)-Satellitenszene 85/325* vom 29.11.1995 [programmiert]

SPOT-3(*HRV-2-XS*)-Satellitenszene 85/325* vom 16.01.1996 [programmiert]

SPOT-1(*HRV-1-XS*)-Satellitenszene 85/326 vom 09.04.1986

SPOT-1(*HRV-2-XS*)-Satellitenszene 86/325 vom 09.04.1986

10.5 Verzeichnis der zitierten Internetadressen

<http://bcnet.org/learning/african/justice.htm>

<http://www.geoniger.com/luv.htm>

<http://www.uni-hohenheim.de/~atlas308/>

Anhang

A.1: Auszug aus dem regionalen geographischen Informationssystem

A.1.1: Verzeichnis der bereits digital vorliegenden aufbereiteten Karten

Datenart	Thema	Dateiname	Form	Attribute	Abdeckung	Originalmaßstab	Projektion	Quelle	Bearbeitung
Topographische Grundlagen	Hauptorte	af-ort.shp	Punkte	Land, Bevölkerung, Hauptstadt	Afrika (Welt)	1 : 3 Mio.	Geographisch [dd]	ESRI 1992: ArcWorld (1 CD) a) Kartographische Information: U.S. Government 1988: World Data Bank II b) Statistische Information: World Resource Institute 1990: Social Indicators of Development, 1992-3 World Resources Data Base c) Index und Geographische Referenz: ESRI 1992: ArcData Programme	I. Franke-Scharf
	Hauptflüsse	af-flu.shp	Linien	Name, System	Afrika (Welt)				
	Hauptseen	af-see.shp	Flächen	Fläche, Name, Höhenlage, Tiefe	Afrika (Welt)				
	Länder	af-land.shp	Flächen	Bevölkerung, Fläche, Währung...	Afrika (Welt)				
	Länder	wa-count.shp	Flächen	Organisationen...	Afrika (Welt)				
	Administrative Grenzen (vor 1991)	wa-admin.shp	Flächen	Kontinent, Region	Westafrika (Welt)				
	Hauptorte	wa-city.shp	Punkte	Name, Land, Region	Westafrika (Welt)				
	Straßen	wa-roads.shp	Linien	Typ, Straßentyp (1: Gravel, 2: Hard Surface, 3: High Speed, 4: Track or Trail, 5: Unsurfaced), Abbildungsmaßstab	Westafrika (Welt)				
	Eisenbahn	wa-rail.shp	Linien	Typ, Bahntyp, Abbildungsmaßstab	Westafrika (Welt)				
	Flüsse	wa-river.shp	Linien	Typ, Flußtyp, Flußgröße	Westafrika (Welt)				
Gewässer	wa-water.shp	Flächen	Typ, Wassertyp (1: Intermittent lake, 2: Island, 3: Lake, 4: Reservoir, 5: River, 7: Salt Pan), Gewässergröße	Westafrika (Welt)					
Statistische Informationen auf Länderebene	Landwirtschaft	wa-agri.shp	Flächen	z. B. Landwirtschaftsfläche, Waldflächen, Ernährungsimporte, Ernährungsproduktion und -versorgung	Westafrika (Welt)	1 : 3 Mio.	Geographisch [dd]	ESRI 1996: Maps & Data (1 CD)	I. Franke-Scharf
	Gesundheit	wa-health.shp	Flächen	z. B. Zugang der urbanen/ruralen Bevölkerung zu sauberem Wasser	Westafrika (Welt)				
	Natürliche Ressourcen	wa-natres.shp	Flächen	z. B. gesamte Landwirtschaftsfläche, ungenutzte Fläche, uneingeschränkt nutzbarer Boden, versch. Waldflächen, Entwaldung	Westafrika (Welt)				
	Bevölkerung	wa-popu.shp	Flächen	urbane/rurale Wachstumsraten, Dichten	Westafrika (Welt)				
Administrative Grenzen	State-Grenzen (Stand: 1995)	ni-admin.shp	Flächen	Bevölkerung, Bevölkerungsdichte	Nigeria (Welt)	1 : 3 Mio.	Geographisch [dd]	ESRI 1996: Maps & Data (1 CD)	I. Franke-Scharf
Topographische und thematische Information	Höhen-schichten	hypso.shp	Flächen	Höhe	Tschad-becken (Welt: Kacheln 5° x 5°)	1 : 500 000 (Operational Navigation Chart)	Geographisch [dd] Elipsoid WGS 84	ESRI 1991: Digital Chart of the World (4 CD)	I. Franke-Scharf
	Länder	land.shp	Flächen	Name					
	Orte	town.shp	Punkte	Name					
	Straßen	road.shp	Linien	Typ, Status					
	Gewässer	drain.shp	Flächen	Typ					
	(Landnutzung)	landcov.shp	Flächen	Typ					
Siedlungen	settlm.shp	Flächen	Typ, Name						
Höhenmodell		dgm30	Grid (Raster)	Höhe	Westafrika (Welt)	30" (GTOPO30)5" (ETOPO5)	Geographisch [dd]	http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/gtopo30.html http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/s/etopo.html	U. Simons
Höhenschichten		hoehe-schichten.shp	Flächen	Höhe	Westafrika (Welt)	s.o.	Geographisch [dd]	abgeleitet aus Digital Chart of the World und GTOPO 30	U. Simons
Bodenkarte	Böden	faosoil	Flächen	Bodennummer, Land, Bodeninformation, Bodentyp	Afrika	1 : 5 Mio.	Geographisch [dd]	UNESCO 1978: FAO- Soilmap of the World (10 Disketten)	I. Franke-Scharf

Anmerkungen zu A.1

Grundlagendaten wie originale Satellitenszenen und Luftbilder bzw. Luftbildmosaike, die bereits in Kapitel 4 ausführlich beschrieben und im Quellenverzeichnis angegeben sind, sind im Anhang nicht nochmals aufgeführt

zu Attributen: Vektordateien enthalten Zusatzinformationen - Liniendateien zu Länge und zum Anfangs- und Endpunkt, Flächendateien zu Flächeninhalt und Umfang Attribute sind meist stark zusammengefasst oder exemplarisch aufgeführt, hinter dem Doppelpunkt aufgeführt sind ausgewählte Attributausprägungen zum Teil auch zweisprachig (deutsch/englisch)

zur Abdeckung: Angaben beziehen sich auf die jeweils aufbereiteten Ausschnitte, in Klammern ist die Gesamtabdeckung des Originaldatensatzes angegeben

zur Projektion: Geographisch - Angaben in Längen- und Breitengraden [dd] - Einheiten in Dezimalgrad

A.1.2: Verzeichnis der digitalisierten und neu erarbeiteten Karten

Datenart	Thema	Dateiname	Form	Attribute	Abdeckung	Originalmaßstab	Projektion	Quelle	Digitalisierung	Bearbeitung
Topographische Übersicht	Ländergrenzen	land	Flächen	Landname	Tschadbecken	1 : 500 000	(Lambert Conformal Conic, Standard Parallels 9°20' 14"40', Convergence Factor 0.20799) Geographisch [dd]	DEFENSE MAPPING AGENCY AEROSPACE CENTER 1988 ONC K-3	J. Breuer	I. Franke-Scharf
	Tschadsee	lake	Fläche	Landflae: Land, See						
	Orte	orte	Punkte	Name						
Topographische Karte Nigeria	Orte	gesamt: tk50ort einzel: tk68ne-ort...	Punkte	Orte_id: 1, 2; Siedlung: Ort, Ort (klein); Tk_name; Ethnie; Gruender; Titel; Stadtmauer; Mai; Verlassen; Bulama	Firgi-Region (Nigeria) Blätter 68NE, 68SE, 69NW, 69SW	1 : 50 000	(Transverse Mercator, Spheroid: Clarke 1880, Unit of Measurement: Foot, Meridian of Origin: 12°30'E, Latitude of Origin: 4°N, Scale Factor at origin: 0.99975, False Coords of Origin: 3642977,9 Ft Easting, Nil Northing) Geographisch [dd]	FEDERAL SURVEYS 1961-65	J. Breuer	I. Franke-Scharf
	Wege	gesamt: tk50weg einzel: tk68ne-weg...	Linien							
	Flüsse	gesamt: tk50flu einzel: tk68ne-flu...	Linien							
	Seen	gesamt: tk50see einzel: tk68ne-see...	Flächen							
	Tschadsee	seekarte	Flächen	Seekarte_i: 10, 20, 30; Wasserflae: See, Sumpf, Land						
Topographische Karte Nigeria der Lake Chad Basin Commission	Landesgrenze	grenze	Linie		Firgi- und Tschadsee-region (Nigeria) Blätter 25SW, 25SE, 46NW, 46NE, 46SE(SW), 47SW, 68NE, 69NW	1 : 50 000	(Transverse Mercator, Spheroid: Clarke 1880, Unit of Measurement: Meter, Meridian of Origin: 15°E, Latitude of Origin: 0°, Scale Factor at origin: 0.9996, False Coords of Origin: 500 000 m Easting, Nil Northing, Datum: Adindan - 30th Arc, 12th Parallel) Geographisch [dd]	D.O.S. 1978: Lake Chad Basin Commission (Luftbildinterpretation 1 : 42 000 (ungefähr) Mai-Juli 1973)	J. Breuer	I. Franke-Scharf
	Orte, verlassene Orte und Hütten	ortpunkt orpoly	Punkte Flächen	Ortpunkt_id: 10, 20, 30						
	Hütten	huetten	Punkte							
	Straßen	strasse	Linien	strasse_id: 10,20; strasse, weg						
	Flüsse	fluss	Linien							
	Landbedeckung	see	Flächen	see_id; Landcover						
Administrative Grenzen Borno State	Local Governments	borno	Flächen		Borno	1 : 500 000	Geographisch [dd]	MINISTRY OF LAND AND SURVEY 1991: Borno State Administrative Map	J. Breuer	I. Franke-Scharf
	Local Government Grenzen		Linien							
	Local Government Headquarters		Punkte	Name der Local Governments						
Klimakarte nach LAUER & FRANKENBERG	Klimazonen, -regionen, Wasserhaushalt	lauer.shp	Flächen	Klimazone: Tropen/Subtropen; Klimaregion: kont./marin; Wasserhaushalt: semiarid...	Afrika (Welt)	1 : 90 Mio.	(Lambert azimuthal, Berührpunkt 15°E/O°) Geographisch [dd]	LAUER, W. & FRANKENBERG, P. 1987: Weltklimakarte aus: Diercke Weltatlas 1987	J. Breuer	I. Franke-Scharf
Klimakarte nach KÖPPEN & GEIGER	Klimazonen	koepen.shp	Flächen	Klima: Af, Aw...	Afrika (Welt)		(Winkels Projektion, Transformation auf Klimakarte nach LAUER & FRANKENBERG) Geographisch [dd]	KÖPPEN, W. & GEIGER, R. 1928: Klimakarte der Erde	J. Breuer	I. Franke-Scharf
Übersicht Niederschlag	Jahresniederschläge	w-ns	Flächen	Niederschl: 0-20, 20-250, 250-500, 500-1000...	Westafrika		s.o.	Diercke Weltatlas (1987) Übersichtskarte S. 128-3	J. Breuer	I. Franke-Scharf
Übersicht Aridität	Zahl der ariden Monate	w-aridmon	Flächen	Arid: 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12	Westafrika		s.o.	s.o. S.128-4	J. Breuer	I. Franke-Scharf
	Klimatologische Trockengrenze	w-trockgr	Linie		Westafrika		s.o.	s.o. S.128-4	J. Breuer	I. Franke-Scharf
Übersicht Bodennutzung	Vegetationsbedeckung	w-nutz	Flächen	Legende: Trop. Regenwald u.s.w.	Westafrika		s.o.	s.o. S.129	J. Breuer	I. Franke-Scharf

Anhang

Datenart	Thema	Dateiname	Form	Attribute	Abdeckung	Originalmaßstab	Projektion	Quelle	Digitalisierung	Bearbeitung		
Niederschlagsvariabilität nach KLAUS	Standardabweichung der jährlichen Niederschlags-summen (1953-73)	nsvari	Linien	Nsvariab: 20,30...	Westafrika		Geographisch [dd]	KLAUS, D. 1981: Karte der Variabilität der jährlichen Niederschlags-summe (1953-73)	J. Breuer	I. Franke-Scharf		
Bioklima nach AUBRÉVILLE		aubrev.shp	Linien	Abkurz; Climat (franz.); Klimagrenze (deutsch)	Westafrika		Geographisch [dd]	AUBRÉVILLE, A. 1950: Carte des Bioclimats	J. Breuer	I. Franke-Scharf		
Vegetation nach WHITE	Vegetations-flächen	white.shp	Flächen	Nummer; Legende	Westafrika südlich der Sahara (Nordafrika)	1 : 5 Mio.	(Miller oblated stereographic projection), Geographisch [dd]	WHITE, F. 1986: Carte de la vegetation de l'Afrique	J. Breuer	I. Franke-Scharf		
	Vegetations-grenzen	whiteln.shp	Linien	Grenze								
Regionale Niederschläge	Isohyeten mittlerer jährlicher Niederschläge	pluvio.shp	Linien	Isohy: 25, 50, 100, 200, 300...	Tschad-becken	1 : 5 Mio.	Geographisch [dd]	PNUD - FS - UNESCO LCBT 1966: Bassin du Lac Tchad, Carte de Pluviométrie moyenne annuelle	J. Breuer	I. Franke-Scharf		
Hydrogeologie (Klima)	Isohyeten mittlerer jährlicher Niederschläge	satte-ns.shp	Linien	Isohyeten: 200, 300, 400, 500, 600	Nigeriani-sches Tschad-becken	1 : 250 000	UTM, Zone 33, Central Meridian=15°E, Clarke 1880 Spheroid (nicht projiziert, da nur interpolierte Isohyeten)	SATTEC 1992: Nigeria Hydrogeologic Map (Maps 4, 5, 14, 15, 16, 26, 28)	S. Golden	I. Franke-Scharf		
	Klimastatio-nen mit Nieder-schlägen	satte-kl.shp	Punkte	Station; Rain: [mm]; Period; Duration								
Regionale Niederschläge	Isohyeten mittlerer jährlicher Niederschläge	tsch-iso, tsch-iso.shp	Linien	Isohyeten: 200, 250...650	Tschad-becken	1 : 2 Mio.	Kartengrundlage: U.S. Army Map Service 1963: No. 13 Fort Lamy, No. 14 Douala (nicht projiziert, da nur grob interpoliert)	TSCHIERSCHE, K. 1997: Statistische Analyse und Interpretation langjähriger Niederschlags- und Temperaturdaten von Klimastationen im Tschadseegebiet	J. Breuer	I. Franke-Scharf		
	Klimastatio-nen mit middle-ren monatli-chen Nieder-schlägen	klimast.shp	Punkte	Station; Jan - Dez: monatliche Niederschläge [mm]; Zeitraum							siehe Quelle	I. Franke-Scharf
Vegetation	Vegetations-regionen, Vegetations-zonen	keay.shp	Flächen	Region: Savannah, Forest, Mountain; Zone: Sahel, Sudan, N Guinea, S Guinea, Derived Savannah, ...	Nigeria	1 : 3 Mio.	Geographisch [dd]	KEAY, R. W. J. 1958: Nigeria, Provisional Map of Vegetation Zones	J. Breuer	I. Franke-Scharf		
	Vegetations-grenzen	keay-ln.shp	Linien	s. o.								
Land Resource Study: Topography	Umriß, Grenzen	lrsgrnz.shp	Flächen, Linien	Landcover: Land, Lake; Country: Nigeria, Cameroun, Chad;	NE-Nigeria	1 : 500 000	(Nach D.O.S.-Karten 1 : 500 000 und 1 : 50 000) Geographisch [dd]	D.O.S. 1970: North East Nigeria - Land Systems	I. Franke-Scharf	I. Franke-Scharf		
	Orte	lrstown, lrstown.shp	Punkte	Name; Groesse: -1 außerhalb NE-Nigeria, 10 groß, 20 mittel, 30 klein							D. Bastian	D. Schneider, I. Franke-Scharf
	Straßen	lrsroad	Linien								D. Bastian	D. Schneider, I. Franke-Scharf
	Flüsse	lrsrive	Linien	Gewaesserart: -10 außerhalb NE-Nigeria, 10 Fluß, 200 Tschadsee-grenze							D. Bastian	D. Schneider, I. Franke-Scharf
Land Resource Study: Land Systems		lrsland	Flächen	Landprovinz: A, B, C, D, E; Landregion; Landsystem					D. Bastian	D. Schneider, I. Franke-Scharf		
Land Resource Study: Geomorphology	Geologie: Alter, Formation, Gestein, Ausgangs-material, Konsistenz; Geomorpho-logie: Landform	lrsgeom	Flächen	LandformNr; Txt; ParentMaterial Nr., Txt; RockTypeNr; Txt; Formation; Age; Consistency; LandformUnit; ParentMaterial Unit		1 : 1 Mio.		D.O.S. 1970: North East Nigeria - Geomorphology	D. Bastian	D. Schneider, T. Skorupinski I. Franke-Scharf		
	Escarpements	lrsescarp	Linien				s. o.		J. Breuer	I. Franke-Scharf		
Land Resource Study: Soils	Böden	lrssoil	Flächen					D.O.S. 1970: North East Nigeria - Soils	D. Bastian	D. Schneider		
Land Resource Study: Vegetation	Vegetation	lrsvege	Flächen					D.O.S. 1970: North East Nigeria - Vegetation	D. Bastian J. Breuer	I. Franke-Scharf		

Anhang

Datenart	Thema	Dateiname	Form	Attribute	Abdeckung	Originalmaßstab	Projektion	Quelle	Digitalisierung	Bearbeitung
Land Resource Study: Aktuelle Landnutzung	Landnutzung	lrslanduse.shp	Flächen		NE-Nigeria	1 : 1 Mio.	Geographisch [dd]	D.O.S. 1970: North East Nigeria - Present Landuse	A. Körber	I. Franke-Scharf
	Niederschlag	lrsrain	Linien	rainfall_[mm] (von inch umgerechnet)		1 : 3 Mio.		D.O.S. 1970: North East Nigeria - Text Map 3: Rainfall (based on data provided by the Nigerian Meteorological Service 1969)	S. Golden	I. Franke-Scharf
Land Resource Study: Klima	Beginn/ Ende/ Länge der Regenzeit	lrsseas	Linien	ID=10: Beginn Regenzeit, ID=20: Länge Regenzeit, ID=30: Ende Regenzeit; Date				D.O.S. 1970: North East Nigeria - Text Map 8: Length, Start and End of the Wet Season (based on WALTER 1967)	S. Golden	I. Franke-Scharf
	Beginn/ Ende der Regenzeit	lrswetd.shp	Linien	ID=10: Beginn Regenzeit, ID=30: Ende Regenzeit; Date						
	Länge Regenzeit	lrswetl.shp	Linien	ID=20, Len_seas: Länge Regenzeit						
	s. o.	lrswetl, lrswetp.shp	Flächen	Coverage ohne ID, Lrs_id, Laengregzeit						
Land Resource Study: Bevölkerung	Bevölkerungsdichte 1963	lrspop, lrspop.shp	Flächen	Popd_Nr.: 1-7, 0, 99; Popd_Tx: 0-50...; umgerechnet in qkm				D.O.S. 1970: North East Nigeria - Text Map 12: Population (based on figures derived from the 1963 population census)	A. Bernhard	I. Franke-Scharf
									s. o. und MINISTRY OF LAND AND SURVEY 1991: Borno State Administrative Map	
Bevölkerung 1991	Bevölkerungsdichte 1991	pop1991cens.hp	s. o.		Borno State (Nigeria)	1 : 500 000	Geographisch [dd]	geogr. Grundlage: MINISTRY OF LAND AND SURVEY 1991: Borno State Administrative Map; Datengrundlage: FEDERAL REPUBLIC OF NIGERIA: 1991 Population Census - provisional results	J. Breuer	I. Franke-Scharf
Luftbildkartierung 1990	Sediment	sed90.shp	Flächen	ID: Sediment: Sand, Ton, Uebergangsbgebiet	Firgi-Region (Nigeria)	1 : 25 000 (Luftbilder)	Geographisch [dd]	BORNO STATE GOVERNMENT, NIGERIA 1990: North East And Zone Development Programme	Blätter 68 NW2: C. Zinser NW3: M. Renkel NW4: F. Etzel NE1: A. Röpke NE2: E. Dreher NE3: K. Pisarew NE4: C. Reelfs SW1: A. Bachmann SW2: U. Hirt SE1: A. Reiprich SE2: D. Eisenhut Blätter 69 NW1: I. May NW2: C. Rehberg NW3: C. Pfahls NW4: F. Schramm NE3: A. Fengler SW1: R. Sievert SW2: T. van den Boom SE1: M. Gumnior	I. Franke-Scharf
	Stehende Gewässer	was90.shp	Flächen	ID: Gewaesser: permanent, periodisch						
	Fließgewässer	flu90.shp	Linien	ID: Fluss: perennierend, periodisch, kanalisiert, Kanal; Name						
	Siedlungen	sie90.shp	Flächen	ID: Siedlung: permanent, saisonal, moderne Anlage, Projektfläche; Name; Ethnie						
	Verkehr	ver90.shp	Linien	ID: Verkehr: Strasse, Weg						
	Regenzeit-anbau	reg90.shp	Flächen	ID: Regenzeit-anbau: aktuell, Brache;						
	Trockenzeit-anbau	tro90.shp	Linien	ID: Trockenzeit-anbau: Damm deutlich, mittel, undeutlich						
	s. o. (Linien als Flächen gepuffert)	tro90-buf50m.shp	Flächen							
	Sonstiger Anbau	son90.shp	Flächen	ID: Anbau: Reis, Flussbewaesserung, Flutfolge						
	Bewässerung	bew90.shp	Flächen	ID: Bewaesserung: überbaut, potentiell, vorbereitet						
	Vegetation	veg90.shp	Flächen	ID: Vegetation: dicht, mittel, vereinzelt						
	Deflationsflächen	def90.shp	Flächen							

Anhang

Datenart	Thema	Dateiname	Form	Attribute	Abdeckung	Originalmaßstab	Projektion	Quelle	Digitalisierung	Bearbeitung
Luftbildkartierung 1957	Sediment	sed57.shp	Flächen	ID; Sediment: Sand, Ton, Uebergangsbereich	engere Firgi-Region (Nigeria)	1 : 25 000 (Luftbilder)	Geographisch [dd]	LAND & SURVEY MAIDUGURI 1957	Blätter 68NE3, 68NE4 komplett; 68NW2, 68NW4, 68NE1, 68NE2, 68SW2, 68SE1, 68SE2, 69NW1, 69NW3, 69SW1 teilweise	I. Franke-Scharf
	Stehende Gewässer	was57.shp	Flächen	ID; Gewaesser: permanent, periodisch						
	Fließ-gewässer	flu57.shp	Linien	ID; Fluss: perennierend, periodisch						
	Siedlungen	sie57.shp	Flächen	ID; Siedlung: permanent, saisonal						
	Verkehr	ver57.shp	Linien	ID; Verkehr: Weg						
	Regenzeit-anbau	reg57.shp	Flächen	ID; Regenzeit-anbau: aktuell, Brache						
	Trockenzeit-anbau	tro57.shp	Linien	ID; Trockenzeit-anbau: Damm deutlich, mittel, undeutlich						
	s. o. (Linien als Flächen gepuffert)	tro57-buf50m.shp	Flächen							
	Sonstiger Anbau	son57.shp	Flächen	ID; Anbau: Flutfolge						
	Vegetation	veg57.shp	Flächen	ID; Vegetation: dicht, mittel, vereinzelt						
Deflations-flächen	def57.shp	Flächen								
Satellitenbildkartierung 1995/96	Landbe-deckung und -nutzung	saisonal.img	Flächen (Raster)	Sediment, Gewässer, Landwirtschaft, Vegetation, Deflation, Brandflächen	engere Firgi-Region (Nigeria)	ca. 1 : 50 000 (SPOT-XS-Satellitenszenen)	Geographisch [dd]	SPOT-XS-Satellitenszenen vom 9.4.86, 15.1.95, 6.9.95, 8.10.95, 29.11.95, 16.1.96		I. Franke-Scharf
Vegetationsindizes	8.12.72, 18.2.73, 7.3.75, 19.3.76, 13.12.78, 13.3.79, 9.4.86, 27.2.88,	ndvi72.img ...	Flächen (Raster)	ID; Vegetation: dicht, mittel, vereinzelt	engere Firgi-Region (Nigeria)	ca. 1 : 50 000 bis 1 : 250 000 (SPOT-XS-, Landsat-TM, Landsat-MSS-Satellitenszenen)		Satellitenszenen SPOT-XS vom 9.4.86, 15.1.95, 6.9.95, 8.10.95, 29.11.95, 16.1.96, Landsat-TM vom 27.2.88, 4.11.92, Landsat-MSS vom 8.12.72, 18.2.73, 7.3.75, 19.3.76, 13.12.78, 13.3.79		I. Franke-Scharf
Vegetationsveränderungskarten	4.11.92, 15.1.95, 6.9.95, 8.10.95, 29.11.95, 16.1.96	cd-ndvi72-79.img ...	Flächen (Raster)	ID; Veränderungen: ohne - immer keine/ immer wenig/ immer mittel, mit - leichte/ mittlere/ starke Abnahme, leichte/ mittlere/ starke Zunahme	engere Firgi-Region (Nigeria)					

Anmerkung: Aufgelistet sind nur die wichtigsten Gesamtergebniskarten ohne Zwischenschritte

A.1.3: Verzeichnis der wichtigsten sonstigen digital vorliegenden Daten

Datenart	Thema	Quelle	Bearbeitung
Klimadaten	jährliche, monatliche, tägliche Niederschlagswerte für Stationen im Tschadbecken (sehr unterschiedliche Zeiträume)	TSCHIERSCHKE, K. 1997: Statistische Analyse und Interpretation langjähriger Niederschlags- und Temperaturdaten von Klimastationen im Tschadseegebiet Eigene Abschriften	K. Tschierschke I. Franke-Scharf
Seespiegelstände	monatliche und z.T. tägliche Pegelstände des Tschadsees an verschiedenen Meßstellen (sehr unterschiedliche Zeiträume)	unterschiedliche Literaturangaben und Kopien der Chad Basin Development Authority	M. Gumnior E. Becker I. Franke-Scharf
Paßpunkt- und Referenzflächen-dateien	Eindeutige Geländepunkte zur Entzerrung und Referenzflächen zur Klassifizierung und Bewertung von Fernerkundungsdaten	Eigene Geländeaufnahmen	I. Franke-Scharf
	Bodenkundliche Profilpunkte der Firgiregion (NE-Nigeria)	Geländeaufnahmen T. Skorupinski	T. Skorupinski I. Franke-Scharf
	Ethnologische Punktaufnahmen mit Zusatzinformation im Tschadseebereich	Geländeaufnahmen H. Kirscht	H. Kirscht I. Franke-Scharf
	Lage der fotografischen Aufnahmen mit zusätzlichen Angaben, Verknüpfung zu Bilddaten gewährleistet	Eigene Erstellung	I. Franke-Scharf
Fotografische Geländeaufnahmen	Bilddateien der wichtigsten Geländefotografien mit geographischer Referenz	Eigene Aufnahmen	M. Gumnior I. Franke-Scharf

Ina Franke-Scharf

Institut für Physische Geographie
Universität Frankfurt
Senckenberganlage 36
60325 Frankfurt
Tel./Fax: 069/798-28411
e-mail: Franke@em.uni-frankfurt.de

Persönliche Angaben

Geburtsdatum: 18. Juli 1968
Geburtsort: Leipzig
Staatsangehörigkeit: deutsch
Familienstand: verheiratet

Ausbildung

1974 - 1982 Oberschule, Leipzig
1982 - 1987 Abitur Schillerschule, Frankfurt am Main
1988 - 1994 Studium an der Universität, Frankfurt am Main
Physische Geographie, Nebenfächer: Geologie, Chemie
Abschluß: Diplom mit Auszeichnung bei Prof. Dr. W. Andres
Thema der Diplomarbeit: "Versuch einer Landnutzungskartierung
durch multitemporale Landsat-TM-Auswertung.- Ein Beispiel aus
dem Hessischen Ried"

Praktika

März 1991 Technischer Umweltschutz beim Technischen Überwachungs-
verein Hessen GmbH, Abteilung Umweltschutz
Juli - August 1991 Nationalpark Berchtesgaden im Rahmen des BMFT-Projektes
"Bodenforschung im deutschen Alpenraum"
März - Mai 1993 Institut für Angewandte Geodäsie, Frankfurt,
Abteilung Photogrammetrische Forschung

Auslandserfahrung

Aug. 1984 - Feb. 1985 El Camino High School, Sacramento, Kalifornien/USA
Sep. 1987 - Juli 1988 Lyon/Frankreich, Studien an der Universität Lyon II
Aug. - Okt. 1995, Forschungsaufenthalte in Nigeria
Jan. - Feb. 1997
Okt. 1998, Feb. 1999 Forschungsaufenthalte in Burkina Faso und Benin

Berufserfahrung

seit 1995 Wissenschaftliche Mitarbeiterin im Sonderforschungsbereich 268
"Kulturentwicklung und Sprachgeschichte im Naturraum
Westafrikanische Savanne"
am Institut für Physische Geographie der Universität Frankfurt
Themenschwerpunkte: Fernerkundung, Geographische
Informationsverarbeitung

- FRANKE, I. (1994): Versuch einer Landnutzungsklassifizierung durch Landsat-TM-Auswertung.- Ein Beispiel aus dem Hessischen Ried; Diplomarbeit Universität Frankfurt [unveröff.].
- STURM, H.-J., FRANKE, I., KIRSCHT, H., ATAHOLO, M. & SKORUPINSKI, T. (1996): Natural environment and land use in the Chad Basin, NE-Nigeria - Preliminary results of an interdisciplinary research.- Ber. Sonderforschungsbereich 268, 8: 335-348; Frankfurt.
- FRANKE-SCHARF, I. (1997): Landnutzungswandel im nigerianischen Tschadbecken. Kartierungen aus Luftbildern von 1957 bis 1990.- Ber. Sonderforschungsbereich 268, 9: 35-51; Frankfurt.
- SKORUPINSKI, T. & FRANKE-SCHARF, I. (1997): Auswirkungen anthropogener Nutzung auf Böden im nigerianischen Tschadbecken. Luftbildkartierungen von Deflationsschäden im Marte Local Government.- Ber. Sonderforschungsbereich 268, 9: 53-66; Frankfurt.
- FRANKE-SCHARF, I., KRINGS, M., PLATTE, E. & THIEMEYER, H. (2000): Neuland am Tschadsee – dauerhafte Nutzungspotentiale?- Geographische Rundschau 11: 28-34; Braunschweig.
- FRANKE-SCHARF, I. (2001): Integration of land use and related information within a Geographic Information System of the Chad Basin in NE-Nigeria.- Ber. Sonderforschungsbereich 268, 14: 105-114; Frankfurt.
- FRANKE-SCHARF, I. & SKORUPINSKI, T. (2001): Mapping of desertification areas by satellite image interpretation and soil survey.- Ber. Sonderforschungsbereich 268, 14: 115-121; Frankfurt.
- HAHN-HADJALI, K., BRAUN-YAO, M., FRANKE-SCHARF, I. & FRITSCHER, N. (2001): Interdépendance entre le potentiel d'exploitation et la structure d'habitat dans la région de l'Atakora.- Ber. Sonderforschungsbereich 268, 14: 197-207; Frankfurt.
- FRANKE-SCHARF, I. (2001): Dry-season farming areas in the Nigerian Chad Basin mapped from aerial photographs.- Ber. Sonderforschungsbereich 268, 17: 61-71; Frankfurt.

Landbedeckung und Landnutzung Tschadbecken, Nordost-Nigeria

1990

Beilagenkarte 1:
FRANKE-SCHARF, Ina (2000):
Landschafts- und Landnutzungswandel
im nigerianischen Tschadbecken

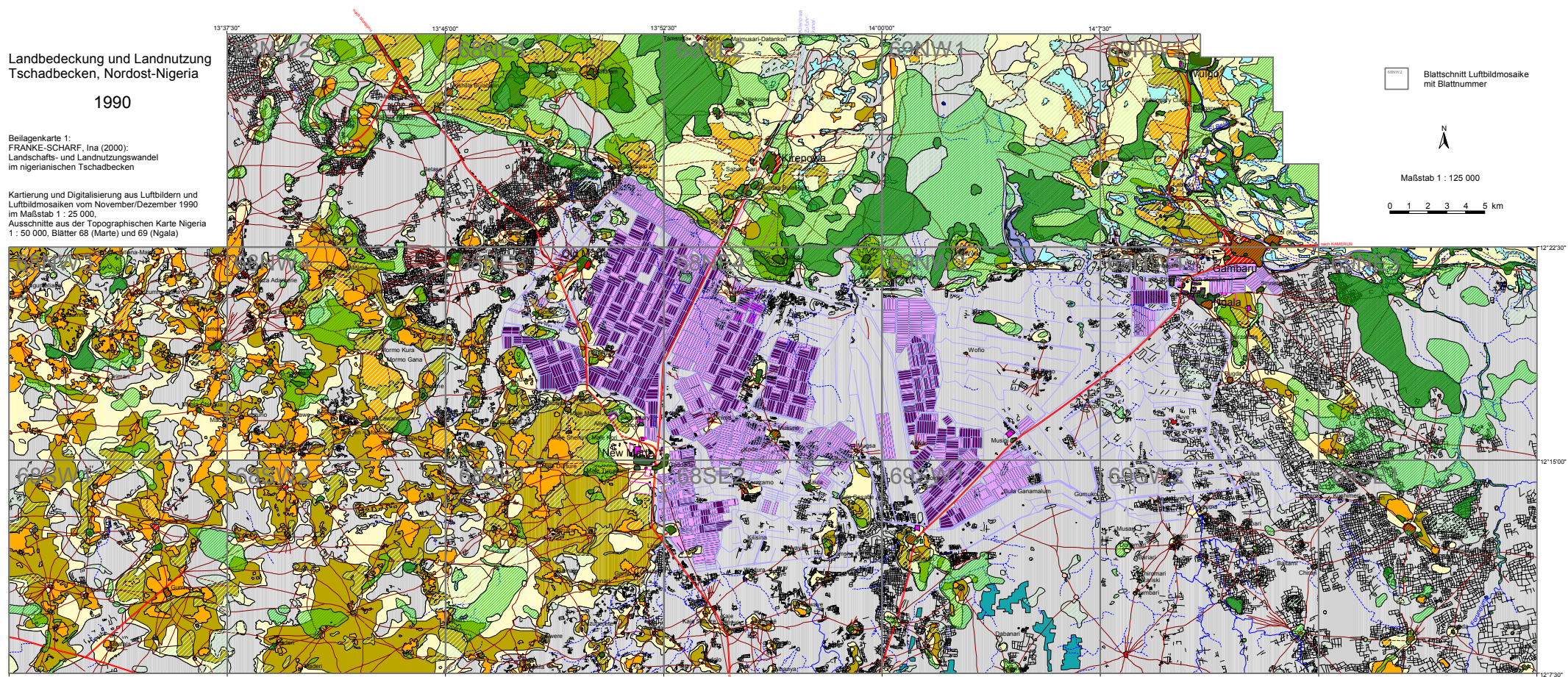
Kartierung und Digitalisierung aus Luftbildern und
Luftbildmosaiken vom November/Dezember 1990
im Maßstab 1 : 25 000,
Ausschnitte aus der Topographischen Karte Nigeria
1 : 50 000, Blätter 68 (Marte) und 69 (Ngala)

Blattschnitt Luftbildmosaik
mit Blattnummer



Maßstab 1 : 125 000

0 1 2 3 4 5 km



Sediment

- Sand
- Ton

Gewässer

- Wasserfläche
- Fluß
- Gewässerrinne
- Kanal

Bebauung

- Siedlung permanent
- saisonal, verlassen
- moderne Anlage
- Projektfläche

Verkehr

- Straße (befestigt)
- Piste, Weg, Viehweg

Landwirtschaft

- Regenzeitanbau**
- aktuell
- ehemalig (Brache verschieden alt)

Trockenzeitanbau

- Dämme

Sonstiger Anbau

- Reis
- Flußbewässerung
- 'Flutfolgenbau'

Bewässerungsanbau (großflächig)

- Potentielle Anbaufläche
- Potentielle Anbaufläche, während Aufnahme für Anbau vorbereitet
- Potentielle Anbaufläche, für Anbau vorbereitet

Vegetation

- Gehölzverbreitung dicht
- mittel
- vereinzelt

Landbedeckung und Landnutzung Tschadbecken, Nordost-Nigeria

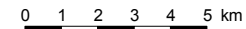
1957

Beilagenkarte 2:
FRANKE-SCHARF, Ina (2000):
Landschafts- und Landnutzungswandel
im nigerianischen Tschadbecken

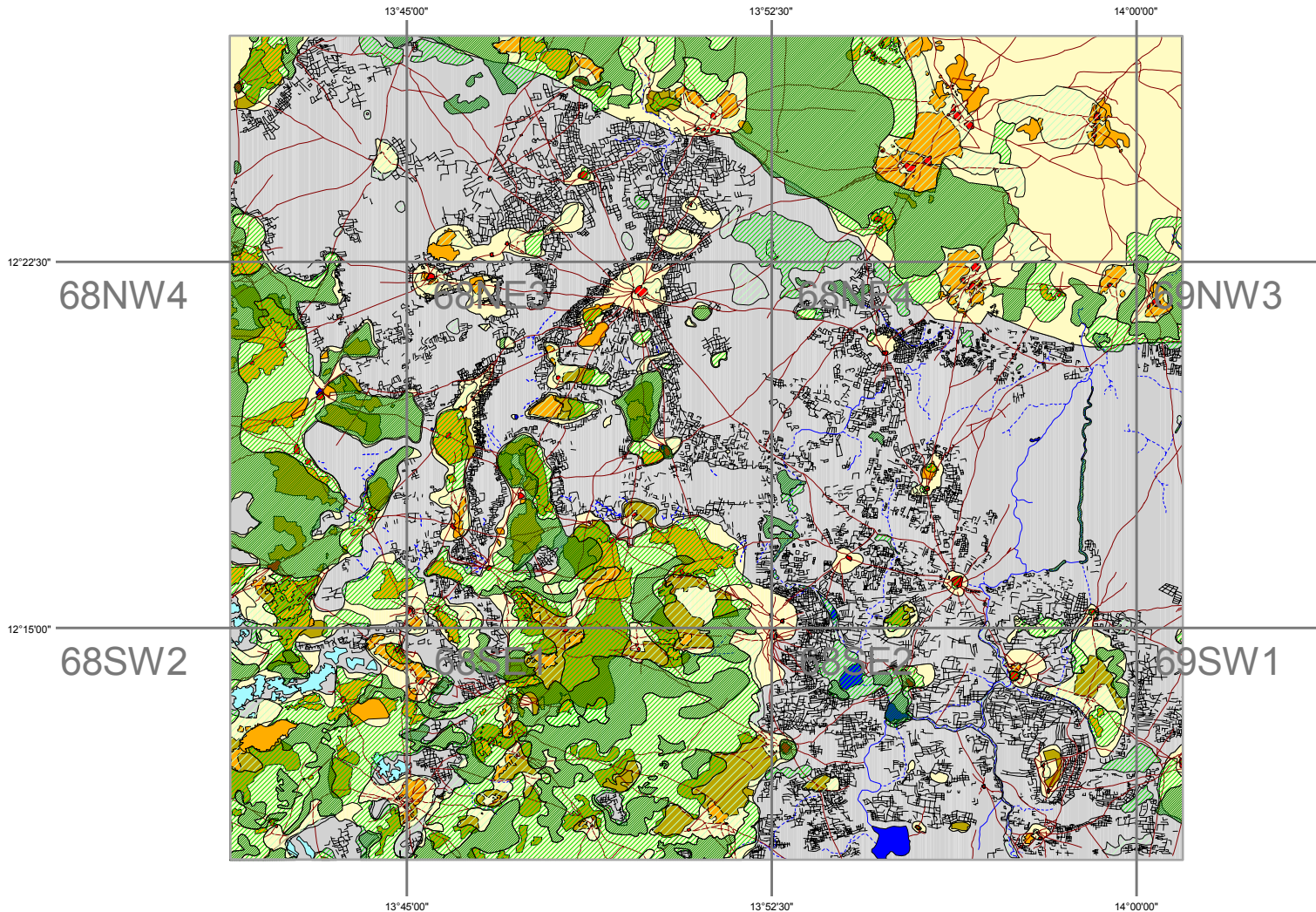
Kartierung und Digitalisierung aus Luftbildern
vom Oktober 1957 im Maßstab ca. 1 : 25 000,
Ausschnitte aus der Topographischen Karte Nigeria
1 : 50 000, Blätter 68 (Marte) und 69 (Ngala)



Maßstab 1 : 125 000



Blattschnitt der Luftbildmosaike 1990
mit Blattnummer zum Vergleich



Sediment

- Sand
- Ton

Gewässer

- Wasserfläche
- Fluß
- Gewässerrinne

Bebauung

- Siedlung
- permanent
 - saisonal, verlassen

Verkehr

- Piste, Weg, Viehweg

Landwirtschaft

- Regenzeitanbau
- aktuell
 - ehemalg
(Brache verschieden alt)

Trockenzeitanbau

- Dämme
- Sonstiger Anbau
- 'Flutfolgeanbau'

Vegetation

- Gehölzverbreitung
- dicht
 - mittel
 - vereinzelt