

Martin Kappas

**Naturraumpotential und Landnutzung
im Oudalan – eine Fallstudie
aus dem Sahel Burkina Fasos
zur Anwendbarkeit von
Fernerkundungsmethoden im
regionalen Maßstab**

**ERDSICHT - EINBLICKE IN GEOGRAPHISCHE
UND GEOINFORMATIONSTECHNISCHE ARBEITSWEISEN**

Schriftenreihe des Geographischen Instituts der Universität Göttingen,
Abteilung Kartographie, GIS und Fernerkundung

Herausgegeben von Prof. Dr. Martin Kappas

ISSN 1614-4716

Martin Kappas

**NATURRAUMPOTENTIAL UND LANDNUTZUNG
IM OUDALAN – EINE FALLSTUDIE
AUS DEM SAHEL BURKINA FASOS
ZUR ANWENDBARKEIT VON
FERNERKUNDUNGSMETHODEN IM
REGIONALEN MAßSTAB**

ibidem-Verlag
Stuttgart

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Dieser Titel ist als Printversion im Buchhandel
oder direkt bei *ibidem* (www.ibidem-verlag.de) zu beziehen unter der

ISBN 978-3-89821-664-7.

∞

ISSN: 1614-4716

ISBN-13: 978-3-8382-5664-1

© *ibidem*-Verlag
Stuttgart 2012

Alle Rechte vorbehalten

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und elektronische Speicherformen sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in or introduced into a retrieval system, or transmitted, in any form, or by any means (electronical, mechanical, photocopying, recording or otherwise) without the prior written permission of the publisher. Any person who does any unauthorized act in relation to this publication may be liable to criminal prosecution and civil claims for damages.

VORWORT DES HERAUSGEBERS

Die Reihe „Erdsicht – Einblicke in geographische und geoinformationstechnische Arbeitsweisen“ soll Forschungsergebnisse und Arbeiten im Bereich der Erdsystemforschung vorstellen. Die Betrachtung der Erde als System ist als Inhalt heutiger und zukünftiger Geowissenschaftlicher Gemeinschaftsforschung dringend gefordert. Die Herausforderungen liegen zum einen in der Erforschung der vielfältigen Interaktionen zwischen den verschiedenen Teilbereichen des Systems Erde. Hierzu zählen Wechselwirkungen zwischen fester Erde und Atmosphäre, zwischen der Landoberfläche und der Hydrosphäre oder zwischen Biosphäre, Hydrosphäre und Atmosphäre. Der Mensch steht dabei mit seinen zentralen Nutzungsansprüchen (Ernährung – landwirtschaftliche Nutzung – Ressourcennutzung) im Mittelpunkt eines vielfach vernetzten Erdsystems. Der Mensch verändert Landschaften und Atmosphäre und greift somit in alle Skalenbereiche des Erdsystems ein. Insofern müssen diese Veränderungen beobachtet und bewertet werden, damit Konzepte für ein nachhaltiges Erdsystemmanagement auf den unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen entwickelt werden können. Die neuen Geoinformationstechniken (Geostatistik; Geographische Informationssysteme – GIS; luft- und Satellitengestützte Fernerkundungssysteme – Remote Sensing) helfen dabei das System Erde zu beobachten und zu begreifen. Ohne diese Technik ist eine ganzheitliche Betrachtung der Erde und eine flächenhafte Bereitstellung von Informationen über das Erdsystem nicht möglich.

Nach der Dürrekatastrophe von 1969 bis 1973 wurde von vielen Stellen versucht, sahelische Ökosystemtypen zu beschreiben und ihre Wirkungsmechanismen zu erforschen. Die vorliegende Studie beschäftigt sich mit dem Naturraumpotenzial und der Landnutzung innerhalb eines Wassereinzugsgebiets im Oudalan, der Sahelprovinz von Burkina Faso. Unter dem Ansatz einer Naturraumpotenzialanalyse wurde neben der Erfassung der sahelischen Landschaftseinheiten mit ihrer Vegetation und ihren Böden ein Schwerpunkt auf die Bewertung des Weidewertes bzw. der Produktivität der Landschaftseinheiten gelegt. Neben umfangreichen Geländearbeiten wurde als weiterer Aspekt der Nutzen von Fernerkundungsdaten für den Raum untersucht. Hier sei anzumerken, dass bis weit in die 90er Jahre hinein (1998) für die meisten westafrikanischen Länder nur Fernerkundungsdaten von wenigen Sensoren (Landsat TM, Spot, NOAA-AVHRR) vorlagen. Oft wurden nur wenige Satellitenaufnahmen archi-

viert, da diese Länder finanziell nicht in der Lage waren, die damals noch recht hohen Anschaffungskosten zu tragen. Die Anwendbarkeit von Fernerkundungsmethoden im regionalen Maßstab besitzt deshalb damals wie heute einen hohen Forschungsbedarf. Ein Forschungsbedarf für die physische Geographie ergibt sich zum Beispiel konkret aus folgenden Fragen:

- Gibt es technische Möglichkeiten, die schnelle Änderung des Vegetationsbildes auf großen Flächen im jahreszeitlichen Wechsel und auch von Jahr zu Jahr hinreichend genau zu erfassen und kurzfristige Prognosen zu erstellen?
- Können bewertete Aussagen zur Biodiversität sahelischer Landschaften gemacht werden?
- Wie eng ist der Zusammenhang von Vegetationstyp und Boden bzw. dem Bodenwasserhaushalt?
- Welchen Gesetzmäßigkeiten ist der Wasserhaushalt sahelischer Böden unterworfen? Wie verhält er sich in Feuchtjahren, wie in Trockenjahren?

Der Fragenkatalog ließe sich vor dem Hintergrund weiter wachsender Bevölkerungszahlen in den westafrikanischen Ländern fortsetzen. Vor dem Hintergrund neuer technischer Möglichkeiten, insbesondere im Bereich der Fernerkundung (höher auflösende Sensoren, größere Anzahl zur Verfügung stehender Sensoren), gibt es heute und in Zukunft neue Möglichkeiten der Naturraumerfassung und Ressourcenbewertung. Die vorliegende Fallstudie beinhaltet Testflächen, die für eine Langzeitbetrachtung von Landschaftseinheiten angelegt wurden und bietet eine Basis für eine erneute Bearbeitung dieser fragilen Landschaften unter dem Aspekt der „Global Change“ Forschung.

Meiner Mitarbeiterin Katrin Kranz danke ich für die umfassende Bearbeitung des Manuskripts zum Abdruck in der Schriftenreihe „Erdsicht“.

Martin Kappas

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort des Herausgebers	V
Inhaltsverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XVII
I Fragestellung und Zielsetzung der Untersuchung.....	1
1.1 Aufbau der Arbeit	2
1.2 Einbindung der Arbeit in den Stand der Forschung.....	3
II Der Oudalan als Naturraum - Physisch-geographische Gegebenheiten im Untersuchungsraum.....	9
2.1 Geologie.....	12
2.2 Geomorphologische Landschaftseinheiten im Untersuchungsraum.....	18
2.2.1 Dünenysteme und Aufsandungen (D, TS, AS)	19
2.2.2 Tal- bzw. Drainagesysteme (TD).....	24
2.2.3 Rumpfflächenelemente (R).....	27
2.2.4 Die Verschachtelung der einzelnen Landschaftseinheiten	31
2.3 Böden.....	33
2.3.1 Fersiallitische Böden (Sols Fersiallitiques)	35
2.3.2 Halomorphe Böden (Sols Halomorphes).....	36
2.3.3 Hydromorphe Böden (Sols Hydromorphes)	37
2.3.4 Subaride Braunerden (Sols Isohumiques).....	37
2.4 Klima	40
2.4.1 Paläoklimatologische und makroklimatische Verhältnisse	40
2.4.2 Klimatologische Daten.....	44
2.4.3 Temperaturen	47
2.4.4 Luftfeuchte	50
2.4.5 Wind.....	54
2.4.6 Andauer der Einstrahlung und Globalstrahlung	55
2.4.7 Evapotranspiration	57
2.4.8 Niederschlag.....	62
2.5 Hydrologie	77
2.5.1 Hydrogeologische Gegebenheiten	79
2.5.2 Oberflächengewässer und Gerinnesystem	80
2.5.3 Abfluss- und Wasserstandswerte des Gorouol	82
2.5.4 Untersuchungen zum Wasserhaushalt sahelischer Bodentypen	88
2.6 Vegetation.....	112
2.6.1 Vegetationseinheiten auf Dünen und Aufsandungen.....	116
2.6.2 Vegetationseinheiten auf lateritischen Flächen	116
2.6.3 Vegetationseinheiten im Bereich anstehender Gesteinskomplexe und auf ebenen Fußflächen	117
2.6.4 Vegetationseinheiten im Überschwemmungsbereich des Gorouol und seiner Zuflüsse	117

2.7	Bevölkerung und Bevölkerungsentwicklung	120
2.8	Grundzüge der Agrar- und Weidewirtschaft im Oudalan	122
2.8.1	Agrarwirtschaft	122
2.8.2	Viehwirtschaft	126
III	Methoden zur Erfassung von Naturraumpotential und Landnutzung.....	135
3.1	Gelände- und Laborarbeit.....	136
3.2	Testflächen.....	142
3.2.1	Testfläche 1 (T1, Landschaftseinheit D1).....	143
3.2.2	Testfläche 2 (T2, Landschaftseinheit D3).....	147
3.2.3	Testfläche 3 (T3, Landschaftseinheit D2).....	148
3.2.4	Testfläche 4 (T4, Landschaftseinheit TD1)	150
3.2.5	Testfläche 5 (T5, Landschaftseinheit TD1)	153
3.2.6	Testfläche 6 (T6, Landschaftseinheit TD1 mit Übergang zu PG/RL). 157	
3.2.7	Testfläche 7 (T7, Landschaftseinheit PG)	158
3.2.8	Testfläche 8 (T8, Landschaftseinheit PG/RL)	160
3.2.9	Testfläche 9 (T9, Landschaftseinheit RL/PG)	163
3.2.10	Testfläche 10 (T10, Landschaftseinheit PG)	164
3.2.11	Testfläche 11 (T11, Landschaftseinheit PG/RI)	165
3.2.12	Testfläche 12 (T12, Landschaftseinheit PG)	167
3.2.13	Testfläche 13 (T13, Landschaftseinheit PG)	168
3.2.14	Testfläche 14 (T14, Landschaftseinheit PG, AS)	170
3.2.15	Testfläche 15 (T15, Landschaftseinheit PG)	172
3.2.16	Testfläche 16 (T16, Landschaftseinheit RL)	173
3.2.17	Testfläche 17 (T17, Landschaftseinheit PG)	175
3.2.18	Testfläche 18 (T18, Landschaftseinheit TD2)	176
3.2.19	Testfläche 19 (T19, Landschaftseinheit TD2)	178
3.2.20	Testfläche 20 (T20, Landschaftseinheit TD1)	181
3.2.21	Testfläche 21 (T21, Landschaftseinheiten TD1, TD2, D1)	183
3.2.22	Testfläche 22 (T22, Landschaftseinheit RGs, PG)	184
3.2.23	Testfläche 23 (T23, Landschaftseinheit RGs, PG)	186
3.2.24	Testfläche 24 (T24, Landschaftseinheit TD2)	187
3.2.25	Testfläche 25 (T25, Landschaftseinheit RI).....	189
3.2.26	Testfläche 26 (T26, Landschaftseinheit TD3)	192
3.2.27	Testfläche 27 (T27, Landschaftseinheit RI, PG)	194
3.2.28	Testfläche 28 (T28, Landschaftseinheit D1).....	195
3.3	Luftbildinterpretation.....	200
3.3.1	Luftbilder des Untersuchungsgebiets.....	204
3.3.2	Luftbildanalysen im Maßstab 1 : 50.000	205
3.3.3	Luftbildanalysen im Maßstab 1 : 20.000	208
3.3.4	Luftbildanalysen im Maßstab 1 : 10.000	218
3.4	Satellitenbildinterpretation - Grundlegende Gedanken.....	222
3.4.1	Vorhandene Datenbasis multitemporaler Satellitendaten (NOAA, Landsat TM, Spot XS)	235
3.4.2	Beispiele operationeller Datenauswertung von NOAA-Daten.....	238
3.5	Satellitenbilder ausgewählter Sensoren zur regionalen Analyse.....	255

3.5.1	Aufbereitung der Daten.....	256
3.5.2	Spektrale Signaturen	261
3.6	Ausgewählte Methoden zur digitalen Klassifikation der Satellitendaten im regionalen Maßstab.....	276
3.6.1	Klassische Klassifizierungsansätze.....	278
3.6.2	Berechnung von Indizes unterschiedlicher Empfindlichkeit für spezielle Bedeckungsklassen.....	289
3.6.3	Linear Spectral Unmixing-Analyse	325
IV	Kombinierte Anwendung der vorgestellten Methoden.....	347
V	Abschließende Bewertung der Anwendung regionaler Fernerkundung und der dargestellten Methoden	389
	Literaturverzeichnis.....	395
	Anhang	403

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1:	Lage des Untersuchungsgebiets	11
Abb. 2:	Geologische Karte von Burkina Faso	12
Abb. 3:	Geologische Situation im Wassereinzugsgebiet des Gorouol	17
Abb. 4:	Aspekt der Landschaftseinheit D 1	20
Abb. 5:	Aspekt der Landschaftseinheit D 2	21
Abb. 6:	Aspekt der Landschaftseinheit D 3	22
Abb. 7:	Aspekt der Landschaftseinheit TS	23
Abb. 8:	Aspekt der Landschaftseinheit AS	23
Abb. 9:	Aspekt der Landschaftseinheit TD1	25
Abb. 10:	Aspekt der Landschaftseinheit TD2	26
Abb. 11:	Aspekt der Landschaftseinheit TD3	27
Abb. 12:	Aspekt der Landschaftseinheit RI	28
Abb. 13:	Aspekt der Landschaftseinheit RGs	29
Abb. 14:	Aspekt der Landschaftseinheit RL	30
Abb. 15:	Aspekt der Landschaftseinheit PG	31
Abb. 16:	Etappen sukzessiver Reliefentwicklung	32
Abb. 17:	Die Verschachtelung der Landschaftseinheiten im Untersuchungs- gebiet	33
Abb. 18:	Bodentypen im Untersuchungsgebiet	39
Abb. 19:	Klimatische Oszillationen der letzten 35.000 Jahre	42
Abb. 20:	Atmosphärische Zirkulation im westafrikanischen Raum	44
Abb. 21:	Monatsmitteltemperaturen Station Gorom-Gorom	48
Abb. 22:	Dekadenwerte der Lufttemperatur, 01.04.1995 bis 31.10.1995, Station Dori	49
Abb. 23:	Dekadenwerte der Beziehung Niederschlag zu Boden-/Lufttempera- turen	50
Abb. 24:	Mittelwerte des Wasserdampfdrucks und der relativen Feuchte, Station Gorom-Gorom	51
Abb. 25:	Typische Kurven der Temperatur und Luftfeuchte im Jahresverlauf 1995, Station Gorom-Gorom	52
Abb. 26:	Verhältnis Insolationsdauer und Temperatur zum Niederschlagsgang 1995, Station Dori	57
Abb. 27:	Dekadenwerte der Evapotranspiration, Lufttemperatur, rel. Feuchte und des Niederschlags, Station Dori	60
Abb. 28:	Schwankungen der täglichen Evapotranspiration im Zeitraum Juni- Oktober 1995 für die Region Ouagadougou, Gorom-Gorom und Mar- koye	61
Abb. 29:	Verschiebung der Isohyeten im westafrikanischen Raum für die Zeit- räume 1950-1967 und 1968-1996	64
Abb. 30:	Verlauf der Isohyeten in Burkina Faso für die Normalperiode 1931- 1960	65

Abb. 31:	Verlauf der Isohyeten in Burkina Faso für die Normalperiode 1961-1990	66
Abb. 32:	Jahresniederschlagssummen an der Station Dori und 5jährig gleitendes Mittel.....	69
Abb. 33:	Agroklimatogramm der Station Dori im Jahr 1994.....	72
Abb. 34:	Agroklimatogramm der Station Dori im Jahr 1995.....	74
Abb. 35:	Agroklimatogramm der Station Dori im Jahr 1996.....	75
Abb. 36:	Mittlere Intensität der Niederschläge im Untersuchungsgebiet	76
Abb. 37:	Hydrogeologische Situation im Einzugsgebiet des Gorouol Ausschnitt aus der „Carte Hydrologique du Burkina Faso, 1 : 500.000, Feuille Dori, 1993	78
Abb. 38:	Oberflächengewässer im Wassereinzugsgebiet des Gorouol.....	81
Abb. 39:	Gullyerosion im Untersuchungsgebiet (Aufnahme Sept. 1995)	82
Abb. 40:	Schematische Darstellung von Überschwemmungsbereichen	83
Abb. 41:	Tägliche Abflusswerte und Wasserstände des Jahres 1984	85
Abb. 42:	Tägliche Abflusswerte und Wasserstände des Jahres 1990	86
Abb. 43:	Piezometerwerte Station Gorom-Gorom	87
Abb. 44:	Wassergehalt (Vol.-%) und pF-Kurven in den Texturen Sand, Lehm und Ton.....	89
Abb. 45:	Ansicht des Tensiometerstandortes TENSIO-1.....	94
Abb. 46:	Gemessene Wasserspannungskurven am Standort TENSIO-1 in den Tiefen 20, 50, 100, 150 und 200 cm im Jahr 1994.....	96
Abb. 47:	Gemessene Wasserspannungskurven am Standort TENSIO-1 in den Tiefen 20, 50, 100, 150 und 200 cm im Jahr 1995.....	100
Abb. 48:	Gemessene Wasserspannungskurven am Standort TENSIO-1 in den Tiefen 20, 50, 100, 150 und 200 cm im Jahr 1996.....	102
Abb. 49:	Veränderung der pF-Werte in Abhängigkeit von Zeit und Bodentiefe eines Luvic Arenosols (Standorttyp Dünentop, TENSIO-1): Vergleich der Bodenfeuchteformen in den Jahren 1994, 1995 und 1996.....	104
Abb. 50:	Gemessene Wasserspannungskurven am Standort TENSIO-3 in den Tiefen 20, 50, 80 cm im Jahr 1994.....	107
Abb. 51:	Gemessene Wasserspannungskurven am Standort TENSIO-3 in den Tiefen 20, 50, 80 cm im Jahr 1995	108
Abb. 52:	Gemessene Wasserspannungskurven am Standort TENSIO-3 in den Tiefen 20, 50, 80 cm im Jahr 1996	109
Abb. 53:	Veränderung der pF-Werte in Abhängigkeit von Zeit und Bodentiefe eines Vertisols (Standorttyp bas fond, TENSIO-3): Vergleich der Bodenfeuchteformen in den Jahren 1994, 1995 und 1996.....	110
Abb. 54:	Vorherrschende Vegetationstypen in Burkina Faso	114
Abb. 55:	Profilskizzen verschiedener Savannenformationen	115
Abb. 56:	Flussdiagramm Gelände- und Laborarbeit	137
Abb. 57:	Typische Degradationssequenz im Untersuchungsraum.....	139
Abb. 58:	Lage der Testflächen T1 bis T28 im Untersuchungsgebiet.....	145
Abb. 59:	Landschaftsprofil mit der Lage der Testflächen (T1-T10) und Luftbildausschnitt 1995	156

Abb. 60:	Lage der Testfläche 25 im Relief	192
Abb. 61:	Aspekt der Testfläche 26 im September 1995	193
Abb. 62:	Aspekt der Testfläche 28 im September 1995	196
Abb. 63:	Flussdiagramm zur Ableitung des Landeignungstyps.....	199
Abb. 64:	Schätzskala mit Prozentangaben und mit Braun-Blanquet-Zahlen zur Bestimmung von Deckungsgraden	204
Abb. 65:	Geomorphologische Landschaftseinheiten der Testregion Großraum Saouga als Resultat der Luftbildinterpretation des Modells 1981 - Bildpaar 2154/2155, M = 1 : 50.000	206
Abb. 66:	Originalluftbild, deckungsgleich mit Kartenausschnitt der Abb. 65....	207
Abb. 67:	Luftbildinterpretation der Testregion Ménégou für das Jahr 1981 im Maßstab 1 : 20.000	210
Abb. 68:	Luftbildinterpretation der Testregion Ménégou für das Jahr 1995 im Maßstab 1 : 20.000	211
Abb. 69:	Luftbildinterpretation der Testregion Saouga für das Jahr 1981 im Maßstab 1 : 20.000	216
Abb. 70:	Luftbildinterpretation der Testregion Saouga für das Jahr 1995 im Maßstab 1 : 20.000	217
Abb. 71:	Luftbildausschnitt Region Saouga im Maßstab 1 : 10.000	220
Abb. 72:	Interpretationsskizze Region Saouga im Maßstab 1 : 10.000	221
Abb. 73:	Mosaik eines heterogenen Landschaftsausschnitts in der Abbildung durch einen Sensor	223
Abb. 74:	Typisches Reflexionsverhalten von grünen Blättern in Abhängigkeit von Pigment, Zellstruktur und Wassergehalt	226
Abb. 75:	Typische Reflexionskurven für Vegetation und trockenen Boden im Vergleich zur Aufzeichnung der Landsat TM-Kanäle 1 bis 7 und zugehöriger Wasserabsorption	227
Abb. 76:	Spektrale Reflexion von Sandböden mit unterschiedlichem Feuchtegehalt.....	229
Abb. 77:	Reflexionsspektren von Goethit und Hämatit im Vergleich zum Tonmineral Illit	230
Abb. 78:	Reflexion im sichtbaren Rot und nahen Infrarot in Relation zum LAI .	232
Abb. 79:	Beziehung zwischen dem NDVI und dem LAI für unterschiedliche Bedeckungsgrade (C)	233
Abb. 80:	Mittlere räumliche Verteilung der NOAA-NDVI-Werte über Burkina Faso für den Zeitraum 1982 bis 1990	240
Abb. 81a:	Der jährliche Verlauf der NDVI-Werte eines Pixels aus NOAA-Daten.....	242
Abb. 81b:	NDVI-Werte und monatliche Niederschläge an der Station Dori, 1982 bis 1990.....	243
Abb. 82:	Mittlerer Verlauf der NDVI-Werte typischer sahelischer Gras- und Buschlandschaft im Norden Burkina Fasos	244
Abb. 83:	Aspekt der Testfläche zur Überprüfung des jährlichen Verlaufs der NDVI-Werte eines Pixels aus NOAA-Daten	245

Abb. 84:	Räumliche Verteilung der dekadischen NDVI-Werte in Burkina Faso im Jahr 1995.....	248
Abb. 85:	Spektralbänder eines Satelliten mit digitalen Zahlenwerten (DNs)	259
Abb. 86:	Kalibrierungsfunktion für die Relation von Strahlungseinheiten zu den DN's in den Satellitenbändern	260
Abb. 87:	Feldspektrometer IRIS RT (GER 2100).....	262
Abb. 88:	Spektralkurven von Oberflächeneinheiten im Untersuchungsraum.....	263
Abb. 89:	Reflexionskurven von Lateritflächen an unterschiedlichen Stellen im Untersuchungsgebiet (Aufnahme: September 1995).....	265
Abb. 90:	Aspekt der häufigsten Krustentypen im Untersuchungsgebiet	266
Abb. 91:	Erfassung der Oberbodenfeuchte (linkes Bild) und Oberflächenerosion (rechtes Bild) auf tonigem Substrat (Standort TENSIO-3, bas fond, Testfläche T24)	268
Abb. 92:	Spektren für Eisenoxyde (Bild oben) und Tonminerale (Bild unten) ..	269
Abb. 93:	Beispiel der SAM-Analyse im zweidimensionalen Fall	270
Abb. 94:	Jahresverlauf der NDVI-Werte für vier Testflächen im Niger.....	272
Abb. 95:	Mittlere NDVI-Werte und deren Streuung im Jahresverlauf für eine degradierte Buschbrache	273
Abb. 96:	Verhältnis von NDVI- und fPAR-Werten für vier Testflächen im Niger	275
Abb. 97:	Flussdiagramm der Fernerkundungsanalyse mittels klassischer Klassifizierungsansätze und Berechnung von Indizes	278
Abb. 98a:	Landsat TM-Composit 4-3-2 vom 29.6.1995 (links: Composite 4-3-2, rechts: klassifizierte Einheiten D1, D2, D3 (gelb) und AS, TS (blau))	283
Abb. 98b:	klassifizierte Flächen des Typs D1, D2, D3 (schwarze Pixel)	284
Abb. 98c:	klassifizierte Flächen des Typs AS, TS (schwarze Pixel)	285
Abb. 98d:	klassifizierte Flächen des Typs PG (schwarze Pixel).....	286
Abb. 98e:	klassifizierte Flächen des Typs TD1, TD2 (schwarze Pixel)	287
Abb. 99:	Darstellung der Bodenlinie im PVI	296
Abb. 100a:	mittlere Verteilung der Vegetationsbedeckung (TSAVI ₁ -Berechnung) (entspricht dem Ausschnitt der überwachten Klassifikation, siehe Abb. 98).....	312
Abb. 100b:	mittlere Verteilung der Vegetationsbedeckung (TSAVI ₁ -Berechnung) Testregion Saouga.....	313
Abb. 101:	Typische Oberbodenerosion im Untersuchungsraum mit Verringerung des Wurzelraumes durch Volumenabnahme des Pedons	314
Abb. 102:	Verhältnis von B-ICFn zu B-IC und Verteilung der Munsell-Farbwerte.....	318
Abb. 103:	Vorgehen zur Ableitung und Nutzung von Vegetationsindizes im Sahel.....	320
Abb. 104:	Vorgehen zur Ableitung und Nutzung der bodenbezogenen Indizes...	321
Abb. 105:	Verteilung der Landschafts- und assoziierten Vegetationseinheiten in den Jahren 1994 und 1995 basierend auf Landsat TM-Daten M : Landschaftseinheit TD, G : Landschaftseinheit PG	323
Abb. 106:	Verteilung von Bodeneinheiten basierend auf Spot XS-Daten	324

Abb. 107:	Makroskopische Mischung (Mixing) von unterschiedlichen Materialien	325
Abb. 108:	Lineares Mixing-Modell für ein einzelnes Pixel	326
Abb. 109:	Ablauf der durchgeführten „Spectral Mixture Analyse“	329
Abb. 110a:	Spektralkurven für unterschiedliche Quarzvarietäten.....	331
Abb. 110b:	Spektralkurven für unterschiedlich aufgeweitete Illit-Tonmineralstrukturen.....	332
Abb. 110c:	Spektralkurven für unterschiedliche Varietäten des Tonminerals Montmorillonit.....	333
Abb. 110d:	Spektralkurven für unterschiedliche Varietäten des Tonminerals Kaolinit	334
Abb. 110e:	Spektralkurven für unterschiedliche Gehalte von Kaolinit und Smektit.....	334
Abb. 110f:	Spektralkurven für Hämatit in Abhängigkeit von der Korngröße	335
Abb. 110g:	Gebildete Spektralbibliothek mit fünf Endmembern.....	336
Abb. 111:	Ergebnisse der MNF-Transformation im Dünenbereich der Region Saouga.....	338
Abb. 112a:	MNF-Band 1	339
Abb. 112b:	MNF-Band 3 („Rauschen“)	340
Abb. 113:	Darstellung von spektral reinen Pixeln nach der PPI-Analyse für den Ausschnitt aus Abb.113a und 113b	342
Abb. 114:	Pixel Purity Index Plot.....	343
Abb. 115:	Kleinräumiger Landsat TM-Ausschnitt des Dünenbereich Saouga PPI-Berechnung und Darstellung der Endmember sowie Verifizierung von Teilbereichen der Endmember über Luftbildausschnitte im Maßstab 1 : 10.000	345
Abb. 116:	Verteilung und Lage der Testregionen im Untersuchungsgebiet (Kartengrundlage: geokodiertes Landsat TM-Bild, Aufnahme 1995) .	349
Abb. 117:	Testregion A, Falschfarbendarstellung Spot XS (Regenzeitaufnahme)	354
Abb. 118:	Multiskalige Darstellung eines Teilbereichs der Testregion A (links: Luftbildausschnitt 1 : 20.000, Befliegung 1995, rechts: Spot PAN-Ausschnitt).....	355
Abb. 119:	Jahreszeitliche Variation der Phytomasse (in kg Trockenmasse / ha) für Schoenefeldia gracilis	358
Abb. 120:	Verteilung der Landschaftseinheiten in Testregion A nach überwachter Klassifikation.....	364
Abb. 121:	TSAVI-Vegetationsindex für Testregion A (nicht klassifiziert)	365
Abb. 122:	Nach Deckungsgraden klassifizierter TSAVI-Index (Klassenaufteilung nach Richter, 1997).....	366
Abb. 123:	Flussdiagramm zur Ableitung der Weidebewertung der Testregion A	369
Abb. 124:	Karte des Weidepotentials der Testregion A.....	370
Abb. 125:	Solitäre Acacia albida auf dem Dünentopbereich von Saouga (a), GPS-Messung (b) und Ergebnis eines Unmixing-Prozesses für Acacia albida (c)	373

Abb. 126:	Testregion B, Falschfarbendarstellung Spot XS (Regenzeitaufnahme)	376
Abb. 127:	Typische Bodenprofile auf den Glacisflächen östlich der Piste Gorom-Gorom - Saouga	378
Abb. 128:	Mittlerer B-IR-Index aller Trockenzeitszenen des Spot XS-Datensatzes in der Testregion B	380
Abb. 129:	Vegetationsbedeckung der Testregion B (Spot-XS-Aufnahme, August)	383
Abb. 130:	Karte der Degradationsstufen in der Testregion B	384
Abb. 131:	Grauwertbilder des Hue, Value und Chroma sowie abgeleitete Munsell-Farbwertverteilung in der Testregion B	388

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1:	Regionale Entwicklungs- und Forschungsprojekte im Oudalan.....	5
Tab. 2:	Mittlere Windgeschwindigkeit und vorherrschende Windrichtung (1955 - 1996), Station Gorom-Gorom	54
Tab. 3:	Einstrahlung in Stunden und Globalstrahlung in Gorom-Gorom (1994 - 1996).....	56
Tab. 4:	Verdunstung in mm/Tag nach Piche-Atmometer, Class-A-Pan (CAP) und Abschätzung einer freien Wasseroberfläche (FWF).....	58
Tab. 5:	Potentielle Verdunstung (ETP) nach Penman in mm/Tag für eine angenommene Albedo von 0,05 und 0,15	59
Tab. 6:	Mittlere Niederschlagssummen für „trockene“, „normale“ und „feuchte“ Jahre im Untersuchungsraum und deren Wiederkehrzeit	67
Tab. 7:	Mittlere Anzahl der Niederschlagstage pro Jahr im Untersuchungsraum, mittl. tägliche Niederschlagshöhen und deren Auftrittswahrscheinlichkeiten	68
Tab. 8:	Standort, Häufigkeit und Nutzung der Gehölzarten im Wassereinzugsgebiet des Gorouol (Feldaufnahmen 1994/1995)	119
Tab. 9:	Kennziffern der Bevölkerungsentwicklung im Oudalan	121
Tab. 10:	Agrarressourcen im Sahel Burkina Fasos	125
Tab. 11:	Statistische Kennwerte der Weideflächen im Sahel Burkina Fasos	127
Tab. 12:	Futterwerte sahelischer Arten	128
Tab. 13:	Zusammenfassende nutzungsorientierte Bewertung der Testflächen und Landschaftseinheiten.....	200
Tab. 14:	Luftbildserien im Bereich des Untersuchungsraumes	205
Tab. 15:	Ergebnisse der multitemporalen Luftbildanalyse Ménégou im Zeitschnitt 1981/1995	212
Tab. 16:	Ergebnisse der multitemporalen Luftbildanalyse Saouga im Zeitschnitt 1981/1995.....	215
Tab. 17:	Charakteristika der vorherrschenden Satelliten für den westafrikanischen Raum	237
Tab. 18:	Ausgewählte Satellitenszenen im Untersuchungsraum	256
Tab. 19:	Munsell-Farbwerte der 28 Testflächen	308
Tab. 20:	Korrelation der aus VIs abgeleiteten Deckungsgrade mit den im Geländekartierten Deckungsgraden (Korrelationskoeffizient nach Pearson).....	311
Tab. 21:	Abgeleitete Munsell-Farbwerte und berechnete BIs aus Spot-Daten.....	317

I FRAGESTELLUNG UND ZIELSETZUNG DER UNTERSUCHUNG

Die Anwendung regionaler Methoden der Fernerkundung (Luftbild- und Satellitenbildinterpretation) soll der Ableitung und Dokumentation des Naturraum- und Landnutzungs-potentials in einem kleinen Wassereinzugsgebiet (2500 km²) im Sahel Burkina Fasos dienen (Fallstudie Gorouol). Ziel ist es, unter Einbindung von Zusatzdaten (Feldstudien, Spektralmessungen, Laboranalysen etc.) die potentielle Nutzung vorhandener Fernerkundungsdaten wissenschaftlich zur Bewertung von Landschaftsräumen aufzuzeigen. Insbesondere kann die Zunahme vegetationsloser Flächen bzw. die Verringerung ökologisch wertvoller Gehölz-Gras-Einheiten und die Zu-/Abnahme von Agrarflächen durch Luft- und Satellitenbilder in ihrer regionalen Dimension erfasst werden. Feldarbeiten sichern die durch die Fernerkundungsanalyse abgeleiteten Interpretationsergebnisse ab und erweitern die Aussagekraft der Fernerkundungsdaten. Dazu wird die Vielfalt der Landschaftsmuster durch Vegetationskartierungen auf Testflächen, Boden- und geomorphologischen Kartierungen sowie Messung spektraler Charakteristika der jeweiligen (Erd-) Oberfläche (spektrale Signaturen) erfasst. Multitemporale Luftbildanalysen zeigen dabei das Spektrum von Möglichkeiten, das Naturraumpotential und die Dynamik der Landschaftsentwicklung (z.B. Zunahme der Gullyerosion, Abnahme der Baumdichte, Ausweitung landwirtschaftlicher Nutzfläche etc.) in mittleren (1 : 50.000) und großen Maßstäben (1 : 10.000) darzustellen. Multitemporale und multispektrale Satellitenbildinterpretationen liefern für regionale Fragestellungen überblicksartige und gutgeeignete Aussagen.

Aus der Zusammenschau von terrestrischen und durch Fernerkundungsdaten abgeleiteten Informationen zum Naturraumpotential eines Untersuchungsgebiets im zentralen Sahel Burkina Fasos baut sich ein Bild der Effizienz regionaler Fernerkundung zur Dokumentation und Analyse von Landschaftsräumen für unterschiedliche Zeiträume auf.

Das Naturraumpotential beinhaltet das Angebot eines speziellen Naturraumes an stofflichen Bestandteilen wie Vegetation, Boden und Wasser sowie auch den Aufbau und die Strukturen des Naturraumes. Das Naturraumpotential eines Landschaftsraumes, seine Landnutzung und Beeinträchtigung (z.B. Bodendegradierung) sind wechselseitig eng miteinander verknüpft. Für die Erfassung und Bewertung des Naturraumpotentials sollen in der vorliegenden Untersuchung sowohl die Leistungsfähig-

keit als auch die negativen Einschränkungen für die Nutzung des Raumes berücksichtigt werden.

1.1 Aufbau der Arbeit

Ziel der Untersuchung im Sahel von Burkina Faso ist die Erfassung, Inventarisierung und Bereitstellung nutzbarer Daten über die gegenwärtige Inwertsetzung und mögliche Gefährdung (Degradierung) des Naturraumpotentials sowie die Bewertung der Einbeziehung regionaler Fernerkundungsmethoden. Die vorliegende Arbeit gliedert sich in drei Hauptkapitel (A, B, C):

A: Datensammlung über den Naturraum

Dazu gehören allgemeine Informationen über die Naturraumausstattung (natürliche Ressourcen), Bevölkerungsverteilung (anthropogene Ressourcen) und Landnutzung (Weide- und Agrarressourcen, Auswertung vorhandener Statistiken) im Sahel von Burkina Faso. Weiterhin ist die qualitative und quantitative Erfassung von Grundlegendaten (Klimadaten, Vegetation, Wasser und Boden) innerhalb einzelner Landschaftseinheiten zu nennen (Kapitel 2). Somit wird in diesem ersten Schritt das Basiswissen zur Einschätzung der vorhandenen Ressourcen erarbeitet. Dieses Grundwissen ist für die Auswertung und anschließende wissensbasierte Interpretation von Fernerkundungsdaten unabdingbar.

B: Monitoring und flächenhafte Erfassung des Naturraumpotentials

Im Vordergrund steht hier die Nutzung fernerkundlich und terrestrisch (Testflächenkartierung) bestimmter Parameter zur flächenhaften Ableitung von Naturraumpotential und Landnutzung. Im vorliegenden Untersuchungsraum besteht bereits eine Vorgabe in Form der Bewertung als Weide- oder Ackerland. Dazu werden Landeignungstypen zur kartographischen und integrierenden Darstellung der Bewertung des Naturraumpotentials ausgeschieden. Beim Landeignungstyp handelt es sich um einen Naturraum mit nahezu homogenem Naturraumpotential. Das heißt, der Landeignungstyp bietet hinsichtlich seiner potentiellen Nutzung und Gefährdung identische Voraussetzungen. Zusätzlich wird eine raum-zeitliche Bewertung des Naturraumpotentials (anhand multitemporaler Datensätze von Luft- und Satellitenbildern) in ausgewiesenen Testräumen durchgeführt, um die raum-zeitliche Veränderung im Naturraumpotential (z.B. Ausweitung der Agrarflächen, eventueller Rückgang der Baumdichte, Vergrößerung der Gullyerosion etc.) darzulegen.

Aufbauend auf dem Basiswissen (Kapitel 2) können die Fernerkundungsdaten tiefgreifend interpretiert werden, d.h., über die bildverarbeitungstechnischen und statistischen Methoden hinaus wird geographisches Wissen relevant.

C: Abschließende Bewertung der angewandten regionalen Fernerkundungsmethoden

Die ausgewählte Methodik der Einbeziehung regionaler Fernerkundungsmethoden wird bezüglich des gewählten Untersuchungsraumes bewertet sowie ein Ausblick auf weitere Entwicklungen und zu fordernde Maßnahmen gegeben.

1.2 Einbindung der Arbeit in den Stand der Forschung

Die ersten geographischen Kenntnisse über den Sahel von Burkina Faso erstrecken sich meist auf Beschreibungen der Topographie sowie der Ethnographie. Physisch-geographische Untersuchungen allgemeiner und damit grundlegender Natur wurden vor allem von verschiedenen Wissenschaftlern der O.R.S.T.O.M. (Office de la recherche scientifique et technique Outre-mer) betrieben. 1970 erschien die Carte géologique de l'Oudalan mit Erläuterungen, die durch Delfour und Jeambrun erstellt worden waren. Ebenfalls in den 70er Jahren erschien die Carte Pédologique de Reconnaissance de la République de Haute-Volta in sechs Blättern, erstellt durch den Bodenkundler René Boulet. In den zugehörigen Erläuterungen versuchte er schon damals, Bodeneinheiten und typische Vegetationszusammensetzungen zur Überschneidung zu bringen. Er verzichtete auf quantitative Vegetationsaufnahmen und nannte jeweils nur wenige Kennarten.

Nach der Dürrekatastrophe von 1968-1973 wurde mehrfach der Versuch gemacht, sahelische Ökosystemtypen zu beschreiben und zu erforschen (Lepage, 1974, Gauthier et al. 1977, Barth, 1978). Das engere Untersuchungsgebiet des Oudalan wurde 1975 bis 1977 von Krings untersucht, er befasste sich dabei mit dem kultur-geographischen Wandel der Landschaft in der Kontaktzone von Nomaden und Bauern im Sahel von Burkina Faso (Krings, 1978).

Die erste große Konferenz der Vereinten Nationen über Desertifikation (UN-Conference on Desertification) fand 1977 in Nairobi statt. Der Begriff der Desertifikation war im Zusammenhang mit den Trockengebieten Westafrikas schon 1949 von Aubréville eingeführt worden. Er untersuchte die Ursachen für die Bodenverschlechterung und somit für den Rückgang der landwirtschaftlichen Erträge. Insbesondere

Mensching forschte intensiv über die anthropogen induzierten Ursachen und Auswirkungen der Desertifikation (Mensching, 1980 und 1990). Von Marchal wurde 1983 auf der Basis der Bodenkarte von Boulet der Versuch unternommen, die Agrarlandschaften Burkina Fasos zu klassifizieren. Die Grenzen der landwirtschaftlichen Produktion wurden 1985 von Achtnich untersucht.

Im Rahmen eines BMFT-Projektes befassten sich Frankenberg und Anhuf mit der Sahelproblematik unter vegetationskundlichem und klimatischem Schwerpunkt (Frankenberg 1985, Frankenberg und Anhuf 1989, Anhuf 1991). Pièri untersuchte die Bodenfruchtbarkeit in der Savanne (1986, 1989, 1992), Berger et al. erforschten den gleichen Aspekt und versuchten gleichzeitig die Wechselwirkungen von Ackerbau und Viehzucht zu erfassen (Berger et al. 1987). Diese Fragestellung wurde 1993 unter dem Blickwinkel des Nährstoffkreislaufes in Savannen von Burchard wieder aufgegriffen. Seit 1986 arbeiten unter der Schirmherrschaft von C.I.L.S.S. (Comité permanent intérêtats de lutte contre la secheresse dans le sahel) länderübergreifend Wissenschaftler zusammen, um das Fortschreiten der Desertifikation zu verhindern. Die Mehrheit der Autoren ist sich heute darüber einig, dass sich die Desertifikationserscheinungen in der westafrikanischen Savanne ausgedehnt haben. Bisher blieb die Frage unbeantwortet, ob die Desertifikation einen reversiblen Prozess darstellt. Mensching stellte fest, dass sich die Ökosysteme, die zerstört zu sein schienen, nach ausreichendem Regenfall „regeneriert“ haben, insbesondere dann, wenn eine ausreichende Vielfalt von Pflanzenarten erhalten blieb.

Für den Untersuchungsraum wurden die wichtigsten regionalen Entwicklungs- und Forschungsprojekte der vorangegangenen Jahre recherchiert und in Tabelle 1 aufgeführt.

Tab. 1: Regionale Entwicklungs- und Forschungsprojekte im Oudalan

Auswahl der Forschungsprojekte im Sahel Burkina Fasos (ab 1980)				
Projekttitle	finanziert durch	Region	Inhalte	Zeitraum
Renforcement des actions de développement rural dans l'ORD du Sahel / BKF / 80 / 002	PNUD FAO BKF 460 Mio. CFA	ORD Sahel	Appuie à production agricole, Formation	1982 - 1986
Création d'une ferme semencière et renforcement de cinq centres semenciers TCP/BKF/4508	PNUD FAO BKF 84 Mio.CFA	Bani / Seno Sagou / Seno Saouga / Oudalan Kelbo Soum Liki / Soum Pobé / Soum	Production de semences de mil, arachide, niébé, Formation de paysans	1986 - 1987
Mise en valeur de la mare de Dori (=RD)	DWHH (ONG) 51,5 Mio. CFA	Dori	Aménagement maraîcher de 30 ha, Formation	1986 - 1989
Développement des cultures de contre saison dans le seno, le Soum et l'Oudalan	Caisse de Solidarité Révolutionnaire BKF 154 Mill. CFA	Oudalan, Seno, Soum	Maraîchage: 65 ha, Formation	1986 - 1989
Développement de périmètres maraîchers pour Groupements Villageois, foyers sonaux et hôpital de Dori	Chine 80 Mill. CFA	Dori, Sebba (Dengakekin-ga) Aribinda (Gaitengota), Djibo	Maraîchage, Formation	1986 - 1989
Projet Agro-Ecologie Dori (P.A.E.)	P.A.CILSS 28,2 Mill. CFA	Secteurs ORD de Dori, Djibo, Gorom	Aménagements antiérosifs, fosse fumièrè cultures fourragères, Formation	1986 - 1988

Auswahl der Forschungsprojekte im Sahel Burkina Faso (ab 1980)
(Fortsetzung Tabelle 1)

Projekttitle	finanziert durch	Region	Inhalte	Zeitraum
Développement cultures fourragères et améliorantes en zone Soudano sahélienne, CCP/RAF/098/SWI	SUISSE FAO CILLS 390 Mill. CFA	Mali / Niger / Burkina, Sebba, Dori	Expérimentation et pré vulgarisation cultures fourragères	1978 - 1987
Vulgarisation des cultures fourragères et d'amélioration des pâturages	Suisse	Barani (Kossi), Demba (Soum)	Production et vulgarisation de cultures fourragères	1985 - 1987
Appui aux organisations socio-économiques villageoises dans l'ORD du Sahel	E.A.A., 149 Mill. CFA	ORD Sahel, Sebba	Appui à ORD pour alphabétisation, visite inter-groupements, formation agents, formation animatrice	1983 - 1987
Projet Economie familiale	D.W.H.H.	Soum (Djibo)	améliorer conditions de vie des femmes, promotion Groupements Féminins, Formation, actions sectorielles	1980 - 1986
Projet d'élevage dans l'Oudalan	F.E.D., 527 Mio. CFA	Soum	points d'eau, commercialisation du bétail, amélioration fourrage et pâturage, encadrement mobile	1980 - 1986
Projet de Centre d'Elevage de formation de l'Oudalan	US AID, 260 Mio. CFA	Oudalan, Markoye	Diffusion des races à haut potentiel, Formation des éleveurs, Cultures fourragères	1964 - 1971

Auswahl der Forschungsprojekte im Sahel Burkina Fasos (ab 1980)
(Fortsetzung Tabelle 1)

Projekttitle	finanziert durch	Region	Inhalte	Zeitraum
Coopération Burkina/Italie	Italie 16 Mill. CFA	Oudalan, Seno	Routes Kaya-Dori, Dori-Gorom, Dori-Markoye, Création Direction Désenclavement Terrestre, Etudes et aménagements agro-sylvopastoraux, Création Direction ONBAH/Dori et 5 barrages	1886 - 1988
Kulturentwicklung und Sprachgeschichte im Naturraum Westafrikanische Savanne	Deutschland SFB 268 der DFG	Burkina Faso	siehe Berichte des SFB	seit 1993

Seit Mitte der 80er Jahre versuchen Wissenschaftler, Informationen über die Veränderung von Landschaftseinheiten flächendeckend über die Daten von Satelliten abzuleiten. Diese Entwicklung ging mit der Aufstellung unterschiedlicher Satellitenprogramme einher. Der Nutzen der Fernerkundung zum Beispiel für Ertragsvorhersagen wurde und wird in vielen großen Projekten weltweit genutzt. In den Vereinigten Staaten ist das „Large Area Crop Inventory Experiment“ (LACIE) zu nennen. In Afrika sind insbesondere das UN/FAO „Africa Real Time Environmental Monitoring Using Imaging Satellites“- Projekt (ARTEMIS¹) und das Kenia Rangeland Ecological Monitoring Unit-Projekt (KREMU) zu nennen. In Europa ist das EG-Projekt MARS (Nutzung der Fernerkundung für die Agrarstatistik) sowie das CORINNE Land Cover-Projekt hervorzuheben. Organisationen wie die U.N. Food and Agricultural Organisation (FAO) liefern jährliche globale Statistiken über die Nahrungsmittelproduktion. Sie geben Auskunft über Art, Anbaufläche und Erntemengen für die einzelnen Länder. Sie sind dabei aber von Informationen abhängig, die die einzelnen Länder für sich erheben und weitergeben. Leider mangelt es jedoch in vielen Entwicklungsländern an zuverlässigen und zeitlich wie räumlich adäquaten Angaben über die

¹Vgl. dazu Hielkema, Jelle U.: Operational satellite environmental monitoring for food security by FAO: The ARTEMIS System. In: Remote Sensing and the Earth's Environment, ESA SP-301, 125-134, 1990.

genutzten Flächen, da den Ländern oft die finanziellen Mittel und die nötige Infrastruktur zur genauen Beobachtung der gesamten Landnutzung fehlen. Die wichtigsten Programme der letzten Jahre, die schwerpunktmäßig auch Fernerkundungsdaten zur Abschätzung der Landnutzung heranziehen, sind zum einen FEWS (Famine Early Warning System)², GIEWS (Global Information and Early Warning System) der FAO und DIAPER (DIAGnostic PERmanent, Unterprojekt von CILSS) sowie das AGRHYMET (Centre regional de formation d'application en agrometeorologie et hydrologie operationelle) Programm.

Im Falle von FEWS steht man bereits am Anfang einer operationellen Nutzung von Fernerkundungsdaten zum Ernte- bzw. Vegetationsmonitoring. Allerdings vollzieht sich dieses Monitoring fast ausschließlich auf einem internationalen Beobachtungsniveau.

Monitoringstudien mittels Fernerkundungsdaten im regionalen Maßstab sind bis dato relativ selten. Aus diesem Grund versuchen internationale Organisationen (United Nations, FAO, WHO etc.), die Nutzung von fernerkundungsbestimmten Daten insbesondere in Afrika auf lokaler Ebene voranzutreiben³.

Die vorliegende Arbeit ist als ein Schritt in die Richtung zu verstehen, die Ableitung von fernerkundungsbasierten Informationen für lokale bzw. regionale Fragestellungen zu nutzen und Entscheidungsträgern geeignete Basisdaten zur Verfügung zu stellen.

Darüber hinaus soll die Anwendbarkeit der Fernerkundung im regionalen Maßstab kritisch hinterfragt und bewertet werden.

²Das FEWS-System nutzt von NOAA abgeleitete AVHRR GAC-Daten zur Bestimmung des NDVI (normierter Vegetationsindex). Diese NDVI-Daten werden täglich für Westafrika berechnet. Dieser Ansatz stellt bereits eine operationelle Nutzung von Fernerkundungsdaten zum Ernte- bzw. Vegetationsmonitoring dar. Die Daten sind via Internet abrufbar und wurden für die vorliegende Arbeit für den Zeitraum 1980-1995 benutzt.

³Pretoria Memorandum on Space Science and Technology in Africa, in: Report on the Second United Nations Regional Conference on Space Technology for Sustainable Development in Africa, UN, General Assembly, Document A/AC. 105/658, 1996.

II DER OUDALAN ALS NATURRAUM - PHYSISCH-GEOGRAPHISCHE GEgebenHEITEN IM UNTERSUCHUNGSRAUM

Der Sahel Burkina Fasos erstreckt sich mit einer Fläche von 36.869 km² zwischen dem 13. und 14. Grad nördlicher Breite und verteilt sich auf die Provinzen Oudalan, Seno und Soum. Die Hauptflusssysteme (Beli, Gorouol, Siriba) erstrecken sich von West nach Ost, sind dem Niger tributär und fließen nur temporär. Topographisch stellt die Landschaft einen Verbund von großen Ebenen, Dünenkomplexen, Hügeln und Pediment- / Glacisflächen dar.

Die Provinz Oudalan beschreibt eine Fläche von 9.700 km² und ist mit ca. 14 Einwohnern/km² eine der gering besiedelten Regionen Burkina Fasos. Der Oudalan wird durch die Landschaftseinheiten des Sahel bestimmt.

Die Sahelzone bezeichnet pflanzengeographisch den Raum zwischen dem Südrand der Sahara und den sudanischen Savannenlandschaften, wobei die Nordgrenze durch die absolute Dominanz sahelischer Arten bestimmt wird, die Südgrenze durch das sahelo-sudanische Zonoökoton (Frankenberg, 1985). Die zugehörige Vegetationseinheit ist die der Dornbuschsavanne.

Im vegetationskundlichen Sinne kann nach Frankenberg (1985) der Sahel im engeren Sinne, der sich zwischen der 250 mm-Isohyete im Norden und der 500 mm-Isohyete im Süden befindet, von dem Sahel im weiteren Sinne, der das sahelo-sudanische und das sudano-sahelische Zonoökoton zusammenfasst und der nach Süden durch die 700 mm- bzw. 900 mm-Isohyete begrenzt wird, unterschieden werden.

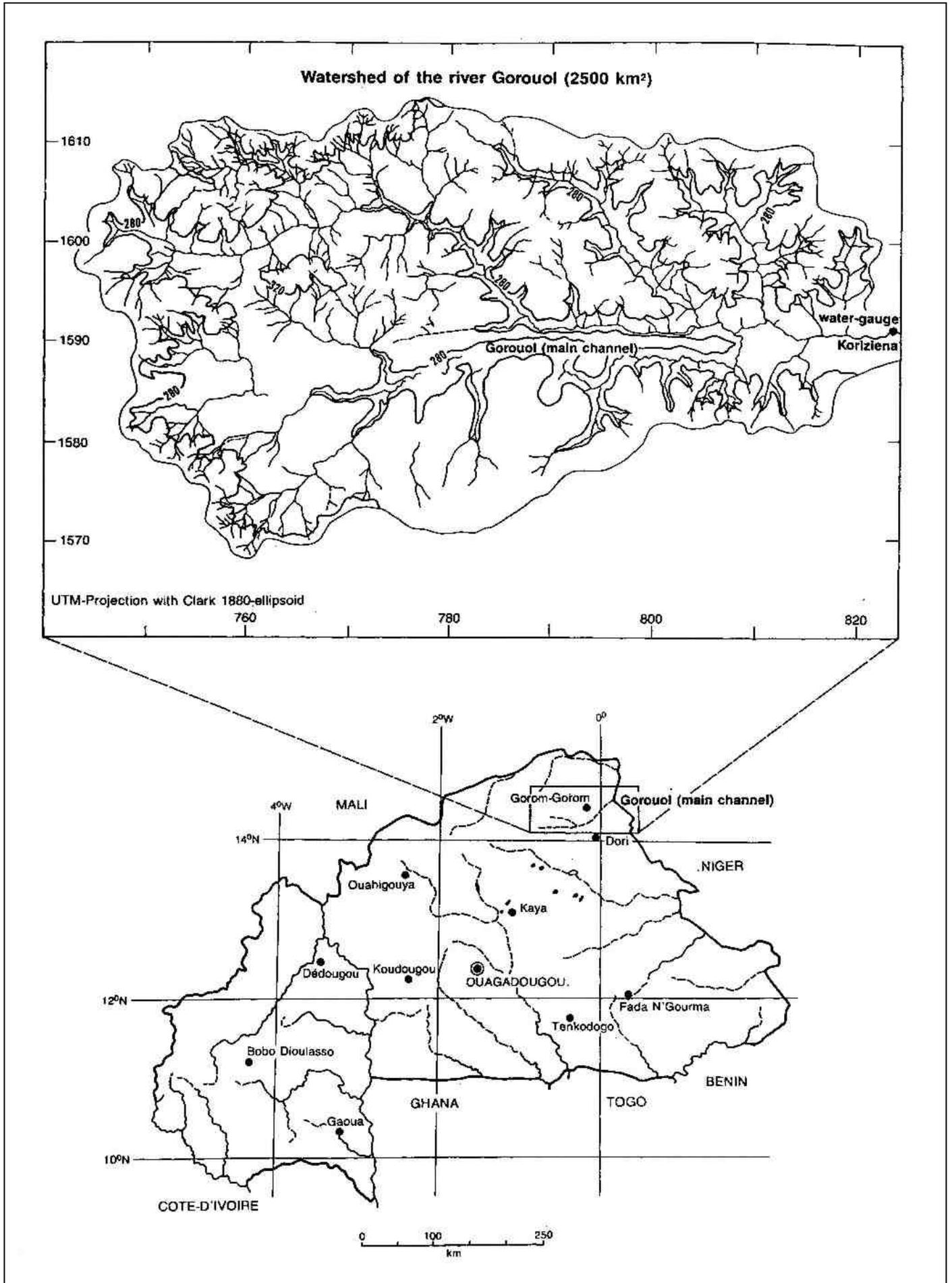
Im klimatologischen Sinne kann der Sahel als der Streifen abgegrenzt werden, der im Norden durch die 200 mm-Isohyete und im Süden durch die 600 mm-Isohyete begrenzt wird (Tetzlaff, 1985; Kappas, 1989).

Der Untersuchungsraum der vorliegenden Arbeit liegt im Einzugsgebiet des Flussgebietes des Gorouol in der Provinz Oudalan, im Norden von Burkina Faso (siehe Abb. 1). Das Einzugsgebiet des Gorouol, eines periodischen Zuflusses des Niger, wurde vor allem deshalb gewählt, weil es die repräsentativen Landschaftseinheiten des Sahels von Burkina Faso beinhaltet und sich insbesondere durch seine Abgeschlossenheit für regionale Fernerkundungsanalysen eignet.

In den folgenden Kapiteln werden der Kenntnisstand bzw. die eigenen Untersuchungsergebnisse zu den einzelnen physischen Teildisziplinen (Geologie, Geomorphologie, Bodenkunde, Klimatologie, Hydrologie und Vegetationsgeographie) sowie Informationen zur Agrar- und Weidewirtschaft, Bevölkerungsverteilung und Bevölkerungsdynamik im Untersuchungsraum dargelegt. Diese Informationen bilden die Grundlagen und das Basiswissen zur Einschätzung des Naturraumpotentials und werden für die anschließende Fernerkundungsanalyse herangezogen.

Die Ausführungen zu den einzelnen Teildisziplinen beschränken sich dabei allerdings auf die Ableitung von Parametern zur Einschätzung des Naturraumpotentials und erheben keinen Anspruch auf wissenschaftliche Vollständigkeit der einzelnen physischen Teildisziplinen. Ziel des Kapitels 2 ist es vielmehr, vorhandenes sowie im Gelände und Labor erarbeitetes „Wissen“ für eine anschließende Fernerkundungsanalyse aufzubereiten.

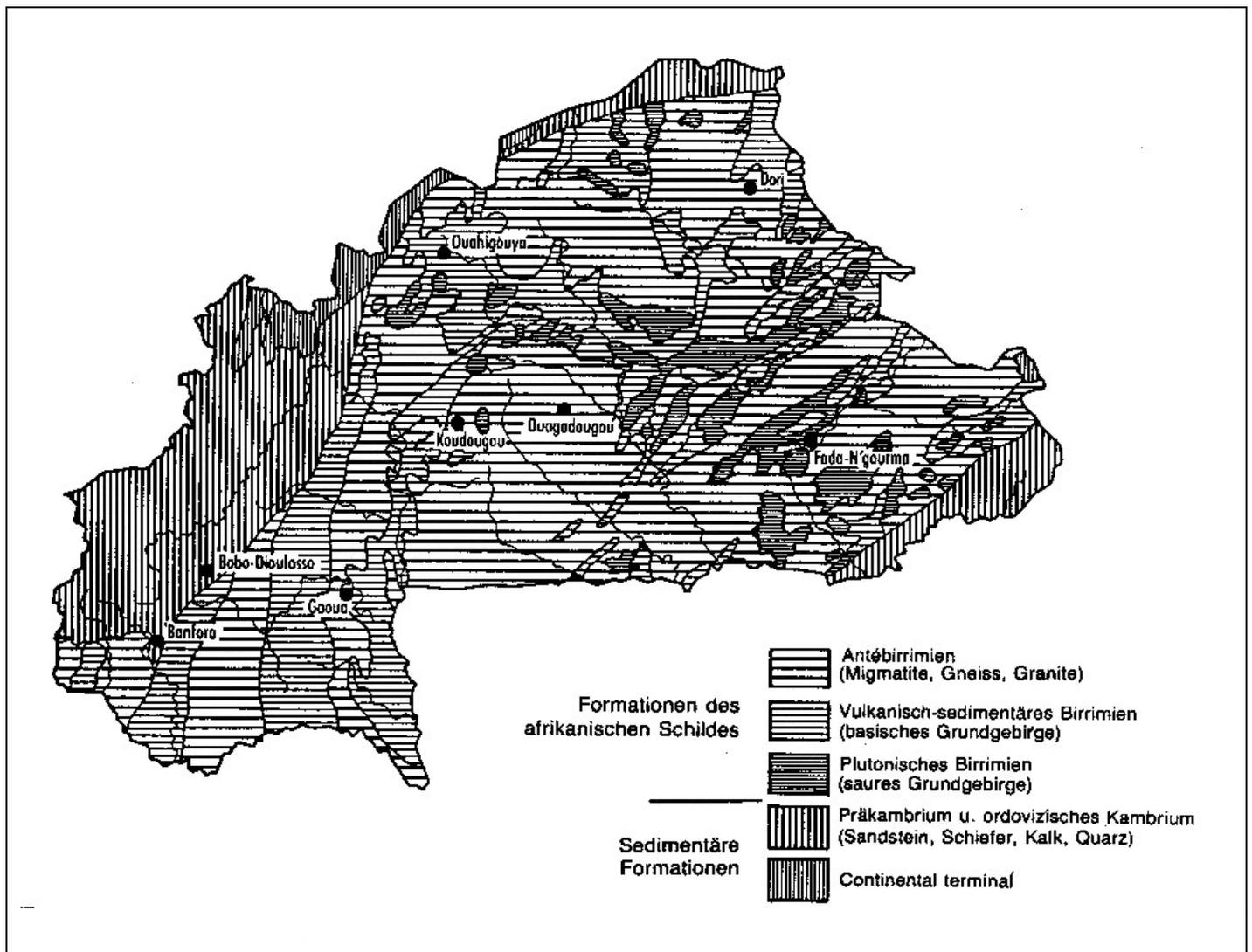
Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebiets
(aus: Kappas, 1997)



2.1 Geologie

Die geologische Karte von Burkina Faso (Abb. 2) zeigt das gesamte Land als eine große Granito-Gneisplatte, auf der präkambrische Metamorphgesteine in der gleichen Ausrichtung, jedoch in unterschiedlicher Dichte punktiert eingestreut liegen. An der Nord- und Südgrenze ist die Platte durch eine mächtige Randschwelle von starken Sedimenten eingefasst.

Abb. 2: Geologische Karte von Burkina Faso



Der geologische Aufbau Burkina Fasos entspricht dem verallgemeinerten Aufbau Westafrikas, welcher bestimmt ist durch einen Grundgebirgssockel aus stellenweise stark gefaltetem Altkristallin. Innerhalb dieses Sockels sind verschiedene Granitintrusionen festzustellen. Die Bildung des Gebirgssockels fällt in die geologische Ur- und Frühzeit, in das Präkambrium, eventuell in die spezifischen Entwicklungsperioden des Birrimien. Der Grundsockel ist im wesentlichen gebildet von Graniten und mehr

oder weniger mächtigen Bänken von Gneis und Glimmerschiefer. Über dem Grundsockel lagert eine mächtige Schicht von tonigem Sandstein mit Kalksteinablagerungen, welche äußerst stark durch Erosion beeinflusst ist. Besonders mächtig ist diese Schicht in der Region um Bobo-Dioulasso und an der Südgrenze zu Benin (Oti-Formation). Diese Schichten gehören teilweise dem Präkambrium (Buem, Tarkwaien), zum Teil dem Kambrium (Cambro-ordovicien) an. Die präkambrischen Formationen beherrschen das Gebiet.

Die Oberflächenformen entsprechen der Wechselbeziehung zwischen geologischer Struktur und den Formen der Erdoberfläche. Die Bergformen und Felsbildungen sind dafür charakteristisch:

Rumpfformen lassen die aus Glimmerschiefern, Phyllitschiefern und Tuffen aufgebauten Stöcke erkennen. Kuppenförmige Umrisse zeigen Hügel und Felsen aus Teilen von Quarziten, von mehr oder weniger mächtigen metamorphen Intrusionen und schwach tonigen Sandsteinen. Kegelförmig, aber mehr abgeplattet als die Kuppen aus Quarziten, sind die Blöcke vulkanischen Ursprungs. Die Granite bilden abgerundete Formen (Kuppen und Dome), ohne jede Vegetation. Soweit sich Tafelbildungen finden, stehen sie unter dem Einfluss des lateritischen Rückenschildes. Quarzadern und Quarzgänge durchbrechen oft die umschließenden Felsen und treten aus ihren Lagern an die Oberfläche (z.B. Raum Kaya und Gorom-Gorom).

Die Reliefunterschiede, meist durch Hebung und Senkung entstanden, sind im ganzen Land relativ gering. Burkina Faso gleicht in seiner Gesamtheit dem Bild einer unermesslichen Fast-Ebene, mit leichter Neigung von Nord nach Süd. Die mittlere Höhenlage liegt bei 200 bis 300 Metern. Die meist in Südwest-Nordostichtung weisenden Höhenzüge - von richtigen Gebirgen kann man in Burkina Faso kaum sprechen - lösen sich in eine Vielzahl von „Inselbergen“ und „Inselhügeln“ auf. Besonders ausgeprägt ist dies zwischen Ouagadougou und Koupela. Sie ziehen sich dort zum Teil zwischen Niger und Volta hin und trennen beide Wassersysteme. Die horizontale Linie ist somit für Burkina Faso charakteristischer als die vertikale Linie. Die bedeutendsten topographischen Gegebenheiten Burkina Fasos liegen auf der westseitigen Begrenzungslinie des Landes. In der Mitte der Linie zwischen dem Dreiländer Eck und Bobo-Dioulasso ist ein Mittelgebirge anzusetzen. Als Endglied der Kette Guineaschwelle-Karala (800 m)-Odienne ist dieses Mittelgebirge Anfangsglied für das voltaische System. Südwärts liegt das Bergland von Sindou-Banfora mit einer Höhe von 400-500 m, Ursprungsgebiet für das Comoe-Bassin. Das Tagoura-Plateau bildet

die Wasserscheide zwischen Comoe und Volta. Im Osten ist das Plateau begrenzt durch mehrere Staffelbrüche (200 m), die sich als Falaise von Banfora etwa auf 200 km in nordöstlicher Richtung östlich an Bobo-Dioulasso vorbeiziehen. Im Raum Orodara liegt die höchste Erhebung Burkina Fasos (700 m). Südlich von Orodara liegt der Ursprung des Schwarzen Volta. Das Gebirge strahlt in Richtung Bobo-Boromo-Yako-Tikare-Kaya aus. Die weitere Fortsetzung bildet zugleich einen Teil der ostseitigen Höhenwelle, die sich von Adrar des Iforas nach dem Atakora zieht und in Burkina Faso von den beiden Zuflüssen des Niger (Gorouol und Sirba) begrenzt wird (Östliches Niger-Bassin). Nordwärts zieht sich das Plateau von Nanergue, welches in seinen Anfängen Wasserscheide zwischen Voltasystem und Nigerbassin ist. Dieses Plateau ist weiterhin Quellgebiet des Banifing, des „kleinen schwarzen Flusses“, der in die Bagoë mündet und dann als Bani dem Niger zufließt. Die Höhenzüge (400 m) folgen dem linken Ufer des Schwarzen Volta und trennen als Randschwelle die Systeme Niger und Volta. Ostseits des Landes liegt zwischen Dori und Dahome eine Schwelle mit einer durchschnittlichen Höhe von ca. 300 m. Sehr unregelmäßig gegliedert, bestimmt sie den Lauf der westlichen Zuflüsse des Niger. Was man von Westafrika allgemein behauptet: es gleiche einer Wanne, beckenartig vertieft im Zentrum, schwellenhaft erhöht in den Seitenbegrenzungen, gilt im besonderen für Burkina Faso. Die Oberflächenform seiner Beckenlandschaft ist weithin ausgeglichen. Im Norden liegen die großen Sandebenen des Sahel, die sich bis an die Linie Dori-Djibo heranschieben. Die Dünen liegen in West-Ost-Richtung. Das Zentrum des Landes ist charakterisiert durch weite, flachgewellte Ebenen, bedeckt mit einem mächtigen Lateritschild.

Die Verteilung der geologischen und petrographischen Einheiten des Untersuchungsgebiets wurde der Geologischen Karte 1 : 200.000 entnommen und in ein GIS-System übertragen (siehe Abb. 3). Diese Karte wurde von Delfour in den Jahren 1960 bis 1964 durch Gelände- und Luftbildstudien erstellt⁴. Das Untersuchungsgebiet lässt sich erdgeschichtlich in zwei sehr gegensätzliche Zeitalter gliedern: das Präkambrium und das Quartär. Im Unteren Präkambrium (vor mehr als 2400 Mio. Jahren) bildete sich der kristalline Sockel des Oudalan aus Magmatiten und Vulkaniten. In der Region wird die Einheit auch Anté-Birrimien (Vor-Birrimien) genannt. Die Gesteine wurden im Laufe der folgenden geologischen Epochen mehrfach gefaltet und mesozonal

⁴Carte Géologique de l' Oudalan, 1 : 200.000, Feuilles Dori - Tera - In Tillit, mit Erläuterungsbericht

metamorphisiert. Häufig wurden die Gesteinsserien auch von Gängen meist granitischer Zusammensetzung durchschlagen. Die petrographische Zusammensetzung ist vielfältig und reicht von Gabbros, Peridotiten, Pyroxenolithen, Basalten und Tuffen sowie verschiedenen Graniten über wiederaufgearbeitete Mischgesteine bis hin zu Gneisen und Leptyniten, die nach Delfour und Jeambrun (1970) eine Zwischenform zwischen Graniten und Gneisen darstellen. Außerdem gehören in diese als Sikiday-Formation zusammengefasste Serie auch Ophiolith-Komplexe, die aber in der untersuchten Region keine Bedeutung haben. Die zweite Untereinheit des Unteren Präkambriums, die Gouba-Formation, setzt sich im wesentlichen aus Quarziten zusammen. Im Mittleren Präkambrium, oder regional dem Birrimien im weiteren Sinne, hatte sich der zentrale Kraton in zwei Geosynklinalen aufgeteilt. Epizonale Metamorphose und Faltungsvorgänge gingen mit dieser Entwicklung einher. Die Gebirgskette zwischen den Geosynklinalen wurde zum Abtragungsgebiet, danach folgte erneut eine Hebung. Es kam zur Bildung einer Molasse, die ihrerseits metamorphisiert und gefaltet wurde und in die basische Intrusionen konkordant eindrangen. Während der Hauptphase der Orogenese kam es zur Inplatznahme alkalischer Granite, in der nachfolgenden post-tektonischen Periode bildeten sich verschiedene Quarze, meist in Form großer Gänge, deren vorherrschende Richtungen WNW-ESE oder, quer dazu, ENE-WSW verlaufen.

Seitdem ist das Oudalan Abtragungsgebiet, es herrscht eine Schichtlücke bis in das Tertiär, in das die Bildung der Laterite eingeordnet wird. Voraussetzung für die Bildung von Lateritkomplexen ist eine intensive und schnelle Verwitterung bei feucht-tropischem Klima mit einem Wechsel zwischen Regen- und Trockenzeiten. In den Auslaugungsperioden während der Regenzeiten wird mehr SiO_2 relativ zu Al_2O_3 weggeführt. In der Trockenzeit folgt mit einsetzender Verdunstung ein kapillarer Aufstieg der Lösung. Gleichzeitig ändert sich der pH-Wert der Lösung von schwach sauer zu schwach alkalisch und schafft somit die Voraussetzung für die Bildung von Aluminium-Hydroxiden oder Aluminium-Oxidhydraten. Die entstehenden Verwitterungsneubildungen heißen Bauxite, im vorliegenden Fall handelt es sich um Silikat- bzw. Lateritbauxit, da er sich aus magmatischen oder metamorphen Gesteinen gebildet hat (Matthes, 1990). In einem typischen Bodenprofil, das aus Verwitterung über Laterit entsteht, bildet sich oft eine Konkretionszone, in der sich Bauxit-Knollen, aber auch Verbackungen von Eisen- und Mangan-Verbindungen anreichern. Eine Übersättigung an Eisen führt zu seiner Abscheidung als Goethit oder Hämatit, geringe Men-

gen dieser Minerale reichen zur intensiven Gelb- bzw. Rot-Färbung ihrer Umgebung aus. Diese intensive Färbung der Eisenminerale hat auch großen Einfluss auf die spektrale Reflektion von Oberflächeneinheiten und schlägt sich im aufgezeichneten Spektralbild der einzelnen Fernerkundungssensoren nieder (vgl. Kappas, 1994, S. 66).

Gegen Ende des Tertiärs änderte sich das Klima im Oudalan und eine intensive chemische Verwitterung konnte wegen Wassermangels nicht mehr stattfinden. Die Laterite blieben als fossile Bodenbildungen zurück und stehen in großen Teilen der untersuchten Region oberflächlich an. Sie sind durch große Stabilität gekennzeichnet und können durch herkömmliche Bearbeitungsmethoden nicht durchbrochen werden, d.h., dass die betroffenen Gebiete im Falle einer Abtragung der überlagernden Bodenbildungen nicht wieder genutzt werden können. Dies führt im Landschaftsraum zur irreversiblen Degradation der Standorte.

Im Quartär, genauer im Ogolien (Kanemien), also 20.000 - 18.000 Jahre B.P., kam es zur Ablagerung von Altdünenkomplexen, deren einzelne Züge großräumig durch Völkel (1987) untersucht wurden. Weitere nachfolgende Trockenphasen bewirkten die Korrasion der verwitterten Altdünen dieser ersten Generation und schufen zwei weitere Dünengenerationen, deren Material weitgehend der ersten Dünengeneration entstammt. Diese Dünenzüge werden im Folgenden als subrezent bezeichnet (siehe auch Völkel, 1987), da sie in ihrer Gesamtheit keiner aktuellen Umlagerung unterliegen. Aktuelle quartäre Prozesse bilden sich in Schwemmsedimenten der Wadis und Senken ab.

Sämtliche Informationen der geologischen Karte sowie weitere Informationen (z. B. Eisengehalt der Gesteine etc.) wurden in ein GIS-System⁵ aufgenommen (siehe Abb. 3) und stehen digital zur Verfügung. Dies hat den Vorteil, dass diese Informationen mit anderen digitalen Daten (z. B. Satellitendaten) verschnitten werden können. Die vorliegenden geologischen Einheiten sowie die im Untersuchungsgebiet ablaufenden reliefprägenden Prozesse führten im Laufe der Zeit zur Ausbildung typischer geomorphologischer Landschaftseinheiten, die im folgenden Kapitel 2.2 für das Einzugsgebiet des Gorouol vorgestellt werden.

⁵Die vorhandenen Kartengrundlagen wurden mit dem GIS-System ATLAS-GIS digitalisiert und kartographisch dargestellt. Zur räumlichen Analyse wurden die Daten in das System IDRISI importiert und weiterverarbeitet.

2.2 Geomorphologische Landschaftseinheiten im Untersuchungsraum

Das Einzugsgebiet des Gorouol erstreckt sich über den präkambrischen Sockel im Norden Burkina Fasos und fällt nach Norden und Osten hin zum Niger ein. Das Untersuchungsgebiet weist die charakteristischen morphologischen Einheiten im Sahel von Burkina Faso und der Region des inneren Nigerbogens auf. Es wird von Dünengürteln in west-östlicher Erstreckung gegliedert. Diese Dünengürtel bilden natürliche Barrieren, an denen sich der Oberflächenabfluss während der Regenzeit staut. Dieses Landschaftsbild schreitet nach Norden alternierend fort. An das Einzugsgebiet des Gorouol grenzt im Norden das Einzugsgebiet des Mare von Oursi mit nahezu identischen naturräumlichen Einheiten. Das Relief des Gebiets weist nur geringe Höhenunterschiede auf, und die Landschaft erscheint dem Reisenden auf den ersten Blick monoton und geomorphologisch wenig differenziert. Detailstudien französischer Wissenschaftler, zumeist im Raum des Mare von Oursi, konnten aber Mitte der siebziger und Anfang der achtziger Jahre eine erhebliche morphologische und ökologische Diversität im sahelischen Milieu des Oudalan nachweisen. So konnten Joly, Dewolf und Riou (1980) mehr als 20 unterschiedliche geomorphologische Einheiten ausgrenzen. Leprun (1977) klassifizierte 17 Bodeneinheiten, und Toutain (1976) beschrieb 10 Klassen von Boden-/Vegetationsassoziationen. Anfang der achtziger Jahre konnten Lointier und Lortic (1984) erstmalig über multispektrale Klassifikation von Satellitenbildern 10 unterschiedliche Oberflächeneinheiten (cover units) ausscheiden.

Für den vorliegenden Untersuchungsraum wurden drei naturräumliche Landschaftseinheiten mit jeweils weiteren Untereinheiten ausgegrenzt, deren Charakteristika im Folgenden kurz erläutert werden. Die Ausgrenzung der definierten Landschaftseinheiten wurde durch die Regionalisierung dieser Einheiten im Satellitenbild vorgenommen.

Die Anzahl der unterschiedlichen geomorphologischen Einheiten wurde zum einen durch die Erfahrungen der Geländebegehungen sowie durch die Ergebnisse einer I-SODATA-Klassifikation der Landsat-TM-Szenen gewonnen (vgl. Flussdiagramm Methodik, Kapitel 3.1).

2.2.1 Dünensysteme und Aufsandungen (D, TS, AS)

Die großen Dünenkomplexe⁶ im Norden Burkina Fasos gehören zu einem Kordon von Altdünen, die sich im Ogolien (ca. 20.000 B.P.) gebildet haben, eine mehr oder weniger starke Pedogenese aufweisen und direkt auf dem präkambrischen Sockel aufliegen. Als Bodenbildungen können hier subaride Braunerden (sols brun-rouge subarides) identifiziert werden, die sich über äolischen Sanden gebildet haben und insgesamt arm an Ton und Schluff sind. Nach Norden hin werden die festliegenden Sande (sables fixés) von unbefestigten Sanden (sables vifs) gefolgt.

Bei starker Degradierung der Altdünenkörper können diese wieder mobilisiert werden. Ein Abflusssystem in Form von Gerinnen ist auf den sandigen Böden nicht existent. Innerhalb der Altdünenkomplexe gibt es Bereiche ohne Bodenbedeckung mit oberflächlicher Verhärtung (Bovalisierung). Diese Flächen wechseln an der Oberfläche mit nicht verhärteten Dünensanden. Chevallier und Valentin (1985) konnten einen erheblichen Unterschied in der Infiltrationskapazität für beide Oberflächeneinheiten feststellen.

Das Gesamtdünensystem (**D**) wurde in drei Untereinheiten eingeteilt:

D1: Hohe Altdünenrücken (z. B. bei Saouga und Ménégou - zentrales Untersuchungsgebiet). Auf den Dünensanden sind meist eisenhaltige, tonarme Böden entwickelt. Abgesehen von Hirseanpflanzungen sind die Flächen überwiegend vegetationsarm und mosaikartig von „Bovalflächen“ durchzogen. Aspekt der Landschaftseinheit D1 siehe Abb. 4.

⁶Vgl. dazu Grunert, J.: Klima- und Landschaftsentwicklung in Ost-Niger während des Jungpleistozäns und Holozäns. In: Hagedorn, H. u. Baumhauer, R. (Hrsg.): Geowissenschaftliche Untersuchungen in Afrika. Würzburger Geogr. Arbeiten, Heft 69, S. 289-304, 1988.



D2: Flache Altdünenbereiche, die von einer „savane arbustive“⁷ bedeckt werden. Je nach Sandmächtigkeit und Bovalisierungsgrad herrscht Hirseanbau vor. Aspekt der Landschaftseinheit D2 siehe Abb. 5.

D3: Altdünenhangbereich mit geringer Neigung. Die Hangbereiche der Altdünen sind ebenfalls von einer „savane arbustive“ bestanden und weisen teilweise Hirseanbau auf. Traditionell sind die Hangbereiche Weideland, deren ursprüngliche Vegetationseinheit, die „savane arborée“, durch anthropogene Übernutzung degradiert wurde. Aspekt der Landschaftseinheit D3 siehe Abb. 6.

TS: Tiefgelegene Sandböden, also mit Wasser besser versorgte Standorte zwischen den Dünenerhebungen, sind gekennzeichnet durch *Acacia senegal*, *Acacia raddiana* und *Combretum* spp. bei den Gehölzen, *Cyperus conglomeratus* und *Brachiaria ramosa* bei den Gramineen und bei den Leguminosen treten *Indigofera senegalensis* und *Alysicarpus ovalifolius* auf.

⁷ Zur Einteilung der Vegetationstypen „savane arbustive“, „savane arborée“ etc. siehe Kapitel 2.6.

Diese Standorte sind für die Beweidung bevorzugt. Aspekt der Landschaftseinheit TS
siehe Abb. 7.

Abb. 5: Aspekt der Landschaftseinheit D 2





AS: Aufsandungen, flachgründige Sandbedeckung (meist < 10 cm) über Glacisflächen oder anstehendem Gestein mit schnellem Abfluss der Niederschläge. An Gehölzen treten unter anderen *Acacia raddiana*, *Grewia* spp. und *Combretum* spp. auf, Gräser treten nur sporadisch auf, überwiegend annuelle Arten der Gattungen *Aristida* und *Tetrapogon*. Diese Standorte sind von geringerer Bedeutung für die Beweidung. Zum Aspekt der Landschaftseinheit AS siehe Abb. 8.

Abb. 7: Aspekt der Landschaftseinheit TS



Abb. 8: Aspekt der Landschaftseinheit AS



Aufgrund ihrer relativ leicht zu bearbeitenden Böden sind die Altdünenbereiche bevorzugte Hirseanbaugebiete. Eine Beeinträchtigung des Anbaus, der noch immer ausschließlich mit der Kurzhacke betrieben wird, ist in der zunehmenden Bovalisierung der Altdünenstandorte zu sehen.

2.2.2 Tal- bzw. Drainagesysteme (TD)

Diese zweite große naturräumliche Landschaftseinheit durchzieht das gesamte Untersuchungsgebiet und erstreckt sich in östlicher bis nordöstlicher Richtung zum Niger hin. In den Hauptabflussrinnen und kleineren Depressionen konzentriert sich der Abfluss des ungeordneten Gesamtabflussnetzes des Einzugsgebiets. Die Tal- und weitläufigen Drainagesysteme sind charakterisiert durch Vertisolböden und gering humifizierte hydromorphe Mineralböden (*sols menéraux peu humifières*). Diese Böden sind nach dem Einsetzen der Regenzeit schnell gesättigt und weisen ein geringes Rückhaltevermögen auf (geringer Gehalt an quellfähigen Tonmineralen). In der Trockenzeit zeigen diese Böden oberflächlich starke Trockenrisse. Die Talbereiche und abflusslosen Senken sind von einer dichteren Vegetation bestanden. Das gesamte Tal- und Drainagesystem wurde in drei Untereinheiten eingeteilt:

TD1: Hauptvorfluter „Gorouol“ mit relativ breitem Talboden und deutlich erkennbarer, eingetiefter Hauptabflussrinne. Auf den auelehnmähnlichen Ablagerungen im Überschwemmungsbereich bilden sich feinsandig-schluffige Böden mit ausgeprägtem Vertisolcharakter. Die Überschwemmungsstandorte weisen an Gehölzen *Acacia* spp., *Grewia* spp. und *Salvadora persica* auf, von Gramineen sind *Echinochloa colonum*, *E. stagnina*, *Vossia cuspidata* und *Panicum laetum* zu nennen. Auf diesen Standorten ernährt sich das Vieh vornehmlich in der Trockenzeit. Aspekt der Landschaftseinheit TD1 siehe Abb. 9.

Abb. 9: Aspekt der Landschaftseinheit TD1



TD2: Nebenabflüsse mit erweiterten Senken (bas fonds), die ein geringes Gefälle haben und durch ihre flächige Ausdehnung eine schlechte Entwässerung bewirken. In dieser Untereinheit sind dunkle Vertisolböden verbreitet, deren Substrat die Herausbildung einer dichten „savane arbustive“ begünstigt. Auf den verdichteten Lehmböden ist der Anteil an Gehölzen sehr gering. Gramineen sind verbreitet, insbesondere *Aristida funiculata* und *Schoenefeldia gracilis*, weiterhin finden sich an Gramineen *Echinochloa colonum*, *Eragrostis pilosa*, *Panicum laetum*, *Sporobolus helvolus* und *Sorghum* spp. Der Wert für die Beweidung wird hoch eingeschätzt. Aspekt der Landschaftseinheit TD2 siehe Abb. 10.

Abb. 10: Aspekt der Landschaftseinheit TD2



TD3: Mare und abflusslose Senken. In diesen Zonen kann Niederschlagswasser bis zu mehreren Wochen oder ganzjährig oberflächlich anstehen. Ganzjährig wasserführende Mare existieren im Untersuchungsraum im Bereich des Ortes Gorom-Gorom oder im Staubereich der Dünenzüge. In den abflusslosen Senken herrschen schluffig-tonige Böden mit Vertisolcharakter vor. Aspekt der Landschaftseinheit TD3 siehe Abb.11.



Die Böden in den Überschwemmungsbereichen sind für den Hackbau im allgemeinen zu schwer. Bei zunehmender Austrocknung verhärten die obersten Bodenhorizonte, während sie im Verlauf der Regenzeit oberflächlich aufquellen. Im Staubereich der Altdünen und im Überschwemmungsbereich des Gorouol wird teilweise Gemüseanbau betrieben (z. B. bei Ménékou). Eine aktuelle Karte (Stand Luftbildbefliegung 1995) der einzelnen Abfluss- und Gerinnesysteme wird in Kapitel 2.5 vorgestellt.

2.2.3 Rumpflächenelemente (R)

Die dritte naturräumliche Landschaftseinheit lässt sich im Untersuchungsgebiet ebenfalls in mehrere Untereinheiten einteilen:

RI: Hohe Inselberge und Bergmassive aus basischen Gesteinen (Gabbros, Dolerite), granitischen Gesteinen oder oberflächlich anstehenden Lateritkrusten. Die höchsten Relieferhebungen dieses Typs bilden das Massiv von Kolel mit 448 m über NN im Norden des Einzugsgebiets und der Bélliata mit 394 m über NN im Süden des Einzugsgebiets. Aspekt der Landschaftseinheit RI siehe Abb. 12.

Abb. 12: *Aspekt der Landschaftseinheit RI*



RGs: Granit-Schildinselberge, die nur geringe Höhen im Untersuchungsgebiet erreichen und eine starke Wollsackverwitterung aufweisen. Die Granit-/Migmatit-Schildinselberge werden meist von einem Glacis aus Granitgrus und Dünensand umgeben. Größere Granit-Inselberge finden sich außerhalb des Untersuchungsgebiets in der Region von Aribinda. Aspekt der Landschaftseinheit RGs siehe Abb. 13.