

**Entwicklung eines
fernerkundungsgestützten Modells zur
Erfassung von pflanzlicher Biomasse in
NW-Namibia**

Dissertation

zur

Erlangung des Doktorgrades (Dr. rer. nat.)

der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

vorgelegt von

Jochen Richters

aus

Ludwigsburg

Bonn 2005

Angefertigt mit der Genehmigung der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen
Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.

1. Referent: Prof. Dr. G. Menz
2. Referent: PD Dr. C. Samimi

Tag der Promotion: 10.03.2005

Diese Dissertation ist auf dem Hochschulschriftenserver der ULB Bonn
http://hss.ulb.uni-bonn.de/diss_online elektronisch publiziert.

Vorwort

Die Auseinandersetzung des Menschen mit einer ariden Umwelt ist der zentrale Forschungsgegenstand des Sonderforschungsbereichs "Kultur- und Landschaftswandel im ariden Afrika" (SFB 389) an der Universität zu Köln. Er kombiniert dabei sowohl geistes- als auch naturwissenschaftliche Fächer. Die Arbeitsgruppe Fernerkundung (RSRG) des Geographischen Instituts der Universität Bonn ist mit dem Teilprojekt "Erfassung von Vulnerabilität mit Fernerkundung in Nordnamibia" (B7) seit Anfang 2002 an dem SFB389 beteiligt.

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen dieses Sonderforschungsbereiches entstanden. Daher gilt mein erster Dank den Kollegen aus dem SFB für anregende Diskussionen, die mir Einblicke in die Methoden und Konzepte benachbarter wie weiter entfernter Forschungsdisziplinen gestatteten. Insbesondere danke ich Herrn Prof. Dr. Michael Bollig für die Möglichkeit, als Bonner Forschergruppe mit einem Teilprojekt in dem SFB mitzuarbeiten. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) danke ich für die Bereitstellung der finanziellen Mittel für Sach- und Reisekosten. Dem Geographischen Institut der Universität Bonn danke ich für die Bereitstellung einer Planstelle, die mir neben den Verpflichtungen in der Lehre und der akademischen Selbstverwaltung den Freiraum gab, diese Arbeit anzufertigen.

Mein außerordentlicher Dank gilt Herrn Prof. Dr. Gunter Menz für die inhaltliche sowie mentale Betreuung der Arbeit. Herrn PD Dr. Cyrus Samimi danke ich herzlich für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Ich bedanke mich für die Kooperationsbereitschaft der zuständigen namibianischen Behörden und bei den Mitglieder des Etosha Ecological Institute in Okaukejo. Hier danke ich vor allem Herrn Johan LeRoux für inhaltliche Anregungen und die praktische Unterstützung bei unseren Feldaufenthalten.

Den Kollegen und Freunden der Arbeitsgruppe Fernerkundung gilt mein besonderer Dank für ihre freundschaftliche Unterstützung. Dies gilt vor allem für Torsten Welle, der mich auf allen Feldaufenthalten begleitet hat und mir dadurch zu einem guten Freund wurde. Daneben danke ich meinen Zimmergenossen Doris

Klein und Peter Poete für anregende und kritische Diskussionen über die Tücken und Untiefen der geographischen Fernerkundung.

Für die kritische Durchsicht des Manuskripts dieser Arbeit danke ich besonders meinen Kollegen Torsten Welle und Doris Klein. Hendrik Wagenseil gilt mein Dank sowohl für intensive Diskussionen in Erlangen über Namibia im allgemeinen und die Fernerkundung in semiariden Räumen im speziellen als auch für die umfassende Korrektur dieser Arbeit.

Und schließlich gilt mein Dank meiner Familie, die in den letzten Jahren und besonders in den letzten Monaten für mich da waren, wenn ich Zuspruch und Aufmunterung brauchte. Besonders dabei danke ich meiner Frau Stefanie Mey und meiner Mutter Ingrid Richters für das konsequente Ausmerzen der unzähligen Rechtschreibfehler und sprachlichen Verknotungen.

Berlin, im Januar 2005

J. Richters

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Forschungsproblem und Fragestellung	4
2	Das Kaokoland im Kontext von "Global Change"	7
2.1	Das Kaokoveld – Versuch einer Definition entlang historischer und naturräumlicher Grenzen	9
2.1.1	Forschungsgeschichte des Kaokolandes	9
2.2	Die naturräumliche Ausstattung des Kaokolandes	10
2.2.1	Klimatische Einordnung und Niederschlagsverteilung im nord- westlichen Namibia	12
2.2.2	Relief, Böden und geologischer Bau als Grundlagen pflanz- licher Entwicklung	18
2.2.3	Die Vegetation und ihre Verteilung im Kaokoveld	20
2.3	Die Wirtschaftsweise der hirtennomadischen Bevölkerung	25
2.3.1	Viehhaltung, Weidewirtschaft und pastoralnomadische Raum- nutzung	28
2.3.2	Konsequenzen der pastoralnomadischen Nutzung für die Vegetationsbedeckung	33
2.4	Globaler Wandel und klimatische Veränderungen	35
3	Methoden und Modellansätze	41
3.1	Methoden zur Erfassung von Biomasse	42
3.1.1	Abgrenzung und Definition	42
3.1.2	Prinzip der Photosynthese	44
3.2	Gemeinsamkeiten und Unterschiede bestehender Modellansätze . .	47
3.2.1	Notwendigkeit neuer Konzepte zur regionalen Analyse von Biomasse	52

4	Entwicklung und Implementierung des "Regionalen Biomasse-Modells (RBM) Kaokoveld"	55
4.1	Erfassung der Nettoprimärproduktion aus Fernerkundungsdaten . . .	55
4.1.1	Der Zusammenhang von NPP, APAR und NDVI	56
4.1.2	Anwendung der NPP-Berechnung im RBM Kaokoveld	58
4.2	Die Ableitung der photosynthetisch aktiven Strahlung	59
4.2.1	Ein mathematisches Modell zur Ermittlung der potentiellen solaren Einstrahlung	60
4.2.2	Variationen der solaren Einstrahlung	63
4.3	Der <i>NDVI</i> als Maß der effektiven Absorption von Sonnenstrahlung	65
4.4	Die Erfassung des biophysikalischen Konversionsfaktors ε	66
4.4.1	Ableitung und Beeinflussung von ε_{max}	68
4.4.2	Temperatur- und Wasserstreß als Einflußfaktoren von ε_{eff} .	76
4.4.3	Ableitung der potentiellen und aktuellen Verdunstung . . .	77
4.5	Eingangsgroßen zur Berechnung der pflanzlichen Biomasse	83
5	Die Nutzung von täglichen Satellitendaten zur Erfassung der dekadi-schen NPP	87
5.1	Die Beschaffung von MODIS-Daten	89
5.2	Die Vorbereitung und Verwendung der MODIS-Daten im RBM Kaokoveld	92
5.2.1	Geokorrektur der MODIS Land-Daten (<i>MOD09</i> , <i>MOD11</i> und <i>MOD44</i>)	94
5.2.2	Ableitung physikalischer Parameter und Zusammenfassung der Zeitreihendaten (<i>MOD09</i> , <i>MOD11</i> und <i>MOD44</i>)	97
5.2.3	Verwendung von MODIS Atmosphärendaten (<i>MOD05_L2</i>)	104
5.3	Raum-zeitlich konstante Datensätze für die Biomassenberechnung	108
5.4	Rechenläufe mit dem Regionalen Biomassemodell	111
5.4.1	Erstellung eines RBM-Projekts zur Biomassenberechnung .	112
5.4.2	Anwendung des Kernmoduls zur Berechnung der raumzeitlichen Biomasse	114
6	Ergebnisse aus dem RBM Kaokoveld	119
6.1	Berechnung von Biomasse und deren raumzeitliche Entwicklung . .	119
6.2	Evaluation der Modellergebnisse	124
6.2.1	Genereller Vergleich mit Ergebnissen anderer Modelle . . .	124
6.2.2	Vergleich mit dem MODIS <i>MOD17</i> Produkt	126

6.2.3	Vergleich der Modellergebnisse mit den Ergebnissen des C-FIX-Modells	128
6.3	Möglichkeiten der Modellvalidierung durch eine unabhängige Datenbasis	132
6.3.1	Durchführung von Feldaufenthalten zwischen 2002 - 2004	132
6.3.2	Bewertung der Vergleichsdaten	138
7	Diskussion der Modellergebnisse	157
7.1	Neue methodische Aspekte in der Biomassenmodellierung	158
7.2	Nutzungspotential der Ergebnisse für das Verständnis der Biomasseproduktion in Nordwestnamibia	162
8	Zusammenfassung	165
8.1	Ausblick für zukünftige Forschungsarbeiten	166
A	Anhang	195
A.1	ENVI/IDL Programme zur Biomassenberechnung	195
A.1.1	MOD09_PREP	195
A.1.2	MOD11_PREP	199
A.1.3	MOD05_PREP	204
A.1.4	MOD44_PREP	209
A.1.5	RBM_PREP_GUI	210
A.1.6	RBM_Kaokoveld	216
A.2	Protokoll der Routine <i>RBM_PREP_GUI</i>	226
A.3	Tabelle der Felddaten von 2002	231
A.4	Datenträger mit Demodaten und Ergebnissen	234

Abbildungsverzeichnis

1.1	Strukturdiagramm der Arbeit	3
2.1	Übersichtskarte des Kaokoveldes	8
2.2	Schematische Hierarchie der Hauptkomponenten von Ökosystemen	11
2.3	Zirkulatorische Grundzüge der Sommerwitterung über dem südlichen Afrika	13
2.4	Klimazonale Gliederung	14
2.5	Monatliche Verteilung der Niederschläge	15
2.6	Mittlere Jahresniederschläge im Kaokoland	16
2.7	Großlandschaften und Bodentypen des Kaokolandes	19
2.8	Vegetationskarte des Kaokolandes	22
2.9	<i>Colophospermum mopane</i>	23
2.10	<i>Stipagrostis hirtigluma</i>	24
2.11	Himba-Siedlung im nördlichen Kaokoveld	27
2.12	Herero-Siedlung	28
2.13	Sanga Rinder im nördlichen Kaokoland	29
2.14	Viehbestand des Kaokolandes	31
2.15	Weidenutzung im nordöstlichen Kaokoland zwischen Epupa und Okangwati	32
2.16	Verbuschte Savanne	33
2.17	Auswirkungen des Holzeinschlags	34
2.18	Prozentuale Veränderung der NPP	36
2.19	Degradierte Savanne südöstlich von Opuwo	39
3.1	Schema der Nahrungspyramide	43
3.2	Idealisiertes saisonales Muster der Biomasse	46
3.3	Klassifikation von Vegetationsmodellen	48
3.4	Klassifikation der BGC-Modelle nach Komplexität	50

4.1	Einstrahlung und Absorptionsbedingungen zur Erfassung der <i>APAR</i>	57
4.2	Modellkomponenten zur Berechnung der Biomasse	59
4.3	Modell zur Berechnung der potentiellen Einstrahlung	62
4.4	Spektrale Energieverteilung	64
4.5	Einflußfaktoren auf den biophysikalischen Konversionsfaktor	67
4.6	Verteilung der Vegetationsanteile im Jahr 2001 aus <i>MOD44B</i>	69
4.7	Fuzzifizierung von des Faktors 'Absolute Höhe'	72
4.8	Fuzzifizierung von des Faktors 'Hangneigung'	73
4.9	Fuzzifizierung von des Faktors 'Nährstoffversorgung'	75
4.10	C/N-Verhältnis aus FAO-Bodenkarte im Kaokoland	76
4.11	Vergleich der RFE- mit MOD05-Daten	81
4.12	Vergleich von PET und EET	83
4.13	Übersicht der RBM-Berechnung	85
5.1	Übersicht der Prozessierung	88
5.2	Screenshot der MODIS-Datenbank	91
5.3	GUI der Routine <i>MOD09_PREP</i>	95
5.4	Integerized Sinusoidal Projektion	96
5.5	Aufbau der Routine <i>MOD09_PREP</i>	98
5.6	Aufbau der Routine <i>MOD11_PREP</i>	100
5.7	Emissivität aus <i>MOD11</i> -Daten	102
5.8	Aufbau der Routine <i>MOD05_PREP</i>	105
5.9	Überlagerung der Swath-Daten mit dem Untersuchungsgebiet	106
5.10	GUI der Routine <i>MOD05_PREP</i>	107
5.11	Bewölkung und Wasserdampf aus <i>MOD05_L2</i> -Daten	108
5.12	GUI der Routine <i>RBM_PREP_GUI</i>	111
5.13	GUI der Routine <i>RBM_Kaokoveld</i>	113
5.14	Programmschema der RBM-Routine <i>RBM_Kaokoveld</i>	115
5.15	Flußdiagramm der Datenprozessierung	116
6.1	Gesamtbiomasse des Jahres 2001	141
6.2	Gesamtbiomasse des Jahres 2002	142
6.3	Gesamtbiomasse des Jahres 2003	143
6.4	Raumzeitliche Entwicklung der pflanzlichen Biomasse 01- 12/2002	144
6.5	Raumzeitliche Entwicklung der pflanzlichen Biomasse 12- 24/2002	145
6.6	Raumzeitliche Entwicklung der pflanzlichen Biomasse 25- 36/2002	146
6.7	Darstellung der Eingangsgrößen für die Biomassenberechnung	147
6.8	MODIS <i>MOD17A3</i> NPP-Produkt	148

6.9	Biomassenproduktion berechnet nach C-FIX aus SPOT-VGT-1-Daten für 2001	149
6.10	Korrelation der DMP- und RBM-Daten	150
6.11	Vergleich der RBM-Ergebnisse entlang eines Reliefgradienten	150
6.12	Lage der Plots zur Felddatenerhebung	151
6.13	Photodokumentation des Plots: p009 (04/2002)	152
6.14	Ernteversuch zur Bestimmung der Biomasse	152
6.15	Darstellung des Meßdesings der Baum- und Strauchschicht	153
6.16	Vergleich der RBM- mit Felddaten für Gesamt- und Grasbiomasse	154
6.17	Vergleich der RBM- mit Felddaten für Gehölzbiomasse	155
7.1	N-S-Profil der Produktion in 2002 bei Otjiu (Hoarusibtal)	162
7.2	Mittleres Hoarusibtal bei Otjiu	163

Tabellenverzeichnis

2.1	Durchschnittlicher Jahresniederschlag an den Stationen Opuwo, Sesfontein und Möwe Bay	17
4.1	Verwendete Symbole zu Berechnung der potentiellen Einstrahlung	63
4.2	Empirische Faktoren der maximalen LUE	70
4.3	Bestimmung der Bodenart	74
5.1	Übersicht der Einheiten der Vegetation in den MOD44B-Datensätzen.	103
6.1	Vergleich der Biomasseproduktion 2001 - 2003	121
6.2	Kennwerte des <i>MOD17A3</i> -Datensatzes für 2002	127
6.3	Vergleich der RBM- mit den Felddaten für 2003	139
A.1	Daten des Feldaufenthaltes von 2002	231

Abkürzungsverzeichnis

ACACIA	Arid Climate Adaptation and Cultural Innovation in Africa
ADDS	African Data Dissemination Service
AMSU	Advanced Microwave Sounding Unit
APAR	Absorbierte Photosynthetisch Aktive Strahlung
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
BGC	Bio-Geochemisches Modell
CASA	Carnegie-Ames-Stanford Approach
CD-ROM	Compact Disk - Read Only Memory
CDP	Constant Data Product
DFG	Deutschen Forschungsgemeinschaft
DM	Trockenmasse, engl. "Dry Matter"
DMP	Dry Matter Productivity
DN	Digital Number
DOY	Day of the Year
DSMW	Digitale Weltbodenkarte, engl. "Digital Soil Map of the World"
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EET	Effektive Evapotranspiration
ENVI	Environment to visualize images
EOS-1	Earth Observing System-1
EROS	Earth Resources Observation Systems
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FEWS	Famine Early Warning System
FPAR	Fraction of absorbed Photosynthetically Active Radiation (Anteil der absorbierten photosynthetisch wirksamen Strahlung)
ftp	File Transfer Protocol
GCM	Global Circulation Model (Globales Zirkulationsmodell)
GCP	Bodenkontrollpunkt, engl. "Ground Control Point"
GPS	Global Positioning System

GUI	Graphische Benutzeroberfläche, engl. "Graphical User Interface"
HDF	Hierarchical Data Format
HRBM	High Resolution Biosphere Model
HRVIR	High Resolution Visible - Infrared-Sensor
IBP	International Biological Program
IDL	Interactive Data Language
IFFN	International Forest Fire News
IFOV	Instantaneous Field of View
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISIN	Intergerized Sinusoidal Projection
ITC	Innertropische Konvergenzzone
LAI	"Leaf Area Index" (Blattflächenindex)
LP DAAC	Land Processes Distributed Active Archive Center
LUE	Lichtverwertungseffizienz, engl. "Light Use Efficiency"
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MRT	MODIS Reprojection Tool
MSG	Meteosat Second Generation
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (US-Wetterdienst)
ORNL	Oak Ridge National Laboratory
PAR	Photosynthetisch Ausnützbare Strahlung, engl. "Photosynthetic Active Radiation"
PET	Potentielle Evapotranspiration
PFT	Pflanzenfunktionstypen, engl. "Plant Function Types"
PIK	Potsdam Institut für Klimafolgenforschung
RBM	Regionales Biomasse-Modell
RFE	geschätzte Niederschlagsdaten, engl. "Rainfall Estimate"
RMS	Root Mean Square Error
RSRG	Arbeitsgruppe Fernerkundung, engl. "Remote Sensing Research Group"
SDS	Scientific Data Set
SFB	Sonderforschungsbereich
SPOT	
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SSM/I	Special Sensor Microwave/Imager

SVAT	.....	Boden-Vegetation-Atmosphärentransfer-Modelle, engl. "Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer"
TLU	.....	äquivalentes Lebendgewicht, engl. "tropical livestock unit"
TSP	.....	Time Step Product
USGS	.....	US Geological Survey
UTM	.....	Universal Transverse Mercator-Projektion
VCF	.....	Vegetation Continuous Field
VGT	.....	VEGETATION
VITO	.....	Flemish Institute for Technological Research
WGS84	.....	World Geodetic System 1984
WMO	.....	World Meteorological Organisation
YDP	.....	Yearly Data Product

1 Einleitung

Die Vegetation und die von ihr erzeugte Biomasse nehmen im trockenen nördlichen Namibia eine Schlüsselrolle ein. Dabei unterliegt das Savannen-Ökosystem einem Gleichgewicht zwischen Produktion von Biomasse und Verbrauch derselben durch den Menschen, Weide- und Wildtiere. Zeitliche Veränderungen der Vegetation und damit der Produktivität des Ökosystems liegen dabei zum einen in der Variabilität der Niederschläge und zum anderen in der Nutzung durch halbnomadische Viehhalter begründet. Bei einer kontinuierlichen Übernutzung kann es zu Problemen wie Degradation, Entwaldung und Desertifikation kommen. Während die Gründe für die Übernutzung in einem zu hohen Weidedruck zu suchen sind, ist eine mögliche zunehmende Variabilität der Niederschläge als Konsequenz eines globalen Wandels zu betrachten. Als Resultat treten auf lokaler wie auch auf regionaler Ebene Landschaftsveränderungen auf.

Eine große Schwierigkeit stellt die Erfassung solcher Veränderungen dar (IPCC, 2001). Ein Indikator ist dabei die Produktivität der Pflanzendecke der Erdoberfläche. Diese Größe ist für die Betrachtung aus zwei unterschiedlichen Perspektiven interessant. Zum einen ist die Produktivität ein Maß für die Kohlenstoffassimilation der Pflanzen und damit ein wichtiger Einflußfaktor im globalen Kohlenstoffhaushalt ; dabei stellt sich vor allem die Frage nach eventuellen globalen und regionalen Kohlenstoffsenken, die zur Verminderung des atmosphärischen Kohlendioxidgehalts beitragen können (WATSON et al., 1997). Zum anderen spielt die Produktivität der Vegetation für die anthropogene Nutzung eine zentrale Rolle.

Besonders im nordwestlichen Namibia mit seiner nomadisch geprägten Raumnutzung ist die ausreichende Entwicklung von pflanzlicher Biomasse wichtig. Das fragile Gleichgewicht, das zur Zeit zwischen pflanzlicher Produktion und dem Verbrauch durch Beweidung besteht, kann in Zukunft durch einen steigenden Viehbesatz gefährdet werden (SULLIVAN, 1999). Die Folgen einer solchen Übernutzung sind bereits an einigen Stellen im Untersuchungsgebiet festzustellen.

Bevor die Ursachen von Landschafts- und Vegetationsveränderungen analysiert werden können, müssen diese Veränderungen sicher und nachvollziehbar erfaßt werden. Dazu stellen neuere Fernerkundungssensoren, wie z.B. MODIS an Bord

von EOS-1 TERRA Satelliten ein ideales Instrumentarium dar. Mit einer mittleren Auflösung und einer fast täglichen Abdeckung der Erde können großräumige Veränderungen an der Erdoberfläche erfaßt werden. Ein zentrales Forschungsfeld ist dabei die Auswertung der raumzeitlichen Daten. In der vorliegenden Arbeit wird ein Ansatz für die Prozessierung von MODIS-Daten zur Ableitung der pflanzlichen Produktivität entwickelt. Diese Prozessierung beinhaltet ein regionales Modell, das fernerkundliche Datenprodukte als zentrale Eingangsvariablen nutzt und mit einem dekadischen¹ Ansatz die Produktivität der Pflanzendecke berechnet. Die Berechnung erfolgt auf der Basis von Rasterzellen, die als kleinste Modelleinheit vorgesehen sind. Um die Ergebnisse dieser Arbeit sowohl für die Abschätzung von Landschaftsveränderungen als auch zur Beurteilung der Weidenutzung durch die lokalen Pastoralnomaden im Untersuchungsgebiet nutzen zu können, wird für jeden Zeitschritt die Gesamtproduktivität der Vegetationsdecke berechnet und zugleich auch die Produktivität der Grasschicht. Letztere spielt für die Ermittlung der Weidebilanz eine bedeutende Rolle.

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 389 "Kultur- und Landschaftswandel im ariden Afrika" in dem Teilprojekt B7 "Modellierung von Vulnerabilität mit Fernerkundung in Nordnamibia" erstellt worden. Der SFB 389 wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert und ist an der Universität zu Köln etabliert. Zentrale Forschungsgegenstand des SFB ist die Auseinandersetzung des Menschen mit einer ariden Umwelt in zwei Schwerpunktregionen. Eine davon ist das nordwestliche Namibia, der originäre Untersuchungsraum der vorliegenden Arbeit. Dabei wurden in dem Untersuchungsgebiet mehrfach Feldarbeiten² durchgeführt, deren Ergebnisse zur Überprüfung der erarbeiteten Modellresultate herangezogen werden, während das methodische Ziel eines Modellansatzes zur Erfassung der raum-zeitlichen pflanzlichen Biomasse im Vordergrund der Arbeit steht.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in vier Teile (siehe Abb. 1.1).

Der erste Teil nennt die zentrale Fragestellung der Arbeit, stellt den Untersuchungsraum vor und ordnet diesen in den Kontext des globalen Wandels ein. Dazu wird in Kapitel 2 der Untersuchungsraum mit seinem naturräumlichen Potential und die Nutzung desselben durch den Menschen dargestellt. Damit soll der Hintergrund des Aspektes der Weidenutzung verdeutlicht werden. Zugleich wird in diesem Kapitel das Phänomen des globalen Wandels beleuchtet und sich daraus

¹Ein dekadischer Zeitschritt umfaßt 10 Tage. Dabei wird der 1.-10. Tag eines Monats zur ersten, der 11.-20. Tag zur zweiten und der 21.-30. Tag eines Monats zur dritten Dekade zusammengefasst.

²Insgesamt wurden vier Feldaufenthalte in den Jahren 2002, 2003 und 2004 durchgeführt.

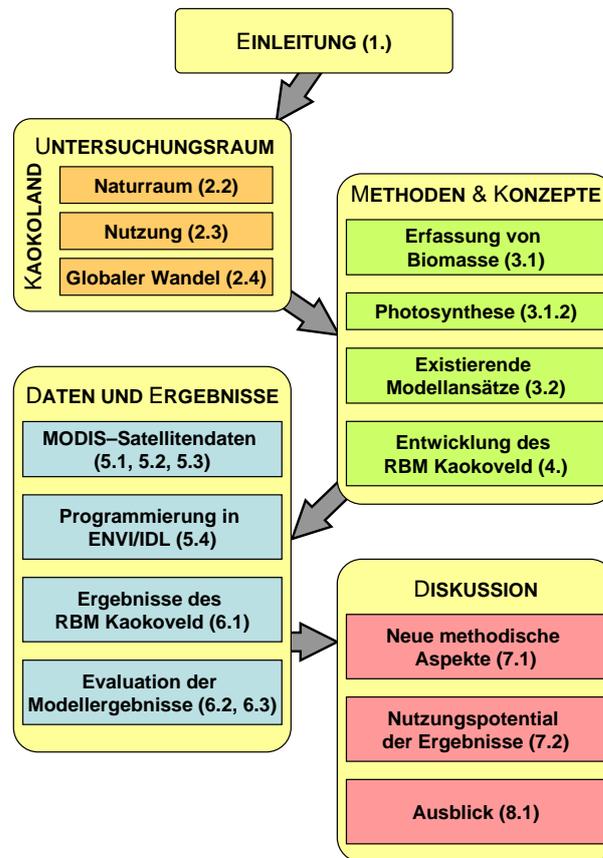


Abbildung 1.1: Strukturdiagramm der vorliegenden Arbeit. Diese gliedert sich in vier Teile, die den Untersuchungsraum darstellen, Methoden und das Modellkonzept erläutern, Daten und Ergebnisse darstellen sowie die Ergebnisse diskutieren. In Klammern sind jeweils die einbezogenen Kapitel vermerkt. (Quelle: eigener Entwurf)

ergebende Konsequenzen im Untersuchungsgebiet dargestellt. Die Produktivität der Pflanzendecke ist für dieses Phänomen ein Schlüsselgröße und wird besonders betont.

Der zweite Teil der Arbeit konzentriert sich auf die methodischen Aspekte. Im Mittelpunkt stehen die Grundlagen der Photosynthese und Bestimmung der Produktivität. Desweiteren wird ein Überblick über existierende Modellansätze zur Bestimmung der Produktivität vorgestellt und diskutiert. Aus den Überlegungen zu einem Modellansatz, der ausschließlich aus Satellitendaten die Produktivität

ableiten soll, resultiert das "Regionale Biomasse-Modell (RBM) Kaokoland". Die Entwicklung und Implementierung dieses Modells wird in Kapitel 4 vorgestellt.

Der dritte Teil befaßt sich vor allem mit den verwendeten Satellitendaten. Diese Daten werden in Kapitel 5 vorgestellt, genauso wie auch die selbstentwickelten Computerroutinen, mit denen diese Daten verarbeitet werden. Dabei steht die Zusammenfassung der täglichen Satellitendaten zu dekadischen Datensätzen bei der Vorverarbeitung im Vordergrund. Die Umsetzung des in Kapitel 4 vorgestellten Modellkonzepts in der Programmiersprache ENVI/IDL der Firma RSI Inc. bildet den Abschluß des Kapitels. Im daran anschließenden Kapitel 6 werden die Ergebnisse der Biomassenmodellierung interpretiert. Einen wichtigen Anteil nimmt dabei die Evaluierung der Ergebnisse ein. Diese umfasst neben dem theoretischen und praktischen Vergleich mit anderen Modellen auch die Auswertung von unabhängigen Daten, die während mehrerer Feldaufenthalte im Untersuchungsgebiet erhoben wurden.

Der vierte und letzte Teil der Arbeit diskutiert in Kapitel 7 zum einen die Ergebnisse der Biomassenentwicklung im Untersuchungsgebiet und zum anderen die neuen methodischen Aspekte der Arbeit. Beendet wird die Arbeit mit einer Zusammenfassung (Kapitel 8) und einem Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeiten.

1.1 Forschungsproblem und Fragestellung

Savannen bilden den häufigsten Vegetationstyp der Tropen und Subtropen (SOLBRIG, 1996). Dabei ist die raumzeitliche Verteilung der pflanzlichen Biomasse in den wechselfeuchten Tropen und Subtropen eng an das Klimatelement Niederschlag gekoppelt und unterliegt somit einer hohen Variabilität (BOND, MIDGLEY & WOODWARD, 2003). Die Nutzung dieser Savannengebiete erfolgte in weiten Teilen des altweltlichen Trockengürtels bis in jüngere Zeit hinein vor allem durch räumlich mobile, nomadisch lebende Viehhirten. Aufgrund jüngerer Prozesse, wie der fortschreitenden Industrialisierung und Globalisierung, konnte sich diese pastoralnomadische Wirtschaftsweise nur sehr vereinzelt erhalten (SCHOLZ, 1994). Die Savannen des Kaokolands im Nordwesten Namibias werden seit dem 18. Jahrhundert von pastoralnomadisch lebenden Himba genutzt. Die haben ihre traditionelle Kultur aufgrund der unzugänglichen Lage des Gebiets und der politisch bedingten Isolation bewahrt (DITTMANN & DITTMANN, 2002). Dies gilt insbesondere für die speziellen Techniken der Viehhaltung und Weidenutzung (BOLLIG & SCHULTE, 1999). Jedoch erlebt der Untersuchungsraum und damit seine

Bewohner seit der Unabhängigkeit Namibias eine stete Öffnung, besonders der Viehmärkte, die mittelfristig zu deutlichen Veränderungen der Nutzungsmuster führen werden (BOLLIG, 2002). Die Konsequenzen solch veränderter Nutzungsmuster sind in vielen afrikanischen Savannengebieten zu beobachten, in denen durch zu hohen Weidedruck Degradation und Desertifikation ausgelöst wurde (MENSCHING, 1990; ELLIS & SWIFT, 1988). Neben solchen Veränderungen, die indirekt auch Konsequenzen auf die Produktivität der Vegetation haben werden, stellen sich auch durch Modifikationen des globalen Klimas (z.B. Veränderung der Niederschlagsmuster) Veränderungen der Vegetation und deren Produktivität ein (SHAVER et al., 2000). Für die speziellen pastoralnomadischen Nutzungsmuster in dem Untersuchungsraum stellt die Produktivität somit eine Schlüsselgröße zur Bestimmung der Weidebilanz dar.

Für die flächenhafte Erkennung, Identifizierung und Bewertung der Veränderungen und deren Konsequenzen stellt die Fernerkundung aufgrund ihrer synoptischen Erfassung und hohen zeitlichen Wiederholbarkeit ein ideales Instrumentarium dar (ROLLER & COLWELL, 1986). Die Erfassung der Produktivität mit Methoden der Fernerkundung ist dabei ein eigenes spezifisches Forschungsproblem, dem sich bereits einige Untersuchungen widmen (siehe dazu Kapitel 3.2).

Diese Arbeit versucht, die methodischen Aspekte der Modellierung von pflanzlicher Produktion mit den oben skizzierten Veränderungen zu verbinden. Von daher steht die raum-zeitliche Erfassung pflanzlicher Biomasse im Zentrum. Um in einem entlegenen Untersuchungsgebiet, wie dem Nordwesten Namibias, eine solche Erhebung flächendeckend durchzuführen, war es notwendig, ein fernerkundungsgestütztes Modell zu entwickeln. In einem ersten Schritt wurden unterschiedliche, bereits existierende Modellansätze hinsichtlich ihrer Eignung für die Erfassung von Biomasse evaluiert. Da bisherige Arbeiten mit der fernerkundungsgestützten Erfassung von Biomasse in dem semiariden Untersuchungsraum Probleme haben, war die Entwicklung eines neuen Modells notwendig.

Das in dieser Arbeit vorgestellte regionale Modellkonzept basiert auf den theoretischen Ansätzen von MONTEITH (1972) und POTTER et al. (1993). Im Gegensatz zu früheren Ansätzen werden jedoch bei dem hier vorgestellten regionalen Biomasse-Modell (RBM) alle notwendigen Einflußgrößen aus fernerkundlichen Datenprodukten abgeleitet. Dabei wird die Produktivität der Vegetation mit einer räumlichen Auflösung von $1 \times 1 \text{ km}^2$ und mit Zeitschritten von jeweils 10 Tagen (dekadischer Ansatz) erfasst.

Das über den Rahmen dieser Arbeit hinausgehende Ziel der Konzeption eines mesoskaligen Beweidungsmodells im Spannungsfeld zwischen pflanzlicher Pro-

duktion und Verbrauch durch Weidetiere (Herbivoren) bietet möglicherweise die Chance, zukünftig auf regionale Veränderungen als Folge globalen Wandels durch ein tieferes Verständnis des Weideökosystems reagieren zu können.

2 Das Kaokoland im Kontext von "Global Change"

Eine durch den Menschen verursachte Beeinflussung des globalen Klimas und damit verbundene Veränderungen der Ökosphäre des Planeten Erde gelten heute als unumstritten. Durch die ansteigenden Emissionen von Treibhausgasen wie Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) und Stickoxiden (N_2O) kam es seit dem Beginn der Industrialisierung Mitte des 18. Jahrhunderts zu einem Anstieg der mittleren globalen Temperatur (IPCC, 2001). Damit verbunden sind Änderungen aller an das Klimasystem gekoppelten Systeme auf der Erde. Das IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) hat seit 1990 in mehreren umfangreichen Berichten versucht, die wissenschaftliche Basis von Klimaveränderungen und deren Auswirkungen auf natürliche und sozio-ökonomische Systeme sowie mögliche Anpassungsstrategien darzustellen. Damit wurden zum einen die globalen Ursachen als auch lokalen Auswirkungen dokumentiert, von denen jeder Mensch betroffen ist.

Ein Kernproblem stellt dabei die Vorhersagbarkeit oder Nichtvorhersagbarkeit von Klimaänderungen dar. Sie erfassen nicht den gesamten Planeten Erde und führen sowohl zu positiven wie negativen Veränderungen auf unterschiedlichen Maßstabsebenen und in unterschiedlichen Regionen der Erde (IPCC, 2001; SHAVER et al., 2000). Besonders betroffen von den vielfältigen Veränderungen wird der afrikanische Kontinent sein, da aufgrund weit verbreiteter Armut und hoher Abhängigkeit der Bevölkerung von landwirtschaftlicher Nutzung nur geringe Möglichkeiten der Anpassung an Folgen des globalen Wandels bestehen (WATSON et al., 1997).

In diesem Kapitel nun sollen Auswirkungen des globalen Wandels auf den nordwestnamibianischen Untersuchungsraum "Kaokoland" erläutert werden. Zuvor soll jedoch eine Einführung in die naturräumlichen Grundlagen des Untersuchungsraumes (Kap. 2.2) und dessen weidewirtschaftliche Nutzung (Kap. 2.3) erfolgen. Durch die Verknüpfung der beiden Komplexe wird ein für die Fragestellung dieser Arbeit notwendiges vollständiges Bild des Naturraums und seiner

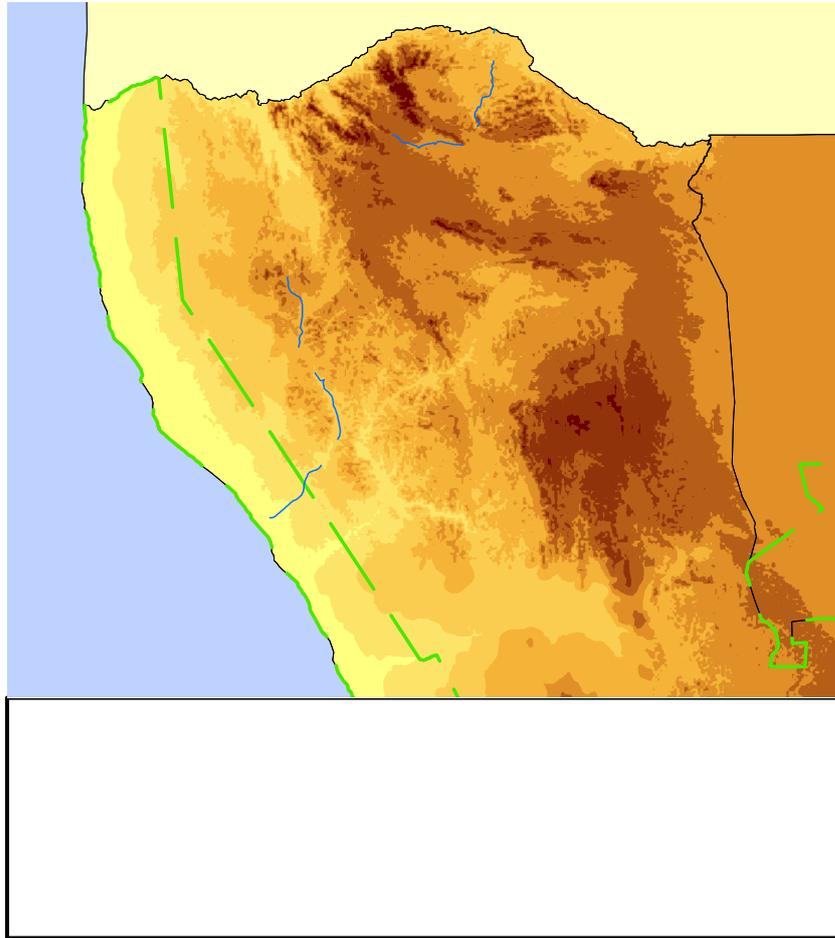


Abbildung 2.1: Übersichtskarte des Kaokoveldes (Datengrundlage: MENDLERSOHN et al., 2002)

Nutzung vorgestellt. In Kapitel 2.4 wird dann auf die unmittelbaren Folgen des globalen Wandels für den Untersuchungsraum eingegangen.

2.1 Das Kaokoveld – Versuch einer Definition entlang historischer und naturräumlicher Grenzen

Die Abgrenzung des Kaokolandes ist sowohl in naturräumlicher als auch in administrativer Hinsicht schwierig. Als Kaokoland¹ wird der nordwestliche Teil Namibias bezeichnet (siehe Abb. 2.1), der im Norden durch den Grenzfluss Kunene abgegrenzt wird (MALAN & OWEN-SMITH, 1974). Im Süden trennt der Hoanib über weite Strecken das Kaokoland vom südlich anschließenden Damaraland ab. Die Westgrenze bildet die Namibwüste und der Nationalpark "Skeleton Coast Park", bzw. der Südatlantik. Bis zur administrativen Neuordnung Namibias nach der Unabhängigkeit im Jahre 1990 und der Eingliederung des Kaokolandes in die größere Region Kunene galt eine Linie, die vom Kunene bei etwa 14° E bis zur NW-Ecke des Etosha-Nationalparks verlief, als Ostgrenze (BRUNOTTE & SANDER, 2002). Die heutige Ostgrenze der nördlichen Kunene Region entspricht in etwa dieser Linie. Diese räumlichen Abgrenzungen sollen auch dieser Arbeit zugrunde gelegt werden. Damit ergibt sich für das Kaokoland eine Fläche von etwa 50 000 km².

In naturräumlicher Hinsicht stellt das Kaokoland den Übergangsraum von dem weiten Hochplateau des südafrikanischen Schildes über die zum Teil aufgelöste Große Randstufe zur Abdachung der Namib dar. Die während der südafrikanischen Besatzungszeit festgelegten administrativen Grenzen des Homelands² 'Kaokoland' decken sich zwar gut mit dem Untersuchungsraum (LESER, 1982), spiegeln jedoch nicht mehr die aktuelle Ausdehnung der Region 'Kunene' wider, die seit der namibianischen Unabhängigkeit eingerichtet wurden.

Nach einem kurzen Überblick über die bisherigen Arbeiten sollen der Untersuchungsraum vorgestellt und hinsichtlich seiner naturräumlichen Ausstattung diskutiert werden. Kapitel 2.3 erläutert dann die Wirtschaftsweise der Himba und Herero, der pastoralnomadischen Bewohner dieses Landstrichs.

2.1.1 Forschungsgeschichte des Kaokolandes

Die kultur- und geowissenschaftliche Erforschung des Kaokolandes steht in einer langen Tradition mit ersten kartographischen Erwähnungen des Kunene und der umliegenden Gebiete zu Beginn des 18. Jahrhunderts (BOLLIG, BRUNOTTE & BECKER, 2002). Erst seit dem Ende des 19. Jahrhunderts erreichen Reisende

¹Oder auch Kaokoveld. Beiden Namen werden in der Literatur synonym verwendet.

²Als Homeland wurden die den indigenen Stämmen zugeordneten Gebiete während der Apartheid bezeichnet (Odendaal-Plan).

aus dem Süden der deutschen Kolonie Südwest-Afrika das Kaokoland und geben in Reiseberichten Auskunft über die bis dato unbekannt Gebiete (HAHN, 1869). Spätere Expeditionen z.B. von Hartmann und Kuntz dienten vor allem der Prospektion und der Erkundung von Transportwegen, die in der Vorlage erster genauerer Karten des Kaokolandes mündeten (KUNTZ, 1912; KUNTZ, 1913; HARTMANN, 1902). Damit setzt die Benennung der Landschaft durch die Kolonialverwaltung ein (z.B. Hartmann Berge, Toennissen Berge, Joubert Berge, usw.). Während der Weltkriege ruhte die Forschung in Südwest-Afrika weitgehend und wurde erst danach wieder aufgenommen. Wichtige Beiträge zur geowissenschaftlichen Erforschung sind die Übersichtsberisungen von ABEL (1954) und ABEL (1959) (zitiert in BOLLIG, BRUNOTTE & BECKER, 2002) zur Reliefgenese und die Untersuchungen von MARTIN (1950); MARTIN & PORADA (1977) zum geologischen Bau und zur Verbreitung von Sedimenten.

Seit der Unabhängigkeit Namibias im Jahr 1990 hat die Anzahl der sozial- und geowissenschaftlichen Forschungen deutlich zugenommen. Zur Erweiterung des Forschungsstandes trugen auch die Publikationen der "Interuniversitären Namibia-Forschungsgruppe" (IUNFG) bei, deren Ergebnisse in BLÜMEL, HÜSER & EITEL (2000); LESER (2000); HEINE (1995); LESER & RUST (1997) und HÜSER et al. (2001) zusammengefasst sind und seit 1995 trägt der SFB 389, der im Kaokoland eine Schwerpunktregion seiner Forschungen hat, zu weiterem Erkenntnisgewinn bei. Im Jahr 2002 erfolgte eine umfassende Darstellung der bisherigen Ergebnisse BOLLIG, BRUNOTTE & BECKER (2002).

Die Erarbeitung der Vegetation des Kaokolandes ist bei weitem nicht so umfangreich wie die sozial- oder geowissenschaftlichen Forschungen. Neben einer vorläufigen Kartierung der Vegetation durch GIESS (1971); GIESS (1998), liegt ein Bestimmungswerk von MERXMÜLLER (1972) vor, das er während seiner Forschungsreise 1957 erstellt hat. Eine detaillierte Beschreibung der Vegetation liefert VILJOEN (1980), der vierzehn Hauptvegetationsklassen unterscheidet (BOLLIG, BRUNOTTE & BECKER, 2002). Weiterführende Arbeiten zur Vegetation, zur Tragfähigkeit und Veränderungen des Pflanzenkleides sind im Rahmen des SFB 389 entstanden (SCHULTE, 2001; BECKER, 2000).

2.2 Die naturräumliche Ausstattung des Kaokolandes

Der Naturraum stellt mit seinen abiotischen Komponenten Klima, Relief, Gewässer und Böden die wichtigste Grundlage für die biotischen Komponenten Vegetation und Tierwelt und damit für die Landnutzung dar (SCHULTZ, 2002). Dabei unter-

liegen diese Einflußfaktoren bestimmten Abhängigkeiten, die in der Hierarchie in Abbildung 2.2 dargestellt sind.

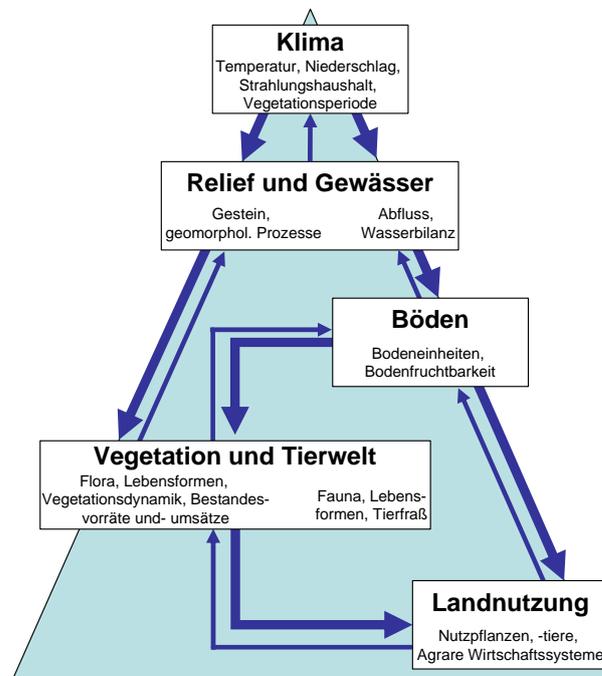


Abbildung 2.2: Schematische Hierarchie der Hauptkomponenten von Ökosystemen. Die Reihenfolge entspricht etwa den Abhängigkeiten der Einflußfaktoren und der Gliederung dieses Kapitels. (Quelle: SCHULTZ, 2002, digital verändert)

So ist beispielsweise die Vegetation in stärkerem Maße von den Böden abhängig als umgekehrt, Böden wiederum sind im wesentlichen Produkte des Materials (Gestein), der Form der Erdoberfläche (Relief) und des Klimas. Aufgrund dieser Abhängigkeiten soll zunächst eine klimatische Einordnung des Kaokolandes erfolgen, sodann ein Abriss über die wichtigsten Reliefformen, den geologischen Bau und die vorhandenen Böden. Der letzte Abschnitt der naturräumlichen Gliederung befasst sich mit der Vegetation des Kaokolandes.

2.2.1 Klimatische Einordnung und Niederschlagsverteilung im nordwestlichen Namibia

Das Klima hat einen primären Einfluß auf die Entwicklung von Biomasse, da die Vegetation der Erde je nach Klimazone und geographischer Lage eine sehr unterschiedliche Dichte, Mächtigkeit und Artenzahl aufweist (KLINK, 1996). Namibia ist insgesamt von einem semihumiden bis ariden Klima geprägt (LESER, 1982). Das **Klima des Kaokolandes** prägen Wüsten- bis Halbwüstenklimare, was sich aus zwei Lagefaktoren in der allgemeinen Zirkulation der Erde erklärt. Zum einen liegt der größte Teil der Kaokovelds bedingt durch die Breitenlage zwischen 17° und 19° S im Einflußbereich der jahreszeitlichen Verschiebung der äquatorialen Tiefdruckrinne (v.a. im Dezember) und des subtropisch-randtropischen Hochdruckgürtels. Die Verschiebung führt zu einem Wechsel von südsommerlicher Regenzeit und winterlicher Trockenzeit. Dies stellt den ersten Lagefaktor dar.

Die winterliche Trockenzeit, die im allgemeinen von März/April bis November/Dezember dauert (KLIMM, SCHNEIDER & VON HATTEN, 1994), wird vom Südostpassat dominiert, der aus dem subtropisch-randtropischen Hochdruckgebiet strömt, absinkt und eine Inversion aufbaut. Die stabil geschichtete Atmosphäre erlaubt kaum Konvektion oder Bildung von Niederschlägen (JÜRGENS & BÄHR, 2002).

Im Südsommer dagegen verschiebt sich die innertropische Konvergenzzone (ITC) dem Sonnenstand folgend bis weit in die Kalahari nach Süden (siehe Abb. 2.3). Die in der ITC konvergierenden Luftmassen, die aus dem Nordostpassat hervorgegangen sind, bedingen Konvergenz in Bodennähe und die Hebung von Luftpaketen. Durch das Aufeinandertreffen von wärmeren Luftmassen aus Norden und Nordosten bzw. feucht-warm-instabilen Luftmassen aus Zentralafrika und vom Indischen Ozean auf der Ostseite des sommerlichen Kalahari-Tiefdruckgebiets und Kaltluftmassen aus dem Süden, kommt es zu sommerlichen Konvektions- und Frontalniederschlägen, die sich in zum Teil heftigen Gewittern entladen (KLIMM, SCHNEIDER & VON HATTEN, 1994, S. 14)(WEISCHET & ENDLICHER, 2000).

Der zweite Faktor ist in der Lage NW-Namibias am Westrand des Kontinents begründet. Zum einen liegt der Kern des subtropisch-randtropischen Hochdruckgebiets über dem östlichen Südatlantik, wodurch Absinkbewegung und Inversion besonders stark ausgebildet werden. Die äquatorwärts ausströmende Luft des Hochdruckgebiets unterliegt einer Flächendivergenz, die die Absinktendenz verstärkt (WEISCHET & ENDLICHER, 2000, S. 304). Die in älteren Quellen gemachte Darstellungen, "die Niederschläge ... stammen aus den Luftmassen des Südostpassats von der Ostseite des südlichen Afrikas, die den Kontinent überqueren

und auch im Westen Niederschläge bringen, sind nach den Ergebnissen meteorologischer Forschung und Satellitenbildinterpretationen nicht aufrechtzuerhalten" (KLIMM, SCHNEIDER & VON HATTEN, 1994, S.14). Zudem verstärkt der kühle Benguelastrom, der Wasser aus subpolaren Breiten entlang der südafrikanischen Westküste gen Norden trägt, mit niedrigen Oberflächentemperaturen die Stabilität der Luftschichtung.

Nach der übergeordneten Einordnung NW-Namibias in die allgemeine Zirkulation der Atmosphäre soll nun die **Ausprägung des Klimas** im Kaokoland erläutert werden. Im Kaokoland und dessen Randgebieten existieren lediglich fünf meteorologische Stationen, deren Daten an das Weather Bureau Windhoek

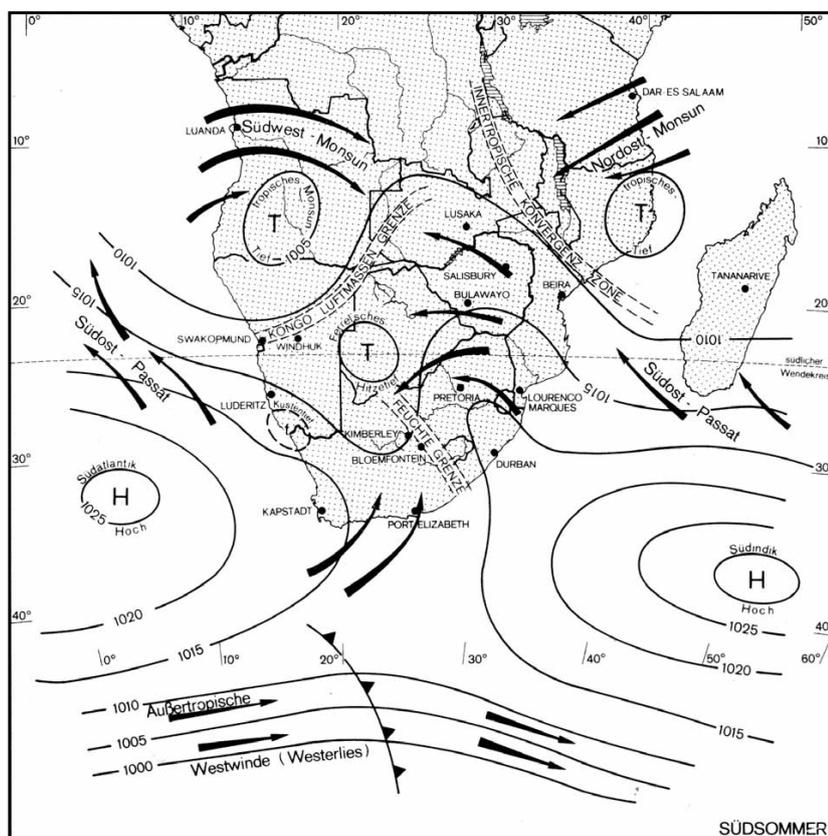


Abbildung 2.3: Zirkulatorische Grundzüge der Sommerwitterung über dem südlichen Afrika. (Quelle: WEISCHET & ENDLICHER (2000, S. 305))

übermittelt werden. Neben der Küstenstation Möwe Bay sind dies Sesfontein im südlichen, Opuwo im zentralen Kaokoland, sowie Ruacana an der Grenze von Kaokoland und Ovamboland und zuletzt Okaukejo im Etoscha Nationalpark. Diesem ohnehin recht spärlichen Meßnetz im Kaokoveld liegt überdies eine fragmentarische Datenlage zugrunde. Keiner der Datensätze repräsentiert eine dreißigjährige Normalperiode; zum Teil liegen für weniger als ein Dutzend Jahre Meßwerte vor. Alle Datensätze sind lückenhaft und weisen monatelange Unterbrechungen auf. Dazu sind die Datensätze der einzelnen Stationen nicht deckungsgleich. Auf dieser Grundlage lassen sich kaum Aussagen machen. So ist z.B. die Dürrekatastrophe der frühen achtziger Jahre, die durch mündliche Überlieferungen dokumentiert ist, nur in den Daten von Sesfontein belegt, in den Stationen Opuwo und Ruacana

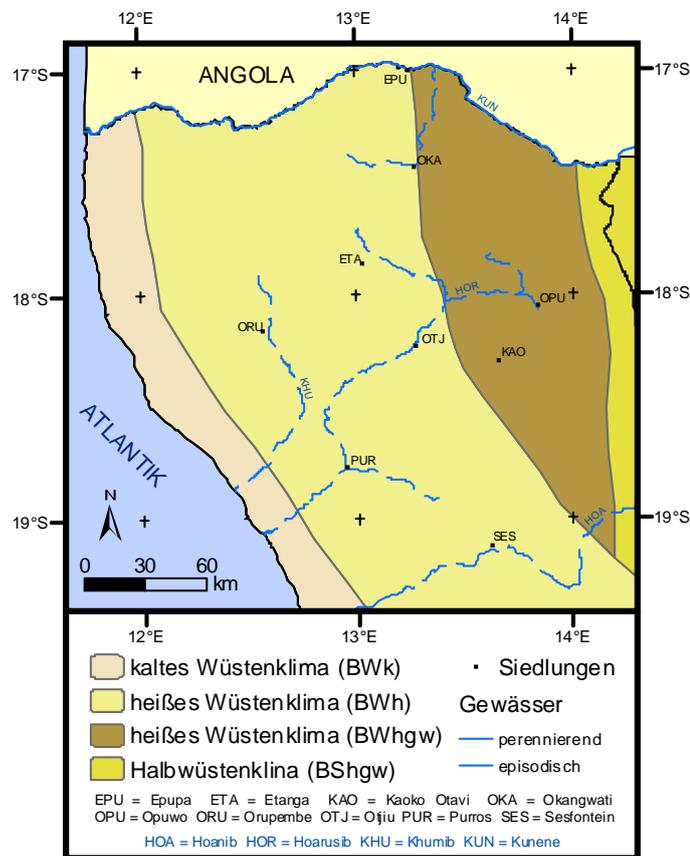


Abbildung 2.4: Klimazonale Gliederung (nach Köppen) (digital verändert nach VAN DER MERWE, 1983)

fanden keine Messungen statt (SANDER & BECKER, 2002, S. 58).

Nach der Klimaklassifikation von Köppen ist der überwiegende Teil des Kaokoveldes dem heißen Wüstenklima mit einer Jahresmitteltemperatur von mehr als 18°C zuzuordnen (BWh) (siehe Abb. 2.4, VAN DER MERWE, 1983). Für den östlichen Teil wird ein Wüstenklima mit sommerlichem Maximum bei den Niederschlägen und Temperaturen beschrieben (BWhgw), das östlich von Opuwo in ein Halbwüstenklima (BShgw) mit sommerlichem Temperatur- und Niederschlagsmaximum übergeht. Bedingt durch den kalten Benguelastrom vor der Küste liegt im westlichsten Teil des Kaokolandes im Bereich des Skeleton Coast Parks ein kaltes Wüstenklima (BWk) vor (SANDER & BECKER, 2002).

Während die Niederschläge für die Entwicklung der Vegetation unabdingbar sind, stellt die **Temperatur** nirgendwo in Namibia einen limitierenden Faktor dar. Auch wenn in weiten Teilen des Landes mit Nachtfrost gerechnet werden muß, tritt dieser in NW-Namibia nur episodisch auf (LESER, 1982; KLIMM, SCHNEIDER & VON HATTEN, 1994).

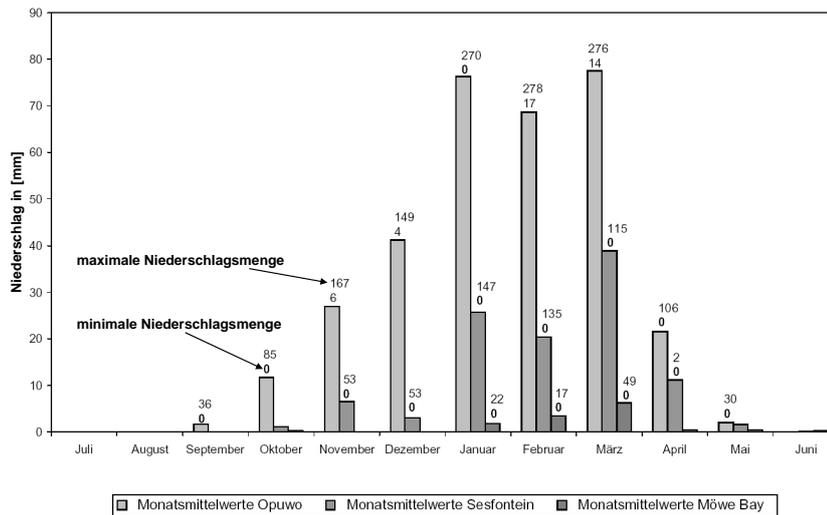


Abbildung 2.5: Monatliche Verteilung der Niederschläge an den Stationen Opuwo, Sesfontein und Möwe Bay (1941-1999) (Quelle: BECKER, 2000)

Die **Niederschläge** fallen im Kaokoland aufgrund der Lage in der planetaren Zirkulation zwischen Dezember und April, wobei die Regenzeit im Nordosten des Untersuchungsgebietes zwischen zwei und vier Monaten dauert. So dauert die Regenzeit in Opuwo etwa drei bis vier Monate. Nach Westen und Süden nimmt sowohl die Niederschlagsmenge als auch die Niederschlagshäufigkeit ab,

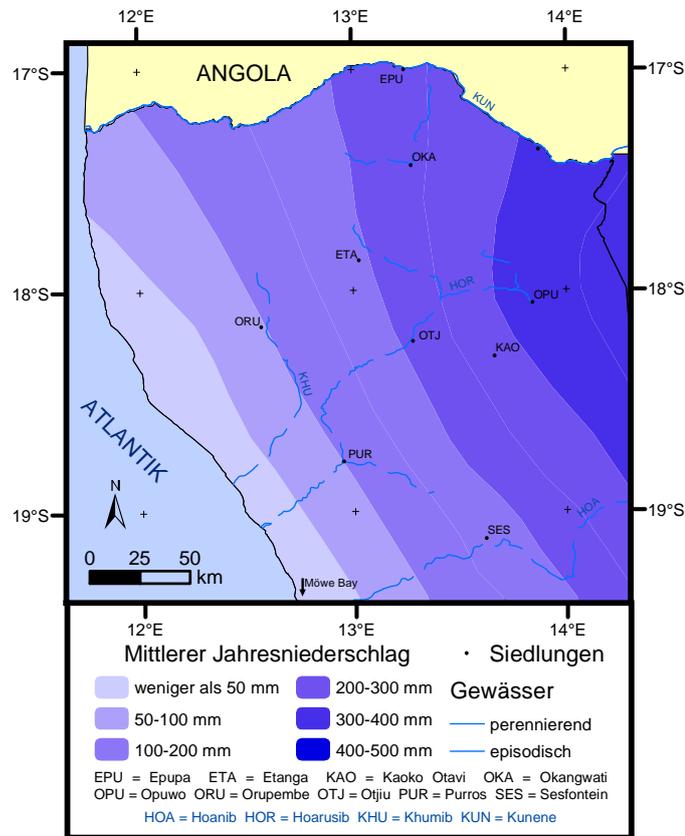


Abbildung 2.6: Mittlere Jahresniederschläge im Kaokoland. (Datengrundlage: MENDLESOHN et al., 2002)

während die Variabilität der Niederschläge in den entsprechenden Gebieten stark zunimmt. In Sesfontein werden nur etwa ein bis zwei Monate Regenzeit erreicht und im Westen des Arbeitsgebiets regnet es lediglich einen Monat, wenn in diesen Gebieten aufgrund der Variabilität überhaupt Niederschläge fallen.

Allgemein nimmt in Trockengebieten die Abweichung vom langjährigen Mittel mit abnehmender Niederschlagshöhe zu (HOURÉROU, 1989). In Namibia generell und auch im Kaokoland sind positive Abweichungen vom mittleren Jahresniederschlag seltener, aber deutlich heftiger als negative Abweichungen (KEMPF, 1994). Bei steigender Aridität und Variabilität treten außerdem vermehrt extrem trockene Jahre auf, in denen weniger als 75% des Niederschlags des langjährigen Mittels fallen (TYSON, 1986).

Für vegetations- und weideökologische Fragestellungen ist die zeitliche Verteilung des Niederschlags über das Jahr von großer Bedeutung (PRIOR, 1994; WILSON & WITKOWSKI, 1998). In Abbildung 2.5 erkennt man, daß die höchsten Niederschlagssummen von Januar bis März fallen. Zugleich wird deutlich, daß die maximalen Niederschlagsmengen den Durchschnitt dieser Monate weit übersteigen können, wie auch die Niederschläge in diesem Zeitraum deutlich geringer oder ganz ausfallen können (BECKER, 2000). Während der März an allen drei Stationen der niederschlagsreichste Monat ist, weisen Opuwo und Sesfontein ein sekundäres Maximum im Januar auf, an der Station Möwe Bay ist der Februar der Monat der zweithöchsten Regenmenge. So ergibt sich für das Kaokoland eine deutliche winterliche Trockenzeit, die von Mai bis Oktober andauert.

Die mittleren Niederschlagsmengen im Untersuchungsgebiet zeigen einen deutlichen nordost-südwestlichen Gradienten, der sich aus der Lagebeziehung des Kaokovelds zur ITC ergibt. Während das östlich gelegene Opuwo noch durchschnittlich 315 mm Jahresniederschlag erhält, fallen die durchschnittlichen Niederschläge in Sesfontein auf 112 mm und in Möwe Bay auf 13 mm Jahresniederschlag. Obwohl Opuwo und Sesfontein auf annähernd gleicher geographischer Länge liegen, sinkt der mittlere Jahresniederschlag um ein Drittel. Dies liegt vor allem an der südlicheren Lage Sesfonteins in Bezug auf die Erreichbarkeit der Niederschläge durch die ITC und an dem zwischen Opuwo und Sesfontein gelegene Bergland der Joubertberge, die mit über 1800 m ü.NN die dritthöchste Erhebung des Kaokolandes darstellen (vgl. Abb. 2.1). So werden die nordöstlich gelegenen Gebiete durch Steigungsniederschläge mit mehr Regen bedacht als Sesfontein im Regenschatten dieses Berglandes.

Tabelle 2.1: Durchschnittlicher Jahresniederschlag an den Stationen Opuwo, Sesfontein und Möwe Bay (Quelle: SANDER & BECKER, 2002; BECKER, 2000)

Station	Geographische Lage	n	Mittl. Jahresniederschlag [mm]
Opuwo	E13° 50', S18° 03'	21	315
Sesfontein	E13° 37', S19° 07'	24	112
Möwe Bay	E12° 43', S19 20'	28	13

(n=Anzahl der Beobachtungsjahre zwischen 1941 und 1998)

Deutlich niedrigere Niederschläge als Opuwo und Sesfontein weist die Station Möwe Bay auf. Mit nur 13 mm mittlerer Jahresniederschlag zeigt diese Station

recht gut die Bedingungen der nördlichen Namib. Die Wahrscheinlichkeit eines Ausschlingens der ITC bis an den Atlantik ist sehr gering. Auch führt der entlang der Küste nach Norden strömende kalte Benguelastrom zu einer geringen absoluten Feuchte der aus süd- und südwestlicher Richtung herangeführten Luftmassen. Über Land vermindert die rasche Erwärmung dann die Niederschlagsbildung. Die durch den Benguelastrom bedingte bodennahe Temperaturinversion schränkt konvektive Niederschläge stark ein (SANDER & BECKER, 2002).

2.2.2 Relief, Böden und geologischer Bau als Grundlagen pflanzlicher Entwicklung

Das deutlichste Reliefmerkmal des Kaokolandes ist die Große Randstufe (Great Escarpment), die hier, wie im übrigen in weiten Teiles des südlichen Afrikas, den Kontinent gegen die Küstenabdachung abgrenzt. So gliedern HILTON-TAYLOR (1994) und LESER (1982) das Kaokoland in drei topographische Einheiten, die vornehmlich nach ihrer **Höhe** und **Topographie** abgegrenzt werden: (1) Das Berg- und Hochland des Großen Escarpments und des Zentralen Hochlandes mit einer maximalen Höhe von etwas über 2000m über NN, (2) das Berg- und Flachland der Küstenabdachung, die westlich der Randstufe von 700 m bis zirka 100 m ü. NN abfällt und (3) das niedriger als 100m über NN liegende Flach- und Hügelland der eigentlichen Namib. Im Osten schließt an diese Dreigliederung die ausdruckslose Haupttrumpffläche (African Surface) an, die sich sanft nach Osten ins Kalaharienbecken neigt. Diese o.g. Großlandschaften streichen annähernd in NNW – SSE Richtung (vgl. Abbildung 2.7). Das Kerngebiet des Kaokolandes ist durch eine enge Verzahnung von zertalten Bergländern mit intramontanen Becken und Rumpfflächen in unterschiedlichen Höhenlagen gegliedert (BRUNOTTE & SANDER, 2002). Während die Grenze zwischen der Haupttrumpffläche und den Bergländern der Großen Randstufe deutlich zutage tritt (z.B. bei Opuwo als mächtige Kalkkrustenstufe), ist die Abgrenzung des Randschwellenbergländes zur westlich anschließenden Küstenebene undeutlich und tritt als gestaffelt verlaufender Bergrücken und beckenartige Talungen hervor (BRUNOTTE & SANDER, 2002).

Der **geologische Untergrund** des Untersuchungsgebietes ist für die Entwicklung des Pflanzenkleides zwar von untergeordneter Bedeutung, soll hier jedoch wegen seines Einflusses auf die Bodenbildung kurz angesprochen werden. Insgesamt zeigen die geologischen Formationen in Namibia eine große Vielfalt hinsichtlich des Alters und der Gesteinsarten. Die ältesten Gesteine sind proterozoische

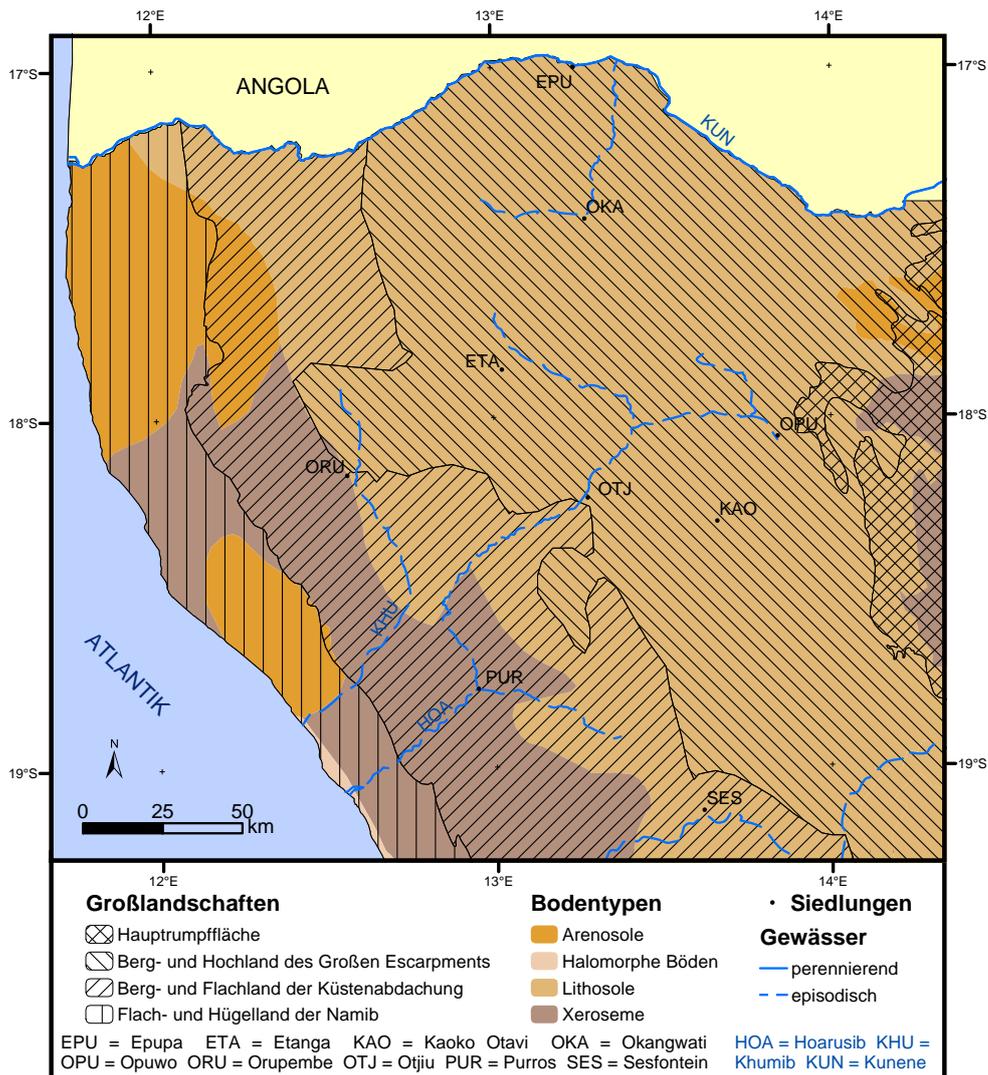


Abbildung 2.7: Großlandschaften und Bodentypen des Kaokolandes. (Quelle: Eigener Entwurf. Datengrundlage: LESER, 1982; MENDLESOHN et al., 2002)

Metamorphite und Intrusivgesteine, die aus dem Randbereich des Kongo-Kraton entstammen. Diese stehen im zentralen Kaokoland zwischen dem Marienflußtal und dem Kunene bei Swartbooisdrif an und reichen in Ausläufern bis in das Hoanibtal westlich von Sesfontein (BRUNOTTE & SANDER, 2002; KLIMM, SCHNEIDER

& VON HATTEN, 1994). Der Bereich der Zebraberge (vgl. Abb. 2.1) wird von einem mächtigen, verwitterungsresistenten Anorthositkomplex gebildet (SANDER, 2002; MALAN & OWEN-SMITH, 1974). Im westlichen Teil des Kaokolandes werden die ältesten Serien von den präkambrischen Gesteinen der Damara-Sequenz überdeckt. Die ursprünglich weit verbreiteten Tillite, Sandsteine und Vulkaniite der Karoo-Folge, die vom Perm bis in die Kreide reichte, sind rezent lediglich in einigen schmalen Talfüllungen im westlichen Kaokoveld erhalten geblieben (JÜRGENS & BÄHR, 2002; BRUNOTTE & SANDER, 2002).

Bereits aufgrund der klimageographischen Lage Namibias (siehe dazu Abschnitt 2.2.1) ist das Nutzungspotential der **Böden** insgesamt gering. Hinzu kommt, daß bislang keine moderne Bodenkarte von Namibia existiert, die eine differenzierte Betrachtung für vegetationsökologische Zwecke erlauben würde. Die Grundlagen der Bodeninformaton entstammen deshalb der FAO-Karte³ (FAO, 1996) sowie der leicht modifizierten Karte des "Atlas of Namibia" (MENDLESOHN et al., 2002). Das Kaokoveld wird nach KLIMM, SCHNEIDER & VON HATTEN (1994) dem Relief entsprechend von Gebirgsböden (Lithosolen) beherrscht. Wie aus Abbildung 2.7 ersichtlich, treten lediglich im Bereich der Namibabdachung flächenhaft Wüsten- und Halbwüstenböden (Xerosole) auf. In Abhängigkeit vom Relief und der großen geologischen Vielfalt wechseln sich jedoch kleinräumig Substrate mit sehr unterschiedlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften ab (BECKER & JÜRGENS, 2002). In streng pedologischem Sinne existieren in Namibia aufgrund der geringen Verwitterung ohnehin kein echten Böden, sondern vor allem Substrate wie Schuttanhäufungen, Lockersedimente und Verwitterungsdecken. Diese funktionieren jedoch wie Böden, indem sie eine Lebensgrundlage für Pflanzen darstellen (LESER, 1982). Infolge der geringen chemischen Verwitterung sind oft geringe Bodenmächtigkeiten, ein geringer Entwicklungszustand und hohe Skeletanteile anzutreffen. Genauso findet kaum Mineralumwandlung statt. Zugleich ist der Humusgehalt der Substrate aufgrund der dünnen Vegetationsdecke meist sehr niedrig (<1%). Beide Faktoren begründen den geringen Gehalt an mineralischen und organischen Nährstoffen. Und das wiederum bedingt eine sehr geringe Fruchtbarkeit der Böden.

2.2.3 Die Vegetation und ihre Verteilung im Kaokoveld

Die großräumige Verteilung der Pflanzendecke ergibt sich aus den standörtlichen Verhältnissen und ist Ausdruck der Evolutionsgeschichte des Pflanzenkleides.

³Die FAO-Karte liegt global im Maßstab 1:5 Mio. vor.

Dabei sind die im nordwestlichen Namibia anzutreffenden Vegetationseinheiten überwiegend als Savannen zu klassifizieren. Savannen sind nach WALTER (1990, S.99) "Ökosysteme, in denen in einem tropischen Grasland zerstreut stehende Holzarten in Wettbewerb mit den Gräsern stehen." Savannen sind dabei nach MONOD (1986), der den afrikanischen Sahel untersucht hat, an ein Gebiet zwischen der 400 mm und der 100 mm Isohyete gebunden. Im südlichen Afrika trifft diese Abgrenzung zumindest für das Kaokoland zu (BECKER, 2002).

Namibia ist aus florenräumlicher Sicht ein interessanter Übergangsraum unterschiedlicher **Florenreiche**. Während die südlichen Bereiche der nördlichen Namib nach JÜRGENS (1991) noch dem kapländischen Florenreich zuzuordnen sind ("Greater Cape Flora" mit "Succulent Karoo Region"), schließt sich östlich ein Übergangssaum von der "Damaraland-Kaokoland Domain" zur "Sudano-Zambesian Domain" an, die beide bereits dem palaeotropischen Florenreich zugeordnet werden. Diese enge Verzahnung unterschiedlicher Florenreiche bedingt ein großes Vorkommen von Endemiten in den jeweiligen Übergangsbereichen (CRAVEN, 2002).

Eine ältere (GIESS, 1971), bis heute neu aufgelegte **Vegetationskartierung**⁴ (GIESS, 1998) berücksichtigt für das Kaokoland lediglich zwei Vegetationstypen: einerseits die Vegetation der nördlichen Namib, die in etwa durch die Grenze des Skeleton Coast Parks begrenzt wird, und andererseits eine Mopanebaum- und Mopanestrauchsavanne weiter östlich. Auch LESER (1982) sieht lediglich zwei Vegetationsformationen, die denen von GIESS (1998) gleichen. Diese beiden Vegetationsformationen könnten als Biome angesprochen werden, da sie, bei gleichzeitiger Betrachtung der Tierwelt, jeweils ein eigenes Ökosystem darstellen (SCHULTZ, 2002). Eine deutlich differenziertere Vegetationskarte wurde von VILJOEN (1980) vorgelegt. Er ordnet die Vegetation dabei 14 Hauptklassen zu, die anhand dominierender Arten in zahlreiche Untereinheiten gegliedert werden (siehe Abbildung 2.8). Die von ihm beschriebenen Einheiten folgen großräumig dem Gradienten der mit Niederschlägen verbundenen Klimaelemente.

Der Osten des Untersuchungsraumes ist von *Colophospermum mopane* dominierten Savanneneinheiten geprägt. Mit dem Eintritt in den Bereich des Escarpments treten verstärkt stammsukkulente Arten in den Vordergrund (*Euphorbia guerichiana*, *Commiphora multijuga* und *C. virgata*) (VILJOEN, 1980). Unter edaphischen oder klimatisch ariden Bedingungen verzweigt *Colophospermum mopane* und bildet eine strauchige Wuchsform; so z.B. in den höher gelegenen und westlichen Teilen des Kaokolandes (SCHULTE, 2001). Dies ist vor

⁴Die Karte von GIESS (1998) liegt im Maßstab 1:1 Mio. vor.

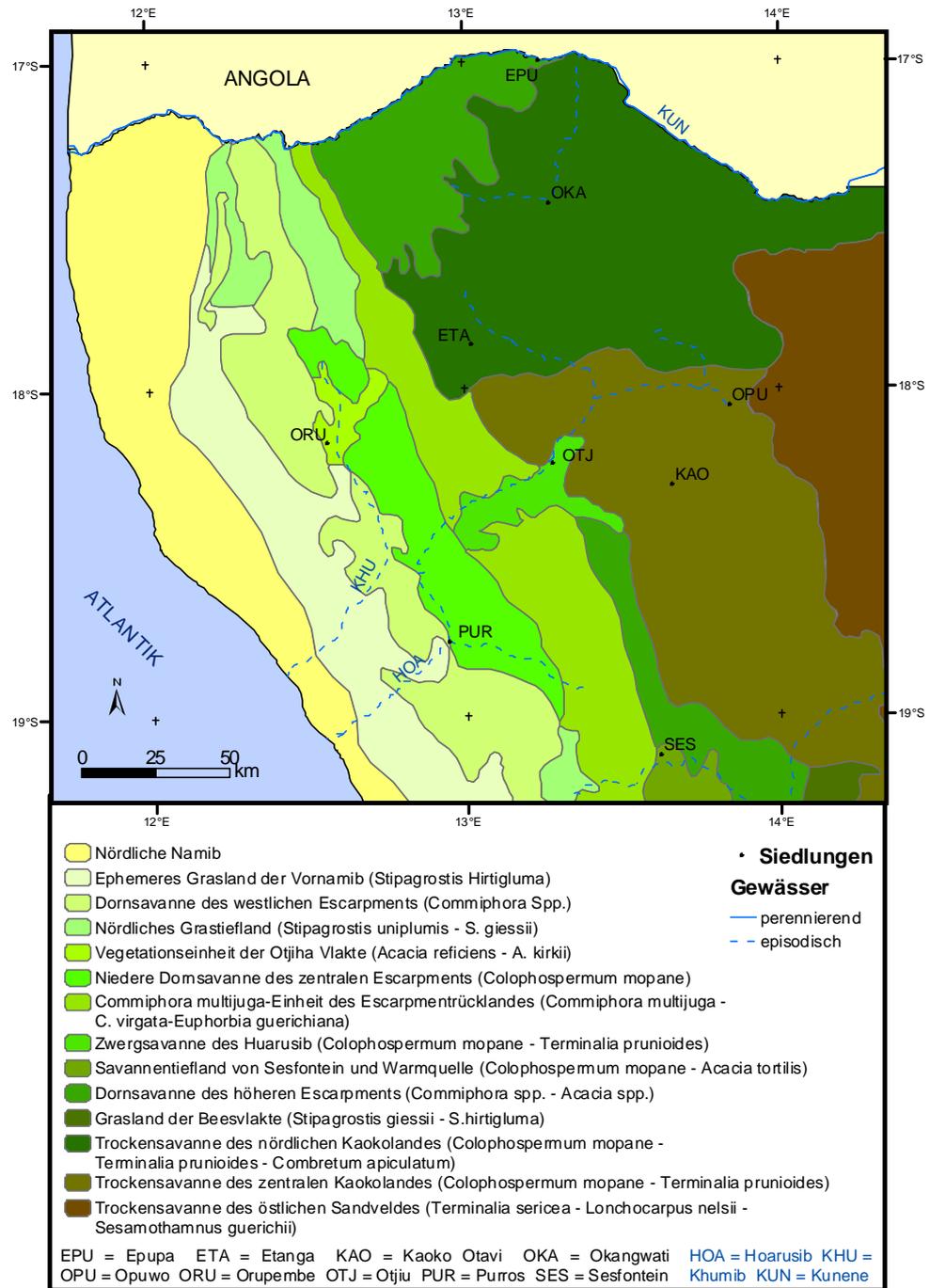


Abbildung 2.8: Vegetationskarte des Kaokolandes (nach VILJOEN, 1980, digital verändert)

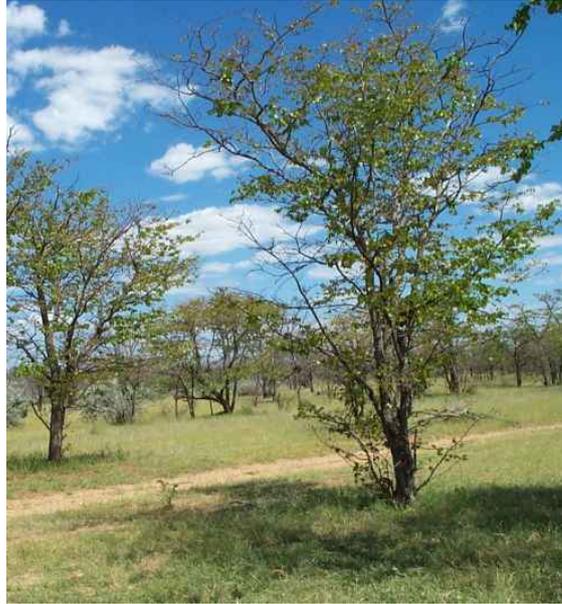


Abbildung 2.9: *Colophospermum mopane*: Typbaum der Savannen im Kaokoland (Höhe etwa 4 Meter)(Photo: Richters, 2002)

allem auf Frosteinwirkung zurückzuführen (BERRY & LOUTIT, 2000). Weiter östlich unter weniger ariden Bedingungen gedeiht *Colophospermum mopane* als ein- bis mehrstämmige Bäume mit bis zu sechs Meter Höhe (siehe Abb. 2.9). Neben den ein- und mehrjährigen Gräsern bildet Mopane einen wichtigen Futterbaum zur Ernährung der Viehherden. In der Trockenzeit werden die Blätter gerne von Ziegen und Rindern gefressen (BOLLIG, 1997b). Dabei zeigt Mopane einen irregulären Laubwurf. Die Zeitpunkte des Blattaustriebs und des Blattwurfs weisen eine Schwankungsbreite von mehreren Wochen auf und sind stark von Habitat- und Niederschlagsbedingungen abhängig. Meist beginnt der Blattyklus mit dem Einsetzen der Trockenzeit im Mai, zwischen August und Oktober sind die Bäume kahl (DEKKER & SMIT, 1996). Dabei kann Mopane scheinbar eine längere Vegetationsperiode aufrechterhalten als andere in dem Gebiet vorkommende Baumarten, wie *Terminalia prunioides* (Blutfruchtbaum) und *Combretum apiculatum* (Kudubusch). Die beiden letztgenannten dienen ebenfalls in der Trockenzeit als Futterbusch für Wild und Nutztiere (BERRY & LOUTIT, 2000).

Westlich der Großen Randstufe geht die Strauch- bis Zwergstrauchsavanne in ein ephemeres Grasland über, das von *Stipagrostis hirtigluma* und *Stipagrostis uniplumes* dominiert wird (BECKER, 2000)(siehe Abb. 2.10). Die Savannenstand-



Abbildung 2.10: Dominierende Pflanze des ephemeren Graslandes westlich der Großen Randstufe: *Stipagrostis hirtigluma* (Photo: Richters, 2002)

orte des westlichen Kaokolandes verfügen in der Grasschicht in den tiefgründigen sandigen Bereichen, die meist auch einer Beweidung unterliegen, vor allem über einjährige Gräser wie *Schmidtia kalahariensis* oder *Stipagrostis hirtigluma*. Daneben sind auch mehrjährige wie *Stipagrostis uniplumes*, *Digitaria spp.* und *Schmidtia pappophoroides* zu finden (SCHULTE, 2001).

Im Rahmen dieser Arbeit, die sich mit der Abschätzung der Biomasse auf einer mesoskaligen Ebene befasst, erfolgt keine Ansprache der Vegetation im engeren botanischen Sinne, da sich mit der verwendeten Methodik (siehe Kapitel 3 und 4) die einzelnen Arten nicht unterscheiden lassen. Stattdessen soll die Produktivität der Pflanzendecke insgesamt erfasst werden. Dies kann in Zukunft eine präzise weideökologische Analyse des Raumes hinsichtlich einer möglichen Übernutzung durch den Menschen erlauben. Deshalb steht in dieser Arbeit nicht die Verteilung einzelner Pflanzenarten im Vordergrund, sondern die Anteile, die bestimmte Pflanzenfunktionstypen der Vegetation einnehmen (engl. "plant function types", PFT) (BEIERKUHNLEIN & SCHULTE, 2000). Dabei steht die Deckung an vorderster Stelle, was bedeutet, daß eine recht genaue Differenzierung der Vegetation über die Beschreibung der Anteile der Baum-, Kraut- und Grasschicht sowie

des unbedeckten Bodens möglich ist (SCHULTE, 2001). Die großräumige Betrachtung der Vegetation und ihrer Produktivität erlaubt sichere Rückschlüsse auf das Weidepotential und läßt sich zusammen mit Beweidungsszenarien für ein Monitoringsystem verwenden.

Zwar spielen solche Szenarien in dieser Arbeit nur eine nachgeordnete Rolle, für ihre Entwicklung und zum Verständnis der möglichen Veränderungen infolge des globalen Wandels sollen in folgendem Kapitel 2.3 die Grundlagen der hirtennomadischen Lebensweise in Nordwest-Namibia erläutert werden.

2.3 Die Wirtschaftsweise der hirtennomadischen Bevölkerung

Die Nutzungsgeschichte des nordwestnamibianischen Untersuchungsraumes läßt sich auf der Basis verschiedener Quellen beleuchten. Dazu gehören archäologische Arbeiten (VOGELSANG, 2002; BOLLIG & VOGELSANG, 2002), archäobotanische Untersuchungen (EICHHORN & JÜRGENS, 2002), mündliche Zeugnisse (BOLLIG, 1997c; BOLLIG & SCHULTE, 1999; BOLLIG, 1997a) sowie der Vergleich mit der Geschichte benachbarter Regionen (BOLLIG & LANG, 1998; BOLLIG, 1997b).

Der interdisziplinäre Ansatz des Sonderforschungsbereichs 389 "Kultur- und Landschaftswandel in ariden Afrika" erlaubte als einer der ersten Versuche, archäologische und ethnologische Erkenntnisse in Kaokoland aufeinander zu beziehen, um eine Rekonstruktion der **Nutzungs-** und **Besiedlungsgeschichte** vorzunehmen (BOLLIG & VOGELSANG, 2002). Bisherige Befunde aus Holzkohlenanalysen zeugen von weitgehender klimatischer Stabilität während des Holozäns (EICHHORN & JÜRGENS, 2002). Die Verfügbarkeit von Wasser war bei der Wahl der Siedlungsplätze sowohl für die rezenten als auch für die prähistorischen Gesellschaften von zentraler Bedeutung. Aus Faustkeilfunden ist bekannt, daß das Kaokoland bereits seit früher Zeit von Menschen besiedelt war (BOLLIG & VOGELSANG, 2002). Bis vor etwa 2000 Jahren wurde das Gebiet ausschließlich von verschiedenen Jäger-Sammler-Gruppen genutzt. Etwa zur Zeitenwende trat eine frühe Haustierhaltung in Form von Kleinvieh (Ziegen und Schafe) auf, die sich vermutlich aus der Einwanderung einer viehhaltenden Bevölkerungsgruppe erklärt (SCHULTE, 2001; VOGELSANG, 2002). Diese eingewanderten Gruppen gingen wahrscheinlich in ansässigen Jäger-Sammler-Gruppen auf, da für eine anschließende Periode von etwa 1000 Jahren bislang keine Haustiere nachgewiesen werden konnten (VOGELSANG, 2002).

Mit der **Einwanderung** der rinderhaltenden Herero, einer Bantu-sprechenden Gruppe von Pastoralisten, aus dem südwestlichen Angola im 18. Jahrhundert n.Chr. fand die nächste große Änderung der Wirtschaftsweise statt. Ihre Wanderung war die Folge gewaltsamer Konflikte in ihren Ursprungsgebieten in Zentralafrika (BAUMANN, 1975). Die Herero-Kultur ist zutiefst von der Rinderhaltung geprägt. Deshalb sieht MÖHLIG (2002) darüber hinaus auch die Befreiung von der Tsetse-Fliege und damit der Schlafkrankheit als einen Grund für die Migration der Herero seit Beginn des 16. Jahrhunderts. Die Herero drangen in Namibia zunächst weiter nach Süden in den Bereich des zentralen namibianischen Hochlandes ein. Nach Auseinandersetzungen mit aus Süden vordringenden Nama-Gruppen wurden die Herero zurückgedrängt. Dabei spalteten sie sich auf in die heutigen, weiter östlich lebenden Herero, die sich im Gebiet zwischen Okavango und Etosha behaupten konnten, und in den westlichen Zweig der Himba, die das nördliche Kaokoland bevölkerten (DITTMANN & DITTMANN, 2002, S. 45). Während der **Siedlungsraum** der Himba besonders das mittlere und nördliche Kaokoland umfasst, wird der Süden des Gebietes auch von Herero bewohnt.

Die **Siedlungsplätze** der Himba basieren auf einer haushaltsbezogenen Struktur, die die grundlegende "Produktions- und Konsumptionseinheit der pastoralen Weidewirtschaft" darstellt (BOLLIG, 2002, S. 190). Die einzelnen Haushalte bestehen dabei sowohl aus semipermanenten Siedlungen ("onganda"), die nach einigen Jahren bis Jahrzehnten um geringe Distanzen (einige 100 Meter) verlegt werden als auch aus Viehcamps ("ohambo") mit einer deutlich höheren Mobilität. Diese dienen der Beweidung unregelmäßig genutzter Flächen. (BOLLIG). In den Haushalten leben im Durchschnitt acht bis neun Personen, die untereinander in verwandtschaftlichen Beziehungen stehen (BOLLIG & SCHULTE, 1999).

Der Siedlungsplatz der Haushalte ist durch einen kreisförmigen weiten Kraal aus Dornen und Gestrüpp gekennzeichnet ($\emptyset \approx 30$ m) (siehe Abb. 2.11). In diesem ist ein innerer Zaun vorhanden, der vor allem dazu dient, die heimkehrenden Herden zusammenzuhalten und sie vor Raubtieren und Überfällen zu schützen (DITTMANN & DITTMANN, 2002). Dieser Innenraum ist auf Luftbildern aufgrund des Dunganfalls meist deutlich als dunkle Ablagerung zu erkennen. Die meisten Haushalte sind zusätzlich von einem Außenzaun umgeben, in den mehrere Wohn- und Vorratshütten eingebettet sind (BOLLIG & VOGELANG, 2002). Ein drittes zentrales Element einer traditionellen Himba-Siedlung ist ein "heiliges Feuer" ("okuruwo"), das nie verlöschen und in einer gedachten Linie den inneren Viehkraal über das Feuer mit der Hütte des Haushaltvorstands verbinden soll (DITTMANN & DITTMANN, 2002). Typisch für die Siedlungen der Himba sind aus

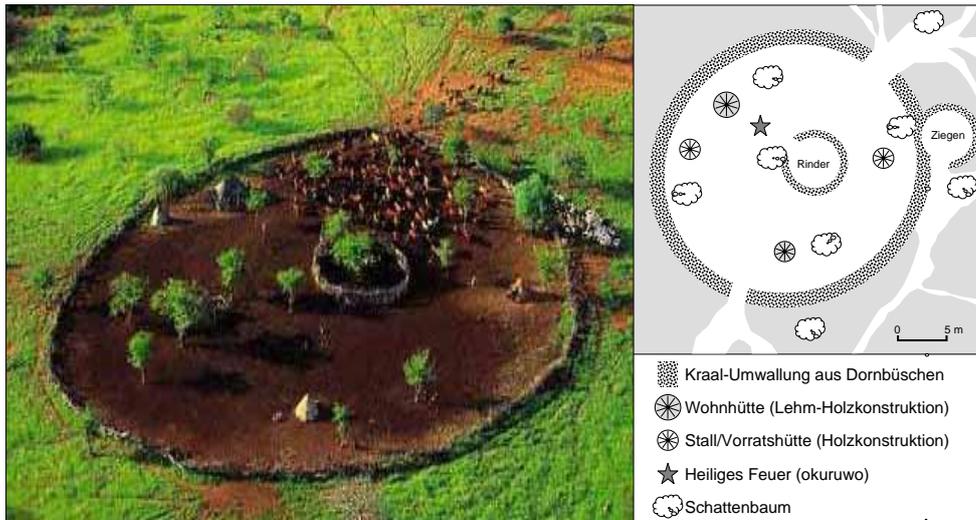


Abbildung 2.11: Typische Himba-Siedlung im nördlichen Kaokoveld (Photo: Yann Arthus Bertrand, 1999; Eigener Entwurf)

Holz und Lehm gefertigte runde Hütten und kuppelförmige Vorratshütten (vgl. Abbildung 2.11).

Die Viehcamps sind schlichter aufgebaut, da sie in der Regel nur einen Außenzaun und einige einfache Hütten besitzen. Allerdings werden sie auch nur für einige Zeit im Jahr genutzt und dienen nicht als langfristige Bleibe. Während der Abwesenheit der Hirten werden die Camps mit Astwerk und Dornbüschen verschlossen. Während die Haushalte nur von einer Familie genutzt werden, werden die Viehcamps in unterschiedlichen Jahren auch von Hirten unterschiedlicher Haushalte aufgesucht. Dabei erspart man sich gerne die Arbeit des Hüttenbaus und setzt nur Zäune des Vorjahres wieder in stand (BOLLIG & VOGELANG, 2002). Während die Haushalte immer in der Nähe von Flußläufen oder Wasserlöchern mit permanenter Wasserversorgung angelegt werden, werden mit den hochmobilen Viehcamps die Weiden weitab von Flüssen genutzt.

Neben der Fleischproduktion der Weidewirtschaft und den Milcherträgen der Rinder und Ziegen wird die Ernährungsbasis durch Sammeln von Wildpflanzen und durch die Anlage von Gärten verbreitert. Besonders das Sammeln von Palmnüssen entlang der größeren Reviere und vor allem an den Ufern des Kunene stellt eine wichtige Ergänzung der Nahrung dar (BOLLIG, 2002). Die landwirtschaftlichen Aktivitäten sorgen für eine zusätzliche Absicherung. Bei der Anlage von Gärten entlang des Kunene und in Revieren unterscheidet man zwischen Trocken-



Abbildung 2.12: Herero-Siedlung südlich von Sesfontein. (Photo: <http://www.grandpoohbah.net>)

und Regenzeitgärten. In den Gärten, die am Kunene von September/Okttober bis in den Juni/Juli hinein bewirtschaftet werden, pflanzen die Himba vor allem Mais und Hirse (VON DER BEHRENS, 2001). Zwar sind die meisten Gärten zu klein, um genügend Getreide für den Jahresverbrauch zu produzieren, doch schafft der Anbau nach BOLLIG (2002) mehr Unabhängigkeit von fahrenden Händlern und sorgt somit für eine eigenständige Existenzsicherung. Die Zunahme der generellen Anbaufläche, wie sie von WELLE (2003) ermittelt wurde, kann als Indiz für einen sozioökonomischen Wandlungsprozess gedeutet werden. Mit der Verstärkung des Gartenbaus werden die Himba eventuell unabhängiger von der Viehzucht. Vielleicht liegen die Gründe für die Zunahme der Anbaufläche auch in einem klimatischen Wandel.

Die Siedlungen der Himba unterscheiden sich vor allem in den Grundrissen von jenen, die von anderen Gruppen, wie z.B. den Herero, gebaut werden. Während die Hütten der Himba einen meist runden Grundriß aufweisen, bauen die Herero vorwiegend rechteckige Hütten, die in der Regel auch nicht durch einen äußeren Kraal gesondert geschützt sind (siehe Abb. 2.12). Das Vieh wird nachts in Gehegen aus Baumstämmen und Ästen gehalten.

2.3.1 Viehhaltung, Weidewirtschaft und pastoralnomadische Raumnutzung

Die bevorzugten Haustiere wie Schaf, Ziege und das für die Himba besonders wichtige Rind haben keine wilden Vorfahren im südlichen Afrika, so daß eine



Abbildung 2.13: Sanga Rinder im nördlichen Kaokoland. Durch die Widerstandsfähigkeit und die gute Anpassung an Aridität sind diese Rinder wesentlicher Bestandteil der Viehzucht der Himba.
(Photo: Richters, 2001)

Herkunft der domestizierten Formen aus nördlicheren Gebieten als sicher gilt (EPSTEIN, 1971). Zwar ist der Beginn der Kleintierhaltung vor ca. 2000 Jahren belegt, der Beginn der spezialisierten Viehhaltung liegt aber bis heute im Dunkeln (VOGELANG, 2002). Die Vorfahren der heutigen Himba und Herero waren bereits als kundige Rinderhalter in das Gebiet des Kaokolandes eingewandert (BOLLIG & VOGELANG, 2002).

Die pastorale Produktion der Himba ist durch bestimmte Determinanten bestimmt, wie z.B. naturräumliches Potential, Struktur der Herden, verfügbare Arbeitskraft und Technologie, räumliche Nutzungsmuster sowie dem Verbrauch der erzeugten Produkte (BOLLIG, 2002). Während der Naturraum im Kapitel 2.2 eingehend beleuchtet wurde, sollen nachfolgend überblicksartig die Herden, die Weidestrategien sowie die Raumnutzung dargestellt werden.

Die im Nordwesten Namibias von den Himba genutzte Rinderrasse, das Sanga Rind, ist an die ariden Bedingungen gut angepasst (siehe Abbildung 2.13). Nicht nur die Widerstandsfähigkeit gegen Krankheiten (z.B. "East Coast Fever"), sondern auch die verzögerte Reproduktion und eine relativ geringe Zahl an Kälbern entlasten das Muttertier (BOLLIG, 2002). Das Rind hat für die Himba eine mystische Bedeutung und spielt in der traditionellen Kultur eine wichtige Rolle. Damit

verbunden ist eine Ahnenverehrung als Mittler zwischen Gott und den Menschen. Besonders die mit der Rinderzucht verbundenen Rahmenbedingungen werden von den Ahnen mitbeeinflusst und gesteuert. Daher läßt sich die Rinderzucht der Himba nicht nur auf ökonomische Aspekte reduzieren, zumal Rinder nur zu bestimmten Anlässen (z.B. Begräbniszeremonien) oder in Notzeiten geschlachtet werden (DITTMANN & DITTMANN, 2002; BOLLIG, 1997a).

Trotz der überragenden Bedeutung des Rindes konzentrieren sich die Himba nicht nur auf die Rinderzucht, sondern halten auch kleinere Herbivoren wie Schafe und besonders Ziegen. Diese dienen neben der Milchproduktion vor allem der Fleischversorgung der pastoralen Bevölkerung. Während die Rinderherden nach SCHULTE (2001) im Bereich der permanenten Siedlung Omuramba (etwa 20 km südlich von Epupa) etwa 200-300 Tieren pro Haushalt umfassten, lag die Zahl des Kleinviehs bei etwa 300-400 Stück (Stand: 1998). Diese Erfahrungen können aus eigenen Beobachtungen auch für andere Teile des Untersuchungsraumes bestätigt werden. Trotzdem schwankt nach BOLLIG (2002) die Größe der Herden in einem weiten Bereich. So berichtet er von Rinderherden zwischen drei Tieren und bis zu geschätzten 800 Tieren, aber auch von Haushalten, die gar keine Rinder besaßen. Die Kleintierherden dagegen sind selten geringer als 80 - 100 Tiere, wobei wohlhabende Haushalte bis zu 400 bis 500 Stück Kleinvieh hielten. Sowohl die Besiedlung mit 0,61 Personen pro Quadratkilometer als auch die Besatzdichten⁵ mit 2,5 TLU/km² liegen im Kaokoland sehr niedrig (BOLLIG & SCHULTE, 1999). Jedoch ist die Tragfähigkeit der Weiden aufgrund der stark variierenden naturräumlichen Potentials und der stark differierenden Niederschläge großen Schwankungen unterworfen. So gibt SWEET (1998) in einer niederschlagsabhängigen Tragfähigkeitsabschätzung eine Größe zwischen 9 und 55 ha pro LSU an, wobei die Tragfähigkeit nach Westen stark abnimmt.

Seit der letzten großen Dürre im Kaokoland, die einen Einbruch der Viehzahlen zur Folge hatte, haben sich die Bestände deutlich erholt. Nach BOLLIG (2002) brach während der Jahrhundertdürre 1980/81 der Rinderbestand von 110.580 auf 15.000 (-85,5%) ein (siehe Abbildung 2.14). Die Kleintierherden waren von dieser Dürre nicht so stark betroffen und reduzierten sich nur um 31,5%. Jedoch war in den Folgejahren ein dramatischer Anstieg der Rinderbestände zu beobachten, der 1996 bereits einen neuen Höchststand von 154.926 Tieren mit sich brachte. Ein Ende dieser Entwicklung ist bislang nicht abzusehen, so daß es sehr wahrscheinlich ist, daß es in naher Zukunft zu deutlichen Übernutzungserscheinungen kommen wird.

⁵Eine TLU = 250 kg äquivalentes Lebendgewicht (engl. "tropical livestock unit")

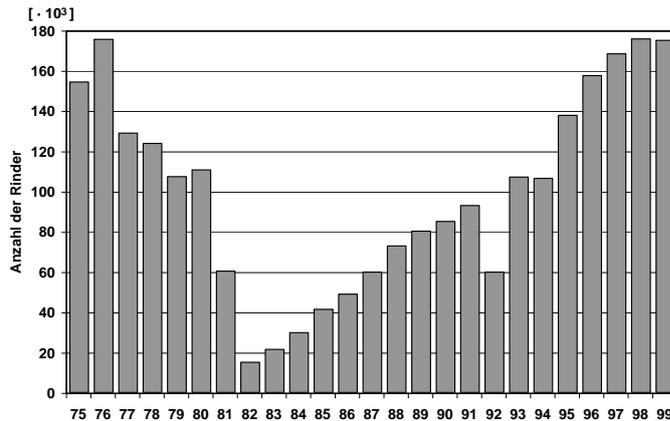


Abbildung 2.14: Viehbestand des Kaokolandes zwischen 1975 und 1999.
(Quelle: BOLLIG, 2002)

Die Weidenutzung im gesamten Kaokoland ist kommunal und nicht wie in anderen Teilen Namibias von einer zunehmenden Privatisierung der Flächen geprägt (WERNER, 2000). Die Himba praktizieren eine pastoralnomadische Wirtschaftsweise, deren wesentliches Charakteristikum die extensive Nutzung durch die Mobilität der Viehherden ist (KEMPF, 1994). Dabei ist die räumliche Nutzung der pastoralen Gebiete in vier Nutzungszonen gegliedert (BOLLIG, 2002): (1) Siedlungszentren mit mehreren permanenten Haushalten, ausreichender Wasserversorgung und Möglichkeiten zur Anlage von Gärten, (2) Siedlungen mit wenigen semipermanenten Haushalten, die immer über ausreichende Wasserversorgung verfügen. Diese beiden Nutzungszonen sind überwiegend permanent genutzt und liegen meist in der Nähe von Fluß- oder Trockenflußläufen. (3) Abseits der Flußläufe werden große Teile des Kaokolandes durch mobile Viehcamps genutzt, die zumindest in weniger als Tagesmarschentfernung Zugang zu Wasser haben, während (4) selten und unregelmäßig genutzte Gebiete einen Rückzugsraum in Dürrezeiten bieten, die jedoch nur über sehr begrenzte Wasserressourcen verfügen.

Die Aufteilung des Raumes in unterschiedliche Nutzungszonen ist ein zentrales Element des Weidemanagements. Die Zonen (1) und (2) bilden dabei die regenzeitlich genutzten Weidegebiete (Regenzeitweide), in denen die Herden nach den ersten ergiebigen Regenfällen zusammengezogen werden. Erst am Ende der Regenzeit, nachdem die wichtigsten Futtergräser ihren Reproduktionszyklus abgeschlossen haben, werden die Herden in die Gebiete der Nutzungszone (3) getrieben, die als Trockenzeitweiden dienen (BOLLIG & SCHULTE, 1999)(siehe Abb.

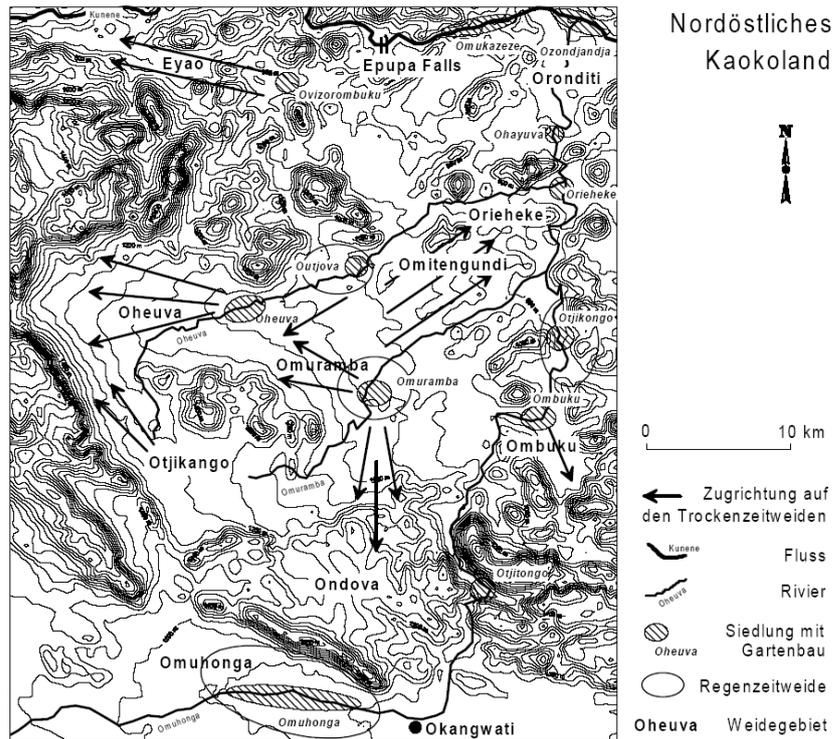


Abbildung 2.15: Weidenutzung im nordöstlichen Kaokoland zwischen Epupa und Okangwati. In vier Fällen sind die Siedlungen von Regenzeitweiden umgeben. Die Pfeile geben die Zugrichtung der Rinder zu den Trockenzeitweiden an. (aus SCHULTE (2002, S. 56), nach BOLLIG (1999, S. 483))

2.15). Dabei sollen unnötige Herdenbewegungen vermieden und die in der Nähe des Siedlungsgebiets liegenden Trockenzeitweiden genutzt werden. Die Gebiete der Nutzungszone (4) werden als Schutzgebiete ausgewiesen und dürfen nur im Fall einer Dürre genutzt werden. Dieses Weidemanagement dient dem Schutz der natürlichen Ressourcen, wobei die Einhaltung der Nutzungsregeln der sozialen Kontrolle der Stammesgemeinschaft unterliegt und Verletzungen derselben geahndet werden (SCHULTE, 2001).

2.3.2 Konsequenzen der pastoralnomadischen Nutzung für die Vegetationsbedeckung

Die Auswirkungen der Nutzung des Raumes durch Himba und Herero lassen sich in zwei Bereiche teilen. Einerseits sind Veränderungen der Landschaft infolge der Beweidung zu beobachten, zum anderen bedingt der Holzeinschlag zum Bau der 'onganga' und der Zäune einen erheblichen Eingriff in die Gehölzschicht.



Abbildung 2.16: Verbuschte Savanne bei Kaoko Otavi mit deutlichen Degradationsanzeichen

(Photo: J. Richters, 2003)

Die traditionellen Beweidungsmuster erlauben einen weitgehenden Schutz der Vegetation und die Herausbildung einer stabilen Sekundärsavanne (MOLEELE et al., 2001; ZEIDLER, HANRAHAN & SCHOLES, 2002). Diese zeichnet sich durch eine Verschiebung der dominanten Arten aus, bei der die perennen Gräser abnehmen und die annuellen einen Zuwachs erhalten (SCHULTE, 2002). Unter normalen Bedingungen entsteht so ein stabiles System aus pflanzlicher Produktion und Konsumption durch Herbivoren (OESTERHELD & MCNAUGHTON, 2000). Dabei wird die Variabilität der Niederschläge, die bei negativen Ausschlägen zu Dürren führen kann, als ein dominierender Faktor der Ökosystemstabilität angesehen (CAUGHLEY, SHEPERD & SHORT, 1987). Entgegen herkömmlicher Lehrmeinung werden somit durch die immer wiederkehrenden Dürren ein regulierendes Element der Herdengrößen eingeführt, das die Regeneration der Weiden nach der Dürre erlaubt (GALVIN & ELLIS, 1996). Die Niederschlagsmuster alleine sind nach O'CONNOR (1985) kein Auslöser von Vegetationsveränderungen im südlichen Afrika. Erst durch eine übermäßige oder ungeeignete Nutzung des Weidelandes



Abbildung 2.17: Auswirkungen des Holzeinschlags im Gebiet Omuhonga. Die Bäume werden gefällt und als Zaunmaterial für die Eingrenzung der Gärten und Kraalbauten verwendet.

(Photo: J. Richters, 2003)

kommt es zu Veränderungen der Vegetation. Diese reichen von einer Abnahme der Weidequalität und der zunehmenden Verbuschung der Weide bis zur vollständigen Degradation der Flächen und einsetzender Bodenerosion (SWEET, 1999; BRUNOTTE & SANDER, 2002). Die vollständige Spanne dieser Übernutzungserscheinungen lassen sich im Kaokoveld beobachten (siehe Abbildung 2.16 und 2.19). Auslöser einer solchen Degradation, das das Weideland in mehreren Schritten zerstört, sind nach SANDER, BOLLIG & SCHULTE (1998) und SCHULTE (2002) auf der einen Seite stark gewachsene Viehherden (vgl. Abb. 2.14) und andererseits in einigen Teilen des Kaokolandes auch Umsiedlungen während der südafrikanischen Mandatszeit. Diese führten z.B. im Gebiet von Omuhonga und um Opuwo zu einer lokalen Überbevölkerung, die als Auslöser der dortigen Vegetationsveränderung gesehen werden muß.

Die (Über-)Nutzung der Baumschicht ist eng an die Gebiete mit Degradationserscheinungen der Weiden gekoppelt. Die Bäume, besonders *Colophospermum mopane*, werden eingeschlagen, bzw. gefällt, um Baumaterial zum Errichten der Kraalpalisaden und der Siedlungsplätze zu erhalten (SCHULTE, 2002). Darüber hinaus dient das Mopane-Holz auch bevorzugt als Brennstoff, da das harte Holz eine hohe Heizleistung hat (EICHHORN & JÜRGENS, 2002). Diese Schädigungen der Gehölzschicht sind in den Gebieten mit einem hohen Besatz an Tieren und einer deutlichen Siedlungsdichte am ausgeprägtesten. Über die Nutzung des Holzes zum Kochen und Kraalbau hinaus werden Büsche und kleine Bäume eingeschla-

gen und damit der Zäune für die Gärten errichtet (siehe Abbildung 2.17) (WELLE, 2003). Da die Büsche und Gehölze in der Trockenzeit als Futterergänzung verwendet werden, sind an vielen Gehölzen Schneitel- und Verbißspuren zu finden. Besonders die Ziegen in den Kleintierherden weiden regelmäßig auch Blätter und kleine Zweige.

2.4 Globaler Wandel und klimatische Veränderungen

Während die Erwärmung des globalen Klimas weltweit als unumstritten gilt (IPCC, 2001), sind die Auswirkungen auf regionaler und lokaler Ebene noch nicht hinreichend erforscht. Jedoch geben eine Vielzahl von Einzelbefunden Hinweise auf mögliche Auswirkungen von Klimaveränderungen. Dies sind neben naheliegenden Aspekten wie Dürren, Temperatur- und Niederschlagsveränderungen auch indirekte Veränderungen, wie z. B. das vermehrte Auftreten von Malariainfektionen in Tansania (EPSTEIN et al., 1998), die zunehmende Erwärmung der Ozeane (LEVITUS et al., 2000) oder die ansteigende Feuergefährdung durch länger anhaltende Trockenperioden im südlichen Afrika (ARNTZEN et al., 1996; IFFN, 2000).

'Global Change' wird dabei als umfassender Wandel aller den Menschen betreffenden Systeme auf der Erde verstanden (IPCC, 1990), wohingegen 'Climate Change' den Wandel des globalen Klimas und langfristige Schwankungen aller Klimafaktoren beschreibt (OCEANIC & ADMINISTRATION, 2003). Die Definition der UNO schränkt 'Climate Change' auf Veränderungen ein, die direkt oder indirekt auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen sind (UNFCCC, 2003).

In diesem Abschnitt sollen nun die Veränderungen und die möglichen Auswirkungen eines globalen Wandels auf globaler, regionaler und lokaler Ebene beleuchtet und diskutiert werden. Der Fokus ist dabei auf den nordwestnamibianischen Untersuchungsraum gerichtet, da möglicherweise die Ergebnisse der in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchung Erklärungen zum Verständnis solcher Veränderungen liefern.

NEMANI et al. (2003) haben aus NOAA AVHRR-Daten die jährliche Netto-primärproduktion (NPP) abgeleitet und diese in einen Zusammenhang mit globalen Umweltveränderungen gebracht. In Abbildung 2.18 ist ein zentrales Ergebnis dieser Untersuchung dargestellt. Die Karte zeigt die prozentuale Veränderung der NPP im Zeitraum von 1982 bis 1999. Für weite Teile Europas, Asiens und Amerikas ist eine Zunahme der NPP zu beobachten. Dies läßt sich nach NEMANI et al. (2003) aus der Zunahme des atmosphärischen CO_2 erklären, die dazu geführt hat, daß in den untersuchten 18 Jahren die NPP weltweit um etwa 6.17%

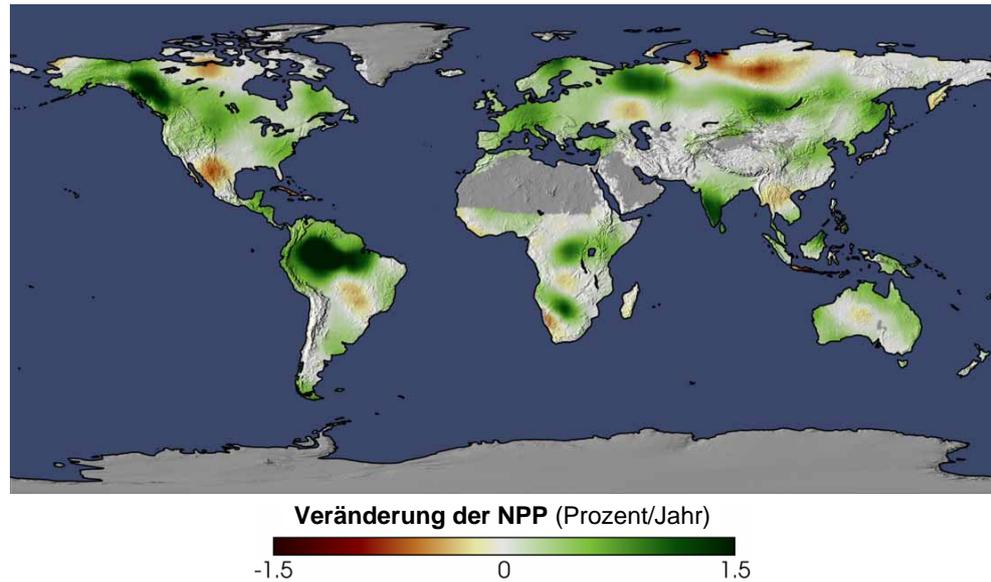


Abbildung 2.18: Prozentuale Veränderung der NPP zwischen 1982 und 1999 auf Basis von linearen Trends.

(Quelle: NEMANI et al., 2003, S. 1561)

zugenommen hat. Für das südliche Afrika zeigt die Abbildung 2.18 hingegen eine gegenläufige Entwicklung. Während das Kalaharibecken und seine Randgebiete deutliche Zuwächse der NPP verzeichnet, ist für Namibia insgesamt und das Kaokoveld eine Abnahme der NPP festzustellen. Diese Abnahme könnte eventuell ihre Ursache in der schweren Dürre der 1990er Jahre haben oder aber ein Indiz für einen gesteigerten Nutzungsdruck durch Beweidung sein. Zwar führt eine erhöhte CO_2 -Konzentration zu einer höheren Produktion der Pflanzen (LARCHER, 1984), doch kann der globale Wandel zu einer Veränderung der Niederschläge führen und das damit eingeschränkte Wachstum kompensiert die vermehrte Wuchseistung.

Wegen der deutlichen Abhängigkeit der Pflanzenproduktion von Niederschlägen wirken sich Veränderungen derselben besonders gravierend aus. So sind nach WATSON et al. (1997) viele Länder des afrikanischen Kontinents von Veränderungen der Niederschläge und wiederkehrenden Dürren betroffen. Dennoch ist das Bild der regionalen Veränderungen der Niederschläge in Afrika uneinheitlich. Obwohl für Westafrika eine Abnahme der Niederschläge seit den 1970er Jahren bis 1990 belegt ist (CHAPPELL & AGNEW, 2004), sind Projektionen für die Zukunft unsicher, da Klimamodelle (GCM) nach LEBEL et al. (2000) bislang nur schlecht

an reale Meßdaten angepaßt sind. Besonders problematisch sind dabei sowohl die Niederschlagsmuster als auch der Gesamtniederschlag, der bei Untersuchungen während der Trockenzeit um 25% und während der Regenzeit um bis zu 75% überschätzt wurde. In einer Simulation verschiedener Szenarien des Klimawandels für die Tropen haben HULME & VINER (1998) unter Annahme der IPCC-Prognose von 1995 einen Anstieg der Trockenzeitlänge um 1-2 Monate errechnet.

Bei der Betrachtung längerer, zurückliegender Zeiträume kann im Gegensatz zu heute in Afrika eine erheblich trockenere Phase während der mittelalterlichen Warmzeit (etwa 1000–1270 n.Chr.) und eine deutlich feuchtere Phase während der Kleinen Eiszeit (1270–1850 n.Chr.) nachgewiesen werden (VERSCHUREN, LAIRD & CUMMING, 2000). In Untersuchungen der klimatischen Veränderungen in Afrika während der letzten zwei Jahrhunderte wurde ein genereller Rückgang der Niederschläge anhand von Seespiegelständen belegt (NICHOLSON & YIN, 2001); dieser Rückgang konnte in den semi-ariden Regionen Afrikas sogar quantifiziert werden mit etwa 20 bis 40% (NICHOLSON, 2001). Allerdings schließen die Autoren einen direkten Zusammenhang mit einer irreversiblen Veränderung in Sinne von "Global Change" aus. Nichtsdestotrotz stellen Dürren eine große Bedrohung für den afrikanischen Kontinent dar, auch wenn sich eine 'gefühlte' Zunahme der Ereignisse nicht nachweisen läßt. Und so bezeichnet LEE-THORP et al. (2001) in der Untersuchung einer 6500-Jahre langen, aus $\delta^{18}O$ -Proxydaten erstellten Temperaturzeitreihe den Temperaturanstieg seit etwa 1750 n.Chr. als Erholung nach der Kleinen Eiszeit.

Für das südliche Afrika im Speziellen gibt es eine Reihe von klimatischen Untersuchungen, die einen Zusammenhang zwischen Niederschlagstrends und dem Phänomen des 'Climate Change' herzustellen. In der Untersuchung von RICHARD et al. (2001) läßt sich allerdings kein signifikanter Einfluß einer globalen Erwärmung feststellen. Zwar sind die Sommerniederschläge von Januar bis März im südlichen Afrika in einer von drei untersuchten Perioden (1934-1969) geringer ausgefallen als in den beiden anderen (1900-1933 und 1970-1998), doch lassen die Ergebnisse nicht auf eine Veränderung aufgrund der globalen Erwärmung schließen. Die Erwärmung wird nach DESANKER (2002) in Afrika zwischen 0.2°C und 0.5°C pro Dekade ansteigen. Dabei wird die stärkste Erwärmung in den semi-ariden Bereichen der Sahara und besonders im zentralen südlichen Afrika zu verzeichnen sein. In den Berichten des IPCC (IPCC, 1990; IPCC, 1995; IPCC, 2001) wird diese Erwärmung generell bestätigt. Die Konsequenzen der Erwärmung liegen dann vor allem in einer Verschärfung der bisherigen Situation: trockene Gebiete werden trockener, feuchte Regionen werden feuchter.

Die möglichen Auswirkungen werden vielfältig sein und beeinflussen auf unterschiedlichen Wegen sowohl die menschliche Gesellschaft als auch einzelne Individuen. Diese Folgen betreffen neben dem Verlust von Biodiversität auch die landwirtschaftliche Produktion, die Wasserversorgung, die Ausbreitung von Krankheiten und Wanderungsbewegungen nomadischer Gruppen (DESANKER, 2002). Beim Ackerbau sind besonders bewässerte Flächen betroffen. Für das südliche Afrika wird mit einem Verlust von etwa 45% der Bewässerungsflächen gerechnet (KINUTHIA, 1997). Daneben sind auch Auswirkungen auf pastoralnomadische Wirtschaftssysteme zu erwarten. Hier droht vor allem der Verlust von Weideland, da in den semi-ariden Räumen die Niederschläge ausbleiben werden (GALVIN et al., 2003). Dies bedingt dann eine Überweidung der übrigen Flächen in deren Folge Degradation und Bodenerosion um sich greift (HOUÉROU, 1996).

Die Fähigkeiten der Bevölkerungen der betroffenen Länder, mit diesen Auswirkungen umzugehen, wird in den Berichten des IPCC (WATSON et al., 1997) als relativ gering eingeschätzt. Das liegt besonders an der großen Abhängigkeit dieser Länder von der Landwirtschaft (LEICHENKO & O'BRIEN, 2002; GONZALEZ, 2002). Dies trifft in hohem Maße auch auf Namibia zu. Doch auch andere Wirtschaftszweige, wie z.B. der Tourismus - nicht nur in Namibia der am stärksten wachsende Wirtschaftszweig - werden durch möglichen Verlust von Wildtieren und Austrocknung der Landschaft Einbußen hinnehmen müssen (WATSON et al., 1997).

Für Namibia und besonders das Kaokoveld gibt es bislang keine Studien, die die möglichen Auswirkungen einer weltweiten Klimaveränderung untersuchen. Doch werden viele der bereits genannten, für Afrika geltenden Phänomene auch in Namibia zutreffen. Vor allem der Verlust von Weideland als Folge nicht ausreichende Niederschläge und zunehmende Überweidung der Flächen stellt schon heute ein gravierendes Problem in weiten Teilen Namibias dar (KEMPF, 1994). Zwar sind die *Colophospermum mopane*-Savannen der Kaokolandes noch weitgehend intakt (SANDER, BOLLIG & SCHULTE, 1998), doch zeigen einzelne Gebiete wie z.B. die Gegend um den zentralen Ort Opuwo deutliche Degradationserscheinungen, die bis zum völligen Verlust des Pflanzenkleides reichen können (siehe Abbildung 2.19).

Eine Folge der globalen Erwärmung wird nach IPCC (2001) die Austrocknung der heute bereits semi-ariden Gebiete sein. Damit steigt die Variabilität der Niederschläge und es verringern sich die Chancen für eine ausreichende Viehnahrung. Dies mündet wieder in Desertifikation und den Verlust von Weideland. Da die Erträge der Grasländer mit traditionellen Methoden (siehe Kapitel



Abbildung 2.19: Degradierete Savanne südöstlich von Opuwo: ein Badland mit starker Gully-Erosion.
(Photo: J. Richters, 2003)

3.1) schlecht zu erfassen sind, fordert KINUTHIA (1997) eine Messung der Biomasse über die Anzahl der jeweiligen 10-Tages-Schritte, die in diesem Zeitraum mehr als 20mm Niederschlag erhalten. Dieser Zeitraum ist für die Detektion signifikanter Unterschiede der vegetativen Phänologie ausreichend und entspricht auch aus diesem Grund der Länge eines Zeitschritts des im Kap. 4 vorgestellten Modellkonzepts.

Der nachweisbare Anstieg der globalen Temperatur wird vielfältige Veränderungen in den globalen Subsystemen des Planeten Erde nach sich ziehen. Die Zahl der Untersuchungen zum Phänomen "Global Change" reicht indes bislang nicht aus, um für abgelegene Regionen wie beispielsweise das Kaokoveld präzise Analysen hinsichtlich der regionalen und lokalen Auswirkungen zu erhalten. Mit der vorliegenden Arbeit soll hierzu ein Beitrag geleistet werden. Zusammenfassend ist als wichtiger regionaler Befund die hohe Wahrscheinlichkeit eine zunehmende Aridisierung festzustellen, die in ihrer Folge die pastoralnomadischen Viehhalter im Kaokoveld vor weidewirtschaftliche Probleme stellen wird. Hinzu kommt, dass schon immer aus Prestige Gründen um Maximierung des Viehbestandes gekämpft wird und bei erhöhter Variabilität sowohl der Niederschlagsmuster als auch der Niederschlagssummen wird eine nachhaltige Bewirtschaftung der Weiden zukünftig schwieriger werden.

Vor diesem Hintergrund ist das im folgenden Modell zur Erfassung der pflanzlichen Biomasse zu sehen, mit dessen Hilfe sowohl die Produktivität einzelner Jahre analysiert als auch ein Beitrag zum Verständnis von Veränderungen geleistet werden kann.

3 Methoden und Modellansätze

Modelle sind "vereinfachte Darstellungen eines Gegenstandes oder Ablaufs, um seine Funktion zu untersuchen" (DUDEN, 1983, S.269). Diese werden in allen Wissenschaftsdisziplinen verwendet, um einen Ausschnitt der Wirklichkeit graphisch und/oder mathematisch darzustellen. Dadurch ermöglichen Modelle einen tieferen Einblick in das Verständnis von Prozessen, Abhängigkeiten und Wechselbeziehungen. In der Geographie werden Modelle verwendet, um in allen Bereichen der physischen Geographie und der Humangeographie Prozesse zu beschreiben.

Besonders bei der Frage der möglichen Konsequenzen eines globalen Wandels bieten ökologische Modelle die Chance der Prognose eventueller zukünftiger Veränderungen. Dabei beschreiben solche Modelle dann die Wechselwirkungen von Artengemeinschaften und/oder die Strukturen eines gesamten Ökosystemes (JÖRGENSEN, 1986). Die Modellierung ökologischer Systeme hat in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen, nicht zuletzt aufgrund gesteigerter Rechnerkapazitäten und moderner Software (HAUHS, LANGE & KASTNER-MARESCHE, 2000). In der Regel ähnelt sich dabei die Vorgehensweise. Zunächst werden Ökosysteme durch die präzise Beschreibung des Anfangszustandes erfasst, um dann nachfolgend komplexere Prozesse abzubilden. Zwar hat diese Gruppe der "Zustandsmodelle" in anderen Naturwissenschaften große Leistungsfähigkeit gezeigt, doch werden bei der Anwendung dieser Modellierungsart auf Ökosysteme oft unscharfe Ergebnisse erzielt. Dies liegt primär an der erforderlichen Unterdrückung stochastischer Einflüsse, die aber notwendig ist, um die Komplexität der realen Welt im Modell einigermaßen handhaben zu können. Und daraus leitet sich eine Abkopplung der Modelle von der realen Umwelt ab.

Im nachfolgenden Abschnitt werden zentrale Begriffe wie Biomasse und pflanzliche Produktion bestimmt. Und zugleich wird das Prinzip der Photosynthese erläutert, soweit es zum Verständnis der vorliegenden Arbeit notwendig ist. Außerdem werden im zweiten Abschnitt dieses Kapitels bisherige Modellansätze zur Bestimmung von Vegetation und Biomasse vorgestellt und hinsichtlich ihrer Eignung für das in Abschnitt 1.1 beschriebene Forschungsproblem dieser Arbeit untersucht.

3.1 Methoden zur Erfassung von Biomasse

Die Abschätzung der Nettoprimärproduktion ist seit langem eine zentrales Ziel grundlegender und angewandter Forschungsarbeiten (SALA & AUSTIN, 2000). Dabei gehen die Fragestellungen in unterschiedliche Richtungen. Zum einen ist die Nettoprimärproduktion ein wichtiger Bestandteil des globalen Kohlenstoffhaushalts und spielt deshalb bei Betrachtungen von "Global Change"-Aspekten eine zentrale Rolle (SCURLOCK et al., 1999; SELLERS et al., 1995; FIELD, RANDERSON & MALMSTRÖM, 1995). Zum anderen ist die Produktion pflanzlicher Biomasse für das Verständnis von Nutzungsmustern, besonders in agrarischen und forstlichen Systemen, enorm wichtig. Aus diesem Grund versuchen Ökologen schon seit längerem diese Prozesse in zufriedenstellender Weise in Modellen abzubilden (WIEGAND, MILTON & WISSEL, 1995; WALKER, 1993; SCHOLLES, 1990).

3.1.1 Abgrenzung und Definition

Die **Phytomasse** (pflanzlicher Bestandsvorrat) bezeichnet die Gesamtmasse aller lebenden Pflanzen. Zusammen mit der **Zoomasse**, der Gesamtmasse aller lebenden Tiere bilden sie die **Biomasse** (SCHULTZ, 2002, S. 60). Global stellt die Phytomasse rund 99% der Biomasse (LARCHER, 1984). Aus diesem Grund findet häufig eine Gleichsetzung von Phyto- und Biomasse statt. Allerdings können lebende Pflanzen viel totes Material (als **Nekromasse** bezeichnet) enthalten (z.B. Borke, tote Äste und Wurzeln). Nicht immer werden alle Bestandteile zur Phytomasse gerechnet, sondern der weiter gefaßte Begriff der stehenden Phytomasse (*standing crop*) verwendet. Diese bezeichnet die oberirdischen Teile eines Pflanzenbestandes und wird in den meisten Modellansätzen, wie auch in dem hier vorgestellten, als Zielgröße verwendet (SALA & AUSTIN, 2000; SCHULTZ, 2002).

Die **Nettoprimärproduktion**¹ ist jener stoffliche Zuwachs einer Pflanze oder einer betrachteten Vegetationseinheit, der aus der Umwandlung von Sonnenlicht in pflanzliche Biomasse bei gleichzeitiger Lebensfunktion geleistet werden kann (SCHULTZ, 2002). Die gesamte Produktion der Vegetation wird als **Bruttoprimärproduktion** bezeichnet (siehe Gleichung 3.1).

$$\text{Bruttoprimärproduktion} - \text{Respiration} = \text{Nettoprimärproduktion} \quad (3.1)$$

Die Produktionsleistung² von Pflanzenbeständen berechnet sich aus dem Auf-

¹Im folgenden als NPP abgekürzt.

²Die Produktionsleistung wird als Produktivität bezeichnet.

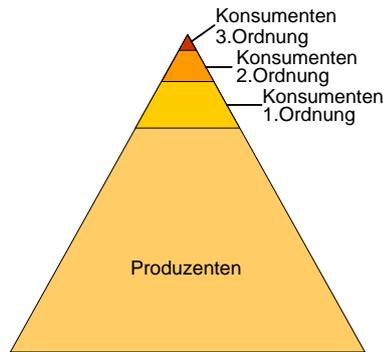


Abbildung 3.1: Schema der Nahrungspyramide (Biomassenpyramide) (Quelle: KLINK, 1996, S. 199, digital verändert)

bau organischer Substanz pro Flächeneinheit (m^2 oder ha) und einer Zeiteinheit (z.B. 10 Tagen)(LARCHER, 1984; SHAVER et al., 2000). Hierbei ist zu berücksichtigen, daß für ökologische Fragestellungen die Bilanz der verfügbaren Biomasse eine wichtige Größe ist. Die ökologische Produktionsgleichung geht auf BOYSEN-JENSEN (1932) zurück und beschreibt die Verwertung der Nettoprimärproduktion (NPP): Ein Teil fließt in den Bestand ein (ΔB), der dadurch einen Zuwachs erhält. Daneben müssen Verluste durch Absterben (V_A), Tierfraß (V_C) und Feuer (V_F) berücksichtigt werden (SCHULTZ, 2002).

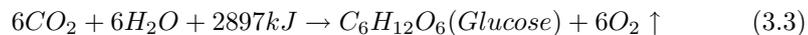
$$\begin{aligned}
 NPP &= \Delta B + V_A + V_C + V_F \\
 NPP &= \text{Nettoprimärproduktion} \\
 \Delta B &= \text{Bestand (standing crop)} \\
 V_A &= \text{Verluste durch Absterben} \\
 V_C &= \text{Verluste durch Tierfraß} \\
 V_F &= \text{Verluste durch Feuer}
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

In manchen Ökosystemen sind die Verluste durch Tierfraß und Feuer generell zu vernachlässigen. So z.B. im Kaokoveld, wo sich aufgrund des hohen Weidedrucks und der insgesamt geringen Produktion keine oder nur vernachlässigbar geringe Verluste durch Feuer ausmachen lassen(BECKER, 2000). Im Kaokoveld lässt sich mit der Gleichung 3.2 die Weidebilanz ermitteln, die für Aussagen über die ökologische Tragfähigkeit des Raumes herangezogen werden kann. Die NPP ist für die nachgeordneten Konsumenten in der Nahrungskette von zentraler Bedeutung, stellt sie doch die Grundlage für die Ernährung konsumierender Organismen dar (KLINK, 1996)(siehe Abb. 3.1). In der Nahrungskette ist wichtig, daß

(1) die Nahrung für alle Nutzer verfügbar ist und die gesamte NPP weitergereicht wird, (2) beim Übergang von energiereicher Substanz von einem Glied der Nahrungskette auf das nächste die verfügbare Energie abnimmt, weil Verluste durch die Umwandlung (Respirationsverluste) auftreten und die Substanzen nicht voll ausgenutzt werden können (KLINK, 1996; SALA & AUSTIN, 2000).

3.1.2 Prinzip der Photosynthese

Als **Photosynthese** bezeichnet man den energiebindenden Prozeß, mit dem autotrophe Lebewesen mit Hilfe des grünen Blattfarbstoffs Chlorophyll Kohlenhydrate aus Wasser und Kohlendioxid aufbauen. Für diesen Vorgang ist elektromagnetische Strahlung in einem Wellenlängenbereich zwischen 380 nm und 710 nm notwendig, die als *photosynthetisch ausnützbare Strahlung* ("photosynthetic active radiation" PAR) bezeichnet wird (LARCHER, 1984). Dieser Strahlungsbereich umfaßt etwa 48% der Globalstrahlung (KLIMM, SCHNEIDER & VON HATTEN, 1994; SEAQUIST, OLSSON & ARDÖ, 2003). Die auf der Blattoberfläche eintreffende Strahlung dringt in das Blatt ein und wird von den Chlorophyllen a und b vor allem in den gelbroten und blaugrünen Bereichen des Spektrums absorbiert (KLINK, 1996). Dabei wird in einem mehrstufigen Prozeß mit Hilfe der empfangenen Strahlungsenergie Kohlendioxid und Wasser in Glucose umgewandelt³. Dabei folgt die Photosynthese folgender Bilanzgleichung (SCHULTZ, 2002):



Die Fixierung des CO_2 erfolgt bei den meisten Pflanzen durch eine organische Verbindung (Pentodiphosphat Ribulose-1,5-bis-phosphat). Das aus 6 Kohlenstoffatomen bestehende Reaktionsprodukt zerfällt sofort in zwei C_3 -Körper. Deshalb werden Pflanzen mit diesem Photosyntheseweg als C_3 -Pflanzen bezeichnet. Die C_3 -Verbindungen werden im sog. Calvin-Benson-Zyklus in mehreren Schritten zu höherwertigen Assimilaten (Zucker, Stärke, Carbonsäure und Aminosäuren) umgebaut. Im tropischen und subtropischen Raum gibt es einen hohen Anteil an Pflanzen, die einen anderen Weg der CO_2 -Fixierung beschreiten. Diese Pflanzen bilden als erstes CO_2 -Fixierungsprodukt keinen C_3 -Körper, sondern eine Dicarbonsäure mit 4 C-Atomen (Oxalessigsäure). Diese werden deshalb auch als C_4 -Pflanzen bezeichnet. Der Umbau zu Kohlenhydraten erfolgt bei diesem als

³Im Rahmen dieser Arbeit wird nur ein kurzer generalisierender Abriß der Photosynthese wiedergegeben. Einzelheiten sind Lehrbüchern der Pflanzenphysiologie zu entnehmen (z.B. MOHR & SCHOPFER, 1995; TAIZ & ZEIGER, 2000).

Hatch-Slack-Kortschak-Weg bezeichneten Verfahren auch über den C_3 -Weg. Allerdings geschieht die Aufnahme und die Weiterverarbeitung des CO_2 räumlich getrennt in verschiedenen, anatomisch unterscheidbaren Geweben (LARCHER, 1984; KLINK, 1996). Zwar ist der C_4 -Weg energieintensiver und erfordert deshalb höhere Lichtintensitäten, doch erfolgt damit eine optimale CO_2 -Ausnutzung. Darüber hinaus sind durch die räumliche Trennung von CO_2 -Fixierung und Glucoseumwandlung die Transpirationsverluste der Pflanzen geringer, weil der Assimilatenaufbau auch bei geschlossenen Stomata stattfinden kann (KLINK, 1996; LARCHER, 1984).

Erfassung und Messung von Biomasse in Ökosystemen

In den Abschnitten 3.1.1 und 3.1.2 sind Biomasse und NPP definiert und die Grundlagen der Photosynthese erläutert worden. Bevor im nachfolgenden Kapitel 3.2 verschiedene bestehende Modelle zur Erfassung von pflanzlicher Biomasse vorgestellt werden, sollen zunächst einige alternative Methoden zur Erfassung von Nettoprimärproduktion dargelegt werden.

Die Erfassung von pflanzlicher Biomasse kann auf unterschiedlichen Maßstabsebenen erfolgen. Dabei ist in einem zeitlich abhängigen System die Umsatzdauer wichtig, in der ein Vorrat (z.B. Phytomasse) einmal umgesetzt wird. Die Umsatzrate bezeichnet den Anteil eines Vorrats, der in einer bestimmten Zeitspanne umgesetzt wird (SCHULTZ, 2002). Für die ökologische Modellierung sind somit Messungen der zentralen Variablen, wie z.B. der Biomasse, zu bestimmten Zeitpunkten eine wichtige Voraussetzung, um Modelle präzise an die Wirklichkeit anzupassen, bzw. die Modellergebnisse realitätsnah zu überprüfen (HAUHS, LANGE & KASTNER-MARESCH, 2000).

Grundsätzlich muß dabei zwischen Biomen mit hohen und solchen mit niedrigen Umsatzraten unterschieden werden. Biome mit hohen Umsatzraten sind dabei Gras-, Savannen- und offene Buschländer, wie sie im Kaokoland weit verbreitet sind. Niedrige Umsatzraten haben dagegen Biome wie Nadel- und Laubwälder und dichte Buschländer. Allerdings gilt die niedrige Umsatzrate nur für langfristige Prozesse wie beispielsweise den Holzzuwachs. Als zweite Komponente sind diese Systeme oft von einer höheren Umsatzrate überlagert, die sich z.B. aus dem jährlichen Blattwachstum ergibt (SALA & AUSTIN, 2000).

Die Abschätzung der NPP in Systemen mit hohen Umsatzraten kann nach SALA & AUSTIN (2000) nach drei Methoden erfolgen: Die einfachste Methode, oberirdische NPP in Grasländern zu erfassen, besteht in der Messung des Maximalwerts der Biomasse. Dieser wird dann mit der jährlichen Produktivität verrechnet

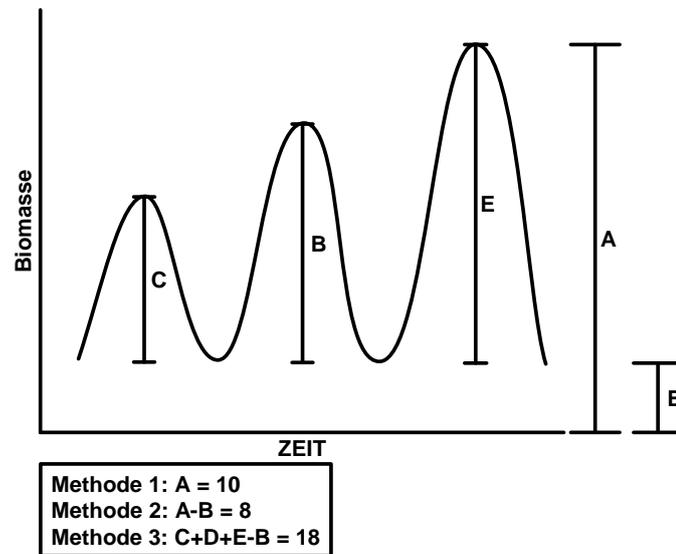


Abbildung 3.2: Idealisiertes saisonales Muster der Biomasse. Schätzungen der Primärproduktion unter Benutzung der Methode 1, Maximalbiomasse, der Methode 2, Maximal- minus Minimalbiomasse und der Methode 3, Summierung der Spitzenwerte minus der Einbrüche (Quelle: SALA & AUSTIN, 2000, digital verändert)

(**Methode 1**). Dabei geht man davon aus, daß der Minimalwert der Biomasse null oder nahezu null ist und dann kontinuierlich bis zum Höchstwert der Biomasse ansteigt. Zugleich darf kein Übertrag von Biomasse aus einer Wachstumsperiode in eine andere stattfinden. Die geringen Kosten für die Erfassung und die Einfachheit des Ansatzes sind die größten Vorteile dieser Methode, die vom International Biological Program (IBP) als Standardmethode festgelegt worden ist (MILNER & HUGHES, 1968).

Die zweite Methode lockert die Annahme, daß kein Übertrag zwischen den Wachstumsperioden stattfindet und mißt den Maximal- und den Minimalwert der Biomasse (**Methode 2**). Die Produktivität wird dabei aus der Differenz der Minimal- und Maximalbiomasse berechnet. Dabei setzt auch diese Methode auf einen monotonen Anstieg der Biomasse während der Wachstumsperiode und auf eine Phase des Biomassenabbaus (SALA & AUSTIN, 2000).

Weil die Produktivität von Grasländern während der Wachstumsperiode wegen der unregelmäßigen Verfügbarkeit von Wasser meist unstetig verläuft, ergibt sich ein saisonales Muster der Biomasse mit mehreren Spitzen und Tälern (siehe Abb.

3.2). Diese intrasaisonalen Veränderungen können mit den Methoden 1 und 2 nicht erfaßt werden. Die dritte Methode dagegen mißt in regulären zeitlichen Intervallen die Biomasse (**Methode 3**) und berechnet die gesamte produzierte Biomasse aus der Summe der Einzelmessungen (SINGH, LAUERROTH & STEINHORST, 1975; SINGH & JOSHI, 1979).

Dabei ist es in der Theorie unwichtig, auf welche Art die Messung der Biomasse erfolgt. Ob nun eine Abschätzung der Biomasse aus Fernerkundungsdaten, pflanzen- oder bestandsspezifischen Modelle oder in-situ-Messungen vorliegen, die den Messungen inhärente Logik bleibt dieselbe.

3.2 Gemeinsamkeiten und Unterschiede bestehender Modellansätze

In den letzten Jahren wurden eine Vielzahl von ökologischen Modellen entwickelt, die zur Abschätzung von Biomasse und pflanzlicher Produktivität genutzt werden können. Bei einigen Ansätzen steht dabei der Parameter NPP im Vordergrund, andere versuchen beispielsweise den Gasaustausch der Vegetation zu modellieren und berechnen Produktivität quasi als Nebenprodukt. Ebenso wie die Modellziele variieren die räumlichen und zeitlichen Skalen, in denen die Modelle angesiedelt sind (MALANSON, 1993; HURTT et al., 1998). In Abbildung 3.3 sind verschiedene Gruppen von Vegetationsmodellen als Funktion des zugrundegelegten Maßstabs und als Funktion des zugrundegelegten Zeitschritts dargestellt (HEAL, MENAUT & STEFFEN, 1993; CIRET, 2002):

Blatt- und Pflanzenmodelle

Die **Blatt-** und **Pflanzenmodelle** nehmen die unterste Ebene der raum-zeitlichen Skalierung ein. Mit typischerweise stündlichen bis täglichen Zeitschritten und einem räumlichen Maßstab von einigen Quadratzentimetern bis zu wenigen Quadratmetern modellieren sie Prozesse in einzelnen Blättern bzw. einzelnen Pflanzen. Blattmodelle beschreiben dabei detailliert die photosynthetischen Prozesse, die durch den Lichteinfall photochemisch ausgelöst werden. Genauso werden enzymatische Prozesse ohne Licht (z.B. Bildung von Glucose und Stärke) wie auch die Austauschprozesse von Kohlendioxid und Sauerstoff, beschrieben (LARCHER, 1984). FARQUHAR, VON CAEMMERER & BERRY (1980) haben z.B. ein biochemisches Blattmodell zur photosynthetischen CO_2 -Assimilation von C_3 -Pflanzen entwickelt.

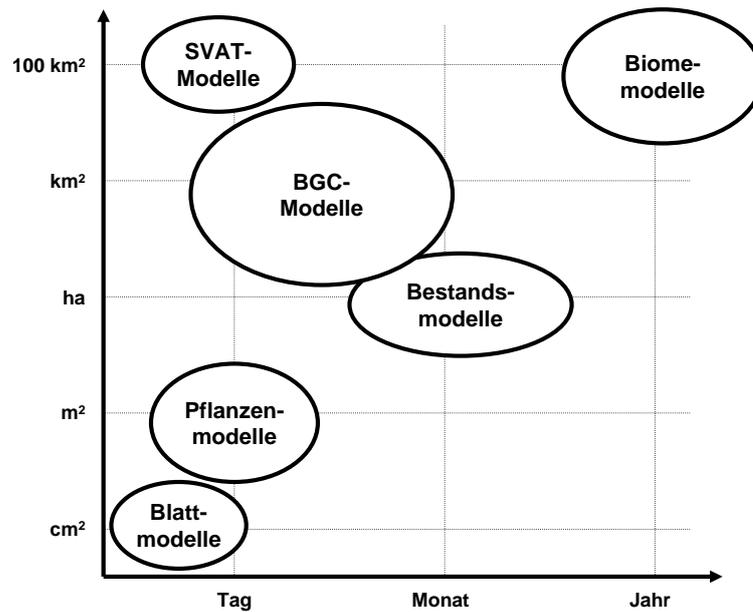


Abbildung 3.3: Klassifikation von Vegetationsmodellen in Bezug auf ihre räumliche und zeitliche Skala. (Quelle: CIRET, 2002, S. 320, digital verändert)

Pflanzenwachstumsmodelle versuchen dagegen Erträge von Nutzpflanzen abzuschätzen und erlauben die Überprüfung von Anbaustrategien wie Sähzeitpunkt oder den Einsatz von Dünger. Pflanzenwachstumsmodelle sind meist speziell auf das Ökosystem abgestimmt, für das sie entwickelt wurden und lassen sich schlecht an unterschiedliche Umweltbedingungen anpassen (WHITE, HOWDEN & NIX, 1993; CIRET, 2002).

Bestandsmodelle

Auf einer größeren Maßstabebene sind **Bestandsmodelle** angesiedelt, bei denen nicht mehr allein die individuelle Pflanze betrachtet wird. Als Bestand wird ein Teil der Vegetation benannt, der in sich relativ homogen und von anderen Teilen deutlich unterscheidbar ist. Dabei umfaßt diese Modellklasse eine Fläche von wenigen Hektar bis zu etwa einem Quadratkilometer. Die Zeitschritte bewegen sich in der Regel in längeren Perioden in einem Rahmen von einigen 10er Tagen bis hin zu mehreren Monaten. Die meisten Vegetationsmodelle dieser Klasse befassen sich mit Forstbeständen (z.B. FOREST Model SHUGART & WEST, 1977). Einige

Bestandsmodelle wurden mit globalen Klimamodellen gekoppelt, um den Einfluß von Klimaänderungen zu erfassen (CIRET, 2002).

Bio-Geochemische Vegetationsmodelle

Die vierte Gruppe von Vegetationsmodellen, die **Bio-Geochemischen Modelle**, dienen der Ermittlung der Nettoprimärproduktion der terrestrischen Biosphäre. Dabei basieren diese Modellansätze auf den physikochemischen Grundlagen der Photosynthese (siehe Kap. 3.1.2), allerdings auf einer räumlich deutlich größeren Ebene als die Blattmodelle. Räumliche Einheiten, von wenigen Hektar bis zu mehreren Quadratkilometern groß, erlauben Analysen sowohl auf regionalem als auch globalem Maßstab (REICH, TURNER & BOLSTAD, 1999). Die Zeitschritte der Modellansätze sind dabei oft von den Eingangsdaten bestimmt und reichen von täglichen über dekadische bis hin zu monatlichen Zeitabschnitten. Die Erkenntnis um die dominante Rolle der Biosphäre für das globale Klima wie auch die Bedeutung des globalen, ökosystemaren Kohlenstoffhaushalts für die "Global Change"-Diskussion haben zur Entwicklung einer großen Anzahl von Bio-Geochemischen Modellen in den letzten Jahren geführt (SCHIMMEL, 1995; CRAMER et al., 1999; RUMY et al., 1999). Das in dieser Arbeit vorgestellte regionale Biomassenmodell für das nordwestliche Namibia ist ebenfalls dieser Gruppe zuzurechnen.

Die Klassifikation verschiedener Vegetationsmodelle hinsichtlich ihrer raumzeitlichen Skalen (vgl. Abb. 3.3) erlaubt einen guten Überblick über die Vielfalt von ökologischen Modellen. Jedoch lassen sich Vegetationsmodelle auch nach anderen Kriterien differenzieren, was zur besseren Unterscheidung verschiedener Modellansätze im Segment der Bio-Geochemischen Modelle (BGC-Modellen) geboten scheint. So lassen sich drei Haupttypen von BGC-Modellen identifizieren: statistische Modelle, fernerkundungsbasierte Modelle und prozeßorientierte Modelle. Daneben läßt sich noch eine Kombination von fernerkundungsbasierten und prozeßorientierten Modellen feststellen, die in einem cross over-Ansatz versucht, beide Typen miteinander zu verknüpfen (vgl. Abb. 3.4).

- (A) Statistische Modelle, oder auch regressionsbasierte Modelle, nutzen empirisch gewonnene Beziehungen zwischen Klimafaktoren und der Primärproduktion einer Vegetationseinheit. So nutzt beispielsweise das erste NPP Modell (MIAMI Modell, LIETH, 1975) eine empirische Regression, um die jährliche NPP aus der Jahresdurchschnittstemperatur und dem Niederschlag abzuleiten, ohne jedoch die solare Einstrahlung zu berücksichtigen. Wegen seiner bestechenden Einfachheit und der empirischen Basis ist es noch heute in

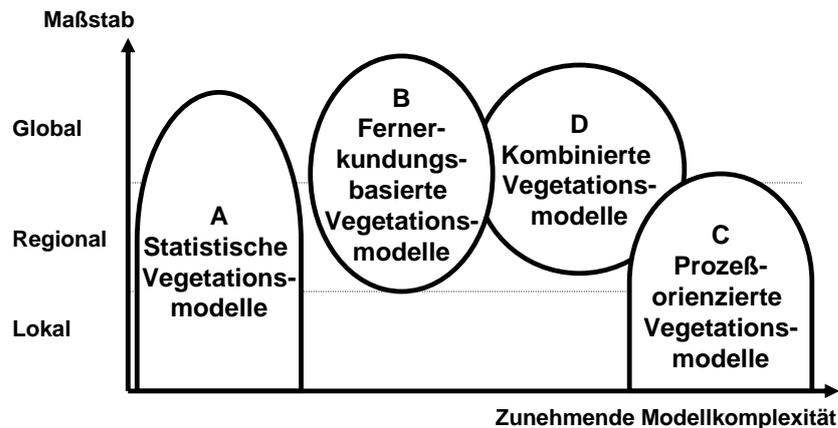


Abbildung 3.4: Klassifikation der BGC-Modelle nach Komplexität und räumlicher Anwendbarkeit. (Quelle: eigener Entwurf)

Gebrauch und wird gerne als Ausgangspunkt für Evaluation "modernerer", stärker mechanistischer Modelle genutzt. Eine moderne Version des Ansatzes von LIETH (1975) ist das "High Resolution Biosphere Model" (HRBM 3.0, ESSER et al., 1994), das vom Institut für Pflanzenökologie der Justus-Liebig-Universität Gießen entwickelt wurde.

- (B) Der zweite Haupttypus der BGC-Modelle sind die auf dem Ansatz von MONTEITH (1977) basierenden fernerkundlichen Modelle. Dabei wird angenommen, daß die Produktivität der Biomasse in einem Zusammenhang mit der von Pflanzen aufgenommenen Energie steht. Diese absorbierte Strahlung kann aus fernerkundlichen Beobachtungen mit Hilfe von spektralen Vegetationsindices abgeleitet werden und so zur Bestimmung der Biomasse der observierten Vegetation genutzt werden (z.B. SEAQUIST, OLSSON & ARDÖ, 2003). Dabei können sowohl statistische als auch fernerkundlich basierte Modelle retrospektiv eingesetzt werden, um ökosystemare Größen zu ermitteln (TIAN, HALL & QI, 1998).
- (C) Prozeßorientierte Vegetationsmodelle versuchen die grundlegenden Prinzipien von Ökosystemen abzubilden. Dabei werden explizite physiologische Prozesse wie Photosynthese, autotrophe Respiration, biologischer Abbau oder Nährstoffkreisläufe dargestellt. Diese prozeßorientierten Modelle erfordern detaillierte Informationen über das Umweltsystem und die biologische Charakteristik des untersuchten Ökosystems (CIRET, 2002). Meist werden

diese Modelle aus einer Kombination verschiedener Submodelle zu den einzelnen Kompartimenten (wie z.B. NPP, Bodenwasserkreislauf, Stickstoffkreislauf, etc.) entwickelt. Die Komplexität des Gesamtansatzes nimmt dabei nach dem Motto "Komplizierte lauffähige Programme entstehen aus einfachen lauffähigen Programmen und nicht aus komplizierten, nicht lauffähigen Programmen" (HAUHS, LANGE & KASTNER-MARESCH, 2000, S. 53) kontinuierlich zu. Bei der Übertragung der Modellansätze von der lokalen Entwicklungsbasis auf einen größeren regionalen oder globalen Maßstab treten bei vielen Modellansätzen oft Probleme auf, da sich die notwendigen Eingangsparameter nicht oder nur sehr schlecht vereinfacht abbilden lassen (RUIMY, SAUGIER & DEDIEU, 1994). Beispiele für prozeßorientierte Modelle sind FOREST-BGC (RUNNING & GOWER, 1991), das für Waldökosysteme eine Vielzahl von Stoff- und Energiekreisläufen abbildet, sowie dessen Nachfolger BIOME-BGC (THORNTON, 2000), das bereits auf beliebige Vegetationseinheiten anwendbar ist. Dabei operiert dieser Ansatz als Punktmodell, woraus sich wiederum Probleme bei der Berücksichtigung von Flächendaten ergeben. Ein weiteres prozeßorientiertes Modell ist CENTURY, das neben der Primärproduktion die Dynamik von Kohlenstoff, Stickstoff, Schwefel und Phosphat in natürlichen und kultivierten Systemen nachbildet (PARTON, STEWART & COLE, 1988). Dieses verbreitete angewendete Modell (OJIMA et al., 1994; OJIMA et al., 1996; PARTON et al., 1993; PARTON et al., 1992; LAURENROTH et al., 1993) benötigt neben umfangreichen klimatischen Eingangsgrößen auch detaillierte Angaben zur Textur der Böden, pflanzlichen Stickstoff-, Phosphor- und Schwefelgehalt sowie weitere atmosphärische und pflanzliche Parameter.

- (D) Eine Kombination von fernerkundlich-basiertem und prozeßorientiertem Ansatz versucht das CASA-Modell (POTTER et al., 1993; FIELD, RANDERSON & MALMSTRÖM, 1995). Dabei werden spektrale Vegetationsindices aus NOAA-AVHRR-Satellitendaten genutzt, um die absorbierte photosynthetisch aktive Strahlung (APAR) zu erfassen und damit die NPP in globalem Maßstab zu berechnen. Die Nutzungseffizienz der eintreffenden Strahlung wird dabei in einem prozeßorientierten Modellansatz variiert, der die Stickstoff- und Kohlenstoffdynamik abbildet (RUIMY et al., 1999). Da für den prozeßorientierten Teilansatz eine Vielzahl von Eingangsparametern notwendig ist, wurde dieser Ansatz bislang nur mit geringer räumlicher Auflösung global angewendet (CRAMER et al., 1999; POTTER et al., 1993).

Biome-Modelle

Globale **Biome-Modelle** wie BIOME-1 (PRENTICE et al., 1992) nutzen eine sehr geringe räumliche Auflösung und werden meist als biogeographisches Vegetationsmodell in globalen Klimamodellen genutzt. Dabei ermitteln die Modelle lediglich die großräumigen Vegetationseinheiten (z.B. Tropischer Regenwald, Tundra, Boreale Nadelwälder etc.) und ihre geographische Verbreitung. Dabei wird davon ausgegangen, daß sich die Vegetation auf einem Klimaxstadium unter den lokalen Klimabedingungen befindet. Biome-Modelle werden eingesetzt, um z.B. die Reaktionen des Klimas auf zukünftige Verschiebungen der Vegetationsgrenzen zu testen (WILLIAMS, SUMMERS & THOMPSON, 1998). Damit können Vorhersagen über eventuelle, langfristige Vegetationsverteilungen vorgenommen werden (CIRET, 2002).

SVAT-Modelle

Die letzte Kategorie von Vegetationsmodellen nach CIRET (2002) sind die **SVAT-Modelle** (Boden-Vegetation-Atmosphärentransfer Modelle, engl. Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer Modelle), die sich auf die biophysikalischen Interaktionen zwischen Atmosphäre und Landoberfläche fokussieren. SVAT-Modelle sind üblicherweise in globale Klimamodelle (GCM) und Wettervorhersagemodelle integriert und stellen die Schnittstelle zwischen Atmosphäre und Erdoberfläche dar. Ihre Aufgabe besteht in der Berechnung der Strahlungsbilanz der Oberfläche und die Aufteilung der latenten und sensiblen Wärmeströme. Die ersten Ansätze nutzten dazu einfache Massen- und Energiebilanzen und einheitliche Oberflächenparameter wie Albedo, aerodynamische Rauigkeit und Bodenfeuchte (SELLERS et al., 1995). Jüngere Ansätze berücksichtigen zusätzlich auch die Einflüsse unterschiedlicher Vegetationseinheiten auf die Energiebilanz der Erdoberfläche durch Vegetationsparameter wie Blattflächenindex (LAI), Saisonalität der Blattflächen, Rauigkeitslänge oder Stomataveränderungen (ABER, 1992).

3.2.1 Notwendigkeit neuer Konzepte zur regionalen Analyse von Biomasse

Während Blatt-, Pflanzen und Bestandsmodelle für die Entwicklung eines pastoral-ökologisch ausgerichteten Biomassenmodells ungeeignet erscheinen, bietet sich besonders die Gruppe der BGC-Modelle mit ihren unterschiedlichen Haupttypen von ihrem räumlichen Maßstab wie von der variablen Länge der Zeitschritte für eine regionale Analyse der Produktivität an. Dabei werden nach HURTT et al. (1998)

die Grenzen von biophysikalischen (SVAT-Modellen), biogeochemischen und biogeographischen Modellen (Biome Modellen) zunehmend verwischen, da neuere Ansätze versuchen, diese unterschiedlichen Sichtweisen zu verschmelzen und in einen integrierten Ansatz zu überführen (CRAMER et al., 1999; RUIFY et al., 1999).

Im vorangegangenen Abschnitt wurden unterschiedliche Konzepte zur Berechnung von Biomasse und Produktivität vorgestellt. Dabei sind besonders die BGC-Modelle geeignet, um auf regionalem Maßstab Biomasse abzubilden. Die Unterschiede der einzelnen Haupttypen, also statistischer Ansatz, fernerkundliches oder prozeßorientiertes Modellkonzept wurden deutlich gemacht. Ein umfangreicher Vergleich konkurrierender Methoden zur Erfassung von Biomasse auf globalem Maßstab wurden am Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK) durchgeführt (CRAMER et al., 1999). In diesem Zusammenhang wurden 17 unterschiedliche Modelle mit einheitlichen Eingangsdaten getestet und die Bedeutung der Produktivität für das Verständnis der Ökosystems Erde betont (RUIFY et al., 1999). Bemerkenswert am Resultat ist dabei, daß die Modellergebnisse für die globale jährlicher NPP zwischen 39,9 und 80,5 Pg C schwanken (CRAMER et al., 1999). Bei einem Mittelwert aller getesteten Modelle von 54,9 Pg C, der in etwa dem publiziertem Referenzwert von 62,3 Pg C entspricht (RUIFY et al., 1996), liegen vor allem die fernerkundlichen Modellkonzepte und einige etablierte Modelle wie CENTURY und CASA im Mittelfeld.

Für den nordwestlichen namibianischen Untersuchungsraum stehen nur in sehr geringem Umfang Klima-, Boden- und Vegetationsdaten zur Verfügung. Aus diesem Grund fällt für die Entwicklung eines pastoral-ökologischen Modellkonzepts die Hauptgruppe der prozeßorientierten Modelle weitgehend aus, da für den Untersuchungsraum (vgl. Kapitel 2.2) keine ausreichenden Daten zur Verfügung stehen. Während die schlechte Erreichbarkeit und Unzugänglichkeit des Raumes die Erhebung eines sicheren Stichprobenumfangs für einen regressionsbasierten Ansatz erschweren, steht mit den in Kapitel 5 beschriebenen MODIS-Daten eine sichere und qualitativ hochwertige Datenbasis für einen fernerkundlich basierten Ansatz zur Verfügung. Aus diesem Grund wurde in Anlehnung an POTTER et al. (1993) und FIELD, RANDERSON & MALMSTRÖM (1995) ein vereinfachter kombinierter Ansatz gewählt, der ausschließlich mit Hilfe von täglichen Fernerkundungsdaten (siehe MODIS-Daten, siehe S. 87) und global verfügbaren konstanten Datensätzen (z.B. globales Geländemodell GTOPO30, S. 110) eine 10-tägige Abschätzung der Produktivität erlaubt. In dem "Regionalen Biomasse-Modell (RBM) Kaokoveld" wird die produzierte Biomasse nach dem Konzept von

MONTEITH (1977) über 10 Tage aus der absorbierten photosynthetisch aktiven Strahlung (APAR) und Lichtverwertungseffizienz (LUE) ermittelt. Der Vorteil einer ausschließlichen Nutzung von fernerkundlich gewonnenen Daten liegt zum einen in der globalen Verfügbarkeit der Daten und damit der potentiellen Anwendungsbereiche und zum anderen in der Möglichkeit, flächenhafte Aussagen zur Produktivität zu treffen. Durch die Parametrisierung der LUE aus Satellitendaten gelangt man zur Unabhängigkeit von Klimadaten. Da diese für den Untersuchungsraum nicht vorliegen, wäre man bei Nutzung anderer Modellkonzepte auf Re-Analysedaten (z.B. ECMWF) oder Ergebnisdaten globaler Klimamodelle angewiesen. Diese liegen aber in den meisten Fällen nicht in der für eine regionale Studie geforderten räumlichen Auflösung von $1 \times 1 \text{ km}^2$ vor (RICHTERS, 2000). Auch scheiden aufgrund der Erfordernis räumlich expliziter Aussagen zur Biomassenentwicklung im Untersuchungsraum die in Abschnitt 3.2 vorgestellten Ansätze aus, da diese entweder zu kleinräumig (nur wenige cm^2 bis m^2) operieren oder nur Punktdaten liefern.

Das umfassende Modellkonzept für das RBM Kaokoveld wird im nachfolgenden Kapitel 4 erläutert. Dabei werden Rückbezüge und Vergleiche mit bestehenden Modellkonzepten einen wesentlichen Anteil an der konzeptionellen Entwicklung haben. Die Implementierung der fernerkundlich erhobenen Daten und die Auseinandersetzung mit der Parametrisierung der einzelnen Modellkomponenten bilden einen wesentlichen Bestandteil des nachfolgenden Kapitels.

4 Entwicklung und Implementierung des "Regionalen Biomasse-Modells (RBM) Kaokoveld"

4.1 Erfassung der Nettoprimärproduktion aus Fernerkundungsdaten

Die Fähigkeit der Pflanzen, aus Licht und Kohlendioxid mit Hilfe der Photosynthese pflanzliche Substanz aufzubauen, ist ein Grundpfeiler für das Leben auf der Erde. Die Vegetation spielt somit eine zentrale Rolle bei der Frage, wie sich der Planet entwickelt. Da besonders der Ausgangsfaktor CO_2 infolge der globalen Erwärmung Veränderungen unterworfen ist, verändert sich langfristig auch die Zusammensetzung der Pflanzengemeinschaften. Daneben greift allerdings auch der Mensch, wie z.B. in dem Untersuchungsgebiet dieser Arbeit, durch die Nutzung der Vegetation massiv in die Biosphäre ein.

Mit dem Einsatz von Satelliten seit den 1970er Jahren zur Beobachtung der Erdoberfläche und den dort stattfindenden Prozessen, wurden erstmals großräumige Studien zur Veränderung der Biosphäre möglich. Nicht zuletzt durch diese Befunde wurde die Wissenschaft auf die globalen Veränderungen des Planeten Erde aufmerksam und sich des engen Zusammenspiels der globalen Subsysteme wie z.B. Wasser- und Klimakreislauf, Vegetation und Kohlenstoffkreislauf bewußt. Während auf der globalen Maßstabsebene eine Vielzahl von Untersuchungen mit Hilfe von Satellitendaten die Vegetation und den Kohlenstoffkreislauf untersuchen (RUNNING et al., 2004; POTTER et al., 1993; JUSTICE et al., 1998; REICH, TURNER & BOLSTAD, 1999), ist dies für regionale Analysen bislang kaum geschehen.

Neben empirischen Ansätzen zur Bestimmung von pflanzlicher Biomasse aus Fernerkundungsdaten gibt es ein weites Feld physikalisch basierter Modellansätze.

Bei empirischen Modellen wird ein statistischer Zusammenhang zwischen am Boden gemessenen Biomassedaten und z.B. einem Vegetationsindex wie dem NDVI hergestellt (z.B. SANNIER et al., 1998). Eine derartige Bestimmung der pflanzlichen Produktion ist durch leicht zu rechnende Regressionen gut herstellbar, doch gilt der statistische Zusammenhang streng genommen nur für jene Punkte, für die eine präzise Bodeninformation vorliegt. Bei der Berechnung weiter entfernter Gebiete ergeben sich so oft große Fehlabweichungen. Ein anderes Konzept verfolgen die physikalisch basierten Modellansätze (vgl. Kapitel 3.2). Hier wird versucht, die maßgeblichen Einflußfaktoren für die Pflanzenentwicklung aus Fernerkundungsdaten zu extrahieren und dann diese zur Produktion von pflanzlicher Biomasse in einem bestimmten Zeitraum und bezogen auf eine gegebene Fläche zu verrechnen.

Dieser Ansatz wird auch bei dem hier vorgestellten Regionalen Biomasse-Modell (RBM) verfolgt. Dabei beträgt die kleinste betrachtete Fläche einen Quadratkilometer und der kleinste vom Modell berücksichtigte Zeitschritt zehn Tage. Die räumlichen Unterschiede in der Produktion von Biomasse entstehen in Nordnamibia vor allem durch Variationen der Pflanzenbedeckung. Differenziert wird diese vor allem durch das Relief, durch ein unterschiedliches Wasserangebot und durch unterschiedliche Einstrahlungsbedingungen.

4.1.1 Der Zusammenhang von NPP, APAR und NDVI

In den frühen Arbeiten von MONTEITH (1972); MONTEITH (1977) konnte nachgewiesen werden, daß es für gut mit Wasser und Nährstoffen versorgte Kulturpflanzen einen linearen Zusammenhang zwischen der erhaltenen Sonnenenergie und der gebildeten pflanzlichen Biomasse gibt. Dieser Zusammenhang wurde mit einer meteorologischen konstanten Abschätzung der Sonneneinstrahlung und dem Anteil der Blätter, die diese einkommende Strahlung absorbieren können, verknüpft. Deswegen konnte der Ansatz von MONTEITH (1972) für ökologische Fragestellungen adaptiert werden (POTTER et al., 1993; RUNNING et al., 2000). Dabei wird der Anteil der photosynthetisch aktiven Strahlung, der von den Pflanzen aufgenommen wird, als *APAR* bezeichnet. Die *APAR* integriert sowohl die geographische als auch die saisonale Variabilität der Tageslänge und einkommender solarer Strahlung, die durch Wolkenbedeckung und atmosphärische Schwächungen beeinflusst wird (RUNNING et al., 2000). Die Effizienz, mit der eine bestimmte Pflanze oder Vegetationseinheit die als Energiemenge erfaßte *APAR* in Biomasse umsetzt, wird durch den biophysikalische Konversionsfaktor ε beschrieben. Dieser ist jeweils spezifisch für die Pflanzen bzw. Vegetationseinheit und den jeweiligen

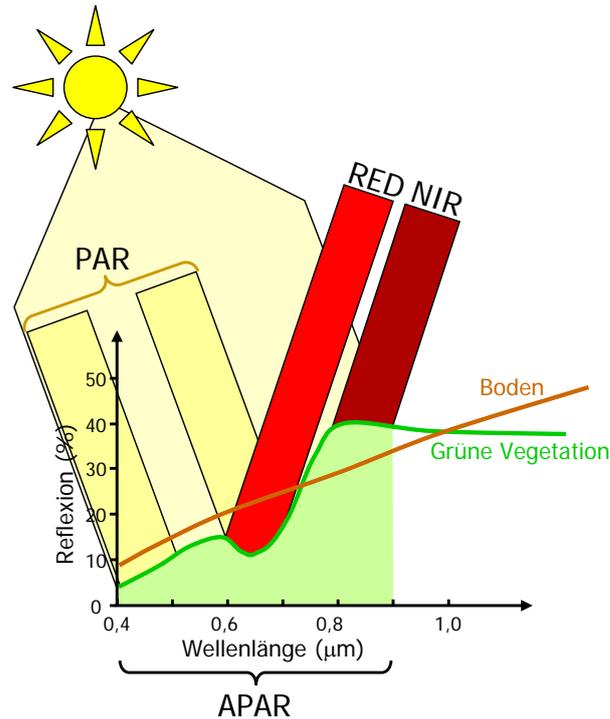


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung der Einstrahlung und Absorptionsbedingungen zur Erfassung der *APAR*. *PAR* ist die photosynthetisch aktive Strahlung, *APAR* der von der Vegetation absorbierte Anteil an der *PAR*, *RED* steht für die reflektierte Strahlung im roten und *NIR* für die reflektierte Strahlung im nahen infraroten Bereich. (Quelle: eigener Entwurf)

Standort. Damit kann die in einem bestimmten Zeitraum auf einer bestimmten Fläche produzierte Biomasse mit folgender Gleichung (4.1) ausgedrückt werden:

$$NPP = \varepsilon \cdot APAR \quad (4.1)$$

wobei ε der erwähnte biophysikalische Konversionsfaktor $[\frac{gDM}{J \cdot 10^6}]^1$ und *APAR* die aufgenommene photosynthetisch aktive Strahlung $[J \cdot 10^6]$ ist.

Wie ASRAR, MYNENI & CHOUDHURY (1992) und MYNENI, NEMANI & RUNNING (1997) nachgewiesen haben, läßt sich *APAR* aus fernerkundlichen Daten

¹DM steht für pflanzliche Trockenmasse ("Dry Matter") in g, *J* bezeichnet die eingestrahelte Energie in Joule

ableiten. Dazu wird der am meisten verbreitete spektrale Vegetationsindex, der "normalised difference vegetation index" (*NDVI*) (vgl. TUCKER, 1979) verwendet, der die Rückstrahlung in den roten und nahen infraroten Spektralbereichen nutzt (siehe Gleichung 4.2).

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

Jener Teil der solaren Strahlung, der in die Bereiche der Chlorophyllabsorption fällt (vgl. Kapitel 3.1.2), wird als photosynthetisch aktive Strahlung *PAR* bezeichnet. Der Quotient von *APAR* zu *PAR* gibt den Anteil der tatsächlich absorbierten photosynthetisch aktiven Strahlung (*FPAR*) wieder und kann in etwa nach RUNNING et al. (2000) dem *NDVI* gleichgesetzt werden. In Abbildung 4.1 ist schematisch ersichtlich, daß die einkommende Strahlung bei photosynthetisch aktiver Vegetation besonders im roten und nahen infraroten Bereich reflektiert wird. Da diese Reflexion der *FPAR* entspricht und den *NDVI* nach der Gleichung 4.2 aus diesen beiden Spektralbereichen errechnet wird, kann ein Zusammenhang zwischen dem *NDVI* und *FPAR* wie folgt hergestellt werden:

$$FPAR = \frac{APAR}{PAR} \approx NDVI \quad (4.3)$$

Wenn *FPAR* aus einem spektralen Vegetationsindex abgeleitet werden kann, dann lässt sich mit Hilfe der in einem bestimmten Zeitraum eingestrahltten solaren Energie PAR^2 und dem biophysikalischen Konversionsfaktor ε , analog zur Gleichung 4.1, die *NPP* berechnen:

$$\begin{aligned} NPP &= \varepsilon \cdot FPAR \cdot PAR \\ &\approx \varepsilon \cdot NDVI \cdot PAR \end{aligned} \quad (4.4)$$

Damit stellt die Gleichung 4.4 die theoretische Basis für den Modellansatz dar.

4.1.2 Anwendung der *NPP*-Berechnung im RBM Kaokoveld

Für die Erfassung der weideökologisch wichtigen Grasschicht muß für die ermittelte pflanzliche Biomasse eine Differenzierung in jenen Anteil, den die Grasschicht ausmacht und jenen, der von der Baumschicht produziert wird, vorgenommen werden. Für die Ernährung der Weidetiere ist besonders die Grasschicht wichtig. Diese Unterscheidung wird mit Hilfe sogenannter Pflanzenfunktionstypen (PFT) gewährleistet, die den Anteil von Gras- und Baumschicht sowie von unbedecktem Boden darstellen (vgl. Kapitel 4.4.1).

²Die *PAR* bezieht sich auf die photosynthetisch aktive Strahlung (vgl. Kapitel 4.2).

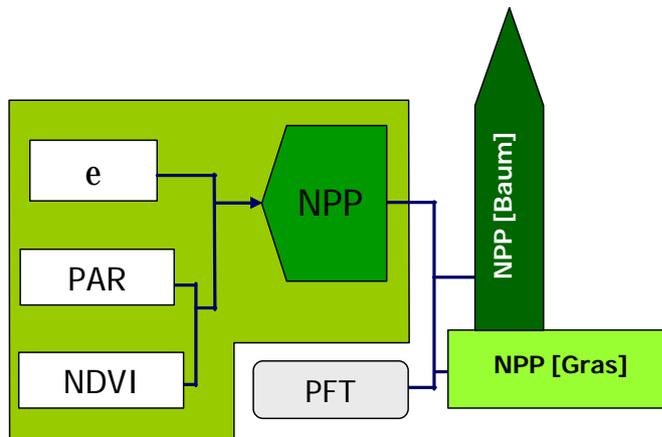


Abbildung 4.2: Modellkomponenten zur Berechnung der Biomasse. ϵ bezeichnet den biophysikalischen Konversionsfaktor, PAR die photosynthetisch aktive Strahlung, $NDVI$ den 'Normalized Difference Vegetation Index', PFT die Pflanzenfunktionstypen der jeweiligen Modellzelle und NPP die berechnete Biomasse. (Quelle: eigener Entwurf)

In Abbildung 4.2 wird schematisch die Ermittlung der Biomasse zu einem Zeitpunkt t in einer Rasterzelle x als Produkt von ϵ , $NDVI$ und PAR dargestellt. Die Variabilität und Ermittlung von ϵ wird in Kapitel 4.4 beschrieben. Außerdem wird dabei erläutert, wie sich die produzierte Biomasse auf die Baumschicht und die Grasschicht aufteilt.

Im folgenden sollen nun die drei zentralen Faktoren der pflanzlichen Biomassenproduktion, PAR , $NDVI$ und ϵ genauer beleuchtet werden.

4.2 Die Ableitung der photosynthetisch aktiven Strahlung

Die photosynthetisch aktive Strahlung (PAR) ist, wie in Abb. 4.2 dargestellt, eine von drei zentralen Eingangsgrößen für die Berechnung der pflanzlichen Biomasse. Diese Größe ist für jede Modellzelle für jeden zu berechnenden Zeitschritt notwendig. Dabei stellt die PAR eine Angebotsgröße dar, die die maximal verfügbare Energie für den Aufbau von Biomasse zu einem Zeitschritt beschreibt. Der tatsächlich in Biomasse umgesetzte Anteil der bereitgestellten Energie wird

nach der Gleichung 4.4 durch den *NDVI* bestimmt.

Im Rahmen des RBM Kaokoveld wird die *PAR* als ein Produkt aus der potentiellen solaren Einstrahlung, dem Bewölkungsgrad im betrachteten Zeitraum und dem Anteil der photosynthetischen Strahlung an der gesamten potentiellen Einstrahlung berechnet (vgl. Gleichung 4.5).

$$PAR_{x,t} = InSol(LAT, Slope, Aspect, DOY)_{x,t} \cdot q_{x,t} \cdot k$$

$$\begin{aligned} InSol &= \text{Funktion der potentiellen solaren Einstrahlung (vgl. Kap. 4.2.1)} \\ q_{x,t} &= \text{bewölkungsabhängiger Transmissionsfaktor } (q \leq 1) \\ k &= \text{Anteil der photosynthetisch nutzbaren Strahlung } (\sim 0.48) \end{aligned} \quad (4.5)$$

Die potentielle solare Einstrahlung ist ein wichtiger Bestandteil zur Ermittlung der zeitlich variablen Biomasseproduktion. Dabei stellt die potentielle solare Einstrahlung eine theoretische Größe dar, die für jede Rasterzelle berechnet wird und sich aus der Lage im Raum, den Reliefbedingungen und dem Zeitpunkt ergibt.

In der Gleichung 4.4 wird allerdings nicht die potentielle Insolation, sondern die photosynthetisch aktive Strahlung (*PAR*) verwendet. Diese umfaßt lediglich jene Anteile des solaren Spektrums, die für das Pflanzenwachstum relevant sind (vgl. Abb. 4.4). Im allgemeinen beträgt der Anteil der *PAR* an der potentiellen Insolation etwa 48 %, die im gelbroten und blaugrünen Spektralbereich eingestrahlt werden (MCCREE, 1981) (vgl. Abbildung 4.1).

Im folgenden werden sowohl die Ermittlung der potentiellen Einstrahlung (*InSol*) als auch die Ermittlung der beiden Faktoren *q* und *k* beschrieben.

4.2.1 Ein mathematisches Modell zur Ermittlung der potentiellen solaren Einstrahlung

Die solare Einstrahlung auf der Landoberfläche beschreibt die Energie, die von der Sonne zur Erde gestrahlt wird. Diese unterscheidet sich im Jahresgang in Abhängigkeit von der geographischen Breite und dem Datum (SCHÖNWIESE, 1994). Für die Einstrahlung an einem bestimmten Punkt auf der Erdoberfläche kommt neben dem Ort und dem Datum noch die jeweilige Reliefsituation zum Tragen. Die potentielle solare Einstrahlung beschreibt den höchsten theoretisch möglichen Wert der Einstrahlung, der nicht von Bewölkung und atmosphärischer

Schwächung³ der eingestrahnten Energie beeinflusst ist (SCHÖNWIESE, 1994).

Ein Modell zur Berechnung der potentiellen Insolation über einem reliefierten Gebiet wurde von SWIFT (1976); SWIFT & KNOERR (1973) und FEDERER (2002) vorgestellt. Das Modell berechnet aus der Hangneigung, der Exposition und der geographischen Breite einen Äquivalenzwinkel, der die Einstrahlung über einer entsprechenden Breite (in Abhängigkeit von Neigung und Exposition) wiedergibt. Zusammen mit der Angabe des jeweiligen Tages des Jahres (*DOY*⁴) kann die potentielle Einstrahlung bestimmt werden. Ähnliche Ansätze zur Ableitung der Einstrahlung verfolgen JOHNSON, RIHA & WILKS (1995); WOODWARD, BARKER & ZYSKOWSKI (2001), jedoch wird hierbei die im Kaokoland wichtige Reliefkomponente außer acht gelassen. Ein GIS-basierter Ansatz wurden von SCHMIDT (2002) vorgestellt, der neben Topographieinformationen auch fernerkundliche Daten als Eingang für die Berechnung nutzt. Jedoch erschien der Ansatz bei der Auswahl eines geeigneten Konzepts zur Bestimmung der PAR für die Realisierung innerhalb des RBM Kaokoveld als zu komplex.

Grundsätzlich ermitteln alle genannten Modelle die Sonnenscheindauer und berechnen damit den Anteil der direkten und diffusen Strahlung (RIVINGTON, MATTHEWS & BUCHAN, 2002). Bei SWIFT (1976) wird tägliche Insolation wie folgt angegeben:

$$PotInsol = SC_1 \cdot \left(\frac{\sin(D) \det \cdot \sin(L_1) \cdot (T_2 - T_1)}{15 + \cos(D) \cdot \cos(L_1) \cdot (\sin(T_2 + L_2 - \sin(T_1 + L_2)) \cdot \frac{12}{\pi})} \right) \quad (4.6)$$

Bevor diese Berechnung gestartet werden kann, müssen vorab noch die Äquivalenzwinkel L_1 und L_2 , die Stundenwinkel der Sonnenauf- und -untergänge T_1 und T_2 sowie die Deklination der Sonne D und die Solarkonstante SC_1 für eine Stunde bestimmt werden. Für die beiden Äquivalenzwinkel gilt folgendes:

$$L_1 = \arcsin(\cos(I) \cdot \sin(L_0) + \sin(I) \cdot \cos(L_0) \cdot \cos(A)) \quad (4.7)$$

$$L_2 = \arctan \left(\frac{\sin(I) \cdot \sin(A)}{\cos(I) \cdot \cos(L_0) - \sin(I) \cdot \sin(L_0) \cdot \cos(A)} \right) \quad (4.8)$$

Nach FEDERER (2002) entspricht die äquivalente Neigung L_1 derjenigen Lokalität auf der Erdoberfläche, an der die Horizontale parallel zu der gegebenen Neigung ist. L_2 ist dabei der Unterschied in Stundenwinkeln zwischen den beiden Punkten.

³Die angenommene atmosphärische Schwächung umfasst die typischen Prozesse von Absorption, Reflexion und Streuung von Strahlung an Atomen, Molekülen und Aerosolen.

⁴*DOY* = Day of the Year (Tag des Jahres nach dem Julianischen Kalender)

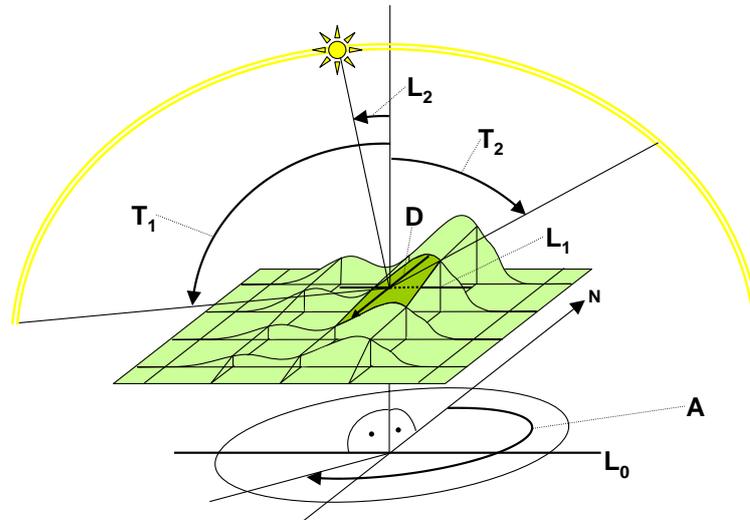


Abbildung 4.3: Schematische Darstellung des Modells zur Berechnung der potentiellen Einstrahlung. Dabei wird mit Hilfe der Stundenwinkel T_1 und T_2 die Sonnenscheindauer über einer Rasterzelle berechnet. Die Erläuterung der Abkürzungen ist in Tabelle 4.1 auf S. 63 aufgeführt. (Quelle: eigener Entwurf)

Für die Berechnung der Tageslänge und damit den Stundenwinkeln T_1 und T_2 ist neben der geographischen Breite die Deklination D der Sonne nötig. Diese berechnet sich wie folgt:

$$D = \arcsin(0.39785 \cdot \sin(278.9709 + 0.9856 \cdot DOY) + 1.9163 \cdot \sin(356.6153 + 0.9856 \cdot DOY)) \quad (4.9)$$

Damit lassen sich nun die Stundenwinkel des Sonnenauf- und -untergangs berechnen. Die Berechnungen unterscheiden sich dabei nicht:

$$T = \arccos(-\tan(L_1) \cdot \tan(D)) \quad (4.10)$$

Die Gleichungen 4.9 und 4.10 werden während der Modellrechnung mehrfach aufgerufen, um die unterschiedlichen Stundenwinkel für Sonnenauf- und -untergang zu ermitteln.

Die letzte Größe, die es zu ermitteln gilt, ist die Solarkonstante SC_1 . Dieser Wert wird für eine Stunde aus dem Wert der Solarkonstante für eine Minute SC_0 berechnet und muß wegen der Unregelmäßigkeit der Erdumlaufbahn an die

Tabelle 4.1: Verwendete Symbole zu Berechnung der potentiellen Einstrahlung

A	Exposition des Hanges [in $^\circ$ von Norden]
D	Deklination der Sonne [pos. Werte auf der Nordhalbkugel, neg. auf der Südhalbkugel]
DOY	Day of the year (nach dem Julianischen Kalender)
E	Radiusvektor der Sonne [Ausgleich der Exzentrizität]
I	Neigung des Hanges [in $^\circ$]
L_0	Geographische Breite des Hanges [pos. Werte auf der Nordhalbkugel, neg. auf der Südhalbkugel]
L_1	Geographische Breite des äquivalenten Hanges
L_2	Stundenwinkel zwischen dem aktuellen und dem äquivalenten Hang
SC_0	Solarkonstante [in $cal/cm^2/min$]
SC_1	Solarkonstante für 60 Min.
$PotInsol$	tägliche potentielle solare Einstrahlung [in $cal/cm^2/Tag$]
T_1	Stundenwinkel des Sonnenaufgangs auf dem Hang
T_2	Stundenwinkel des Sonnenuntergangs auf dem Hang

Exzentrizität angepaßt werden. Dazu dient die Gleichung 4.11:

$$E = 1.0 - 0.0167 \cdot \cos((DOY - 3) \cdot 0.0172) \quad (4.11)$$

Damit kann die Solarkonstante SC_1 berechnet werden:

$$SC_1 = \frac{60 \cdot SC_0}{(E \cdot E)} \quad (4.12)$$

4.2.2 Variationen der solaren Einstrahlung

Zwar wird die solare Einstrahlung im Jahresverlauf von dem in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Modell gut dargestellt, doch zur Ermittlung des zentralen Eingabeparameters PAR müssen, wie schon in 4.2 angedeutet, noch zwei Aspekte einfließen. Dies ist zum einen die Einschränkungen der Einstrahlung durch Wolken und zum anderen der Anteil des vom Chlorophyll der Pflanzen aufgenommenen Sonnenlichts.

Die Absorptionsspektren von Chlorophyll A und B, wie in Abbildung 4.4 von LARCHER (1984) dargestellt, machen deutlich, daß die maximale Aufnahme von Strahlungsenergie in den Bereichen von 0.35 - 0.45 und 0.6 - 0.75 μm liegt. Wird nun die Globalstrahlung auf die die Erdoberfläche erreichenden Wellenlängen projiziert läßt sich die einkommende Energie für jeden μm des elektromagnetischen Spektrums bestimmen. In diesem gedanklichen Konstrukt lassen sich nun die Absorptionsbanden des Chlorophylls einfügen und so kann der Anteil der für Pflanzen nutzbaren Lichtenergie ermittelt werden (LARCHER, 1984). Dieser ist von vielen Autoren bestimmt und mit einem Anteil von etwa 48% der Globalstrahlung angegeben worden (LARCHER, 1984; SEAQUIST, OLSSON & ARDÖ, 2003; CIRET,

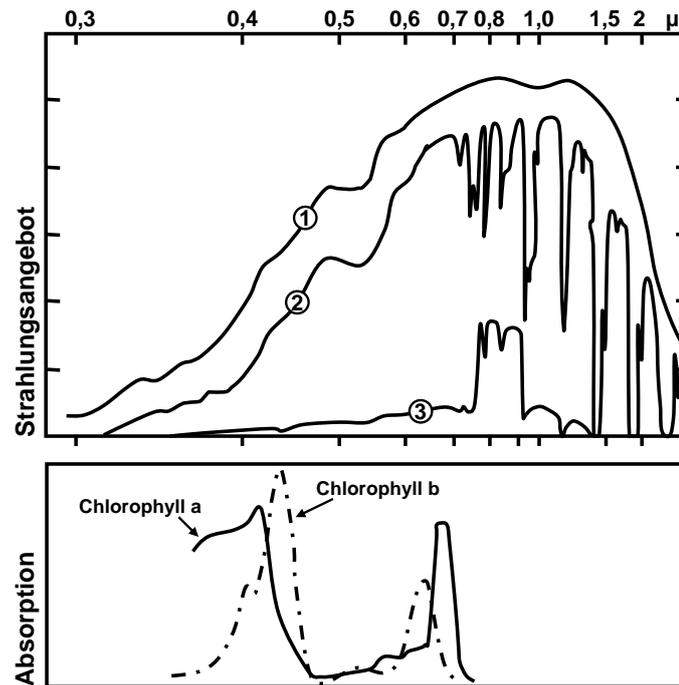


Abbildung 4.4: Spektrale Energieverteilung (1) der Sonnenstrahlung außerhalb der Erdatmosphäre, (2) der direkten Sonnenstrahlung am Erdboden und (3) der Strahlung unter einem Pflanzenbestand ("Rot-schatten"). Darunter: Spektrale Absorption durch photosynthetisch wirksames Chlorophyll a und b (Quelle: nach LARCHER, 1984, digital verändert)

2002). Und jener Wert wird auch als Parameter in der Modellierung der Biomasse genutzt.

Der zweite Faktor, der bei der Abschätzung der *PAR* eine Rolle spielt, ist die Transmission der Atmosphäre. Diese wird in dem vorliegenden Ansatz durch die Einbeziehung der Bewölkung erreicht. Zwar spielen auch andere atmosphärische Prozesse wie Absorption und Streuung der Atmosphäre eine gewisse Rolle, doch lassen sich diese Einflüsse wegen der eingeschränkten meteorologischen Datelage im Untersuchungsgebiet nicht hinreichend genau quantifizieren und werden demzufolge ignoriert. WEISCHET (1995) stellt dabei heraus, daß Absorption und Streuung lediglich einen geringen Einfluß auf die eingestrahelte Energie in den relevanten Wellenlängenbereichen haben. Von deutlich größerer Bedeutung ist

dagegen Verminderung der Einstrahlung durch Bewölkung (LARCHER, 1984). Zwar dringt auch durch einen völlig mit Wolken bedeckten Himmel genug Licht, um Pflanzen zur Photosynthese anzuregen, doch erreicht die diffuse Strahlung nicht die Leistungsdichte direkter Einstrahlung (HEYER, 1979), sondern etwa 75% (SCHÖNWIESE, 1994). Um die mittlere Bewölkung über einen Zeitraum von zehn Tagen für das Biomassemodell zu ermitteln, werden tägliche Satellitendaten hinsichtlich der Wolkenbedeckung pro Bildpunkt ausgewertet. Über die Berechnung des Mittels wird eine durchschnittliche Bewölkung für jeden Modellschritt von 10 Tagen ermittelt. Dieser kann nun die Einstrahlung um den maximalen Faktor von 0,25 beeinflussen. Bei dieser vereinfachten Bewölkungsbetrachtung muss allerdings auf die Überflugzeit des Satelliten TERRA geachtet werden. Da die meisten erdbeobachtenden Satelliten am späten Vormittag (Lokalzeit) das Untersuchungsgebiet überfliegen, wird die reale Bewölkung bei den in Namibia vorherrschenden konvektiven Niederschlägen eher zu einer Unterschätzung der Bewölkung führen. Während der besonders relevanten Regenzeit zu Beginn des Jahres herrschen jedoch konvektive Niederschlagsereignisse vor, die gewaltige Wolkenmassen aus dem äquatorialen Afrika heranführen. Diese sind dann bereits in den Vormittagsaufnahmen dokumentiert.

4.3 Der NDVI als Maß der effektiven Absorption von Sonnenstrahlung

Innerhalb der fernerkundlichen Forschung gibt es wohl kaum einen multispektralen Index, der eine größere Popularität erfahren hat als der von TUCKER (1979) definierte *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). TUCKER (1979) machte sich die Erkenntnis zunutze, daß grüne lebendige Vegetation charakteristische Rückstrahlungssignale im roten und nahen infraroten Bereich liefert.

Nach den Konzepten von POTTER et al. (1993) und RUNNING et al. (2000) drückt der NDVI den Anteil der tatsächlich von der Vegetation absorbierten Strahlung aus (siehe Gleichung 4.2). Jedoch kann der NDVI nicht direkt in die Berechnung der Biomasse einfließen, sondern muss nach SEAQUIST, OLSSON & ARDÖ (2003) transformiert werden. Damit wird ein linearer Zusammenhang zwischen der FPAR und dem NDVI hergestellt, wie er in der Gleichung 4.13 dargestellt ist.

$$FPAR = 1.67(NDVI) - 0.07 \quad (4.13)$$

Dabei wird FPAR linear zwischen der unteren Grenze des NDVI für nackten Boden und der oberen Grenze für den maximalen NDVI skaliert⁵ (GOWARD & HUENNRICH, 1992; POTTER et al., 1993; RUIY et al., 1996; PRINCE et al., 1995). Der maximale NDVI ergibt sich für dichte, aktive, grüne Vegetation.

4.4 Die Erfassung des biophysikalischen Konversionsfaktors ε

Die Umwandlung von solarer Energie in pflanzliche Biomasse erfolgt über den Ansatz der Lichtnutzungseffizienz (engl. 'Light Use Efficiency', LUE), die auf der schon erwähnten Theorie von MONTEITH (1972) basiert. Die LUE stellt einen Faktor dar, der als biophysikalischer Konversionsfaktor ε von der eingestrahnten Energie in erzeugte Biomasse übersetzt. Der Faktor ε ist eine Funktion unterschiedlicher Einflußfaktoren:

$$\varepsilon = f(\text{Biom}, \text{Relief}, \text{Boden}) \cdot f(\text{Klima}) \quad (4.14)$$

Dabei setzt sich in diesem Ansatz ε aus zwei Teilkomponenten zusammen; aus diesem Grund sind auch in der Gleichung 4.14 zwei Funktionen angegeben. Zum einen jener Teil der LUE, der als ε_{max} bezeichnet wird und nicht so hoch variabel ist, und zum anderen ε_{eff} . Der maximale biophysikalische Konversionsfaktor ε_{max} wird nur zu Beginn jeden Modelljahres ermittelt und integriert den Einfluß von Relief, Boden und der betrachteten Vegetationseinheit. Der effektive biophysikalische Konversionsfaktor ε_{eff} wird für jeden Zeitschritt berechnet und erfaßt die aktuellen klimatischen Bedingungen. Dieses zweistufige Verfahren ist in Abbildung 4.5 schematisch dargestellt.

Im Kapitel 4.4.1 wird die Berechnung der maximalen LUE dargestellt und auf die Bedeutung des Bioms, des Reliefs und des Bodens eingegangen. Dieser konstante Faktor ε_{max} wird durch das zugrunde liegende Biom definiert und durch die Einflußfaktoren 'Relief' und 'Boden' variiert. Im nachfolgenden Kapitel 4.4.2 dagegen werden die Einflüsse der aktuell wirkenden klimatischen Bedingungen und deren Einfluss zur Ermittlung der aktuellen LUE beschrieben. Der effektive biophysikalische Konversionsfaktor ε_{eff} berücksichtigt die klimatische Situation in jeder Modellzelle x zum Zeitpunkt t und kann wie folgt ausgedrückt werden:

⁵Der untere Grenzwert wird wie folgt angenommen: NDVI=0.04, für 0% Absorption, der obere für 95% Absorption: NDVI=0.61.

$$\varepsilon_{eff}(x, t) = T_\varepsilon(x, t) \cdot W_\varepsilon(x, t) \cdot \varepsilon_{max}(x, t) \quad (4.15)$$

wobei ε_{eff} der effektive Konversionsfaktor in $[\frac{gDM}{J \cdot 10^6}]$, ε_{max} die maximale LUE in $[\frac{gDM}{J \cdot 10^6}]$, T_ε der Temperaturstreß und W_ε der Wasserstreß als dimensionslose Skalare darstellen.

Dabei stellen zum einen die Temperatur und zum anderen die Feuchtigkeit die beiden begrenzenden Faktoren der Pflanzenentwicklung dar. Zwar gab es Ansätze, mit einem einheitlichen Konversionsfaktor zu rechnen (HEIMANN & KEELING, 1989), doch eine Vielzahl von Untersuchungen legen nahe, daß der biophysikalische Konversionsfaktor nicht über die ganze Erde einheitlich ist (POTTER et al., 1993). Aus diesem Grund werden in dieser Simulation variable Werte für die Ermittlung der Biomasse verwendet. Dabei wird ε_{eff} zu jedem Zeitschritt von zwei Streßfaktoren beeinflusst, die limitierend auf das Pflanzenwachstum wirken. Dies sind zum einen Temperatur- T_ε und zum anderen Wasserstreß W_ε . Diese werden im Abschnitt 4.4.2 eingehend erläutert. Zunächst soll jedoch auf die Ermittlung der maximalen LUE eingegangen werden.

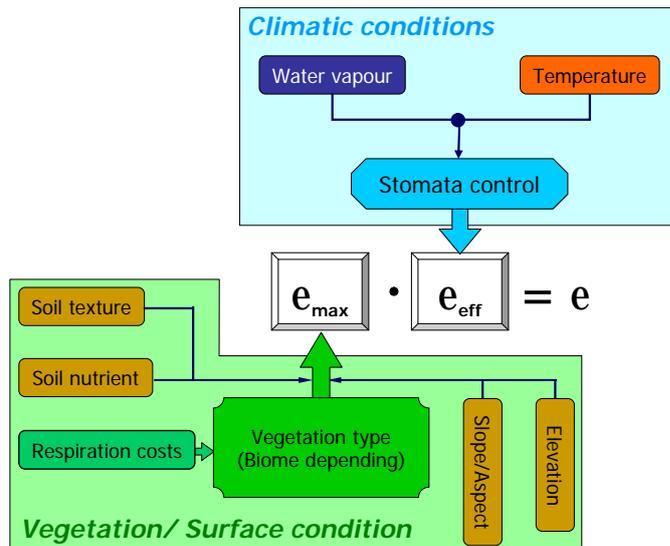


Abbildung 4.5: Schematische Darstellung der Einflussfaktoren auf den biophysikalischen Konversionsfaktor ε_{eff} (Quelle: eigener Entwurf)

4.4.1 Ableitung und Beeinflussung von ε_{max}

Die maximale LUE stellt die bestmögliche Effizienz dar, mit der Pflanzen das absorbierte Sonnenlicht (*APAR*) in Biomasse umsetzen können. Diese wird im Modell für jede Rasterzelle einmal pro Modelljahr bestimmt und setzt sich aus der potentiellen Verwertungseffizienz ε_p , in die die Zusammensetzung der Vegetation eingeht, und den Einflußfaktoren x_{Relief} und x_{Boden} , die die Beeinflussung infolge der topographischen und pedologischen Eigenschaften der jeweiligen Modellzelle widerspiegeln, gemäß der Gleichung 4.16 zusammen:

$$\varepsilon_{max} = \varepsilon_p \cdot x_{Relief} \cdot x_{Boden} \quad (4.16)$$

Dabei ist die Verwertungseffizienz nicht für alle Biome gleich und es muß zwischen C3- und C4-Pflanzen unterschieden werden. C3-Pflanzen sind wegen der Gleichförmigkeit der Chloroplasten in ihren Blättern nur begrenzt in der Lage, Licht umzusetzen. Dabei bestehen Limitierungen in der Fixierung von CO_2 (LARCHER, 1984). C4-Pflanzen dagegen können durch unterschiedlich geformte Blattzellen in darin unterschiedlich angeordneten Chloroplasten die einfallende Strahlung besser nutzen und somit mehr CO_2 resorbieren. Zugleich ist dieser Chemismus mit einer geringeren Abgabe von Wasserdampf (H_2O) verbunden. Viele Gräser verfügen über die Fähigkeit mit dem C4-Zyklus Photosynthese zu betreiben und sind somit besser an aride Umweltbedingungen angepaßt (SCHULTZ, 2002)(vgl. Kap 3.1.2).

Die maximale Verwertungseffizienz wird in dem vorliegenden Modell zur Ermittlung der Biomasse aus dem Vergleich von Feldbeobachtungen und Angaben aus der Literatur empirisch bestimmt (RUNNING et al., 1995; RUNNING et al., 2000; POTTER et al., 1993; SEAQUIST, OLSSON & ARDÖ, 2003; THORNTON, 2000). Diese Daten werden dann an der Vegetationsbedeckung und dem Verhältnis von Baum-, Strauch- und Grasschicht für die jeweilige Landbedeckung skaliert. Dazu werden als Basis die für das jeweilige Modelljahr zugrunde liegenden Daten der Vegetationsanteile ("Vegetation Fraction") genutzt, um so die potentielle Verwertungseffizienz ε_p zu ermitteln (siehe Abb. 4.6). Diese Daten werden mit dem MODIS Produkt *MOD44B* als 'Vegetation Continuous Fields' zur Verfügung gestellt (siehe Kapitel 5.2.2). Dies bedeutet, daß in diesem Datensatz mit einer Auflösung von $1000 \times 1000 m^2$ der jeweilige Anteil der Baumschicht, der Strauch- und Grasschicht und des unbedeckten Bodens abgelegt sind. Somit läßt sich für alle Modellzellen die jeweilige Zusammensetzung ermitteln, die sich auch über die

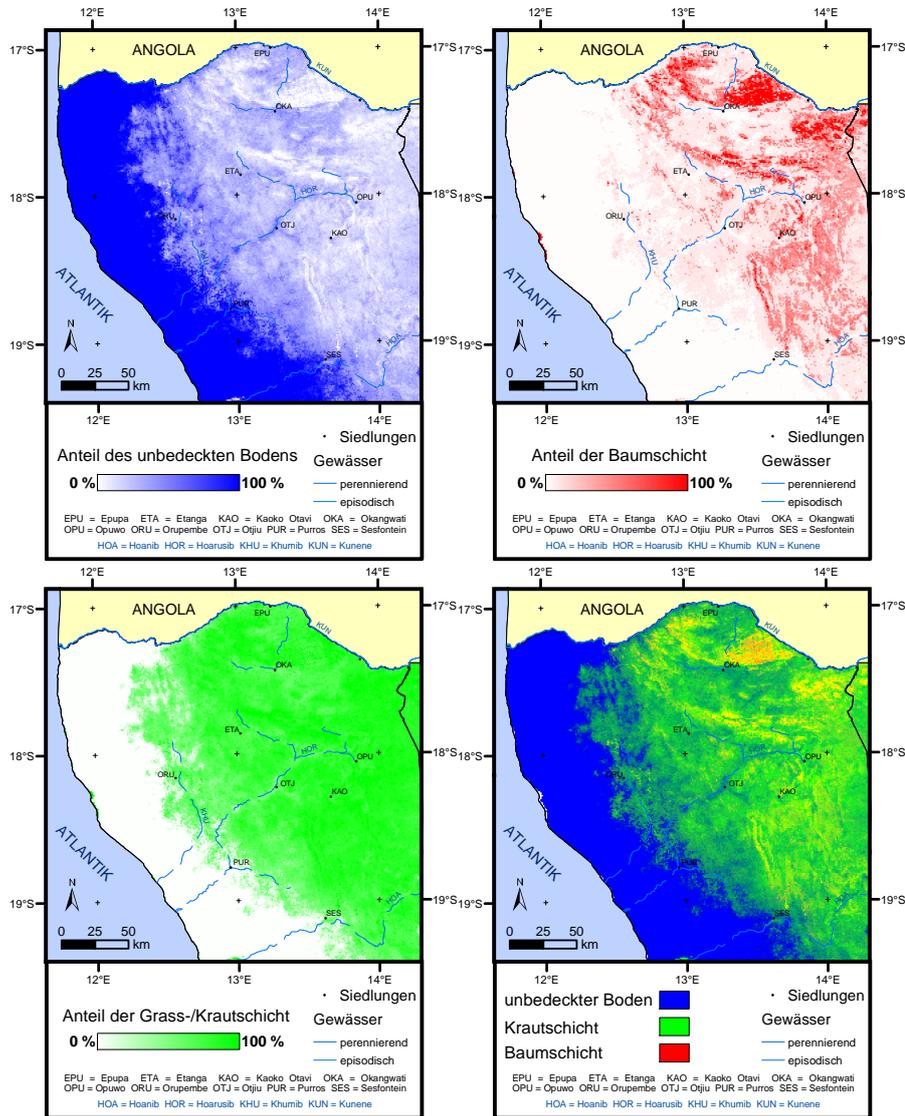


Abbildung 4.6: Verteilung der Vegetationsanteile im Jahr 2001 aus *MOD44B*. Der Anteil der jeweiligen Vegetationsschicht wird mit den empirischen Werten aus Tab. 4.2 zur pot. Verwertungseffizienz ε_p verrechnet. (Quelle: eigener Entwurf)

Gleichung 4.17 in der potentiellen LUE widerspiegelt.

$$\varepsilon_p(x) = \frac{(\varepsilon_{bare}FC_{bare}(x)) + (\varepsilon_{herb}FC_{herb}(x)) + (\varepsilon_{tree}FC_{tree}(x))}{100} \quad (4.17)$$

Tabelle 4.2: Empirische Faktoren für die drei Vegetationsschichten ("Vegetation Fraction") zur Berechnung der maximalen LUE im Biomassemodell

Biome	LUE [g DM/MJ]
Tree	0.01116
Grass	0.00604
Bare	0.003

Dabei ist $\varepsilon_p(x)$ die potentielle LUE der Zelle x in $[\frac{gDM}{J \cdot 10^6}]$ und $FC_{xx}(x)$ der Anteil des jeweiligen Biomes⁶ in [%] in der bestimmten Zelle. Die zugrunde liegenden Werte für die biophysikalischen Konversionsfaktoren ε_{bare} , ε_{herb} und ε_{tree} sind in Tabelle 4.2 aufgeführt und werden dem RBM als Look-up-Tabelle bereitgestellt. Die dort angegebenen empirischen Werte stammen aus der Literatur (RUNNING et al., 2000; POTTER et al., 1993; SEAQUIST, OLSSON & ARDÖ, 2003; THORNTON, 2000) und sind mit Hilfe von Vergleichsdaten angepaßt worden, die das ORNL-DAAC (2001) veröffentlicht hat. Das ORNL-DAAC⁷ sammelt weltweit ökosystemare Daten über den Austausch von biologischen, geologischen und chemischen Komponenten der Erde, wie z.B. die jährliche pflanzliche Biomassenproduktion, Wuchsleistung einzelner Pflanzenarten oder von Biomen.

Die LUE wird als $[\frac{gDM}{J \cdot 10^6}]$ angegeben und beinhaltet somit die Umsetzung der eingestrahelten Energie (in $J \cdot 10^6$) in produzierte pflanzliche Trockenmasse (DM).

Das Wachstum von Pflanzen wird in vielfältiger Weise von der Umwelt beeinflusst, in der die Pflanzen gedeihen. Diese Umwelteinflüsse können in einer Zusammenschau als Standortbedingungen erfaßt werden (WALTER, 1990). LESER (1991) spricht in diesem Zusammenhang von Ökotope und definiert damit die kleinste räumliche Einheit, die als eigenständiges Ökosystem betrachtet werden kann. KLINK (1996) führt vier mittelbare und fünf direkt wirksame Faktoren auf, die das Pflanzenwachstum beeinflussen. Dabei sind die Faktoren *Klima*, *Relief*, *Boden* und *Biotische Faktoren* (z.B. Konkurrenz mit anderen Pflanzen, Tierfraß, Einwirkungen des Menschen) als indirekte, die Faktoren *Licht*, *Wärme*, *Wasser*, *Chemische Faktoren* und *Mechanische Faktoren* dagegen als unmittelbare Standortfaktoren zu betrachten. SCHULTZ (2002) verdeutlicht die Komponenten und

⁶'bare' steht für unbedeckten Boden, 'herb' für Gräser und krautige Vegetation und 'tree' für den Anteil der Baumschicht.

⁷Oak Ridge Laboratory - Distributed Active Archive Center

stellt sie in eine hierarchische Gliederung. Dabei ist das *Klima* primärer Faktor, darauf folgen *Relief*, *Gewässer* und *Böden* und nachgeordnet *biotische Faktoren* und *Landnutzung*.

SCHULTZ (2002) stellt für die tropisch/subtropischen Trockengebiete die Limitierungen in der Wasserversorgung als wichtigsten Faktor noch vor die Faktoren Licht und Wärme, da diese in der Regel nicht limitierend wirken. Dabei sind die Einflußfaktoren Licht, Wärme und Wasser besonders hoch variabel, weshalb diese in dem Modellansatz für jeden Zeitschritt neu berechnet werden. Die Faktoren Relief und Boden sind zwar bedeutsam, doch für den betrachteten Modellzeitraum von maximal etwa einem Jahrzehnt geringer variabel. Es reicht deshalb aus, diese Faktoren nur auf der Ebene der jährlichen Zeitschritte mit einzubeziehen.

Um die Einflußgrößen *Relief* und *Boden* im vorliegenden Modellansatz zu repräsentieren, werden die zugrunde liegenden Daten für die Böden und die Reliefparameter nach dem Konzept der Fuzzy-Logik kombiniert (TRAEGER, 1994; ZIMMERMANN, 1991). Dabei wird versucht, die menschliche Fähigkeit, anhand unsicherer, bzw. unscharfer Informationen Gegenstände und Zustände zu beschreiben und vor allem zu bewerten, auf Maschinen zu übertragen (BANK, 2004). Dazu werden alle Variablen, die beschrieben oder bewertet werden sollen, in ein Einheitsintervall zwischen 0 und 1 transformiert. Dieser Prozeß wird als Fuzzifizierung bezeichnet (KRUSE, GEBHARDT & KLAWONN, 1993). Diese transformierten Variablen können mit unterschiedlichen Fuzzy-Operatoren verknüpft werden. Diese werden dann mit dem dieser Modellzelle zugrunde liegenden biophysikalischen Konversionsfaktor ε_p multipliziert. So wird eine eventuelle Reduktion der LUE in Abhängigkeit von den Wachstum limitierenden Faktoren zu ε_{max} erreicht.

Der Einfluß des Reliefs wird durch zwei Parameter repräsentiert. Das ist zum einen die absolute Höhe (in m ü. NN), die nach KLINK (1996) die Höhenstufung der Vegetation bestimmt. Zum anderen findet die Hangneigung (in °) Eingang in die Skalierung von ε_{max} , da aufgrund von Geländebeobachtungen eine Beeinflussung der Vegetation plausibel erscheint. Die Exposition am Hang wird bereits bei der Berechnung der *PAR* berücksichtigt. Der Einfluß der Höhe berechnet sich dabei wie folgt, wobei jedoch zu beachten ist, daß die Skalierungsfaktoren empirisch aus Geländebeobachtungen gewonnen wurden:

$$x(h) = -0.0005833 \cdot H + 1.5833 \quad \text{für } 1000m < H < 2200 \quad (4.18)$$

Dabei ist $x(h)$ die skalierte Höhe H . Da Limitierungen durch die Höhe im Untersuchungsgebiet erst ab etwa 1000 m ü. NN auftreten, werden alle Ergebnisse

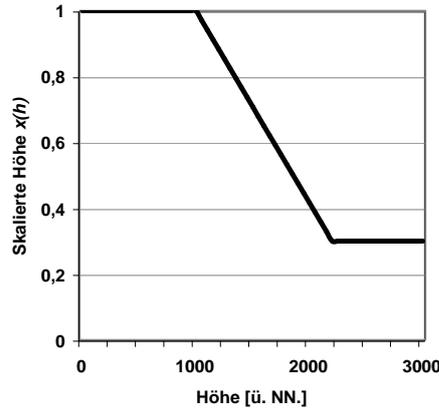


Abbildung 4.7: Graphische Darstellung der Fuzzifizierung des Einflußfaktors 'Absolute Höhe' für die Bestimmung von ε_{max} . Die Skalierungsfaktoren der Funktion sind empirisch aus Geländebeobachtungen bestimmt. (Quelle: eigener Entwurf)

der Gleichung 4.18, die größer als 1.0 sind, auf 1.0 gesetzt⁸. Jedoch sollte der Einfluß der Höhe nicht überschätzt werden. Nach KLINK (1996) wirkt sich die absolute Höhe über dem Meer auf das Wachstumsverhalten aus, jedoch werden durch die Höhe bedingte Einstrahlungsveränderungen bereits an anderer Stelle in die Überlegungen eingebracht (siehe Abschnitt 4.2.1). Aus diesen Grund wird die maximale Limitierung von x_{Relief} auf 0.3 beschränkt, dies entspricht einer Höhe von 2200m ü.NN (s. Abb. 4.7). Damit sind ohnehin die Gipfelhöhen im Kaokoland fast erreicht, so dass eine weitere Absenkung der fuzzifizierten Höhe unnötig ist. Die Einschränkungen für die absolute Höhe gelten auch für die Hangneigung.

Die Hangneigung des Reliefs wird ebenfalls linear auf einen Bereich von 0 bis 1 skaliert. Dazu wird folgende Gleichung mit den angegebenen empirischen Faktoren verwendet:

$$x(s) = -0.08 \cdot SL + 1.24 \quad \text{für } 3^\circ < SL < 8^\circ \quad (4.19)$$

In Gleichung 4.19 repräsentiert $x(s)$ den Skalierungsfaktor der Hangneigung, SL ist die Hangneigung in $^\circ$. Dabei ist die Gleichung lediglich für den Bereich zwischen 3° und 8° Hangneigung gültig. In den nur sehr flach geneigten Becken und Tallagen treten keine neigungsbedingten Limitierungen auf und auch in steileren Lagen ist Pflanzenwachstum eingeschränkt noch möglich. Aus diesem Grund ist die maximale Begrenzung durch die Hangneigung auf 0.6 festgelegt worden. Die

⁸Dies entspricht einer Höhen von 1000 m ü. NN.

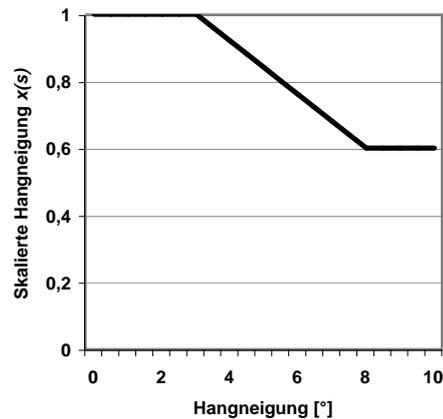


Abbildung 4.8: Graphische Darstellung der Fuzzifizierung des Einflußfaktors 'Hangneigung' für die Bestimmung von ε_{max} . Die Skalierungsfaktoren der Funktion sind empirisch aus Geländebeobachtungen bestimmt. (Quelle: eigener Entwurf)

Fuzzifizierung ist in Abbildung 4.8 graphisch dargestellt.

Nach der Fuzzifizierung der beiden Einflußgrößen werden diese von einem "fuzzy-oder"-Operator verknüpft. Dies bedeutet, daß eine ungünstige Reliefsituation der einen Größe (z.B. 'zu steiler Hang') durch einen günstigen Wert der anderen Größe (z.B. 'nicht zu hoch gelegen') ausgeglichen werden kann. Das Resultat ist der Einflußfaktor x_{Relief} und dieser wird zusammen mit dem Einflußfaktor x_{Boden} per Multiplikation in die Berechnung von ε_{max} miteinbezogen.

Der Einfluß der Böden ist nach SCHULTZ (2002) ein wichtiger Standortfaktor. Zwar sind die Böden für den betrachteten Untersuchungszeitraum von etwa vier Jahren weitgehend invariabel, doch könnten in längerfristigen Modellläufen Prozesse wie Bodendegradation oder Ermüdungserscheinungen der Böden eine Bedeutung erlangen. Aus diesem Grund wird die Berechnung des Bodeneinflusses auf die LUE, wie schon der Einfluss des Reliefs, jährlich ermittelt. Da bodenkundliche Grundlagen im Untersuchungsgebiet weitgehend fehlen, wurde die von der FAO publizierte "Digital Soil Map of the World" (FAO, 1996) verwendet. Diese globale Bodenkarte liefert für den regionalen Maßstab des Modellansatzes ausreichend genaue Aussagen zu den beiden wichtigen Bodenparametern "Bodenart" und "Nährstoffversorgung". Diese beiden Größen werden in dem Modellkonzept zur Erfassung des Bodeneinflusses auf die LUE herangezogen. Dabei stellt die Bo-

Tabelle 4.3: Korngrößenspektren zur Bestimmung der Bodenart aus den FAO-Bodenkarte.

(Quelle: ZOBLEK, 1986)

Bodenart	% Ton	% Schluff	% Sand	Fuzzy-Wert
Grob	9	8	83	0.2
Grob / Mittel	20	20	60	0.3
Mittel	30	33	37	0.4
Mittel / fein	48	25	27	0.5
Fein	67	17	17	0.6

denart nach POTTER et al. (1993) ein Maß für die Wasserspeicherkapazität und das Feuchteregime von Böden dar. Die Nährstoffversorgung wird mittels des C/N-Verhältnisses abgebildet (SCHEFFER et al., 1998). Beide Größen werden ebenfalls nach dem Konzept der Fuzzy-Logik in einen Wertebereich zwischen 0 und 1 transformiert.

In dem Datensatz der FAO (1996) liegt die Information zur Bodenart in drei getrennten Datensätzen vor, die den prozentualen Anteil von Ton, Schluff und Sand für den jeweiligen Oberboden angeben. Insgesamt werden für das Kaokoland nur die Oberböden betrachtet, da die Bodenmächtigkeit und der Entwicklungsgrad der Böden ohnehin meist so gering ist, daß die Bodenbildung kaum in tiefere Bereiche als 1 m vorgedrungen ist. Zwar ist die Sedimentmächtigkeit in den sandigen Beckenlagen des Kaokovelds z.T. größer als 1 m, jedoch dringt auch hier die Bodenbildung nicht tiefer. Als Maß für die Fähigkeit eines Bodens, die Pflanzen mit gespeichertem Wasser zu versorgen, wird die Textur des Bodens verwendet (SCHEFFER et al., 1998). Der Boden wird in fünf Texturklassen gegliedert, denen wiederum ein Fuzzy-Wert zugewiesen wird. Die Grenzen der Texturklassen sind in Tabelle 4.3 dargestellt und entsprechen den von ZOBLEK (1986) publizierten Daten zur globalen Texturverteilung. Dieser Datensatz hat weltweit Eingang erhalten in die Umweltforschung, besonders in Klimamodellierungen (POTTER & BROOKS, 1998).

Die Nährstoffversorgung der Pflanzen durch die Böden ist nach KLIMM, SCHNEIDER & VON HATTEN (1994) im Kaokoveld ohnehin sehr gering (vgl. Abschnitt 2.2.2). Das dimensionslose Verhältnis von organischem Kohlenstoff (C) zu Stick-

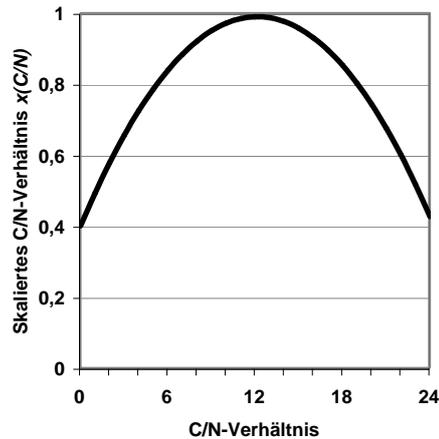


Abbildung 4.9: Graphische Darstellung der Fuzzifizierung des Einflußfaktors 'Nährstoffversorgung' für die Bestimmung von ε_{max} (Quelle: eigener Entwurf)

stoff (N) gibt wieder, wie gut essenzielle Stickstoffverbindungen durch Huminstoffe für Pflanzen bereitgestellt werden. Damit kann dieser Parameter als indirektes Maß für die Pflanzenernährung herangezogen werden. Für eine optimale Versorgung von Pflanzen sollte das C/N-Verhältnis bei etwa 12 liegen. Sowohl ein höheres als auch ein niedrigeres C/N-Verhältnis bringen Nachteile bei der Nährstoffversorgung. Bei höheren C/N-Werten enthält der Boden meist größere Menge an unzersetztem Pflanzenmaterial. Dies reduziert die Nährstoffversorgung, da weniger Humus bereitsteht (AHL et al., 1996).

Das C/N-Verhältnis ist ebenfalls als Datensatz in der FAO-Bodenkarte abgelegt (FAO, 1996) und wird für die Berechnung im Kaokoveld verwendet (siehe Abb. 4.10), indem es ähnlich wie schon die Einflußgrößen 'absolute Höhe' und 'Hangneigung' fuzzifiziert wird. In Abbildung 4.9 ist die Fuzzifizierung graphisch dargestellt, die zugehörige Gleichung 4.20 gibt die Berechnung wieder:

$$x(C/N) = -0.004 \cdot CN^2 + 0.0971 \cdot CN + 0.4 \quad (4.20)$$

Dabei steht $x(C/N)$ für das fuzzifizierte C/N-Verhältnis und CN für das C/N-Verhältnis des jeweiligen Pixels. Die Parameter wurden nach Literaturangaben empirisch angepasst (AHL et al., 1996; BRIEMLE, 1998). Die beiden resultierenden Einflußfaktoren für die Textur und die Nährstoffversorgung werden mit einem 'fuzzy-or'-Operator verschnitten. Dies bedeutet, daß eine ungünstige Texturklasse durch eine gute Nährstoffversorgung ausgeglichen werden kann (SCHEFFER et al.,

Dabei ist T_ε der Temperaturstreß und T die mittlere Tagestemperatur über den Zeitschritt t in der Modellzelle x .

Bei Temperaturen von -10°C und niedriger wird folglich LUE (ε_{max}) auf 0 gesetzt (vgl. Gleichung 4.15). Der Temperaturstreß für das Pflanzenwachstum liegt bei 0,8 für 0°C , bei 1,0 für 20°C und wieder bei 0,8 für 40°C .

Neben der Temperatur wirkt vor allem die Versorgung der Pflanzen mit Feuchtigkeit als wichtiger regulierender Faktor. Dieser wird von SEAQUIST, OLSSON & ARDÖ (2003) als Wasserstreß (engl.: 'Water stress scalar', WSS) bezeichnet und wird von einigen Autoren (POTTER et al., 1993; FIELD, RANDERSON & MALMSTRÖM, 1995) als Quotient aus effektiver Evapotranspiration (EET) und potentieller Evapotranspiration (PET) ausgedrückt. In dem hier vorgestellten Ansatz findet ein Vorschlag von POTTER et al. (1993) Verwendung, der jedoch mit neueren Forschungsergebnissen von SEAQUIST, OLSSON & ARDÖ (2003) und NISHIDA et al. (2003) ergänzt wird. Der Wasserstreß W_ε berechnet sich demnach wie folgt:

$$W_\varepsilon(x, t) = 0,5 + 0,5 \cdot \frac{EET(x, t)}{PET(x, t)} \quad (4.22)$$

In der Gleichung 4.22 steht W_ε für den Wasserstreß, EET für die effektive Evapotranspiration und PET für die potentielle Evapotranspiration zum Zeitpunkt t in der Zelle x .

Im folgenden wird im Kapitel 4.4.3 die Ermittlung der potentiellen und aktuellen Evaporation erläutert, die zur Ermittlung des Wasserstreß-Faktors (W_ε) benötigt werden.

4.4.3 Ableitung der potentiellen und aktuellen Verdunstung

Die als Evapotranspiration bezeichnete Verdunstung über Land umfaßt je nach dem Bedeckungsgrad mit Vegetation sowohl die Evaporation von unbelebten Oberflächen als auch die Transpiration der belebten Natur (HUPFER, 1996). Dabei sind diese Prozesse wegen der extrem hohen kleinräumigen Variabilität sehr schwierig zu erfassen. Durch die Betrachtung der Verdunstung auf einer größeren Skala lassen sich einige der Einflußfaktoren begrenzen und geeignet parametrisieren. Der einfachste Modellfall für die Ableitung der Verdunstung entspricht der potentiellen Verdunstung. Hierbei wird angenommen, daß zu jeder Zeit genügend Wasser sowohl im Boden als auch in der Vegetation zur Verfügung steht (WEISCHET, 1995). Die potentielle Evapotranspiration (PET) ist somit vor allem von der eingestrahlten Energie der Sonne abhängig.

Ermittlung der potentiellen Verdunstung

Die potentielle Verdunstung spielt für die Erfassung des variablen Anteils am biophysikalischen Konversionsfaktor ε eine zentrale Rolle. So wird aus dem Quotienten der potentiellen und aktuellen Verdunstung auf den Wasserstreß der Vegetation geschlossen und somit ein wichtiger Begrenzungsfaktor für die Biomassebestimmung bestimmt. Da sich der gesamte Modellansatz vornehmlich auf die Verwendung fernerkundlich gewonnener Daten stützt, wird auch im Fall der Verdunstungsberechnung ein fernerkundlich gestütztes Modell zum Einsatz kommen, um die potentielle Verdunstung abzuschätzen.

Seit PENMAN (1948) existiert eine Gleichung zur Berechnung der Evaporation über Wasserflächen. Diese nutzt klimatologische Eingabeparameter wie Sonnenscheindauer, Temperatur, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit zur Berechnung. In der Folge ist dieser Ansatz von vielen Wissenschaftlern für die Berechnung der Evapotranspiration unterschiedlichster Landoberflächen erweitert worden (THORNTHWAITE, 1948; WATTS & HANCOCK, 1985; WRIGHT, 1982; BUSINGER, 1956; BURMAN & POCHOP, 1994; CHRISTIANSEN, 1968; HANKS, 1974). Besonders der Ansatz von PENMAN (1948) und MONTEITH (1971) hat sich etabliert und wird heute in vereinfachter Form auch von der FAO zur Berechnung der potentiellen Verdunstung empfohlen (ALLEN et al., 1998). In dieser Arbeit wird eine Weiterentwicklung der Penman-Monteith-Formel verwendet, die PRIESTLEY & TAYLOR (1972) für mesoskalige Landschaftsausschnitte entwickelt haben.

Im allgemeinen kann die potentielle Verdunstung als latenter Wärmestrom in der Energiebilanz eines Raumausschnitts (x) zum Zeitpunkt (t) beschrieben werden (WEISCHET, 1995):

$$R_n(x, t) - G(x, t) = H(x, t) + \lambda E(x, t) \quad (4.23)$$

wobei R_n die einkommende Globalstrahlung aus lang- und kurzwelliger Strahlung von der Sonne, G den Bodenwärmestrom, H den sensiblen Wärmestrom und λE den latenten Wärmestrom darstellt. Dieser latente Wärmestrom kann bei unbegrenzter Wasserversorgung von Vegetation und Untergrund der potentiellen Evapotranspiration gleichgesetzt werden.

Die Methode von PRIESTLEY & TAYLOR (1972) stellt wegen ihres direkten physikalischen Bezugs zur Strahlung sowie ihres erfolgreichen Einsatzes bei agrometeorologischen Versuchen ein gutes Instrumentarium zur Ermittlung der potentiellen Verdunstung dar. JIANG & ISLAM (1999) und BASTIAANSEN (1995) haben darüberhinaus den Ansatz für die Verwendung bei größeren Raumausschnitten dargestellt:

$$\lambda E = \alpha_a \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot (R_n - G) \quad (4.24)$$

Dabei ist α_a der advektive Parameter, Δ der Sättigungsdampfdruck (kPa/°C), γ die psychrometrische Konstante (kPa/°C), R_n die Globalstrahlung (MJ/m²) und G der Bodenwärmestrom (MJ/m²) (nach SEAQUIST, OLSSON & ARDÖ, 2003).

Der advektive Parameter α_a wird meist als konstant mit einem Wert von 1.26 angegeben (NISHIDA et al., 2003; SEAQUIST, OLSSON & ARDÖ, 2003). JENSEN, BURMAN & ALLEN (1990) wenden für eine aride Umgebung einen Wert von 1.75 an, um der verstärkt aufstrebenden warmen Luft sowohl vom Boden als auch aus der Luft gerecht zu werden. Dabei werden in dem Parameter α_a die Effekte der Priestley-Taylor-Parameter α und β kombiniert (JIANG & ISLAM, 1999).

Die in Gleichung 4.24 benötigte Globalstrahlung kann nach NISHIDA et al. (2003) wie folgt ermittelt werden:

$$R_n = (1 - R^\uparrow)R^\downarrow + L^\downarrow - \epsilon\sigma T_s^4 \quad (4.25)$$

Die kurzwellige Einstrahlung (R^\downarrow) wird aus dem im Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Modell von SWIFT (1976); SWIFT & KNOERR (1973) abgeleitet. Die Albedo (R^\uparrow) wird direkt aus den MODIS-Daten mit Hilfe des von SONG & GAO (1999) vorgestellten Ansatzes geschätzt. Dabei werden die kurzwelligen Spektralkanäle des *MOD09*-Produkts kalibriert und gemittelt. Die langwellige Ausstrahlung setzt sich aus der Stefan-Boltzmann-Konstante ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{Wm}^2\text{K}^4$), der Emissivität (ϵ) und der Oberflächentemperatur (T) zusammen. Die Emissivität und die Oberflächentemperatur können direkt aus dem MODIS *MOD11*-Daten entnommen werden.

Der Bodenwärmestrom G wird nach der von MORAN et al. (1989) entwickelten Gleichung berechnet:

$$G = 0.583^{-2.13 \cdot NDVI} \cdot R_n \quad (4.26)$$

Diese Formel ist gültig für $NDVI > 0.0$. Für Pixel mit $NDVI < 0.0$ (z.B. Gewässer) wird G als konstanter Anteil von R_n in der Form $G = 0.583 \cdot R_n$ betrachtet (JIANG & ISLAM, 1999). Der Sättigungsdampfdruck Δ in [hPa] ist von der Temperatur abhängig und berechnet sich für Temperaturen $T > 0^\circ\text{C}$ nach WEISCHET (1995) wie folgt:

$$\Delta = 6.1078 \frac{7.5 \cdot T}{237.3 + T} \quad (4.27)$$

Die psychrometrische Konstante wird mit $0.667 \text{kPa}/^\circ\text{C}$ angesetzt.

Die potentielle Evapotranspiration über einer Fläche läßt sich nach der dargestellten Methode mit Gleichung 4.24 berechnen. Dabei wird die Energie ermittelt, die als latente Energie λE für die Verdunstung zur Verfügung steht. Die potentielle Verdunstung (mm) kann nun aus der Umrechnung der latenten Wärme λE (MJ/m^2) in verdunstetes Wasser mit dem Faktor $2450 \text{ J/g } H_2O$ ermittelt werden (SCHÖNWIESE, 1994).

Ermittlung der aktuellen Verdunstung

Die aktuelle Verdunstung einer Fläche läßt sich nur äußerst schwierig ermitteln. Die sichersten Ergebnisse werden in der Regel durch direkte Messungen erzielt (WEISCHET, 1995). Seit der Entwicklung von Multispektralmessungen durch Satelliten ist es jedoch möglich, den Wasserdampfgehalt der Atmosphäre zu bestimmen (KING et al., 1992; GAO & KAUFMAN, 1998). Das Datenprodukt des MODIS-Sensors *MOD05_L2* liefert für das Untersuchungsgebiet einen täglichen Wert des Gesamtwasserdampfgehalts der Atmosphäre ('total precipitable water' in mm/m^2) mit einer räumlichen Auflösung von 1 km^2 .

Bei diesem Parameter wird davon ausgegangen, daß der gesamte Wasserdampfgehalt der Atmosphäre über einer definierten Fläche (z.B. 1 km^2) als Säule erfaßt wird. Des weiteren geht die Modellvorstellung davon aus, daß sämtlicher enthaltener Wasserdampf kondensieren und als Niederschlag zur Erde fallen könnte (SCHÖNWIESE, 1994). Untersuchungen haben gezeigt, daß lediglich etwa 10% des verdampften Wassers kondensieren und etwa 90% in der Atmosphäre verbleiben (vgl. WEISCHET, 1995).

Da die Verteilung des Wasserdampfs in der Atmosphäre nicht gleichförmig ist, sondern sich auf die untersten Schichten konzentriert, könnte man den Wasserdampfgehalt auch als Maß für die aktuelle Verdunstung dieser Oberfläche betrachten. Dazu müssen einschränkend die unterschiedlichen Quellen des Wasserdampfs beleuchtet werden: Erstens kann der Wasserdampf aus anderen Gebieten durch Winde und Luftmassenverlagerung herantransportiert werden; und zweitens ist der Wasserdampfgehalt das Ergebnis lokaler Verdunstung und repräsentiert damit die effektive Evapotranspiration (*EET*). Eine Vielzahl von Untersuchungen (z.B. SANDER & BECKER, 2002; MENZ & BACHMANN, 1992) haben gezeigt, daß tropische Niederschläge meist konvektive Ursachen haben und nur in geringem Maße zyklonale Niederschlagsereignisse darstellen. So kann mit einer geringen Unsicherheit die Wasserdampfsäule der Atmosphäre, wie sie nach GAO & KAUFMAN (1998) für MODIS *MOD05_L2*-Daten ermittelt wird, als ein Maß für die effektive Evapotranspiration angenommen werden.

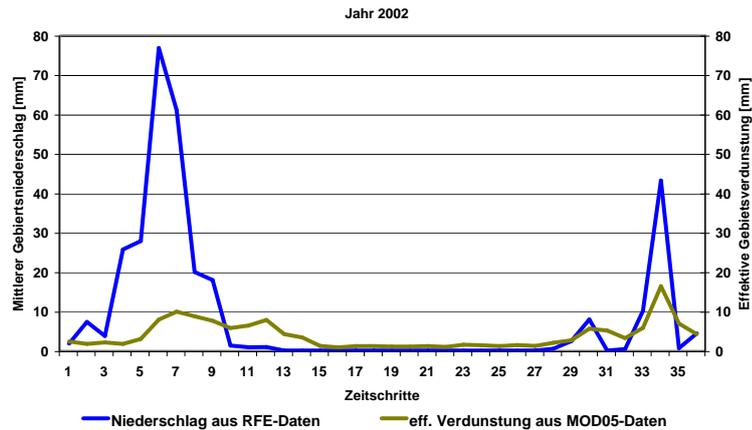


Abbildung 4.11: Das Diagramm stellt den mittleren Gebietsniederschlag für das Untersuchungsgebiet aus FEWS RFE-Daten und die aktuelle Verdunstung aus *MOD05*-Daten für jeden Zeitschritt des Jahres 2002 gegenüber. Die Niederschläge liegen in der Summe über der Verdunstung, wengleich die Gebietsverdunstung auch nach dem Ende der Regenzeit im Zeitschritt 10 (1.-10.04.2002) noch anhält. (Quelle: eigener Entwurf)

Zur Kontrolle sollen dabei zwei Vergleichsparameter dienen, mit denen die Plausibilität der Wasserdampfdaten getestet werden kann. Einerseits kann nur soviel Wasser verdunsten, wie durch Niederschläge in das Gebiet eingebracht werden. Zwar liegen für das Untersuchungsgebiet keine gemessenen flächendeckenden Niederschlagsdaten vor, doch stellt der *African Data Dissemination Service (ADDS)* des USGS geschätzte Niederschlagsdaten ("Rainfall Estimate", RFE) mit einer räumlichen Auflösung von $8 \times 8 \text{ km}^2$ kostenlos über das Internet zur Verfügung. Die Niederschläge werden mit dem FEWS RFE Algorithmus nach einem Ansatz von XIE & ARKIN (1997) im *NOAA's Climate Prediction Center* abgeschätzt. Dazu werden METEOSAT 7-Daten gemeinsam mit Regenfalldaten von Bodenstationen ausgewertet. Zusammen mit zwei neueren Instrumenten zur Niederschlagsbestimmung, dem *Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I)* an Bord des DMSP⁹-Satelliten und der *Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU)* an Bord von NOAA AVHRR können global tägliche Niederschläge abgeschätzt werden (FEWS-NET, 2003).

Mit Hilfe eines einfachen räumlichen Interpolationsverfahrens können diese Nie-

⁹DMSP: Defense Meteorological Satellite Programm

derschlagsdaten auf die räumliche Auflösung des RBM von 1000m x 1000m pro Rasterzelle bezogen werden. Mit einem Vergleich dieser Daten mit den Wasserdampfdaten aus MODIS kann geprüft werden, ob die effektive Evapotranspiration realistisch ist. Dazu darf diese die Menge der gefallenen Niederschläge nicht übersteigen. Für das Jahr 2002 wurden dazu in Abbildung 4.11 die mittleren Gebietsniederschläge aus den FEWS RFE-Daten mit der von MODIS erfaßten Evapotranspiration verglichen. Dabei läßt sich feststellen, daß die Verdunstung zwar in den trockenen Monaten über den mittleren Niederschlägen liegt, jedoch im gesamten Jahr die gefallenen Niederschläge nicht erreicht. Damit scheinen die Daten zur Evapotranspiration aus MODIS sinnvoll zu sein.

Andererseits kann die effektive Evapotranspiration die potentielle Verdunstung nicht übersteigen. In sofern können auch damit die beiden Datensätze geprüft werden. Für einen zufällig ausgewählten 10-Tages-Schritt (TS: 10/2002) wurden in Abbildung 4.12 die vom RBM berechnete PET mit der EET von MODIS durch Subtraktion verglichen. Für die überwiegende Anzahl der Bildpunkte (87.6 % der Landpixel) stimmt die Erwartung, daß die potentielle Verdunstung die aktuelle bei weitem übersteigt.

Nur im küstennahen Bereich der Skelettküste wird durch den frühen Überflugzeitpunkt des Satelliten eine höhere Wasserdampfsäule gemessen. Dies resultiert aus den häufigen morgendlichen Nebelbänken, die sich aufgrund des kalten Benguelastroms bilden und vom ablandigen Wind im Verlauf des Vormittags zerstreut und aufs Meer getrieben werden. Allerdings beträgt hier die Differenz zwischen der PET und EET nur selten mehr als ein bis zwei mm Wassersäule. Insgesamt ist das Ergebnis der PET-Modellierung positiv und genügt vollauf den Erfordernissen zur Bestimmung des Wasserstress, der nach Gleichung 4.22 berechnet wird.

Der Wasserstreß wirkt zusammen mit dem Temperaturstreß auf die maximale Lichtverwertungseffizienz ε_{max} und über eine Mittelung der beiden Streßfaktoren wird der Einfluß berechnet (SEQUIST, OLSSON & ARDÖ, 2003). Der resultierende effektive biophysikalische Konversionsfaktor ε_{eff} gibt nun in Abhängigkeit von den klimatischen, pedologischen und topographischen Eigenschaften die Assimilationsfähigkeit der zusammengesetzten Anteile der Vegetationseinheiten wieder. Da die Einflußgrößen von Relief, Boden und Klima jeweils als skalierende Faktoren wirken, bleibt die ursprüngliche Einheit des biophysikalischen Konversionsfaktors $[\frac{gDM}{J \cdot 10^6}]$ erhalten (RUIYU et al., 1996). Bei der Kombination dieser Größe mit der zuvor ermittelten PAR und $FPAR/NDVI$ erhält man die Biomasse, die für jede Modellierungszelle in einem Zeitschritt produziert wurde.

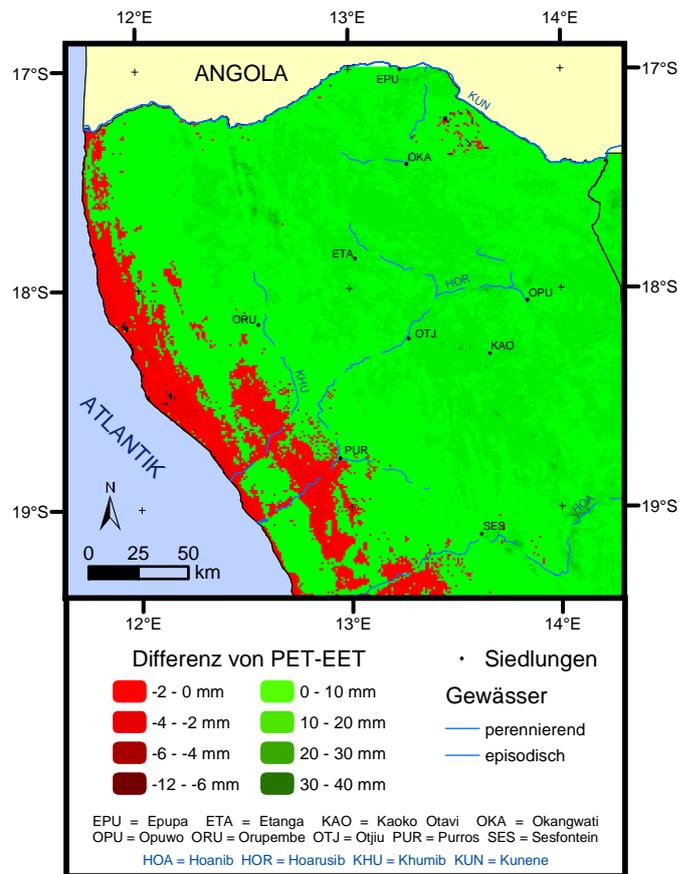


Abbildung 4.12: Differenz potentieller Evapotranspiration (PET) zur aktuellen Evapotranspiration (EET) für den Zeitschritt 10/2002. Im Bereich der namibianischen Skelettküste lassen morgendliche Nebelbänke die EET über die PET anwachsen. (Quelle: eigener Entwurf)

4.5 Eingangsgrößen zur Berechnung der pflanzlichen Biomasse

Nachdem nun alle Eingangsgrößen und Berechnungsgrundlagen zur Verknüpfung der Daten abgeschlossen sind, sollen im letzten Abschnitt dieses Kapitels in einer Zusammenschau die Bearbeitungsschritte zur Berechnung der pflanzlichen Biomasse im Sinne von NPP dargestellt werden. Dabei verfolgt der Ansatz des RBM

Kaokoveld die Absicht, die Produktion der Vegetation nur aus frei zugänglichen Datensätzen zu errechnen. Diese Datensätze werden im Kapitel 5 ausführlich erläutert. In der Abbildung 4.13 ist das Verfahren zur Erfassung der pflanzlichen Biomasse übersichtlich dargestellt. Die Umsetzung dieser Modelltheorie in ein ausführbares Rechenprogramm und dessen Arbeitsweise in der Programmiersprache ENVI/IDL (RSI, 1999a) sind im Kapitel 5.4 dargestellt.

Die Erfassung der raumzeitlichen Produktion gestaltet sich in zwei Schritten. Dabei werden die länger wirkenden Eingangsparameter wie ε_{max} zuerst berechnet und bleiben für die gesamte Laufzeit eines Modelljahres gültig. Der größere Teil der Berechnungen umfaßt allerdings höher variable Eingangsdaten und Größen, die für jeden 10-Tages-Schritt erneut berechnet werden. Diese Zeiteinheit ist im Modell fest vorgegeben und stellt die geringste zeitliche Modellauflösung dar. Die Gründe für diese Zeitschrittlänge sind z.T. bereits genannt worden und sollen an dieser Stelle nochmals zusammengefaßt werden:

1. Der Zeitraum von 10 Tagen zwischen zwei Berechnungen des Modells ist ausreichend lange, um phänologische Unterschiede zwischen zwei Zeitschritten festzustellen; und es besteht noch keine Gefahr, die für die Vegetation wichtigen Ereignisse, wie z.B. Auswirkungen von signifikanten Niederschlägen, zu verpassen.
2. Eine Verringerung des Datenumfanges ist angesichts des hohen Rohdatenvolumens der verwendeten MODIS-Daten unbedingt notwendig. Dies kann mit der Limitierung der Zeitschritte auf 10 Tage erreicht werden, indem die MODIS-Daten zu geeigneten Kompositen zusammengefaßt werden. Bei einer kürzeren Zeitschrittlänge würde die Rechenzeit des Modells sehr stark anwachsen.
3. Die Zeitschrittlänge von 10 Tage eröffnet darüber hinaus die Möglichkeit, ältere NOAA-AVHRR Daten (mit geeigneter Anpassung) in das Modellkonzept problemlos zu integrieren. Diese älteren Daten sind meist als 10-Tages-Komposite gespeichert. Damit erschließt sich retrospektiv ein Modellzeitraum von rund 25 Jahren, der zur Beurteilung der rezenten Prozesse äußerst interessant ist.

Die Laufzeit des Modells umfaßt die Jahre 2000 bis 2003, für die bereits MODIS-Daten vorliegen. Aus der Wahl des neuen mesoskaligen Sensorsystems MODIS (siehe dazu Kapitel 5) resultiert auch die räumliche Auslösung des RBM-Modellkonzepts. Zwar liefert MODIS für einige Spektralbereiche Daten mit einer Auflösung von $250 \times 250 \text{ m}^2$, doch der überwiegende Teil der Kanäle wird mit $500 \times$

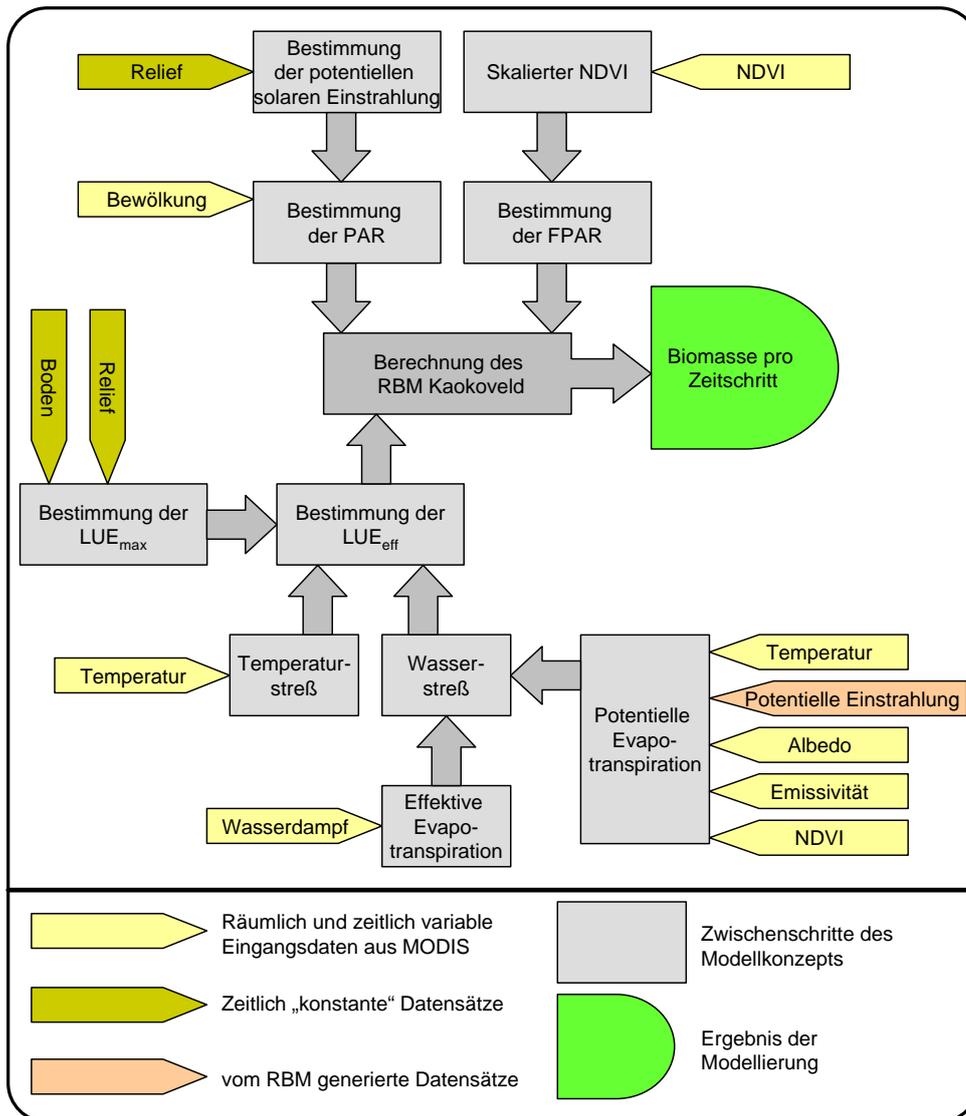


Abbildung 4.13: Modellübersicht zur Berechnung der raumzeitlichen Biomasseentwicklung. Im Schema sind die einzelnen Schritte dargestellt, die zur Erfassung der pflanzlichen Produktion notwendig sind. (Quelle: eigener Entwurf)

500 m² beziehungsweise 1000 x 1000 m² pro Pixel aufgezeichnet. Aber nicht nur aus technischen Erwägungen ist der „Ein-Kilometer“-Maßstab gut geeignet. Er

erlaubt die großräumige und vollständige Abdeckung des Kaokolandes. Auch mit einem höher auflösenden Fernerkundungssystem wären genauere Analysen kaum möglich. Zudem eignet sich der räumliche Maßstab ausgezeichnet im Hinblick auf die angesprochene zukünftige Nutzung des Modellkonzepts mit retrospektiven NOAA-AVHRR-Daten, die ebenfalls meist als 1 x 1 km²-Daten abgelegt werden, bzw. mit den neuen MSG-Daten. Grundsätzlich sind alle Programme und Vorverarbeitungsroutinen zur Berechnung der pflanzlichen Biomasse auf die Anwendung des Modells mit höher aufgelösten Pixeln ausgelegt.

5 Die Nutzung von täglichen Satellitendaten zur Erfassung der dekadischen NPP

Wie schon in Kapitel 4.1 angesprochen, ist die Nutzung von Fernerkundungsdaten zur Erfassung von ökologischen Parametern grundsätzlich kein neuer Ansatz. Mit dem Start des amerikanischen Satelliten TERRA EOS-1 im Herbst 1999 durch den USGS und den an Bord befindlichen Sensor MODIS wurde jedoch erstmals ein Fernerkundungssystem geschaffen, das explizit für die Erfassung von Umweltparametern gebaut wurde. Mit einer räumlichen Auflösung¹ von 250 bis 1000m und einem "Swath"-Winkel² von etwa 45° gelingt es dem Sensor fast täglich die gesamte Erdoberfläche abzubilden (GUENTHER et al., 1998; BARNES, PAGANO & SALOMONSON, 1998; COHEN & JUSTICE, 1999).

Die zweite Neuerung dieses Satelliten und Sensorsystems ist die konsequente Auslieferung von veredelten Datenprodukten an die Nutzergemeinschaft. Im Gegensatz zu früheren Sensorsystemen, bei denen die Vorverarbeitung, Kalibrierung und Geokorrektur der aufgezeichneten Daten im wesentlichen in der Hand der einzelnen Nutzer lag, können nun bereits vorprozessierte Datenprodukte mit genauen Spezifikationen genutzt werden³. Diese Handhabung bedeutet für dem Nutzer eine große Erleichterung, da sich hierdurch eine Vielzahl von Fehlern vermeiden lassen. Die vorprozessierten Daten bestellt man über eine Internetseite beim USGS⁴ und diese werden dann von einem ftp-Server für einen begrenzten Zeitraum bereitgestellt. Zwar müssen die so beschafften Daten in der Regel noch an die Erfordernisse des jeweiligen Nutzers angepaßt werden, doch bietet die zen-

¹Die räumliche Auflösung gibt die Größe an, mit der ein einzelner Bildpunkt erfaßt werden kann.

²Der "Swath"-Winkel bezeichnet den Winkel der Abtastbreite des Sensors. Dieser wird auch als FOR ("Field of view") bezeichnet. Bei MODIS bedeutet dies, daß ein etwa 2500 km breiter Streifen entlang des Flugpfades abgebildet wird.

³Allgemeine und spezielle Angaben zu MODIS und den lieferbaren Datenprodukten sind unter <http://modis.gsfc.nasa.gov/> zu finden.

⁴EOS Data Gateway <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>

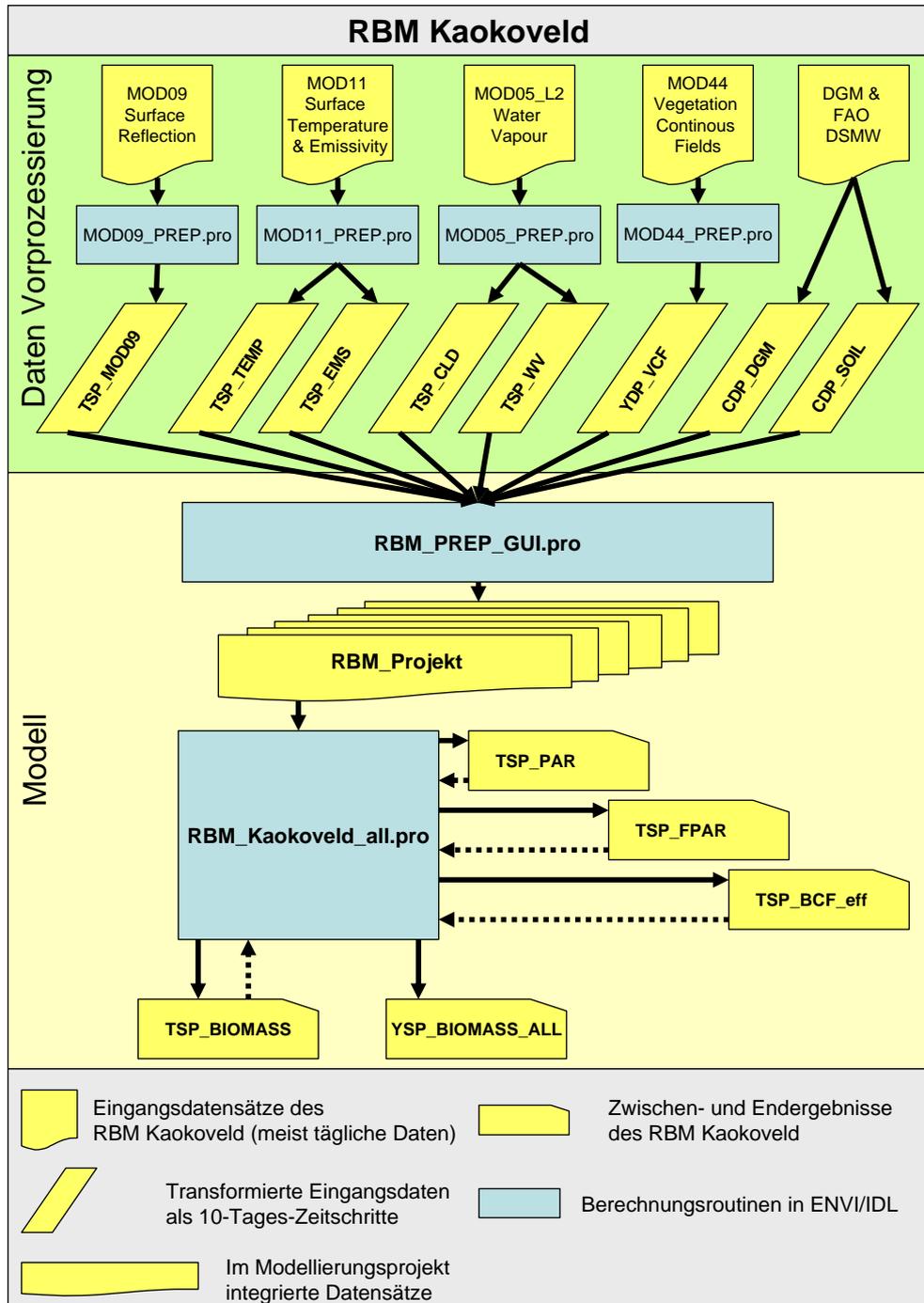


Abbildung 5.1: Übersicht der gestuften Prozessierung zur Berechnung von Biomasse. (Quelle: eigener Entwurf)

trale Vorprozessierung auf den Rechnern des USGS den Vorteil, daß die einzelnen Nutzer weniger Probleme mit diskontinuierlichen Daten haben, d.h. die Daten sind nach einem einheitlichen Schema prozessiert und weisen deshalb weniger Fehler auf.

Für die Berechnung der Biomasse aus täglichen MODIS-Satellitendaten sind eine Reihe eigens entwickelter Routinen notwendig, die in der Programmierumgebung ENVI/IDL erstellt worden sind (siehe Anhang A.1). Die Bearbeitung der Daten umfaßt zwei Hauptschritte: Erstens werden in der Daten-Vorprozessierung (siehe Abbildung 5.1) die unterschiedlichen, meist täglichen MODIS-Daten in eine einheitliche Geometrie, ein einheitliches Datenformat und in die zeitliche Auflösung von 10 Tagen transformiert. Dazu sind verschiedene ENVI/IDL-Routinen notwendig, die in den Kapiteln 5.2.1 und 5.2.3 vorgestellt werden. Die Ergebnisse dieser Transformationen liegen danach als TSP-, YDP- bzw. CDP-Datensatz⁵ vor (siehe Kap. 5.2). Im zweiten Schritt wird das eigentliche RBM-Hauptmodell angestoßen. Diese Prozeß gliedert sich wiederum in zwei IDL-Routinen, die zuerst ein Modellierungsprojekt anlegen (*RBM_PREP_GUI*) und dann die Berechnung der Biomasse für jeden Zeitschritt und als Jahresbilanz durchführen (*RBM_Kaokoveld*) (siehe Abb. 5.1). In dem Modellierungsprojekt (RBM_Projekt) werden sowohl alle Eingangsdaten wie auch sämtliche Ergebnisse in einer einheitlichen Struktur abgelegt und gespeichert. Durch die Teilung der Prozessierung in zwei eigenständige IDL-Routinen und durch die Anlage des Modellierungsprojekts läßt sich das RBM-Kernmodul *RBM_Kaokoveld* weitgehend automatisieren, so daß bei den zum Teil erheblichen Rechenzeiten kein Operator das Modell beaufsichtigen muß. Jener Teil der Modellprogrammierung wird im Kapitel 5.4 ausführlich dargestellt.

5.1 Die Beschaffung von MODIS-Daten

Alle für die Berechnung von Biomasse notwendigen Datensätze wurden beim USGS EOS Data Gateway bestellt. Über einen Internet-basierten Dialog wird mit Hilfe zahlreiche Selektionsverfahren eine Auswahl der Daten getroffen (USGS-NASA, 2004b).

In einem ersten Schritt selektiert man den gewünschten Datensatz. Dabei kann

⁵TSP steht für "time step product" und bezeichnet 10-Tages-Daten, YDP steht für "yearly data product" und bezeichnet Daten, die nur einmal pro Modelljahr genutzt werden und CDP steht für "constant data product" und bezeichnet konstante Daten, die über die gesamte Modelllaufzeit nicht variabel sind (z.B. die FAO Bodenkarte).

man sich sowohl von der Auswahl nach Attributen (z.B. Prozessierungsgrad, räumliche und zeitliche Auflösung, etc.) als auch nach dem Namen des gesuchten Datensatzes leiten lassen. Der zweite Schritt umfaßt die Auswahl des Zielgebiets, das die Daten abbilden sollen. Hier kann man z.B. geographische Längen- und Breitenbereiche angeben oder das Zielgebiet per Mausclick auf einer interaktiven Karte einzeichnen. Der nächste Schritt legt die Auswahl des zeitlichen Rahmens fest, in dem ein Zeitintervall mit Start- und Endzeitpunkt bestimmt wird. Diese Eingabe kann nach einem Standardschema (YYYY-MM-DD) erfolgen oder als Angabe des julianischen Tages und Jahres (YYYY-DDD). In einem letzten Schritt können noch allgemeine Angaben festgelegt werden, wie die gewünschte maximale Anzahl von Treffern, die maximale Suchzeit, etc. Ein großer Vorteil ist die Möglichkeit die Suchanfragen zu speichern, damit diese Daten nicht für jeden neuen Suchvorgang erneut eingegeben werden müssen (USGS-NASA, 2004b).

Mit dem Beginn der Suche wird die oben formulierte Anfrage an das LP DAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center) gesandt; dort wird in den Datenbanken überprüft und nach Treffern gefahndet. Minütlich erhält der Nutzer dabei eine Auskunft über den Stand der Suche. Nach Abschluß, festgelegt durch den Ablauf der maximalen Suchzeit, durch vollständiges Durchsuchen der Datenbanken oder durch Benutzerwunsch, werden die Ergebnisse dem Nutzer tabellarisch präsentiert. Für jeden gesuchten Datensatz (z.B. *MOD09-Surface-Reflectance Produkt*⁶) wird die Anzahl der Treffer angegeben. Der Nutzer muß anschließend die gewünschten Datensätze auswählen. Nun folgt die Wahl der Bestelloption: Für die Bestellung von MODIS Datensätzen sind besonders zwei Optionen in Bezug auf die Datenlieferung interessant: ftp-pull und CD-ROM. Bei der Bestellung der Daten auf CD-ROM werden die Daten beim USGS auf CD bzw. DVD gebrannt und per Post an den Nutzer gesandt. Dieses Verfahren dauert in der Regel acht bis zehn Wochen und ist deshalb nur bedingt zu empfehlen. Besser und schneller erfolgt die Auslieferung per ftp-pull Verfahren (s.u.). Die Bestellung wird nach der Auswahl des Liefermediums mit Eingabe der persönlichen Angaben wie Name, Adresse, Institution und Emailadresse abgeschlossen und an das LP DAAC gesandt (USGS-NASA, 2004b).

Kurze Zeit nach Beendigung der Bestellung erhält man eine Bestätigung der erfolgreichen Bestellung per Email. Wenn als Liefermedium ftp-pull gewählt wurde, erfolgt, je nach Auslastung des LP DAAC, nach einigen Stunden bis etwa drei Tagen die Benachrichtigung der Bereitstellung der geordneten Daten, wiederum per Email. Nun stehen die Daten für einen Zeitraum von fünf Tagen auf

⁶Bezeichnung des USGS für ein MODIS-Satellitendatenprodukt.

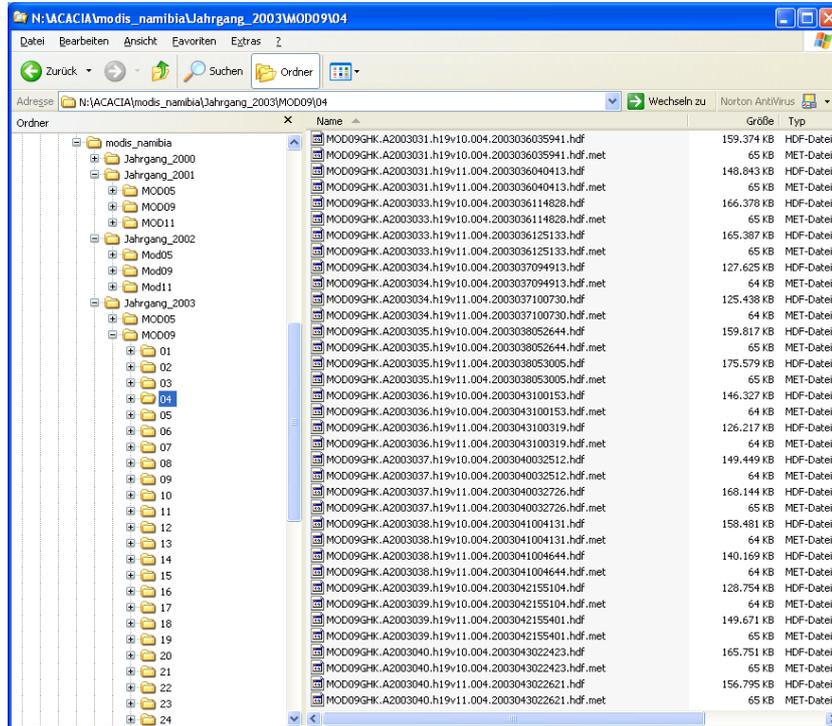


Abbildung 5.2: Screenshot der Ordnerstruktur zur Speicherung der heruntergeladenen MODIS-Daten. Die Daten werden nach Jahr, Produktname und 10-Tages-Komposit sortiert. (Quelle: eigener Entwurf)

einem ftp-Server des LP DAAC zur Verfügung und können mit den beigefügten Zugangsdaten heruntergeladen werden. Dabei ist die gegebenenfalls große Datenmenge zu beachten, damit der Download auch in der zur Verfügung stehenden Zeit vonstatten geht. Erfahrungsgemäß ist es sinnvoll kleine Datenpakete zu bestellen, um Abbrüche der ftp-Verbindung während des Transfers zu vermeiden.

Der besondere Reiz der MODIS Daten liegt in der kostenfreien Verteilung und Nutzung der Daten. Nach der Philosophie des USGS sind die meisten Daten des Satellitensystems EOS-1 TERRA frei verfügbar und lassen sich per Internet beziehen. Während in der Anfangszeit nach dem Start von TERRA die Server des LP DAAC häufig überlastet waren, funktioniert die Bestellung und Auslieferung der Daten mittlerweile problemlos. Bedauerlich ist lediglich, daß das LP DAAC kein ftp-push Verfahren anbietet, bei dem die neu erzeugten MODIS-Produkte automatisch in die MODIS-Datenbank der RSRG an der Universität Bonn geliefert

werden.

Die heruntergeladenen MODIS-Daten werden in der RSRG am Geographischen Institut der Universität Bonn (GIUB) in einer Ordnerstruktur abgelegt, die in der ersten Hierarchie nach Jahren geordnet ist. Die zweite Hierarchie ist von den verschiedenen MODIS-Produkten geprägt, darunter sind die jeweils zugehörigen 10-Tages Komposite als Ordner repräsentiert (siehe dazu Abbildung 5.2). Diese Datenbankstruktur erlaubt den Routinen der RBM-Vorbereitung einen einfachen und effizienten Zugriff auf die MODIS-Produkte. Die Gefahr, daß durch Fehler in der Vorverarbeitung die originalen MODIS-Produkte beschädigt und neu heruntergeladen werden müssen, ist durch die konsequente Angabe von Ausgabeordnern minimiert.

5.2 Die Vorbereitung und Verwendung der MODIS-Daten im RBM Kaokoveld

In dem nordnamibianischen Untersuchungsgebiet sind aufgrund der abgeschiedenen Lage und den geringen wirtschaftlichen Aktivitäten nur sehr wenige Bodendaten verfügbar, die zur Nutzung in dem in Kapitel 4 beschriebenen Modell zur Biomasseberechnung geeignet sind. Deshalb zielt der Ansatz des RBM darauf ab, ohne bodengestützte Information auszukommen und verwendet ausschließlich öffentlich und global verfügbare Datensätze. Einen wesentlichen Input leisten dabei die bereits erwähnten Datensätze des Sensorsystems MODIS an Bord des Satelliten TERRA EOS-1. Da die Datenmengen für ein räumlich und zeitlich explizites Modell enorm hoch sind, finden insgesamt sechs unterschiedliche Datensätze Eingang in das Modell. Dies sind drei Zeitreihen-Datensätze der "Land Application Group"⁷ JUSTICE (2004), ein Zeitreihen-Datensatz der "MODIS Atmosphere Group"⁸ KING (2004), sowie zwei konstante Datensätze der FAO (1996) und des USGS-EROS-DATA-CENTER (2004). Unter Zeitreihen-Datensätzen werden Datenreihen verstanden, die in kontinuierlichen Zeitabständen (z.B. täglich) einen Satellitendatensatz liefern.

Für die in Kapitel 4.1.2 beschriebene Ableitung der Nettoprimärproduktion aus Satellitendaten sind verschiedene Datenprodukte von MODIS notwendig. Zentrale Bedeutung kommen den Oberflächenreflektanzen (*MOD09*) zu, aus denen

⁷Die "Land Application Group" umfaßt die Prozessierung jener Datenprodukte, die die Landoberfläche betreffen (z.B. *MOD09*, *MOD11* und *MOD44*).

⁸Die "MODIS Atmosphere Group" umfaßt die Prozessierung der Atmosphärenprodukte von MODIS (z.B. *MOD05.L2*).

der NDVI abgeleitet wird. Daneben ist für die Bestimmung des aktuellen biophysikalischen Konversionsfaktors ε das Thermalprodukt (*MOD11*) und das Datenprodukt zum Wasserdampfgehalt der Atmosphäre notwendig (*MOD05.L2*). Aus diesem Datensatz wird eine Wolkenmaske extrahiert, die zur Erfassung der atmosphärischen Transmission gebraucht wird. Diese Datenprodukte liegen mit einer zeitlichen Auflösung von 1 Tag und einer räumlichen Auflösung von 500 - 1000 m Pixelgröße vor. Der maximale biophysikalische Konversionsfaktor wird aus dem jährlichen MODIS-Vegetationsprodukt *MOD44*, sowie den konstanten Datensätzen zu den Bodeneigenschaften (DSMW) und dem GTOPO30-Datensatz zur Topographie gebildet.

Die MODIS-Daten, die von USGS ausgeliefert werden, sind in einem speziellen Datenformat abgelegt, das als "Hierarchical Data Format" (HDF) bezeichnet wird. Dieses Datenformat, das heute in der Version HDF5 vorliegt, wird vielfältig in naturwissenschaftlichen Bereichen eingesetzt. HDF ist ein Multi-Objekt Datenformat, das seit 1993 von USGS und NASA verwendet wird und plattformunabhängig unterschiedliche Datentypen zusammen mit den zugehörigen Metadaten speichern kann. Dabei lassen sich über dieses Format auch große Datensätze gezielt ansprechen, die eine effiziente Datenspeicherung erlauben (RSI, 1999b). Für die Speicherung von MODIS-Daten wurde das HDF-Spezialformat HDF-EOS geschaffen. Dieses erlaubt z.B. die Speicherung von Metadaten zur Geoinformation, Raster- und Punktdaten oder auch Streifendaten ("Swath data"), die beim Überflug von Satelliten erzeugt werden (ULLMAN, 2001). Die für das RBM benötigten Satellitendaten werden als HDF-EOS ausgeliefert.

Da das regionale Biomassemodell für Nordwest-Namibia mit einer zeitlichen Auflösung von 10 Tagen arbeitet, die MODIS-Daten aber in der Regel nur als tägliche Daten, als 8-Tages-Daten oder als 16-Tage-Produkt vorliegen, muß für alle benötigten Datenprodukte die zeitliche Modellauflösung von 10 Tagen aus täglichen Daten zusammengefaßt werden. Die Länge eines Zeitschritts von 10 Tagen ist besonders aus zwei Gründen sinnvoll: Zum einen stellt dieser Zeitraum eine akzeptable Größe hinsichtlich phänologischer Unterschiede der Vegetation dar (PRICE, CROOKS & MARTINKO, 2001), zum anderen ergibt sich damit für retrospektive Analysen die Möglichkeit, NOAA-AVHRR-Daten als Input für die Biomassemodellierung zu verwenden. Hier liegt zur Minimierung des Bewölkungseinflusses die typische Aggregation bei 10 Tagen (HUETE, JUSTICE & LIU, 1994). Die jeweils verwendeten Verfahren werden in Kapitel 5.2.2 und 5.2.3 angesprochen.

Neben der Aggregation der zeitlichen Dimension müssen zum Teil die Daten

noch in ihrer geometrischen Projektion geändert werden. Der USGS liefert die Daten der "Land Application Group" in der "Intergerized Sinusoidal Projection" (ISIN) aus, die für die Anwendung im RBM nur begrenzt geeignet ist, da diese Projektion von ENVI/IDL nicht gelesen werden kann (RSI, 1999a). Deshalb müssen diese Daten in die Standardprojektion des Modells *UTM WGS84, Zone 33S* gebracht werden. Die *MOD05.L2* Daten dagegen werden als "Swath data" entlang des überflogenen Bildstreifens ausgeliefert. Um diese in die Standardprojektion des Modells zu bringen, müssen die Daten in einem komplizierten Verfahren an die oben genannte Projektion angepaßt werden.

Die Notwendigkeit der Projektionsveränderung zu einer gemeinsamen UTM-Projektion und die Aggregierung von 10-Tages-Werten aus täglichen Daten verursacht ein sehr hohes Datenaufkommen. Im Mittel liegt das Rohdatenvolumen aus MODIS-Produkten für jeden 10-Tages-Zeitschritt bei etwa 16,8 GB. Allein schon wegen dieser immensen Datenmengen ist eine stufenweise Reduktion der Daten sowohl in räumlicher wie auch zeitlicher Hinsicht dringend geboten.

5.2.1 Geokorrektur der MODIS Land-Daten (MOD09, MOD11 und MOD44)

Prinzipiell arbeiten alle Routinen zur Vorverarbeitung der MODIS Land-Produkte nach demselben Schema, sodaß in diesem Abschnitt nur das generelle Schema diskutiert wird. Die Unterschiede der einzelnen Datenprodukte, die besonders hinsichtlich der Aggregierung zu 10-Tages-Kompositen bestehen, werden in den jeweiligen Abschnitten angesprochen. Zusätzlich geben die Abbildungen (z.B. Abb. 5.5) weitergehende Informationen über den Aufbau der Routinen. Der komplette Quellcode in der Programmiersprache IDL ist auf der CD im Anhang abgelegt und kann mit einem beliebigen Texteditor eingesehen werden.

Zur Anwendung der Vorverarbeitung bestimmter MODIS Land-Produkte muß die jeweils zugehörige IDL-Routine ausgeführt werden (also für *MOD09*-Daten die Routine *MOD09_PREP*; für *MOD11*-Daten die Routine *MOD11_PREP* und für *MOD44*-Daten die Routine *MOD44_PREP*). Der Aufbau des Dialogfensters (GUI, "Graphical User Interface") ist für alle drei Datenprodukte der gleiche, wie exemplarisch in Abbildung 5.3 dargestellt. Die MODIS-Daten müssen bereits in einer Ordnerstruktur vorsortiert sein und dies läßt sich am einfachsten bereits beim Download der Daten realisieren. Der Routine *MOD09_PREP* wird dann über die GUI lediglich eine Textdatei mit jeweils einem Pfad zu einem Ordner für jedes 10-Tages-Komposit übergeben ("MOD09 directory file"). Mit der Aus-

wahl des Ordners, in den die Ergebnisse geschrieben werden ("output directory"), und der Wahl der resultierenden Pixelgröße ("pixel resolution") sind bereits alle notwendigen Schritte getan. Nun beginnt die *MODXX_PREP*-Routine⁹, nacheinander die einzelnen Ordner zu prüfen, die MODIS-Daten umzuprojizieren und nachfolgend zu 10-Tages Kompositen zu aggregieren. Prinzipiell ließe sich das gesamte Modell auch mit 500 m Pixelgröße statt der eigentlich vorgesehenen 1000 m Pixelgröße betreiben. Jedoch sind zu diesem Zeitpunkt eventuelle theoretische wie praktische Konsequenzen noch nicht bearbeitet, so daß zur Zeit nur die Möglichkeit der Berechnung der Biomasse auf 1000 x 1000 m² Pixeln besteht.

Die Arbeitsweise der jeweiligen Vorverarbeitungsroutinen sind nachfolgend erläutert.

Grundsätzlich werden die MODIS Daten der "Land Application Group" bereits projiziert ausgeliefert. Zur einfacheren Handhabung der Daten werden diese in einzelnen Kacheln ("tiles") von jeweils 1200 km Nord-Süd und 1200 km West-Ost produziert, was am Äquator etwa einer Ausdehnung von 10° geographische Länge und 10° geographische Breite entspricht. In der Abbildung 5.4 ist die ISIN-Projektion dargestellt, wobei die beiden Kacheln, die zum Abdeckung des Untersuchungsraum notwendig sind, hervorgehoben sind. Der USGS numeriert die Kacheln horizontal von West nach Ost und vertikal von Norden nach

⁹'XX' steht für die jeweilige Produktnummen wie in der Abb. 5.1 im oberen Teil 'Daten Vorprozessierung' dargestellt.

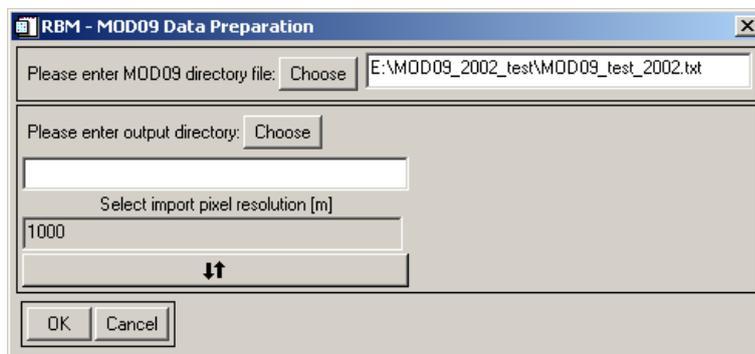


Abbildung 5.3: Programmfenster (GUI) der Routine *MOD09_PREP*. In dem Dialog werden zum einen die Eingangsdaten ausgewählt (oberer Teil) und zum anderen der Ausgabeordner und die gewünschte räumliche Auflösung der Daten festgelegt (unterer Teil). (Quelle: eigener Entwurf)

Süden (WOLFE, ROY & VERMOTE, 1998). Somit trägt die nördliche Kachel, die das Untersuchungsgebiet abdeckt, die Nummer H19V10 und die südlichere Kachel die Nummer H19V11.

Die von USGS ausgelieferten Daten befinden sich in der flächentreuen "Integerized Sinusoidal Projection" (ISIN) (ROSSOW & GARDNER, 1984; SNYDER, 1987). Allerdings entspricht diese Projektion nicht der vom Modell benötigten UTM Zone 33S Projektion auf WGS84. Da sich diese Projektion nur auf die MODIS Land-Daten beschränkt und die meisten Standardprogramme zur Bearbeitung von Satellitendaten, wie auch ENVI/IDL, nicht in der Lage sind, die ISIN-Projektion zu lesen und darzustellen (USGS-NASA, 2004a), müssen diese Daten in die gewünschte Projektion transformiert werden. Dies geschieht mit Hilfe eines vom USGS-NASA (2004a) bereitgestellten Programms MODIS Reprojection Tool (MRT) mit der Routine *resample.exe*, die unter IDL mit Hilfe eines Batchprozesses angesprochen wird und als Ausgabe die gewünschten umprojizierten Bänder des jeweiligen Datensatzes enthält (siehe z.B. oberen Teil der Abbildung 5.5 oder 5.6). Dazu liest z.B. im Fall der *MOD09*-Daten die Routine *HDF_import_all* aus der "MOD09 directory file" alle einem Komposit zugehörigen *MOD09*-Daten ein und übergibt diese einzeln an die Routine *MOD_project*. Diese

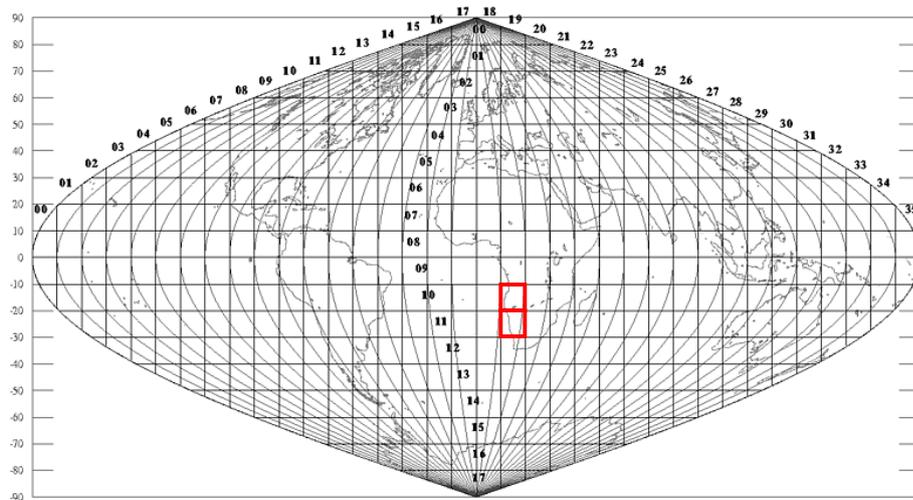


Abbildung 5.4: "Integerized Sinusoidal Projection" mit Kachelgitter zur Bestimmung der MODIS Land-Daten. Die beiden Kacheln zur Abdeckung des Untersuchungsgebiets sind hervorgehoben. (Quelle: USGS-NASA, 2004a)

überprüft die Daten, erstellt über die Routine *param* eine Parameterdatei, die gemeinsam mit der MODIS-Daten der Routine *resample* übergeben wird. Diese ruft *resample.exe* auf und projiziert die Inputdaten nach den Angaben der Parameterdatei aus ISIN nach UTM Zone 33S, WGS84 um. Dabei werden jeweils nur die in der Parameterdatei angegebenen Bänder umprojiziert und als einzelne Dateien in einem temporären Ordner gespeichert. Zugleich schneidet die Routine *resample.exe* einen Ausschnitt aus den Daten aus, um das Volumen bereits im ersten Rechenschritt zu reduzieren. Diese einzelnen Bänder werden in einem nachfolgenden Schritt von der IDL-Routine *MOD_project* eingelesen und wieder zu einem umprojizierten Datensatz zusammengeführt. Diese Re-Projektion der Daten wird mit jedem täglichen Datensatz durchgeführt. Dabei wird der Datentyp der Inputdaten unverändert gelassen. Nach jeweils 10 Datensätzen, die einem 10-Tages-Komposit zugehörig sind, wird dann mit der IDL-Routine *MOD09_composit* ein weiterer Prozeß angestoßen (siehe z.B. für die Verarbeitung von MODIS *MOD09*-Daten den Aufbau der Routine *MOD09_PREP*, Abb. 5.5).

5.2.2 Ableitung physikalischer Parameter und Zusammenfassung der Zeitreihendaten (MOD09, MOD11 und MOD44)

Während die Änderung der Projektion von ISIN zu UTM, Zone 33S auf WGS84 für alle drei MODIS Land-Datensätze nach dem gleichen Schema abläuft, arbeitet der zweite Schritt innerhalb der Vorverarbeitung für jeden Datensatz unterschiedlich. Im folgenden werden die Verfahren für die drei MODIS Land-Datensätze dargestellt und es wird auf die Unterschiede hingewiesen.

Surface Reflection (MOD09)

Für die Erfassung der Biomasse mit Hilfe des Ansatzes von MONTEITH (1972) enthalten die Oberflächen-Reflexions-Daten des Sensors MODIS zentrale Informationen über den Zustand der Vegetation im Untersuchungsgebiet.

Die *MOD09*-Daten enthalten spektrale Reflektanzen, die normalerweise zwischen 0–100 % skaliert sind. Da die Auflösung der spektralen Information beim Sensorsystem MODIS mit 12 Bit¹⁰ sehr hoch ist (CONBOY, 2000), sind die Reflektanzen je Kanal fein differenziert. Die Speicherung dieser Daten als physikalischer Parameter würde als Datentyp einen Gleitkommawert (32bit-Float) voraussetzen.

¹⁰Dies entspricht $2^{12} = 4096$ Abstufungen.

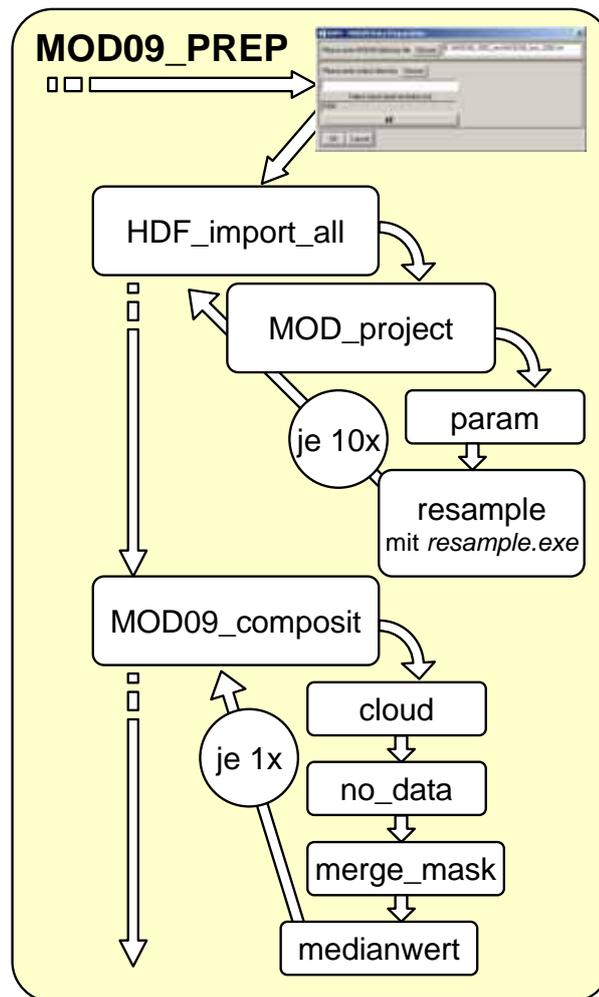


Abbildung 5.5: Aufbau und Struktur der Routine *MOD09_PREP*, die der Vorverarbeitung von MODIS *MOD09*-Daten dient. (Quelle: eigener Entwurf)

Dies wiederum hätte eine enorme Datenmenge zur Folge, da insgesamt 7 spektrale Kanäle in dem Produkt vorhanden sind. Mit der Speicherung der Daten als DN-Werte mit dem Datentyp 16bit-Integer und einer späteren Umrechnung in Reflektanzen während der Laufzeit des RBM-Hauptmodells kann viel Speicherkapazität gewonnen werden.

Nach der Umwandlung der Projektion (Kap. 5.2.1) erfolgt, wie in Abbildung

5.5 schematisch dargestellt, die Aggregation der MODIS *MOD09*-Daten zu 10-Tages-Kompositen. Dazu dient die Routine *MOD09_composit*, die zuerst alle 10 Datensätze mit den jeweils sieben spektralen Bändern einliest. Dann überprüft die Routine mit Hilfe der Subroutinen *cloud* und *no_data*, welche Pixel in welchem Datensatz von Wolken bzw. von ungültigen Datenbereichen betroffen sind. Dabei wird ein Grenzwert von $DN = 5500$ für die Überprüfung der Bewölkung und ein Grenzwert von $DN = 0$ für ungültige Datenbereiche gewählt (USGS-NASA-DAAC, 2004b). Diese Grenzwerte sind in der Dokumentation der *MOD09*-Daten festgelegt und haben globale Gültigkeit. Die beiden daraus resultierenden Masken werden von der Routine *merge_mask* kombiniert. Die Routine *medianwert* berechnet unter Berücksichtigung der Ausschlußmasken für jedes Pixel in jedem spektralen Kanal den Median, der als Ergebnis des Aggregierungsprozesses gespeichert wird. RICHTERS & KLEIN (2002) haben die Auswirkungen dieser Methode auf die resultierende Datenqualität des NDVI geprüft und dabei festgestellt, daß die Zusammenfassung über den Median hinsichtlich der Rechendauer und Genauigkeit deutliche Vorteile gegenüber einer Zusammenfassung über das arithmetische Mittel bzw. über die Bildung nach der "maximum composit"-Methode nach HOLBEN (1986) hat. Dies liegt vor allem daran, daß in den MOD09 Surface Reflectance-Daten Wolken bereits markiert sind (s.o.) und die Daten einer Atmosphärenkorrektur unterzogen wurden (VERMOTE et al., 1997).

Die Ergebnisdaten werden als "Time Step Product" (*TSP*) nach dem Schema *TSP_MOD09_XXYYYY.data* abgelegt. Dabei steht *MOD09* für den Produkttyp und *XXYYYY* für die Zeitmarke. Die ersten zwei *XX* bezeichnen das 10-Tages-Komposit innerhalb des Jahres (01-36), *YYYY* steht für die Angabe des Modelljahres. So bedeutet der Datensatz *TSP_MOD09_052001.data*, daß es sich hierbei um ein *MOD09*-Produkt vom 11. bis 20. Februar 2001 handelt.

Nach Abschluß der Zusammenfassung eines 10-Tages-Komposits springt die Routine *MOD09_PREP* zum Anfang der Berechnung zurück, lädt die MODIS *MOD09*-Daten der nächsten 10 Tage und beginnt diese mit Hilfe von *HDF-import_all* und *MOD_project* umzuprojizieren und anschließend zu einem Komposit zusammenzufassen.

Surface Temperature (MOD11)

Während aus dem MOD09-Datensätzen immer nur jeweils ein TSP extrahiert werden kann, werden dem Surface Temperature *MOD11*-Datensatz zwei Inputdatensätze für die Modellierung entnommen. Dieser tägliche Datensatz umfaßt neben der Oberflächentemperatur für zwei Zeitpunkte pro Tag zusätzlich noch

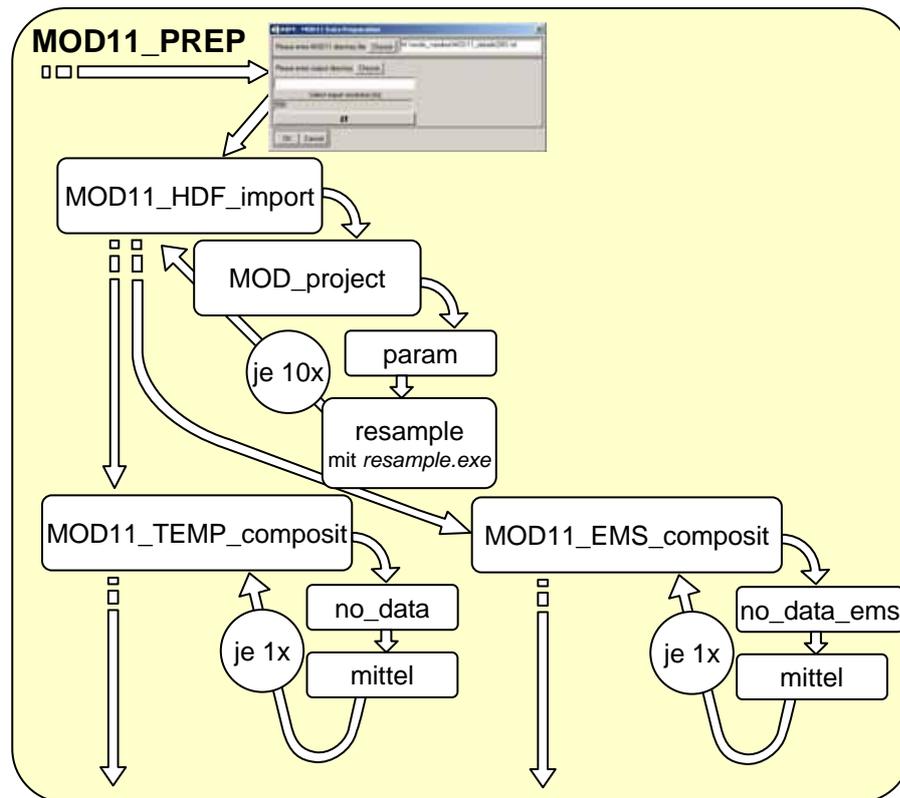


Abbildung 5.6: Aufbau und Struktur der Routine *MOD11_PREP*, die der Vorverarbeitung von MODIS *MOD11*-Daten dient. (Quelle: eigener Entwurf)

die Emissivität. Aus diesen Angaben werden zwei TSP abgeleitet, eines zur Temperatur und das andere zur Emissivität. Dabei teilt sich die Vorverarbeitung nach der Umprojektion der *MOD11*-Daten in der Routine *MOD_project* in zwei Stränge auf. Zuerst werden wie im Abschnitt 5.2.1 beschrieben die zwei Bänder der Tages- und Nacht oberflächentemperatur erfaßt und nachfolgend die Bänder der Emissivität, die für zwei MODIS-Spektralkanäle (Band 31 und Band 32) im *MOD11*-Datensatz abgelegt sind. Danach erfolgt die Aggregation der täglichen Daten zu 10-Tages Kompositen, getrennt nach den Ergebnisprodukten.

Die Routine *MOD11_TEMP_composit* liest zunächst die umprojizierten Temperaturdaten der *MOD11*-Datei für alle zehn Tage ein. Da vom USGS bereits ein kontinuierlicher, validierter Datensatz ausgeliefert wird (USGS-NASA-DAAC,

2004a), prüft die Routine *no_data* mit einem unteren und einem oberen Grenzwert lediglich, welche Pixel nicht mehr innerhalb der Spezifikationen des USGS¹¹ liegen und damit ungültig sind. Dadurch werden sowohl bewölkte Pixel als auch Verzerrungen, die durch die Veränderung der Projektion hervorgerufen werden, sicher erkannt. Anschließend werden die gültigen Pixel von der Routine *MOD11_TEMP_composit* unter Benutzung von *mittel* zusammengefaßt. Dabei wird die mittlere Tagestemperatur nach der Minimum-Maximum-Methode arithmetisch aus dem Tag- und Nachtwert der Temperatur berechnet (WEISCHET, 1995). Der letzte Schritt besteht in der Berechnung der Temperatur in °C, die mit Hilfe der vom USGS-NASA-DAAC (2004a) vorgegebenen Skalierungsfaktoren leicht zu bewerkstelligen ist. Der USGS gibt dabei für die Temperatur innerhalb des gültigen Wertebereichs folgende Skalierungsfunktion an (Gleichung 5.1):

$$\text{Temperatur}[^{\circ}\text{C}] = x_{MOD11} \cdot 0.0200 - 273.15 \quad (5.1)$$

Das Ergebnis ist das "Time Step Product" *TSP_TEMP_XXYYYY.data*, das für jedes 10-Tages Komposit erzeugt wird.

Die Weiterverarbeitung der Emissivitätsdaten aus *MOD11* nach der Projektionsänderung erfolgt analog zur Berechnung der Temperaturdaten. Wieder liest die Routine *MOD11 EMS_composit* die zu verarbeitenden 10 Tage ein und ermittelt die gültigen Pixel über die Routine *no_data EMS* mit Hilfe eines von USGS vorgegebenen Grenzwertes von $DN = 0$ (USGS-NASA-DAAC, 2004a). Anschließend werden die gültigen Pixel für die 10 Tage gemittelt und mit Hilfe der "Scale"- und "Offset"-Faktoren¹² die reale Emissivität für jedes Pixel berechnet. Die Ergebnisdaten werden als *TSP EMS_XXYYYY.data* abgelegt (siehe Abb. 5.7). Mit Hilfe der Abbildung 5.6 lassen sich die Details der Vorverarbeitung der *MOD11*-Daten nochmals nachvollziehen.

Vegetation Continuous Field (MOD44)

Der dritte Datensatz aus der Reihe der von der MODIS *Land Application Group* herausgegebenen Daten, der in das Biomassenmodell Eingang findet, ist der MODIS *MOD44B*-Datensatz. Dieser Datensatz, der im Gegensatz zu den *MOD11*- und den *MOD09*-Daten nur jährlich prozessiert wird, trägt die Bezeichnung "Vegetation Continuous Fields" (USGS-NASA-DAAC, 2004c) (siehe Abb. 4.6). In

¹¹Der untere Grenzwert liegt bei $DN = 7500$ der obere Grenzwert bei $DN = 65535$ (USGS-NASA-DAAC, 2004a).

¹²Der USGS-NASA-DAAC (2004a) gibt folgende Faktoren an: Scale faktor = 0.0020; Offset = 0.4900

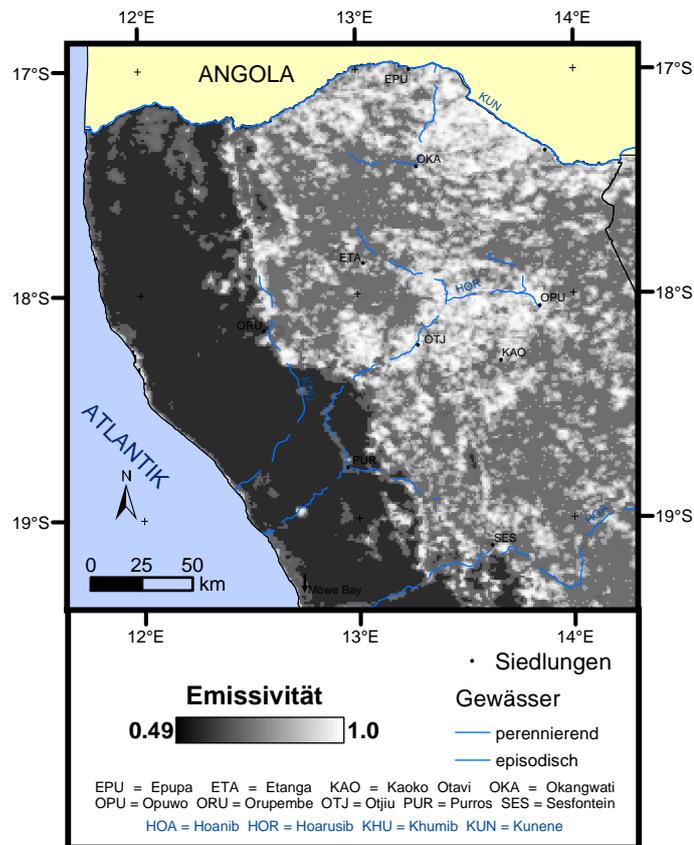


Abbildung 5.7: Emissivität aus MODIS *MOD11*-Daten für den Zeitschritt 17/2002. Dargestellt ist der Datensatz *MOD11_EMS_172002.data* (Quelle: eigener Entwurf)

diesem Datensatz sind mit einer Auflösung von $500 \times 500 \text{ m}^2$ Informationen zur Zusammensetzung der Vegetation im jeweiligen Bildpunkt gespeichert.

Dabei wird die Vegetation über die prozentuale Zusammensetzung aus drei Funktionseinheiten betrachtet. Diese umfassen die Klassen "Baumschicht" ("tree cover"), "Nicht-Baumschicht" ("non-tree vegetation") und "unbedeckter Boden" ("bare") (HANSEN et al., 2003). Die jeweiligen Funktionseinheiten sind dabei noch weiter in Untereinheiten differenziert, die in Tabelle 5.1 dargestellt sind. Der Import der MOD44B-Daten verläuft analog zur den bereits vorgestellten MOD11- und MOD09-Daten. Die Routine *MOD44_PREP* ruft über *MOD_project* die C-Routine *resample.exe* auf. Diese projiziert die auch in ISIN ausgegebenen Daten

Tabelle 5.1: Übersicht der Einheiten der Vegetation in den MOD44B-Datensätzen.

Datensatz	Einheit	Gültiger Wertebereich
Percent Tree Cover	Prozent	0 - 100
Percent Broadleaf	Prozent	0 - 100
Percent Needleleaf	Prozent	0 - 100
Percent Evergreen	Prozent	0 - 100
Percent Deciduous	Prozent	0 - 100
Percent Nontree Vegetation	Prozent	0 - 100
Percent Shrubs	Prozent	0 - 100
Percent Crops	Prozent	0 - 100
Percent Other Herbaceous	Prozent	0 - 100
Percent Bare	Prozent	0 - 100
Percent Ice	Prozent	0 - 100
Percent Bare Ground	Prozent	0 - 100

nach UTM, Zone 33S auf WGS84. Dann werden die insgesamt 12 Bänder des Datensatzes, inklusive der Untereinheiten (vgl. Tab. 5.1), umsortiert. Dabei wird aus der Funktionseinheit "non-tree vegetation" die Untereinheit "Sträucher" ("shrubs") herausgelöst und der Einheit "Baumschicht" zugeschlagen. Damit wird eine deutlichere Differenzierung der Vegetationsbedeckung erreicht, die nun in der Einheit "Nicht-Baumschicht" nur noch Gräser, Kräuter und Nutzpflanzen enthält. Die genaue Definition der Grenzen der jeweiligen Einheiten sind bei HANSEN et al. (2003) beschrieben. Die Nutzpflanzen spielen bei der Anwendung der Daten im Untersuchungsgebiet keine Rolle, da dort keine Voraussetzungen für Ackerbau herrschen. Die minimalen Flächen der Gärten der Himba (siehe Abschnitt 2.3) können aufgrund der durchschnittlichen Größe von 0,91 ha (WELLE, 2003) vernachlässigt werden.

Mit diesem Verfahren wird eine Trennung des Datensatzes in Gehölzschicht und Grasschicht möglich. Da der MOD44B-Datensatz die Festlegung der LUE in entscheidendem Maße steuert (vgl. Abschnitt 4.4), wird damit eine Unterscheidung zwischen der Produktion der Gras- und der Baumschicht möglich (HANSEN et al., 2002; DEFRIES, TOWNSHEND & HANSEN, 1999). Nach dem Abschluß der Zuordnung speichert die Routine MOD44.PREP die jährlichen Daten zum Anteil der Vegetation unter dem Dateinamen *YDP_VCF_YYYY.data* ab. Dabei steht *YDP* für "Yearly data product", *VCF* für "Vegetation continuous field" und *YYYY* bezeichnet die Jahreszahl, für die der erzeugte Datensatz gültig ist.

5.2.3 Verwendung von MODIS Atmosphärendaten (MOD05_L2)

Wie bereits ausgeführt, stehen für den Untersuchungsraum keine kontinuierlichen und hochaufgelösten Niederschlagsdaten zur Verfügung. Deswegen wurden MODIS *MOD05_L2* Daten verwendet, um über den Wasserdampfgehalt der Atmosphäre Kenntnis von Niederschlagsereignissen zu erhalten. Dabei dient der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre als eine der Steuergrößen für den per Fuzzy-Logik ermittelten biophysikalischen Konversionsfaktor ε (vgl. Kapitel 4.4). Die vom USGS bereitgestellten Daten *MOD05_L2* liegen für den Untersuchungszeitraum vollständig als Datenprodukte der Version V004 vor. Dies bedeutet, daß die Daten bereits validiert sind und eventuelle Fehler Einzelercheinungen und nicht systematischer Natur sind (CONBOY, 1999). Die Daten liegen im Auslieferungszustand als Swath-HDF-Daten vor. Dies bedeutet, daß die Daten zwar über in den HDF-Datensatz eingebettete "Geopoints" verfügen, die Daten jedoch nicht projiziert, sondern in der Flugbahngeometrie des aufzeichnenden Satelliten vorliegen. Aus diesen Grund ist eine umfassende Geokorrektur notwendig, die die Daten in die modellweite Projektion UTM Zone33S (WGS84) bringt. Erst anschließend können die resultierenden täglichen Daten zu 10-Tages Kompositen zusammengefaßt werden.

Geokorrektur der MOD05_L2-Daten

Um die *MOD05_L2*-Daten in das gleiche Projektionssystem zu bringen wie die anderen MODIS-Datenprodukte, arbeitet der dafür entwickelte Korrekturalgorithmus in einem zweistufigen Verfahren (vgl. Abb. 5.8). In einem ersten Schritt (Routine *MOD05_import*) werden die sog. "Geopoints" aus dem *.hdf Datensatz ausgelesen. Diese sind für jedes fünfte Pixel in x- und y-Richtung gespeichert. Die darin enthaltenen Werte zur geographischen Länge und Breite werden zusammen mit der Lageinformation im Bild (Zeilen/Spalten) ausgelesen und zwischengespeichert. Nun werden die geographischen Koordinaten in das Zielkoordinatensystem (UTM, Zone 33S, WGS84) überführt und bilden zusammen mit der Lageinformation im Bild einen umfangreichen Satz an Bodenkontrollpunkten (GCP)¹³.

Im nächsten Schritt werden die täglichen *.hdf-Daten ausgelesen. Neben Metainformationen, wie z.B. die "Geopoints", werden in HDF-Daten die eigentlichen

¹³GCP bezeichnet einen "Ground Control Point", der eine exakte Beziehung zwischen einem Bildpunkt und einer räumlichen Koordinate erlaubt. Die GCPs werden zur Lösung der Transformationsgleichung benötigt.

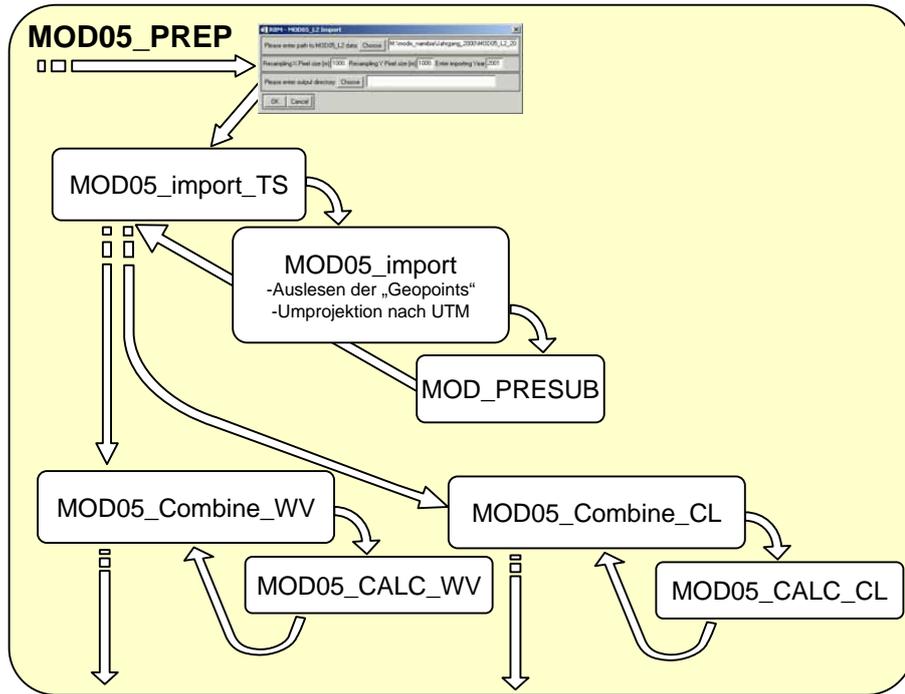


Abbildung 5.8: Aufbau und Struktur der Routine *MOD05_PREP*, die der Vorverarbeitung von MODIS *MOD05*-Daten dient. (Quelle: eigener Entwurf)

Nutzdaten als "Scientific Data Sets" (SDS) abgelegt. Von den insgesamt fünf SDS in den *MOD05*-Daten werden in dem RBM lediglich zwei SDS genutzt. Dies ist einerseits die Säule des Wasserdampfes und zum anderen eine Wolkenmaske, die aus dem Datensatz *MOD35* während der Erstellung von *MOD05_L2* vom USGS einkopiert wird. Diese beiden SDS werden von der Routine *MOD05_import* ausgelesen und mit Hilfe einer Triangulation ersten Grades mit einem "Nearest Neighbour Resampling" in die Zielprojektion UTM, Zone 33S, WGS84 umgewandelt. Dabei liegt der erzeugte RMS-Fehler unter 0,34 Pixeln. Dieser Umstand ist aus der hohen Anzahl der GCPs erklärbar.

Da die *MOD05_L2*-Daten als Swath-Daten¹⁴ ausgeliefert werden, ist das genaue Festlegen des für das Modell benötigten Ausschnitts sehr schwierig, da bei

¹⁴Die *MOD05_L2*-Daten werden als Swath-Daten entlang des Flugpfades des Satelliten ausgeliefert. Da sich die Flugbahn von TERRA bei jedem Überflug geringfügig ändert, verfügen die Swath-Daten außer in den "Geopoints" über keine absolute Geometrie.

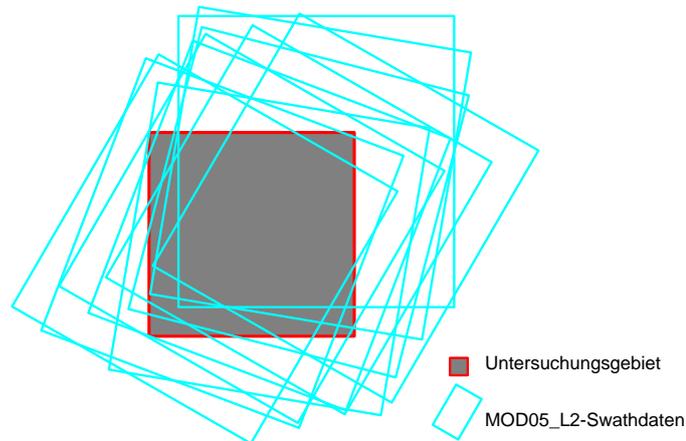


Abbildung 5.9: Schematische Darstellung der Überlagerung der Swath-Daten mit dem Untersuchungsgebiet. Durch die Verschiebung des Swath-Daten ist eine aufwendige geometrische Korrektur und Mosaikierung nötig. (Quelle: eigener Entwurf)

der Selektion der MOD05-Daten auf den Servern des USGS meistens zu viele Datensätze selektiert werden. Da die Swath-Daten im Gegensatz zu den Daten der "Land Application Group" nicht in Tiles vorliegen, können die Grenzen des Untersuchungsgebiet bei der Bestellung der Daten nicht genau bestimmt werden. Deshalb werden im vorhergehenden Arbeitsschritt immer die einzelnen *MOD05_L2*-Daten eines Zeitschritts umprojiziert und nachfolgend mit den übrigen Daten aggregiert und zugleich mosaikiert, damit das Untersuchungsgebiet vollständig abgedeckt ist. Die Werte für diesen Ausschnitt werden im Programmdialog der Routine *MOD05_PREP* abgefragt (siehe 5.10).

Ableitung von physikalischen Parametern und Aggregation der MOD05_L2-Daten

Das Zusammenfassen der umprojizierten *MOD05_L2* zu physikalischen Parametern für jeweils 10 Tage erfolgt über ein mehrstufiges Verfahren, in dem die einzelnen, täglichen Datensätze geladen werden und der jeweils benötigte Parameter (Wasserdampf oder Wolkenmaske) ausgelesen und mit den übrigen Tagesdatensätzen kombiniert wird. Dieses Verfahren ist schematisch in der Abbildung 5.8 dargestellt. Die beiden Ergebnisdatensätze für die Wolkenmaske und den Wasserdampfgehalt werden jeweils getrennt berechnet. Für die Kompositbildung ist

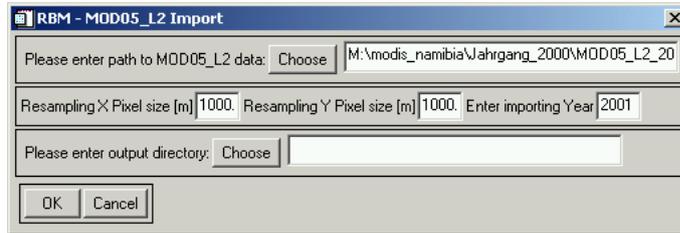


Abbildung 5.10: Programmfenster (GUI) der Routine *MOD05_PREP*. Die GUI dient der Auswahl der zu verarbeitenden MOD05_L2-Datenliste (oberer Teil). Im mittleren Teil läßt sich die zu erzeugende Pixelgröße sowie das zu verarbeitende Modelljahr festlegen. Im unteren Teil der GUI muss ein Ausgabeverzeichnis für die berechneten Daten angegeben werden. (Quelle: eigener Entwurf)

wichtig, daß ungültige Pixel mit 0 gekennzeichnet sind. So wird für die Berechnung des Wasserdampfgehalts über 10 Tage ein Mittelwert aus den täglichen Daten gebildet (vgl. Abb. 5.11, rechts). Dabei fallen jene Pixel, die als ungültig markiert sind, aus der Berechnung heraus.

Ein ähnliches Verfahren findet auch bei der Zusammenfassung der Wolkenmaske statt. Allerdings wird hier noch in einem vorgelagerten Schritt die binäre Wolkenmaske aus dem Byte-Datensatz zur Bewölkung ausgelesen. Dabei bedeutet ein Wert von 0 für das jeweilige Pixel "nicht bewölkt", ein Wert von 1 bedeutet "Wolkenbedeckung". Die Zusammenfassung der täglichen Wolkenmasken erfolgt über die Berechnung eines Mittelwertes über 10 Tage, der als Prozentwert ausgedrückt wird. Dies bedeutet, daß alle gültigen Pixel innerhalb eines Zeitschritts summiert und durch die Anzahl der gültigen Pixel geteilt werden. Der resultierende Kommawert wird zu einem ganzzahligen Prozentwert gerundet und mit einem Wertebereich von 0-100 als Byte-Datensatz abgelegt. Wenn z.B. in einem 10-Tages-Zeitschritt ein Pixel in einem der zehn Datensätze ungültig ist, sechs Pixel als "nicht bewölkt" und drei Pixel als "bewölkt" markiert sind, dann ergibt sich in der finalen Wolkenmaske für dieses Pixel ein Wert von 30^{15} (siehe Abb. 5.11, links). Dabei ist die Interpretation der Ergebnisse bedeutsam. Mit einer Prozentangabe kann somit relativ einfach auf die Wolkenbedeckung innerhalb der Periode von 10 Tagen geschlossen werden. Die so gewonnene Wolkenbedeckung ist eine wichtige Steuergröße für die Abschätzung der einfallenden solaren Strahlung, die

¹⁵Dabei liegt folgende Rechnung zugrunde: 10 Pixel - 1 ungültiges Pixel = 9 gültige Pixel; davon sind 3 Pixel bewölkt, d.h. $3 \div 9 = 0.33\bar{3}$, gerundet $0.3 \cdot 100 = 30$

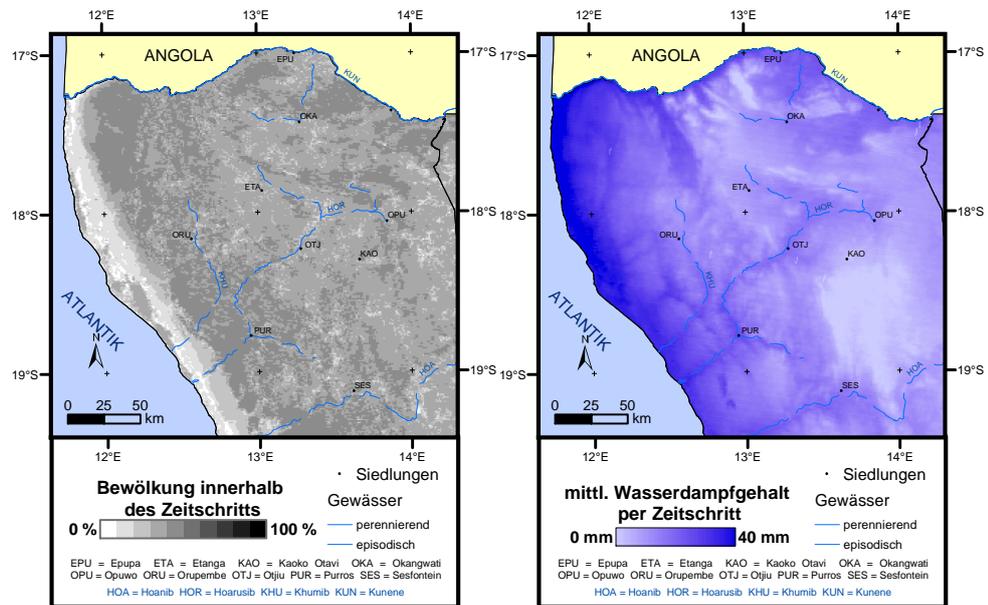


Abbildung 5.11: Bewölkung und Wasserdampf aus *MOD05_L2*-Daten für den Zeitschritt 17/2002. Dargestellt ist links der Datensatz *TSP_CLD_172002.data*, rechts der Datensatz *TSP_WV_172002.data*. Die Bewölkung über einen Zeitschritt wird als Prozentangabe über 10 Tage berechnet; der Wasserdampf wird als Mittelwert über einen Zeitschritt in mm Wassersäule bestimmt. (Quelle: eigener Entwurf)

im Kapitel 4.2.2 beschrieben ist.

5.3 Raum-zeitlich konstante Datensätze für die Biomassenberechnung

Neben den Zeitreihendatensätzen werden in dem Modellkonzept zwei konstante Datensätze genutzt. Dies ist zum einen die von der FAO (1996) herausgegebene "Digital Soil Map of the World" (DSMW) und zum anderen der "Global 30 Arc Second Elevation Dataset" (GTOPO30), der vom USGS-EROS-DATA-CENTER (2004) publiziert wurde. Diese Datensätze sind global verfügbar und stellen sowohl für die Bodeninformation als auch für die Topographie im Kaokoland eine einheitliche Informationsbasis dar.

Diese beiden Datensätze fließen wie in Kapitel 4.4 dargestellt in die Berechnung des biophysikalischen Konversionsfaktors ϵ ein. Prinzipiell ließe sich auch an diesem Punkt eine Variierung der Eingangsgrößen vornehmen, um beispielsweise relief- und bodenverändernde Erosionsprozesse abbilden zu können, doch wurde im Rahmen dieser Arbeit hierauf verzichtet. Dies liegt zum einen in der räumlichen Dimension solcher Bodendegradationsprozesse und Reliefveränderungen begründet, zum anderen in dem mesoskaligen Modellansatz, der nicht beabsichtigt derartig kleinräumige Phänomene zu erfassen. Dies ist weder mit den gegebenen Relief- und Bodendaten möglich, noch erlauben die eingesetzten MODIS-Daten eine räumlich derart fein differenzierte Analyse.

Die "Digital Soil Map of the World" der FAO

Die DSMW wurde 1996 von der FAO als digitale Version der "FAO/UNESCO Soil Map of the World" herausgegeben (FAO, 1996). Die ursprünglich analoge Originalkarte lag dabei im Maßstab 1:5 000 000 vor, wurde für zehn Kartenblätter digitalisiert und deckte weite Teile der Landmasse der Erde ab. Die daraus resultierenden Daten liegen als Vektor- und Rasterdaten für verschiedene Softwareprodukte vor, wie ARC/INFO, ERDAS Imagine oder IDRISI.

Für die einzelnen Bodeneinheiten werden eine Vielzahl von Bodenparametern ausgewiesen, so z.B. pH-Wert, organischer Kohlenstoffgehalt, C/N-Verhältnis, Bodentiefe, Eignung für Ackerbau oder Feldkapazität (FAO, 1996). Angesichts der Ableitung der DSMW aus einem schon generalisierten Kartenwerk können die Ansprüche an den Datensatz nicht allzu hoch sein (AHL et al., 1996). Nichtsdestotrotz sind die Informationen der DSMW immer noch die beste verfügbare Bodeninformation für das Untersuchungsgebiet in Nordwest-Namibia (siehe Abb. 2.7 auf S. 19).

Zur Integration der Daten in das RBM wurden die auf UTM Zone 33S, WGS84 projizierten Vektordaten der einzelnen Bodenparameter in dem Programm ArcView 3.2 in ein 1000m-Raster überführt. Da es sich hierbei um einen konstanten Datensatz handelt, wird dieser unter dem Dateinamen *CDP_SOIL_YYYY.data* abgelegt. *CDP* steht dabei für "Constant Data Product". Eine weitergehende Änderungen in Sinne einer Vorverarbeitung ist bei diesem Datensatz nicht notwendig.

Das globale digital Geländemodell GTOPO30

Der zweite über den gesamten betrachteten Zeitraum von drei Jahren (2001–2003) "konstant" bleibende Datensatz ist die topographische Information. Ihr liegt der GTOPO30-Datensatz zugrunde, ein globales Geländemodell, das mit einer horizontalen Auflösung von 30 Bogensekunden ausgeliefert wird. Dies entspricht einer Rasterweite von etwa 1km (USGS-EROS-DATA-CENTER, 2004) und fügt sich daher passend in die anderen Datensätze des mesoskaligen Modellkonzepts des RBM ein.

Dabei stellt der GTOPO30-Datensatz im Vergleich zu früheren topographischen Modellen eine wesentliche Verbesserung hinsichtlich der Genauigkeit und des Maßstabs dar (ROW, HASTINGS & DUNBAR, 1995). Doch trotz der Erneuerungen ist der GTOPO30-Datensatz lediglich ein zusammengesetztes Produkt aus acht unterschiedlichen Datenquellen (USGS-EROS-DATA-CENTER, 2004). Für Namibia wurden die topographischen Informationen zum größten Teil dem "Digital Terrain Elevation Dataset" entnommen, der zu militärischen Zwecken für weite Teile Europas, Asiens und Afrikas erstellt wurde; Daten für kleinere Randgebiete entstammen den "Digital Charts of the World", die aus digitalisierten Fliegerkarten generiert wurden (DANKO, 1992). GESCH & LARSON (1996) folgend, kann die gute Qualität der Datenbasis für Afrika insgesamt betont werden.

Seit der "Shuttle Radar Topography Mission" (SRTM) im Februar 2000 sollten erheblich verbesserte, konsistente und detailreichere Geländemodelle zur Verfügung stehen. Leider wurde die Prozessierung dieser Daten nicht vor Beginn des Jahres 2004 abgeschlossen, so daß dieser Datensatz nicht berücksichtigt werden konnte, obwohl er ein großes Potential in sich birgt (RAMIREZ, 2004). Auch die Nutzung der Daten des Sensors ASTER, der sich ebenfalls an Bord von TERRA EOS-1 befindet, wäre eine Option gewesen. Doch die aufwendige Generierung und Validierung von Geländemodellen aus diesen Daten erschien angesichts der direkt verfügbaren GTOPO30-Daten, die bereits in einem geeigneten Maßstab vorlagen, zu aufwendig.

Der GTOPO30-Datensatz wird in unterschiedlichen Abschnitten (sog. "Tiles") von jeweils 50° Breite und 40° Länge ausgeliefert. Der größte Teil Namibias und das Untersuchungsgebiet liegen im Tile W020S10. Dieser Datensatz kann per ftp-Download vom USGS bezogen werden¹⁶. Die in geographischer Projektion vorliegenden Daten wurden für die Verwendung im RBM nach UTM Zone 33S auf WGS84 umprojiziert und stehen anschließend als *CDP_DGM_YYYY.data* dem Hauptmodell für die Verarbeitung zur Verfügung. Dabei entspricht die Bildung

¹⁶Die genaue Adresse lautet wie folgt: <ftp://edcftp.cr.usgs.gov/pub/data/gtopo30/global/w020s10.tar.gz>

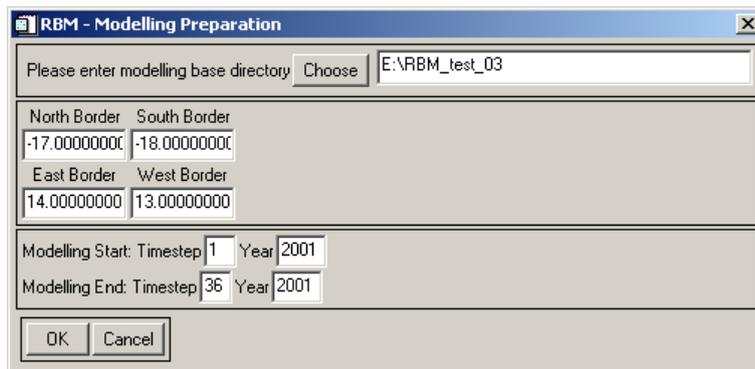


Abbildung 5.12: Graphische Benutzeroberfläche des Routine *RBM_PREP_GUI*, die zur Erstellung des RBM-Projekts gebraucht wird. (Quelle: eigener Entwurf)

des Dateinamens denselben Regeln, die schon im Abschnitt der DSMW erläutert wurden.

5.4 Rechenläufe mit dem Regionalen Biomassemodell

Nachdem die Vorbereitung aller zur Modellierung der Biomasse notwendigen Daten abgeschlossen ist, kann die Verarbeitung im RBM-Hauptmodell (vgl. Abb. 5.1) angestoßen werden. Dazu muß zuerst ein sogenanntes RBM-Projekt mit der Routine *RBM_PREP_GUI* erstellt werden, in dem alle notwendigen Daten mit definierten Dateinamen und in einer vorgegebenen Ordnerstruktur automatisch abgelegt werden. Anschließend können die Daten mit dem Kernmodul des Programms *RBM_Kaokoveld* verrechnet werden. Dieser Prozeß arbeitet ohne Nutzereingabe und liefert neben einer Vielzahl von Zwischenergebnissen sowohl die produzierte Phytomasse für jeden Zeitschritt als auch Angaben zur Gesamtphytomasse z.B. innerhalb eines Jahres.

In diesem Abschnitt wird zunächst die Benutzung und Arbeitsweise der Routine *RBM_PREP_GUI* erläutert, um dann im nachfolgenden Teil die Anwendung und Funktion des Kernmoduls des RBM Kaokoveld darzustellen.

5.4.1 Erstellung eines RBM-Projekts zur Biomassenberechnung

Die Routine *RBM_PREP_GUI* dient der Überprüfung und Vorbereitung der Eingabedaten für den Modellkern. Dabei wird ein RBM-Projekt angelegt, in dem alle Eingangs- und Ergebnisdaten gespeichert werden. Vorteil dieses Verfahrens ist, daß das Kernmodul *RBM_Kaokoveld* ohne Benutzerinteraktion auskommt, da alle eventuellen Einstellungen bereits von der Routine *RBM_PREP_GUI* geklärt werden. Bei der erheblichen Rechenzeit des Kernmoduls¹⁷, gerade bei einem so großen Untersuchungsraum wie dem Kaokoveld und einer Laufzeit des Modells über mehrere Modelljahre, verhindert dieses Verfahren Störungen in der Berechnung durch eventuell fehlende Daten oder plötzlich notwendige Benutzereingriffe.

Da alle notwendigen Eingabedateien und Nutzereinstellungen durch die Routine *RBM_PREP_GUI* vorgenommen werden, ist diese mit einer GUI ausgestattet. Über mehrere Dialogfenster werden die notwendigen Eingangsdateien abgefragt und nachfolgend in die RBM-Projektstruktur implementiert.

Als erstes wird der Pfad abgefragt, an dem das RBM-Projekt in der Dateistruktur des Computers erstellt werden soll. Und es werden sowohl die räumliche Ausdehnung des Untersuchungsraumes als auch der zeitliche Rahmen bestimmt, den das RBM berechnen soll (s. Abb. 5.12). In den beiden nachfolgenden GUI-Dialogen werden zuerst die zeitlich variablen Eingangsdaten abgefragt, die zuvor mit der jeweiligen Vorverarbeitungsroutine aufbereitet werden mußten. Dieser Prozeß ist variabel und wird je nach Anzahl der zu berechnenden Modelljahre wiederholt, bis alle variablen Eingangsdaten erfaßt sind. Dabei werden jeweils nur die Pfade zu den Ordnern abgefragt. Die zu einzelnen 10-Tages-Schritten prozessierten Datensätze sucht die Routine *RBM_PREP_GUI* selbständig. Nachdem die Pfade der variablen Daten erfaßt sind, werden die konstanten Datensätze wie *CDP_DGM_YYYY.data* und *CDP_SOIL_YYYY.data* aufgenommen. Zugleich bietet dieser Dialog die Option, einen Startdatensatz für die Berechnung der Biomassenbilanz festzulegen. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, einzelne Modelljahre zu berechnen und diese Berechnungsergebnisse als Ausgangsbasis für die Modellierung des nachfolgenden Jahres zu nutzen. Dies kann für die Simulation verschiedener Szenarien genutzt werden, z.B. die Simulation völlig ausbleibender oder stark erhöhter Niederschläge.

Nachdem alle Pfade eingegeben sind, beginnt die Hauptarbeit der Routine *RBM_PREP_GUI*. Dabei werden zunächst die notwendigen Ordnerstrukturen an der gewünschten Stelle im Dateiverzeichnis angelegt und überprüft. Dann beginnt

¹⁷Auf einem leistungsstarken Computer (P4 (2,5 GHz), 1024 MB DDR-RAM) benötigt das RBM Kaokoveld zur Berechnung eines Modelljahres etwa 45 Minuten.

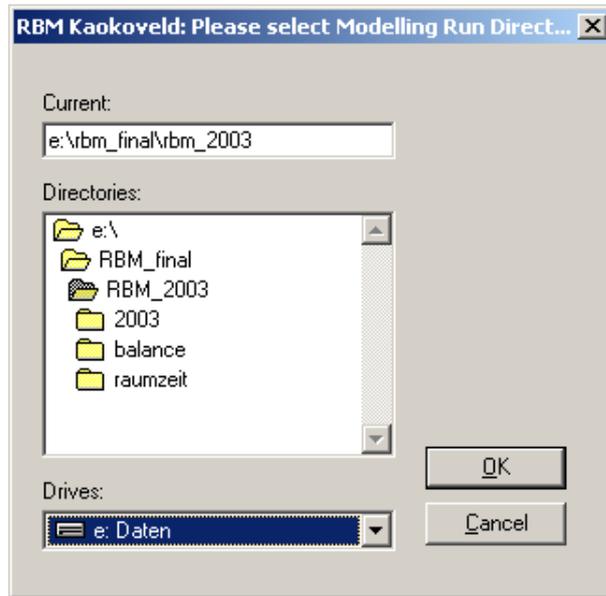


Abbildung 5.13: GUI der Routine *RBM_Kaakoveld*. Mit dem Dialog wird der Pfad zu dem zu berechnenden RBM-Projekt ausgewählt. (Quelle: eigener Entwurf)

die Routine nacheinander, die einzelnen Datendateien zu sortieren, zu überprüfen und den gewünschten Ausschnitt für die Modellierung herauszuschneiden. Die erzeugten Subsets werden der Sortierung folgend in der Ordnerstruktur des RBM-Projekts abgelegt. Über alle Aktivitäten von *RBM_PREP_GUI* führt die Routine ein Protokoll, das als Textdatei in dem RBM-Projekt abgelegt wird (siehe Anhang A.2). Eine Überprüfung des Protokolls durch den Nutzer ist zwingend erforderlich, damit die Routine erfolgreich beendet wird. In der Protokolldatei sind alle bearbeiteten Dateien aufgeführt und so läßt sich leicht prüfen, ob einzelne Dateien nicht gefunden oder korrupt waren. Diese sind als Fehlstellen in der Berechnungskette aufgeführt. Erst wenn die Protokolldatei einwandfrei ist, darf das RBM-Kernmodul ausgeführt werden, da dieses zu Gunsten der Rechengeschwindigkeit nicht fehlertolerant gestaltet ist. Wenn Eingangsdaten fehlen, kommt es zur Instabilität des gesamten Modells.

5.4.2 Anwendung des Kernmoduls zur Berechnung der raumzeitlichen Biomasse

Das Kernmodul des raumzeitlich expliziten Modells zur Erfassung von pflanzlicher Biomasse arbeitet nach der Auswahl und Angabe des RBM-Projekts ohne weitere Benutzereingaben (siehe Abb. 5.13). In diesem Abschnitt soll die Arbeitsweise des Kernmoduls erläutert und die Koppelung der einzelnen Routinen dargelegt werden. Dabei wird aufgezeigt, wie die theoretischen Aspekte der Modellierung, die im Kapitel 4 vorgestellt wurden, in den ENVI/IDL-Quellcode umgesetzt werden. Wichtig für das Verständnis des Programms ist dabei die Abbildung 5.14, in der das Programmschema der Routine *RBM_Kaokoveld* dargestellt ist.

Nach der Übergabe des Dateipfades zu dem RBM-Projekt liest die Routine *RBM_Kaokoveld* zuerst die Optionsdatei ein, um den Zeitraum der Biomasse-simulation zu erfassen. Dann übergibt die Routine das erste Jahr und die zu berechnenden Zeitschritte an *RBM_year*. Dieses Programm dient vor allem der Steuerung der einzelnen Rechenschritte.

Als erstes wird der für das jeweilige Jahr konstante maximale biophysikalische Konversionsfaktor ε_{max} berechnet. Dieser Schritt wird von der Routine *epsilon_max* erledigt, die dazu insgesamt drei Datensätze aus dem RBM-Projekt einliest. Dies ist zum einen das für das jeweilige Modelljahr gültige MODIS-Produkt "Vegetation Continuous Field", das als *YDP_VCF_YYYY.data* vorliegt, und zum anderen die beiden konstanten Datensätze zu den Böden (DSMW, FAO, 1996) und dem Relief (GTOPO30, USGS-EROS-DATA-CENTER, 2004), die als *CDP_SOIL_YYYY.data* und *CDP_DGM_YYYY.data* vorliegen (siehe Kap. 5.3).

Die Routine *e_max_DGM* berechnet aus dem digitalen Höhenmodell zuerst die Hangneigung für jede Rasterzelle und fuzzifiziert anschließend die beiden Parameter mit der Formel 4.18 und 4.19, die im Kapitel 4.4.1 beschrieben worden sind. Die beiden Ergebnisse werden anschließend an *epsilon_max* zurückgegeben, wo sie mit einem "fuzzy_and"-Operator verknüpft werden. Im nächsten Schritt wird der Bodendatensatz an die Routine *e_max_SOIL* übergeben und gemäß der Angaben in Kapitel 4.4.1 verarbeitet. Dazu wird aus dem Datensatz die Bodenart des Oberbodens genauso ausgelesen wie das C/N-Verhältnis des Bodens. Zur Beurteilung der Textur werden die Ton-, Schluff- und Sandanteile des Bodens nach der Tabelle 4.3 beurteilt und ihnen ein Fuzzywert zugeordnet. Die Werte des C/N-Verhältnisses werden nach der Gleichung 4.20 fuzzifiziert. Die beiden fuzzifizierten Parameter Textur und C/N-Verhältnis werden dann von einem "fuzzy_or"-Operator verschnitten und das Ergebnis an die übergeordnete Routine zurückgegeben. Die Routine *epsilon_max* liest nun den *YDP_VCF_YYYY-*

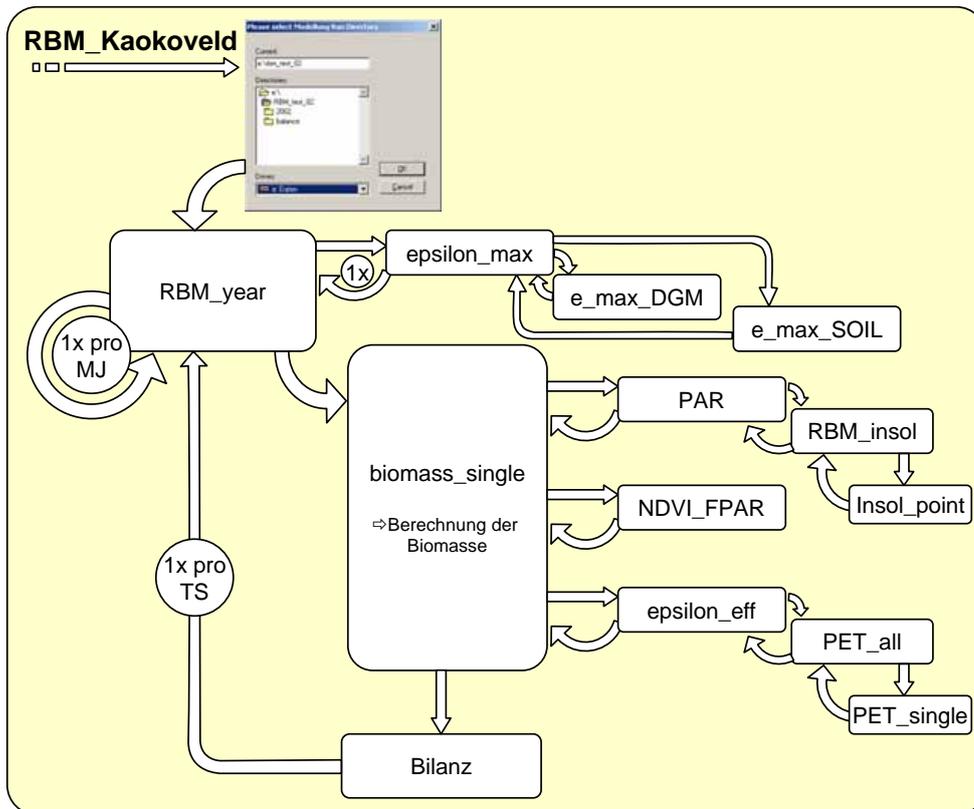


Abbildung 5.14: Programmschema der RBM-Kernroutine *RBM_Kaakoveld*. Während die übergeordnete Routine *RBM_year* nur einmal pro Modelljahr (MJ) ausgeführt wird, werden die Routine *biomass_single* und die nachgeordneten Routinen für jeden Zeitschritt (TS) berechnet. (Quelle: eigener Entwurf)

Datensatz ein. Zusammen mit den vorgegebenen empirischen Faktoren zur Erfassung der pflanzlichen Biomasse der drei Vegetationsanteile (vgl. Tabelle 4.2), deren Anteile aus dem "Vegetation Continuous Field"-Datensatz ausgelesen werden, wird die maximale LUE für jede Rasterzelle bestimmt. Diese LUE-Werte werden anschließend mit den beiden fuzzifizierten Einflußfaktoren Relief und Boden verschnitten. Der erzeugte Datensatz gibt den maximalen biophysikalischen Konversionsfaktor ε_{max} wieder und trägt die Bezeichnung *YSP_BCF_YYYY.data*. Dieser Datensatz wird als 32bit-float-Rasterdatensatz gespeichert.

Nach der Berechnung des für das jeweilige Modelljahr konstanten Parameters

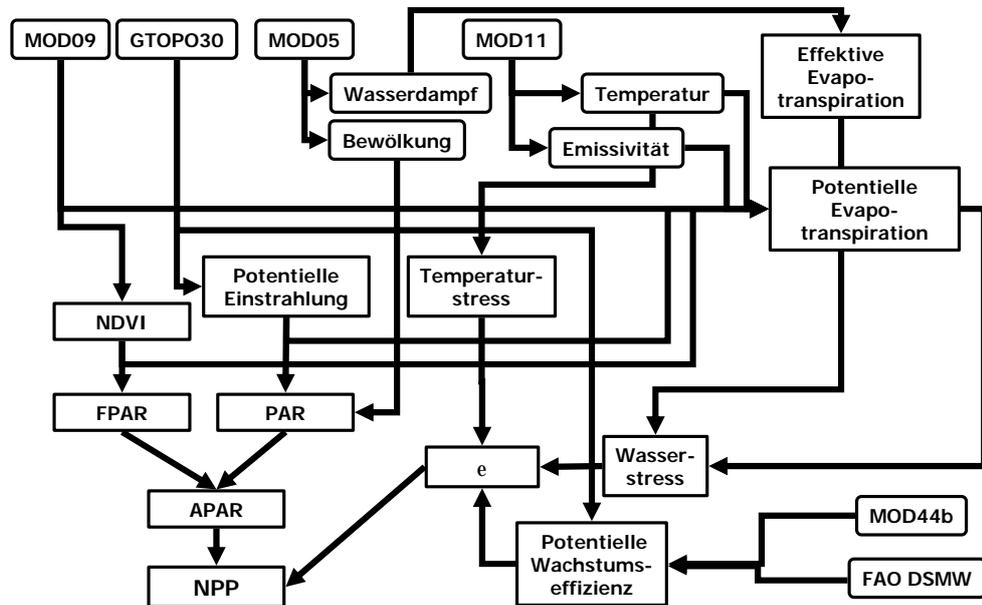


Abbildung 5.15: Flußdiagramm der Verarbeitung innerhalb der Routine *RBM_Kaokoland*. Ausgehend von vier variablen MODIS- und zwei konstanten Datensätzen werden verschiedene Zwischenprodukte und als Endergebnis die pflanzliche Produktion berechnet. (Quelle: eigener Entwurf)

übergibt *RBM_year* nun die Regie an die Routine *biomass_single*, die für die Ermittlung der pflanzlichen Produktion innerhalb eines Zeitschritts zuständig ist. Zuerst erstellt *biomass_single* alle notwendigen Dateipfade, um auf das RBM-Projekt Zugriff zu erhalten.

Der erste Faktor zur Berechnung der pflanzlichen Biomasse ist die von der solaren Einstrahlung abgeleitete PAR. Diese wird, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, in der Routine *PAR* mit Hilfe eines Beleuchtungs- und Strahlungsmodells von SWIFT (1976) und SWIFT & KNOERR (1973) erfaßt. Dazu übergibt *biomass_single* an die nachgeordnete Routine *PAR* die Pfadangaben zu dem GTOPO30-Reliefdatensatz und den Bewölkungsdaten aus dem *MOD05*-Datensatz sowie die Daten des Zeitraums, den dieser Zeitschritt umfaßt. Die Routine *PAR* übergibt den Reliefpfad und die Datumsangabe an *RBM_insol*. Diese lädt zuerst das DGM und berechnet die Exposition und Hangneigung für jede Rasterzelle. Dann wird für jeden Tag innerhalb des Zeitschrittes und für jede Rasterzelle durch die Rou-

tine *insol.point* die potentielle solare Einstrahlung bestimmt¹⁸. Nachdem die Berechnung zu der Routine *PAR* zurückgekehrt ist, wird die Bewölkungsdatei *TSP_CLD_XXYYYY.data* geladen und für jede Rasterzelle unter Einbeziehung des Anteils der photosynthetisch nutzbaren Strahlung (48%) und der potentiellen Einstrahlung für diesen Zeitraum die Abschätzung der PAR berechnet (siehe dazu Abschnitt 4.2.2). Das Ergebnis der Berechnung wird als *TSP_PAR_XXYYYY.data* in dem RBM-Projekt gespeichert.

In einem zweiten Schritt wird der Pfad für den jeweiligen Zeitschrittdatensatz *TSP_MOD09_XXYYYY.data* an die Routine *NDVI.FPAR* übergeben. Diese liest die *MOD09*-Daten ein, kalibriert diese mit den von USGS vorgegebenen Koeffizienten¹⁹ zu Reflektanzen (USGS-NASA-DAAC, 2004b) und berechnet danach den NDVI. Um den Anteil der absorbierten photosynthetisch aktiven Strahlung zu erhalten, kann jedoch nach SEAQUIST, OLSSON & ARDÖ (2003) der NDVI nicht direkt verwendet werden, sondern muß, wie im Abschnitt 4.3 erläutert, noch mit der Gleichung 4.13 transformiert werden. Diese Berechnung wird anschließend von *NDVI.FPAR* durchgeführt; die beiden Ergebnisse, der NDVI-Datensatz und die FPAR, werden als *TSP_NDVI_XXYYYY.data* und *TSP_FPAR_XXYYYY.data* gespeichert.

Nach der Gleichung 4.4 ist neben den Faktoren PAR und FPAR noch die Lichtverwertungseffizienz ε_{eff} notwendig, um die pflanzliche Produktivität abzuschätzen. Die in dem jeweiligen Zeitschritt effektiv wirkende LUE wird nach der Gleichung 4.15 aus der maximalen LUE und zwei klimatischen Einflußfaktoren von der Routine *epsilon_eff* berechnet. Dieser werden von der übergeordneten Routine *biomass_single* die Pfadangaben zu jeweils folgenden Datensätzen übergeben: Temperatur, Emissivität, Wasserdampf, PAR, NDVI und *MOD09*. Zusätzlich wird der von *epsilon_max* berechnete *YSP_BCF_YYYY.data*-Datensatz mit der maximalen LUE übergeben. Die Routine *epsilon_eff* beginnt mit der Berechnung des Einflusses der Temperatur, lädt dazu den Datensatz *TSP_TEMP_XXYYYY.data* und transformiert die darin gespeicherten Werte für jede Rasterzelle nach der Gleichung 4.21 in einen Skalar für Temperaturstreß. Da in dem zweiten Skalar für den Wasserstreß nach der Gleichung 4.22 die potentielle wie die aktuelle Verdunstung einfließen, muß zunächst die potentielle Verdunstung nach dem in Abschnitt 4.4.3 beschriebenen Ansatz abgeschätzt werden. Dies wird von der Routine *PET_all* geleistet, die dazu die benötigten Eingangsdaten für Temperatur, Einstrahlung²⁰, Emissivität, Albedo und NDVI einlädt und diese für jede

¹⁸Eine genaue Beschreibung findet sich in Kapitel 4.2.1.

¹⁹Die *MOD09*-Daten werden dazu mit 0.0001 multipliziert.

²⁰Diese Größe wurde bereits von *RBM_insol* berechnet.

Rasterzelle der Routine *PET_single* zuführt. *PET_single* berechnet nach den Gleichungen 4.24, 4.25, 4.26 und 4.27 die resultierende potentielle Evapotranspiration und gibt das Ergebnis an *PET_all* zurück. Dort wird die berechnete PET als *TSP_PET_XXYYYY.data* gespeichert und das Programm kehrt zu der Routine *epsilon_eff* zurück. Die aktuelle Verdunstung wird aus dem *TSP_WV_XXYYYY.data*-Produkt geladen und mit der PET nach der Gleichung 4.22 zum Skalar des Wasserstresses verrechnet. Der letzte Schritt zur Ermittlung der ε_{eff} erfolgt durch die Kombination der maximalen LUE ε_{max} mit den beiden klimatischen Strebfaktoren, die von der Routine *epsilon_eff* nach der Gleichung 4.15 verrechnet werden. Der resultierende Datensatz wird unter der Bezeichnung *TSP_BCF_e_XXYYYY.data* gespeichert.

Nach der Ermittlung aller drei Größen für die Abschätzung der pflanzlichen Produktion berechnet die Routine *biomass_single* die NPP für jede Rasterzelle. In einem dritten Schritt wird die produzierte Phytomasse gemäß den Anteilen der Gras-, Strauch- und Baumschicht in die jeweilige Teilproduktion zerlegt. Nach Beendigung der Berechnung von *biomass_single* wird dieser Prozeß in einer Schleife so lange wiederholt, bis alle Zeitschritte berechnet sind.

Nach der Berechnung aller Zeitschritte für ein Jahr (i.d.Regel 36) wird die Routine *RBM_year* erneut solange aufgerufen, bis alle Modelljahre berechnet sind. Danach kommt die Modellierung zum Abschluß.

6 Ergebnisse aus dem RBM Kaokoveld

Das regionale Biomassemodell (RBM) Kaokoveld dient der quantitativen Erfassung der oberirdischen Biomasse aus Fernerkundungsdaten. Dazu werden in einem Modellkonzept (vgl. Kap. 4) unterschiedliche MODIS-Datensätze miteinander nach dem Konzept von MONTEITH (1972) verknüpft und mit empirischen Faktoren zur Lichtverwertungseffizienz verrechnet. Die komplexe Modellierung berücksichtigt topographische, pedologische, klimatische Bedingungen sowie vor allem die Einstrahlungsbedingungen. Der Modelloutput ist die produzierte oberirdische pflanzliche Biomasse für jeden Zeitschritt, festgelegt auf jeweils einen dekadischen Zeitraum. Zugleich berechnet *RBM_Kaokoveld* auch die gesamte produzierte Biomasse für variable Zeiträume, z.B. ein Jahr. Nachdem in den beiden vorangegangenen Kapiteln das Modellkonzept und dessen programmtechnische Umsetzung in ENVI/IDL, sowie die für die Berechnung notwendigen Daten vorgestellt wurden, sollen nun die Ergebnisse des Biomassemodells "RBM Kaokoveld" vorgestellt werden.

6.1 Berechnung von Biomasse und deren raumzeitliche Entwicklung

Die berechneten Ergebnisse der Biomassemodellierung werden nachfolgend primär in thematischen Karten dargestellt, da dadurch räumliche Veränderungen innerhalb des Arbeitsgebietes besonders prägnant zum Ausdruck kommen. Aufgrund der großen Anzahl von Modellergebnissen lassen sich nicht alle Resultate in Form von Karten in dieser Arbeit unterbringen. Jedoch befinden sich alle Eingangsdaten, alle Zwischenergebnisse und Endberechnungen auf der dieser Arbeit beigelegten CD (siehe Anhang A.4).

Im Folgenden werden deshalb lediglich die Gesamtbiomassekarten für die drei Modelljahre 2001, 2002 und 2003 vorgestellt (vgl. Abb. 6.1, 6.2 und 6.3). Dabei

gilt eine einheitliche Skalierung der Farbwiedergabe für alle drei Karten, so daß unterschiedliche Farbnuancen auch reale Unterschiede der Ergebnisse darstellen und nicht etwa durch einen linearen Stretch¹ der Daten verfälscht sind. Die Farben sind so gewählt, daß sehr niedrige Biomassewerte in Beige- und Gelbtönen dargestellt sind, mittlere bis höhere Biomassenwerte von hellgrün nach dunkelgrün ansteigen und Spitzenwerte in Rottönen abgebildet werden. Um einen Eindruck von der unterschiedlichen raumzeitlichen Entwicklung der Biomasse zu gewinnen, sind in den Abbildungen 6.4, 6.5 und 6.6 die Einzelergebnisse der Zeitschritte für das Jahr 2002 dargestellt.

Die **Biomassekarte des Jahres 2001** (vgl. Abb. 6.1) bildet die Verteilung der produzierten pflanzlichen Biomasse im Kaokoveld ab. Dabei ergibt sich ein deutliches Produktionsgefälle von Nordosten in Richtung Südwesten, im wesentlichen dem Verlauf der Niederschläge folgend. Während inhärent im Bereich der Skelettküste in der nördlichen Namib keine Produktion stattfindet, steigt die jährlich produzierte Biomasse nach Osten hin an und erreicht in den relativ niederschlagsreichen Zebrabergen ein Maximum mit 4,981 t/ha. Die mittlere Produktion im Jahr 2001 liegt bei 1,289 t/ha.

Die weiten Becken- und Tallandschaften des Großen Escarpments treten mit einer Produktion von etwa 1,5 bis 2,5 t/ha auf, wobei besonders die wenig beweideten Bergländer mit einem relativ dichten Baum- und Buschbesatz und einer darunterliegenden Grasschicht für eine vergleichsweise hohe Produktion sorgen. Die Maximalwerte der Produktion liegen bei etwa 3,2 - 3,9 t/ha. Weiter westlich im Bereich der Berg- und Flachländer der Küstenabdachung, nimmt die Produktivität deutlich ab. Dies ist vor allem auf die annualen Gräser zurückzuführen, die diese Landschaften prägen: Ein deutlicher Wachstumsschub nach dem Ende der Regenzeit und dann trocknen die Gräser schnell aus und tragen nicht weiter zur Produktion bei. Deshalb wird in diesem Bereich auch nur eine Produktion von 0,3 bis 1,0 t/ha erreicht. Die Gesamtproduktion des Jahres 2001 ist mit 10.290.800 t pflanzlicher Biomasse die höchste der drei betrachteten Modelljahre.

Im Jahr 2001 erhielt das Kaokoveld im Vergleich zu den beiden nachfolgenden Jahren relativ ergiebige Niederschläge (FEWS-NET, 2003). Dieses zusätzliche Wasserangebot ist auch in der pflanzlichen Produktivität im Vergleich zu den Jahren 2002 (Abb. 6.2) und 2003 (Abb. 6.3) deutlich zu erkennen.

In Tabelle 6.1 werden die Unterschiede der drei Jahre bereits anhand der Mittelwerte der jährlichen Produktion deutlich. Diese liegen für das Jahr 2001 um

¹Die meisten Bildverarbeitungssysteme wie ENVI/IDL oder ERDAS Imagine wenden standardmäßig einen 2%-Stretch auf dargestellte Bilddaten an.

Tabelle 6.1: Vergleich der statistischen Kennwerte der jährlichen Biomassenproduktion in 2001, 2002 und 2003.

Jahr	Minimum [t/ha]	Maximum [t/ha]	Mittelwert [t/ha]	STDEV [t/ha]	Total [t]
2001	0	4,981	1,289	0,886	10.290.800
2002	0	4,132	1,194	0,813	9.533.970
2003	0	4,445	1,188	0,890	9.488.640

etwa 0,11 t/ha höher als in den beiden nachfolgenden Jahren, wobei das Jahr 2003 die geringste Produktion zu verzeichnen hat. Die Minimalwerte betragen modellbedingt Null, da in diesen Rasterzellen in dem entsprechenden Jahr keine Produktion zu verzeichnen war. Alle statistischen Parameter sind nur für die Landoberfläche des Untersuchungsgebietes berechnet, die Meeresoberfläche des Südatlantik wurde dazu jeweils ausmaskiert.

Die **Karte** der produzierten **Gesamtbiomasse für das Jahr 2002** zeigt ein ähnliches Bild (Abb. 6.2) wie das Jahr 2001. Lediglich die Mittel- und Maximalwerte fallen niedriger aus, wie aus Tabelle 6.1 ersichtlich ist. Als Folge der veränderten Niederschlagsabläufe weist auch die räumliche Verteilung der Biomasse andere Muster auf als in der Karte für das Jahr 2001. Dies wird besonders deutlich im Bereich südlich und nördlich von Orupembe, am Ostsäum der Namib, wo im Jahr 2002 westlich des Khumib und zwischen den Rivieren Khumib und Hoarusib deutlich mehr Biomasse gebildet wurde als im Jahr zuvor (etwa +0,208 t/ha). Im Gegensatz war 2002 die Produktion entlang der Höhenzüge und im zentralen Bereich des Kaokoveldes nicht so stark ausgeprägt. Insgesamt führte dies zu einer niedrigeren Produktion. Für den zentralen Bereich des Untersuchungsgebietes liegt die mittlere Produktionsleistung etwa 0,261 t/h unter der von 2001.

Betrachtet man die **Biomassekarte des Jahres 2003**, so offenbaren sich im Vergleich mit 2002 erhebliche Unterschiede. Während nach Tabelle 6.1 die maximale Produktion höher liegt als im Jahr 2002, deuten der geringere Mittelwert und besonders die größte Standardabweichung der drei Jahre eine Veränderung zu den beiden vorhergehenden Jahren an. Dies spiegelt sich auch in den räumlichen Mustern wider (vgl. Abb. 6.3), die eine deutliche Konzentration der Produktion im östlichen Kaokoland belegen. Die östlichen Bergländer treten mit hohen Biomassewerten von 3,5 - 4,5 t/ha hervor und auch in den östlichen Tal- und

Beckenbereichen zeigen die dunkelgrünen Farbtöne der Karte 6.3 eine Produktionsleistung von über 2,0 t/ha an. Dagegen fällt der westliche Teil des Kaokoveldes im Vergleich zu 2002 deutlich ab. Während sich für 2002 noch eine erhebliche Produktion westlich des Khumib festhalten läßt, reichte im Jahr 2003 die Entwicklung von Biomasse kaum über das Große Escarpment hinaus. Im diesem Jahr zeigt sich somit eine deutliche Zweiteilung des Untersuchungsgebiets in einen biomassereichen östlichen Teil und einen biomasseärmeren westlichen Bereich, der kaum zur Gesamtproduktion beiträgt. Diese Gesamtproduktion allerdings liegt trotz der einseitigen Entwicklung im östlichen Kaokoland mit 9.488.640 t pflanzliche Biomasse nur um 0,004 % niedriger als die Gesamtproduktion im Jahr 2002. Ungeklärt ist bislang, ob und wenn ja welche Konsequenzen eine solch einseitige Biomassenentwicklung für die pastoralnomadische Nutzung durch Himba und Herero hat.

Der raumzeitliche Verlauf pflanzlicher Produktion wird exemplarisch anhand der Biomasseentwicklung des Jahres 2002 dargestellt. In den Abbildungen 6.4, 6.5 und 6.6 sind deshalb pro Bildtafel für je 12 Zeitschritte die resultierende dekadische pflanzliche Biomasse dargestellt. Dabei wird die Produktion über jeweils 10 Tage anhand einer gleichbleibend skalierten Farbtabelle abgebildet. Deutlich zu beobachten ist ein starker Anstieg der Produktion zwischen dem Zeitschritt 09/2002 und 13/2002 (April 2002). Dieser deutet sich zwar schon im Zeitschritt 11/2002 und 12/2002 an, wird jedoch erst in 13/2002 verstärkt. Durch die im März verstärkt einsetzenden Niederschläge im Jahr 2002 begann die phänologische Hauptphase erst mit diesem Zeitpunkt. Einige vereinzelte Niederschläge Ende Januar führten bereits im Februar zu einer geringen Produktion, wie im Zeitschritt 04/2002 und 05/2002 zu erkennen ist. Die Regenzeit hielt im Kaokoveld im Jahr 2002 bis zur zweiten Maiwoche an. Ab diesem Zeitpunkt (13/2002 - 14/2002) setzte Austrocknung ein, zunächst nur die Wüstenrandgebiete der Namib betreffend. Ab Juni des Jahres, etwa zum Zeitpunkt der Zeitschritte 17/2002 - 18/2002, erfaßte die Austrocknung große Teile des Untersuchungsgebietes. Lediglich die gehölzreichen Anhöhen konnten Feuchtigkeit bewahren und weiter zur Produktion beitragen. Die Becken- und Tallandschaften der großen Randstufe dagegen waren weitgehend trocken und unterlagen zudem bereits intensiver Beweidung. Weitere Produktion hat zwar stattgefunden, diese wurde jedoch durch die Beweidung direkt wieder verbraucht, so daß die Bilanz \pm null beträgt. In den Zeitschritten 28/2002 bis 34/2002 (Oktober - Dezember 2002) war die Trockenzeit voll ausgeprägt und es fand so gut wie keine Produktion statt. Gegen Mitte bis Ende Dezember setzten dann schon wieder die ersten Niederschläge der kommen-

den Regenzeit ein, was sich in den letzten beiden Karten 35/2002 und 36/2002 durch einen sanften Anstieg der Produktion bemerkbar machte.

Koppelt man diese räumlichen und zeitlichen Information über die Produktion von pflanzlicher Biomasse mit einem Beweidungsmodell, das die möglichen Bewegungen des Weideviehs darstellt, könnten Belege für den Verbrauch von Biomasse als Futter und damit für die These gefunden werden, daß Talungen als erstes abgeweidet werden und sie deshalb auch der potentiell stärksten Gefahr von Degradation ausgesetzt sind. Die großen Talstrukturen im Kaokoveld, wie z.B. das Tal des Hoarusib, sind Leitlinien für den Abfluß, verfügen damit über eine bessere Wasserversorgung, und dennoch weisen sie nur eine verhältnismäßig geringe pflanzliche Produktion auf. Und dies liegt nicht zuletzt an der bereits fortgeschrittenen Degradation der Savannen, die z.B. im Hoarusib-Tal nur noch eine äußerst geringe Bedeckungen mit Gräsern und Büschen aufweisen. Diese Befunde können aus eigener Anschauung bestätigt werden.

Die Darstellung der Ergebnisse liefert zwar eine Reihe interessanter Erkenntnisse, die sich gut in das allgemeine Bild des Untersuchungsraumes einfügen lassen, doch darf dabei die Darstellung der Eingangsgrößen nicht vernachlässigt werden. Exemplarisch sind deshalb in der Abbildung 6.7 die drei zentralen Faktoren PAR , $FPAR$ und ε_{eff} , die das Biomasseprodukt generieren, zusammen mit der produzierten Biomasse für den Zeitschritt 11/2003 dargestellt. Dabei ist zu beachten, daß die produzierte Biomasse im Modell intern in der Einheit g/m^2 berechnet wird, die Ausgabe und Speicherung der Daten jedoch in der Einheit t/ha erfolgt, da diese in der Literatur gebräuchlicher ist.

Bei der Betrachtung der drei Eingangsgrößen fallen zunächst die bildlichen Unterschiede auf. Während die $FPAR$ wegen der nicht vorhandenen Vegetation und einem daraus resultierenden, sehr geringen NDVI in der nördlichen Namib gegen Null strebt, erreicht die effektive PAR recht hohe Werte von über $70 MJ/m^2$ aufgrund der starken Einstrahlung. Im Mittel werden im zentralen Kaokoland in diesem Zeitschritt etwa $57 MJ/m^2$ eingestrahlt. Lediglich direkt an der Küste läßt die PAR aufgrund der häufigen Nebelbänke deutlich nach. Allerdings befindet sich dort auch keine Vegetation, die diese Strahlung nutzen könnte. Die effektive LUE bildet, besonders in Abhängigkeit von der Vegetation, Spitzenwerte von $0,316 g DM/MJ$ für die gras- und gehölzreichen Höhenzüge im östlichen Kaokoland. In der Randnamib werden dagegen Werte von lediglich $0,09$ bis $0,12 g DM/MJ$ erreicht. Schon Mitte April zeigt sich bei der Betrachtung der pflanzlichen Produktion jene deutliche Zweiteilung des Arbeitsgebiets, die bereits bei Abbildung 6.3 angesprochen wurde.

Eine weitergehende Darstellung der Modellergebnisse ist auf dem beiliegenden Datenträger verfügbar. Hier ist z.B. die raumzeitliche Entwicklung der pflanzlichen Biomasse für alle drei untersuchten Jahre als Animation abrufbar.

Da auf die Ergebnisse und ihre Bedeutung für den Untersuchungsraum in Kapitel 7 noch ausführlich eingegangen wird, soll in den folgenden Abschnitten zunächst eine Überprüfung der Modellergebnisse stattfinden.

6.2 Evaluation der Modellergebnisse

Die Evaluation der Modellergebnisse dient in erster Linie einer Überprüfung der Rechenergebnisse und damit einer Stärkung des entwickelten Modells. Darüber hinaus sollen Unterschiede zu konkurrierenden Modellkonzepten aufgezeigt und sowohl Stärken als auch eventuelle Schwächen des gewählten Ansatzes verdeutlicht werden.

Eine absolute Überprüfung der errechneten Daten ist für den Untersuchungsraum sehr schwierig. Dies liegt einerseits an der relativen Unzugänglichkeit des Gebietes mit einer starken Heterogenität von Relief, Substrat und Vegetation. Und andererseits erschwert die räumliche Skala des Modellansatzes von 1x1 km² durch ihre damit generalisierenden Eigenschaften den direkten Vergleich mit Felddaten (JENKINS et al., 1999). Ein entsprechender Versuch wird dennoch im Abschnitt 6.3.2 unternommen.

Zuvor jedoch sollen die Modellergebnisse des RBM Kaokoveld mit den Ergebnissen anderer Modelle verglichen werden (Abschnitt 6.2.1). Danach werden zum einen das allgemeine MODIS Datenprodukt *MOD17A* und zum anderen die Ergebnisse des C-FIX-Modells als Vergleichsbasis zum Test der RBM-Daten herangezogen (Abschnitt 6.2.2 und 6.2.3).

6.2.1 Genereller Vergleich mit Ergebnissen anderer Modelle

Die Biomassenproduktion im globalen Maßstab schwankt in erheblichem Maße. Dabei sind die tropisch ariden, extrem vom Niederschlag bestimmten Räume eine Grenzregion des Pflanzenwachstums (BOND, MIDGLEY & WOODWARD, 2003). Generell liegt die pflanzliche Trockenmasseproduktion in Gebieten unter 200 mm Jahresniederschlag zwischen 0,5 und 2,0 t/ha (ALBERDA, 1977). Steigt der Jahresniederschlag an, ergeben sich nach RODIN, BAZILEVICH & ROZOV (1975) im Mittel 4 t/ha für die subtropisch und tropisch-ariden Gebiete und bis zu 10,0 t/ha für tropisch-semiaride Räume. Eine ähnliche Größenordnung der Jahrespro-

duktion von bis zu 9 t/ha führt LARCHER (1984) für Savannen an. Allerdings gibt der Autor für Strauchwüsten nur noch eine Jahresproduktion von 0,9 t/ha an. Das Kaokoveld ist im Zwischenbereich einzuordnen. RUNNING (1990) gibt für Grasländer und trockene Savannen eine NPP von etwa 600 - 900 g/m² an.

Die meisten globalen Datensätze zur Biomasseproduktion von Ökosystemen sind zu grob aufgelöst, um in einem regionalen Modellansatz als Validierung zu dienen (CRAMER et al., 1999). Jedoch können diese verwendet werden, um Anhaltspunkte für die Plausibilität des Modellkonzepts und seiner Ergebnisse zu liefern. So gibt (POTTER et al., 1993) bezogen auf den CASA-Ansatz für die Biomasseklasse "Perennial grasslands" eine mittlere jährliche NPP von 4,69 t/ha mit einer Standardabweichung von 2,24 t/ha an. Die Produktivität der nachfolgenden Klasse "Broadleaf shrubs with bare soil" wird dabei von den Autoren mit 1,15 t/ha und einer Standardabweichung von 1,68 t/ha berechnet. Nach der Definition der Klassengrenzen müßte das Kaokoveld im Übergangsbereich der beiden genannten Klassen zu finden sein.

In einem am PIK durchgeführten, groß angelegten Vergleich von 17 Modellen zur Berechnung der globalen NPP, wurde für das südwestliche Afrika eine über alle verglichenen Modelle gemittelte NPP von 200-400 g C/m² erreicht (CRAMER et al., 1999; RUIFY et al., 1999). Bei einem durchschnittlichen Anteil an Mineralstoffen von 10% (LARCHER, 1984) ergeben sich somit Werte für die pflanzliche Trockenmasse, die den Ergebnissen des RBM Kaokoveld gleichen.

Im westafrikanischen Sahel sind die Determinanten des Pflanzenwachstums mit jenen vergleichbar, die im Kaokoveld gelten. Für diesen Raum konnten SEAQUIST, OLSSON & ARDÖ (2003) mit einem ähnlichen wie dem hier vorgestellten Modellansatz für das Jahr 1992 vergleichbare Größen für die Produktivität der semiariden Grasländer ermitteln. Dabei konnten die Autoren ihre Ergebnisse in guten Einklang mit Vergleichsmessungen anderer Modelle bringen.

In einer Untersuchung zur Vorhersage der Weidequalität im semiariden Südwesten Botswanas haben MOLEELE et al. (2001) die Produktivität unterschiedlicher Grasareale terrestrisch gemessen und im Mittel eine jährliche Produktion von 1,63 t/ha erfaßt. Somit liegt auch dieser Befund im Bereich der vom Modell berechneten Werte.

Biomasse und Futterwert der Savanne um Epupa im nördlichen Kaokoland wurden in einer detaillierten Untersuchung von CASIMIR & BOLLIG (2002) bestimmt. Dabei ergab sich aus LANDSAT-TM-Auswertungen, die mit detaillierten Felddaten korreliert wurden, für die Region eine mittlere Trockenmasse von 0,86 t/ha im Jahr 1995. Aus der berechneten Biomasse nach dem RBM Kaokoveld konnte für

denselben Raum für den Zeitraum der drei untersuchten Jahre eine mittlere Produktivität der Grasschicht von 0,95 t/ha festgestellt werden. Damit übertrifft das RBM-Ergebnis die Messung von CASIMIR & BOLLIG (2002) um etwa 10%. Diese Schwankung resultiert aus den unterschiedlichen Niederschlagsbedingungen. Mitte der 90er Jahre bremste eine generelle Trockenheit die Vegetationsentwicklung im Kaokoland (BECKER, 2000).

Nach diesen bislang vorgestellten relativen Vergleichen und der Zusammenschau genereller globaler Modelle soll im folgenden Abschnitt ein direkter Vergleich mit "konkurrierenden" Daten folgen.

6.2.2 Vergleich mit dem MODIS MOD17 Produkt

Ein neuer Aspekt in der Umweltforschung mit Fernerkundungsdaten ist das beim Sensorsystem TERRA-MODIS erstmals angewendete Verfahren, nicht nur Satellitenrohdaten an die Nutzergemeinschaft auszuliefern, sondern bereits vorprozessierte und evaluierte Datenprodukte auszugeben (CONBOY, 1999). Diese Vorteile macht sich die hier vorgestellte Arbeit durch die Verwendung von MODIS Level-2 Daten zunutze, indem Datenprodukte wie *MOD09* "Surface Reflectance", *MOD11* "Surface Temperature and Emissivity" oder *MOD05* "Water vapor" verarbeitet werden. Neben diesen Level-2-Produkten werden von der "Land Application Group" auch weiter veredelte Level-3- und Level-4-Produkte angeboten. Das MODIS-Produkt *MOD17A3* "Net Photosynthesis and Primary Productivity" ist ein derartiges Level-4-Produkt, das als jährliches Produkt erhältlich ist (*MOD17A3*) (RUNNING et al., 1999). Dieses Datenprodukt beinhaltet unter anderem einen Rasterdatensatz der NPP für den gewählten Zeitraum mit einer Auflösung von 1x1 km². Der *MOD17*-Datensatz wird zwar auch vergleichbar zu dem in dieser Arbeit vorgestellten Ansatz aus MODIS-Daten abgeleitet, jedoch wählten RUNNING et al. (1999) ein globales Konzept zur Ableitung der NPP.

In der Abbildung 6.8 ist das *MOD17A3*-Produkt für das Jahr 2002 im Bereich des namibianischen Untersuchungsgebiets dargestellt. Während die *MOD17A3*-Daten als jährliche NPP in der Einheit kg C/m² abgelegt sind, wurden die Daten zur vergleichbaren Darstellung in die Größen des RBM mit Hilfe der Gleichung 6.1 in t DM/ha umgerechnet. Dabei wird nach LARCHER (1984) der Faktor 1.1 für die Umrechnung von g C in g DM verwendet. Da Pflanzen außer Kohlenstoffverbindungen noch Mineralstoffe enthalten, muß diese als Aschengewicht bezeichnete Menge vom Trockengewicht abgezogen werden, um die NPP in kg C/m² anzugeben. Dieses Aschengewicht macht etwa 10% des Trockengewichts aus (LARCHER, 1984). Um also von der NPP in kg C/m² auf kg TM/m² zu gelangen, muß mit

Tabelle 6.2: Die statistischen Kennwerte des MODIS *MOD17A3*-Datensatzes für das Jahr 2002

	Minimum [t/ha]	Maximum [t/ha]	Mittelwert [t/ha]	STDEV [t/ha]	Total [t]
MOD17A3 (2002)	- 3,597	6,029	0,530	0,674	3.958.360
RBM Kaokoveld (2002)	0	4,132	1,194	0,813	9.533.970

1,1 multipliziert werden. Damit das Resultat in t/ha ausgegeben werden kann, muß noch einmal der Faktor 10 berücksichtigt werden:

$$tDM/ha = kgC/m^2 \cdot 1,1 \cdot 10^1 \quad (6.1)$$

Bei der Betrachtung von Abbildung 6.8 fallen zunächst sehr reguläre Muster auf, die sich Quadraten zuordnen lassen. Dies sind Artefakte, die aus der Prozesierung der Daten resultieren. Bei der Berechnung der Biomasse werden unter anderem parametrisierte Klimadaten benutzt, die in einer räumlichen Auflösung von $1^\circ \times 1^\circ$ vorliegen (RUNNING et al., 1999). Es ist anzunehmen, daß durch eine ungenaue Anpassung von Grenzwerten diese Zellengrenzen in den resultierenden Datensatz übertragen wurden. Dies entspricht nicht einer präzisen Umsetzung des ursprünglichen Konzepts von WHITE et al. (2000) und RUNNING (1998). Damit wird deutlich, daß der globale Modellansatz von HEINSCH et al. (2003) und RUNNING et al. (1999) Schwierigkeiten mit der Abbildung räumlicher Muster auf regionaler Ebene hat, was beim RBM nicht der Fall ist. Insofern ist das RBM den *MOD17A3*-Daten überlegen.

Doch nicht nur die Probleme der räumlichen Muster lassen an der Eignung der *MOD17A3*-Daten für eine regionale Analyse zweifeln, auch die konkreten Ergebnisse stimmen - zumindest für das Kaokoveld - nicht mit dem allgemeinen Bild überein. Schon beim visuellen Vergleich zwischen den *MOD17A3*-Daten (Abb. 6.8) und Ergebnis des RBM Kaokoveld (Abb. 6.2) läßt sich dies nachvollziehen². Offensichtlich wird es bei der Berechnung einfacher statistischer Kenngrößen. In der Tabelle 6.2 sind diese Kenngrößen für den *MOD17A3*-Datensatz des Jahres 2002 dargestellt. Auch für diese Berechnung wurde die Meeresoberfläche analog zur Tabelle 6.1 ausmaskiert. Im Vergleich mit den RBM-Ergebnissen des Jahres 2002 fällt besonders auf, daß der Datensatz negative Werte enthält und die Maxi-

²Die Abbildungen 6.2 und 6.8 verwenden zur besseren Vergleichbarkeit dieselbe Farbskalierung.

malwerte deutlich über den Ergebnissen des RBM liegen. Dagegen ist die mittlere Produktion um etwa 55% geringer. Infolgedessen fällt auch die Gesamtproduktion mit 3.958.360 t Trockenmasse deutlich niedriger aus.

Diese statistischen Kennwerte in Verbindung mit den räumlichen Mustern aus Abbildung 6.8 zeigen einige Probleme des MODIS-Datensatzes auf. Die Gesamtproduktion liegt weit unterhalb der Ausgabe des RBM. Diese allerdings entsprechen weitgehend den allgemeinen Literaturangaben (vgl. Abschnitt 6.2.1) und sind von daher vertrauenswürdiger. Des weiteren kommt hinzu, daß die MOD17A3-Daten deutliche Schwächen hinsichtlich der räumlichen Muster der pflanzlichen Produktion aufweisen. So finden sich z.B. die Maximalwerte der Biomasseproduktion im sehr ariden Randbereich der Namib, in Wahrheit mit extrem spärlicher Vegetation bewachsen ist. Dieses Resultat mag durch die eingeflossenen Klimadaten induziert sein. Bei der groben räumlichen Auflösung wurden wahrscheinlich die morgendlichen Nebelbänke der Skelettküste als pflanzenverfügbare Feuchtigkeit interpretiert und generieren auch bei minimalem Bewuchs eine maximale Produktion. Eine weiteres Kuriosum stellen die Gebiete mit negativen Biomasseproduktion dar, wie sie sich z.B. im Bereich der Baynes-Berge im nördlichen Kaokoveld ergeben. Diese Flächen werden in der Abbildung 6.8 schwarz gekennzeichnet. Prinzipiell dürften solche Flächen nach dem Modellansatz von RUNNING et al. (1999) nirgendwo auf der Landoberfläche der Erde auftreten. Eventuell liegt hier eine noch ungenügende Feinabstimmung des Konzepts vor. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die *MOD17A3*-Daten bislang nur den Qualitätsstatus "Beta" tragen. Mit dem Qualitätsstatus gibt der USGS an, inwieweit die entsprechenden MODIS-Produkte bereits validiert sind. Der Status "Beta" ist die erste von drei Stufen und bedeutet nach CONBOY (1999), daß die Daten bislang erst minimal validiert wurden und nur sehr begrenzt sichere Ergebnisse liefern. Damit können die Erwartungen an den MOD17A3-Datensatz nicht allzu hoch sein. Im übrigen bestätigt sich das Bild der zweifelhaften Datenqualität auch für den *MOD17A3*-Datensatz des Jahres 2001. Der *MOD17A3*-Datensatz des Jahres 2003 war zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit noch nicht verfügbar.

6.2.3 Vergleich der Modellergebnisse mit den Ergebnissen des C-FIX-Modells

In einer Reihe von erfolgreichen Modellansätzen zeichnet sich auch das von VEROUSTRATE, PATYN & MYNENI (1994) entwickelte C-FIX-Modell durch die Verwendung des generellen Zusammenhangs von MONTEITH (1977) in Kombination

mit Fernerkundungsdaten aus. Dabei wird ähnlich wie in dem RBM-Ansatz die *FPAR* aus dem NDVI von SPOT-VEGETATION-Daten bestimmt. Die übrigen Einflußgrößen, wie die globale solare Einstrahlung, klimatische Effizienz, photosynthetische Effizienz und CO_2 -Düngung werden entweder als empirische Größen eingegeben oder stammen aus Klimadaten der WMO (SABBE & VEROUSTRAETE, 1999). Das Ergebnis des Modells sind Angaben über die CO_2 -Fixierung und Kohlenstoffassimilation von Vegetationsbeständen, die besonders für die Diskussion um Kohlenstoffsenken im Kontext des globalen Klimawandels (Kyoto-Protokoll) von großer Bedeutung sind (VAN DE WALLE & LEMEUR, 1999).

Mit dem Start des französischen SPOT-4 Satelliten im Oktober 1997 wurde erstmals, neben den hochauflösenden HRVIR-Systemen, der französisch-belgische, niedrig-auflösende Sensor VEGETATION VGT-1 in den Orbit gebracht. SPOT VGT-1 wurde speziell für die Beobachtung der terrestrischen Vegetation entwickelt (CNES, 1994). Das Programm des VGT-1 wird seit 2003 mit dem Nachfolgesensor VGT-2 an Bord von SPOT-5 fortgesetzt (VITO, 2003). Der Sensor liefert Daten auf vier spektralen Bändern zwischen dem blauen und dem nahen Infrarot mit einer Auflösung von etwa $1,1 \times 1,1 \text{ km}^2$ im Nadir. Daraus werden insbesondere NDVI-Daten abgeleitet, da die Lage der spektralen Kanäle explizit für die Berechnung des NDVI gewählt wurden (CNES, 1994). Aus diesen Daten werden mit Hilfe des C-FIX-Modells unter anderem globale Daten zur pflanzlichen Biomasse abgeleitet (SABBE & VEROUSTRAETE, 2000). Dieses als "Dry Matter Productivity" (DMP) bezeichnete Datenprodukt ist kostenfrei beim "Flemish Institute for Technological Research" (VITO) zu erhalten³ und soll in dieser Arbeit als Referenz für die Evaluation der RBM-Ergebnisse dienen.

Für die Überprüfung der RBM-Ergebnisse wurde ein, das gesamte Jahr 2001 in 10-Tages-Datensätzen umfassender Datensatz des DMP-Produkts, mit den raumzeitlichen Ergebnissen des RBM verglichen. Da sowohl der DMP-Datensatz als auch die RBM-Daten auf dekadischen Zeitschritten aufbauen, ist ein Vergleich sinnvoll. Die DMP-Daten eignen sich darüber hinaus auch sehr gut als Referenz, sind doch die Ergebnisse des C-FIX-Modells anhand zahlreicher Studien überprüft (VEROUSTRAETE & SABBE, 2000; EERENS et al., 2001; EERENS et al., 1999). In Abbildung 6.9 ist die akkumulierte Jahresproduktion aus den DMP-10-Tages-Daten für 2001 dargestellt. Insgesamt zeigt sich ein ganz ähnliches Produktionsmuster wie auf der Karte der Jahresproduktion aus RBM-Daten (siehe Abb. 6.1, S. 142). Auch bei diesem, von der RBM-Modellierung völlig unabhängigen Datensatz, ergibt sich für die Höhenlagen der Zebraberger und der übrigen Bergländer

³Die Internetadresse für die Daten lautet: <http://www.geosuccess.net>

die höchste Produktion. Ebenso stimmen die grundsätzlichen Muster überein, so z.B. daß westlich des Khumib kaum noch Produktion stattfindet. Lediglich einige kleinere Unterschiede, wie z.B. die etwas höhere Produktion im Bereich Okangwati, deuten auf die komplett unterschiedliche Datengrundlage der beiden Resultate hin.

Um die Evaluierung nicht nur mit einem visuellen Vergleich zu beenden, wurden auch statistische Kennwerte der beiden Datensätze in Beziehung gesetzt und Korrelationen zwischen den 10-Tages-Datensätzen des DMP-Produkts und jenen der RBM-Ergebnisse gerechnet. Dabei wurde die gesamte Landfläche im Untersuchungsraum (Abb. 6.9) berücksichtigt. In Abbildung 6.10 sind die Korrelationen für die 36 Zeitschritte dargestellt. Dabei zeigt sich, daß besonders signifikante Korrelationen zwischen den Zeitschritten 12 bis 22 mit Korrelationskoeffizienten von zum Teil über 0,9 herrschen. Dies deutet auf eine sehr guten Übereinstimmung bei der Wiedergabe der wichtigen phänologischen Phase der Vegetation hin. Etwas geringere Korrelationskoeffizienten, um etwa 0,7, wurden für den Jahresanfang 2001 ermittelt. Mit Beginn der Trockenzeit, etwa ab dem Zeitschritt 20, bis zum Jahresende, mit dem Zeitschritt 36, sind gering abfallende Korrelationen mit Werten um 0,8 festzustellen. Unter Umständen scheinen die beiden Modellansätze die zunehmende Austrocknung und damit den Rückgang der Produktion unterschiedlich zu bewerten. Die Gesamtkorrelation aller Zeitschritte beträgt 0,825. Auch wenn es im raumzeitlichen Verlauf geringe Unterschiede zwischen den beiden Modellen für das Jahr 2001 gibt, beträgt die Korrelation zwischen den summierten Jahresproduktionen 0,9512 und stellt ein sehr positives Ergebnis dar. Das bereinigte Bestimmtheitsmaß beträgt $r^2=0,9048717$, womit rund 90% der auftretenden Biomassewerte mit 99% Vertrauenswahrscheinlichkeit nach einem F-Test erklärt werden können.

Der Vergleich der beiden Datensätze zeigt die Übereinstimmungen der Ergebnisse der Modellkonzepte von C-FIX und RBM. Für eine längerfristige Anwendung in semiariden Savannengebieten erscheint jedoch das RBM Kaokoveld besser gerüstet zu sein. Zum einen stellt der SPOT VGT-1-Sensor trotz des Starts von SPOT 5 mit VGT-2 ein experimentelles System dar (VITO, 2003), wohingegen MODIS über einen gesicherten Planungshorizont von etwa 15 Jahren verfügt (CONBOY, 2000). Damit ist die Datenlage für ein langfristiges Monitoring gewährleistet. Zum anderen verfügt das RBM Kaokoveld über einen physikalisch-basierten Ansatz zur Bestimmung der LUE, der auch die Adaption an andere (Trocken-) Räume erlaubt (z.B. über die Anpassung der LUE-Lookuptabelle), während das C-FIX Modell mit empirischen Größen arbeitet (SABBE & VER-

OUSTRAETE, 1999; SABBE & VEROUSTRAETE, 2000). Bevor in einem Exkurs der dritte Ansatz zur Beurteilung des RBMs mit Hilfe von unabhängigen Daten aus den Feldaufenthalten dargestellt wird (Kap. 6.3.1), sollen die RBM-Ergebnisse und die beiden konkurrierenden Modellansätze entlang eines Transekts durch den Untersuchungsraum verglichen und ein kurzes Zwischenfazit gezogen werden.

In Abbildung 6.11 sind die akkumulierten Biomasseergebnisse des RBM für die Jahre 2001, 2002 und 2003 entlang einer Profillinie durch das Kaokoland dargestellt. Diese Linie zwischen den Punkten A und B (vgl. Beikarte in Abb. 6.11) folgt zum einen dem Relief von den Höhen der Zebraberger über den Steilrandberg und der Abdachung zur Namib bis zur Küste des Atlantiks. Zum anderen verläuft in dieser Richtung auch ein klimatischer Gradient, wodurch in Richtung SW die Niederschläge abnehmen. Zusätzlich sind zum Vergleich der RBM-Ergebnisse noch die Biomasseergebnisse der beiden oben besprochenen Modelle von MODIS *MOD17A* und C-FIX für die erwähnte Profillinie dargestellt.

Die drei RBM-Ergebnisse präsentieren sich eng geschart und bestätigen die Unterschiede zwischen den drei Jahren, die schon in Kap. 6.1 besprochen wurden. So ist zu erkennen, daß die Profillinie des Jahres 2003 im NE des Kaokovelds (Zebraberger - Steilrandberg) höher als die des Jahres 2002 liegt. Dagegen fällt die Kurve von 2003 im südlichen und westlichen Kaokoland unter die von 2002 (Hoarusib - Khumib - Namib). Damit bestätigt sich die deutliche regionale Disparität der pflanzlichen Produktion im Jahr 2003.

Die Profillinien der beiden anderen Modelle zeigen deutlichere Abweichungen. Der MODIS *MOD17A*-Datensatz für 2002 zeichnet die Biomassenproduktion nur rudimentär nach. Die Profillinie ist durch häufige Datenlücken gekennzeichnet und scheint nur im Bereich zwischen Hoarusib und Khumib die Biomasseentwicklung näherungsweise nachzuzeichnen. Die Profillinie des C-FIX Modells für 2001 bestätigt dagegen die gute Vergleichbarkeit mit dem RBM. Lediglich im Bereich der Zebraberger und in der Vornamib zwischen Hoarusib und Khumib liegt die C-FIX-Kurve deutlich unter dem RBM-Ergebnis für 2001. Doch bleibt die generell gute Übereinstimmung bestehen, da beide Kurven für C-FIX und RBM (2001) die pflanzliche Produktion sehr ähnlich nachzeichnen.

Das regionale Biomassemodell für Nordwest-Namibia liefert generell plausible Ergebnisse. Dies zeigen erstens die guten Übereinstimmungen mit Literaturwerten und den z.T. regionalisierten Ergebnissen globaler NPP-Modelle. Zweitens hat die Korrelation der RBM-Ergebnisse mit dem C-FIX-Modell gezeigt, daß auch die raumzeitliche Entwicklung präzise erfaßt wird und bei der jährlichen Produktion eine große Übereinstimmung herrscht. Der Vergleich mit den *MOD17A3-*

Daten macht dagegen die Überlegenheit eines regionalen Ansatzes deutlich, der die räumlichen Muster erheblich besser abbildet als das globale MODIS-Konzept. Ein vierter Vergleich mit Felddaten soll nun zeigen, ob sich die Ergebnisse des RBM auch mit Hilfe von terrestrisch erhobenen Messwerte bestätigen lassen.

6.3 Möglichkeiten der Modellvalidierung durch eine unabhängige Datenbasis

In diesem Abschnitt sollen die RBM-Daten mit Hilfe von unabhängigen Felddaten überprüft werden. Dazu werden zunächst im Abschnitt 6.3.1 die Feldaufenthalte beschrieben und sowohl die Meßgrößen als auch die Meßmethodik erläutert. Im Abschnitt 6.3.2 werden dann die erhobenen Feldmeßwerte in Beziehung zu den RBM-Ergebnissen gesetzt.

6.3.1 Durchführung von Feldaufenthalten zwischen 2002 - 2004

Seit Beginn des Forschungsprojekts "Modellierung von Vulnerabilität mit Hilfe von Fernerkundung im Kaokoveld" im Rahmen des SFB 389 ACACIA wurden in den Jahren 2002, 2003 und 2004 mehrere mehrwöchige Feldaufenthalte durchgeführt. Das Ziel dieser Forschungsreisen lag im Wesentlichen in drei Aspekten:

- Es sollte ein tieferes Verständnis für die im Untersuchungsgebiet stattfindenden Prozesse gewonnen werden. Dabei finden in dem Raum neben natürlichen Prozessen vor allem durch den Menschen induzierte Veränderungen statt, die sich in einem Landschaftswandel niederschlagen. Besonders hervorzuheben sind dabei das Anwachsen der Viehherden, die damit verbundene Verstärkung der Überweidung und die zunehmende Selbsthaftwerdung der Himba-Bevölkerung, was zu einer starken lokalen Übernutzung der natürlichen Ressourcen führt.
- Darüber hinaus dienten die Feldaufenthalte der Erfassung, Messung und Beurteilung der pflanzlichen Produktivität. Die dabei erhobenen Daten werden als unabhängige Referenz für die Überprüfung der RBM-Ergebnisse genutzt.
- Und nicht zuletzt wurden durch die Kartierung und Vermessung von Gartenbauflächen die Möglichkeiten der Ernährungssicherung der Himba-Bevölkerung untersucht. Dabei wirft die festgestellte Intensivierung des Gartenbaus Fragen nach Veränderungen der Lebensverhältnisse auf (WELLE, 2003). Diese Aspekte sollen in zukünftigen Arbeiten weiter vertieft werden.

Während der dritte Aspekt auf die Überprüfung der RBM-Ergebnisse keinen Einfluß hat, ist der erste für die Interpretation der Ergebnisse (vgl. dazu Kapitel 7) relevant. Der zweite Aspekt beinhaltet die Erhebung von Evaluierungsdaten. Die Ausführungen in diesem Abschnitt konzentrieren sich deshalb auch auf diesen Gesichtspunkt.

Umfang und Auswahl der Testflächen

Da die Bewertung eines regionalen Modells zur Erfassung der pflanzlichen Biomasse sehr komplex ist, gilt es Meßgrößen zu finden, die zur Überprüfung taugen. Dabei wird jeder Meßmethodik, die im lokalen Umfeld durchgeführt wird, dominiert vom Problem der räumlichen Aussagefähigkeit. Dies bedeutet, daß sehr genau hinterfragt werden muß, ob die punktuell erhobenen Meßergebnisse auch für die Maßstabebene des Modells von $1 \times 1 \text{ km}^2$ gelten (TRAXLER, 1997). Um diesem Problem besonders im heterogenen Umfeld des nordwestlichen namibianischen Untersuchungsgebiets zu begegnen, wurde einerseits eine strukturierte Auswahl der Testflächen (s.u.) getroffen und andererseits eine hohe Anzahl von Plots untersucht. Die Gesamtzahl lag bei 146 untersuchten Plots. Ein Großteil der Plots wurde nicht nur einmal, sondern mehrfach in den Feldaufenthalten 2002, 2003 und zuletzt 2004 aufgesucht. In der Abbildung 6.12 sind die Positionen der Plots verzeichnet. Wegen der schlechten Zugänglichkeit des Untersuchungsgebiets, abseits der Fahrpisten, wurden die Plots mit einem durchschnittlichen Abstand von zehn Kilometern entlang der wenigen vorhandenen Verkehrswege festgelegt. Zwar wird dadurch die Lage der Plots im Untersuchungsgebiet zufällig verteilt, doch führt dieses Verfahren eventuell zu einer teilweise verzerrten Stichprobe, da nicht alle Landschaftselemente in gleichen Teilen beprobt wurden (KRÄMER, 2000). Diesem Umstand kann jedoch dadurch begegnet werden, daß bei der Evaluation nur jene Rasterzellen aus den Ergebnisdatensätzen berücksichtigt werden, die sich auch tatsächlich mit den Plots decken.

Um direkte Einflüsse der Verkehrswege und Fahrpisten auszuschließen, wurden die Plots jeweils einige 10er Meter abseits der Wege in der natürlichen Vegetation plaziert um lokale Veränderung, z.B. bei mehreren vorhanden Fahrspuren, auszuschließen. Für eine schnelle und problemlose Wiedererkennung, wurden die Testflächen mit Hilfe eines GPS-Geräts auf wenige Meter genau eingemessen. Zudem wurden alle Plots photographisch dokumentiert, und zwar mit einer Senkrechtaufnahme und vier Horizontalaufnahmen nach Norden, Osten, Süden und Westen, die mit einer Digitalkamera aufgenommen wurden (siehe dazu Abb. 6.13). Dieses Vorgehen erlaubt spätere Überprüfungen der Felddaten, wie der Be-

deckungsschätzung, und eine visuelle Interpretation der Veränderungen zwischen zwei Jahren, bzw. zwei Feldaufenthalten.

Die Größe der Plots wurde als Quadrat mit 25 m Kantenlänge festgelegt. Damit umfaßt ein Plot eine Fläche von 625 m². Dabei wurde darauf geachtet, daß sich die Plots nicht direkt in Übergangszonen der Vegetation befinden, sondern daß die Vegetationseinheit, in die eine einzelne Testfläche gelegt wird, über mehrere 100 Meter eine gewisse Homogenität aufweist. Damit soll eine flächenhafte Aussage der Plots gewährleistet werden.

Methoden zur Untersuchung des Bodens

Auf den Testflächen wurden bei einer erstmaligen Aufnahme neben der grundsätzlich durchgeführten Vegetationsaufnahme zusätzlich einige Bodenparameter erhoben. Diese wurden mit den Angaben der FAO-Bodenkarte (FAO, 1996) verglichen, um sicher zu stellen, daß die generalisierten Angaben der DSMW auch für das Kaokoland zutreffen. Folgende Parameter wurden erhoben:

- Ansprache der **Bodenart** mit Hilfe der Fingerprobe nach AG-BODEN (1994); so wurden die Anteile der Sand-, Schluff- und Tonfraktion im Feinboden des Oberbodens geschätzt. Bei der Ansprache der **Textur** wurde der Skeletanteil des Grobbodens der Probe durch Schätzen bestimmt (AG-BODEN, 1994).
- **Kalkgehalt** des Oberbodens; wurde mittels Salzsäureprobe bestimmt. Dazu wurde 10%-Salzsäurelösung (*HCl*) auf den Feinboden geträufelt und der Carbonatgehalt nach der sicht- und hörbaren Säurereaktion (AG-BODEN, 1994) abgeschätzt.
- **Salzgehalt** des Bodens: wurde mit Hilfe der Leitfähigkeit des Bodens bestimmt. Dazu wurde eine Suspension aus 6,0 g Feinboden mit 30 ml destilliertem Wasser hergestellt. Nach 30 min Standzeit wurde die Leitfähigkeit mit dem Leitfähigkeitsmeßgerät LF537 der Firma WTW gemessen.
- Messung des **ph-Wertes**: eingesetzt wurde das pH-Meter Modell pH90 der Firma WTW. Um den Sättigungseffekt einzugrenzen, wurde bei der Messung eine 0,01M *CaCl*₂-Lösung eingesetzt. Das Salz verdrängt die H⁺-Ionen an den Austauschern, so daß die Gesamtacidität der Bodenlösung gemessen wird, die 0,4 bis 0,8 pH-Einheiten unter der aktuellen Acidität liegt (SCHEFFER et al., 1998). Es wurden 4,0 g Feinboden eingewogen und mit 10 ml 0,01M *CaCl*₂-Lösung versetzt. Die Suspension wurde mit einem Glasstab

kurz gerührt und eine Stunde stehengelassen. Nach zehnminütiger Meßdauer wurde der Wert abgelesen.

Der Vergleich der Feldmessungen zeigte keine gravierenden Differenzen zum digitalen Datensatz, weshalb der DSWM-Datensatz für den Modellansatz geeignet erscheint.

Während die Bodendaten nur einmalig bei der ersten Ansprache der Testflächen erhoben wurden, wurden die nachfolgenden Daten zur Vegetation auch bei mehrmaligem Aufsuchen der Plots jedes Mal erfaßt.

Methoden zur Untersuchung der Grasschicht

Die Grasschicht im weiteren Sinne umfaßt nicht nur Gräser, sondern auch krautige Gewächse, auch wenn diese im Kaokoland, besonders als Futterpflanzen, nur eine begrenzte Rolle spielen (CASIMIR & BOLLIG, 2002; SCHULTE, 2001). Bei der Ansprache der Grasschicht wurden jedoch keine einzelnen Pflanzen bestimmt, sondern die Vegetationsschicht in ihrer Gesamtheit als Funktionstyp erfaßt. Eine genaue Differenzierung der Pflanzen ist für den Zweck der Modellevaluation nicht sinnvoll, da der regionale Maßstab des Modells die Ansprache einzelner Pflanzen ohnehin nicht zuläßt. Die folgenden drei Parameter wurden bei der Untersuchung der Grasschicht erfaßt:

- Über die Gesamtfläche des Plots von $25 \times 25 \text{ m}^2$ wurden über zufällig verteilte Messungen die durchschnittliche minimale, mittlere und maximale **Höhe der Grasschicht** bestimmt.
- Für die Bestimmung der **Deckung** der Grasschicht wurde an einer für den Plot repräsentativen Stelle ein Meßrahmen ausgelegt, mit dessen Hilfe sich die Deckungsschätzung präzisieren läßt. Der quadratische Meßrahmen hat eine Kantenlänge von 1m und ist im Inneren durch gespannte Schnüre in $10 \times 10 \text{ cm}$ große Felder gegliedert. Damit ergeben sich 100 Felder, die durch einfaches Auszählen der prozentualen Bedeckung recht genaue Schätzungen erlauben (JENTSCH, 2002).
- Die oberirdische **Produktivität** der Grasschicht wurde mit Probeschnitten erfaßt. Dies stellt nach MILNER & HUGHES (1968) die genaueste Form der Biomassenbestimmung dar. Wie schon in Abschnitt 3.1.2 dargestellt, wurden die Feldaufenthalte zeitlich so gewählt, daß die Pflanzendecke nach dem Ende der Regenzeit geerntet werden konnte. Dabei wurde auf einer

Fläche von 1 x 1 m² sämtliches oberirdisches Pflanzenmaterial manuell geerntet und in luftgetrocknetem Zustand gewogen. In Abbildung 6.14 ist der Ernteversuch am Plot P008 im Jahr 2002 dargestellt. Nach MILNER & HUGHES (1968) hätten die Proben in Trockenschrank bei 80° Celsius getrocknet werden müssen; dies war unter Feldbedingungen jedoch nicht möglich. Trocknungsversuche von SCHULTE (2001) zeigen jedoch, daß feldtrockene Proben im Untersuchungsgebiet keinen meßbaren Gewichtsverlust bei einer nachträglichen Trocknung erfahren. Dies liegt wahrscheinlich an der geringen Luftfeuchtigkeit und den hohen Temperaturen.

Methoden zur Untersuchung der Baum- und Strauchschicht

Die Baum- und Strauchschicht ist zwar weideökologisch nicht so relevant wie die Grasschicht, doch werden die Blätter der Büsche und Bäume in der Trockenzeit auch vom Vieh verzehrt. Daneben hat die Baum- und Strauchschicht durch die relativ dichte Belaubung einen deutlichen Einfluß auf die aus Satellitendaten gemessenen pflanzlichen Biomassedaten. Während der Feldaufenthalte wurden folgende Parameter der Baum- und Strauchschicht erfaßt:

- Die **Anzahl der Bäume und Sträucher** auf der gesamten Testfläche wurde gezählt. Damit lassen sich zusammen mit dem Umfang der Gehölze die Deckung der Schichten abschätzen. Die Grenze zwischen Bäumen und Büschen wurde nach BECKER (2000) bei 2m Höhe gezogen. Bei der späteren Berechnung der Bedeckung wurden diese beiden Einheiten wieder zusammengeführt, damit ein einheitlicher Wert für die Gehölzdeckung bestimmt werden kann.
- Neben der Gesamtanzahl der Gehölze wurden für jeweils 10% der Bäume und Sträucher⁴ die Formparameter '**Stammdurchmesser**', '**Kronendurchmesser**', '**Wuchshöhe**' und '**Anzahl der Hauptäste**' bestimmt. Dabei wurde darauf geachtet, daß für den Plot repräsentative Individuen vermessen wurden. Mit diesen Angaben läßt sich allometrisch sowohl die Biomasse des Bestandes als auch die Deckung abschätzen (WERNER & MURPHY, 2001; SANNIER et al., 2002; NIKLAS & ENQUIST, 2001).
- Das **Alter** der Gehölze wird zusätzlich in Form von fünf Altersklassen für 10% der Baum- und Strauchindividuen geschätzt. Dieser Wert kann so einen groben Anhaltspunkt für die Reproduktionsfähigkeit der Gehölze liefern (SCHULTE, 2001).

⁴Dabei wird immer mindestens ein Baum und Strauch pro Plot vermessen.

Aus den im Feld erhobenen Daten wurden anschließend der Bedeckungsgrad und die Trockenbiomasse bestimmt. Die Deckung wurde dabei nach der Gleichung 6.2 für die Baumschicht abgeleitet. Die Deckung der Strauchschicht nutzt die gleiche Formel 6.2 für die entsprechenden Strauchangaben. Die Gehölzdeckung wird dann mit der Gleichung 6.3 durch die Addition der Baum- und Strauchdeckung bestimmt (vgl. Abbildung 6.15).

$$\text{Deckung}_{\text{Baum}} = \frac{m_{\text{Baum}} \cdot \left(\frac{\sum D_{\text{Baum}}^2 \cdot \frac{\pi}{4}}{n_{\text{Baum}}} \right)}{\text{Plotgröße}} \quad (6.2)$$

Dabei ist $\text{Deckung}_{\text{Baum}}$ die Deckung der Baumschicht in %, m_{Baum} die Gesamtzahl der Bäume pro Plot, n_{Baum} die Anzahl der vermessenen Bäume pro Plot und D_{Baum} ist der Durchmesser der vermessenen Bäume in m.

$$\text{Gehölzdeckung} = \text{Deckung}_{\text{Baum}} + (\text{Deckung}_{\text{Strauch}} \cdot 0,75) \quad (6.3)$$

Die Trockenbiomasse wird nach dem Ansatz von SANNIER et al. (2002) berechnet, die für *Colospospermum mopane* und *Leucophaera bainesii* einen linearen Zusammenhang zwischen dem Volumen und dem Trockenblattgewicht gefunden haben. Diese Untersuchungen zum Trockenblattgewicht wurden in dem östlich an das Untersuchungsgebiet anschließenden Etoscha-Nationalpark durchgeführt. *Colospospermum mopane* wird als Typbaum der nordnamibianischen Savanne zur Berechnung der Baumbiomasse nach der Gleichung 6.5 benutzt. Dabei werden zur Berechnung des Baumvolumens als vereinfachter Rotationskörper (vgl. Abb. 6.15) sowohl die mittlere Wuchshöhe, der durchschnittliche Kronendurchmesser als auch der Stammdurchmesser verwendet. Das Baumvolumen berechnet sich demnach wie in Gleichung 6.4 folgt.

$$V_{\text{Baum}} = \left(\frac{\pi \cdot 2/3 W}{3} \cdot \left(\frac{S^2 + S}{2} \cdot \frac{K + K^2}{2} \right) \right) + \left(\frac{\pi}{3} \cdot 1/3 W \cdot \left(\frac{3K}{2} - 1/3 W \right) \right) \quad (6.4)$$

Dabei steht V_{Baum} für das Baumvolumen in m^3 , W ist die Wuchshöhe in m, S ist der Stammdurchmesser in m und K der Kronendurchmesser in m. Aus dem ermittelten Baumvolumen V_{Baum} und der Anzahl der Bäume pro Plot n_{Baum} wird anschließend über den linearen Zusammenhang von SANNIER et al. (2002), wie in Gleichung 6.5 angegeben, die Blattbiomasse DM_{Baum} in t/ha berechnet.

$$DM_{\text{Baum}} = (0.0000886 \cdot V_{\text{Baum}}) \cdot (16 \cdot n_{\text{Baum}}) \quad (6.5)$$

Die Berechnung der Strauchbiomasse gestaltet sich ähnlich wie die Bestimmung der Blattbiomasse der Bäume. Allerdings wird hier lediglich der Durchmesser der Sträucher zur Berechnung des linearen Zusammenhangs nach SANNIER et al. (2002) gemäß der Gleichung 6.6 benutzt.

$$DM_{\text{Strauch}} = \left(0.001185 \cdot \left(\frac{\pi}{4} SD^2 \right) + 0.000058 \right) \cdot (16 \cdot n_{\text{Strauch}}) \quad (6.6)$$

Dabei ist DM_{Strauch} die Strauchbiomasse in t/ha, SD der Strauchdurchmesser in m und n_{Strauch} die Anzahl der Sträucher auf einem Plot. Die gesamte Gehölzbiomasse wird dann durch die Addition der Baumbiomasse DM_{Baum} und der Strauchbiomasse DM_{Strauch} ermittelt. Mit diesen vorbereitenden Schritten stehen nun die Felddaten für den Vergleich mit den Modellergebnissen bereit. Dabei ist zu beachten, daß die aufbereiteten Felddaten eine unabhängige Datenbasis zur Evaluation darstellen.

6.3.2 Bewertung der Vergleichsdaten

Wie schon im vorhergehenden Abschnitt angemerkt, werden für die Evaluation der RBM-Daten nur jene Rasterzellen berücksichtigt, die sich auch tatsächlich mit exakt ausgewählten Plotlagen aus der Feldforschung decken. Damit ergibt sich letztlich ein etwas begrenzter Stichprobenumfang – insgesamt 97 Proben –, doch sind in diesem Fall beide Variablen, die Felddaten und die RBM-Ergebnisse, unabhängig voneinander erhoben. Hinzu kommt, daß die Felddaten die reale Situation im Untersuchungsgebiet für das jeweilige Jahr widerspiegeln. Mit dieser Datenbasis läßt sich eine realitätsnahe Überprüfung des RBM vornehmen.

Der Vergleich zwischen den Felddaten und den RBM-Ergebnissen soll durch die Berechnung der linearen Korrelation erfolgen. Dieses Verfahren erlaubt die Beschreibung des Zusammenhangs zwischen gemessener und modellierter Biomasse über zwei Jahre (SIMIONI et al., 2000). Dazu wurden in Abbildung 6.16 sowohl die Gesamtbiomasse als auch die Biomasse der Grasschicht für das Jahr 2002 aus den Ergebnissen des RBM gegen die entsprechenden, im Feld erhobenen Daten geplottet. Beim Vergleich ergibt sich für die Grasschicht ein Korrelationskoeffizient von 0,9076 mit einem bereinigten Bestimmtheitsmaß von $R_a^2 = 82,2\%$. Der F-Test wurde mit 99% Vertrauenswahrscheinlichkeit bestanden. Da der berechnete R^2 -Wert einer Stichprobe dazu tendiert, eine optimistische Schätzung über die Güte einer Funktion auszuweisen, wurde jeweils statt des einfachen Bestimmtheitsmaß das bereinigte Bestimmtheitsmaß (R_a^2) ermittelt (HÜBSCHER, 2000).

Tabelle 6.3: Vergleich der RBM-Ergebnisse mit den gemessenen Felddaten für die Gesamtbiomasse, die Biomasse der Grasschicht und der Gehölzschicht für 2003. N bezeichnet die Anzahl der Plots.

	N	Korrelationskoeffizient	R_a^2
Gesamtbiomasse	76	0,8839	77,83 %
Biomasse der Grasschicht	76	0,8977	80,33 %
Biomasse der Gehölzschicht	76	0,9488	89,89 %

Die Korrelation der pflanzlichen Gesamtproduktion ist nicht ganz so ausgeprägt wie die der Grasschicht. Hier liegt der Korrelationskoeffizient bei 0,8840 und damit bei einem bereinigten Bestimmtheitsmaß von $R_a^2 = 77,9\%$. Der obligatorische F-Test wurde dabei ebenfalls mit 99% Vertrauenswahrscheinlichkeit bestanden.

In der Abbildung 6.17 sind die RBM-Ergebnisse für die Baum- und Strauchschicht gegen die Biomassewerte der Gehölze geplottet. Da diese Werte wegen der sehr geringen Bedeckung um etwa eine Zehnerpotenz niedriger liegen als die Biomassewerte der Grasschicht, wurde diese Korrelation in einem eigenen Diagramm dargestellt. Der Korrelationskoeffizient beträgt in diesem Fall 0,9932, woraus sich ein bereinigtes Bestimmtheitsmaß von $R_a^2 = 98,6\%$ ergibt. Der F-Test war auch in diesem Fall mit 99% Vertrauenswahrscheinlichkeit erfolgreich. Damit wurde für das Jahr 2002 die spärliche Baum- und Strauchvegetation vom Modell am besten erfaßt. Dies liegt wahrscheinlich darin begründet, daß sich der Anteil der Baumschicht in den *MOD44B*-Daten am sichersten bestimmen läßt, wohingegen die Unterscheidung von 'Krautschicht' zu 'unbedecktem Boden' schwieriger ist (DEFRIES, TOWNSHEND & HANSEN, 1999).

Ein sehr ähnliches Bild ergibt der Vergleich der Felddaten mit den entsprechenden Ergebnissen des RBM für das Jahr 2003.

In Tabelle 6.3 sind die Korrelationskoeffizienten und das bereinigte Bestimmtheitsmaß R_a^2 aufgeführt. Insgesamt wurden für das Jahr 2003 drei Korrelationen zwischen der RBM-Berechnung und den Felddaten gerechnet. Einmal die Korrelation der pflanzlichen Gesamtbiomasse, dann jene der Biomasse der Grasschicht und weiterhin eine Korrelation für die Biomasse der Gehölzschicht. Die Daten der Gehölzschicht wurden nach dem in Abschnitt 6.3.1 erläuterten Verfahren berechnet.

Insgesamt zeigen die Auswertungen des Jahres 2003 ein sehr ähnliches Bild wie jene des Jahres 2002. Lediglich die Produktion der Gehölze wurde im zweiten Jahr geringfügig schlechter erfaßt. Ob dies an einer zufällig ungünstigen Wahl der Testgebiete, bzw. des Testzeitraums lag oder die Modellabstimmung im Jahr 2003 nicht optimal war, läßt sich nicht bestimmen. Grundsätzlich erscheinen die Modellergebnisse jedoch plausibel und geben ein realistisches Bild der pflanzlichen Produktion im untersuchten Zeitraum wieder. Ein Erklärungszusammenhang von rund 78% für die Gesamtbiomasse ist bei einem regionalen Modellkonzept ein deutlicher Fortschritt, vor allem, weil eine große Anzahl anderer Ansätze den direkten Vergleich mit Bodendaten scheut und sich statt dessen lediglich generell auf globale Größen zur Produktion beziehen (z.B. SEAQUIST, OLSSON & ARDÖ, 2003; z.B. RIEDO et al., 1998).

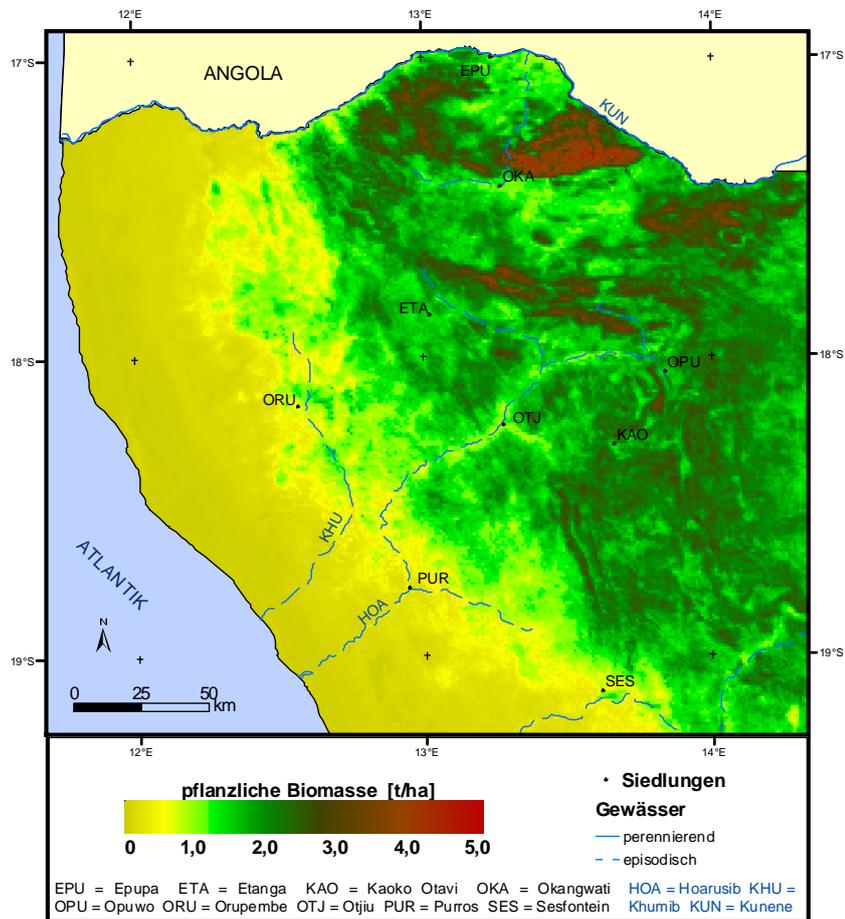


Abbildung 6.1: Karte der produzierten pflanzlichen Biomasse im Kaokoland im Jahr 2001. (Quelle: eigener Entwurf)

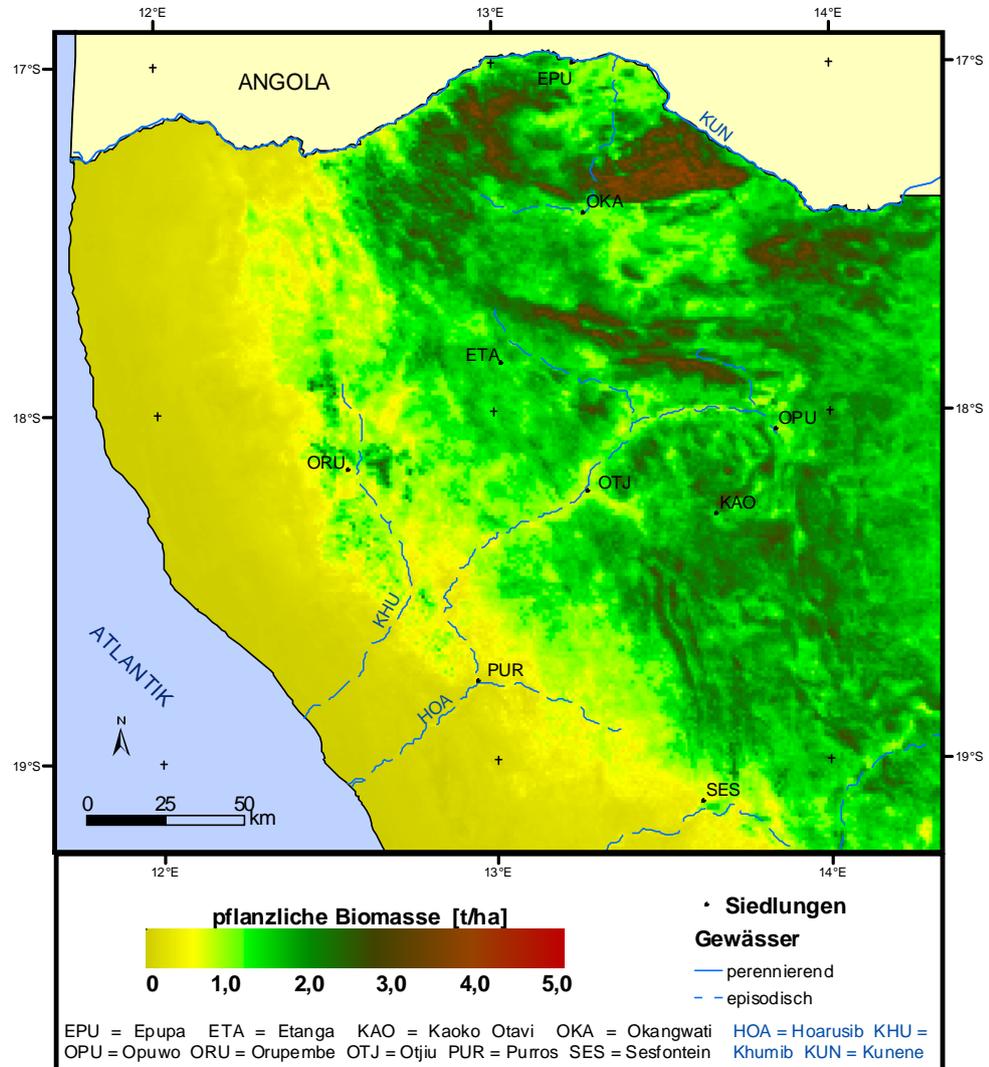


Abbildung 6.2: Karte der produzierten pflanzlichen Biomasse im Kaokoland im Jahr 2002. (Quelle: eigener Entwurf)

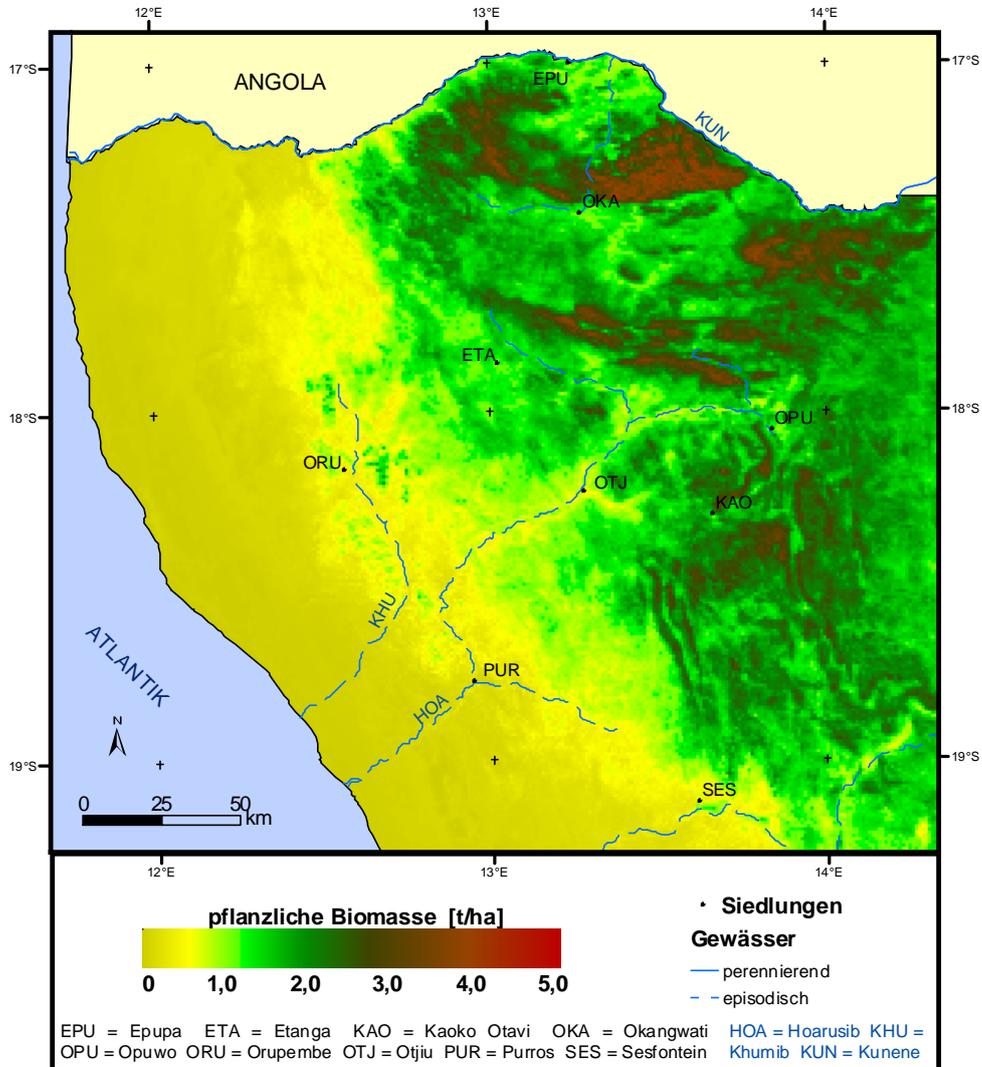


Abbildung 6.3: Karte der produzierten pflanzlichen Biomasse im Kaokoland im Jahr 2003. (Quelle: eigener Entwurf)

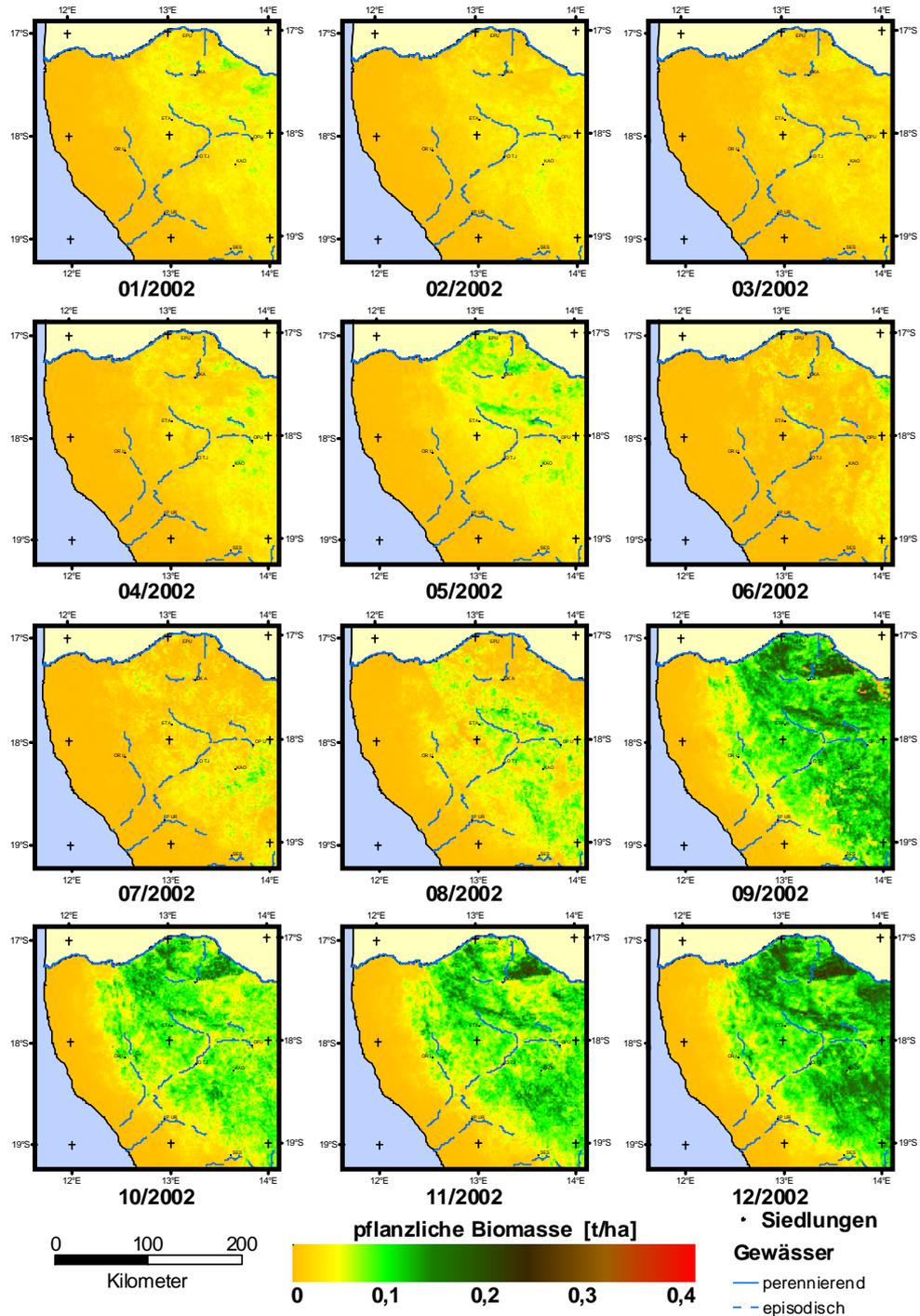


Abbildung 6.4: Raumzeitliche Entwicklung der pflanzlichen Biomasse im Kaokoveld. Dargestellt sind die dekadischen Zeitschritte 01/2002 bis 12/2002 (Januar - April). (Quelle: eigener Entwurf)

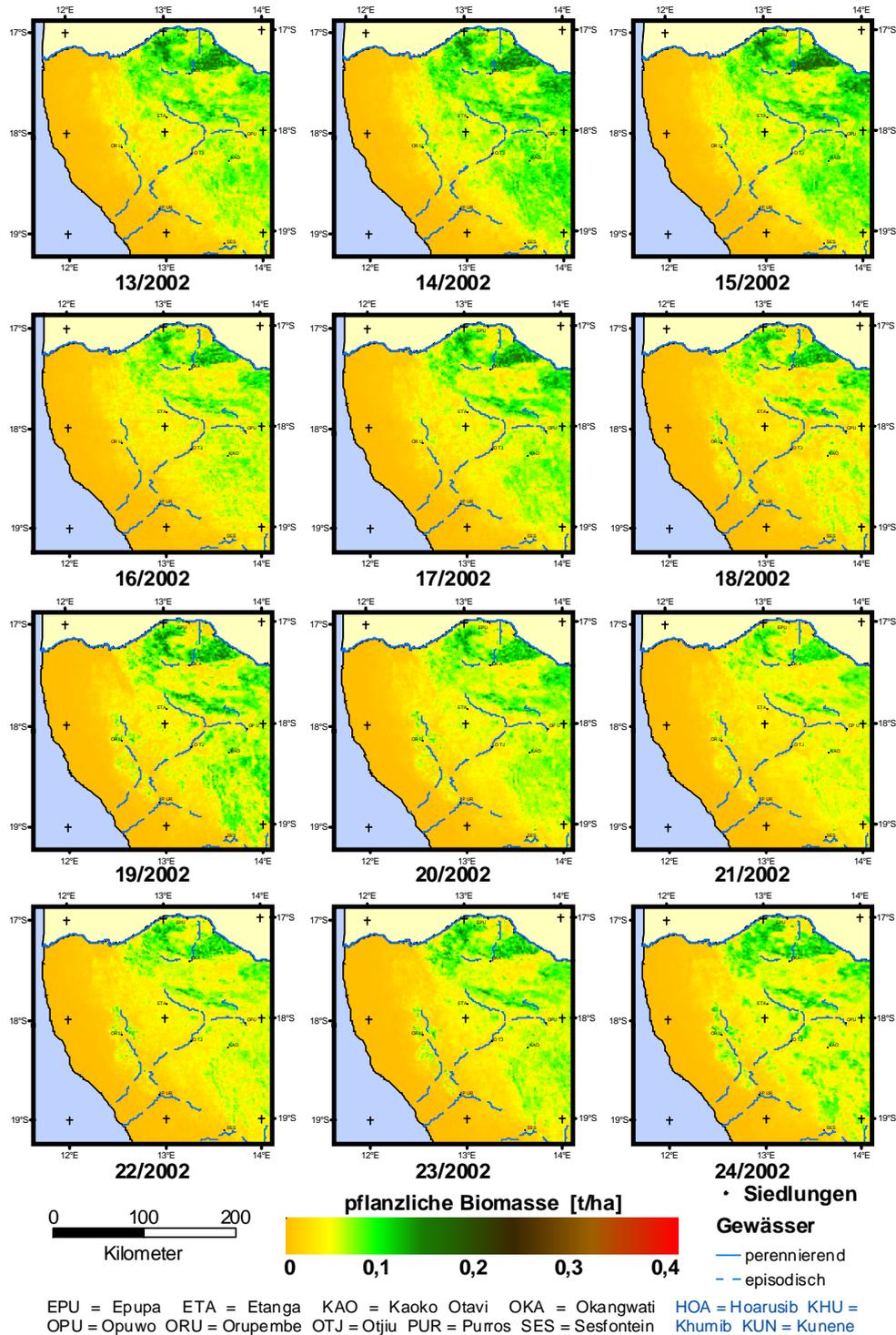


Abbildung 6.5: Raumzeitliche Entwicklung der pflanzlichen Biomasse im Kaokoveld. Dargestellt sind die dekadischen Zeitschritte 13/2002 bis 24/2002 (Mai - August). (Quelle: eigener Entwurf)

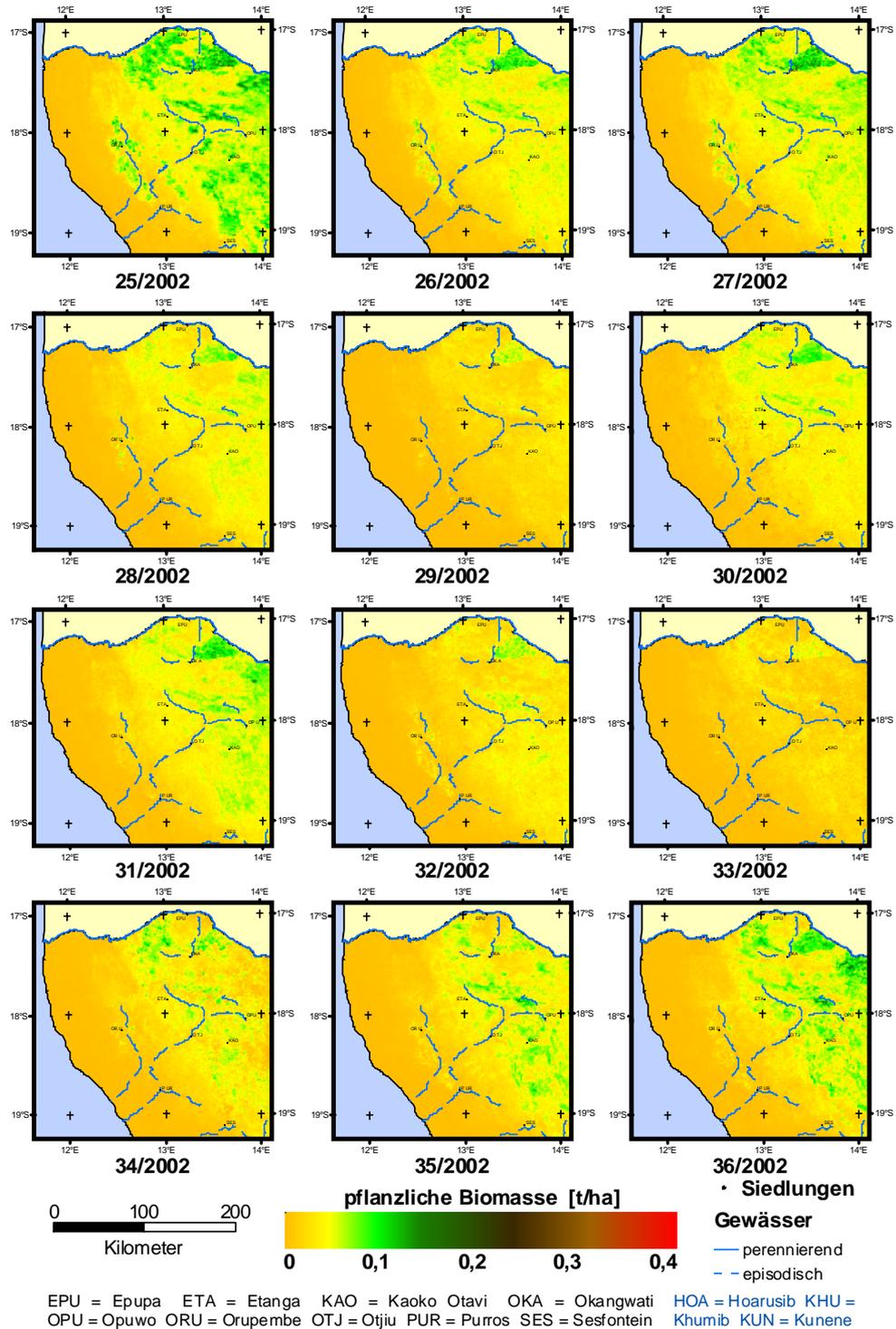


Abbildung 6.6: Raumzeitliche Entwicklung der pflanzlichen Biomasse im Kaokoveld. Dargestellt sind die dekadischen Zeitschritte 25/2002 bis 36/2002 (September - Dezember). (Quelle: eigener Entwurf)

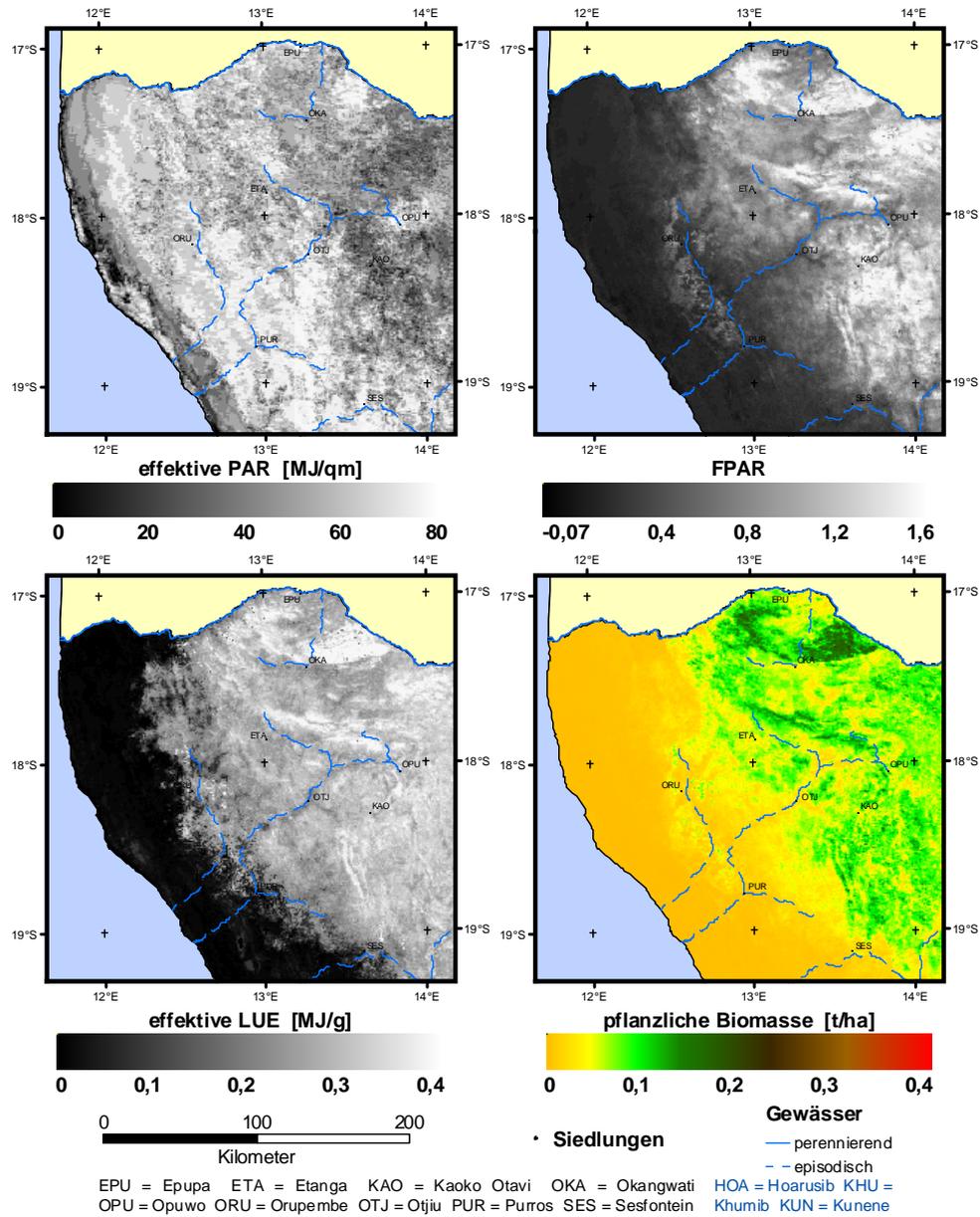


Abbildung 6.7: Darstellung der drei Faktoren PAR , $FPAR$ und ε_{eff} zur Berechnung der raumzeitlichen pflanzlichen Produktion sowie der resultierenden Biomasse für den Zeitschritt 11/2003. (Quelle: eigener Entwurf)

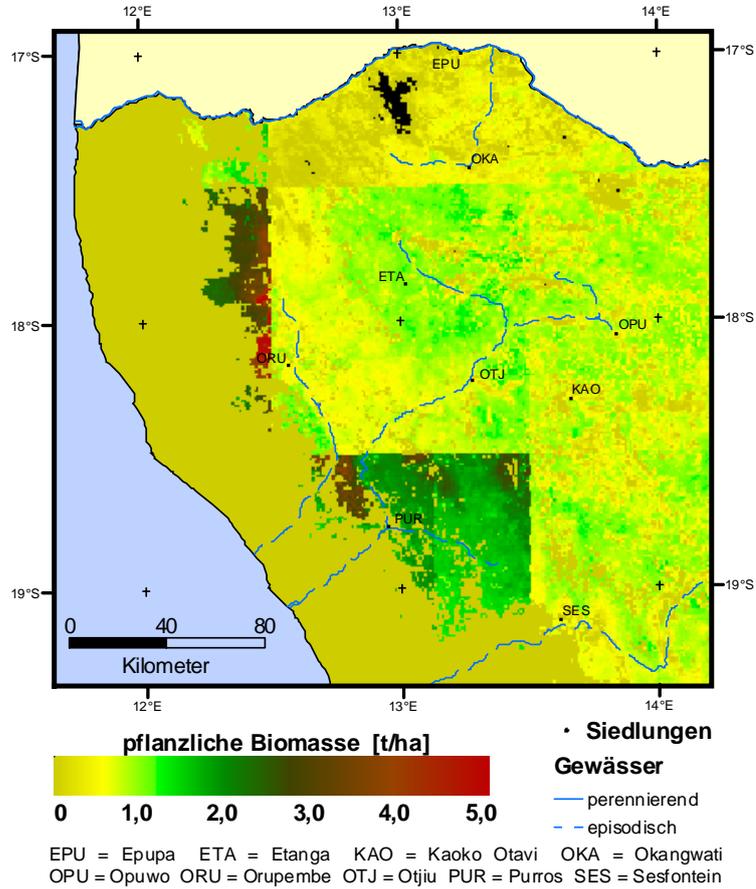


Abbildung 6.8: MODIS *MOD17A3*-Produkt für das Jahr 2002, das die NPP aus einem globalen Ansatz zur Biomasse darstellt. Deutlich sind Artefakte der Prozessierung zu erkennen. Die Daten der Produktivität sind auf einem sehr niedrigen Niveau angesiedelt. (Quelle: eigener Entwurf)

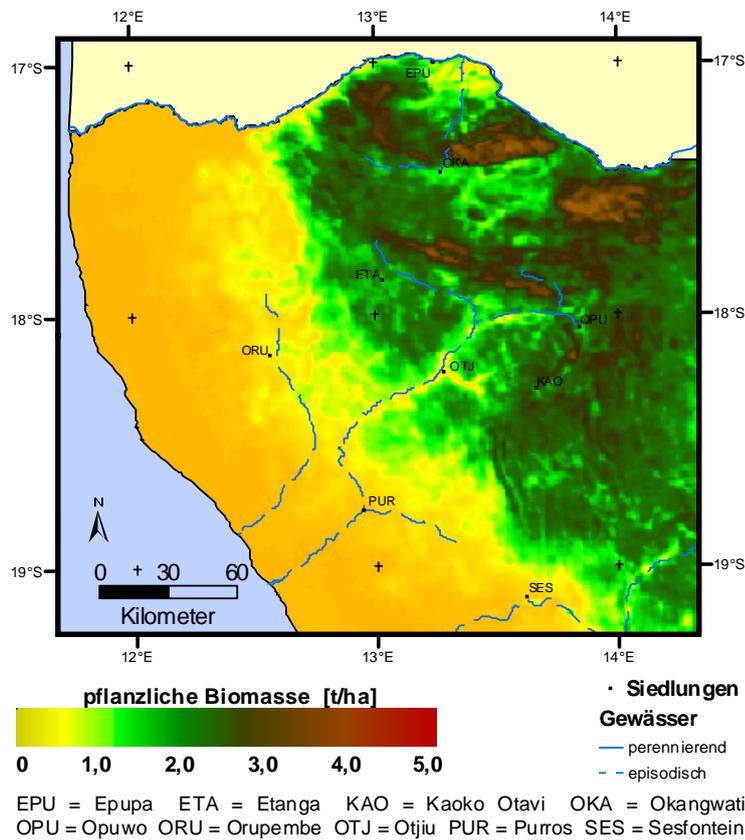


Abbildung 6.9: Biomassenproduktion berechnet nach C-FIX aus SPOT-VGT-1-Daten. Die Karte zeigt die akkumulierte Produktion des Jahres 2001 aus DMP-Daten nach den Ergebnissen des C-FIX-Modells. (Quelle: eigener Entwurf)

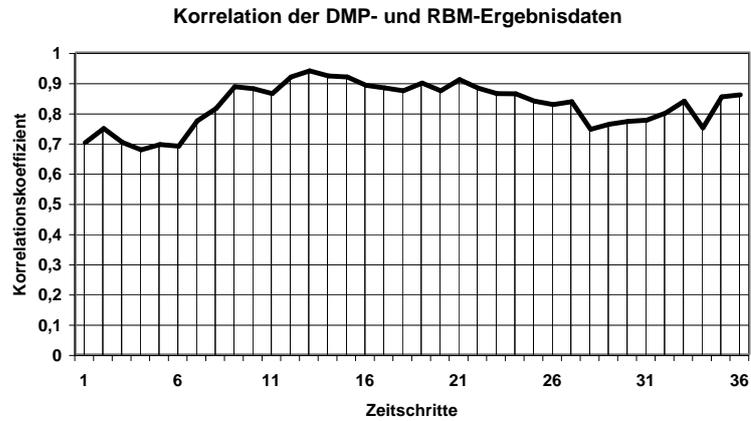


Abbildung 6.10: Korrelation der einzelnen Zeitschritte der DMP-Daten mit den RBM-Biomassedaten für 2001. (Quelle: eigener Entwurf)

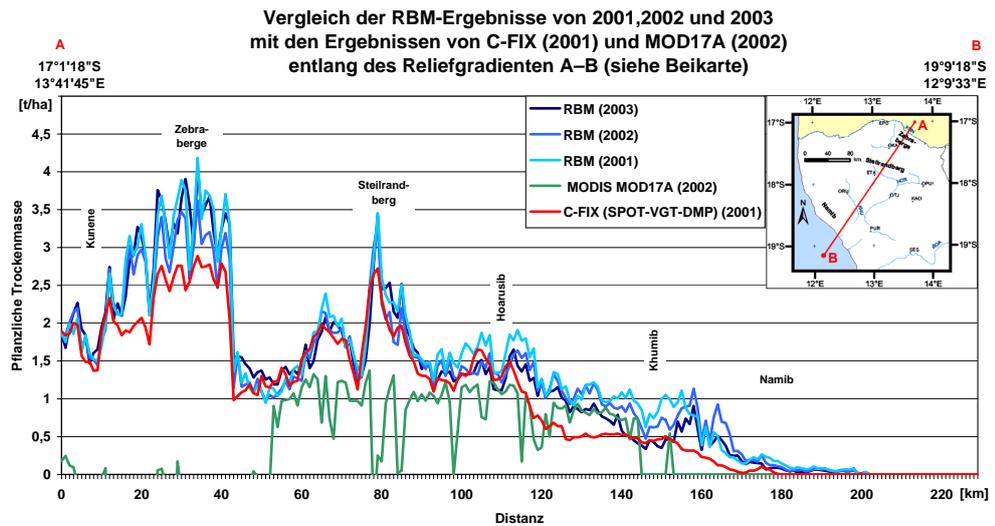


Abbildung 6.11: Vergleich der RBM-Ergebnisse (2001, 2002, 2003) mit C-FIX (2001) und *MOD17A* (2002) entlang eines Reliefgradienten A–B von NE nach SW (siehe Beikarte). (Quelle: eigener Entwurf)

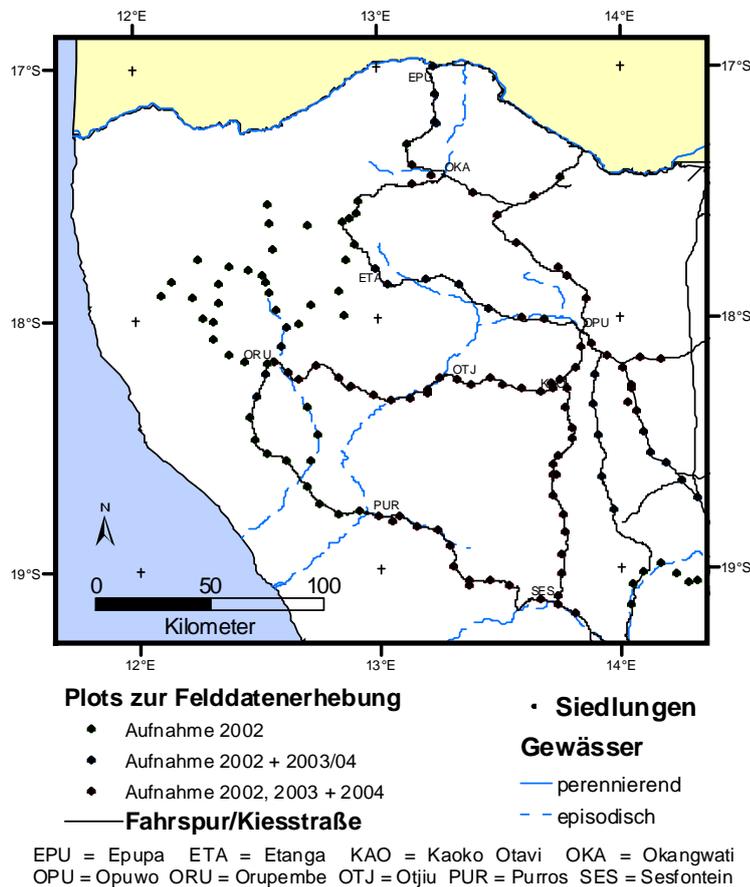


Abbildung 6.12: In der Karte sind die Plots der Felddatenerhebung verzeichnet. Einige der 146 Plots wurden in den Jahren 2002, 2003 und 2004 wiederholt aufgesucht, um die Veränderungen zwischen den Jahren zu identifizieren. (Quelle: eigener Entwurf)

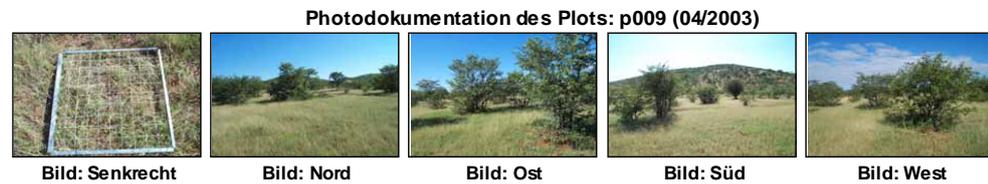


Abbildung 6.13: Photographischen Dokumentation des Plots p009, aufgenommen im April 2003. Je Plot wurden fünf Aufnahmen angefertigt. Die Felddaten können so zu einem späteren Zeitpunkt visuell überprüft und auf Plausibilität getestet werden. (Quelle: eigener Entwurf)



Abbildung 6.14: Ernteversuch zur Bestimmung der oberirdischen pflanzlichen Biomasse der Grasschicht. Dargestellt ist Plot P008. (Quelle: eigener Entwurf)

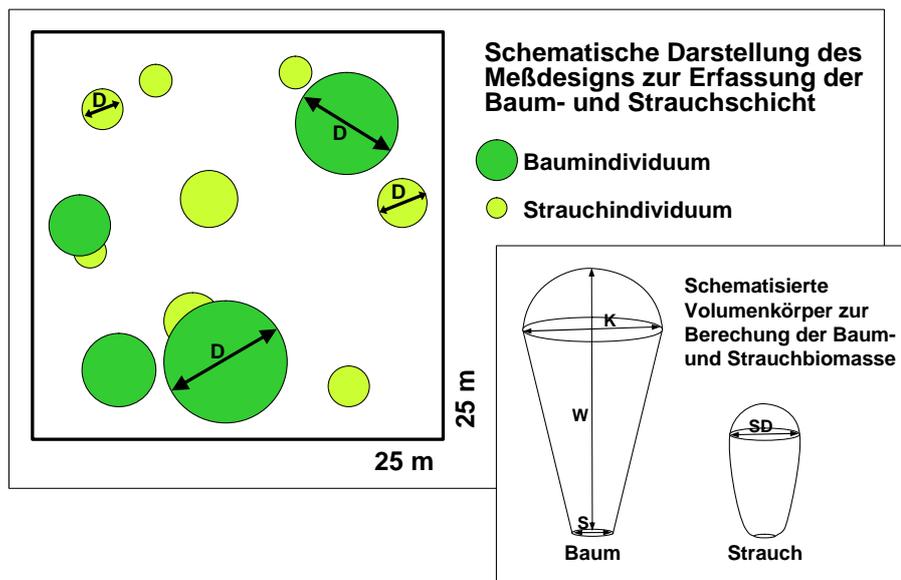


Abbildung 6.15: Schematische Darstellung der Erfassung der Baum- und Strauchdeckung. Häufig verdecken höhere Bäume einen Teil der Büsche; damit besteht Gefahr einer Überschätzung der Gehölzdeckung. (Quelle: eigener Entwurf)

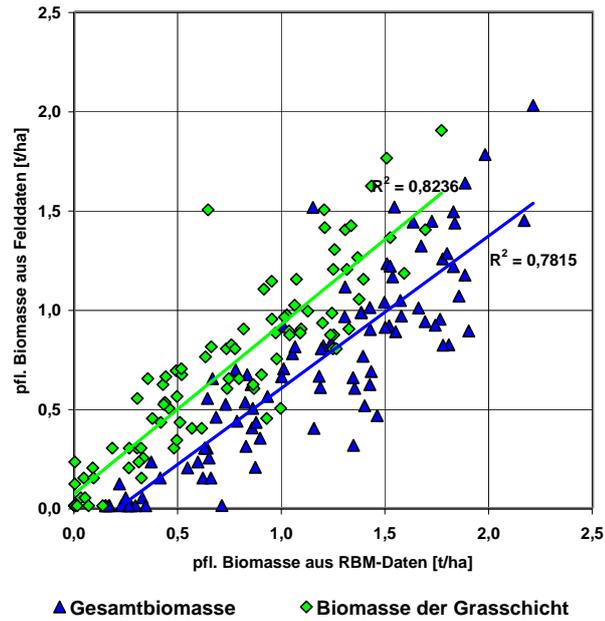


Abbildung 6.16: Vergleich der RBM-Ergebnisse mit gemessenen Felddaten für Grasbiomasse und pflanzliche Gesamtbiomasse im Jahr 2002. Für R^2 wurde hier das einfache Bestimmtheitsmaß angegeben. (Quelle: eigener Entwurf)

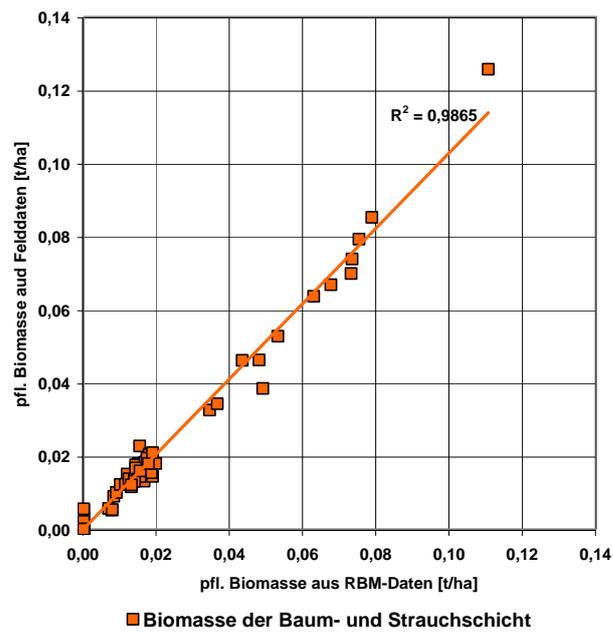


Abbildung 6.17: Vergleich der RBM-Ergebnisse mit gemessenen Felddaten für Gehölzbiomasse im Jahr 2002. Für R^2 wurde hier das einfache Bestimmtheitsmaß angegeben. (Quelle: eigener Entwurf)

7 Diskussion der Modellergebnisse

Das regionale Biomassemodell (RBM) Kaokoland liefert Ergebnisse, die eine zuverlässige Informationen über die Produktion von pflanzlicher Biomasse geben. Dabei wird sowohl der räumliche als auch der zeitliche Unterschied in der Modellierung durch die Verwendung von fernerkundlich erhobenen Daten beachtet.

Mit Hilfe von vier unterschiedlichen und unabhängigen Verfahren wurden die Ergebnisse des RBM verglichen. Dabei stellt sich das grundsätzliche Problem der Vergleichbarkeit von Flächendatensätzen: Es gibt, abgesehen von den Felddaten, die im Abschnitt 6.3.1 verwendet wurden, so gut wie keine detaillierten Angaben zur pflanzlichen Produktion im Untersuchungsraum. Diesem Umstand mußte auch bei der Entwicklung des Modells Rechnung getragen werden. Zugleich eröffnet dies allerdings auch die Chance für komplexere Umweltsysteme mit einem geringen Umfang an Bodendaten modellgestützte Lösungen zu entwickeln. Die Evaluation des Modells brachte folgende Erkenntnis:

- Der Vergleich der Modellergebnisse mit anderen, besonders globalen Modellansätzen, erzielte eine gute Übereinstimmung. Dabei ist besonders hervorzuheben, daß etablierte Modellansätze wie z.B. das CASA-Modell (FIELD, RANDERSON & MALMSTRÖM, 1995) wiederum gute Übereinstimmungen mit den RBM-Ergebnissen zeigen. Diese Übereinstimmungen treffen auch für die wenigen regionalen (z.B. MOLEELE et al., 2001) und lokalen Studien zu (siehe CASIMIR & BOLLIG, 2002).
- Der direkte Vergleich mit quasi konkurrierenden Datensätzen wie dem *MOD17A*-Daten von MODIS zeigt die Stärken des RBM deutlich auf. Bedingt durch den regionalen Ansatz werden die Besonderheiten des Untersuchungsraumes vom RBM deutlich besser erfaßt als bei den *MOD17A*-Daten. Dies mag vor allem in der globalen Ausrichtung des Konkurrenzprodukts begründet liegen. Der Umkehrschluß bedeutet allerdings, daß für eine eventuelle Übertragbarkeit des RBM-Konzepts auf andere Gebiete der Erdoberfläche jene inhärente Anpassungen nötig sind. Dies betrifft z.B. die empirischen Faktoren des LUE Konzepts oder auch jene bei der Fuzzifizierung der Einflußgrößen 'Relief' und 'Boden'.

- Bei dem Vergleich der RBM-Daten mit SPOT DMP-Daten aus dem C-FIX-Modell wird deutlich, daß globale Konzepte regional gut anwendbar sind. Die Daten eines global validierten Modellkonzepts erzeugen sehr gute Übereinstimmung mit den RBM-Ergebnissen, wie die Korrelationen der einzelnen Zeitschritte zeigen.
- Der Vergleich mit aufwendig erhobenen Felddaten zeigt dagegen, daß das RBM ausreichend 'Bodenhaftung' behalten hat, um sowohl den Vergleich mit globalen Datensätzen als auch mit sehr spezifischen lokalen Daten zu bestehen.

Damit erscheinen die Ergebnisse des Modells plausibel und bilden die realistische Produktion von pflanzlicher Biomasse ab. Somit können die Ergebnisse als sicher bezeichnet werden und als Eingangsdaten für weitere Analysen dienen.

Nach der Vorstellung der Ergebnisse und der erfolgreichen Validierung des Modells im vorangegangenen Kapitel sollen nun die Ergebnisse und ihre Interpretation im Vordergrund stehen. Unter anderem werden neue methodische Aspekte diskutiert und weitere Erkenntnisse zur Produktivität der Vegetation im nordwestlichen Namibia dargestellt.

7.1 Neue methodische Aspekte in der Biomassenmodellierung

Mit der ausschließlichen Nutzung von global und frei verfügbaren Daten zur Berechnung der pflanzlichen Produktion wird das Modell einem Anspruch nach globaler Verwendbarkeit gerecht. Dabei wird einschränkend eine eventuelle Anpassung an andere Vegetationzonen nötig sein. Dies betrifft z.B. die empirischen Daten der maximalen LUE. Mit der Nutzung dieser Datengrundlage sind aber auch die Voraussetzungen dafür geschaffen, daß das Modell nicht nur in wenigen hochspezialisierten Forschungsprojekten Eingang findet, sondern gegebenenfalls sogar von Nutzern außerhalb der Forschungscommunity angewendet wird. So wäre es denkbar und realisierbar, das Modellkonzept z.B. für die Abschätzung regionaler agrarer Leistungsfähigkeit in den sogenannten Entwicklungsländern anzupassen. Dem Nutzer entstünden nur geringe Kosten für die Datenbeschaffung und Berechnung. Ausreichend Zeit vorausgesetzt, ist die Anwendung des Modells auch auf leistungsschwächeren Computern kein Problem.

Eine weitere deutliche Neuerung betrifft nicht nur die Verwendung von frei verfügbaren Daten, sondern gleichermaßen die Nutzung von MODIS-Daten. Die-

ses neuartige Sensorsystem ist erst seit etwa fünf Jahren im Orbit und liefert seit ca. Mai 2000 Daten. Die erheblich feinere Abstimmung des Sensors, besonders zu Detektion von Vegetation, machen die MODIS-Daten zur idealen Basis für regionale, bis hin zu globalen Forschungsansätzen (USGS-NASA-DAAC, 2004b). Dabei konnte mit den Vergleich der RBM-Ergebnisse mit den *MOD17A*-Daten in Abschnitt 6.2.2 die Überlegenheit des RBM für regionale Analysen eindrucksvoll gezeigt werden. Die regionale Komponente wird vor allem durch die ausschließliche Verwendung jenen Eingangsdaten verbessert, deren räumlichen Auflösung entweder genau der Modellauflösung entspricht oder noch höher liegt. Die geringe räumliche Auflösung, die die Eingangsdaten der *MOD17A*-Daten aufweisen, ist ein entscheidender Faktor für die geringe Qualität dieser Daten.

Der regionale Maßstab ist durch die Nutzung von Satellitendaten mit einer räumlichen Auflösung von $1 \times 1 \text{ km}^2$ schon mit dem Start der NOAA-Satelliten im Jahre 1979 erschlossen wurden (ROLLER & COLWELL, 1986). Damit wird eine für die Landschaftsökologie wichtige Maßstabsebene erfaßt, die sich in ihrem Wirkungsgefüge deutlich von der lokalen wie der globalen Ebene abgrenzt (LESER, 1991). So lassen sich z.B. größere Vegetationseinheiten trotz der relativ hohen Heterogenität innerhalb der einzelnen Modellzelle erfassen. Ein erheblicher Vorteil bei der Nutzung des regionalen Maßstabs besteht darin, eben nicht von Lokal- oder Punktmodellen auf die Fläche schließen zu müssen, und umgekehrt, kein fehlerträchtiges Downscaling von globalen Daten versuchen zu müssen (MENZ, 1994). Die Bedeutung des regionalen Maßstabs für ökologische Forschung auf der Basis von Fernerkundungsdaten ist gerade in jüngerer Zeit besonders betont worden, seitdem auch die Rechenleistung moderner Computer für aufwendige Modellierungen ausreichend ist (REICH, TURNER & BOLSTAD, 1999; RUNNING et al., 2004).

Ein weiterer entscheidender Vorteil der Nutzung von MODIS-Daten liegt in der Verfügbarkeit von vorprozessierten MODIS-Datenprodukten. Diese werden nach einem einheitlichen Schema berechnet, global validiert und stehen mit präzisen Definitionen kostenlos zur Verfügung. Damit können viele potentielle Fehlerquellen, die bei dem ansonsten notwendigen Pre-Processing¹ entstehen, ausgeschlossen bzw. reduziert werden. Damit sind diese Datensätze und in deren Folge auch das RBM besonders geeignet, von Nutzern verwendet zu werden, die entweder keine oder nur geringe Kenntnisse von den Problemen der Satellitenfernerkundung

¹Im allgemeinen bezeichnet das Pre-Processing folgende Schritte: geometrische und radiometrische Korrektur, Wolkenmaskierung und atmosphärische Anpassung sowie die Kalibrierung der Daten.

haben oder sich nicht mit diesen Schwierigkeiten auseinandersetzen wollen.

Neben den oben diskutierten, allgemeinen methodischen Neuerungen sind in dem Modellkonzept eine Reihe Detailverbesserungen im Vergleich zu früheren Ansätzen der Biomassemodellierung realisiert. Dies betrifft in erster Linie die Ableitung der PAR, des Wasserstreßskalars und die Parametrisierung von Boden- und Reliefeinflüssen.

Die photosynthetisch aktive Strahlung wird in dem vorliegenden Konzept mit Hilfe eines mathematischen Modells abgeleitet. Dazu wird der Anteil der Globalstrahlung in Abhängigkeit von der geographischen Breite, des Reliefs und dem Zeitpunkt der Modellberechnung nach SWIFT (1976); SWIFT & KNOERR (1973) ermittelt (siehe Kapitel 4.2). Diese Berechnung, die als Eingangsdatensatz lediglich ein digitales Geländemodell und einen gegebenen Zeitschritt benutzt, ist somit von den insgesamt in das RBM einfließenden MODIS-Satellitendaten unabhängig. Damit lassen sich Überlagerungs- und Verstärkungseffekte ausschließen, die bei ausschließlich satellitengestützten Modellansätzen zu Problemen führen können, da in diesen Konzepten auch die PAR aus Fernerkundungsdaten abgeleitet wird (z.B. SEAQUIST, OLSSON & ARDÖ, 2003).

Während viele ältere Modellansätze den Einfluß von pflanzenverfügbarem Wasser mittels einer Modellierung der Bodenfeuchte zu quantifizieren versuchen, ist dies wegen fehlender Klimadaten, die Aufschluß über Niederschläge geben könnten, in Nordwestnamibia nicht möglich. Das RBM gleicht dieses Defizit an klimatischer Information aus durch die Berechnung und Miteinbeziehung des Wasserstreßskalars. Dazu wird die effektive Evapotranspiration der potentiellen gegenübergestellt. In neuesten Ergebnissen von JIANG & ISLAM (1999) und besonders NISHIDA et al. (2003) wurde die Abschätzung der potentiellen Evapotranspiration aus mittel aufgelösten Fernerkundungsdaten vorgestellt. Dieser Ansatz wird mit dieser Arbeit zum ersten Mal mit MODIS-Daten kombiniert und erlaubt somit eine flächenhafte Abschätzung der potentiellen Evapotranspiration. Ebenfalls aus MODIS-Daten wird über die *MOD05*-Daten die aktuelle Evapotranspiration ermittelt. Zusammen dienen diese beiden Parameter der Erfassung des Wasserstressses.

Auch die Verwendung der *MOD44*-Daten zur Charakterisierung der Pflanzenbedeckung stellt einen neuen Aspekt bei der Erfassung der pflanzlichen Produktion dar. Während ältere Ansätze meist externe Klassifizierungen der Vegetation benutzen, wird im RBM-Konzept ein vorbereitetes Datenprodukt verwendet (HANSEN et al., 2002), das die prozentuale Verteilung von vegetationslosem Boden, Gras- und Baumschicht beinhaltet. Damit lassen sich über die Pflanzenfunk-

tionstypen wichtige Vegetationseinheiten wie Savannen, Gras- und Waldländer oder Buschland stratifizieren. Zugleich fließt das Datenprodukt in das RBM ein, indem es zentrale Funktion für die Zusammensetzung der LUE übernimmt.

Desweiteren werden auch bei der Ableitung der LUE neuere Ansätze der Modellierung angewendet. Dies betrifft z.B. die Kombination von Relief- und Bodeneinfluß über Fuzzy-Operatoren, die auf die jährliche Ableitung von ε_{max} wirken. Dazu werden die Einflußgrößen *Höhe*, *Hangneigung*, *Bodenart* und *C/N-Verhältnis* in dimensionslose Intervalle von 0-1 transformiert. Diese werden über unterschiedliche Fuzzy-Operatoren miteinander verknüpft und verändern dadurch die potentielle LUE. Mit der Anwendung dieser Fuzzy-Logik lassen sich so unscharfe und indirekte Einflüsse im Modell abbilden, die sich z.B. aus unterschiedlichen Standorten der Pflanzen ergeben (ZIMMERMANN, 1991).

Das regionale Biomasse-Modell präsentiert sich damit als eine gelungene und modernisierte Regionalisierung von etablierten Konzepten. Dabei wurde das generelle Modellkonzept nach den Theorien von MONTEITH (1972) und POTTER et al. (1993) aufgebaut, doch wurde der physikalisch basierte Ansatz jenes Modells, der den Grundprinzipien der Photosynthese folgt, um die konsequente Nutzung von Fernerkundungsdaten erweitert. Diese Komponente unterscheidet das RBM Kaokoveld von vielen anderen NPP-Modellen, die entweder nur teilweise oder überhaupt nicht mit Fernerkundungsdaten arbeiten. Zugleich wurde mit der Verwendung von MODIS-Datenprodukten auf ein neues und modernes Sensorsystem gesetzt, das für die kommenden Jahrzehnte ein "Flagschiff der Erdbeobachtung" (COHEN & JUSTICE, 1999, S. 3) darstellen wird. Somit werden dem RBM auch in Zukunft hochwertige und kostenfreie Daten zur Verfügung stehen. Dies gestattet eine Nutzung des RBM Kaokoveld auch für längere, zukünftige Zeiträume über den Rahmen dieser Arbeit hinaus.

Mit einer räumlichen Auflösung von $1 \times 1 \text{ km}^2$ und dem dekadischen Ansatz des Modells wird zusätzlich noch die Möglichkeit eröffnet – mit geringen Anpassungen der Vorverarbeitung – retrospektive NOAA AVHRR-Daten zur Rekonstruktion pflanzlicher Produktion vergangener Jahrzehnte einzusetzen.

7.2 Nutzungspotential der Ergebnisse für das Verständnis der Biomasseproduktion in Nordwestnamibia

Neben den methodischen Neuerungen des Modellansatzes soll diese Arbeit gleichermaßen auch einen Beitrag sowohl zum Problemkomplex "Weideökologie" als auch zum Gesamtkomplex "Global Change" leisten. Da die Ergebnisse des RBM Kaokoveld nach der in Abschnitt 6.2 durchgeführten Evaluation in ihrer räumlichen und zeitlichen Ausprägung für plausibel und gültig befunden wurden, können sie nun inhaltlich diskutiert werden.

Mit den Ergebnissen des RBM Kaokoveld ließe sich gemäß der in Kapitel 1.1 formulierten Forderung bei Kenntnis des raum-zeitlichen Wanderungsverhaltens von Herbivoren eine Weidebilanz berechnen. Damit könnte ein Beweidungsmodell erstellt werden, mit dem Fragen um Nachhaltigkeit eines Weidesystems, bzw. um Vulnerabilität der Herdenhalter hinsichtlich schwankender Futtererträge abgeschätzt werden zu können (MENZ & RICHTERS, 2004).

Obwohl sich das Modellkonzept auf den regionalen Maßstab konzentriert, lassen sich auch kleinräumige Prozesse wie Degradation und Bodenerosion erfassen. Zwar sind diese Prozesse im Modellgefüge nicht direkt erkennbar, doch lassen sich beispielsweise durch den Vergleich der Ergebnisse mit der potentiellen Produktion Defizite feststellen, die in ihrer räumlichen Ausprägung als Proxy für

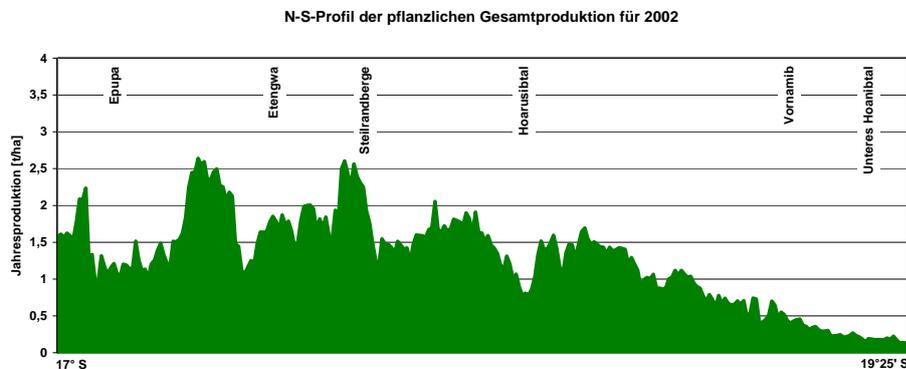


Abbildung 7.1: N-S-Profil der pflanzlichen Gesamtproduktion für 2002 für die Länge 13°10' Ost bei Otjiu (Hoarusibital). Infolge starker Beweidung im Tal wird dort eine deutlich niedrigere Produktion erreicht als in dem Vergleichsgebiet Etengwa. (Quelle: eigener Entwurf)



Abbildung 7.2: Mittleres Hoarusibtal bei Otjiu. Nur durch die Gehölzvegetation erreicht das unter hohem Weidedruck liegende Gebiet eine geringe Produktion an pflanzlicher Biomasse. (Photo: J. Richters, 05/2002)

Degradationsprozesse dienen können.

In Abbildung 7.1 wird ein N-S-Profil der pflanzlichen Gesamtproduktion für das Jahr 2002 dargestellt. Deutlich zu erkennen sind dabei die schnell wechselnden Bedingungen, die eine kleinräumige Änderung der Produktion bedingen. Grundsätzlich fällt die Produktion gen Süden ab; die Profillinie erfasst auch die Randbereiche der Namib. Deutlich zeichnet sich der leichte Anstieg der Produktion im unteren Hoanibtal ab, das durch Pflanzenwachstum im Bereich von Amspoort ausgelöst wird. Dieser schon tief in der Namib liegende Talgebiet wird in manchen Jahren den abgehenden Wassern des Hoanib erreicht und diese sorgen so für den Grünschub. Ein deutlicher Einbruch im Wachstum ist dagegen im Hoarusibtal bei der Siedlung Otjiu zu erkennen. Dieser ist übrigens auch in Abbildung 6.2 (S. 142) festzustellen. Um Otjiu fällt das Pflanzenwachstum um etwa 0,7 t/ha gegenüber der Produktion an den Talflanken ab. Theoretisch müsste die Produktion im Tal aufgrund der geringen Hangneigung, der unterdurchschnittlichen Geländehöhe und den tiefgründigen Böden stärker ausfallen als in den umliegenden Bergländern. Doch aufgrund der starken Beweidung des Tals ist die Degradation der Vegetation so weit fortgeschritten, daß nur noch eine geringe Produktion stattfindet. Im Vergleich dazu scheint das ähnlich strukturierte Gebiet um Etengwa noch nicht so sehr von Degradation betroffen zu sein. Aus Geländebefunden kann diese Erklärung für die geringe Produktion im Hoarusibtal

bestätigt werden, wie Abbildung 7.2 verdeutlicht. Auf dem Photo ist die Situation im Mai 2002 im mittleren Hoarusibtal bei Otjiu dokumentiert. Abgesehen von den Gehölzen zeigt sich das Gebiet fast völlig vegetationslos und belegt somit die geringe Produktion. In Feldbeobachtungen (Stand: Mai 2002) wurden im Bereich Otjiu mehrere große Rinderherden (jeweils ca. 100-180 Tiere) und etliche Kleintierherden aus Schafen und Ziegen gezählt (insgesamt ca. 2500 Tiere), die zu einer nachhaltigen Überweidung des Gebiets führen. Zudem verfestigt sich immer mehr der Eindruck, daß die in diesem Gebiet lebenden Himba ihre traditionellen Nutzungsmuster weitgehend aufgegeben und sich in permanenten Siedlungen niedergelassen haben. Dies führt verständlicherweise zu einer Übernutzung der natürlichen Ressourcen.

Neben dem gewachsenen Verständnis der Biomasseproduktion in einem semi-ariden bis ariden Ökosystem und der Möglichkeit, das RBM Kaokoveld um eine weideökologische Komponente zu erweitern, erlaubt die Abschätzung der Produktion mit Methoden der Fernerkundung einen Zugang zu dem Phänomen des globalen Wandels auf regionaler Ebene. Dies stellt nach WATSON et al. (1997) einen bedeutenden Schritt für das Verständnis der globalen Klimaveränderung dar. Dabei ist es besonders für den afrikanischen Kontinent wichtig, die Prozesse der natürlichen wie auch der vom Menschen beeinflussten Ökosysteme besser zu verstehen. So lassen sich z.B. mit Hilfe von besser angepassten GCM wesentlich genauere Vorhersagen zu Veränderungen der Landoberfläche treffen. Aufgrund der hohen Abhängigkeit der afrikanischen Bevölkerung von den natürlichen Ressourcen ist eine derartige Verbesserung dringend geboten. In Rahmen des RBM wird eben nicht nur die raum-zeitliche pflanzliche Biomasse berechnet, sondern die für die Berechnung notwendigen Zwischenprodukte, wie die solare Einstrahlung oder Verdunstung, stehen ebenfalls zur Verfügung. Diese Zwischenergebnisse lassen sich wiederum ideal als Eingangsdatensätze für andere, ggf. weitergehende Modellierungen einsetzen.

8 Zusammenfassung

Mit dem regionalen Biomassemodell (RBM) Kaokoveld ist es erstmals möglich, für regionale Untersuchungsräume umfassend und zeitlich hoch aufgelöst die Produktion der pflanzlichen Biomasse zu bestimmen. Der Vergleich mit früheren Ansätzen zeigt, daß der spezifische Vorteil des RBM in einer guten regionalen Anpassung liegt, und die pflanzliche Produktivität sicher erfaßt wird. Infolge der Verwendung mittelaufgelöster Satellitendaten lassen sich so flächendeckende Aussagen auch für Gebiete ableiten, die ansonsten für die Forschung nicht erreichbar wären.

Der Ansatz der Modellierung basiert auf bekannten Prinzipien zur Verknüpfung von spektralen Satellitenmessungen mit den physikalischen Grundlagen der Photosynthese. Dadurch wird eine flächenhafte Aussage zur Produktivität innerhalb eines beliebigen Zeitfensters möglich. Im vorliegenden RBM wurde ein dekadischer Zeitschritt gewählt, der die Phänologie der Vegetation angemessen berücksichtigt, zudem eine akzeptable Rechenzeit des Modells erlaubt und darüber hinaus die Nutzung von NOAA AVHRR-Daten für eine retrospektive Berechnung der Produktivität der letzten Jahrzehnte möglich macht. Die Neuerungen dieser Arbeit liegen vor allem in den methodischen Ansatzpunkten.

Zum einen wird mit dem RBM ein Modellansatz vorgelegt, der ausschließlich Satellitendaten und frei erhältliche Daten zur Berechnung nutzt. Damit wird das Modell – im Gegensatz zu früheren Ansätzen – unabhängig von Felddaten und erlaubt so die Beobachtung von Räumen, die nur sehr schwer zugänglich sind. Zugleich ist eine Modellierung durch den möglichen Verzicht von Feldaufenthalten erheblich preisgünstiger durchzuführen.

Zum anderen werden durch die Nutzung von MODIS-Daten neue Wege für die Verarbeitung von Satellitendaten beschritten. Da der USGS als Betreiber des Sensorsystem TERRA-MODIS die gewonnenen Daten in Form von definierten und validierten Datenprodukten vertreibt, ist die Anwendungsentwicklung erheblich verbessert worden. Dennoch wurde über die grundlegende Prozessierung des USGS hinaus eine umfangreiche Vorverarbeitung der Daten notwendig, um aus den täglichen MODIS-Daten geometrisch und zeitlich richtige 10-Tages-

Datenkomposite abzuleiten.

Das Ergebnis des RBM Kaokoveld ist die gebildete pflanzliche Biomasse pro dekadischen Zeitschritt. Diese wird als ein Ergebnis abgelegt. Zusätzlich wird die akkumulierte pflanzliche Biomasse über den Modellzeitraum berechnet.

Die Ergebnisse des Modells wurden mit unabhängigen Verfahren überprüft, auch wenn dies wegen der Abgeschlossenheit des Untersuchungsraumes ein schwieriges Unterfangen war. Als Ergebnis kam dabei nicht nur eine gute Übereinstimmung der Modellergebnisse mit global etablierten Konzepten wie CASA oder C-FIX heraus, sondern auch eine besonderes gelungene Anpassung an die regionale Maßstabebene. Dies wurde beim Vergleich der RBM-Ergebnisse mit den global berechneten *MOD17A*-Daten deutlich.

Das RBM stellt somit einen validierten Datensatz und eine zugehörige Methodik zu Verfügung, die vielfältig nutzbar ist. Ein Anwendungsbereich ist beispielsweise für die in Kapitel 1.1 bereits angesprochene Weidebilanz. Dabei steht die Ernährung der Weidetiere natürlich im Vordergrund. Jedoch gibt z.B. ein genau ermittelter Futtermangel Indizien darüber, welche Handlungsoptionen der pastoralnomadischen Bevölkerung im Kaokoveld bleiben. Dabei liegt der spezifische Vorteil des RBM in der präzisen raum-zeitlichen Verfügbarkeit der Information, die bei einer globalen Betrachtung des Untersuchungsraumes, wie sie z.B. von CASIMIR & BOLLIG (2002) für das Gebiet um Epupa durchgeführt wurde, verloren geht. Somit leistet das RBM auch einen Beitrag zur Vorhersagbarkeit von Landschaftsveränderungen.

Ein weiterer Anwendungsbereich für das RBM ergibt sich im Kontext des globalen Wandels. Die Produktion von Biomasse hat nicht nur auf regionaler Ebene Bedeutung, sondern kann darüber hinaus auch Hinweise auf großräumigere Veränderungen liefern. Eine genaue raum-zeitliche Analyse der Modellergebnisse kann Erkenntnisse über langfristige Veränderungen der Vegetation liefern. Somit wird es möglich sein, Wandel und Veränderungen im Sinne von "Global Change" zu rekonstruieren.

8.1 Ausblick für zukünftige Forschungsarbeiten

Die Berechnung des RBM liefert anschauliche Ergebnisse und durch die Validierung sind diese auch gesichert. Damit ist das Ziel dieser Arbeit erreicht. Trotzdem bleiben einige Aspekte unberücksichtigt, die im folgenden diskutiert und als Ansatzpunkte für zukünftige Forschungsarbeiten dienen können.

Vorrangiges Ziel für eine Erweiterung des Modellansatzes sollte eine nachhalti-

ge Erfassung von Weidebilanzen darstellen. Damit ließen sich sowohl Produktion als auch Konsumption abbilden und tiefere Erkenntnisse nicht nur über Veränderungen des Naturraums, sondern auch über die Interaktion desselben mit dem Menschen gewinnen. Dabei kann dann unter Umständen auch die Frage nach der Ursache von Landschaftsveränderungen geklärt werden. Diese können ja zum einen durch menschliche Nutzung induziert sein, zum anderen aber auch ein Resultat des globalen Klimawandels darstellen. Zugleich eröffnet dies dann auch die Möglichkeit, Handlungsoptionen der pastoralnomadischen Bevölkerung zu simulieren, insofern als unterschiedliche Nutzungssysteme im Modell getestet werden. Besonders interessant ist dies vor dem Hintergrund jüngerer politischer Veränderungen in Namibia seit der Unabhängigkeit 1990. Als Folge dieser Veränderungen findet eine Öffnung des Kaokolandes statt und damit verbunden eine zunehmende Produktion von Weidetieren für den nationalen und internationalen Markt. Dies wird enorme Folgen für die traditionellen Nutzungsmuster haben. Eine Abschätzung dieser Auswirkungen und eventuell Minderung negativer Auswirkungen kann vielleicht ein integriertes Weidebilanzmodell vornehmen, das sowohl die Produktion und den Naturraum als auch die Nutzung mit einer hohen räumlichen wie zeitlichen Auflösung betrachtet.

Bislang ungelöst ist jedoch die Frage, wie sich ein solches Modell methodisch implementieren läßt, obwohl das RBM Kaokoveld alle Programmschnittstellen für eine Koppelung mit einem Beweidungsmodell bietet. Doch ist die raum-zeitliche Verteilung der Weidetiere ein bislang ungelöstes Problem. Die absolute Zahl der Herbivoren im Untersuchungsgebiet ist zwar bekannt, doch deren Position zu einem bestimmten Zeitpunkt läßt sich nur mit Hilfe eines statistischen Regelwerks und einigen Fuzzy-Operatoren bewerkstelligen. Ob die daraus ermittelte Verteilung dann allerdings der realen Situation entspricht, kann nur sehr schwer sichergestellt werden.

Ein deutlich geringeres Forschungsproblem stellt dagegen der Test der Skalenabhängigkeit des RBM dar. Auch wenn aus generellen Überlegungen eine Berechnung des RBM mit einer höheren räumlichen Auflösung problemlos erscheint, muß dieser Schritt noch gründlich getestet werden. Sollte eine Transformation des Ansatzes auf eine räumliche Auflösung von $500 \times 500 \text{ m}^2$ möglich sein, ergeben sich eventuell Vorteile bei der Beschreibung und Erkennung von kleinräumigen Strukturen. Damit ließen sich noch genauere Prognosen für einen Landschaftswandel erstellen.

Vor dem Hintergrund eines sich immer rascher verändernden Planeten Erde muß die Bedeutung der Umweltforschung betont werden. Nur wenn es gelingt,

den Prozeß dieser Veränderung zu verstehen, kann die Menschheit darauf reagieren und Lösungen zur Anpassung finden. Dabei kommt der Fernerkundung und ihren Methoden eine besondere Bedeutung zu: "Ganz sicherlich ist die Beobachtung nach wie vor eine wichtige Facette der Arbeit des UNEP. Es geht um eine möglichst objektive Erfassung des Zustandes der Welt mit Blick auf die ökologischen Ressourcen. Aber schon seit längerer Zeit ist nicht nur die Analyse und das Erkennen von Fehlentwicklungen Aufgabe dieser Institution, sondern auch die Suche nach Antworten, die Einleitung von Maßnahmen und die Entwicklung von Instrumenten gegen solche Fehlentwicklungen" (Klaus Töpfer, Executive-Director of the United Nations Environment Programme, UNEP).

Literaturverzeichnis

- Abel, H. (1954):** Beiträge zur Landeskunde des Kaokoveldes (Südwestafrika).
In: Deutsche Geographische Blätter,, Nr. 47, S. 7–123. 10
- Abel, H. (1959):** Völkerkundlich-kulturgeographische Beobachtungen in
Südwestafrika und Südafrika (1952, 1957). In: Veröffentlichungen aus dem
Überseemuseum Bremen,, Nr. 1/3, S. 165–187. 10
- Aber, J.D. (1992):** Terrestrial ecosystems. In: **K.E. Trenberth (Hrsg.):**
Climate system modelling. Cambridge, UK: Cambridge University Press,
S. 173–200. 52
- AG-Boden; Rohstoffe, Bundesanstalt für Geowissenschaften und
(Hrsg.) (1994):** Bodenkundliche Kartieranleitung. 4. Auflage. Hannover:
E. Schweizerbart'scher Verlag. 134
- Ahl, C. et al. (1996):** Aspekte und Grundlagen der Bodenkunde. Göttingen:
Eigenverlag des Instituts für Bodenkunde. 75, 109
- Alberda, T.H. (1977):** Possibilities of dry matter production from foliage plants
under different climatic conditions. In: Proceedings of the XIII. International
Grassland Congress. Leipzig, S. 61–69. 124
- Allen, R.G. et al. (1998):** Crop evapotranspiration - Guidelines for computing
crop water requirements. In: FAO Irrigation and drainage paper. FAO. 78
- Arntzen, J. et al. (1996):** Climate Change and Southern Africa: An exploration
of some potential impacts in the SADC region. World Wildlife Fund,
Climatic Research Unit – Technischer Bericht. 35
- Asrar, G., R.B. Myneni & B. Choudhury (1992):** Spatial Heterogeneity
in vegetation canopies and remote sensing of absorbed photosynthetically
active radiation: A modelling study. In: Remote Sensing of Environment,
41, S. 85–103. 57

- Bank, M. (2004):** Fuzzy-Logik. \langle URL: <http://www.informatik.uni-ulm.de/ni/Lehre/SS04/ProsemSC/ausarbeitungen/Bank.pdf> \rangle – Zugriff am 28.09.2004. 71
- Barnes, W.L., T.S. Pagano & V.V. Salomonson (1998):** Prelaunch characteristics of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on EOS-AM1. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36, Nr. 4, S. 1088–1100. 87
- Bastiaanssen, W.G.M. (1995):** Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain - A remote sensing approach under clear skies in mediterranean climates. Dissertation, Winand Staring Center, Wageningen, The Netherlands. 78
- Baumann, H. (1975):** Die Südwest-Bantu-Provinz. In: **H. Baumann (Hrsg.):** Die Völker Afrikas und ihre traditionellen Kulturen. Wiesbaden: Fritz Steiner Verlag, S. 473–511. 26
- Becker, T. (2000):** Muster der Vegetation und ihre Determinanten in einem desertifikationsgefährdeten Raum im Nordwesten Namibias (Kaokoland). Dissertation, Universität zu Köln, Köln. 10, 15, 17, 23, 43, 126, 136
- Becker, T. (2002):** Zur Phytogeographie des Kaokolandes. In: **M. Bollig, B. Brunotte & T. Becker (Hrsg.):** Interdisziplinäre Perspektiven zu Kultur- und Landschaftswandel im ariden und semiariden Nordwest Namibia. Selbstverlag Geographie Uni Köln. 21
- Becker, T. & N. Jürgens (2002):** Vegetationsökologische Untersuchungen im Kaokoland, Nordwest-Namibia. In: **M. Bollig, B. Brunotte & T. Becker (Hrsg.):** Interdisziplinäre Perspektiven zu Kultur- und Landschaftswandel im ariden und semiariden Nordwest Namibia. Selbstverlag Geographie Uni Köln. 20
- Behrens, R. von der (2001):** Gartenbau der Himba: Ackerbauliche Bodennutzung einer pastoralnomadischen Gruppe im Nordwesten Namibias. Diplomarbeit, Institut für Völkerkunde der Universität zu Köln, Köln. 28
- Beierkuhnlein, C. & A. Schulte (2000):** Plant Functional Types: Einschränkungen und Möglichkeiten funktioneller Klassifikationsansätze in der Vegetationsökologie. In: **K. Jax (Hrsg.):** Funktionsbegriff und Unsicherheit in der Ökologie. Frankfurt/M.: Peter Lang, S. 45–64. 24

- Berry, C. & B. Loutit (2000):** Bäume und Sträucher im Etosha Nationalpark und in Nord- und Zentral-Namibia. Namibia Wissenschaftliche Gesellschaft. 23
- Blümel, W.D., K. Hüser & B. Eitel (2000):** Uniab-Schwemmfächer und Skelettküsten-Erg: Zusammenspiel von äolischer und fluvialer Dynamik in der nördlichen Namib. In: Regensburger Geographische Schriften,, Nr. 33, S.37–56. 10
- Bollig, M.:** Mündliche Mitteilung. 26
- Bollig, M. (1997a):** Contested Places. Graves and Graveyards in Himba Culture. In: *Anthropos*, 92, S.35–50. 25, 30
- Bollig, M. (1997b):** Risk and Risk Minimization among Himba Pastoralists in North- Western Namibia. In: *Basler Afrika Bibliographien.* 23, 25
- Bollig, M. (1997c):** "When the war came the cattle slept..." Himba Oral Traditions. Köln: Institut für Völkerkunde der Universität zu Köln. 25
- Bollig, M. (1999):** Risk management in a hazardous environment. Comparative study of two pastoral societies (Pokot, North-West Kenya, and Himba, North-West Namibia). No address in, Unpubl. Habilitation Thesis, University of Cologne, Köln.. 32
- Bollig, M. (2002):** Produktion und Austausch - Grundlagen der pastoralen Ökonomie Nordwest-Namibias. In: **M. Bollig, B. Brunotte & T. Becker (Hrsg.):** Interdisziplinäre Perspektiven zu Kultur- und Landschaftswandel im ariden und semiariden Nordwest Namibia. Selbstverlag Geographie Uni Köln, Kölner Geographische Arbeiten 77, S.189–206. 5, 26, 27, 28, 29, 30, 31
- Bollig, M., E. Brunotte & T. Becker (2002):** Der Sonderforschungsbereich 389 und die Schwerpunktregion 'Kaokoland' - Perspektiven und forschungshistorische Bedingungen. In: **M. Bollig, B. Brunotte & T. Becker (Hrsg.):** Interdisziplinäre Perspektiven zu Kultur- und Landschaftswandel im ariden und semiariden Nordwest Namibia. Selbstverlag Geographie Uni Köln, Kölner Geographische Arbeiten 77, S.1–12. 9, 10
- Bollig, M. & H. Lang (1998):** Demographic Growth and Resource Exploitation in two pastoral Communities. In: *Nomadic People*, 3, S.16–34. 25

- Bollig, M. & A. Schulte (1999):** Environmental Change and Pastoral Perception. Degradation and Indigenous Knowledge in two pastoral Communities. In: *Human Ecology*, 27, S. 493–514. 4, 25, 26, 30, 31
- Bollig, M. & R. Vogelsang (2002):** Besiedlungsgeschichte und rezente Siedlungsgeschichte im Nordwesten Namibias. In: **M. Bollig, B. Brunotte & T. Becker (Hrsg.):** Interdisziplinäre Perspektiven zu Kultur- und Landschaftswandel im ariden und semiariden Nordwest Namibia. Selbstverlag Geographie Uni Köln, Kölner Geographische Arbeiten 77, S. 145–158. 25, 26, 27, 29
- Bond, W.J., G.F. Midgley & F.I. Woodward (2003):** What controls South African vegetation - climate or fire? In: *South African Journal of Botany*, 69, S. 79–91. 4, 124
- Boysen-Jensen, J. (1932):** Die Stoffproduktion der Pflanzen. Jena: G. Fischer. 43
- Briemle, G. (1998):** Aulendorfer Extensivierungsversuch: Ergebnisse aus 10 Jahren Grünlandausmagerung. In: *Landinfo*, Nr. 8, S. 1–7. 75
- Brunotte, E. & H. Sander (2002):** Die Morphosequenz des Randschwellenbergländes im zentralen Kaokoland von der Kalkkrustenstufe zum Namibbrand anhand eines Transektes. In: **M. Bollig, B. Brunotte & T. Becker (Hrsg.):** Interdisziplinäre Perspektiven zu Kultur- und Landschaftswandel im ariden und semiariden Nordwest Namibia. Selbstverlag Geographie Uni Köln. 9, 18, 19, 20, 34
- Burman, R. & L. O. Pochop (1994):** Evaporation, Evapotranspiration and Climatic Data. Amsterdam: Elsevier Science B. V.. 78
- Businger, J. A. (1956):** Some remarks on Penman's equations for the evapotranspiration. In: *Journal of Agriculture Science* 4, Nr. 77. 78
- Casimir, M. & M. Bollig (2002):** Ökologische Grundlagen der mobilen Weidewirtschaft der Himba in Nord-Namibia. In: **M. Bollig, B. Brunotte & T. Becker (Hrsg.):** Interdisziplinäre Perspektiven zu Kultur- und Landschaftswandel im ariden und semiariden Nordwest Namibia. Selbstverlag Geographie Uni Köln. 125, 126, 135, 157, 166

- Caughley, G., N. Sheperd & J. Short (1987):** Kangaroos: their ecology and management on the sheep rangelands of Australia. New York: Cambridge University Press. 33
- Chappell, A. & C.T. Agnew (2004):** Modelling climate change in West African Sahel rainfall (1931-90) as an artifact of changing station locations. In: International Journal of Climatology, Nr. 24, S. 547-554. 36
- Christiansen, J. E. (1968):** Pan evaporation and evapotranspiration from climatic data. In: Journal of Irrigation and Drainage Division, ASCE, 94, S. 243-265. 78
- Ciret, C. (2002):** Modelling and Prediction of Terrestrial Biosphere. In: **G. Peng, L.M. Leslie & Y. Shao (Hrsg.):** Environmental Modelling and Prediction. Berlin: Springer. – Kapitel 8, S. 317-344. 47, 48, 49, 50, 52, 63
- CNES (1994):** VEGETATION Newsletter, October 1994. [⟨URL: http://vegetation.cnes.fr/vgtnews/vgtnews01.html⟩](http://vegetation.cnes.fr/vgtnews/vgtnews01.html) – Zugriff am 24.09.2004. 129
- Cohen, W. & C. Justice (1999):** Validating MODIS Terrestrial Ecology Products: Linking In Situ and Satellite Measurements. In: Remote Sensing of Environment, 70, S. 1-3. 87, 161
- Conboy, B. (1999):** MODIS Data. [⟨URL: http://modis.gsfc.nasa.gov/data/⟩](http://modis.gsfc.nasa.gov/data/) – Zugriff am 24.09.2004. 104, 126, 128
- Conboy, B. (2000):** MODIS Technical Specifications. [⟨URL: http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specs.html⟩](http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specs.html) – Zugriff am 08.09.2004. 97, 130
- Cramer, W. et al. (1999):** Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): Overview and key results. In: Global Change Biology, Nr. 5, S. 1-15. 49, 51, 53, 125
- Craven, P. (2002):** Plant species diversity in the Kaokoveld, Namibia. In: **M. Bollig, B. Brunotte & T. Becker (Hrsg.):** Interdisziplinäre Perspektiven zu Kultur- und Landschaftswandel im ariden und semiariden Nordwest Namibia. Selbstverlag Geographie Uni Köln, Kölner Geographische Arbeiten 77, S. 75-80. 21
- Danko, D.M. (1992):** The digital chart of the world. In: GeoInfo Systems, Nr. 2, S. 29-36. 110

- DeFries, R.S., J.R.G. Townshend & M.C. Hansen (1999):** Continuous fields of vegetation characteristics at the global scale at 1-km resolution. In: Journal of Geophysical Research, 104, Nr. D14, S. 911–927. 103, 139
- Dekker, B. & G.N. Smit (1996):** Browse production and leaf phenology of some trees and shrubs in different *Colophospermum mopane* savanna communities. In: African Journal of Range Forestry, 13, S. 15–23. 23
- Desanker, P.V. (2002):** Impact of climate change on Africa. Washington DC, USA: WWF Climate Change Program – Technischer Bericht. 37, 38
- Dittmann, A. & F. Dittmann (2002):** Jenseits der Peripherie – Entwicklungsperspektiven der Himba in Nordwestnamibia. In: Petermanns Geographische Mitteilungen, 146, Nr. 1, S. 44–53. 4, 26, 30
- Duden (1983):** Der kleine Duden "Fremdwörterbuch". Bibliographisches Institut. 41
- Eerens, H. et al. (2001):** Crop Monitoring and Yield Forecasting with NOAA-AVHRR or SPOT-VEGETATION. Vito-TAP – Technischer Bericht. 129
- Eerens, H. et al. (1999):** Use of 1km²-resolution imagery in the Belgian Crop Growth Monitoring System (B-CGMS). Vito-TAP – Technischer Bericht. 129
- Eichhorn, B. & N. Jürgens (2002):** Vegetationsgeschichte und Nutzung pflanzlicher Ressourcen im Kaokoland - Stabilität oder Wandel? In: **M. Bollig, B. Brunotte & T. Becker (Hrsg.):** Interdisziplinäre Perspektiven zu Kultur- und Landschaftswandel im ariden und semiariden Nordwest Namibia. Selbstverlag Geographie Uni Köln, Kölner Geographische Arbeiten 77, S. 119–135. 25, 34
- Ellis, J.E. & D.M. Swift (1988):** Stability of African pastoral ecosystems: alternate paradigms and implications for development. In: Journal of Rangeland Management, 41, S. 450–459. 5
- Epstein, H. (1971):** The origin of the domestic animals of Africa. New York. 29
- Epstein, P. et al. (1998):** Biological and physical signs of climate change: focus on mosquito borne diseases. In: Bulletin of the American Meteorological Society, Nr. 79, S. 409–417. 35

- Esser, G. et al. (1994):** High Resolution Biosphere Model: Documentation Model, Version 3.00.00. Gießen: Institut für Pflanzenökologie der Justus-Liebig-Universität Gießen, 1994. 50
- FAO (1996):** Digital Soil Map of the World and derived Soil Properties. Land and water media series 1. (URL: <http://www.fao.org/ag/agl/agll/dsmw.html>) – Zugriff am 07.09.2004. 20, 73, 74, 75, 76, 92, 108, 109, 114, 134
- Farquhar, G.D., S. von Caemmerer & J.A. Berry (1980):** A biochemical model of photosynthetic CO_2 assimilation in leaves of C_3 species. In: *Planta*, Nr. 149, S. 78–90. 47
- Federer, C.A. (2002):** Brook90 - A Simulation Model for Evaporation, Soil Water and Streamflow. (URL: <http://www.compassbook.com>) – Zugriff am 12.08.2002. 61
- FEWS-NET (2003):** African data dissemination service. (URL: <http://edcw2ks21.cr.usgs.gov/adds/readme.php>) – Zugriff am 24.03.2003. 81, 120
- Field, C.B., J.T. Randerson & C.M. Malmström (1995):** Global Net Primary Production: Combining Ecology and Remote Sensing. In: *Remote Sensing of Environment*, 51, S. 74–88. 42, 51, 53, 77, 157
- Galvin, K.A. & J. Ellis (1996):** Climatic patterns and human socio-ecological strategies in the rangeland of sub-Saharan Africa. In: **E. Odada et al. (Hrsg.):** Global change and subsistence rangelands in southern Africa: the impact of climatic variability and resource access on rural livelihoods. Canberra: GCTE Core Project Office, GCTE Working Document 20. 33
- Galvin, K.A. et al. (2003):** Climate Variability and impact on East African livestock herders. Fort Collins, CO, USA: Natural Resource Ecology Laboratory – Technischer Bericht. 38
- Gao, B.-C. & Y.J. Kaufman (1998):** The MODIS Near-IR Water Vapor Algorithm. Algorithm Technical Background Document Auflage. USGS, 1998. 80
- Gesch, D.B. & K.S. Larson (1996):** Techniques for development of global 1-kilometer digital elevation models. In: *Pecora Thirteen, Human Interactions with the Environment - Perspectives from Space*. Sioux Falls, South Dakota. 110

- Giess, W. (1971):** A preliminary vegetation map of South West Africa. In: *Dinteria*, 4, S. 5–114. 10, 21
- Giess, W. (1998):** A preliminary vegetation map of Namibia (3. Aufl.). In: *Dinteria*, 4, S. 5–114. 10, 21
- Gonzalez, P. (2002):** Program to monitor impacts of desertification and climate change in Africa. Famine Early Warning System Network (FEWS NET) – Technischer Bericht. 38
- Goward, S.M. & K.E. Huemmrich (1992):** Vegetations canopy PAR absorption and the Normalized Difference Vegetation Index: an assessment using the SAIL model. In: *Remote Sensing of Environment*, 39, S. 119–140. 66
- Guenther, B. et al. (1998):** Prelaunch algorithm and data format for the Level 1 calibration products for the EOS-AM1 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36, Nr. 4, S. 1142–1151. 87
- Hahn, J. (1869):** Die Ovaherero. In: *Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin*, 19, Nr. 4, S. 226–258. 10
- Hanks, R.J. (1974):** Model for predicting plant yield as influenced use. In: *Agron. J.* 66, S. 660–665. 78
- Hansen, M.C. et al. (2003):** Global Percent Tree Cover at a Spatial Resolution of 500 Meters: First Results of the MODIS Vegetation Continuous Fields Algorithm. In: *Earth Interactions* 7. 102, 103
- Hansen, M.C. et al. (2002):** Development of a MODIS tree cover validation data set for Western Province, Zambia. In: *Remote Sensing of Environment*, Nr. 83, S. 320–335. 103, 160
- Hartmann, G. (1902):** Meine Expedition 1900 ins nördliche Kaokofeld und 1901 durch das Amboland. In: *Beiträge zur Kolonialpolitik und Kolonialwirtschaft*, Nr. 4, S. 1–29. 10
- Hauhs, M., H. Lange & A. Kastner-Maresch (2000):** Die Modellierung ökologischer Systeme - wissenschaftliche Computerspiele oder theoretische Alchemie. In: *Petermanns Geographische Mitteilungen*, 144, Nr. 2, S. 52–57. 41, 45, 51

- Hübscher, A. (2000):** Statistik. (URL: http://www.isl.org/huebscher/ah_stvor.htm) – Zugriff am 12.09.2004. 138
- Heal, O.W., J.C. Menaut & W.L. Steffen (1993):** Toward a global terrestrial observing system (GTOS), detecting and monitoring change in terrestrial ecosystems. UNESCO-IGPB (14). – Tech. Report. MAB Digest. 47
- Heimann, M. & C.D. Keeling (1989):** A tree dimensional model of atmospheric CO_2 transport based on observed winds, II, Model Description. In: **D. H. Peterson (Hrsg.):** Aspects of Climate Variability in the Pacific and Western America. Band 55, AGU, S. 240–260. 67
- Heine, K. (1995):** Paläoklimatische Informationen aus süd-west-afrikanischen Böden und Oberflächenformen: Methodische Überlegungen. In: Geomethodica, Nr. 20, S. 27–74. 10
- Heinsch, F.A. et al. (2003):** User's Guide GPP and NPP (MOD17A2/A3) Products NASA MODIS Land Algorithm. USGS-NASA – Technischer Bericht. 127
- Heyer, E. (1979):** Witterung und Klima. Leipzig: Teubner Verlagsgesellschaft. 65
- Hilton-Taylor, C. (1994):** The Kaokoveld. Namibia and Angola. In: **S.D. Davis, V.H. Heywood & A.C. Hamilton (Hrsg.):** Centres of Plant Diversity. A Guide and Strategy for their Conservation. Cambridge: WWF & IUCN, S. 201–203. 18
- Holben, B.N. (1986):** Characterization of maximum value composites from temporal AVHRR data. In: Int. J. Remote Sensing, 7, S. 1417–1434. 99
- Houérou, H.N. Le (1996):** Climate change, drought and desertification. In: Journal of Arid Environments, Nr. 33, S. 133–185. 38
- Hourérou, H.N. Le (1989):** The Grazing Land Ecosystems of the African Sahel. Berlin: Springer. 16
- Hüser, K. et al. (2001):** Namibia: Eine Landschaftskunde in Bildern. Göttingen: Hess Verlag. 10
- Huete, A., C. Justice & H. Liu (1994):** Development of Vegetation and Soil Indices for MODIS-EOS. In: Remote Sensing of Environment, 49, S. 227–234. 93

- Hulme, M. & D. Viner (1998):** A climate change scenario for the Tropics. In: Climatic Change,, Nr. 39, S. 145–176. 37
- Hupfer, P. (1996):** Unsere Umwelt: Das Klima. Stuttgart, Leipzig: B. G. Teubner, Umwelt, ISBN 3–8154–3521–8. 77
- Hurttt, G.C. et al. (1998):** Terrestrial models and global change: Challenges for the future. In: Global Change Biology,, Nr. 4, S. 581–590. 47, 52
- IFFN (2000):** Fires in the Southern Cape Peninsula, Western Cape Province, South Africa January 2000. International Forest Fire News – Technischer Bericht. 35
- IPCC (1990):** IPCC First Assessment Report. Impacts Assessment of Climate Change – Report of Working Group II. Geneva, Switzerland: IPCC – Technischer Bericht. 35, 37
- IPCC (1995):** Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses. Geneva, Switzerland: IPCC – Technischer Bericht. 37
- IPCC (2001):** Climate Change 2001: The Scientific Basis. Summary for Policymakers (SPM) and Technical Summary (TS). Geneva, Switzerland: IPCC – Technischer Bericht. 1, 7, 35, 37, 38
- Jenkins, J.C. et al. (1999):** Sources of variability in net primary production predictions at a regional scale: A comparison using PnET-II and TEM4.0 in Northeastern US forests. In: Ecosystems,, Nr. 2, S. 555–570. 124
- Jensen, R.E., R.D. Burman & R.G. Allen (1990):** Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE Manuals 70, 1990. 79
- Jentsch, A. (2002):** Hinweise zur Bedeckungsschätzung, Pers. Komm. No address in. 135
- Jiang, L. & S. Islam (1999):** A methodology for estimation of surface evaporation over large areas using remote sensing observations. In: Geophysical Research Letters, 26, Nr. 17, S. 2773–2776. 78, 79, 160
- Johnson, I.R., S.J. Riha & D.S. Wilks (1995):** Modelling daily net canopy photosynthesis and its adaption to irradiance and atmospheric CO_2 concentration. In: Agricultural Systems, 50, S. 1–35. 61

- Jürgens, N. (1991):** A new approach to the Namib Region I: Phytogeographic subdivision. In: *Vegetatio*, 97, S. 21–38. 21
- Jürgens, U. & J. Bähr (2002):** Das südliche Afrika. Gotha: Justus Perthes Verlag, Perthes Regionalprofile. 12, 20
- Jörgensen, S.E. (1986):** Fundamentals of ecological modelling. Amsterdam. Oxford, New York, Tokio: Elsevier Publishers. 41
- Justice, C. (2004):** MODIS Land Discipline Web Site. \langle URL: <http://modis-land.gsfc.nasa.gov/index.asp> \rangle – Zugriff am 07.09.2004. 92
- Justice, C. et al. (1998):** The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36, Nr. 4, S. 1228–1249. 55
- Kempf, J. (1994):** Probleme der Land-Degradation in Namibia. Ausmaß, Ursachen und Wirkungsmuster dargestellt anhand ausgewählter Untersuchungsgebiete. Würzburg: Würzburger Geographische Manuskripte. 16, 31, 38
- King, M. D. et al. (1992):** Remote Sensing of Cloud, Aerosol, and Water Vapor Properties from the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS). In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30, Nr. 1, S. 2–27. 80
- King, M.D. (2004):** MODIS Atmosphere. \langle URL: <http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/> \rangle – Zugriff am 07.09.2004. 92
- Kinuthia, J.H. (1997):** Global warming and climate impacts in Southern Africa: How might things change? \langle URL: <http://www.bradford.ac.uk/research/ijas/ijasno2/kinuthia.html> \rangle – Zugriff am 14.09.2004. 38, 39
- Klimm, E., K.-G. Schneider & S. von Hatten (1994):** Das südliche Afrika II. Namibia - Botswana. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt, *Wissenschaftliche Länderkunden* 39. 12, 13, 15, 19, 20, 44, 74
- Klink, H.-J. (1996):** Das Geographische Seminar: Vegetationsgeographie. Braunschweig: Westermann Verlag. 12, 43, 44, 45, 70, 71, 72
- Krämer, W. (2000):** So lügt man mit Statistik. 4. Auflage. München: Piper Verlag. 133

- Kruse, R., J. Gebhardt & P. Klawonn (1993):** Fuzzy-Systeme. Stuttgart: Teubner. 71
- Kuntz, J. (1912):** Das Kaokoveld. Map XX83. 10
- Kuntz, J. (1913):** Die geographischen Resultate der Kaokoexpedition 1910/12. In: Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin., Nr. 6, S. 363–371. 10
- Larcher, W. (1984):** Ökologie der Pflanzen. Stuttgart: UTB. 36, 42, 43, 44, 45, 47, 63, 64, 65, 68, 125, 126
- Laurenroth, W.K. et al. (1993):** Modelling vegetation structure–ecosystem process interactions across sites and ecosystems. In: Ecologic Modelling., Nr. 67, S. 49–80. 51
- Lebel, T. et al. (2000):** From GCM scales to hydrological scales: rainfall variability in West Africa. In: Stochastic Environmental Research and Risk Assessment., Nr. 14, S. 275–295. 36
- Lee-Thorp, J.A. et al. (2001):** Rapid climate shifts in the southern African interior throughout the mid to late Holocene. In: Geophysical Research Letters., Nr. 28, S. 4507–4510. 37
- Leichenko, R.M. & K.L. O’Brien (2002):** The dynamics of rural vulnerability to global change: The case of Southern Africa. In: Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change., Nr. 7, S. 1–18. 38
- Leser, H. (1982):** Namibia. Klett Verlag, Länderprofile. 9, 12, 15, 18, 19, 20, 21
- Leser, H. (1991):** Landschaftsökologie. 2. Auflage. Stuttgart: Eugen Ulmer Verlag. 70, 159
- Leser, H. (2000):** Methodische Probleme sedimentologischer Untersuchungen pleistozäner Sedimente in Kaokoveld (Namibia). In: Regensburger Geographische Schriften., Nr. 33, S. 19–36. 10
- Leser, H. & U. Rust (1997):** Pleistocene and Holocene sediments and paleosoils of the Northern Namib Margin (Namibia). In: Proceedings of the 4th Int. Conf. on Geomorphology, Bologna.. 10
- Levitus, J. et al. (2000):** Warming of the World Ocean. In: Science., Nr. 287, S. 2225–2229. 35

- Lieth, H. (1975):** Modelling the primary production of the world. In: **H. Lieht & R.H. Whittaker (Hrsg.):** Primary Productivity of the Biosphere. Berlin: Springer-Verlag, S. 237–263. 49, 50
- Malan, J.S. & G.L. Owen-Smith (1974):** The Ethnobotany of Kaokoland. In: Cimbebasia,, Nr. 2, S. 131–178. 9, 20
- Malanson, G.P. (1993):** Comment on modelling ecological response to climatic change. In: Climatic Change,, Nr. 23, S. 95–109. 47
- Martin, H. (1950):** Südwestafrika. In: Geologische Rundschau,, Nr. 38, S. 6–14. 10
- Martin, H. & H. Porada (1977):** The intercratonic branch of the Damara orogen in South West Africa. I. Discussion of geodynamic models. II. Discussion of relationship with the Pan-African Mobile Belt System. In: Precambrian Research,, Nr. 5, S. 311–357. 10
- McCree, K. J. (1981):** Photosynthetically active radiation. Springer-Verlag, S. 41–55. 60
- Mendlesohn, J. et al. (2002):** Atlas of Namibia : A portrait of the Land and its' People. Cape Town: David Philip Publishers. 8, 16, 19, 20
- Mensching, H. (1990):** Desertifikation: Ein weltweites Problem der ökologischen Verwüstung in den Trockengebieten der Erde. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft. 5
- Menz, G. (1994):** Biomasse und Satellitenfernerkundung - Zur Berechnung von Karten der oberirdischen Phytomasse von Kenya aus NOAA-NDVI-Daten. In: Geomethodica, 19, S. 149–188. 159
- Menz, G. & M. Bachmann (1992):** Studien zum konvektiven Niederschlagsgeschehen im Lake Viktoria Gebiet mit digitalen METEOSAT-Daten. In: Erdkunde,, Nr. 4, S. 135–148. 80
- Menz, G. & J. Richters (2004):** Modellierung von Vulnerabilität in Nordnamibia mit Fernerkundung. Projektantrag zur Teilprojekt B7. In: **M. Bollig & W. Schuck (Hrsg.):** Kultur- und Landschaftswandel im ariden Afrika. DFG-Finanzierungsantrag des Sonderforschungsbereichs 389 an der Universität zu Köln. Köln, S. 369–394. 162

- Merwe, J.H. van der (1983):** National Atlas of South West Africa – Nasionale Atlas van Suidwes-Afrika. Cape Town. 14, 15
- Merxmüller, H. (1972):** Prodrömus einer Flora von Südwestafrika. Cramer. 10
- Möhlig, W.J.G. (2002):** Ethnohistorische Erkenntnisse aus sprachhistorischen Quellen im Herero. In: **M. Bollig, B. Brunotte & T. Becker (Hrsg.):** Interdisziplinäre Perspektiven zu Kultur- und Landschaftswandel im ariden und semiariden Nordwest Namibia. Selbstverlag Geographie Uni Köln, Kölner Geographische Arbeiten 77, S. 159–170. 26
- Milner, C. & R.E. Hughes (1968):** Methods for the Measurement of the Primary Production of Grassland. Oxford: Blackwell, IBP Handbook 6. 46, 135, 136
- Mohr, H. & P. Schopfer (1995):** Plant Physiology. 10. Auflage. Berlin: Springer Verlag. 44
- Moleele, N. et al. (2001):** Assessment of vegetation indexes useful for browse (forage) prediction in semi-arid rangelands. In: International Journal of Remote Sensing, 22, Nr. 5, S. 741–756. 33, 125, 157
- Monod, T. (1986):** The Sahel Zone north of the equator. In: **M. Evenari, A. Shmida & I. Noy-Meir (Hrsg.):** Hot deserts and arid shrublands. Elsevier Science Publishers, S. 203–243. 21
- Monteith, J. L. (1971):** Evaporation and surface temperature. In: Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 107, S. 1–27. 78
- Monteith, J.L. (1972):** Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. In: Journal of Applied Ecology, 9, S. 747–766. 5, 56, 66, 97, 119, 161
- Monteith, J.L. (1977):** Climate and the efficiency of crop production in Britain. In: Philosoph. Trans. Royal Society London, Nr. 281, S. 277–294. 50, 54, 56, 128
- Moran, M. S. et al. (1989):** Mapping surface energy balance components by combining landsat thematic mapper and ground-based meteorological data. In: Remote Sensing of Environment, 30, Nr. 1, S. 77–87. 79
- Myneni, R.B., R.R. Nemani & S.W. Running (1997):** Estimation of Global LAI and FPAR from radiative transfer models. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 35, S. 1380–1393. 57

- Nemani, R.R. et al. (2003):** Climate-Driven Increases in Global Terrestrial Net Primary Production from 1982 to 1999. In: *Science*, 300, S. 1560–1563. 35, 36
- Nicholson, S.E. (2001):** Climatic and environmental change in Africa during the last two centuries. In: *Climate Research*,, Nr. 17, S. 123–144. 37
- Nicholson, S.E. & X. Yin (2001):** Rainfall conditions in equatorial East Africa during the Nineteenth Century as inferred from the record of Lake Victoria. In: *Climatic Change*,, Nr. 48, S. 387–398. 37
- Niklas, K.J. & B.J. Enquist (2001):** Invariant scaling relationships for inter-specific plant biomass production rates and body size. In: *PNAS*, 98, Nr. 5, S. 2922–2927. 136
- Nishida, K. et al. (2003):** An operational remote sensing algorithm of land surface evaporation. In: *Journal of Geophysical Research* 108, Nr. D9. 77, 79, 160
- Oceanic, National & Atmospheric Administration (2003):** Glossary of Terminology. \langle URL: http://coris.noaa.gov/glossary/glossary_a_k.html \rangle – Zugriff am 03.01.2005. 35
- O'Connor, T.G. (1985):** A synthesis of field experiments concerning the grass layer in the savanna region of southern Africa. Pretoria: CSIR (114). – South African National Scientific Programmes Report. 33
- Oesterheld, M. & S.J. McNaughton (2000):** Herbivory in Terrestrial Ecosystems. Springer, S. 151–157. 33
- Ojima, D.S. et al. (1996):** Impact of climate and atmospheric carbon dioxide changes on grasslands of the world. In: **A.I. Breymeyer et al. (Hrsg.):** *Global Change: Effects on Coniferous Forests and Grasslands*. Chichester, NY, USA: Wiley, Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE), S. 271–309. 51
- Ojima, D.S. et al. (1994):** Long- and short-term effects of fire on nitrogen cycling in tallgrass prairie. In: *Biogeochemistry*,, Nr. 23, S. 1–18. 51
- ORNL-DAAC (2001):** NPP Database. \langle URL: http://www-eosdis.ornl.gov/NPP/npp_home.html \rangle – Zugriff am 12.03.2002. 70

- Parton, W.J. et al. (1993):** Modelling vegetation structure - ecosystem process interactions across sites and ecosystems. In: *Ecological Modelling*, 67, Nr. 1, S. 49–80. 51
- Parton, W.J., J.W.B. Stewart & C.V. Cole (1988):** Dynamics of C, N, P and S in grassland soils : a model. In: *Biogeochemistry*, S. 109–131. 51
- Parton, W.S. et al. (1992):** Simulation of carbon and nitrogen dynamics under elevated carbon dioxide in the tallgrass prairie. In: *Bulletin of the Ecological Society of America*, Nr. 73, S. 290–291. 51
- Penman, H.L. (1948):** Natural evaporation from open water, bare soil and grass. In: *Proceedings Royal Soc. Agri.* 193, S. 120–145. 78
- Potter, C.S. & V. Brooks (1998):** Global analysis of empirical relations between annual climate and seasonality of NDVI. In: *International Journal of Remote Sensing*, 19, Nr. 15, S. 2921–2948. 74
- Potter, C.S. et al. (1993):** Terrestrial Ecosystem Production: A Process Model based on Global Satellite and Surface Data. In: *Global Biogeochemical Cycles*, 7, Nr. 4, S. 811–841. 5, 51, 53, 55, 56, 65, 66, 67, 68, 70, 74, 76, 77, 125, 161
- Prentice, I.C. et al. (1992):** A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties, and climate. In: *Journal of Biogeography*, 19, S. 117–134. 52
- Price, K.P., T.J. Crooks & E.A. Martinko (2001):** Grasslands Across Time and Scale: A Remote Sensing Perspective. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, April 2001, S. 414–420. 93
- Priestley, C.H.B. & R.J. Taylor (1972):** On the assessment of surface heat fluxes and evaporation using large-scale parameters. In: *Monthly Weather Rev.* 100, S. 81–92. 78
- Prince, S.D. et al. (1995):** Geographical, Biological and Remote Sensing Aspects of the Hydrologic Atmospheric Pilot Experiment in the Sahel (HAPEX-Sahel). In: *Remote Sensing of Environment*, 51, S. 215–234. 66
- Prior, J. (1994):** Pastoral Development Planning. Oxford: Oxfam Development, Guidelines No.9. 17

- Ramirez, E. (2004):** Shuttle Radar Topography Mission - The Mission to map the World. (URL: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>) – Zugriff am 07.09.2004. 110
- Reich, P.B., D.P. Turner & P. Bolstad (1999):** An Approach to Spatially Distributed Modelling of Net Primary Production (NPP) at the Landscape Scale and Its Application in Validation of EOS NPP Products. In: Remote Sensing of Environment, 70, S. 69–81. 49, 55, 159
- Richard, Y. et al. (2001):** 20th century droughts in southern Africa: Spatial and temporal variability, teleconnections with oceanic and atmospheric conditions. In: International Journal of Climatology,, Nr. 21, S. 873–885. 37
- Richters, J. (2000):** Integration von Globalen Re-Analysedaten zur operativen Atmosphärenkorrektur - Dargestellt an Fallbeispielen aus Westafrika. Diplomarbeit, Geographisches Institut der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Bonn. 54
- Richters, J. & D. Klein (2002):** Ableitung von 10-Tages-Kompositen aus täglichen MODIS-Daten. In: **E. Seyfert (Hrsg.):** Zu neuen Märkten auf neuen Wegen mit neuer Technik., Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung: 11. 99
- Riedo, M. et al. (1998):** A pasture simulation model for dry matter production, and fluxes of carbon, nitrogen, water and energy. In: Ecological Modelling, 105, S. 141–183. 140
- Rivington, M., K.B. Matthews & K. Buchan (2002):** A comparison of methods for providing solar radiation data to crop models and decision support systems. No address in. 61
- Rodin, L.E., N.T. Bazilevich & N.H. Rozov (1975):** Productivity of the world's main ecosystems. Washington: Natural Academy of Science. 124
- Roller, N.E.G. & J.E. Colwell (1986):** Coarse-resolution satellite data for ecological studies. In: Bioscience, 36, Nr. 7, S. 468–475. 5, 159
- Rossow, W.B. & L. Garder (1984):** Selection of a map grid for data analysis and archival. In: Journal of Climate and Applied Meteorology, 23, Nr. 8, S. 1253–1257. 96

- Row, L.W., D.A. Hastings & P.K. Dunbar (1995):** TerrainBase Worldwide Digital Terrain Data - Documentation Manual. CD-ROM Release 1.0. Auflage. Boulder, Colorado: National Geophysical Data Center, 1995. 110
- RSI, Research System Inc. (1999a):** ENVI Programmer's Guide. RSI. 84, 94
- RSI, Research System Inc. (1999b):** HDF User's Guide. The Board of Trustees of the University of Illinois. 93
- Ruimy, A. et al. (1999):** Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): analysis of differences in light absorption and light-use efficiency. In: *Global Change Biology*, Nr. 5, S. 56–64. 49, 51, 53, 125
- Ruimy, A. et al. (1996):** The use of CO_2 flux measurements in models of the global terrestrial carbon budget. In: *Global Change Biology*, Nr. 2, S. 287–296. 53, 66, 82
- Ruimy, A., B. Saugier & G. Dedieu (1994):** Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. In: *Journal of Geophysical Research*, 99, Nr. 5, S. 263–283. 51
- Running, S.W. (1990):** Estimating terrestrial primary productivity by combining remote sensing and ecology simulation. In: **R.J. Hobbs & H.A. Mooney (Hrsg.):** Remote sensing of biosphere functioning. Band 79, New York: Springer-Verlag. – Kapitel 4, S. 65–86. 125
- Running, S.W. (1998):** A Blueprint for Improved Global Change Monitoring of the Terrestrial Biosphere. In: *The Earth Observer*, 10, Nr. Jan/Feb, S. 1–11. 127
- Running, S.W. & S.T. Gower (1991):** FOREST-BGC, A general model of forest ecosystem processes for regional applications. II. Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets. In: *Tree Physiology*, Nr. 9, S. 147–169. 51
- Running, S.W. et al. (1995):** A Remote Sensing Based Vegetation Classification Logic for Global Land Cover Analysis. In: *Remote Sensing of Environment*, 51, S. 39–48. 68
- Running, S.W. et al. (1999):** MODIS daily photosynthesis (PSN) and annual net primary production (NPP) product (MOD17). GSFC-USGS (ATBD 16). – Algorithm Theoretical Basis Document. 126, 127, 128

- Running, S.W. et al. (2004):** A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. In: *BioScience*, 54, Nr. 6, S. 547–560. 55, 159
- Running, S.W. et al. (2000):** Global Terrestrial Gross and Net Primary Productivity from the Earth Observing System. Springer, S. 44–57. 56, 58, 65, 68, 70
- Sabbe, H. & F. Veroustraete (1999):** Estimation of net ecosystem productivity of European terrestrial ecosystems by means of the C-Fix model and NOAA/AVHRR data. In: *Vito*. 129, 130
- Sabbe, H. & F. Veroustraete (2000):** Demonstration of a standard Net Primary Productivity product for the SPOT 4-VEGETATION instrument. In: *VITO*. 129, 131
- Sala, O.E. & A.T. Austin (2000):** Methods of Estimating Aboveground Net Primary Productivity. Springer, S. 31–43. 42, 44, 45, 46
- Sander, H. (2002):** Zur naturräumlichen Gliederung des nordöstlichen Kaokolandes. In: **M. Bollig, B. Brunotte & T. Becker (Hrsg.):** Interdisziplinäre Perspektiven zu Kultur- und Landschaftswandel im ariden und semiariden Nordwest Namibia. Selbstverlag Geographie Uni Köln. 20
- Sander, H. & T. Becker (2002):** Klimatologie des Kaokolandes. In: **M. Bollig, B. Brunotte & T. Becker (Hrsg.):** Interdisziplinäre Perspektiven zu Kultur- und Landschaftswandel im ariden und semiariden Nordwest Namibia. Selbstverlag Geographie Uni Köln. 15, 17, 18, 80
- Sander, H., M. Bollig & A. Schulte (1998):** Himbas Paradise Lost. Stability, Degradation and Pastoralist Management of the Omuhonga Bassin (Namibia). In: *Die Erde*, 129, Nr. 4, S. 301–315. 34, 38
- Sannier, C.A. et al. (1998):** Real-time vegetation monitoring with NOAA-AVHRR in Southern Africa for wildlife management and food security assessment. In: *International Journal of Remote Sensing*, 19, Nr. 4, S. 621–639. 56
- Sannier, C.A. et al. (2002):** Real-time monitoring of vegetation biomass with NOAA-AVHRR in Etosha National Park, Namibia, for fire risk assessment. In: *International Journal of Remote Sensing*, 23, Nr. 1, S. 71–89. 136, 137, 138

- Scheffer et al. (1998):** Lehrbuch der Bodenkunde. 14. Auflage. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag. 74, 75, 134
- Schimel, D.S. (1995):** Terrestrial Biogeochemical Cycles: Global Estimates with Remote Sensing. In: Remote Sensing of Environment, 51, S. 49–56. 49
- Schmidt, U. (2002):** Modellierung des kurzwelligen solaren Strahlungshaushalts im Hochgebirge auf der Basis von digitalen Geländemodellen und Satellitendaten am Beispiel des Hunza-Karakorum/Nordpakistan. Dissertation, Geographisches Institut der Universität Bonn. 61
- Schönwiese, C.-D. (1994):** Klimatologie. Ulmer. 60, 61, 65, 80
- Scholes, R.J. (1990):** Changes in nature and the nature of changes: interactions between terrestrial ecosystems and the atmosphere. In: South African Journal of Science, 90, S. 350–354. 42
- Scholz, F. (1994):** Nomadismus - Mobile Tierhaltung; Formen, Niedergang und Perspektiven einer traditionsreichen Lebens- und Wirtschaftsweise. In: Geographische Rundschau, 46, Nr. 2, S. 72–78. 4
- Schulte, A. (2001):** Weideökologie des Kaokolandes. Struktur und Dynamik einer Mopane-Savanne unter pastoralnomadischer Nutzung. Dissertation, Universität zu Köln, Köln. 10, 21, 24, 25, 30, 32, 135, 136
- Schulte, A. (2002):** Stabilität oder Zerstörung? Veränderungen der Vegetation unter pastoralnomadischer Nutzung. In: **M. Bollig, B. Brunotte & T. Becker (Hrsg.):** Interdisziplinäre Perspektiven zu Kultur- und Landschaftswandel im ariden und semiariden Nordwest Namibia. Selbstverlag Geographie Uni Köln. 32, 33, 34
- Schultz, J. (2002):** Die Ökozonen der Erde. UTB. 10, 11, 21, 42, 43, 44, 45, 68, 70, 71, 73
- Scurlock, J.M.O. et al. (1999):** Terrestrial NPP: Toward a consistent data set for global model evaluation. In: Ecological Applications, 3, Nr. 9, S. 913–919. 42
- Seaquist, J.W., L. Olsson & J. Ardö (2003):** A remote sensing-based primary production model for grassland biomes. In: Ecological Monitoring, 169, S. 131–155. 44, 50, 63, 65, 68, 70, 77, 79, 82, 117, 125, 140, 160

- Sellers, P.J. et al. (1995):** Remote Sensing of the Land Surface for Studies of Global Change: Models - Algorithms - Experiments. In: Remote Sensing of Environment, 51, S. 3–26. 42, 52
- Shaver, G.R. et al. (2000):** Global Warming and Terrestrial Ecosystems: A Conceptual Framework for Analysis. In: BioScience, 50, Nr. 10, S. 871–882,. 5, 7, 43
- Shugart, J.H.H. & D.C. West (1977):** Development of an Appalachian deciduous forest model and its implication to the assessment of the impact of chestnut Blight. In: Journal of Environmental Mangement,, Nr. 5, S. 161–179. 48
- Simioni, G. et al. (2000):** Treegrass: a 3D, process-based model for simulating plant interactions in tree-grass ecosystems. In: Ecological Modelling, 131, S. 47–63. 138
- Singh, J.S. & M.C. Joshi (1979):** Tropical grasslands primary production. In: **R.T. Coupland (Hrsg.):** Grassland Ecosystems of the World. Cambridge: Cambridge University Press, S. 197–218. 47
- Singh, J.S., W.K. Lauerroth & R.K. Steinhorst (1975):** Review and assessment of various techniques for estimating net arial primary production in grasslands from harvest data. In: Botanical Review, 41, S. 181–232. 47
- Snyder, J.P. (1987):** Map Projections - a Working Manual. Washington, DC: United States Government Printing Office, U.S. Geological Survey Professional Paper 1395. 96
- Solbrig, O.T. (1996):** The Diversity of the Savanna Ecosystem. In: **O.T. Solbrig, E. Medina & J.F. Silva (Hrsg.):** Biodiversity and Savanna Ecosystem Processes. A Global Perspective. Berlin: Springer, S. 1–27. 4
- Song, J. & W. Gao (1999):** An improved method to derive surface albedo from narrowband AVHRR satellite data: narrowband to broadband conversion. In: Journal of Applied Meteorology,, Nr. 38, S. 239–249. 79
- Sullivan, S. (1999):** The impacts of people and livestock on topographically diverse open wood- and shrub-lands in arid north-west Namibia. In: Global Ecology & Biogeography, 8, Nr. 3-4, S. 257–277. 1
- Sweet, J. (1998):** A rainfall model for estimation carring capacity. Windhoek: Northern Regions Livestock Development Project (NOLIDEP). 30

- Sweet, J. (1999):** Livestock - Coping With Drought: Namibia - A Case Study. No address in. 34
- Swift, L. W. (1976):** Algorithm for Solar Radiation on Mountain Slopes. In: Water Resources Research, 12, Nr. 1, S. 108–112. 61, 79, 116, 160
- Swift, L. W. & K. R. Knoerr (1973):** Estimating Solar Radiation on Mountain Slopes. In: Agricultural Meteorology, 12, S. 329–339. 61, 79, 116, 160
- Taiz, L. & E. Zeiger (2000):** Physiologie der Pflanzen. 25. Auflage. Springer Verlag. 44
- Thorntwaite, C. W. (1948):** An approach toward a rational classification of climate. In: Geograph. Rev. 38, Nr. 55. 78
- Thornton, P.E. (2000):** User's Guide for BIOME-BGC, Version 4.1.1. Missoula: Numerical Terradynamic Simulation Group, School of Forestry, University of Montana, USA. 51, 68, 70
- Tian, H., C.A.S. Hall & Y. Qi (1998):** Modelling primary productivity of the terrestrial biosphere in changing environments: toward a dynamic biosphere model. In: Critical Revue of Plant Science, Nr. 15, S. 541–557. 50
- Traeger, D.H. (1994):** Einführung in die Fuzzy-Logik. Stuttgart: BG Teubner Verlag. 71
- Traxler, A. (1997):** Handbuch des vegetationsökologischen Monitorings: Methoden, Praxis, angewandte Projekte. Wien: Umweltbundesamt Österreich, Teil A: Methoden. 133
- Tucker, C. J. (1979):** Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. In: Remote Sensing of Environment, 8, S. 127–150. 58, 65
- Tyson, P.D. (1986):** Climatic Change and Variability in Southern Africa. Cape Town: Oxford University Press. 16
- Ullman, R. (2001):** Status and Plans for HDF-EOS, NASA's Format for EOS Standard Products. (URL: http://hdfEOS.gsfc.nasa.gov/hdfEOS/HDFEOS_status/HDFEOSStatus.htm) – Zugriff am 08.09.2004. 93
- UNFCCC (2003):** Caring for climate - a guide to the Climate Change Convention and the Kyoto Protocol. United Nations Framework Convention on Climate Change. 35

- USGS-EROS-Data-Center (2004):** GTOPO30 Global Topographic Data. [⟨URL: http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/gtopo30.asp⟩](http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/gtopo30.asp) – Zugriff am 07.09.2004. 92, 108, 110, 114
- USGS-NASA (2004a):** MODIS Reprojection Tool Distribution Page. [⟨URL: http://LPDAAC.usgs.gov/landdaac/tools/modis/index.asp⟩](http://LPDAAC.usgs.gov/landdaac/tools/modis/index.asp) – Zugriff am 07.09.2004. 96
- USGS-NASA (2004b):** Ordering Tutorial for the EOS Data Gateway (EDG) Version 3.5.1. [⟨URL: http://LPDAAC.usgs.gov/tutorial/index.asp⟩](http://LPDAAC.usgs.gov/tutorial/index.asp) – Zugriff am 07.09.2004. 89, 90
- USGS-NASA-DAAC (2004a):** MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid. [⟨URL: http://edcdaac.usgs.gov/modis/mod11a1v4.asp⟩](http://edcdaac.usgs.gov/modis/mod11a1v4.asp) – Zugriff am 07.09.2004. 100, 101
- USGS-NASA-DAAC (2004b):** MODIS/Terra Surface Reflectance Daily L2G Global 500m SIN Grid. [⟨URL: http://edcdaac.usgs.gov/modis/mod09ghkv4.asp⟩](http://edcdaac.usgs.gov/modis/mod09ghkv4.asp) – Zugriff am 07.09.2004. 99, 117, 159
- USGS-NASA-DAAC (2004c):** MODIS/Terra Vegetation Continuous Fields Yearly L4 Global 500m ISIN Grid. [⟨URL: http://edcdaac.usgs.gov/modis/mod44b.asp⟩](http://edcdaac.usgs.gov/modis/mod44b.asp) – Zugriff am 27.09.2004. 101
- Vermote, E.F. et al. (1997):** Atmospheric correction of visible to middle infrared EOS-MODIS data over land surface, background, operational algorithm and validation. In: *Journal of Geophysical Research* 14, Nr. 102. 99
- Veroustraete, F., J. Patyn & R.B. Myneni (1994):** Forcing of a simple ecosystem model with fAPAR and climatic data to estimate regional scale photosynthetic assimilation. In: *Vegetation, Modelling and Climate Change Effects*. The Hague, the Netherlands: Academic Publishing, S. 151–177. 128
- Veroustraete, F. & H. Sabbe (2000):** European Net Ecosystem Productivity determined with space borne sensors. In: *Topics in Ecology*. 129
- Verschuren, D., K.R. Laird & B.F. Cumming (2000):** Rainfall and drought in equatorial east Africa during the past 1,100 years. In: *Nature*, Nr. 403, S. 410–414. 37
- Viljoen, P.J. (1980):** Veldtrips, Verspreiding van die Groter Soogdiere, en enkele Aspekte van die Ekologie von Kaokoland. Diplomarbeit, Fakulteit Wissen Natuurkunde, Univerty of Pretoria, Pretoria. 10, 21, 22

- VITO (2003):** VEGETATION-FAQ. (URL: <http://www.vgt.vito.be/faq/faq.html>) – Zugriff am 24.09.2004. 129, 130
- Vogelsang, R. (2002):** Migration oder Diffusion? - Frühe Viehhaltung im Kaokoland. In: **M. Bollig, B. Brunotte & T. Becker (Hrsg.):** Interdisziplinäre Perspektiven zu Kultur- und Landschaftswandel im ariden und semiariden Nordwest Namibia. Selbstverlag Geographie Uni Köln, Kölner Geographische Arbeiten 77, S. 137–144. 25, 29
- Walker, B.H. (1993):** Rangeland Ecology: understanding and managing change. In: *Ambio*, Nr. 22, S. 80–87. 42
- Walle, I.I. van de & R. Lemeur (1999):** Biogeochemical Cycles of Belgian Forest Ecosystems Related to Global Change and Sustainable Development. BelFOR (CONTRACT NR. CG/DD/05). – Technischer Bericht. 129
- Walter, H. (1990):** Vegetation und Klimazonen: Grundriß der globalen Ökologie. 6. Auflage. Stuttgart: UTB Ulmer. 21, 70
- Watson, R.T. et al. (1997):** A special Report of IPCC Working Group II. Summary for Policymakers. The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) – Technischer Bericht. 1, 7, 36, 38, 164
- Watts, P. J. & N. H. Hancock (1985):** Evaporation and potential evaporation - a practical approach for agricultural engineers. In: *Mech. Engrg. Trans.* 10, Nr. 4, S. 231–240. 78
- Weischet, W. (1995):** Einführung in die Allgemeine Klimatologie. 6. Auflage.. 64, 77, 78, 79, 80, 101
- Weischet, W. & W. Endlicher (2000):** Regionale Klimatologie. Teil 2: Die alte Welt. Stuttgart: B.G. Teubner Verlag. 12, 13
- Welle, T. (2003):** Fernerkundungsgestützte Abschätzung von Ertragszahlen aus subsistenten Gartenbauflächen der Himba-Bevölkerung im nordwestlichen Namibia. Diplomarbeit, Geographisches Institut der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Bonn. 28, 35, 103, 132
- Werner, P.A. & P.G. Murphy (2001):** Size-specific biomass allocation and water content of above- and below-ground components of three Eucalyptus species in a northern Australian savanna. In: *Australian Journal of Botany*, 49, Nr. 2, S. 155–167. 136

- Werner, W. (2000):** From communal pastures to enclosures: the development of land tenure in Herero reserves. In: **M. Bollig & J.B. Gewald (Hrsg.):** People, Cattle and Land. Transformations of a pastoral Society in South-western Africa. Köln: Institut für Völkerkunde der Universität zu Köln, S. 247–270. 31
- White, D.H., S.M. Howden & H.A. Nix (1993):** Modelling agricultural and pastoral systems. In: **A.J. Jakeman, M.B. Beck & M.J. McAleer (Hrsg.):** Modelling Change in Environmental Systems. West Sussex: John Wiley and Sons. 48
- White, M.A. et al. (2000):** Parameterization and sensitivity analysis of the BIOME-BGC terrestrial ecosystem model: net primary production controls. In: *Earth Interactions*, 4, Nr. Paper No. 3, S. 1–85. 127
- Wiegand, T., S.J. Milton & C. Wissel (1995):** A Simulation Model for a Shrub Ecosystem in the Semiarid Karoo, South Africa. In: *Ecology*, 76 (7), S. 2205–2221. 42
- Williams, J.W., R.L. Summers & W.III. Thompsona (1998):** Applying plant functional types to construct biome maps from eastern North American pollen data: comparisons with model results. In: *Quaternary Science Reviews*, 17, Nr. 6–7, S. 607–627. 52
- Wilson, T.B. & E.T.F. Witkowski (1998):** Water requirements for germination and early seedling establishment in four African savanna woody plant species. In: *Journal of Arid Environments*, 80, S. 541–550. 17
- Wolfe, R.E., D.P. Roy & E.F. Vermote (1998):** The MODIS land data storage, gridding and compositing methodology: Level 2 Grid. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Nr. 36, S. 1324–1338. 96
- Woodward, S.J.R., D.J. Barker & R.F. Zyskowski (2001):** A practical model for predicting soil water deficit in New Zealand pastures. In: *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 44, S. 91–109. 61
- Wright, J. L. (1982):** New evapotranspiration crop coefficients. In: *J. Irrig. and Drain. Div.*, ASCE, 108, S. 57–74. 78
- Xie, P. & P. A. Arkin (1997):** A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimations, and numerical model outputs. In: *Bulletin of American Meteorological Society*, 78, Nr. 11, S. 2539–2558. 81

Zeidler, J., S. Hanrahan & M. Scholes (2002): Land-use intensity affects range condition in arid to semi-arid Namibia. In: *Journal of Arid Environments*, 52, S. 389–403. 33

Zimmermann, H.-J. (1991): *Fuzzy Set Theory. And its applications.* 2. Auflage. Boston: Kluwer Academic Publishers. 71, 161

Zobler, L.A. (1986): World soil file for global climate modelling. NASA – Tech. Memo. 87802. 74

A Anhang

A.1 ENVI/IDL Programme zur Biomassenberechnung

Im Anhang wird der Quellcode aller selbstentwickelten Routinen abgedruckt. Dies dient zum einen der Dokumentation der IDL-Routinen und zum anderen zur Eröffnung der Möglichkeit, den Aufbau und die Struktur des RBM-Modells zu ergründen. Da der Quellcode sehr umfangreich und zusätzlich auf der beiliegenden CD abgelegt ist, wie dieser im Anhang mit einer nur sehr kleinen Schriftgröße zweispaltig abgedruckt.

A.1.1 MOD09_PREP

```
; MOD09_PREP.pro
; -----
; Das Tool MOD09_PREP dient der Aufbereitung der MODIS
; MOD09 V004 Daten zur Verwendung im Regionalen Biosphären-
; modell (RBM) Kaokoveld.
; Dabei arbeitet die Routine mit verschiedenen Unterroutinen,
; die folgende Aktionen durchführen:
; 1. Umprojektion der einzelnen MOD09-Daten aus ISIN nach
;    UTM
; 2. Ausgabe der unprojizierten Daten in ein temporäres
;    Verzeichnis.
; 3. Zusammenfassen der Daten zu 10-Tages-Kompositen. Dabei
;    werden Wolken und eventuelle No-Data Bereiche über den
;    zeitlichen Verschnitt eliminiert.
; *****
PRO PARAM, datname_in, tile_name, temp, pix
; -----
; diese Programm erzeugt eine Parmeterfile um die C-Routine
; resample.exe zu steuern
; Erstellt am 28.02.2002 von J. Richters, RSRG - Uni Bonn
; -----
; Folgende Variablen werden von einer Übergeordneten
; Routine übergeben:
; datname_in: Dies ist der Dateiname samt Pfad der MODIS
; *.hdf Datei, die umprojiziert werden soll.
; -----
parampfad=temp+'project.prm'
datain='INPUT_FILENAME = '+datname_in
dataout='OUTPUT_FILENAME = '+temp+'modis temp.tif'
;folgende mit 1 markierte Kanäle werden prozessiert
P0='SPECTRAL_SUBSET = (1 1 1 1 1 1 0 0)'
P1=' '
;Definition eines Subsets als Zeilen/Spalten Angabe
P2='SPATIAL_SUBSET_TYPE = INPUT_LINE_SAMPLE'
case tile_name of
'h19v10': subset=[200,1300,2000,2400]
'h19v11': subset=[200,1,2000,1000]
endcase
uly=STRTRIM((subset(0)),1)
ulx=STRTRIM((subset(1)),1)
lry=STRTRIM((subset(2)),1)
lrx=STRTRIM((subset(3)),1)
P3='SPATIAL_SUBSET_UL_CORNER = ( '+ulx+' '+uly+' )'
P4='SPATIAL_SUBSET_LR_CORNER = ( '+lrx+' '+lry+' )'
P5=' '
P6='RESAMPLING_TYPE = NN'
P7=' '
P8='OUTPUT_PROJECTION_TYPE = UTM'
P9=' '
P10='UTM_ZONE = 33'
P11='DATUM = WGS84'
P12='OUTPUT_PIXEL_SIZE = '+STRTRIM(pix,1)
OPENW,1,parampfad
PRINTF,1,datain
PRINTF,1,P1
PRINTF,1,P1
PRINTF,1,P0
PRINTF,1,P1
PRINTF,1,P2
PRINTF,1,P3
PRINTF,1,P4
PRINTF,1,dataout
PRINTF,1,P5
PRINTF,1,P6
PRINTF,1,P7
PRINTF,1,P8
PRINTF,1,P9
PRINTF,1,P10
PRINTF,1,P11
PRINTF,1,P12
PRINTF,1,P1
CLOSE,1
; -----
; Ende der Routine PARAM.pro
```

```

; -----
END
; *****
; *****
PRO RESAMPLE, datname_in, tile_name, temp, pix
; *****
; Diese Programm stößt den Resample-Prozess der MODIS-
; Daten an.
; -----
PARAM, datname_in, tile_name, temp, pix
; -----
; Erzeugung einer Batchdatei zur Initialisierung der
; Umprojektion
; -----
pre_command='set MRTDATADIR=D:\ENVI_IDL\startup\mrt23\data'
command='D:\ENVI_IDL\startup\mrt23\bin\resample -p '+temp+'$
'project.prm -g '+temp+'modis_resample.log'
bat_name='D:\ENVI_IDL\startup\mrt23\bin\ModisRun.bat'
OPENW,1,bat_name
PRINTF,1,pre_command
PRINTF,1,command
CLOSE,1
; -----
; Absetzen des Shell-Befehls
; -----
SPAWN, bat_name
; -----
; Ende der Routine RESAMPLE.pro
; -----
END
; *****
PRO MOD_PROJECT, datname_in, outpfad, temp, pix
; *****
; diese Programm erzeugt projiziert mit Hilfe der C-Routine
; resample.exe MODIS Daten aus einer ISIN Integerized
; Sinusoidal Grid in UTM, WGS84, Zone 33 South um.
; Erstellt am 28.02.2002 von J. Richters, RSRG - Uni Bonn
; -----
; Pfad zu dem temporär erzeugten Daten
; -----
temp_pfad=temp+'*.tif'
; -----
; Definition des Ausgabenamens
; -----
datname = STRMID(datname_in, (STRPOS( datname_in, 'MOD', $
/REVERSE_SEARCH)))
prod_name=STRMID(datname, 0,5)
datum_name=STRMID(datname, (STRPOS( datname, 'A',5 ))+1,7)
tile_name=STRMID(datname, (STRPOS( datname, 'h',10 ))+6)
outname=outpfad + prod_name + '_' + datum_name + '_' + $
tile_name + '.modis'
PRINT, outname
; -----
; Aufruf von resample.pro, die eine Steuerdatei für die
; C-Routine erzeugt und dem Resamling Prozess anstößt.
; -----
RESAMPLE, datname_in, tile_name, temp, pix
; -----
; Abfragen der Anzahl der erzeugten Dateien.
; -----
fname=FINDFILE(temp_pfad, count=count)
IF count LT 0 THEN RETURN
; -----
; Öffnen der ersten Datei um die Geometrie anzufragen
; -----
ENVI_OPEN_DATA_FILE, fname(0), /tiff, r_fid=fid
IF (fid EQ -1) THEN RETURN
ENVI_FILE_QUERY, fid, ns=ns, nl=nl, nb=nb
dims = [-1, 0, ns-1, 0, nl-1]
map_info=envi_get_map_info(fid=fid)
ENVI_FILE_MNG, id=fid, /remove
; -----
; Erzeugen eines Array, in dem die umprojizierten Daten
; gelagert werden.
; -----
data=INTARR(ns,nl,count)
; -----
; Einlesen einzelnen Bänder und Ausgabe in Speicherarray
; -----
FOR i=0,count-1 DO BEGIN
ENVI_OPEN_DATA_FILE, fname(i), r_fid=fid, /tiff
data(*,*,i)=FIX(ENVI_GET_DATA(fid=fid, dims=dims, pos=0))
ENVI_FILE_MNG, id=fid, /remove, /delete
endfor
; -----
; Ausgabe der umprojizierten Datei
; -----
OPENW,2,outname
WRITEU, 2, data
CLOSE, 2
ENVI_SETUP_HEAD, fname=outname, $
ns=ns, nl=nl, nb=count, $
interleave=0, data_type=2, $
offset=0, map_info=map_info, $
/write, r_fid=out_id
ENVI_FILE_MNG, id=out_id, /remove
; -----
; Ende der Routine MOD_PROJECT.pro
; -----
END
; *****
PRO MOD09_HDF_IMPORT_ALL, in_pfad, outpfad, temp, pix
; *****
; Das Programm arbeitet in folgender Reihenfolge:
; 1. Abfrage des Verzeichnisses, in dem die MODIS Rohdaten liegen (Input)
; und Angabe des Ausgabeordners für prozessierten Daten.
; 2. Übergabe der Dateinamen einzeln an die Subroutine mod_reproject.pro
; Hier wird der Ausgabedateiname abgeleitet, die zugehörige Parameter-
; Datei für die Projektion geschrieben und die C-Routine resample.exe
; gestartet. Anschließend werden die erzeugten *.tif-Dateien erneut
; in ENVI eingelesen und als ENVI-Datei ausgegeben.
; 3. Zusammenfügen der beiden zu einem Zeitpunkt gehörigen Datenfiles
; über die Mosaiking-Funktion von ENVI.
; -----
; Definition eines temporären Verzeichnisses
; -----
tmp=tmp+'MODIS' ; Temporäres Verzeichnis zur
; Zwischenlagerung von Daten
; -----
; Überprüfung der Temporären Ordner
; -----
dirtest=FILE_TEST(tmp,/DIRECTORY)
if dirtest EQ 0 then FILE_MKDIR, tmp
tmp=tmp+'\'
; -----
; Eingabename der MODIS +.hdf Datei
; -----
such_str=in_pfad+'*.hdf'
data_names=FINDFILE(such_str, count=filezahl)
IF filezahl LT 1 THEN GOTO, ende
; -----
; Beginn der Prozessierung
; -----
FOR i=0, filezahl-1 DO BEGIN
MOD_PROJECT, data_names(i), outpfad, tmp, pix
ENDFOR
; -----
; Ende der Prozessierung erreicht
; -----
ende: print, 'No File found'
; -----
; Ende der Routine MOD09_HDF_IMPORT_ALL.pro
; -----
END
; *****
PRO CLOUD, data, wolk
; *****
; Diese Routine testen des Vorhandensein von Wolken und

```

```

; erzeugt eine Wolkenmaske aus den Spektraldaten.
; -----
; Definition eines Arrays um Zwischenergebnisse Test1
; aufzunehmen
; -----
wolk = BYTARR(N_ELEMENTS(data(*,0)),N_ELEMENTS(data(0,*)))
; -----
; Testabfrage
; -----
g1=5500
  hilf=WHERE(data(*,*) gt g1, count)
  wolk(*,*)=0
  IF (count GT 0) THEN wolk(hilf)=1
; -----
; Ende der Routine CLOUD.pro
; -----
END
; *****
PRO NO_DATA, data, no_mask
; *****
; Diese Routine überprüft, ob alle Pixel Werte enthalten
; und erzeugt eine No-Data-Maske.
; -----
; Definition eines Arrays um Zwischenergebnisse Test1
; aufzunehmen
; -----
no_mask = BYTARR(N_ELEMENTS(data(*,0)),N_ELEMENTS(data(0,*)))
; -----
; Testabfrage
; -----
ndv=(0)          ; ndv = no data value
  hilf=WHERE(data(*,*) eq ndv, count)
  no_mask(*,*)=0
  IF (count GT 0) THEN no_mask(hilf)=1
; -----
; Ende der Routine NO_DATA.pro
; -----
END
; *****
PRO MERGE_MASK, wolk, nodata, mask
; *****
; Zusammenführen der Wolken & NO Data Maske
; -----
mask=BYTARR(N_ELEMENTS(wolk(*,0)), N_ELEMENTS(wolk(0,*)))
hilf2=wolk(*,*)+nodata(*,*)
hilf=WHERE(hilf2(*,*) GT 0,count)
mask(*,*)=0
IF (count GT 0) THEN mask(hilf)=1
; -----
; Ende der Routine MERGE_MASK.pro
; -----
END
; *****
PRO MITTEL_WERT, data,mask, erg
; *****
; Berechnung der Mittelwert pro MODIS-Band unter Einbeziehung
; der Gesamtmaske.
; -----
erg=INTARR(N_ELEMENTS(data(*,0,0)),N_ELEMENTS(data(0,*)))
FOR x=0,(N_ELEMENTS(data(*,0,0))-1) DO BEGIN
  FOR y=0,(N_ELEMENTS(data(0,*))) -1 DO BEGIN
    hilf=WHERE(mask(x,y,*) ne 1,count)
    IF count NE 0 THEN BEGIN
      werte=INTARR(10)
      werte=data(x,y,*)
      erg(x,y)=ROUND(MEDIAN(werte))
    ENDIF ELSE BEGIN
      erg(x,y)=-9999
    ENDELSE
  ENDFOR
ENDFOR
; -----
; Ende der Routine MITTEL_WERT.pro
; -----
; *****
END
; *****
PRO MOD09_COMPOSIT, in_pfad, outpfad
; -----
; Die Routine MOD09_COMPOSIT.pro bildet aus mehreren
; importierten MOD09-Daten 10-Tages-Komposite. Dabei werden
; sowohl eventuell vorhandene Wolken genauso wie Fehlpixel
; reduziert bzw. beseitigt.
; -----
such_str=in_pfad+'*.modis'
data_names=INDFILE(such_str, count=count)
IF count LT 1 THEN RETURN
; -----
; Erzeugen des Ausgabenamens der Datei
; -----
date=STRMID(data_names(0),(STRPOS(data_names(0),'\'', $
/REVERSE_SEARCH)))
Prod=STRMID(date,(STRPOS(date,'M')),5)
year=STRMID(date,7,4)
period_hlp=STRMID(data_names(0),0,(STRPOS(data_names(0),'\'', $
/REVERSE_SEARCH)))
period=STRMID(period_hlp,(STRPOS(period_hlp,'_', $
/REVERSE_SEARCH))+1,2)
oname='TSP_' + Prod + '_' + period + year + '.data'
outname=outpfad+oname
; -----
; Einlesen von grundsätzlichen Dateninformationen
; -----
ENVI_OPEN_FILE, data_names(0), r_fid=fid, /NO_REALIZE
envi_file_query, fid, ns=ns, nl=nl, nb=nb
dims = [-1, 0, ns-1, 0, nl-1]
map_info=envi_get_map_info(fid=fid)
ENVI_FILE_MNG, id=fid, /remove
data=INTARR(ns,nl,nb,count)
; -----
; Erzeugen einer Gesamtvariablen,
; die alle Daten enthält
; -----
FOR i=0,count-1 DO BEGIN
  ENVI_OPEN_FILE, data_names(i), r_fid=fid, /NO_REALIZE
  FOR j=0,nb-1 DO BEGIN
    data(*,*,j,i)=ENVI_GET_DATA(fid=fid, dims=dims, pos=j)
  ENDFOR
  ENVI_FILE_MNG, id=fid, /remove
  PRINT, 'Datei Nr. 'i,' eingelesen.'
ENDFOR
; -----
; Ausmaskieren der Wolkenbereiche
; -----
wolk=BYTARR(nl,ns,count)
FOR i=0,count-1 DO BEGIN
  file_data=data(*,*,1,i)
  CLOUD, file_data,wolk_mask
  wolk(*,*,i)=wolk_mask
  PRINT, 'Wolken für Datei Nr. 'i,'ermittelt.'
ENDFOR
; -----
; Ausmaskieren der No-Data-Bereiche
; -----
nodata=BYTARR(nl,ns,count)
FOR i=0,count-1 DO BEGIN
  file_data=data(*,*,1,i)
  NO_DATA, file_data,no_mask
  nodata(*,*,i)=no_mask
  PRINT, 'NO DATA Werte für Datei Nr. 'i,'ermittelt.'
ENDFOR
; -----
; Bestimmung der Gesamtmaske (aus Wolken und No Data)
; -----
mask=BYTARR(N_ELEMENTS(data(*,0,0)),N_ELEMENTS(data(0,*)))
FOR i=0,count-1 DO BEGIN
  wolk_mask=wolk(*,*,i)
  nodata_mask=nodata(*,*,i)
  MERGE_MASK, wolk_mask, nodata_mask, erg_mask

```

```

mask(*,*,i)=erg_mask
PRINT, 'Zusammenführen der Masken für Datei Nr. ',i,'beendet.'
ENDFOR
; -----
; Ermittlung der Durchschnittswerte
; -----
outdata=INTARR(ns,nl,nb)
data_band=INTARR(ns,nl,count)
FOR b=0,nb-1 DO BEGIN
  FOR n=0,count-1 DO BEGIN
    data_hilf=data(*,*,b,n)
    data_band(*,*,n)=data_hilf(*,*)
  ENDFOR
  MITTEL_WERT, data_band,mask, erg
  outdata(*,*,b)=erg
  PRINT, 'Die Mittelwertberechnung für Band Nr. ',b,$
  'ist abgeschlossen.'
ENDFOR
; -----
; Ausgabe der gemittelten Datei
; -----
OPENW,1,outname
WRITEU,1,outdata
CLOSE,1
ENVI_SETUP_HEAD, fname=outname, $
ns=ns, nl=nl, nb=nb, $
interleave=0, data_type=2, $
offset=0, map_info=map_info, $
/write, r_fid=o_id
ENVI_FILE_MNG, id=o_id, /remove
; -----
; Ende der Routine MOD09_COMPOSIT.pro
; -----
end
; *****
PRO MOD09_PREP
; *****
; Die Routine MOD09_PREP.pro liest beliebige MODIS MOD09
; Daten (Surface Reflectance) ein und bereitet diese
; allgemein für die Anwendung im RM Kaokoveld auf.
; Dabei übernimmt die Routine MOD09_PREP.pro eine steuernde
; Funktion und ruft die nachgeordneten Prozesse zur
; Datenverarbeitung auf.
; -----
; VORDEFINIERT VARIABLEN
; Diese sollen nur bei der Installation auf einer neuen
; Plattform angepasst werden !!
; -----
tmp = 'D:\Temp' ; Pfad zu temporären Verzeichnis
; zur Zwischenlagerung von Daten.
; -----
; Eingangspfad
; -----
pfad='E:\MOD09_2002_test\MOD09_test_2002.txt'
pix = 1000
; -----
; Graphische Benutzeroberfläche zur Eingabe der Pfade
; -----
list = ['500','1000']
base=WIDGET_AUTO_BASE(title='RM - MOD09 Data Preparation')
w1=WIDGET_BASE(base, /row, /frame)
e1=WIDGET_OUTF(w1, uvalue='ipfad', default=pfad, $
prompt='Please enter MOD09 directory file:', /auto)
w3=WIDGET_BASE(base, /column, /frame)
p5 = WIDGET_OUTF(w3, uvalue='opfad', /directory, $
prompt='Please enter output directory:', /auto)
p6 = widget_toggle(w3, uvalue='pix', list=list, $
prompt='Select import pixel resolution [m]', /auto)
result=AUTO_WID_MNG(base)
if (result.accept eq 0) then RETALL ;exit by cancel-button
; -----
; Auslesen der GUI
; -----
pfad=(result.ipfad)
; -----
;-----
outf=(result.opfad)
pixel=(result.pix)
CASE pixel OF
0 :pix=500
1:pix=1000
ENDCASE
; -----
; Definition der Ausgabe
; -----
outf=outf+'\ '
mod09_outpfad = outf
dirtest=FILE_TEST(mod09_outpfad,/DIRECTORY)
if dirtest EQ 0 THEN FILE_MKDIR, mod09_outpfad
mod09_outpfad=mod09_outpfad+'\ '
; -----
; Bestimmung der Länge der Pfaddatei
; -----
A = ' ' ; Dummy-Variable zum Einlesen der Pfade
n = 0 ; Zählvariable z. Ermitt. d.Gesamtzahl d. Pfade
; -----
; Schleife mit EOF Statment um Länge zu Bestimmen
; -----
OPENR,1,pfad
WHILE NOT EOF(1) DO BEGIN
  READF, 1, A
  n=n+1
ENDWHILE
CLOSE, 1
; -----
; Echtes Einlesen der Pfadangaben
; -----
pfade=STRARR(n)
OPENR,1,pfad
FOR i=0, n-1 DO BEGIN
  READF, 1, A ; Read a line of text
  pfade(i) = A
ENDFOR
CLOSE, 1
; -----
; B E G I N N D E R P R O Z E S S I E R U N G
; -----
; Erzeugung eines Ordner, der die Importprodukte aufnimmt
; -----
pfad = STRMID(pfade,(STRPOS(pfade(0), '\', /REVERSE_SEARCH))+1)
import_outpfad=tmp +'\'+ pfad
; -----
; Beginn der Importschleife
; -----
FOR i=0,n-1 DO BEGIN
; -----
; Überprüfung des Ausgabeordners
; -----
import_outpfd = import_outpfad(i)
dirtest=FILE_TEST(import_outpfd,/DIRECTORY)
if dirtest EQ 0 THEN FILE_MKDIR, import_outpfd
import_outpfd = import_outpfd +'\ '
; -----
; Import der HDF-Daten
; -----
MOD09_HDF_IMPORT_ALL, pfade(i), import_outpfd, tmp, pix
; -----
; Compositing
; -----
MOD09_COMPOSIT, import_outpfd(i), mod09_outpfad
ENDFOR
; -----
; Ende der Routine MOD09_PREP.pro
; -----
PRINT, 'All Jobs finished !'
PRINT, 'Thanks for using MOD09_PREP'
PRINT, '(c) J.Richters, GIUB, Uni Bonn; 12/2003'
; -----

```

```
; Ende der Routine MOD09_PREP                                END
;-----
```

A.1.2 MOD11_PREP

```
; Tool zur automatischen Umprojektion von MODIS Daten mit
; Hilfe des MODIS Reprojection Tool V.2.2
;-----
; Das Programm arbeitet in folgender Reihenfolge:
; 1. Abfrage des Verzeichnisses, in dem die MODIS
; Rohdaten liegen (Input) und Angabe des Ausgabe-
; ordners für prozessierten Daten.
; 2. Übergabe der Dateinamen einzeln an die Subroutine
; mod_reproject.pro. Hier wird der Ausgabedateiname
; abgeleitet, die zugehörige Parameter-Datei für die
; Projektion geschrieben und die C-Routine
; resample.exe gestartet. Anschließend werden die
; erzeugten *.tif-Dateien erneut in ENVI eingelesen
; und als ENVI-Datei ausgegeben.
; 3. Zusammenfügen der beiden zu einem Zeitpunkt
; gehörigen Datenfiles über die Mosaiking-Funktion
; von ENVI.
;-----
;*****
PRO PARAM, datname_in, tile_name, temp, pix
;*****
; diese Programm erzeugt eine Parmeterfile um die C-Routine
; resample.exe zu steuern
; Erstellt am 28.02.2002 von J. Richters, RSRG - Uni Bonn
;-----
; Folgende Variablen werden von einer Übergeordneten Routine
; übergeben: datname_in: Dies ist der Dateiname samt Pfad
; der MODIS *.hdf Datei, die umprojiziert werden soll.
; (STRING Variable!)
;-----
; Definition der einzelnen STRING-Einträge für *.prm-Steuer-
; datei für resample.exe
;-----
parampfad=temp+'project.prm'
datain='INPUT_FILENAME = '+datname_in
dataout='OUTPUT_FILENAME = '+temp+'modis_temp.tif'
;folgende mit 1 markierte Kanäle werden prozessiert
PO='SPECTRAL_SUBSET = (1 0 0 0 1 0 0 0 1 1 0 0)'
P1=' '
;Definition eines Subsets als Zeilen/Spalten Angabe
P2='SPATIAL_SUBSET_TYPE = INPUT_LINE_SAMPLE'
CASE tile_name OF
'h19v10': subset=[1,600,1200,1200]
'h19v11': subset=[1,1,1200,600]
ENDCASE
uly=STRTRIM((subset(0)),1)
ulx=STRTRIM((subset(1)),1)
lry=STRTRIM((subset(2)),1)
lrx=STRTRIM((subset(3)),1)
P3='SPATIAL_SUBSET_UL_CORNER = ( '+ulx+' '+uly+' )'
P4='SPATIAL_SUBSET_LR_CORNER = ( '+lrx+' '+lry+' )'
P5=' '
P6='RESAMPLING_TYPE = NN'
P7=' '
P8='OUTPUT_PROJECTION_TYPE = UTM'
P9=' '
P10='UTM_ZONE = 33'
P11='DATUM = WGS84'
P12='OUTPUT_PIXEL_SIZE = '+ STRTRIM(pix,1)
;-----
; Ausgabe der Parameterdatei zur Übergabe an resample.exe
;-----
OPENW,1,parampfad
PRINTF,1,datain
PRINTF,1,P1
PRINTF,1,P1
PRINTF,1,P0
PRINTF,1,P1
PRINTF,1,P2
PRINTF,1,P3
PRINTF,1,P4
PRINTF,1,dataout
PRINTF,1,P5
PRINTF,1,P6
PRINTF,1,P7
PRINTF,1,P8
PRINTF,1,P9
PRINTF,1,P10
PRINTF,1,P11
PRINTF,1,P12
PRINTF,1,P1
CLOSE,1
;-----
; Ende der Routine PARAM.pro
;-----
END
;*****
PRO RESAMPLE, datname_in, tile_name, temp, pix
;*****
; Diese Programm stößt den Resample-Prozess der MODIS
; Daten an und arbeitet dazu in zwei Schritten;
; 1. Die Routine PARAM.pro wird angestoßen, die die
; Parameterdatei für die Shell-Routine resample.exe erzeugt.
; 2. Die Shell-Routine resample.exe wird von der Routine
; RESAMPLE.pro angestossen.
;-----
; Erzeugen der Parameterdatei für resample.exe
;-----
PARAM, datname_in, tile_name, temp, pix
;-----
; Erzeugung einer Batchdatei zur Initialisierung
; der Umprojektion. Dabei muss die Shellvariable
; MRTDATADIR gesetzt werden.
;-----
pre_command='set MRTDATADIR=D:\ENVI_IDL\startup\mrt31\data'
command='D:\ENVI_IDL\startup\mrt31\bin\resample -p '+temp+'$
'project.prm -g '+temp+'modis_resample.log'
;-----
; Definition des Dateinamens und Ausgabe der Batchdatei
;-----
bat_name='D:\ENVI_IDL\startup\mrt31\bin\ModisRun.bat'
OPENW,1,bat_name
PRINTF,1,pre_command
PRINTF,1,command
CLOSE,1
;-----
; Absetzen des Shell-Befehls und Übergabe des
; Befehls an die Kommandozeile
;-----
SPAWN, bat_name
;-----
; Ende des Routine RESAMPLE.exe
;-----
END
;*****
PRO MOD_PROJECT, datname_in, outpfad, temp, pix
;*****
; diese Programm erzeugt projiziert mit Hilfe der C-Routine
; resample.exe MODIS Daten aus einer ISIN Integerized
; Sinusoidal Grid in UTM, WGS84, Zone 33 South um.
; Erstellt am 28.02.2002 von J. Richters, RSRG - Uni Bonn
```

```

; -----
; Pfad zu dem temporär erzeugten Daten
; -----
temp_pfad=temp+'*.tif'
; -----
; Definition des Ausgabenamens
; -----
datname = STRMID(datname_in, (STRPOS( datname_in, 'MOD', $
/REVERSE_SEARCH)))
prod_name=STRMID(datname, 0,5)
datum_name=STRMID(datname, (STRPOS( datname, 'A2',5 ))+1,7)
tile_name=STRMID(datname, (STRPOS( datname, 'h',10 ))+6)
;file_mkdir, outpfad+'reproj'
LST_name=outpfad + prod_name + '_' + datum_name + '_' + $
_LST_name + '_LST.modis'
EMS_name=outpfad + prod_name + '_' + datum_name + '_' + $
tile_name + '_Emissivity.modis'
print, LST_name
print, EMS_name
; -----
; Aufruf von resample.pro, die eine Steuerdatei für die
; C-Routine erzeugt und dem Resamling Prozess anstößt.
; -----
RESAMPLE, datname_in, tile_name, temp, pix
; -----
; Import der LST - Daten
; -----
; Abfragen der Anzahl der erzeugten Dateien.
; -----
LST_pfad=temp+'*1km.tif'
fname=FILENAME(LST_pfad, count=count)
if count LT 0 THEN RETURN
; -----
; Öffnen der ersten Datei um die Geometrie anzufragen
; -----
ENVI_OPEN_DATA_FILE, fname(0), /tiff, r_fid=fid
if (fid eq -1) then RETURN
envi_file_query, fid, ns=ns, nl=nl, nb=nb, data_type=dt
dims = [-1, 0, ns-1, 0, nl-1]
map_info=envi_get_map_info(fid=fid)
envi_file_mng, id=fid, /remove
; -----
; Erzeugen eines Array, in dem die umprojizierten Daten
; gelagert werden.
; -----
data=INTARR(ns,nl,count)
; -----
; Einlesen einzelnen Bänder und ausgabe in Speicherarray
; -----
for i=0,count-1 do begin
envi_open_data_file, fname(i), r_fid=fid, /tiff
if (fid eq -1) then RETURN
data(*,i)=(ENVI_GET_DATA(fid=fid, dims=dims, pos=0))
envi_file_mng, id=fid, /remove, /delete
endifor
; -----
; Ausgabe der LST Daten
; -----
openw,2,LST_name
writeu, 2, data
close, 2
ENVI_SETUP_HEAD, fname=LST_name, $
ns=ns, nl=nl, nb=count, bnames=['LST Day [°C]', 'LST Night [°C]'], $
interleave=0, data_type=dt, $
offset=0, map_info=map_info, $
/write, r_fid=LST_id
envi_file_mng, id=LST_id, /remove
; -----
; Import der EMS - Daten
; -----
; Abfragen der Anzahl der erzeugten Dateien.
; -----
LST_pfad=temp+'*Emiss_3*.tif'
fname=findfile(LST_pfad, count=count)
if count lt 0 then return
; -----
; Öffnen der ersten Datei um die Geometrie anzufragen
; -----
envi_open_data_file, fname(0), /tiff, r_fid=fid
if (fid eq -1) then return
envi_file_query, fid, ns=ns, nl=nl, nb=nb, data_type=dt
dims = [-1, 0, ns-1, 0, nl-1]
map_info=envi_get_map_info(fid=fid)
envi_file_mng, id=fid, /remove
; -----
; Erzeugen eines Array, in dem die importierten Daten
; gelagert werden.
; -----
data=bytarr(ns,nl,count)
; -----
; Einlesen einzelnen Bänder und ausgabe in Speicherarray
; -----
for i=0,count-1 do begin
envi_open_data_file, fname(i), r_fid=fid, /tiff
if (fid eq -1) then return
data(*,i)=(ENVI_GET_DATA(fid=fid, dims=dims, pos=0))
envi_file_mng, id=fid, /remove, /delete
endifor
; -----
; Ausgabe der LST Daten
; -----
openw,2,EMS_name
writeu, 2, data
close, 2
ENVI_SETUP_HEAD, fname=EMS_name, $
ns=ns, nl=nl, nb=2, bnames=['Emiss'], $
interleave=0, data_type=1, $
offset=0, map_info=map_info, $
/write, r_fid=LST_id
envi_file_mng, id=LST_id, /remove
; -----
; Ende der Routine MOD_PROJECT.pro
; -----
END

;*****
PRO MOD11_HDF_IMPORT, in_pfad, outpfad, pix, temp
;*****
; Diese Routine steuert die Auswahl des Verzeichnisses,
; das an die untergeordnete Routine mod_project übergeben
; wird.
; -----
; Überprüfung der Existenz der temporären Ordner
; -----
dirtest=FILE_TEST(temp,/DIRECTORY)
IF dirtest eq 0 THEN FILE_MKDIR, temp
temp=temp+'\'
tmp=temp+'mod_resample'
dirtest=FILE_TEST(tmp,/DIRECTORY)
IF dirtest eq 0 THEN FILE_MKDIR, tmp
tmp=tmp+'\'
; -----
; Eingabename der MODIS *.hdf Datei
; -----
such_str=in_pfad+'*.hdf'
data_names=FILENAME(such_str, count=filezahl)
; -----
; Beginn der Prozessierung
; -----
FOR i=0, filezahl-1 DO BEGIN
MOD_PROJECT, data_names(i), outpfad, temp, pix
ENDFOR
; -----
; Ende der Prozessierung erreicht
; -----
ende: PRINT, 'No File found'
; -----

```

```

; Ende der Routine MOD11_HDF_IMPORT.pro
; -----
END
; *****
; *** BEGINN DER ROUTINE MOD11_COMPOSIT *****
; *****
; *** NO DATA MASKIERUNG *****
; *****
PRO NO_DATA, data, no_mask
; -----
; Definition eines Arrays um Zwischenergebnisse Test1
; aufzunehmen
; -----
no_mask = BYTARR(N_ELEMENTS(data(*,0)),N_ELEMENTS(data(0,*)))
; -----
; Testabfrage
; -----
ndvl=7500          ; ndvl = no data value low
ndvh=65535        ; ndvh = no data value high
no_mask(*,*)=0
    hilf=WHERE(data(*,*) LT ndvl , count)
    IF (count NE 0) THEN no_mask(hilf)=1
    hilf2=WHERE(data(*,*) GT ndvh,count2)
    IF (count2 NE 0) THEN no_mask(hilf2)=1
; -----
; Ende der Routine NO_DATA.pro
; -----
END
; *****
; *** NO DATA MASKIERUNG EMS *****
; *****
PRO NO_DATA_EMS, data, no_mask
; *****
; Definition eines Arrays um Zwischenergebnisse Test1 aufzunehmen
no_mask = bytarr(n_elements(data(*,0)),n_elements(data(0,*)))
; Testabfrage
ndvl=0          ; ndvl = no data value low
no_mask(*,*)=0
    hilf=where(data(*,*) eq ndvl , count)
    if (count NE 0) then no_mask(hilf)=1
;no_mask(*,*)=0
END
; *****
; *** MITTELWERT BERECHNUNG *****
; *****
PRO MITTEL, t_dat, t_mask, erg
; *****
hilf=WHERE(t_mask eq 0, count)
if count NE 0 then $
erg=FIX(MEAN(t_dat(hilf))) else erg=0
END
; *****
; *** MAIN PROCESSING LEVEL *****
; *****
PRO MOD11_TEMP_COMPOSIT, in_pfad, temp_outpfad
; -----
; Eingabename der MODIS *.modis Datei
; -----
; Massenprozessierung
; -----
such_str=in_pfad+'*LST.modis'
data_name=findfile(such_str, count=count)
tile_name=STRMID(data_name, (STRPOS( data_name(0), 'h',10 ),6)
use=where(tile_name eq 'h19v10', count_use)
if count_use lt 1 then return
data_names=strarr(count_use)
data_names=data_name(use)
count=count_use
; -----
; Erzeugen des Ausgabenamens der Datei
; -----
date=STRMID(data_names(0),(STRPOS(data_names(0),'',$
/REVERSE_SEARCH)))
Prod=STRMID(date,(STRPOS(date,'M')),5)
year=STRMID(date,7,4)
period_hlp=STRMID(data_names(0),0,(STRPOS(data_names(0),'',$
/REVERSE_SEARCH)))
period=STRMID(period_hlp,(STRPOS(period_hlp,'_',$
/REVERSE_SEARCH))+1,2)
Temp_oname='TSP_TEMP' + '_' + period + year + '.data'
temp_name=temp_outpfad+Temp_oname
print, temp_name
; -----
; Einlesen von grundsatzlichen Dateninformationen
; -----
envi_open_file, data_names(0), r_fid=fid, /NO_REALIZE
envi_file_query, fid, ns=ns, nl=nl, nb=nb
dims = [-1, 0, ns-1, 0, nl-1]
map_info=envi_get_map_info(fid=fid)
envi_file_mng, id=fid, /remove
; -----
; Erfassung der Temperatur
; -----
temp_data=intarr(ns,nl,count)
temp_mask=bytarr(ns,nl,count)
day_temp=intarr(ns,nl)
night_temp=intarr(ns,nl)
for i=0,count-1 do begin
; -----
; Einlesen der einzelnen Datei
; -----
envi_open_file, data_names(i), r_fid=fid, /NO_REALIZE
day_temp(*,*)=ENVI_GET_DATA(fid=fid, dims=dims, pos=0)
night_temp(*,*)=ENVI_GET_DATA(fid=fid, dims=dims, pos=1)
; mit pos=0 wird das 1. Band selectiert
envi_file_mng, id=fid, /remove ;/delete
print, 'Temp_Datei: ',i,' eingelesen.'
; -----
; Ausmaskieren der No-Data-Bereiche
; -----
day_nodata=bytarr(ns,nl)
no_data, day_temp,no_mask
day_nodata(*,*)=no_mask
; -----
night_nodata=bytarr(ns,nl)
no_data, night_temp,no_mask
night_nodata(*,*)=no_mask
; -----
; Berechnung der mittleren Tagestemperatur
; -----
temp_dum=intarr(ns,nl)
temp_dum(*,*)=0
mask_dum=bytarr(ns,nl)
mask_dum(*,*)=0
; -----
hilf=WHERE((day_nodata(*,*) eq 0) and $
(night_nodata(*,*) eq 0),c_hilf)
if c_hilf NE 0 then begin
temp_dum(hilf)=ROUND((day_temp(hilf)+night_temp(hilf))/2)
mask_dum(hilf)=0
endif
; -----
hilf=WHERE((day_nodata(*,*) eq 0) and $
(night_nodata(*,*) eq 1),c_hilf)
if c_hilf NE 0 then begin
temp_dum(hilf)=ROUND(day_temp(hilf))
mask_dum(hilf)=0
endif
; -----
hilf=WHERE((day_nodata(*,*) eq 1) and $
(night_nodata(*,*) eq 0),c_hilf)
if c_hilf NE 0 then begin
temp_dum(hilf)=0
mask_dum(hilf)=1
endif
; -----
hilf=WHERE((day_nodata(*,*) eq 1) and $
(night_nodata(*,*) eq 1),c_hilf)

```

```

if c_hilf NE 0 then begin
  temp_dum(hilf)=0
  mask_dum(hilf)=1
endif
; -----
temp_data(*,*,i)=temp_dum
temp_mask(*,*,i)=mask_dum
endfor
temp_dum=0
; -----
; Bestimmung der mittleren Temperatur über 10 Tage
; -----
temp_out=intarr(ns,nl)
t_dat=intarr(count)
t_mask=bytarr(count)
for y=0,nl-1 do begin
  for x=0,ns-1 do begin
    t_dat=temp_data(x,y,*)
    t_mask=temp_mask(x,y,*)
    mittel,t_dat,t_mask,erg
    temp_out(x,y)=BYTE(erg)
  endfor
endfor
; -----
; Bestimmung der realen Temperaturen
; über Data Scaling & Kelvin Umrechnung
; -----
temp_scaling=0.0200
kelvin=273.15
temp_out=temp_out * temp_scaling
temp_out=temp_out + kelvin
; -----
; Ausgabe der gemittelten Datei
; -----
openw,1,temp_name
writeu,1,temp_out
close,1
bnames=['Temperatur [°C]']
ENVI_SETUP_HEAD, fname=temp_name, $
ns=ns, nl=nl, nb=1, bnames=bnames, $
interleave=0, data_type=4, $
offset=0, map_info=map_info, $
/write, r_fid=tmp_id
ENVI_FILE_MNG, id=tmp_id, /remove
; -----
; Ende der Routine MOD11_TEMP_COMPOSIT
; -----
END
; *****
; *** MOD11_EMS_COMPOSIT *****
; *****
PRO MOD11_EMS_COMPOSIT, in_pfad, ems_outpfad
; -----
; Massenprozessierung
; -----
such_str=in_pfad+'*Emissivity.modis'
data_name=FILENAME(such_str, count=count)
tile_name=STRMID(data_name, (STRPOS( data_name(0), 'h',10 ),6)
use=WHERE(tile_name eq 'h19v10', count_use)
if count_use lt 1 then return
data_names=STRARR(count_use)
data_names=data_name(use)
count=count_use
; -----
; Erzeugen des Ausgabenamens der EMS-Datei
; -----
date=STRMID(data_names(0), (STRPOS(data_names(0), '\', $
/REVERSE_SEARCH)))
Prod=STRMID(date, (STRPOS(date, 'M')), 5)
year=STRMID(date, 7, 4)
period_hlp=STRMID(data_names(0), 0, (STRPOS(data_names(0), '\', $
/REVERSE_SEARCH)))
period=STRMID(period_hlp, (STRPOS(period_hlp, '_'), $
/REVERSE_SEARCH))+1, 2)

ems_onsame = 'TSP_EMS' + '_' + period + year + '.data'
ems_name = ems_outpfad+ems_onsame
; -----
; Einlesen von grundsätzlichen Dateninformationen
; -----
envi_open_file, data_names(0), r_fid=fid, /NO_REALIZE
envi_file_query, fid, ns=ns, nl=nl, nb=nb
dims = [-1, 0, ns-1, 0, nl-1]
map_info=envi_get_map_info(fid=fid)
envi_file_mng, id=fid, /remove
; -----
; Erfassung der Emissivitätsdaten
; -----
ems_data=bytarr(ns,nl,count)
ems_mask=bytarr(ns,nl,count)
ems_temp=BYTARR(ns,nl)
emsb31_temp = BYTARR(ns,nl)
emsb32_temp = BYTARR(ns,nl)
for i=0,count-1 do begin
; -----
; Einlesen der einzelnen Datei
; -----
envi_open_file, data_names(i), r_fid=fid, /NO_REALIZE
emsb31_temp(*,*)=ENVI_GET_DATA(fid=fid, dims=dims, pos=0)
emsb32_temp(*,*)=ENVI_GET_DATA(fid=fid, dims=dims, pos=1)
envi_file_mng, id=fid, /remove; /delete
print, 'EMS-Datei: ', i, ' eingelesen.'
; *****
; Ausmaskieren der No-Data-Bereiche
; *****
b31_nodata=bytarr(ns,nl)
no_data_ems, emsb31_temp, no_mask
b31_nodata(*,*)=no_mask
; -----
b32_nodata=bytarr(ns,nl)
no_data_ems, emsb32_temp, no_mask
b32_nodata(*,*)=no_mask
; *****
; Berechnung der mittleren Emissivität
; *****
ems_dum=BYTARR(ns,nl)
ems_dum(*,*)=0
mask_dum=BYTARR(ns,nl)
mask_dum(*,*)=0
; -----
hilf=WHERE((b31_nodata(*,*) eq 0) and $
(b32_nodata(*,*) eq 0), c_hilf)
if c_hilf NE 0 then begin
  ems_dum(hilf)=BYTE(ROUND(((emsb31_temp(hilf)+$
emsb32_temp(hilf))/2))
  mask_dum(hilf)=0
endif
; -----
hilf=WHERE((b31_nodata(*,*) eq 0) and $
(b32_nodata(*,*) eq 1), c_hilf)
if c_hilf NE 0 then begin
  ems_dum(hilf)=BYTE(ROUND(emsb31_temp(hilf)))
  mask_dum(hilf)=0
endif
; -----
hilf=WHERE((b31_nodata(*,*) eq 1) and $
(b32_nodata(*,*) eq 0), c_hilf)
if c_hilf NE 0 then begin
  ems_dum(hilf)=BYTE(ROUND(emsb32_temp(hilf)))
  mask_dum(hilf)=1
endif
; -----
hilf=WHERE((b31_nodata(*,*) eq 1) and $
(b32_nodata(*,*) eq 1), c_hilf)
if c_hilf NE 0 then begin
  ems_dum(hilf)=0
  mask_dum(hilf)=1
endif
; -----

```

```

ems_data(*,*,i)=ems_dum
ems_mask(*,*,i)=mask_dum
endfor
ems_dum=0
; *****
; Bestimmung der mittleren Temperatur über 10 Tage
; *****
ems_out=BYTARR(ns,nl)
e_dat=INTARR(count)
e_mask=BYTARR(count)
for y=0,nl-1 do begin
  for x=0,ns-1 do begin
    e_dat=ems_data(x,y,*)
    e_mask=ems_mask(x,y,*)
    mittel, e_dat, e_mask, erg
    ems_out(x,y)=erg
  endfor
endfor
; -----
; Bestimmung der Emissivität
; über Data Scaling & Kelvin Umrechnung
; -----
ems_scaling = 0.00200
ems_offset = 0.4900
ems_out = (ems_out * ems_scaling) + ems_offset
; -----
; Ausgabe der gemittelten Datei
; -----
openw,1,ems_name
writeu,1,ems_out
close,1
bnames=['Emissivität']
ENVI_SETUP_HEAD, fname=ems_name, $
  ns=ns, nl=nl, nb=1, bnames=bnames, $
  interleave=0, data_type=4, $
  offset=0, map_info=map_info, $
  /write, r_fid=ems_id
ENVI_FILE_MNG, id=ems_id, /remove
; -----
; Ende der Routine MOD11_EMS_COMPOSIT.pro
; -----
END
; *****
; PRO MOD11_PREP
; *****
; Die Routine MOD11_PREP.pro liest beliebige MODIS MOD11
; (Surface Temperature & Emissivity) ein und bereitet die
; allgemein für die Anwendung im RBM Kaokoveld auf.
; Dabei übernimmt die Routine MOD11_PREP.pro eine steuernde
; Funktion und ruft die nachgeordneten Prozesse zur
; Datenverarbeitung auf.
; -----
; VORDAFINIERTER VARIABLEN
; Diese sollen nur bei der Installation auf einer neuen
; Plattform angepasst werden !!
; -----
tmp = 'D:\Temp' ; Pfad zu temporären Verzeichnis
; ; zur Zwischenlagerung von Daten.
; -----
; Eingangspfad
; -----
pfad='E:\MOD11_2001_test\MOD11_test_2001.txt'
pix = 1000
; -----
; Graphische Benutzeroberfläche zur Eingabe der Pfade
; -----
list = ['500','1000']
base=WIDGET_AUTO_BASE(title='REM - MOD11 Data Preparation')
w1=WIDGET_BASE(base, /row, /frame)
e1=WIDGET_OUTF(w1, uvalue='ipfad', default=pfad, $
  prompt='Please enter MOD11 directory file:', /auto)
w3=WIDGET_BASE(base, /column, /frame)
p5 = WIDGET_OUTF(w3, uvalue='opfad', /directory, $
  prompt='Please enter output directory:', /auto)

p6 = widget_toggle(w3, uvalue='pix', list=list, $
  prompt='Select import resolution [m]', /auto)
result=AUTO_WID_MNG(base)
if (result.accept eq 0) then RETALL ;exit by cancel-button
;+++++++
; Auslesen der GUI
;+++++++
pfad=(result.ipfad)
;-----
outf=(result.opfad)
pixel=(result.pix)
CASE pixel OF
  0 :pix=500
  1:pix=1000
ENDCASE
; -----
; Definition der Ausgabe
; -----
outf=outf+'\'
temp_outpfad = outf + 'Temperatur'
dirtest=FILE_TEST(temp_outpfad,/DIRECTORY)
if dirtest EQ 0 THEN FILE_MKDIR, temp_outpfad
temp_outpfad=temp_outpfad+'\'
ems_outpfad = outf + 'Emissivity'
dirtest=FILE_TEST(ems_outpfad,/DIRECTORY)
if dirtest EQ 0 THEN FILE_MKDIR, ems_outpfad
ems_outpfad=ems_outpfad+'\'
; -----
; Bestimmung der Länge der Pfaddatei
; -----
A = '' ; Dummy-Variable zum Einlesen der Pfade
n = 0 ; Zählvariable z. Ermitt. d.Gesamtzahl d. Pfade
; -----
; Schleife mit EOF Statment um Länge zu Bestimmen
; -----
OPENR,1,pfad
WHILE NOT EOF(1) DO BEGIN
  READF, 1, A
  n=n+1
ENDWHILE
CLOSE, 1
; -----
; Echtes Einlesen der Pfadangaben
; -----
pfade=STRARR(n)
OPENR,1,pfad
FOR i=0, n-1 DO BEGIN
  READF, 1, A ; Read a line of text
  pfade(i) = A
ENDFOR
CLOSE, 1
; -----
; B E G I N N D E R P R O Z E S S I E R U N G
; -----
; 1. Import und Umprojektion aller einzelnen Daten
; aus ISIN in UTM.
; -----
; Erzeugung eines Ordner, der die Importprodukte aufnimmt
; -----
pfad = STRMID(pfade,(STRPOS(pfade(0), '\', /REVERSE_SEARCH)+1)
import_outpfad=tmp +'\'+ pfad
; -----
; Beginn der Importschleife
; -----
FOR i=0,n-1 DO BEGIN
  ; Überprüfung des Ausgabeordners
  import_outpfad = import_outpfad(i)
  dirtest=FILE_TEST(import_outpfad,/DIRECTORY)
  if dirtest EQ 0 THEN FILE_MKDIR, import_outpfad
  import_outpfad = import_outpfad +'\\'
; -----
; Starten der Prozessierung
; -----
MOD11_HDF_IMPORT, pfade(i) , import_outpfad, pix, tmp

```



```

                datum=datum, units=units)
; Convert from Geographic to UTM ;
ENVI_CONVERT_PROJECTION_COORDINATES, $
    ixmap_all, iymap_all, iproj, $
    oxmap_all, oymap_all, oproj
; ++++++
; Übernahme der Daten aus der HDF Datei in ENVI
; ++++++
ENVI_ENTER_DATA, cloud, r_fid=cld_id
ENVI_FILE_QUERY, cld_id, ns=ns, nl=nl, nb=nb, data_type=dt
CLOUD = BYTARR(ns,nl)
dims=[-1, 0, ns-1, 0, nl-1]
CLOUD = ENVI_GET_DATA(fid=cld_id, dims=dims, pos=0)
WV=INTARR(ns,nl,2)
ENVI_ENTER_DATA, wv_nr, r_fid=wv_nr_id
ENVI_ENTER_DATA, wv_nr_corr, r_fid=wv_nr_corr_id
WV(*,*,0) = ENVI_GET_DATA(fid=wv_nr_id, dims=dims, pos=0)
WV(*,*,1) = ENVI_GET_DATA(fid=wv_nr_corr_id, dims=dims, pos=0)
ENVI_FILE_MNG, id=wv_nr_id, /remove
ENVI_FILE_MNG, id=wv_nr_corr_id, /remove
ENVI_ENTER_DATA, wv, r_fid=wv_id
ENVI_FILE_QUERY, wv_id, ns=ns, nl=nl, nb=nb, data_type=dt
ENVI_FILE_MNG, id=wv_id, /remove
ENVI_FILE_MNG, id=wv_nr_corr_id, /remove
ENVI_FILE_MNG, id=wv_nr_corr_id, /remove
; ++++++
; Beginn der Umprojektion der Daten
; ++++++
; All. Parameter für die Umprojektion
; ++++++
pts = [oxmap_all, oymap_all, X_all_base, Y_all_base ]
;ps = [ps, ps]
method=6 ;Triangulation with nearest neighbor
degree=1 ;
background=0 ;
; ++++++
; Parameter für WV
; ++++++
pos = [0,1]
bnames = ['WV Correction Factor', 'Total Water Vapor - NIR']
; ++++++
; Beginn der Image-to-Map-Registrierung für WV
; ++++++
ENVI_DOIT, 'envi_register_doit', $
    w_fid=wv_id, w_pos=pos, w_dims=dims, $
    method=method, out_name=out_wv, $
    pts=pts, pixel_size=ps, $
    proj=oproj, OUT_BNAME=bnames, r_fid=wv_warp
; ++++++
; Parameter für Cloud Mask
; ++++++
pos = 0
bnames = ['Cloud Mask']
; ++++++
; Beginn der Image-to-Map-Registrierung für WV
; ++++++
ENVI_DOIT, 'envi_register_doit', $
    w_fid=cld_id, w_pos=pos, w_dims=dims, $
    method=method, out_name=out_cld, $
    pts=pts, pixel_size=ps, $
    proj=oproj, OUT_BNAME=bnames, r_fid=cld_warp
; ++++++
; Schließen aller offenen Dateien
; ++++++
ENVI_FILE_MNG, id=wv_warp, /remove
ENVI_FILE_MNG, id=wv_id, /remove
ENVI_FILE_MNG, id=cld_id, /remove
ENVI_FILE_MNG, id=cld_warp, /remove
; ++++++
; ENDE der Routine MOD05_IMPORT
; ++++++
END
#####
; MOD05_PRESUB.pro
; ++++++

```

```

PRO MOD05_PRESUB, data_name, xmap, ymap, ps, nns, nnl
; ++++++
; Konstante Parameter
; ++++++
utm_zone = 33
datum = 'WGS84'
;ps = [ps,ps]
units = ENVI_TRANSLATE_PROJECTION_UNITS('Meters')
; ++++++
; Öffnen der Datei
; ++++++
ENVI_OPEN_FILE, data_name, r_fid=fid, /no_realize
IF (fid eq -1) THEN RETURN
ENVI_FILE_QUERY, fid, ns=ns, nl=nl, nb=nb, data_type=dt, $
    bnames=bnames
pos=INTARR(nb)
map_info = ENVI_GET_MAP_INFO(fid=fid)
proj = ENVI_PROJ_CREATE(/utm, zone=utm_zone, /south, $
    datum=datum, units=units)
x_map = FLTARR(2)
y_map = FLTARR(2)
x_map(0) = map_info.mc(2)
y_map(0) = map_info.mc(3)
x_map(1) = x_map(0) + (ns * ps(0))
y_map(1) = y_map(0) - (nl * ps(1))
dims = [-1, 0, ns-1, 0, nl-1]
; -----
; Erzeugung einer virtuellen Datei für um daten und
; Umgebung aufzunehmen
; -----
x_max_dim = 1500 + ns + 1500
y_max_dim = 1500 + nl + 1500
if (dt eq 1) then v_data=BYTARR(x_max_dim, Y_max_dim,nb)
if (dt eq 2) then v_data=INTARR(x_max_dim, Y_max_dim,nb)
if (dt eq 3) then v_data=LONARR(x_max_dim, Y_max_dim,nb)
if (dt eq 4) then v_data=FLTARR(x_max_dim, Y_max_dim,nb)
; -----
; Einlesen der MOD05-Daten
; -----
for i=0, nb-1 do begin
v_data(1500:(1500+ns-1),1500:(1500+nl-1),i)=ENVI_GET_DATA$
(fid=fid, dims=dims, pos=i)
endfor
; Schließen der Data-Datei
envi_file_mng, id=fid, /remove ;,/delete
; -----
; Definition der map_info
; -----
units = ENVI_TRANSLATE_PROJECTION_UNITS('Meter')
datum = 'WGS84'
vmc = [1500D, 1500, x_map(0), y_map(0)]
virtu_map_info = ENVI_MAP_INFO_CREATE(proj=proj, MC = vmc,$
    PS = ps)
; Einladen der virtuellen Datei
ENVI_ENTER_DATA, v_data, map_info = virtu_map_info, r_fid = v_fid
; -----
; Transformation der Map-Koordinaten in File-Pixel
; -----
ENVI_CONVERT_FILE_COORDINATES, v_fid, xf, yf, xmap, ymap
xf=FIX(xf)
yf=FIX(yf)
print, 'SUBSET PIXEL X(round):', xf
print, 'SUBSET PIXEL Y(round):', yf
print, 'nns:',nns, 'nnl:', nnl
; -----
; Bestimmung der Zeilen und Spalten des Subsets
; -----
; Bestimmung der Spalten (X-Richtung)
dims = [-1, xf, (xf+nns)-1, yf, (yf+nnl)-1]
ENVI_FILE_QUERY, v_fid, nb=nb, data_type=dt
pos=INTARR(nb)
; ++++++
if (dt eq 1) then data=BYTARR(nns,nnl,nb)
if (dt eq 2) then data=INTARR(nns,nnl,nb)

```

```

if (dt eq 3) then data=LONARR(nns,nnl,nb)
if (dt eq 4) then data=LTARR(nns,nnl,nb)
if (dt eq 5) then data=DLARR(nns,nnl,nb)
if (dt eq 6) then data=DCOMPLEXARR(nns,nnl,nb)
if (dt eq 14) then data=LONARR(nns,nnl,nb)
if (dt eq 12) then data=UONARR(nns,nnl,nb)
if (dt eq 13) then data=ULONARR(nns,nnl,nb)
if (dt eq 15) then data=ULONG4ARR(nns,nnl,nb)
; ++++++
for i=0, nb-1 do begin
data(*,i)=ENVI_GET_DATA(fid=v_fid, dims=dims, pos=i)
endifor
ENVI_FILE_MNG, id=v_fid, /remove ;,/delete
; ++++++
; Ausgabe der kopierten Datei
; ++++++
OPENW, 1, data_name
WRITEU,1, data
CLOSE,1
mc = [0, 0, xmap, ymap]
map_info_out = ENVI_MAP_INFO_CREATE(proj=proj, MC=mc, PS=ps)
ENVI_SETUP_HEAD, fname=data_name, $
ns=nns, nl=nnl, nb=nb, $
interleave=0, data_type=dt, $
offset=0, file_type=0, bnames=bnames, $
map_info=map_info_out, /write, r_fid=oid
envi_file_mng, id=oid, /remove ;,/delete
; ++++++
; ENDE der Routine MOD05_PRESUB.pro
; ++++++
END
; #####
PRO MOD05_CALC_WV, data_name
; ++++++
; Öffnen der WV-Datei
; ++++++
ENVI_OPEN_FILE, data_name, r_fid=fid, /no_realize
if (fid eq -1) then RETURN
ENVI_FILE_QUERY, fid, ns=nns, nl=nnl, nb=nb, data_type=dt, $
bnames=bnames
pos=INTARR(nb)
dims = [-1, 0, ns-1, 0, nl-1]
map_info = ENVI_GET_MAP_INFO(fid=fid)
; ++++++
; Einlesen der CLD-Daten
; ++++++
cld_data = BYTARR(ns,nnl,nb)
FOR i=0,nb-1 DO BEGIN
cld_data = ENVI_GET_DATA(fid=fid, dims=dims, pos=i)
ENDFOR
ENVI_FILE_MNG, id=fid, /remove
; ++++++
; Bestimmung der bewölkten Pixel
; ++++++
data = BYTARR(ns,nnl)
FOR y=0,nl-1 DO BEGIN
FOR x=0,ns-1 DO BEGIN
BIT_EXTRACT, cld_data(x,y), 1, dummy
data(x,y) = dummy
ENDFOR
ENDFOR
; ++++++
; Ausgabe der binären Bewölkungsdatei
; ++++++
OPENW, 1, data_name
WRITEU,1, data
CLOSE,1
ENVI_SETUP_HEAD, fname=data_name, $
ns=nns, nl=nnl, nb=nb, $
interleave=0, data_type=1, $
offset=0, file_type=0, bnames=bnames, $
map_info=map_info, /write, r_fid=oid
ENVI_FILE_MNG, id=oid, /remove ;,/delete
; ++++++
; ENDE der Routine MOD05_CALC_CLD.pro
; ++++++
END
; #####
PRO BIT_EXTRACT, zahl, stelle, bit
dummy=BYTE(zahl/(2stelle))
bit=dummy MOD 2
END
; #####
PRO MOD05_IMPORT_SINGLE_TS, name, out_wv, out_cld,$
xmap, ymap, ps, ns, nl
; ++++++
; Import der MODIS MOD05_L2 Daten
; ++++++
MOD05_IMPORT, name, out_wv, out_cld, ps
; ++++++
; Reduktion der importierten Daten auf Untersuchungsgebiet
; ++++++

```

```

; Subset der WaterVapor-Daten
MOD05_PRESUB, out_wv, xmap, ymap, ps, ns, nl
; ++++++
; Subset der Cloud-Daten
MOD05_PRESUB, out_cl, xmap, ymap, ps, ns, nl
; ++++++
; Ermittlung der Wolkenmaske
MOD05_CALC_CLD, out_cl
; ++++++
; Umrechnung der WV-Daten in cm/Luftsäule Wasserinhalt
MOD05_CALC_WV, out_wv
; ++++++
; ENDE der Routine MOD05_IMPORT_SINGLE_TS.pro
END
; #####
; MOD05_IMPORT_TS.pro
; ++++++
PRO MOD05_IMPORT_TS, pfd, out_wv, out_cl, ps, year
; Diese Routine dient der Ermittlung der einzelnen
; Dateinamen in einem Zeitschritt (TS).
; ++++++
; Definition des Sucharguments für Erfassung der
; hdf-Dateien
; ++++++
such_str = pfd + '\*.hdf'
names=FILENAME(such_str, count=n_files)
; ++++++
; Ermittlung des Dateinames für die Ausgabe
; ++++++
out_n=STRMID(names,STRPOS(names(0), '\',/REVERSE_SEARCH)+1)
out_name=STRMID(out_n,0,22)
print, 'Ausgabename',out_name(0)
; ++++++
; Generelle Geoinformation für importierte Daten
; ++++++
; Räumliche Eingrenzung
north_border=-15.0
east_border=18.0
south_border=-21.0
west_border=11.0
DEG_Borders = [west_border, east_border, $
               north_border, south_border]
; ++++++
utm_zone = 33
datum = 'WGS84'
units = ENVI_TRANSLATE_PROJECTION_UNITS('Meters')
; -----
; Anpassung der Eckkoordinaten
; -----
ixmap=[DEG_Borders(0),DEG_Borders(1)]
iymap=[DEG_Borders(2),DEG_Borders(3)]
iproj = ENVI_PROJ_CREATE(/geographic)
; Get the projection information
oproj = ENVI_PROJ_CREATE(/utm, zone=utm_zone, /south, $
                        datum=datum, units=units)
; Convert from Geographic to UTM
ENVI_CONVERT_PROJECTION_COORDINATES, $
    ixmap, iymap, iproj, $
    xkoord, ykoord, oproj
; -----
; Bestimmung der ns und nl
; -----
ns=FLOOR((xkoord(1) - xkoord(0))/ ps(0))
nl=FLOOR((ykoord(0) - ykoord(1))/ ps(1))
xmap=xkoord(0)
ymap=ykoord(0)
print, 'ns:', ns, 'nl:', nl
; Beginn der Schleife zum Import der einzelnen Dateien

FOR i=0,n_files-1 DO BEGIN
    ; Ausgabenname für WV
    wv_pfd = out_wv + '\'+ out_name(i) + '.wv'
    ; Ausgabenname für CLD
    cld_pfd = out_cl + '\'+ out_name(i) + '.cl'
    ; Result = EOS_QUERY( name, Info)
    print, cld_pfd
    ; Beginn des einzelnen Imports
    MOD05_IMPORT_SINGLE_TS, names(i), wv_pfd, cld_pfd, $
        xmap, ymap, ps, ns, nl
ENDFOR
; ++++++
; Beginn des Zusammenfassens zu 10-Tages-Kompositen
; ++++++
; Zusammenfassen der WV-Daten
; ++++++
MOD05_COMBIME_TS_WV, out_wv, year
MOD05_COMBIME_TS_CLD, out_cl, year
; ++++++
; ENDE der Routine MOD05_IMPORT_TS.pro
; ++++++
END
; #####
; MOD05_COMBIME_TS_WV.pro
; ++++++
PRO MOD05_COMBIME_TS_WV, pfd, year
; Diese Routine dient der Zusammenfassung der einzelnen
; WV-Dateien zu einem 10-Tages WV-Produkt pro Zeitschritt
; (TS). Dabei werden die Water Vapor-Daten als einfaches
; arithmetisches Mittel über die zehn Einzelwerte pro
; Pixel berechnet.
; ++++++
; Erzeugung des Dateinames
; ++++++
print, pfd, year
TS = STRMID(pfd, STRPOS(pfd,'\',/REVERSE_SEARCH)+1,2)
yr = STRTRIM(year,2)
data_name = 'TSP_WV_' + TS + yr + '.data'
opfad = STRMID(pfd,0, STRPOS(pfd,'\',/REVERSE_SEARCH)+1)
out_name = opfad + data_name
; ++++++
; Erfassung der einzelnen Dateien
; ++++++
such_str = pfd + '\*.wv'
names=FILENAME(such_str, count=n_files)
IF (n_files LE 0) THEN RETURN
; ++++++
; Einlesen der ersten Datei
; ++++++
ENVI_OPEN_FILE, names(0), r_fid=fid, /no_realize
IF (fid EQ -1) THEN RETURN
ENVI_FILE_QUERY, fid, ns=ns, nl=nl, nb=nb, data_type=dt, $
    bnames=bnames
pos=INTARR(nb)
dims = [-1, 0, ns-1, 0, nl-1]
map_info = ENVI_GET_MAP_INFO(fid=fid)
ENVI_FILE_MNG, id=fid, /remove
; ++++++
; Einlesen der Daten zu Berechnung und Abfangen von
; Pixelverschiebungen
; ++++++
data = FLTARR(ns,nl,n_files)
FOR i=0,n_files-1 DO BEGIN
    ENVI_OPEN_FILE, names(i), r_fid=fid, /no_realize
    data(*,*,i) = ENVI_GET_DATA(fid=fid, dims=dims, pos=0)
    ENVI_FILE_MNG, id=fid, /remove
ENDFOR
; ++++++
; Berechnung des Arithmetischen Mittels
; ++++++
data_out = FLTARR(ns,nl)
FOR y=0,nl-1 DO BEGIN
    FOR x=0,ns-1 DO BEGIN
        dum = WHERE(data(x,y,*)) NE 0, count)

```

```

IF count NE 0 THEN BEGIN
  hilf=FLTARR(count)
  hilf(*)=data(x,y,dum)
  data_out(x,y) = MEAN(hilf)
ENDIF ELSE BEGIN
  data_out(x,y)=0
ENDELSE
ENDFOR
ENDFOR
; ++++++
; Ausgabe der 10-Tages-WaterVapor-Datei
; ++++++
OPENW, 1, out_name
WRITEU,1, data_out
CLOSE,1
ENVI_SETUP_HEAD, fname=out_name, $
  ns=ns, nl=nl, nb=1, $
  interleave=0, data_type=dt, $
  offset=0, file_type=0, bnames=bnames, $
  map_info=map_info, /write, r_fid=oid
ENVI_FILE_MNG, id=oid, /remove
; ++++++
; ENDE der Routine MOD05_COMBINE_TS_WV.pro
; ++++++
END
;#####
; MOD05_COMBINE_TS_CLD.pro
; ++++++
PRO MOD05_COMBINE_TS_CLD, pfad, year
; Diese Routine dient der Zusammenfassung der einzelnen
; ClD-Dateien zu einem 10-Tages Wolkenprodukt pro
; Zeitschritt (TS). Dabei wird die Bewölkung über 10 Tage
; als Prozentwert angegeben, damit der Bewölkungsverlauf
; besser widerspiegelt wird.
; ++++++
; Erzeugung des Dateinamens
; ++++++
;pfad = 'e:\test\2001\wv\01'
TS = STRMID(pfad, STRPOS(pfad, '\', /REVERSE_SEARCH)+1,2)
yr = STRTRIM(year,2)
data_name = 'TSP_CLD_' + TS + yr + '.data'
;data_name = 'TSP_CLD_' + '08' + '2001' + '.data'
opfad = STRMID(pfad,0, STRPOS(pfad, '\', /REVERSE_SEARCH)+1)
out_name = opfad + data_name
; ++++++
; Erfassung der einzelnen Dateien
; ++++++
such_str = pfad + '*.clD'
names=FILENAME(such_str, count=n_files)
IF (n_files LE 0) THEN RETURN
; ++++++
; Einlesen der ersten Datei
; ++++++
ENVI_OPEN_FILE, names(0), r_fid=fid, /no_realize
  IF (fid EQ -1) THEN RETURN
ENVI_FILE_QUERY, fid, ns=ns, nl=nl, nb=nb, data_type=dt, $
  bnames=bnames
pos=INTARR(nb)
dims = [-1, 0, ns-1, 0, nl-1]
map_info = ENVI_GET_MAP_INFO(fid=fid)
ENVI_FILE_MNG, id=fid, /remove
; ++++++
; Einlesen der Daten zu Berechnung
; ++++++
data = BYTARR(ns,nl,n_files)
FOR i=0,n_files-1 DO BEGIN
  ENVI_OPEN_FILE, names(i), r_fid=fid, /no_realize
  data(*,i) = ENVI_GET_DATA(fid=fid, dims=dims, pos=0)
  ENVI_FILE_MNG, id=fid, /remove
ENDFOR
; ++++++
; Berechnung der Bewölkung über 10 Tage
; ++++++
data_out = BYTARR(ns,nl)
dum = BYTARR(n_files)
FOR y=0,nl-1 DO BEGIN
  FOR x=0,ns-1 DO BEGIN
    hilf = WHERE(data(x,y,*) EQ 1, count)
    data_out(x,y) = BYTE((FLOAT(count)/FLOAT(n_files))*100)
  ENDFOR
ENDFOR
; ++++++
; Ausgabe der 10-Tages-Bewölkungsdatei
; ++++++
OPENW, 1, out_name
WRITEU,1, data_out
CLOSE,1
ENVI_SETUP_HEAD, fname=out_name, $
  ns=ns, nl=nl, nb=1, $
  interleave=0, data_type=1, $
  offset=0, file_type=0, bnames=bnames, $
  map_info=map_info, /write, r_fid=oid
ENVI_FILE_MNG, id=oid, /remove
; ++++++
; ENDE der Routine MOD05_COMBINE_TS_CLD.pro
; ++++++
END
;#####
; M A S S E N _ P R O C E S S I N G
;#####
PRO MOD05_PREP
; ++++++
; Pfad zur Angabe Verweisdatei auf Dateipfade
; ++++++
pfad='M:\modis_namibia\Jahrgang_2000\MOD05_L2_2000.txt'
ps = [1000.,1000.]
year = 2001
; ++++++
; Graphische Benutzeroberfläche zur
; Auswahl der Importparameter
; ++++++
base=WIDGET_AUTO_BASE(title='RBM - MOD05_L2 Import')
w1=WIDGET_BASE(base, /row, /frame)
  e1=WIDGET_OUTF(w1, uvalue='home', $
  prompt='Please enter path to MOD05_L2 data:', $
  default=pfad, /auto)
w2=WIDGET_BASE(base, /row, /frame)
  p1 = WIDGET_PARAM(w2, dt=4, field=4, xsize=4, $
  default=ps(0), uvalue='x_pix', $
  prompt='Resampling X Pixel size [m]', /auto)
  p2 = WIDGET_PARAM(w2, dt=4, field=4, xsize=4, $
  default=ps(1), uvalue='y_pix', $
  prompt='Resampling Y Pixel size [m]', /auto)
  p3 = WIDGET_PARAM(w2, dt=2, field=8, xsize=4, $
  default=year, uvalue='year', $
  prompt='Enter importing Year', /auto)
w3=WIDGET_BASE(base, /row, /frame)
  r1=WIDGET_OUTF(w3, uvalue='out', /directory, $
  prompt='Please enter output directory:', /auto)
result=AUTO_WID_MNG(base)
if (result.accept eq 0) then RETALL ;exit by cancel-button
; ++++++
; Auslesen der GUI Informationen
; ++++++
pfad=(result.home)
;-----
ps(0)=(result.x_pix)
ps(1)=(result.y_pix)
year=(result.year)
;-----
outf=(result.out)
; ++++++
; Bestimmung der Anzahl der Zeilen der Verweisdatei
; ++++++
OPENR,1,pfad
; Define a string variable:
A = ''

```

```

n = 0
; Loop until EOF is found:
WHILE NOT EOF(1) DO BEGIN
  READF, 1, A
  n=n+1
ENDWHILE
CLOSE, 1
; ++++++
; Definition eines Array zur Aufnahme der Dateipfade
; ++++++
pfade=STRARR(n)
; ++++++
; Einlesen der Dateipfade
; ++++++
OPENR,1,pfad
FOR i=0, n-1 DO BEGIN
  READF, 1, A
  pfade(i) = A
ENDFOR
CLOSE, 1
; ++++++
; Bestimmung eines Ausgabepfades
; ++++++
if (outf EQ '') THEN RETALL
outf_wv = outf + '\wv\'
outf_cld = outf + '\cld\'
; ++++++
; Beginn der Prozessierung
; ++++++
FOR i=0,n-1 DO BEGIN
  ; ++++++
  ; Erzeugung der Ausgabeordner für WV
  ; ++++++
  pfad = STRMID(pfade(i),(STRPOS(pfade(i), '\', /REVERSE_SEARCH))+1)
  outpf_wv = outf_wv + pfad
  ; ++++++
  ; Überprüfung des Ausgabeordners für WV
  ; ++++++
  dirtest=FILE_TEST(outpf_wv,/DIRECTORY)
  IF dirtest EQ 0 THEN FILE_MKDIR, outpf_wv
  out_wv=outpf_wv
  ; ++++++
  ; Erzeugung der Ausgabeordner für CLD
  ; ++++++
  outpf_cld = outf_cld + pfad
  ; ++++++
  ; Überprüfung des Ausgabeordners für CLD
  ; ++++++
  dirtest=FILE_TEST(outpf_cld,/DIRECTORY)
  IF dirtest EQ 0 THEN FILE_MKDIR, outpf_cld
  out_cld=outpf_cld
  ; Starten der Prozessierung
  MOD05_IMPORT_TS, pfade(i), out_wv, out_cld, ps, year
ENDFOR
; ++++++
; Ende der Routine MOD05_PREP
; ++++++
END

```

A.1.4 MOD44_PREP

```

; Tool zur automatischen Umprojektion von MODIS Daten mit
; Hilfe des MODIS Reprojection Tool V.2.2
; -----
; Das Programm arbeitet in folgender Reihenfolge:
; 1. Abfrage des Verzeichnisses, in dem die MODIS Rohdaten
; liegen (Input) und Angabe des Ausgabeordners für
; prozessierten Daten.
; 2. Übergabe der Dateinamen einzeln an die Subroutine
; mod_reproject.pro. Hier wird der Ausgabedateiname
; abgeleitet, die zugehörige Parameterdatei für die
; Projektion geschrieben und die C-Routine resample.exe
; gestartet. Anschließend werden die erzeugten *.tif-
; Dateien erneut in ENVI eingelesen und als ENVI-Datei
; ausgegeben.
; 3. Zusammenfügen der beiden zu einem Zeitpunkt gehörigen
; Datenfiles über die Mosaiking-Funktion von ENVI.
; *****
pro param, datname_in, tile_name, temp
; diese Programm erzeugt eine Parmeterfile um die C-Routine
; resample.exe zu steuern
; Erstellt am 28.02.2003 von J. Richters, RSRG - Uni Bonn
; Folgende Variablen werden von einer übergeordneten Routine
; übergeben:
; datname_in: Dies ist der Dateiname samt Pfad der MODIS
; *.hdf Datei, die umprojiziert werden soll. (STRING Variable!)
parampfad=temp+'project.prm'
datain='INPUT_FILENAME = '+datname_in
dataout='OUTPUT_FILENAME = '+temp+'modis_temp.tif'
;folgende mit 1 markierte Kanäle werden prozessiert
P0='SPECTRAL_SUBSET = (1 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0)'
P1=' '
P2='SPATIAL_SUBSET_TYPE = INPUT_LINE_SAMPLE'
case tile_name of
'h19v10': subset=[200,1300,2000,2400]
'h19v11': subset=[200,1,2000,1000]
endcase
uly=string(subset(0))
uly=string(subset(1))

lry=string(subset(2))
lrx=string(subset(3))
P3='SPATIAL_SUBSET_UL_CORNER = ('+uly+' '+lry+')'
P4='SPATIAL_SUBSET_LR_CORNER = ('+lrx+' '+lry+')'
P5=' '
P6='RESAMPLING_TYPE = nearest_neighbor'
P7=' '
P8='OUTPUT_PROJECTION_TYPE = UTM'
P9=' '
P10='UTM_ZONE = 33'
P11=' '
P12='OUTPUT_PIXEL_SIZE = 1000'
openw,1,parampfad
printf,1,datain
printf,1,P1
printf,1,dataout
printf,1,P1
printf,1,P0
printf,1,P1
printf,1,P2
printf,1,P3
printf,1,P4
printf,1,P5
printf,1,P6
printf,1,P7
printf,1,P8
printf,1,P9
printf,1,P10
printf,1,P11
printf,1,P12
printf,1,P1
close,1
end
;*****
pro resample, datname_in, tile_name, temp
param, datname_in, tile_name, temp
; -----
; Erzeugung einer Batchdatei zur Initialisierung

```

```

; der Umprojektion. Dabei muss die Shellvariable
; MRTDATADIR gesetzt werden.
; -----
pre_command='set MRTDATADIR=D:\ENVI_IDL\startup\mrt31\data'
command='D:\ENVI_IDL\startup\mrt31\bin\resample -p '+temp+'
'project.prm -g ' +temp+'modis_resample.log'
; -----
; Definition des Dateinamens und Ausgabe der Batchdatei
; -----
bat_name='D:\ENVI_IDL\startup\mrt31\bin\ModisRun.bat'
OPENW,1,bat_name
PRINTF,1,pre_command
PRINTF,1,command
CLOSE,1
; -----
; Absetzen des Shell-Befehls und Übergabe des
; Befehls an die Kommandozeile
; -----
SPAWN, bat_name
end
;#####
; Modis_reproject.pro
;#####
; diese Programm erzeugt projiziert mit Hilfe der C-Routine
; resample.exe MODIS Daten aus einer ISIN Integerized Sinusodial
; Grid in UTM, WGS84, Zone 33 South um.
; Erstellt am 28.02.2002 von J. Richters, RSRG - Uni Bonn
pro mod_project, datname_in, outpfad, temp
; Pfad zu dem tempär erzeugten Daten
temp_pfad=temp+'*.tif'
; Definition des Ausgabenamens
datname = STRMID(datname_in, (STRPOS( datname_in, 'MOD', $
/REVERSE_SEARCH)))
prod_name=STRMID(datname, 0,5)
datum_name=STRMID(datname, (STRPOS( datname, 'A',5))+1,7)
tile_name=STRMID(datname, (STRPOS( datname, 'h',10 )),6)
file_mkdir, outpfad+'reproj'
outname=outpfad +'reproj'+ prod_name + '_' + datum_name + $
'_' + tile_name + '.modis'
; Aufruf von resample.pro, die eine Steuerdatei für die C-Routine
; erzeugt und dem Resamling Prozess anstößt.
resample, datname_in, tile_name, temp
; Abfragen der Anzahl der erzeugten Dateien.
fname=findfile(temp_pfad, count=count)
if count lt 0 then return
; Öffnen der ersten Datei um die Geometrie anzufragen
envi_open_data_file, fname(0), /tiff, r_fid=fid
if (fid eq -1) then return
envi_file_query, fid, ns=ns, nl=nl, nb=nb
dims = [-1, 0, ns-1, 0, nl-1]
map_info=envi_get_map_info(fid=fid)
envi_file_mng, id=fid, /remove
; erzeugen eines Array, in dem die umprojizierten Daten gelagert werden.endifor
data=bytarr(ns,nl,count)
; Einlesen einzelnen Bänder und ausgabe in Speicherarray
for i=0,count-1 do begin
envi_open_data_file, fname(i), r_fid=fid, /tiff
data(*,i)=fix(ENVI_GET_DATA(fid=fid, dims=dims, pos=0))
envi_file_mng, id=fid, /remove, /delete
endifor

bnames=['Bare [%]', 'Nontree Vegetation [%]', 'Tree Cover [%]']
; Ausgabe der Umprojizierten Datei
openw,2,outname
writeu, 2, data
close, 2
ENVI_SETUP_HEAD, fname=outname, $
ns=ns, nl=nl, nb=count, bnames=bnames, $
interleave=0, data_type=1, $
offset=0, map_info=map_info, $
/write, r_fid=out_id
envi_file_mng, id=out_id, /remove
end
;#####
; Definition eines temporären Verzeichnisses
;#####
temp='d:\temp\MODIS'; Temporäres Verzeichnis zur Zwischen-
; lagerung von Daten
; Überprüfung der Temporären Ordner
dirtest=FILE_TEST(temp,/DIRECTORY)
if dirtest eq 0 then FILE_MKDIR, 'd:\temp\MODIS'
temp=temp+'\'
;#####
; Eingabename der MODIS *.hdf Datei
;#####
in_pfad=envi_pickfile(title='Wählen Sie die erste *.HDF Datei:', $
filter='*.hdf')
if (in_pfad eq '') then retall
datadir = STRMID(in_pfad, 0,(STRPOS(in_pfad, '\', /REVERSE_SEARCH))+1)
such_str=datadir+'*.hdf'
data_names=findfile(such_str, count=filezahl)
if filezahl lt 1 then retall
;#####
; GUI um Prozessierung zu überwachen und Ausgabefestzulegen.
;#####
base =widget_auto_base(title='RBM - MODIS Processing', /XBIG)
datlist = widget_slist(base, prompt='Use following files for processing', $
list=data_names, /frame, /no_select)
infotext='No. of selected files: '+strtrim(string(filezahl),1)
Info = WIDGET_SLABEL(Base, prompt=infotext)
wo = widget_outf(base, uvalue='outf', /directory, $
prompt='Please Select Output Directory',/auto)
result = auto_wid_mng(base)
if (result.accept eq 0) then retall
outpfad=result.outf
;#####
; Beginn der Prozessierung
;#####
; 1. Umprojizieren der MODIS *.hdf Daten aus SINUSODIAL in
; UTM, WGS84
;#####
for i=0, filezahl-1 do begin
mod_project, data_names(i), outpfad, temp
;#####
; Ende der Prozessierung erreicht
;#####
print,'End of Processing reached'
print,'Thanks for using MOD44_PREP.pro'
end

```

A.1.5 RBM_PREP_GUI

```

; RBM_PREP.pro (v0.1)
;#####
; Diese Routine wurde von J. Richters am 09.10.2003
; im Rahmen des Teilprojekt B7 im SFB 389 ACACIA
; am GIUB erstellt
;#####
; Die Routine RBM_PREP.pro ist die zwingende Vorbereitung
; für einen erfolgreichen Verlauf einer Biomassenberechnung
; mit RBM_KAKOVELD_ALL.pro. Diese vorbereitende Routine
; analysiert, ordnet und testet alle Dateien, die für einen
; erfolgreichen Modellauf nötig sind. Dazu werden alle
; benötigten Dateien aufgerufen, ggf. beschnitten und in
; die modelleigene Ordner und Dateistruktur geschrieben.
; Die Arbeit der Routine RBM_PREP.pro umfasst folgende

```

```

; Schritte:
; - Abfrage von Benutzerinformationen (Home-Verzeichnis,
;   Zeitraum des Modelllaufs, räumliche Eingrenzung).
; - Abfrage der Modelleingangsdaten (hier werden jeweils
;   die Pfade zu den Verzeichnissen erhoben, da meist
;   jeweils 1 Jahr komplett pro Zeitschritt vorliegt).
; - Aus den erhobene Daten werden nun sämtliche Ordner
;   angelegt, die für die Funktion des Modells von
;   Bedeutung sind.
; - Danach werden alle benötigten Dateien geöffnet,
;   räumlich beschnitten und dann in der modelleigene
;   Ornerstruktur abgelegt.
; - Parallel dazu wird eine Logfile erstellt, die alle
;   Vorkommnisse protokolliert. Erst wenn hier alle
;   Dateien als korrekt verzeichnet sind, kann der
;   Modelllauf über die Routine RBM_KAKKOVELD_ALL.pro
;   gestartet werden.
;+++++
; PRO SUBSET_SINGLE.pro
;+++++
; Diese Routine wurde von J. Richters
; am 08.10.2003 im Rahmen des SFB 389 - ACACIA,
; Teilprojekt B7 am GIUB erstellt.
;+++++
; Diese Routine schneidet ein Subset aus der angelieferten
; Daten. Dazu sind lediglich folgende Parameter nötig:
; - Eingabepfad
; - Ausgabepfad
; - UL_xy      Obere Linke Ecke des Subsets
; - LR_xy      Untere Rechte Ecke des Subsets
; Zusätzlich liefert die Routine noch eine Log-Meldung
; über den Erfolg oder Misserfolg der Dateioperation
;+++++
PRO SUBSET_SINGLE, data_in, data_out, UL_xy, LR_xy, ns, nl, log
result=FILE_TEST(data_in)
IF (result NE 1) THEN BEGIN
  log='ERROR: File ' + data_out + ' not written: File ' + $
    data_in + ' not found'
  RETURN
ENDIF
ENVI_OPEN_FILE, data_in, r_fid=fid, /no_realize
; Anpassung der Eckkoordinaten
xmap=[UL_xy(0),LR_xy(0)]
ymap=[UL_xy(1),LR_xy(1)]
; Transformation der Map-Koordinaten in File-Pixel
ENVI_CONVERT_FILE_COORDINATES, fid, xf, yf, xmap, ymap
xf=ROUND(xf)
yf=ROUND(yf)
; Ruecktransformation der File-Pixel in Map-Koordinaten um
; Fehler aus Integerwandlung auszugleichen
ENVI_CONVERT_FILE_COORDINATES, fid, xf, yf, x_map, y_map, /to_map
IF (ns EQ 0) THEN BEGIN
  if xf(0) gt xf(1) then ns=(xf(0)-xf(1))+1 $
  else ns=(xf(1)-xf(0))+1
ENDIF
IF (nl EQ 0) THEN BEGIN
  if yf(0) gt yf(1) then nl=(yf(0)-yf(1))+1 $
  else nl=(yf(1)-yf(0))+1
ENDIF
ENVI_FILE_QUERY, fid, nb=nb, data_type=dt, bnames=bnames
dims = [-1, xf(0), xf(0)+ns-1, yf(0), yf(0)+nl-1]
pos=INTARR(nb)
map_info = ENVI_GET_MAP_INFO(fid=fid)
map_info.mc(2)=x_map(0)
map_info.mc(3)=y_map(0)

if (dt eq 1) then data=BYTARR(ns,nl,nb)
if (dt eq 2) then data=INTARR(ns,nl,nb)
if (dt eq 3) then data=LONGARR(ns,nl,nb)
if (dt eq 4) then data=FLTARR(ns,nl,nb)
if (dt eq 5) then data=DBLARR(ns,nl,nb)
if (dt eq 6) then data=DCOMPLEXARR(ns,nl,nb)
if (dt eq 14) then data=LONGARR(ns,nl,nb)
if (dt eq 12) then data=UINTARR(ns,nl,nb)

if (dt eq 13) then data=ULONARR(ns,nl,nb)
if (dt eq 15) then data=ULONG4ARR(ns,nl,nb)

for i=0, nb-1 do begin
  data(*,*,i)=ENVI_GET_DATA(fid=fid, dims=dims, pos=i)
endfor
ENVI_FILE_MNG, id=fid, /remove ;,/delete
; Ausgabe der kopierten Datei
OPENW, 10, data_out
WRITEU,10, data
CLOSE,10
ENVI_SETUP_HEAD, fname=data_out, $
  ns=ns, nl=nl, nb=nb, bnames=bnames, $
  interleave=0, data_type=dt, $
  offset=0, file_type=0, $
  map_info=map_info, /write, r_fid=oid
ENVI_FILE_MNG, id=oid, /remove ;,/delete
log='OK: File ' + data_out + ' written'
END
; #####
; ++++++ M A I N   P R O C E S S I N G   L E V E L ++++++
; ++++++
PRO RBM_PREP_GUI
;+++++
; Meldung des Programms
;+++++
print, 'This is RBM_PREP.pro :: Date ', SYSTIME()
print,'(C) J.Richters, 10/2003; SFB389 - ACACIA TP B7; built at GIUB'
; ++++++
; Einstellungen
; ++++++
Pfad='E:'
run_name='RBM_test_03'
HOME_PFD= Pfad+'\''+run_name
;+++++
; Zeitliche Eingrenzung
;+++++
modelling_start= [1,2001]
modelling_end= [36,2001]
;+++++
; Räumliche Eingrenzung
;+++++
north_border=-17.0
east_border=14.0
south_border=-18.0
west_border=13.0
;+++++
; Angabe der unveränderlichen Modellparameter
;+++++
utm_zone=33
datum='WGS84'
ns=0
nl=0
TS_pa=36 ; Angabe der Modellzeitschritte pro Jahr (= 36)
;+++++
; Dialogfenster zur Eingabe der grundsätzlichen
; Modellparameter
;+++++
base=WIDGET_AUTO_BASE(title='RBM - Modelling Preparation')
w1=WIDGET_BASE(base, /row, /frame)
e1=WIDGET_OUTF(w1, uvalue='home', /directory, $
  prompt='Please enter modelling base directory', $
  default=HOME_PFD, /auto)
w2=WIDGET_BASE(base, column=2, /frame)
p1 = WIDGET_PARAM(w2, dt=4, field=8, xsize=10, $
  default=north_border, uvalue='north', $
  prompt='North Border', /auto)
p2 = WIDGET_PARAM(w2, dt=4, field=8, xsize=10, $
  default=east_border, uvalue='east', $
  prompt='East Border', /auto)
p3 = WIDGET_PARAM(w2, dt=4, field=8, xsize=10, $
  default=south_border, uvalue='south', $
  prompt='South Border', /auto)

```

```

p4 = WIDGET_PARAM(w2, dt=4, field=8, xsize=10, $
  default=west_border, uvalue='west', $
  prompt='West Border', /auto)
w3=WIDGET_BASE(base, row=2, /frame)
p5 = WIDGET_PARAM(w3, dt=2, xsize=2, $
  default=modelling_start(0), uvalue='start_ts', $
  prompt='Modelling Start: Timestep', /auto)
p6 = WIDGET_PARAM(w3, dt=2, xsize=4, $
  default=modelling_start(1), uvalue='start_year', $
  prompt='Year', /auto)
p7 = WIDGET_PARAM(w3, dt=2, xsize=2, $
  default=modelling_end(0), uvalue='end_ts', $
  prompt='Modelling End: Timestep', /auto)
p8 = WIDGET_PARAM(w3, dt=2, xsize=4, $
  default=modelling_end(1), uvalue='end_year', $
  prompt='Year', /auto)
result=AUTO_WID_MNG(base)
if (result.accept eq 0) then RETALL ;exit by cancel-button
;+++++
; Auslesen der ersten GUI
;+++++
HOME_PFD=(result.home)
;-----
north_border=(result.north)
east_border=(result.east)
south_border=(result.south)
west_border=(result.west)
;-----
modelling_start(0)=(result.start_ts)
modelling_start(1)=(result.start_year)
modelling_end(0)=(result.end_ts)
modelling_end(1)=(result.end_year)
;+++++
; Berechnung der Modelllaufzeit
;+++++
; Ermittlung der Modelljahre
model_years=modelling_end(1) - modelling_start(1)+1
y=0
model_time=INTARR(model_years,2)
for t=0,model_years-1 do begin
  model_time(t,0)=modelling_start(1)+y
  y=y+1
endfor
;+++++
; Ermittlung der Modellzeitschritte
;+++++
model_time(0,1)= TS_pa - modelling_start(0) +1
FOR t=1,model_years-2 DO BEGIN
  model_time(t,1)=TS_pa
ENDFOR
model_time(model_years -1,1)=modelling_end(0)
modelling_time=STRTRIM(model_time,2)
;+++++
; Auswahl der Pfade pro Jahr (TSP-Produkte)
;+++++
ALL_PFD=STRARR(model_years,6)
FOR t=0, model_years-1 DO BEGIN
  ;+++++
  ; Aufbau der GUI zur Erfassung der jährlichen Daten
  ;+++++
  PFD_title='RBM - Modelling Data Paths - Year: ' + $
    modelling_time(t,0)
  e1_prompt='Path to Spectral Refl. Data [Year: ' + $
    modelling_time(t,0) + ']:'
  e2_prompt='Path to Cloud Data [Year: ' + $
    modelling_time(t,0) + ']:'
  e3_prompt='Path to Surface Temperature Data [Year: ' + $
    modelling_time(t,0) + ']:'
  e4_prompt='Path to Surface Emissivity Data [Year: ' + $
    modelling_time(t,0) + ']:'
  e5_prompt='Path to Water Vapor Data [Year: ' + $
    modelling_time(t,0) + ']:'
  e6_prompt='Please select Vegetation Continuous ' + $
    'Fields Data [Year: ' + $
      modelling_time(t,0) + ']:'
  base_tsp=WIDGET_AUTO_BASE(title=PFD_title)
  w2=WIDGET_BASE(base_tsp, /column, /frame)
  e1=WIDGET_OUTF(w2, uvalue='mod09', /directory, $
    prompt=e1_prompt, /auto)
  e2=WIDGET_OUTF(w2, uvalue='cloud', /directory, $
    prompt=e2_prompt, /auto)
  e3=WIDGET_OUTF(w2, uvalue='temp', /directory, $
    prompt=e3_prompt, /auto)
  e4=WIDGET_OUTF(w2, uvalue='ems', /directory, $
    prompt=e4_prompt, /auto)
  e5=WIDGET_OUTF(w2, uvalue='wv', /directory, $
    prompt=e5_prompt, /auto)
  e6=WIDGET_OUTF(w2, uvalue='vcf', $
    prompt=e6_prompt, /auto)
  pfd_result=AUTO_WID_MNG(base_tsp)
  IF (pfd_result.accept EQ 0) THEN RETALL ;exit by cancel-button
  ;+++++
  ; Auslesen der GUI für jährliche Daten
  ;+++++
  ALL_PFD(t,0)=(pfd_result.mod09)
  ALL_PFD(t,1)=(pfd_result.cloud)
  ALL_PFD(t,2)=(pfd_result.temp)
  ALL_PFD(t,3)=(pfd_result.ems)
  ALL_PFD(t,4)=(pfd_result.wv)
  ALL_PFD(t,5)=(pfd_result.vcf)
ENDFOR
;+++++
; Auswahl der Pfade pro Modellauf (CDP)
;+++++
CDP_PFD=STRARR(2)
CDP_title='RBM - Modelling Data Paths - ' + $
  'Constant Data Products'
e1_prompt='Path to Digital Elevation Model [DEM]'
e2_prompt='Path to FAO Soil Map [SOIL]'
e3_prompt='Path to Starting NPP-Data [NPP_balance]'
base_cdp=WIDGET_AUTO_BASE(title=CDP_title)
w2=WIDGET_BASE(base_cdp, /column, /frame)
e1=WIDGET_OUTF(w2, uvalue='dem', $
  prompt=e1_prompt, /auto)
e2=WIDGET_OUTF(w2, uvalue='soil', $
  prompt=e2_prompt, /auto)
e3=WIDGET_OUTF(w2, uvalue='NPP_bal', $
  prompt=e3_prompt, /auto)
cdp_result=AUTO_WID_MNG(base_cdp)
; -----
; Auslesen der GUI für konstante Datenpfade
; -----
CDP_PFD(0)=(cdp_result.dem)
CDP_PFD(1)=(cdp_result.soil)
NPP_PFD = cdp_result.NPP_bal
;+++++
; Anlage des Modellierungsverzeichnis
;+++++
; Matrix mit Pfadnamen anlegen
MODEL_PFD=STRARR(model_years,13)
;+++++
; Prüfung des Homeverzeichnis
;+++++
home_test = FILE_TEST(HOME_PFD, /DIRECTORY)
IF (home_test EQ 1) THEN BEGIN
  GOTU, end_home
ENDIF ELSE BEGIN
  FILE_MKDIR, HOME_PFD
ENDELSE
end_home:
;+++++
; Prüfung des Balance-Verzeichnis
;+++++
BAL_PFD=HOME_PFD + '\balance'
bal_test = FILE_TEST(BAL_PFD, /DIRECTORY)
IF (bal_test EQ 1) THEN GOTU, level2 $
ELSE FILE_MKDIR, BAL_PFD
;+++++

```

```

; Prüfung und Anlage der 2. Ordnerlevels
; ++++++
level2:
for t=0,N_ELEMENTS(modelling_time(*,0))-1 do begin
; -----
12_pfd=HOME_PFD+'\'modelling_time(t,0)
result = FILE_TEST(12_pfd, /DIRECTORY)
if (result eq 1) then goto, level3_1 $
else FILE_MKDIR, 12_pfd
level3_1:
; -----
13_1_pfd=HOME_PFD+'\'modelling_time(t,0)'\ysp'
result = FILE_TEST(13_1_pfd, /DIRECTORY)
if (result eq 1) then goto, level3_2 $
else FILE_MKDIR, 13_1_pfd
level3_2:
MODEL_PFD(t,0)= 13_1_pfd
; -----
MODEL_PFD(t,0)= 13_1_pfd
13_2_pfd=HOME_PFD+'\'modelling_time(t,0)'\tsp'
result = FILE_TEST(13_2_pfd, /DIRECTORY)
if (result eq 1) then goto, level4_1 $
else FILE_MKDIR, 13_2_pfd
level4_1:
; -----
14_1_pfd=HOME_PFD+'\'modelling_time(t,0)'\tsp\mod09'
result = FILE_TEST(14_1_pfd, /DIRECTORY)
if (result eq 1) then goto, level4_2 $
else FILE_MKDIR, 14_1_pfd
level4_2:
MODEL_PFD(t,1)= 14_1_pfd
; -----
14_2_pfd=HOME_PFD+'\'modelling_time(t,0)'\tsp\ndvi'
result = FILE_TEST(14_2_pfd, /DIRECTORY)
if (result eq 1) then goto, level4_3 $
else FILE_MKDIR, 14_2_pfd
level4_3:
MODEL_PFD(t,2)= 14_2_pfd
; -----
14_3_pfd=HOME_PFD+'\'modelling_time(t,0)'\tsp\temperatur'
result = FILE_TEST(14_3_pfd, /DIRECTORY)
if (result eq 1) then goto, level4_4 $
else FILE_MKDIR, 14_3_pfd
level4_4:
MODEL_PFD(t,3)= 14_3_pfd
; -----
14_4_pfd=HOME_PFD+'\'modelling_time(t,0)'\tsp\emissivity'
result = FILE_TEST(14_4_pfd, /DIRECTORY)
if (result eq 1) then goto, level4_5 $
else FILE_MKDIR, 14_4_pfd
level4_5:
MODEL_PFD(t,4)= 14_4_pfd
; -----
14_5_pfd=HOME_PFD+'\'modelling_time(t,0)'\tsp\watervapor'
result = FILE_TEST(14_5_pfd, /DIRECTORY)
if (result eq 1) then goto, level4_6 $
else FILE_MKDIR, 14_5_pfd
level4_6:
MODEL_PFD(t,5)= 14_5_pfd
; -----
14_6_pfd=HOME_PFD+'\'modelling_time(t,0)'\tsp\cloud'
result = FILE_TEST(14_6_pfd, /DIRECTORY)
if (result eq 1) then goto, level4_7 $
else FILE_MKDIR, 14_6_pfd
level4_7:
MODEL_PFD(t,6)= 14_6_pfd
; -----
14_7_pfd=HOME_PFD+'\'modelling_time(t,0)'\tsp\biomass'
result = FILE_TEST(14_7_pfd, /DIRECTORY)
if (result eq 1) then goto, level4_8 $
else FILE_MKDIR, 14_7_pfd
level4_8:
MODEL_PFD(t,7)= 14_7_pfd
; -----
14_8_pfd=HOME_PFD+'\'modelling_time(t,0)'\tsp\par'
result = FILE_TEST(14_8_pfd, /DIRECTORY)
if (result eq 1) then goto, level4_9 $
else FILE_MKDIR, 14_8_pfd
level4_9:
MODEL_PFD(t,8)= 14_8_pfd
; -----
14_9_pfd=HOME_PFD+'\'modelling_time(t,0)'\tsp\par_eff'
result = FILE_TEST(14_9_pfd, /DIRECTORY)
if (result eq 1) then goto, level4_10 $
else FILE_MKDIR, 14_9_pfd
level4_10:
MODEL_PFD(t,9)= 14_9_pfd
; -----
14_10_pfd=HOME_PFD+'\'modelling_time(t,0)'\tsp\BCF_eff'
result = FILE_TEST(14_10_pfd, /DIRECTORY)
if (result eq 1) then goto, level4_11 $
else FILE_MKDIR, 14_10_pfd
level4_11:
MODEL_PFD(t,10)= 14_10_pfd
; -----
14_11_pfd=HOME_PFD+'\'modelling_time(t,0)'\tsp\PET'
result = FILE_TEST(14_11_pfd, /DIRECTORY)
if (result eq 1) then goto, level4_12 $
else FILE_MKDIR, 14_11_pfd
level4_12:
MODEL_PFD(t,11)= 14_11_pfd
; -----
14_12_pfd=HOME_PFD+'\'modelling_time(t,0)'\tsp\FPAR'
result = FILE_TEST(14_12_pfd, /DIRECTORY)
if (result eq 1) then goto, level4_13 $
else FILE_MKDIR, 14_12_pfd
level4_13:
MODEL_PFD(t,12)= 14_12_pfd
; -----
ENDIFOR
+++++
; Beginn der Datenprozessierung
+++++
; Bestimmung des Datensubsets (Map Coordinates)
+++++
iproj = ENVI_PROJ_CREATE(/geographic)
if (north_border lt 0) then begin
oproj = ENVI_PROJ_CREATE(/utm,zone=utm_zone, /south, datum =datum)
endif else begin
oproj = ENVI_PROJ_CREATE(/utm,zone=utm_zone, datum=datum)
endelse
; Create the pairs of Latitude and Longitude
ixmap = [east_border, west_border]
iymp = [north_border, south_border]
; Convert from Geographic to UTM
ENVI_CONVERT_PROJECTION_COORDINATES, $
ixmap, iymp, iproj, $
oxmap, oymap, oproj
; Sorting of the UTM pairs
UL_xy=[oxmap(1), oymap(0)] ;Upper Left X in Map Coordinates
;Upper Left Y in Map Coordinates
LR_xy=[oxmap(0), oymap(1)] ;Lower Right X in Map Coordinates
;Lower Right Y in Map Coordinates
+++++
; Erstellung einer Log Datei, die Programmierungen
; aufnimmt und als Textfile speichert
+++++
LOG_PFD=HOME_PFD + '\RBM_Prep_file_0.log'
; -----
; Prüfung der Log Datei:
; wenn schon existent, neuer Dateiname
; -----
result=FILE_TEST(LOG_PFD)
if (result eq 1) then begin
Log_such=HOME_PFD + '\*.log'
logs=FINDFILE(Log_such, count=log_c)
log_nr=FIX(STRMID(logs(log_c-1), $
STRPOS(logs(log_c-1), '_','/REVERSE_SEARCH)+1, $

```

```

STRPOS(logs(log_c-1),'.',/REVERSE_SEARCH))
LOG_PFD=HOME_PFD + '\RBM_PREP_file_' + $
STRTRIM((log_nr+1),2) + '.log
endif
;-----
; Beginn der Log Datei
;-----
OPENW,1,LOG_PFD
PRINTF,1,'This is RBM Enironment Modelling Preparation Log '
PRINTF,1,'written in ENVI/IDL 3.5'
PRINTF,1,'by J. Richters (C)2003'
PRINTF,1,'This RBM Environment in running under:'
PRINTF,1,!VERSION
PRINTF,1,' '
PRINTF,1,'Check of written files:'
PRINTF,1,'Begin of Logging ',SYSTIME()
;+++++
; Verarbeitung einmaliger Daten
;+++++
; Ablage der allg. Modellparameter
;-----
TIME_PFD=HOME_PFD + '\rbm_pref.rbm'
MODEL_TIM = STRARR(4)
MODEL_TIM(0)=STRTRIM(modelling_start(0),2)
MODEL_TIM(1)=STRTRIM(modelling_start(1),2)
MODEL_TIM(2)=STRTRIM(modelling_end(0),2)
MODEL_TIM(3)=STRTRIM(modelling_end(1),2)
OPENW,10,TIME_PFD
PRINTF,10,'MOD_TIME_Start_TS='+MODEL_TIM(0)
PRINTF,10,'MOD_TIME_Start_YR='+MODEL_TIM(1)
PRINTF,10,'MOD_TIME_END_TS='+MODEL_TIM(2)
PRINTF,10,'MOD_TIME_END_YR='+MODEL_TIM(3)
CLOSE,10
;-----
; Log Meldung
;-----
PRINTF,1,'File: '+TIME_PFD+' written.'
;-----
; Ablage der NPP-Balance
;-----
npp_name='BIOMASS_ALL.data'
npp_out=BAL_PFD+'\'+npp_name
subset_single, NPP_PFD, npp_out, UL_xy, LR_xy, ns, nl, log
;-----
; Log Meldung
;-----
PRINTF,1, log
;+++++
; Verarbeitung der Daten auf jährlicher Basis
;+++++
FOR t=0,N_ELEMENTS(model_time(*,0))-1 DO BEGIN
;-----
; Log Meldung
;-----
PRINTF,1,'Year: ',STRTRIM(model_time(t,0))
;-----
; Verarbeitung und Ablage der YSP Daten: DGM
;-----
dgm_name='CDP_DGM_'+modelling_time(t,0)+''.data'
dgm_out=MODEL_PFD(t,0)+'\'+dgm_name
subset_single, CDP_PFD(0), dgm_out, UL_xy, LR_xy, ns, nl, log
;-----
; Log Meldung
;-----
PRINTF,1, log
;-----
; Verarbeitung und Ablage der YSP Daten: Soil
;-----
soil_name='CDP_SOIL_'+modelling_time(t,0)+''.data'
soil_out=MODEL_PFD(t,0)+'\'+soil_name
subset_single, CDP_PFD(1), soil_out, UL_xy, LR_xy, ns, nl, log
;-----
; Log Meldung
;-----
PRINTF,1, log
;-----
; Verarbeitung und Ablage der YSP Daten: VCF
;-----
VCF_name='YDP_VCF_'+modelling_time(t,0)+''.data'
VCF_out=MODEL_PFD(t,0)+'\'+VCF_name
subset_single, ALL_PFD(t,5), VCF_out, UL_xy, LR_xy, ns, nl, log
;-----
; Log Meldung
;-----
PRINTF,1, log
;-----
; Verarbeitung und Ablage der YSP Daten: XXX
;-----
;+++++
; Verarbeitung und Ablage der TSP Daten: MODO9
;+++++
; Prüfung der Eingangsdaten: MODO9
;-----
such_str=ALL_PFD(t,0)+''.data'
names=FINDFILE(such_str, count=count)
data_names= STRMID(names, (STRPOS(names, '\', /REVERSE_SEARCH))+1)
;+++++
; Konstruktion des Dateinamens
;+++++
data_hilf=STRARR(TS_pa)
zr=0
for TS=0,8 do begin
zr=zr+1
data_hilf(TS)='TSP_MODO9_0'+STRTRIM(zr,2)+ $
STRTRIM(model_time(t,0),2)+''.data'
endif
for TS=9,TS_pa-1 do begin
zr=zr+1
data_hilf(TS)='TSP_MODO9_'+STRTRIM(zr,2)+ $
STRTRIM(model_time(t,0),2)+''.data'
endif
;+++++
; Abfangen von Anfangs- und ...
;+++++
if (t eq 0) then begin
data_out=STRARR(model_time(t,1))
j=0
for i=modelling_start(0)-1,TS_pa-1 do begin
data_out(j)=data_hilf(i)
j=j+1
endif
endif
;+++++
; ... Endverlusten.
;+++++
if (t eq (model_years-1)) then begin
data_out=STRARR(model_time(t,1))
for i=0, modelling_end(0)-1 do begin
data_out(i)=data_hilf(i)
endif
endif
endif
;-----
; Verarbeitung und Ablage der YSP Daten: MODO9
;-----
for i=0,(N_ELEMENTS(data_out))-1 do begin
data_in=ALL_PFD(t,0)+'\'+data_out(i)
dat_out=MODEL_PFD(t,1)+'\'+data_out(i)
subset_single, data_in, dat_out, UL_xy, LR_xy, ns, nl, log
;-----
; Log Meldung
;-----
PRINTF,1, log
endif
;+++++
; Verarbeitung und Ablage der TSP Daten: TEMP
;+++++
; Prüfung der Eingangsdaten: TEMP
;-----

```



```

; -----
; Verarbeitung und Ablage der YSP Daten: WATERVAPOR
; -----
for i=0,(N_ELEMENTS(data_out))-1 do begin
  data_in=ALL_PFD(t,4)+'\'+data_out(i)
  dat_out=MODEL_PFD(t,5)+'\'+data_out(i)
  subset_single, data_in, dat_out, UL_xy, LR_xy, ns, nl, log
; -----
; Log Meldung
; -----
  PRINTF,1, log
endfor
; -----
; ++++++
; Verarbeitung und Ablage der TSP Daten: EMISSIVITY
; ++++++
; Prüfung der Eingangsdaten: EMISSIVITY
; -----
such_str=ALL_PFD(t,3)+'*.data'
names=FILENAME(such_str, count=count)
data_names= STRMID(names, (STRPOS(names, '\', /REVERSE_SEARCH)+1)
; ++++++
; Konstruktion des Dateinamens
; ++++++
data_hilf=STRARR(TS_pa)
zr=0
for TS=0,8 do begin
  zr=zr+1
  data_hilf(TS)='TSP_EMS_0'+STRTRIM(zr,2)+ $
  STRTRIM(model_time(t,0),2)+'*.data'
endfor
for TS=9,TS_pa-1 do begin
  zr=zr+1
  data_hilf(TS)='TSP_EMS_'+STRTRIM(zr,2)+ $
  STRTRIM(model_time(t,0),2)+'*.data'
endfor
; ++++++
; Abfangen von Anfangs- und ...
; ++++++
if (t eq 0) then begin
  data_out=STRARR(model_time(t,1))
  j=0
  for i=modeling_start(0)-1,TS_pa-1 do begin
    data_out(j)=data_hilf(i)
    j=j+1
  endfor
endif
; ++++++
; ..Endverlusten
; ++++++
if (t eq (model_years-1)) then begin
  data_out=STRARR(model_time(t,1))
  for i=0, modelling_end(0)-1 do begin
    data_out(i)=data_hilf(i)
  endfor
endif
; -----
; Verarbeitung und Ablage der YSP Daten: WATERVAPOR
; -----
for i=0,(N_ELEMENTS(data_out))-1 do begin
  data_in=ALL_PFD(t,3)+'\'+data_out(i)
  dat_out=MODEL_PFD(t,4)+'\'+data_out(i)
  subset_single, data_in, dat_out, UL_xy, LR_xy, ns, nl, log
; -----
; Log Meldung
; -----
  PRINTF,1, log
ENDIFOR
; ++++++
; ENDE der Jahreschleife
; ++++++
endfor
; -----
; Schließen der LOG Datei
; -----
PRINTF,1, 'End of Logging ', SYSTIME()
CLOSE,1
; -----
; Öffnen der LOG Datei
; -----
command='notepad '+LOG_PFD
spawn, command
; ++++++
; ENDE der Routine RBM_PREP_GUI.pro
; ++++++
END

```

A.1.6 RBM_Kaokoveld

```

; Das RBM Kaokoveld ist ein physikalisch basiertes, rechner-
; gestütztes Modell zu Berechnung von Biomasse aus
; mesoskaligen Satellitendaten. Diese müssen vor der
; Einspeisung in das Modell in definierte geophysikalische
; Parameter umgerechnet werden.
; ++++++
; Dieses Modell wurde im Rahmen der Promotion von
; J. Richters am Geographischen Institut der Universität
; Bonn (GIUB) entwickelt.
; ++++++
PRO RBM_YEAR, home, model_time
; J. Richters, 07/2003, RSRG, GIUB, University of Bonn
; Diese Routine steuert die Berechnung aller Prozesse,
; die im Laufe eines Jahres stattfinden
; ++++++
; Berechnung von jährlichen Zwischenprodukten
; ++++++
Print, model_time
jahr = STRTRIM(model_time(0),2)
steps = model_time(1)
TS_start = model_time(2)
TS_end = model_time(3)
; -----
; Epsilon_max
; -----
EPSILON_MAX, home, jahr
; ++++++
; Berechnung von kurzfristigen Daten (jeweils 10 Tage)
; ++++++
FOR i=0, steps-1 DO BEGIN
; -----
; Allgemeine Parameter pro Timestep
; -----
  date=INTARR(2)
  date(0)=model_time(0)
  date(1)=model_time(2)+i
; -----
; Meldung an Log-Window
; -----
  log = 'Starting Timestep '+ STRTRIM(i+1,2)
  print,log
; -----
; Biomasse
; -----
  BIOMASS_SINGLE, home, date
; -----
; Bilanzberechnung
; -----

```

```

bil_param='bio'
BILANZ, home, date, bil_param
; -----
; Weidetierdynamik
; -----
; Biomasse Destruenten (Wild, mikrobiotischer
; Abbau, etc.)
; -----
ENDFOR
; ++++++
; Ende der Routine RBM_YEAR.pro
; ++++++
END
; ++++++
; EPSILON_MAX.pro
; ++++++
; Die Routine EPSILON_MAX.pro berechnet den Parameter
; epsilon_max unter Einbeziehung folgender Datensätze:
; - landcover type
; - relief information
; - soil information
; Die Routine nutzt einerseits die Ergebnisse der vorher
; abgearbeiteten Routine LANDCOVER.pro und integriert diese
; über eine Look-up Tabelle der Biometypen mit den
; beeinflussenden Parametern Relief und Boden.
; Dabei nutzt die Routine EPSILON_MAX.pro zwei Submodule:
; - E_MAX_DGM zur Berechnung der Beeinflussung durch
;   das Relief
; - E_MAX_SOIL zur Berechnung der Beeinflussung durch
;   Bodendifferenzierung
; ++++++
PRO EPSILON_MAX, home, year
; home=string(Basisverzeichnis des Modelllaufs)
; year=intarr(1), gibt jahr der prozessierung an
jahr=year
; ++++++
; Konstruktion der Datenpfade
; ++++++
LUCC_pfad= home+'\' +jahr+'\' \yvp\YDP_VCF_' +jahr+' .data'
DGM_pfad= home+'\' +jahr+'\' \yvp\CDP_DGM_' +jahr+' .data'
SOIL_pfad= home+'\' +jahr+'\' \yvp\CDP_SOIL_' +jahr+' .data'
BCF_PFD = home+'\' +jahr+'\' \yvp\VSP_BCF_' +jahr+' .data'
; ++++++
; Einlesen der LUCC Daten und Auslesender Dateiinformation
; ++++++
ENVI_OPEN_FILE, LUCC_pfad, r_fid=LUCC_id, /no_realize
if (LUCC_id eq -1) then return
ENVI_FILE_QUERY, LUCC_id, ns=ns, nl=nl, nb=nb
map_info=ENVI_GET_MAP_INFO(fid=LUCC_id)
; ++++++
; Berechnung der Reliefeinflüsse
; ++++++
DGM_fuzzy=FLTARR(ns,nl)
DGM_fuzzy(*,*)=1
SLP_fuzzy=FLTARR(ns,nl)
SLP_fuzzy(*,*)=1
dgm=FILE_TEST(DGM_pfad)
if (dgm eq 1) then begin
    E_MAX_DGM, DGM_pfad, DGM_fuzzy, SLP_fuzzy
endif
; ++++++
; Berechnung der Bodeneinflüsse
; ++++++
SOIL_fuzzy=FLTARR(ns,nl)
SOIL_fuzzy(*,*)=1
soil=FILE_TEST(SOIL_pfad)
if (soil eq 1) then begin
    E_MAX_SOIL, SOIL_pfad, SOIL_fuzzy
endif
; ++++++
; Look-Up Tabelle für Biome Epsilon
; ++++++
BARREN= 0.003 ;
GRASS= 0.00804 ;

TREE= 0.01116 ;
; ++++++
; Öffnen und Einlesen der LUCC Daten
; ++++++
VCF=BYTARR(ns,nl,3)
dims = [-1, 0, ns-1, 0, nl-1]
FOR i=0,2 DO BEGIN
    VCF(*,*,i) = ENVI_GET_DATA(fid=LUCC_id, dims=dims, pos=i)
ENDFOR
ENVI_FILE_MNG, id=LUCC_id, /remove
; ++++++
; Zuordnung der Look-Up Tabelle
; ++++++
BIOME_fuzzy=FLTARR(ns,nl)
; -----
FOR i=0,2 DO BEGIN
    dum = VCF(*,*,i)
    hlp = WHERE(dum GT 100, count)
    IF count GT 0 THEN dum(hlp)=0
    VCF(*,*,i) = dum
ENDFOR
; ++++++
; Berechnung von Epsilon aus den Flächenbedeckungen
; ++++++
VCF = FLOAT(VCF)
VCF(*,*,0) = VCF(*,*,0) * BARREN
VCF(*,*,1) = VCF(*,*,1) * GRASS
VCF(*,*,2) = VCF(*,*,2) * TREE
BIOME_fuzzy = VCF(*,*,0)+VCF(*,*,1)+VCF(*,*,2)
; ++++++
; Zusammenführung der BIOME mit DGM_fuzzy und SOIL_fuzzy
; ++++++
; Gewichtungen der Einflußparameter Relief & Boden
x_relief = 0.8
;w_Slope = 0.5
w_Soil = 0.6
Relief_fuzzy=FLTARR(ns,nl)
FUZZY_AND, DGM_fuzzy, SLP_fuzzy, Relief_fuzzy
Epsi_all=FLTARR(ns,nl,2)
Epsi_all(*,*,0)=Relief_fuzzy(*,*) * x_relief
Epsi_all(*,*,1)=SOIL_fuzzy(*,*) * w_Soil
Epsilon_ges=FLTARR(ns,nl)
Epsilon_ges(*,*)=MEAN(Epsi_all(*,*,*))
; ++++++
; Integration der Biometypes
; ++++++
Epsilon_gesamt=FLTARR(ns,nl)
Epsilon_gesamt(*,*)=Epsilon_ges(*,*) * BIOME_fuzzy(*,*)
; ++++++
; Integration der Seamask
; ++++++
ENVI_OPEN_FILE, DGM_pfad, r_fid=DGM_id, /no_realize
if (DGM_id eq -1) then return
ENVI_FILE_QUERY, DGM_id, ns=ns, nl=nl, nb=nb
map_info=ENVI_GET_MAP_INFO(fid=DGM_id)
seamask=INTARR(ns,nl)
dims = [-1, 0, ns-1, 0, nl-1]
seamask(*,*) = ENVI_GET_DATA(fid=DGM_id, dims=dims, pos=0)
ENVI_FILE_MNG, id=DGM_id,/remove
meer=WHERE(seamask eq 0,meer_count)
IF meer_count gt 0 THEN Epsilon_gesamt(meer)=-1
; ++++++
; Ausgabe des Parameters EPSILON_MAX
; ++++++
bnames = ['Biophysical Conversion Factor [MJ/g C]']
openw,1, BCF_PFD
writeu,1, Epsilon_gesamt
close,1
ENVI_SETUP_HEAD, fname=BCF_PFD, $
ns=ns, nl=nl, nb=1, map_info=map_info,$
interleave=0, data_type=4, bnames=bnames,$
offset=0, /write, r_fid=out_id
ENVI_FILE_MNG, id=out_id,/remove
; ++++++

```

```

; Ende der Routine EPSILON_MAX.pro
; ++++++
END
; *****
; E_MAX_DGM.pro
; Diese Routine berechnet für die übergeordnete Routine
; EPSILON_MAX.pro den Einfluss des Reliefs für die
; Biome-Epsilonwerte wird aufgerufen von EPSILON_MAX
; Benutze Variablen:
; - DGM_Pfad: STRING-Variablen mit Pfadangabe zum DGM
; - DGM_fuzzy: 2-D FLOAT-ARRAY zur Aufnahme der Werte,
;   per default auf 1 gesetzt
; - SLP_fuzzy: 2-D FLOAT-ARRAY zur Aufnahme der Werte,
;   per default auf 1 gesetzt
; *****
PRO E_MAX_DGM, DGM_pfad, DGM_fuzzy, SLP_fuzzy
; ++++++
; Einlesen der DGM-Datei
; ++++++
ENVI_OPEN_FILE, DGM_pfad, r_fid=dgm_id, /no_realize
if (dgm_id eq -1) then return
; ++++++
; Ermittlung grundlegender Dateiinformationen
; ++++++
ENVI_FILE_QUERY, dgm_id, ns=ns, nl=nl, nb=nb
map_info = ENVI_GET_MAP_INFO(fid=dgm_id)
dims = [-1, 0, ns-1, 0, nl-1]
proj = ENVI_GET_PROJECTION(fid=dgm_id, $
pixel_size=pixel_size)
; ++++++
; Ableitung der Hangneigung (Slope)
; ++++++
pos = [0]
bptr = [0]
ENVI_DOIT, 'topo.doit', $
fid=dgm_id, pos=pos, dims=dims, $
bptr=bptr, /in_memory, $
pixel_size=pixel_size, r_fid=slope_id
; ++++++
; Einlesen der DGM- und Slope-Daten
; ++++++
dgm=FLTARR(ns,nl,2)
dgm(*,*,0) = ENVI_GET_DATA(fid=dgm_id, dims=dims, pos=0)
dgm(*,*,1) = ENVI_GET_DATA(fid=slope_id, dims=dims, pos=0)
; ++++++
; Schließen der offenen Dateien
; ++++++
ENVI_FILE_MNG, id=dgm_id, /remove
ENVI_FILE_MNG, id=slope_id, /remove, /delete
; ++++++
; Fuzzyifizierung und Fuzzy-Parameter
; ++++++
a1= -0.0004
b1= 1.4
gu1= 1000
go1= 2200
a2= -0.2
b2= 1.6
gu2= 3
go2= 8
; ++++++
; DGM_Fuzzyifizierung & Slope-Fuzzyifizierung
; ++++++
DGM_fuzzy=FLTARR(ns,nl)
DGM_fuzzy(*,*)=a1*dgm(*,*,0)+b1
t1=WHERE(dgm(*,*,0) lt gu1,count_t1)
if (count_t1 gt 0) then DGM_fuzzy(t1)=1
t2=WHERE(dgm(*,*,0) gt go1,count_t2)
if (count_t2 gt 0) then DGM_fuzzy(t2)=0.3
; ++++++
SLP_fuzzy=FLTARR(ns,nl)
SLP_fuzzy(*,*)=a2*dgm(*,*,1)+b2
t3=WHERE(dgm(*,*,1) lt gu2,count_t3)
if (count_t3 gt 0) then SLP_fuzzy(t3)=1

t4=WHERE(dgm(*,*,1) gt go2,count_t4)
if (count_t4 gt 0) then SLP_fuzzy(t4)=0.6
; ++++++
; Ende der Routine E_MAX_DGM.pro
; ++++++
END
; *****
; E_MAX_SOIL.pro
; Diese Routine berechnet für die übergeordnete Routine
; EPSILON_MAX.pro den Einfluss des Bodens für die
; Biome-Epsilonwerte. Dabei wird die FAO-Weltbodenkarte
; zugrunde gelegt.
; Wird aufgerufen von EPSILON_MAX
; Benutze Variablen:
; - SOIL_Pfad: STRING-Variablen mit Pfadangabe zu den
;   Soildaten
; - DGM_fuzzy: 2-D FLOAT-ARRAY zur Aufnahme der Werte,
;   per default auf 1 gesetzt
; *****
PRO E_MAX_SOIL, SOIL_pfad, SOIL_fuzzy
; ++++++
; Einlesen der DGM-Datei
; ++++++
ENVI_OPEN_FILE, SOIL_pfad, r_fid=soil_id, /no_realize
IF (soil_id EQ -1) THEN RETURN
; ++++++
; Ermittlung grundlegender Dateiinformationen
; ++++++
ENVI_FILE_QUERY, soil_id, ns=ns, nl=nl, nb=nb
map_info = ENVI_GET_MAP_INFO(fid=soil_id)
dims = [-1, 0, ns-1, 0, nl-1]
; ++++++
; Auslesen der Bodendaten aus SOIL_pfad
; ++++++
soildat=FLTARR(ns,nl,4)
soildat(*,*,2)=ENVI_GET_DATA(fid=soil_id, dims=dims, pos=0)
soildat(*,*,1)=ENVI_GET_DATA(fid=soil_id, dims=dims, pos=1)
soildat(*,*,0)=ENVI_GET_DATA(fid=soil_id, dims=dims, pos=2)
soildat(*,*,3)=ENVI_GET_DATA(fid=soil_id, dims=dims, pos=14)
ENVI_FILE_MNG, id=soil_id, /remove
; ++++++
; Texturbestimmung
; ++++++
textur=BYTARR(ns,nl)
tex_fuzzy=FLTARR(ns,nl)
;-----
coarse=WHERE((soildat(*,*,0) gt 0) and $
(soildat(*,*,1) lt 9) and $
(soildat(*,*,1) gt 0) and $
(soildat(*,*,1) lt 8) and $
(soildat(*,*,1) gt 83) and $
(soildat(*,*,2) lt 100), coarse_c)
if coarse_c gt 0 then begin
textur(coarse)=1
tex_fuzzy(coarse)=0.2
endif
;-----
coars_med=WHERE((soildat(*,*,0) gt 9) and $
(soildat(*,*,0) lt 20) and $
(soildat(*,*,1) gt 8) and $
(soildat(*,*,1) lt 20) and $
(soildat(*,*,2) gt 63) and $
(soildat(*,*,2) lt 83), coars_med_c)
if coars_med_c gt 0 then begin
textur(coars_med)=2
tex_fuzzy(coars_med)=0.3
endif
;-----
medium=WHERE((soildat(*,*,0) gt 20) and $
(soildat(*,*,0) lt 30) and $
(soildat(*,*,1) gt 20) and $
(soildat(*,*,1) lt 33) and $
(soildat(*,*,2) gt 37) and $
(soildat(*,*,2) lt 63), medium_c)

```

```

if medium_c gt 0 then begin
  textur(medium)=3
  tex_fuzzy(medium)=0.4
endif
;-----
med_fine=WHERE((soildat(*,*,0) gt 30) and $
  (soildat(*,*,0) lt 48) and $
  (soildat(*,*,1) gt 25) and $
  (soildat(*,*,1) lt 33) and $
  (soildat(*,*,2) gt 27) and $
  (soildat(*,*,2) lt 37), med_fine_c)
if med_fine_c gt 0 then begin
  textur(med_fine)=4
  tex_fuzzy(med_fine)=0.5
endif
;-----
fine=WHERE((soildat(*,*,0) gt 48) and $
  (soildat(*,*,0) lt 67) and $
  (soildat(*,*,1) gt 17) and $
  (soildat(*,*,1) lt 25) and $
  (soildat(*,*,2) gt 17) and $
  (soildat(*,*,2) lt 27), fine_c)
if fine_c gt 0 then begin
  textur(fine)=5
  tex_fuzzy(fine)=0.6
endif
;-----
no_data=WHERE((soildat(*,*,*) eq -1), no_data_c)
if no_data_c gt 0 then begin
  textur(no_data)=0
  tex_fuzzy(no_data)=0
endif
; ++++++
; Bestimmung der Bodennährstoffe
; ++++++
a = -0.004 ; Die Parameter a,b und c sind empirisch
b = 0.0971 ; für die untenangegebene Gleichung bestimmt
c = 0.4
nutri_fuzzy=FLTARR(ns,nl)
nutri_fuzzy(*,*)=a*(soildat(*,*,3)*soildat(*,*,3))+b*soildat(*,*,3)+c
t1=WHERE(nutri_fuzzy(*,*) lt 0,count_t1)
if (count_t1 gt 0) then nutri_fuzzy(t1)=0
; ++++++
; Kombination von Textur und Bodennährstoffen
; ++++++
FUZZY_OR, tex_fuzzy, nutri_fuzzy, SOIL_fuzzy
; ++++++
; Ende der Routine E_MAX_SOIL.pro
; ++++++
END
; ++++++
; FUZZY_OR.pro
; ++++++
PRO FUZZY_OR, Vari, Var2, Erg
ns=N_ELEMENTS(Vari(*,0))
nl=N_ELEMENTS(Vari(0,*))
Erg=FLTARR(ns,nl)
hlp=FLTARR(2)
FOR y=0,nl-1 DO BEGIN
  FOR x=0,ns-1 DO BEGIN
    hlp(0)=Vari(x,y)
    hlp(1)=VAR2(x,y)
    Erg(x,y)=MAX(hlp)
  ENDFOR
ENDFOR
END
; ++++++
; FUZZY_AND.pro
; ++++++
PRO FUZZY_AND, Vari, Var2, Erg
ns=N_ELEMENTS(Vari(*,0))
nl=N_ELEMENTS(Vari(0,*))
Erg=FLTARR(ns,nl)
hlp=FLTARR(2)
FOR y=0,nl-1 DO BEGIN
  FOR x=0,ns-1 DO BEGIN
    hlp(0)=Vari(x,y)
    hlp(1)=VAR2(x,y)
    Erg(x,y)=MIN(hlp)
  ENDFOR
ENDFOR
END
; ++++++
; NDVI_FPAR.pro
; ++++++
PRO NDVI_FPAR, MOD09_PFD, NDVI_PFD, FPAR_PFD, FPAR
; ++++++
; Öffnen der Mod09-Datei und Auslesen allgemeine Angaben
; ++++++
ENVI_OPEN_FILE, MOD09_PFD, r_fid=mod09_id
ENVI_FILE_QUERY, mod09_id, ns=ns, nl=nl, nb=nb, data_type=dt
map_info = ENVI_GET_MAP_INFO(fid=mod09_id)
; ++++++
; Ermittlung des NDVI
; ++++++
datai=INTARR(ns,nl,2) ; Erzeugen eines Dataarrays
ndvi=FLTARR(ns,nl) ; Erzeugen eines Outputarrays
datao=FLTARR(ns,nl,2)
dims = [-1, 0, ns-1, 0, nl-1]
datai(*,*,0) = ENVI_GET_DATA(fid=mod09_id, dims=dims, pos=0)
datai(*,*,1) = ENVI_GET_DATA(fid=mod09_id, dims=dims, pos=1)
ENVI_FILE_MNG, id=mod09_id, /remove
; ++++++
; Kalibrierung der MODIS MOD09 Spektraldaten
; ++++++
mod09_cal=0.002
datao(*,*,*) = FLOAT(datai(*,*,*)) * mod09_cal
; ++++++
; Berechnung: NDVI=(NIR - RED)/(NIR + RED)
; ++++++
ndvi=(datao(*,*,1) - datao(*,*,0))/(datao(*,*,1) + datao(*,*,0))
; ++++++
; Ausgabe der NDVI Datei
; ++++++
bnames=['NDVI']
OPENW,1,NDVI_PFD
WRITEU,1,ndvi
CLOSE,1
ENVI_SETUP_HEAD, fname=NDVI_PFD, $
  ns=ns, nl=nl, nb=1, $
  interleave=0, data_type=4, $
  offset=0, /write, map_info=map_info,$
  r_fid=NDVI_id, bnames=bnames
ENVI_FILE_MNG, id=NDVI_id, /remove
; ++++++
; Ermittlung der FPAR
; ++++++
a = 1.67 ; Kalibrierung nach Seaquist et al .2003
b = 0.07 ; für westafrikanische Savanne
FPAR=FLTARR(ns,nl)
FPAR= a * (ndvi) - b
; ++++++
; Ausgabe von FPAR
; ++++++
bnames=['FPAR']
OPENW,1,FPAR_PFD
WRITEU,1,FPAR
CLOSE,1
ENVI_SETUP_HEAD, fname=FPAR_PFD, $
  ns=ns, nl=nl, nb=1, $
  interleave=0, data_type=4, $
  offset=0, /write, map_info=map_info,$
  r_fid=FPAR_id, bnames=bnames
ENVI_FILE_MNG, id=FPAR_id, /remove
; ++++++
; Ende der Routine NDVI_FPAR.pro
; ++++++
END

```

```

; *****
; BILANZ.pro
; Diese Routine berechnet die aktuelle Bilanz des
; Biomassemodells und schreibt die Daten in die Ursprungs-
; datei zurück.
; Dabei werden die unterschiedlichen Vegetationslayer
; berücksichtigt.
PRO BILANZ, home, date, bil_param
; ++++++
; Übergabe der Parameter und Ableitung der Ausgabepfade
; ++++++
; Angabe des Prozessierungsjahres
jahr=STRTRIM(date(0),2)
; -----
; Angabe des 10-Tages-Komposits
IF date(1) LT 10 THEN step = '0'+STRTRIM(date(1),2) $
ELSE step=STRTRIM(date(1),2)
; -----
; Erstellen der Pfade
; -----
BIO_BALANCE_PFD=home+'balance\BIOMASS_ALL.data'
CASE bil_param OF
'bio':DATA_PFD=home+'+'+jahr+'tsp\biomass\TSP_BIOMASS_'+ $
step+jahr+'.data'
'tier':DATA_PFD=home+'+'+jahr+'tsp\grazing\TSP_CATTLE_'+ $
step+jahr+'.data'
'wild':DATA_PFD=home+'+'+jahr+'tsp\grazing\TSP_GAME_'+ $
step+jahr+'.data'
ELSE:return
ENDCASE
; ++++++
; Ermittlung der NPP-Bilanz
; -----
; Einlesen der Bilanzdatei
; -----
ENVI_OPEN_FILE, BIO_BALANCE_PFD, r_fid=biobil_id
ENVI_FILE_QUERY, biobil_id, ns=ns, nl=nl, nb=nb, data_type=dt
map_info = ENVI_GET_MAP_INFO(fid=biobil_id)
biomass_bil=FLTARR(ns,nl,nb)
bdims = [-1, 0, ns-1, 0, nl-1]
FOR i=0,nb-1 DO BEGIN
biomass_bil(*,*,i) = ENVI_GET_DATA(fid=biobil_id, dims=bdims, pos=i)BCF_PFD = home+'+'+jahr+'ysp\YSP_BCF_'+jahr+'.data'
ENDFOR
ENVI_FILE_MNG, id=biobil_id, /remove
; -----
; Einlesen der Datendatei
; -----
ENVI_OPEN_FILE, DATA_PFD, r_fid=data_id
ENVI_FILE_QUERY, data_id, ns=ns, nl=nl, nb=nb, data_type=dt
map_info = ENVI_GET_MAP_INFO(fid=data_id)
bil_data=FLTARR(ns,nl,nb)
ddims = [-1, 0, ns-1, 0, nl-1]
FOR i=0,nb-1 DO BEGIN
bil_data(*,*,i) = ENVI_GET_DATA(fid=data_id, dims=ddims, pos=i)
ENDFOR
ENVI_FILE_MNG, id=data_id, /remove
; -----
; Berechnung der Bilanz
; -----
FOR i=0,nb-1 DO BEGIN
biomass_bil(*,*,i)=biomass_bil(*,*,i)+bil_data(*,*,i)
ENDFOR
; -----
; Ausgabe der Biomassenbilanz
; -----
bnames=['NPP gesamt [g/m2*ts]', 'NPP Bare [g/m2*ts]', $
'NPP NonTree [g/m2*ts]', 'NPP Tree [g/m2*ts]']
OPENW, 1, BIO_BALANCE_PFD
WRITEU, 1, biomass_bil
CLOSE, 1
ENVI_SETUP_HEAD, fname=BIO_BALANCE_PFD, $
ns=ns, nl=nl, nb=nb, $
interleave=0, data_type=4, $
offset=0, /write, map_info=map_info, $
r_fid=biobil_id, bnames=bnames
ENVI_FILE_MNG, id=biobil_id, /remove
END
; *****
; BIOMASS_SINGLE.pro
; *****
; Diese Routine wurde von J. Richters am 21.07.2003
; im Rahmen des SFB 389 - ACACIA, TP B7 am GIUB erstellt.
; *****
; J. Richters, 07/2003, RSRG, GIUB, University of Bonn
; Diese Proedur dient der Berechnung der Biomasse zu einem
; Zeitpunkt Tx der vom Zeitpunkt Tx +1 bis Tx +n gefolgt
; wird. Der erneute Aufruf der Proedur erfolgt durch eine
; übergeordnete Steuerproedur.
; *****
PRO BIOMASS_SINGLE, home, date
; *****
; ++++++
; Übergabe der Parameter und Ableitung der Ausgabepfade
; ++++++
; Angabe des Prozessierungsjahres
jahr=STRTRIM(date(0),2)
; -----
; Angabe des 10-Tages-Komposits
IF date(1) LT 10 THEN step = '0'+STRTRIM(date(1),2) $
ELSE step=STRTRIM(date(1),2)
; ++++++
; Ableitung der Eingabepfade
; ++++++
MDD09_PFD= home+'+'+jahr+'tsp\mod09\TSP_MDD09_'+step+ $
jahr+'.data'
CLD_PFD = home+'+'+jahr+'tsp\cloud\TSP_CLD_'+step+ $
jahr+'.data'
TMP_PFD = home+'+'+jahr+'tsp\temperatur\TSP_TEMP_'+ $
step+jahr+'.data'
EMS_PFD = home+'+'+jahr+'tsp\emissivity\TSP_EMS_'+ $
step+jahr+'.data'
WV_PFD = home+'+'+jahr+'tsp\water vapor\TSP_WV_'+step+ $
+jahr+'.data'
DGM_PFD = home+'+'+jahr+'ysp\CDP_DGM_'+jahr+'.data'
BCF_PFD = home+'+'+jahr+'ysp\YSP_BCF_'+jahr+'.data'
BIO_BALANCE_PFD=home+'balance\BIOMASS_ALL.data'
VCF_PFD = home+'+'+jahr+'ysp\YDP_VCF_'+jahr+'.data'
; ++++++
; Ableitung der Ausgabepfade
; ++++++
NDVI_PFD= home+'+'+jahr+'tsp\ndvi\TSP_NDVI_'+step+jahr+ $
+'.data'
FPAR_PFD= home+'+'+jahr+'tsp\lpar\TSP_FPAR_'+step+jahr+ $
+'.data'
PAR_PFD= home+'+'+jahr+'tsp\par\TSP_PAR_'+step+jahr+ $
+'.data'
PAR_Eff_PFD=home+'+'+jahr+'tsp\par_eff\TSP_PAR_Eff_'+ $
step+jahr+'.data'
BIOMASS_PFD=home+'+'+jahr+'tsp\biomass\TSP_BIOMASS_'+ $
step+jahr+'.data'
PET_PFD = home+'+'+jahr+'tsp\pet\TSP_PET_'+ $
step+jahr+'.data'
BCF_E_PFD = home+'+'+jahr+'tsp\BCF_Eff\TSP_BCF_e_'+ $
step+jahr+'.data'
; ++++++
; Ermittlung der PAR
; ++++++
PAR, DGM_PFD, CLD_PFD, PAR_PFD, PAR_Eff_PFD, date, PAR_Eff
; ++++++
; Ermittlung der FPAR
; ++++++
NDVI_FPAR, MDD09_PFD, NDVI_PFD, FPAR_PFD, FPAR
; ++++++
; Ermittlung des biophysikalischen Konversionsfaktors
; Epsilon
; ++++++

```

```

EPSILON_EFF, BCF_PFD, TMP_PFD, WV_PFD, bcf_eff, $
MOD09_PFD, PAR_PFD, EMS_PFD, $
NDVI_PFD, PET_PFD, BCF_E_PFD
; ++++++
; Erfassung allgemeiner Dateiparameter
; ++++++
ENVI_OPEN_FILE, MOD09_PFD, r_fid=mod09_id
ENVI_FILE_QUERY, mod09_id, ns=ns, nl=nl, nb=nb, data_type=dt
map_info = ENVI_GET_MAP_INFO(fid=mod09_id)
ENVI_FILE_MNG, id=mod09_id, /remove
; ++++++
; Berechnung der Biomasse
; ++++++
npp_out=FLTARR(ns,nl,4)
npp_tsp = FLTARR(ns,nl)
npp_tsp = FPAR * PAR_Eff * bcf_eff
npp_out(*,*,0) = npp_tsp
; ++++++
; Löschen der Variablen
; ++++++
i_ndvi=0
PAR_Eff=0
E_Eff=0
; ++++++
; Aufteilen der NPP in Funktionseinheiten
; ++++++
ENVI_OPEN_FILE, VCF_PFD, r_fid=vcf_id
ENVI_FILE_QUERY, vcf_id, ns=ns, nl=nl, nb=nb, data_type=dt
map_info = ENVI_GET_MAP_INFO(fid=vcf_id)
vcf=BYTARR(ns,nl,3)
dims = [-1, 0, ns-1, 0, nl-1]
vcf(*,*,0) = ENVI_GET_DATA(fid=vcf_id, dims=dims, pos=0)
vcf(*,*,1) = ENVI_GET_DATA(fid=vcf_id, dims=dims, pos=1)
vcf(*,*,2) = ENVI_GET_DATA(fid=vcf_id, dims=dims, pos=2)
ENVI_FILE_MNG, id=vcf_id, /remove
npp_out(*,*,0) = npp_tsp
npp_cent = npp_tsp * 0.01
npp_out(*,*,1) = npp_cent * FLOAT(vcf(*,*,0))
npp_out(*,*,2) = npp_cent * FLOAT(vcf(*,*,1))
npp_out(*,*,3) = npp_cent * FLOAT(vcf(*,*,2))
; ++++++
; Ausgabe des NPP_TSP
; ++++++
bnames=['NPP gesamt [g/m2*ts]', 'NPP Bare [g/m2*ts]', $
'NPP NonTree [g/m2*ts]', 'NPP Tree [g/m2*ts]']
OPENW, 1, BIOMASS_PFD
WRITEU, 1, npp_out
CLOSE, 1
ENVI_SETUP_HEAD, fname=BIOMASS_PFD, $
ns=ns, nl=nl, nb=4, $
interleave=0, data_type=4, $
offset=0, /write, map_info=map_info, $
r_fid=biomass_id, bnames=bnames
ENVI_FILE_MNG, id=biomass_id, /remove
; ++++++
; ENDE der Routine BIOMASS_SINGLE.pro
; ++++++
; PAR.pro
; ++++++
; Diese Routine wurde von J. Richters
; am 21.07.2003
; im Rahmen des SFB 389 - ACACIA, Teilprojekt B7 am GIUB
; erstellt.
; ++++++
; Diese Procedur dient der Berechnung der photosynthetisch
; aktiven Strahlung, die mit dem Chlorophyll der grünen
; Vegetation interagiert und so Biomasse bildet.
; Dabei wird die Procedur von der übergeordneten Berechnung
; der NPP aufgerufen und ruft ihrerseits die Ermittlung der
; Potentiellen Solaren Einstrahlung auf.
; ++++++
PRO PAR, DGM_PFD, CLD_PFD, PAR_PFD, PAR_Eff_PFD, $
date, PAR_Eff
; ++++++
; Übergabe der Parameter
; ++++++
jahr=STRTRIM(date(0),2) ; Angabe des Prozessierungsjahres
step=STRTRIM(date(1),2) ; Angabe des 10-Tages-Komposits
; ++++++
; Allgemeine Angaben
; ++++++
par_frac = 0.48 ; Anteil der photosynthetisch
; nutzbaren Strahlung (etwa 50%)
; ++++++
; Berechnung der potentiellen Solaren Einstrahlung
; ++++++
RBM_INSOL, DGM_PFD, date(1), PAR_PFD, potinsol_sum
PAR_Eff = FLTARR(N_ELEMENTS(potinsol_sum(*,0)), $
N_ELEMENTS(potinsol_sum(0,*)))
; ++++++
; Integration der Wolkenmaske
; ++++++
ENVI_OPEN_FILE, CLD_PFD, r_fid=clد_id
ENVI_FILE_QUERY, clد_id, ns=ns, nl=nl, nb=nb, data_type=dt
map_info = ENVI_GET_MAP_INFO(fid=clد_id)
clد_mask=BYTARR(ns,nl)
dims = [-1, 0, ns-1, 0, nl-1]
clد_mask(*,*)=ENVI_GET_DATA(fid=clد_id, dims=dims, pos=0)
ENVI_FILE_MNG, id=clد_id, /remove
; ++++++
; Ermittlung der Extinktion der Atmosphäre
; ++++++
clد_mask = FLOAT(clد_mask) / 100
; ++++++
; Berechnung der PAR
; ++++++
PAR_Eff(*,*)=potinsol_sum(*,*) * par_frac * clد_mask(*,*)
; ++++++
; Ausgabe der Effektiven PAR
; ++++++
bnames=['Effektive Einstrahlung [MJ/m2*ts]']
OPENW, 1, PAR_Eff_PFD
WRITEU, 1, PAR_Eff
CLOSE, 1
ENVI_SETUP_HEAD, fname=PAR_Eff_PFD, $
ns=ns, nl=nl, nb=1, $
interleave=0, data_type=4, $
offset=0, /write, map_info=map_info, $
r_fid=pareff_id, bnames=bnames
ENVI_FILE_MNG, id=pareff_id, /remove
; ++++++
; ENDE der Routine PAR.pro
; ++++++
END
; ++++++
; Dieses Program dient der Berechnung der potentiellen
; Solaren Einstrahlung auf einer beliebigen Fläche. Dazu
; werden lediglich drei Eingabevariablen gebraucht:
; - Julianisches Datum (Tag des Jahres, DOY)
; - Neigung der jeweiligen Rasterzelle (Slope)
; - Exposition der jeweiligen Rasterzelle (Aspect)
; ++++++
; Benutzung:
; das Programm gliedert sich in zwei Teile. Eine
; übergeordnete Routine liest das digitale Geländemodell
; aus und berechnet daraus slope und aspect und erhebt die
; Angabe des Tages. Danach werden diese Angaben einem
; Punktmodell zugeführt, das die Potentielle Solare
; Einstrahlung für die jeweiligen Daten berechnet.
; Diese Routine stammt aus einem Aufsatz von Swift(1976):
; Algorithm for Solar Radiation on Mountain Slopes.
; In: Water Resources Research, Vol.12, No.1.
; ++++++
; Diese Routine wurde von J. Richters
; am 25.02.2003 im Rahmen des SFB 389 - ACACIA,
; Teilprojekt B7 am GIUB erstellt.

```

```

; ++++++
PRO INSOL_POINT, doy, A, I, L0, R4
; ++++++
; Eingang der Berechnung (nach Swift, 1976)
; ++++++
; Eingabvariablen:
;doy = 174 ; doy = Day of Year nach dem julianischen
; Kalender
;A = 270 ; A = exposition des Hanges (Aspect) in °
;I = 30 ; Neigung des Hanges (Slope) in °
;L0 = 30 ; Geographische Breite des Hanges in °
R0 = 1.95 ; Solarkonstante [cal/cm 2/min-1]
; unveränderliche Variablen
pi = 3.1415927 ; Pi
; Umrechnung der Eingangsvariablen
A = pi * A / 180
I = pi * I / 180
L0 = pi * L0 / 180
; ++++++
; Berechnung der Sonnenposition
; ++++++
; Berechnung der Deklination
D = 0.007 - 0.4067 * cos((doy + 10) * 0.0172)
; Berechnung des radius Vektors der Sonne
E = 1.0 - 0.0167 * cos((doy-3) * 0.0172)
; ++++++
; Berechnung der Reliefparameter L1 und L2
; ++++++
; Berechnung der Äquivalenzwinkel L1
L1 = asin(cos(I) * sin(L0) + sin(I) * cos(L0) * cos(A))
; Berechnung der Äquivalenzwinkel L2
D1 = cos(I) * cos(L0) - sin(L0) * cos(A)
if (D1 eq 0) then begin
  D1 = 1.0 * E - 10
  L2 = atan((sin(I) * sin(A))/(D1))
endif else begin
  L2 = atan((sin(I) * sin(A))/(D1))
endif else
endelse
if (D1 lt 0) then L2 = L2 + 180
; ++++++
; Berechnung der Solarkonstante für 60 Min
; ++++++
R1 = 60 * R0 / (E * E)
; ++++++
; Berechnung der Stundenwinkel für Sonnenscheindauer
; ++++++
T = acos(-tan(L1) * tan(D))
T7 = T - L2
T6 = -T - L2
T = acos(-tan(L0) * tan(D))
T1 = T
T0 = -T
if (T7 lt T1) then T3 = T7 else T3 = T1
if (T6 lt T0) then T2 = T6 else T2 = T0
; ++++++
; Berechnung der potentiellen Solaren Einstrahlung
; ++++++
if (T3 lt T2) then begin
  T2 = 0
  T3 = 0
endif
T6 = T6 + 360
if (T6 lt T1) then begin
  T6 = T6
  T9 = T1
  R4 = (R1 * (sin(D) * sin(L1) * (T3 - T2) / 15 $
    + cos(D) * cos(L1) * (sin(T3 + L2) - sin(T2 + L2)) * 12 / pi) $
    + (R1 * (sin(D) * sin(L1) * (T9 - T6) / 15 $
    + cos(D) * cos(L1) * (sin(T9 + L2) - sin(T6 + L2)) * 12 / pi))
endif else begin
  R4 = R1 * (sin(D) * sin(L1) * (T3 - T2) / 15 $
    + cos(D) * cos(L1) * (sin(T3 + L2) - sin(T2 + L2)) * 12 / pi)
endelse
; ++++++
; Berechnung der Einstrahlungsdauer
; ++++++
T4 = T2 / 15
T5 = T3 / 15
; ++++++
; ENDE der Routine INSOL_POINT.pro
; ++++++
END
; ++++++
;pro, RBM_insol, doy, DGM,doy
PRO RBM_INSOL, DGM_PFD, step, PAR_PFD, potinsol_sum
; ++++++
; Einlesen des DGM und Berechnung der Reliefparameter (Slope & Aspect)
; ++++++
ENVI_OPEN_FILE, DGM_PFD, /no_realize, r_fid=fid
ENVI_FILE_QUERY, fid, ns=ns, nl=nl
proj = ENVI_GET_PROJECTION(fid=fid, pixel_size=pixel_size)
dims = [-11, 0, ns-1, 0, nl-1]
pos = [0]
bptr = [0,1]
ENVI_DOIT, 'topo.doit', $
  fid=fid, pos=pos, dims=dims, $
  bptr=bptr, /in_memory, $
  pixel_size=pixel_size, r_fid=r_fid
data=FLTARR(ns,nl,4)
data(*,*,0) = ENVI_GET_DATA(fid=fid, dims=dims, pos=0)
data(*,*,1) = ENVI_GET_DATA(fid=r_fid, dims=dims, pos=0)
data(*,*,2) = ENVI_GET_DATA(fid=r_fid, dims=dims, pos=1)
; ++++++
; Berechnung der Latitude für jeder Zeile des DGM
; ++++++
; Umprojizieren der Daten um die Geographische Breite
; zu finden. Einlesen der vorhanden Map_info und Aus-
; lesen von Projektionsparametern
map_info = ENVI_GET_MAP_INFO(fid=fid)
ps_y=map_info.ps(1)
iymap=map_info.mc(3)
ixmap=map_info.mc(2)
; Uebernahme der Eingangsprojektion aus Map Info und
; Erzeugen einer neuen Projektion
iproj = map_info.proj
oproj = ENVI_PROJ_CREATE(/geographic)
; Öffnung einer Schleife um Geogr. Breite für jeder
; Zeile zu berechnen. Die Breitenangabe wird in der
; Ebene 4 des Array Data(*,*,3) gespeichert.
for i=0,nl-1 do begin
  ENVI_CONVERT_PROJECTION_COORDINATES, ixmap, iymap, $
    iproj, oxmap, oymap, oproj
  iymap=iymap - ps_y
  data(*,i,3)=oymap
endifor
; ++++++
; Schließen und Entfernen der offenen Dateien
; ++++++
ENVI_FILE_MNG, id=fid, /remove, /delete
ENVI_FILE_MNG, id=r_fid, /remove, /delete
; ++++++
; Eingabe des Tages (des Jahres: 1-365)
; ++++++
doy_o = step * 10
doy_a=doy_o - 10
if (doy_a lt 1) then dooy_a = 1
if (doy_o gt 365) then dooy_o = 365
nod=10 ; Anzahl der Tage pro Rechenschritt

```

```

; ++++++
; Berechnung der Potentiellen Einstrahlung
; mit Hilfe der Subroutine 'insol_point.pro'
; ++++++
; Ausgabearray der aufsummierten Insol-Daten
potinsol_sum=FLTARR(ns,nl)
doy=doy_a
for j=0,10-1 do begin
; Ausgabearray der berechneten Daten
potinsol=FLTARR(ns,nl)
; Schleife zur Adressierung jeder Rasterzelle
for y=0, nl-1 do begin
for x=0, ns-1 do begin
A = data(x,y,2)
I = data(x,y,1)
LO = data(x,y,3)
R4sum = 0. ;Aufsummierte Einstrahlung
INSOL_POINT, doy, A, I, LO, R4
potinsol(x,y)=R4
endifor
endifor
potinsol_sum(*,*)=potinsol_sum(*,*) + potinsol(*,*)
doy=doy+1
endifor
; ++++++
; Umrechnung der Energie von Cal in J und pro qm
; ++++++
Cal_to_J = 4.186 ; i cal = 4.186 J
potinsol_sum = (potinsol_sum * Cal_to_J * 10000) / 1000000
; ++++++
; Ausgabe der Pot. Einstrahlung in eine Datei
; ++++++
bnames=['Potentielle Einstrahlung [MJ/m2/ts]']
OPENW,1,PAR_PFD
WRITEU,1,potinsol_sum
CLOSE, 1
ENVI_SETUP_HEAD, fname=PAR_PFD, $
ns=ns, nl=nl, nb=1, interleave=0,$
data_type=4, offset=0, /write, $
map_info=map_info, bnames=bnames, $
r_fid=pot_sol_id
ENVI_FILE_MNG, id=pot_sol_id, /remove
; ++++++
; Ende der Routine RBM_INSOL.pro
; ++++++
END
; ++++++
; EPSILON_EFF.pro
; ++++++
; Die Routine EPSILON_EFF.pro berechnet den effektiven
; biophysikalischen Konversionsfaktor (BCF) epsilon unter
; Einbeziehung folgender Datensätze:
; - YSP_BCF_YYYYY.data (Epsilon_Max)
; - TSP_WV_XXXXXX.data (MODIS Wasserdampf)
; - TSP_TMP_XXXXXX.data (MODIS Surface Temperatur)
; - TSP_EMS_XXXXXX.data (MODIS Surface Emissivity)
; - TSP_INSOL_XXXXXX.data (Solare Einstrahlung)
; ++++++
; Diese Routine wurde von J. Richters
; am 15.12.2003 im Rahmen des SFB 389 - ACACIA,
; Teilprojekt B7 am GIUB erstellt.
; ++++++
PRO EPSILON_EFF, BCF_PFD, TMP_PFD, WV_PFD, bcf_eff, $
MOD09_PFD, PAR_PFD, EMS_PFD, NDVI_PFD, $
PET_PFD, BCF_E_PFD
; ++++++
; Erfassung des Temperaturstesses
; ++++++
ENVI_OPEN_FILE, TMP_PFD, r_fid=tmp_id, /no_realize
ENVI_FILE_QUERY, tmp_id, ns=ns, nl=nl
map_info = ENVI_GET_MAP_INFO(fid=tmp_id)
temp = FLTARR(ns,nl)
dims = [-1, 0, ns-1, 0, nl-1]
temp(*,*) = ENVI_GET_DATA(fid=tmp_id, dims=dims, pos=0)
ENVI_FILE_MNG, id=tmp_id, /remove
; ++++++
; Berechnung des Temperaturstess (Skaliert von 0-1)
; ++++++
T_stress = 0.8 + 0.02 * (temp) - 0.0005 * (temp^2)
; Eingrenzung auf gültigen Wertebereich
t_hilf=WHERE(T_stress lt 0, t_count)
if t_count gt 0 then T_stress(t_hilf)=0
; ++++++
; Erfassung des Wasserstress mit akt. und pot. Verdunstung
; ++++++
; Berechnung der PET
; -----
PET_all, TMP_PFD, PAR_PFD, EMS_PFD, MOD09_PFD, PET, $
NDVI_PFD, PET_PFD
; ++++++
; Ermittlung der aktuellen Verdunstung
; ++++++
ENVI_OPEN_FILE, WV_PFD, r_fid=wv_id, /no_realize
ENVI_FILE_QUERY, wv_id, ns=ns, nl=nl
wv = FLTARR(ns,nl)
dims = [-1, 0, ns-1, 0, nl-1]
wv(*,*) = ENVI_GET_DATA(fid=wv_id, dims=dims, pos=0)
ENVI_FILE_MNG, id=wv_id, /remove
; ++++++
; Berechnung des pflanzenrelevanten Wasserdampfs (ca. 10%)
; ++++++
wv = wv * 0.1
; ++++++
; Berechnung des Wasserstress (Skaliert von 0-1)
; ++++++
W_stress = 0.5 + 0.5 * (wv/PET)
; ++++++
; Eingrenzung auf gültigen Wertebereich
; ++++++
w_hilf=WHERE(FINITE(W_stress) eq 0, w_count)
if w_count gt 0 then W_stress(w_hilf) = 0
w_hilf=WHERE(W_stress gt 1.0, w_count)
if w_count gt 0 then W_stress(w_hilf) = 1
w_hilf=WHERE(W_stress lt 0, w_count)
if w_count gt 0 then W_stress(w_hilf) = 0
; ++++++
; Ausgabe des Wasser- & Temperaturstess (Skaliert von 0-1)
; ++++++
PF_stress=FLTARR(ns,nl,2)
PF_stress(*,*,0)=T_stress(*,*)
PF_stress(*,*,1)=W_stress(*,*)
PF_stress_out=BCF_E_PFD+'_PF_stress.data'
OPENW,1,PF_stress_out
WRITEU,1,PF_stress
CLOSE, 1
bnames=['T_Stress','W_Stress']
ENVI_SETUP_HEAD, fname=PF_stress_out, $
ns=ns, nl=nl, nb=2, interleave=0,$
data_type=4, offset=0, /write, $
map_info=map_info, bnames=bnames, $
r_fid=bcf_e_id
ENVI_FILE_MNG, id=bcf_e_id, /remove
; ++++++
; Berechnung des effektiven biophysikalischen
; Konversionsfaktors (BCF_eff)
; ++++++
ENVI_OPEN_FILE, BCF_PFD, r_fid=bcf_id, /no_realize
ENVI_FILE_QUERY, bcf_id, ns=ns, nl=nl
bcf_max = FLTARR(ns,nl)
dims = [-1, 0, ns-1, 0, nl-1]
bcf_max(*,*) = ENVI_GET_DATA(fid=bcf_id, dims=dims, pos=0)
ENVI_FILE_MNG, id=bcf_id, /remove
; ++++++
; Kombination der Stressfaktoren
; ++++++
bcf_eff = FLTARR(ns,nl)
bcf_eff = bcf_max * ((T_stress + W_stress)/2)
; ++++++

```

```

; Ausgabe der BCF-Effektiv-Datei
; ++++++
bnames=['eff. BCF [MJ/g C]']
OPENW,1,BCF_E_PFD
WRITEU,1,bcf_eff
CLOSE, 1
ENVI_SETUP_HEAD, fname=BCF_E_PFD, $
ns=ns, nl=nl, nb=1, interleave=0,$
data_type=4, offset=0, /write, $
map_info=map_info, bnames=bnames, $
r_fid=bcf_e_id
ENVI_FILE_MNG, id=bcf_e_id, /remove
; ++++++
; ENDE der Routine EPSILON_EFF.pro
; ++++++
END
; #####
; In den Modul PET wird mit Hilfe der Priestley-Taylor-
; Gleichung die potentielle Verdunstung für jeden Punkt
; im Modellraster berechnet.
; Dabei wird die Routine PET_single.pro aufgerufen, die
; die PET punkthaft berechnet. Die übergeordnete Routine
; PET_all.pro steuert die Routine an und liefert die
; benötigten Eingangsparameter.
; #####
PRO PET_SINGLE, T, Es, EMS, alb, PET, NDVI
; Dieses Modell dient der Ermittlung der Potentiellen
; Evaporation dabei wird der Ansatz von Penman-Monteith
; und Priestley-Taylor genutzt.
; -----
; Übernahme von Punktdaten aus übergeordneter Routine
; -----
; T = 30 ; Temperatur [°C]
; Es = ; Globalstrahlung [MJ/m2] aus
; ; dem Modell von Swift(1976)
; Ems = ; Emissivität [MJ/m2] aus MOD11
; alb = ; Albedo
; -----
; Konstante Parameter
; -----
a = 1.26 ; Priestley-Taylor-Parameter
; (Adektiver Parameter)
gamma = 0.667 ; psychrometrische Konstante [kPa/°C]
sigma = 5.67*10-8; Stefan-Boltzmann-Konstante [W m2 K4]
; -----
; Variable Parameter (inkl. Berechnung)
; -----
delta = 6.1078-(7.5 * T)/(237.3 + T) ; Sättigungs-
; dampfdruck (für T > 0) nach Weischet (1995)
Rn = (1 - alb)*Es - EMS * sigma*T4
G = (0.583-2.13 * NDVI) * Rn ; Bodenwärmestrom [MJ/m2]
; -----
; Berechnung der Energie für pot. Evapotranspiration
; -----
lambdaE = a*(delta/(delta + gamma)) * (Rn - G) ; [MJ/m2]
; -----
; Berechnung der pot. Evapotranspiration
; -----
PET = lambdaE / 2450 ; Pot. Verdunstungsrate [kg/m2]
; -----
; Anpassung der Einheiten von kg/m2 auf g/m2
; -----
PET = PET * 100 ; Pot. Verdunstungsrate [g/m2]=[cm/m2]
; -----
; Ende der Routine PET_single.pro
; -----
END
; #####
PRO PET_all, TMP_PFD, INSOL_PFD, EMS_PFD, MOD09_PFD, $
PotEvapo, NDVI_PFD, PET_PFD

```

```

; -----
; Einlesen der Dateien um PET abzuleiten
; -----
; Einlesen der Temperaturdaten
; -----
ENVI_OPEN_FILE, TMP_PFD, r_fid=tmp_id, /no_realize
ENVI_FILE_QUERY, tmp_id, ns=ns, nl=nl
map_info = ENVI_GET_MAP_INFO(fid=tmp_id)
temp = FLTARR(ns,nl)
dims = [-1, 0, ns-1, 0, nl-1]
temp(*,*) = ENVI_GET_DATA(fid=tmp_id, dims=dims, pos=0)
ENVI_FILE_MNG, id=tmp_id, /remove
; -----
; Einlesen der Eff. Einstrahlung
; -----
ENVI_OPEN_FILE, INSOL_PFD, r_fid = insol_id, /no_realize
insol = FLTARR(ns,nl)
insol(*,*) = ENVI_GET_DATA(fid=insol_id, dims=dims, pos=0)
ENVI_FILE_MNG, id=insol_id, /remove
; -----
; Einlesen der Emissivität
; -----
ENVI_OPEN_FILE, EMS_PFD, r_fid = EMS_id, /no_realize
emiss = FLTARR(ns,nl)
emiss(*,*) = ENVI_GET_DATA(fid=EMS_id, dims=dims, pos=0)
ENVI_FILE_MNG, id=EMS_id, /remove
; -----
; Einlesen der MOD09 & Generierung der Albedo
; -----
ENVI_OPEN_FILE, MOD09_PFD, r_fid = ALB_id, /no_realize
ENVI_FILE_QUERY, ALB_id, ns=ns, nl=nl, nb=nb
alb_dum = INTARR(ns,nl,nb)
FOR i=0, 4 DO BEGIN
alb_dum(*,*,i) = ENVI_GET_DATA(fid=ALB_id, dims=dims, pos=i)
ENDFOR
ENVI_FILE_MNG, id=ALB_id, /remove
; -----
; Kalibrierung der MODIS MOD09 Spektraldaten
; -----
mod09_cal=0.002
alb_dum(*,*,*) = FLOAT(alb_dum(*,*,*)) * mod09_cal
dum=FLTARR(N_ELEMENTS(alb_dum(0,0,*)))
albedo = FLTARR(ns,nl)
FOR Y=0, nl-1 DO BEGIN
FOR X=0, ns-1 DO BEGIN
dum = alb_dum(x,y,*)
out=MEAN(dum)
albedo(x,y) = out
ENDFOR
ENDFOR
alb_dum = 0
; -----
; Einlesen des NDVI
; -----
ENVI_OPEN_FILE, NDVI_PFD, r_fid = NDVI_id, /no_realize
NDVI = FLTARR(ns,nl)
NDVI(*,*) = ENVI_GET_DATA(fid=NDVI_id, dims=dims, pos=0)
ENVI_FILE_MNG, id=NDVI_id, /remove
; -----
; Beginn einer Doppelschleife um PET pro Punkt zu berechnen
; -----
PotEvapo = FLTARR(ns,nl)
FOR y=0,nl-1 DO BEGIN
FOR x=0,ns-1 DO BEGIN
T = temp(x,y)
Es = insol(x,y)
EMS = emiss(x,y)
alb= albedo(x,y)
ndv = ndvi(x,y)
PET_SINGLE, T, Es, Ems, alb, PET, ndv
PotEvapo(x,y) = PET
ENDFOR
ENDFOR
; -----

```

```

; Ausgabe der PET
; -----
bnames=['Potentielle Evapotranspiration [cm]']
OPENW,1,PET_PFD
WRITEU,1,PotEvapo
CLOSE, 1
ENVI_SETUP_HEAD, fname=PET_PFD, $
  ns=ns, nl=nl, nb=1, interleave=0,$
  data_type=4, offset=0, /write, $
  map_info=map_info, bnames=bnames, $
  r_fid=pet_id
ENVI_FILE_MNG, id=pet_id, /remove
; -----
; Ende der Routine PET_all.pro
; -----
END
; #####
PRO READ_RBM, RBM_PFD, PARAM, Wert
; #####
; J. Richters, 07/2003, RSRG, GIUB, University of Bonn
; Diese Routine liest die Parameterdatei für das
; RBM Kaakoveld und sucht einzelne Parameter
; heraus und gibt sie zurück.
OPENR,1, RBM_PFD
a=''
z=0
WHILE NOT EOF(1) DO BEGIN
  ; Read a line of text:
  READF, 1, A
  ;print, a
  z=z+1
ENDWHILE
CLOSE,1
b=STRARR(2,z)
OPENR,1, RBM_PFD
FOR i=0,z-1 DO BEGIN
  READF,1,A
  b(0,i)=STRMID(A,0,STRPOS(A,'=',/REVERSE_SEARCH))
  b(1,i)=STRMID(A,STRPOS(A,'=',/REVERSE_SEARCH)+1)
ENDFOR
CLOSE,1

Index=WHERE (B(0,*) eq PARAM,count)
IF count eq 1 THEN WERT=B(1,Index)
END
; #####
PRO RBM_KAKOVELD
; #####
; RBM_Steuerung
; J. Richters, 07/2003, RSRG, GIUB, University of Bonn
; Diese Routine dient der generellen Steuerung des
; RBM Kaakoveld und ruft vor allem die Routine
; RBM_Year.pro mit der nachgeordneten biomass_single.pro
; auf.
; #####
; Auswahl des Modellaufs (von RBM_Prep.pro angelegt)
; #####
; Zeitliche Eingrenzung
; #####
MODEL_TIM=STRARR(4)
modellung_start= [1,2001]

modellung_end= [36,2001]
RBM_PFD=home +'\rbm_pref.rbm'
PARAM='MOD_TIME_Start_TS'
READ_RBM, RBM_PFD, PARAM, MODEL_TIM(0)
PARAM='MOD_TIME_Start_YR'
READ_RBM, RBM_PFD, PARAM, MODEL_TIM(1)
PARAM='MOD_TIME_End_TS'
READ_RBM, RBM_PFD, PARAM, MODEL_TIM(2)
PARAM='MOD_TIME_End_YR'
READ_RBM, RBM_PFD, PARAM, MODEL_TIM(3)
MODEL_TIM = FIX(MODEL_TIM)
; #####
; Angabe der unveränderlichen Modellparameter
; #####
utm_zone=33
datum='WGS84'
TS_pa=36 ; Angabe der Modellzeitschritte
; pro Jahr (= 36)
; #####
; GUI zum Einlesen der Modellparameter
; #####
; Berechnung der Modellaufzeit
; #####
; Wichtige Parameter zur Weitergabe innerhalb des Modells:
; MODEL_TIME INT = Array[year, 4]
; MODEL_TIME(year,0) = Jahr des Modellaufs
; MODEL_TIME(year,1) = Anzahl der Modell Time Steps
; MODEL_TIME(year,2) = erster Time Step
; MODEL_TIME(year,3) = letzter Time Step
; #####
; Ermittlung der Modelljahre
; #####
modellung_years=modellung_end(1) - modellung_start(1)+1
y=0
MODEL_TIME=INTARR(modellung_years,4)
FOR t=0,modellung_years-1 DO BEGIN
  MODEL_TIME(t,0)=modellung_start(1)+y
  y=y+1
ENDFOR
; #####
; Ermittlung der Modellzeitschritte
; #####
MODEL_TIME(0,1) = TS_pa - modellung_start(0) +1
MODEL_TIME(0,2) = modellung_start(0)
MODEL_TIME(0,3) = TS_pa
FOR t=1,modellung_years-2 DO BEGIN
  MODEL_TIME(t,1) = TS_pa
  MODEL_TIME(t,2) = 1
  MODEL_TIME(t,3) = TS_pa
ENDFOR
MODEL_TIME(modellung_years -1,1) = modellung_end(0)
MODEL_TIME(modellung_years -1,2) = 1
MODEL_TIME(modellung_years -1,3) = modellung_end(0)
; #####
; Beginn der Modellberechnung
; #####
for i=0,modellung_years-1 do begin
  RBM_year, home, model_time(i,*)
endfor
; #####
; Schliessen aller Dateien und Beenden der LogFile
; #####
; Ende der Routine RBM_Kakoveld_all.pro (RBM-Steuerung)
; #####
END

```

A.2 Protokoll der Routine RBM_PREP_GUI

Nachfolgend ist exemplarisch die Protokolldatei eines Rechenlaufs der Routine *RBM_PREP_GUI* aufgeführt.

```

This is RBM Enironment Modelling Preparation Log
written in ENVI/IDL 3.5
by J. Richters (C)2003
This RBM Environment in running under:
{ x86 Win32 Windows Microsoft Windows 5.6 Oct 26 2002      32      64}

Check of written files:
Begin of Logging Wed Sep 22 13:55:47 2004
File: E:\RBM_FINAL\RBM_2002\rbm_pref.rbm written.
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\balance\BIOMASS_ALL.data written
Year:      2002
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\ysp\CDP_DGM_2002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\ysp\CDP_SOIL_2002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\ysp\YDP_VCF_2002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\mod09\TSP_MOD09_012002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\mod09\TSP_MOD09_022002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\mod09\TSP_MOD09_032002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\mod09\TSP_MOD09_042002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\mod09\TSP_MOD09_052002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\mod09\TSP_MOD09_062002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\mod09\TSP_MOD09_072002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\mod09\TSP_MOD09_082002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\mod09\TSP_MOD09_092002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\mod09\TSP_MOD09_102002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\mod09\TSP_MOD09_112002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\mod09\TSP_MOD09_122002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\mod09\TSP_MOD09_132002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\mod09\TSP_MOD09_142002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\mod09\TSP_MOD09_152002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\mod09\TSP_MOD09_162002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\mod09\TSP_MOD09_172002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\mod09\TSP_MOD09_182002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\mod09\TSP_MOD09_192002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\mod09\TSP_MOD09_202002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\mod09\TSP_MOD09_212002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\mod09\TSP_MOD09_222002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\mod09\TSP_MOD09_232002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\mod09\TSP_MOD09_242002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\mod09\TSP_MOD09_252002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\mod09\TSP_MOD09_262002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\mod09\TSP_MOD09_272002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\mod09\TSP_MOD09_282002.data written

```


OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\emissivity\TSP_EMS_262002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\emissivity\TSP_EMS_272002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\emissivity\TSP_EMS_282002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\emissivity\TSP_EMS_292002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\emissivity\TSP_EMS_302002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\emissivity\TSP_EMS_312002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\emissivity\TSP_EMS_322002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\emissivity\TSP_EMS_332002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\emissivity\TSP_EMS_342002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\emissivity\TSP_EMS_352002.data written
OK: File E:\RBM_FINAL\RBM_2002\2002\tsp\emissivity\TSP_EMS_362002.data written
End of Logging Wed Sep 22 13:56:50 2004

A.3 Tabelle der Felddaten von 2002

Tabelle A.1: Beispiel der Daten des Feldaufenthaltes von 2002 zur Berechnung der Modellevaluation

Plot Nr.	LAT in [°]	LON in [°]	Deckung [%]	Höhe [in cm]			Biomasse Gras [in g] (1 x 1 m ²)	Anzahl Bäume (25 x 25 m ²)	mittl. Höhe Bäume von 10% in [m]	mittl. Stammdurch- messer Bäume in [m]	mittl. Kronendurch- messer Bäume in [m]
				min	mittl.	max					
P001	-17,2274	13,2526	8	8	30	70	102	2	2	0,248	1,20
P002	-17,2205	13,2398	10	10	20	50	65	1,3	3,5	0,291	0,80
P003	-17,3129	13,1239	9	35	75	90	140	5	2,5	0,092	1,20
P004	-17,3954	13,1444	5	10	20	30	60	1	3	0,265	0,40
P006	-17,4734	13,1432	8	15	20	50	45	2	2	0,127	1,20
P007	-17,5359	12,9252	12	30	45	75	93	4	1,5	0,048	1,50
P008	-17,5843	12,9174	25	12	25	35	114	1	3	0,175	1,80
P009	-17,6041	12,8880	20	11	50	65	162	4	1,7	0,032	1,00
P010	-17,6196	12,8593	3	3	15	35	87	17	1	0,095	0,80
P011	-17,7103	12,9039	4	7	30	55	67	4	1,7	0,127	1,00
P012	-17,8041	12,9920	5	10	60	80	97	2	1,8	0,095	1,50
P013	-17,8744	13,3346	3	20	40	60	62	0	2,5	0,111	2,00
P014	-18,1224	13,8377	2	3	25	45	97	1	2	0,127	2,00
P015	-18,2031	13,8129	6	10	25	33	90	5	1,6	0,048	1,00
P016	-18,2549	13,7480	10	5	15	20	136	20	1,5	0,057	1,20
P017	-18,3005	13,6736	12	3	18	50	140	6	1,7	0,111	1,50
P018	-18,2901	13,5904	13	6	40	60	88	4	2,5	0,223	2,10
P019	-18,2698	13,5149	14	6	24	44	80	2	2	0,207	1,60
P020	-18,2442	13,4652	2	15	40	60	30	2	2,1	0,191	1,10
P021	-18,2707	13,3819	5	5	20	40	110	3	1,8	0,000	1,00
P022	-18,2506	13,3285	3	4	35	65	69	1	1,6	0,159	1,30
P023	-18,2397	13,2533	3	5	8	35	40	1	1	0,159	1,20
P024	-18,2882	13,2006	3	15	35	55	50	1	1,1	0,127	0,30
P025	-18,3212	13,1291	2	2	6	15	30	1	2	0,159	1,50
P026	-18,3324	13,0475	2	4	20	50	53	1	1,1	0,127	0,40
P027	-18,3112	12,9768	3	6	60	140	76	6	1,4	0,064	1,00
P028	-18,2745	12,8881	9	5	60	80	96	6	2,4	0,095	1,10
P029	-18,2359	12,8346	5	5	30	85	34	4	1,2	0,064	1,20
P030	-18,1873	12,7438	4	5	25	80	56	0	2	0,159	2,50
P031	-18,2407	12,6705	10	60	60	60	80	2	1,8	0,095	1,60
P032	-18,2188	12,6249	2	5	50	80	62	0	0	0,000	0,00
P033	-18,1746	12,5715	10	8	40	80	45	1	1,7	0,000	1,50
P034	-18,1791	12,5446	5	8	25	50	55	0	0	0,000	0,00
P035	-18,1707	12,4476	2	25	40	55	43	2	1,3	0,000	1,20
P036	-18,1420	12,3842	2	20	30	45	15	0	0	0,000	0,00
P037	-18,0794	12,3190	1	25	35	55	5	0	0	0,000	0,00
P038	-18,0115	12,3230	0	20	30	50	12	0	0	0,000	0,00

Plot Nr.	LAT in [°]	LON in [°]	Deckung [%]	Höhe [in cm]			Biomasse Gras [in g] (x1m ²)	Anzahl Bäume (25 x 25 m ²)	mittl. Höhe Bäume von 10% in [m]	mittl. Stammdurch- messer Bäume in [m]	mittl. Kronendurch- messer Bäume in [m]
				min	mittl.	max					
P039	-17,9394	12,3454	0	2	18	35	1	0	0	0,000	0,00
P040	-17,8591	12,3414	0	10	40	65	23	0	0	0,000	0,00
P041	-17,7910	12,3864	4	20	50	80	65	0	0	0,000	0,00
P042	-17,8042	12,4653	12	20	60	80	67	1	0,6	0,127	0,40
P043	-17,8257	12,5237	11	50	70	100	81	1	0,6	0,111	0,30
P044	-17,8558	12,5395	4	20	40	60	90	2	1,5	0,127	1,70
P045	-17,8966	12,5523	5	8	45	75	150	3	1,5	0,064	1,30
P046	-17,9677	12,5773	2	10	40	60	1	1	1,3	0,064	0,60
P047	-18,0390	12,6196	3	5	40	75	70	0	0	0,080	0,00
P048	-18,1152	12,6032	4	5	35	60	66	0	0	0,000	0,00
P049	-18,2183	12,5317	12	30	55	70	82	5	1,4	0,000	1,10
P050	-18,3103	12,4929	2	30	40	60	20	0	0	0,000	0,00
P051	-18,3943	12,4693	4	20	35	50	30	0	0	0,000	0,00
P052	-18,4791	12,4886	0	10	25	50	1	0	0	0,000	0,00
P053	-18,5395	12,5385	0	4	20	38	1	0	0	0,000	0,00
P054	-18,5695	12,6152	0	3	20	30	1	0	0	0,000	0,00
P055	-18,6692	12,6982	0	3	15	30	1	0	0	0,000	0,00
P056	-18,7373	12,7498	0	4	30	50	1	0	0	0,000	0,00
P057	-18,7793	12,8314	2	8	20	40	5	0	0	0,000	0,00
P058	-18,7677	12,9149	0	10	30	50	1	0	0	0,000	0,00
P059	-18,7895	12,9955	1	5	30	60	1	0	0	0,000	0,00
P060	-18,8336	13,1537	1	10	40	90	1	0	0	0,000	0,00
P061	-18,8493	13,2394	0	10	40	70	1	0	0	0,159	0,00
P062	-18,9124	13,2913	4	20	40	80	25	0	0	0,414	0,00
P063	-18,9914	13,3023	5	8	55	80	52	0	0	0,000	0,00
P064	-19,0468	13,3657	3	4	25	50	23	1	0,7	0,127	0,40
P065	-19,0484	13,4577	2	20	60	100	30	0	0	0,000	0,00
P066	-19,0732	13,5315	2	15	60	100	15	0	0	0,000	0,00
P067	-19,1266	13,6642	2	20	40	70	30	0	0	0,175	0,00
P068	-19,1150	13,7397	2	10	25	40	15	0	0	0,318	0,00
P069	-19,0226	13,7535	3	20	60	80	40	0	0	0,477	0,00
P070	-18,9475	13,7561	4	5	50	80	43	0	0	0,064	0,00
P071	-18,8610	13,7714	2	20	60	100	20	1	1,5	0,080	1,00
P072	-18,7895	13,7597	14	20	40	60	141	5	1,8	0,191	1,30
P073	-18,7116	13,7206	11	4	20	40	89	8	1,4	0,159	0,80
P074	-18,6310	13,7205	12	10	40	60	105	2	2,2	0,127	1,20
P075	-18,5543	13,7450	15	12	50	100	87	18	1,7	0,064	1,00
P076	-18,4903	13,7970	9	6	14	30	115	6	2,2	0,159	1,80

Plot Nr.	LAT in [°]	LON in [°]	Deckung [%]	Höhe [in cm]			Biomasse Gras [in g] (1x1m ²)	Anzahl Bäume (25 x 25 m ²)	mittl. Höhe Bäume von 10% in [m]	mittl. Stammdurch- messer Bäume in [m]	mittl. Kronendurch- messer Bäume in [m]
				min	mittl.	max					
P077	-18,4494	13,8011	45	10	40	70	98	6	2,1	0,095	1,70
P078	-18,3668	13,7728	50	3	10	60	142	4	2,1	0,127	2,50
P079	-18,2907	13,7604	38	3	20	80	120	2	2,6	0,159	2,50
P080	-18,1101	13,8799	28	10	40	60	190	5	2,7	0,318	2,00
P081	-18,1586	13,9435	18	15	40	70	120	3	2	0,159	1,00
P082	-18,2102	14,0120	23	0	0	cm Büsch	99	1	2,5	0,223	1,80
P083	-18,2922	14,0455	17	7	20	100	130	3	2	0,286	1,00
P084	-18,3797	14,0656	43	7	35	70	126	2	2,4	0,271	1,20
P085	-18,4637	14,0975	50	20	60	80	150	1	2,5	0,255	1,50
P086	-18,5433	14,1230	45	20	60	100	176	4	1,6	0,127	1,20
P087	-18,5885	14,1899	12	5	40	140	88	2	2,5	0,111	1,10
P088	-18,6659	14,2541	15	20	40	60	65	1	1,6	0,159	1,30
P089	-18,7225	14,3153	18	12	50	140	90	1	2,5	0,191	2,00
P090	-19,0564	14,3182	8	2	8	40	50	3	1,8	0,159	1,00
P091	-19,0607	14,2809	10	20	50	60	75	1	2,5	0,159	1,50
P092	-19,0280	14,2332	6	3	30	60	87	2	2	0,127	1,40
P093	-18,9826	14,1679	15	20	60	80	80	2	2	0,159	1,50
P094	-19,0219	14,0915	18	20	60	80	115	2	2	0,223	1,60
P095	-19,0713	14,0514	6	5	15	40	60	1	2	0,191	1,00
P096	-19,1531	14,0406	35	10	40	60	118	3	2,3	0,350	1,30
P097	-17,1896	13,2680	5	10	35	100	80	0	0	0,000	0,00

A.4 Datenträger mit Demodaten und Ergebnissen

In der hinteren Umschlagklappe befindet sich eine CD-ROM, auf der folgende Dateien abgelegt sind:

- Alle ENVI/IDL-Routinen zur Vorverarbeitung und Prozessierung von MODIS-Daten zur Berechnung der pflanzlichen Biomasse.
- Ein Beispieldatensatz für den eigenständigen Test des Modells. Dieser Datensatz umfaßt alle notwendigen MODIS-Datenprodukte und die konstanten Datensätze für einen Teilausschnitt des Untersuchungsgebiets für das Jahr 2001. Die Daten liegen in komprimierter Form vor und sind nach dem Entpacken als RBM-Projekt verfügbar.
- Die in dieser Arbeit angesprochenen Ergebnisse des RBM sind auf der CD nochmals dokumentiert. Dabei sind sowohl digitale Karten der Biomasse vorhanden wie auch die zugrunde liegenden berechneten Daten. Zur besseren Visualisierung wurden die Ergebnisse der einzelnen Zeitschritte in einer Animation kombiniert und sind als digitales Video auf der CD gespeichert.
- Diese vollständige Arbeit ist im Adobe PDF-Format auf der CD abgelegt.

Die CD verfügt über ein einfaches HTML-Webmenü. Nach dem Einlegen der CD-ROM muß lediglich die Datei index.html auf der obersten Ordner Ebene der CD ausgeführt werden.

Index

- äquivalentes Lebendgewicht, 30
- ökologische Produktionsgleichung, 43
- C. virgata*, 21
- Colophospermum mopane*, 21
- Commiphora multijuga*, 21
- Euphorbia guerichiana*, 21
- Schmidtia kalahariensis*, 24
- Stipagrostis hirtigluma*, 23, 24
- Stipagrostis uniplumes*, 23
- C₃-Pflanze, 44
- C₄-Pflanzen, 44

- Absorptionsspektren, 63
- APAR, 56
- Aridität, 16

- Böden, 20
- Benguelastrom, 13
- Besatzdichte, 30
- Bestandsmodelle, 49
- Bewölkung, 65
- Beweidung, 33
- BGC-Modelle, 50
- Bio-Geochemischen Modelle, 49
- Biomasse, 24, 42
- Biomemmodelle, 52
- Blattmodelle, 47
- Bodenerosion, 34

- Bruttoprimärproduktion, 42

- Calvin-Benson-Zyklus, 44
- Chlorophyll, 44, 63

- Dürrekatastrophe, 14
- Damara-Sequenz, 20
- Damaraland, 9
- Degradation, 34
- Digital Soil Map of the World, 108

- Einwanderung, 26
- ephemeres Grasland, 23
- Ernährungsbasis, 27
- Erwärmung, 35
- Etosha-Nationalpark, 9

- Feuer, 43
- Florenreiche, 21
- FPAR, 58
- Futterbaum, 23
- Fuzzifizierung, 71

- Gartenbau, 27
- Global 30 Arc Second Elevation Dataset, 108
- Global Change, 39, 42
- Große Randstufe, 9, 18

- Höhenstufung, 71

- Haupttrumpffläche, 18
Herbivoren, 33
Herero, 9, 26
Himba, 9, 26
Hoanib, 9
Holzeinschlag, 33
- Insolation, 60, 61
Intergerized Sinusoidal Projection, 94
IPCC, 7, 38
IUNFG, 10
- Küstenabdachung, 18
Kalaharibecken, 18
Kaokolandes, 9
Kaokoveld, 9
Kernmodul, 112
Klima, 12
Klimaklassifikation, 15
Klimamodelle, 36
klimatische Lagefaktoren, 12
Klimaveränderungen, 7
Kohlendioxid, 7
Kohlenstoffhaushalt, 1, 42
Konsumption, 33
Konversionsfaktor, 56
Kraal, 26
Kunene, 9
- Lichtnutzungseffizienz, 66
- Methan, 7
- Nahrungskette, 43
Namib, 9
NDVI, 56, 65
Nekromasse, 42
Nettoprimärproduktion, 42
Niederschläge, 15
Niederschlagshäufigkeit, 15
Niederschlagsmenge, 15
Niederschlagstrend, 37
Nutzungsgeschichte, 25
Nutzungspotential, 20
- PAR, 44
Pflanzenfunktionstypen, 24, 58
Pflanzenwachstumsmodelle, 48
Photosynthese, 44
Phytomasse, 42
Produktivität, 24
Prozeßorientierte Vegetationsmodel-
le, 50
- Regenzeit, 15
Rinderbestand, 30
Rohdatenvolumen, 94
- Sanga Rind, 29
Savannen, 21
Sekundärsavanne, 33
Siedlungsplätze, 26
solare Einstrahlung, 60
Statistische Modelle, 49
stehende Phytomasse, 42
Stickoxiden, 7
strauchige Wuchsform, 21
Surface Temperature, 99
SVAT-Modelle, 52
- Temperatur, 15
Temperaturstreß, 76
TERRA EOS-1, 87
Tragfähigkeit, 30
Treibhausgasen, 7
Trockenmasse, 70
- Umsatzraten, 45

USGS EOS Data Gateway, 89

Variabilität, 16

Vegetationsbedeckung, 68

Vegetationskartierung, 21

Verbuschung, 34

Viehcamp, 27

Viehhaltung, 29

Wasserdampfgehalt, 104

Wasserstreiß, 77

Weidenutzung, 31

Zebraberger, 20

Zeitschrittlänge, 84

Zirkulation, 13

Zoomasse, 42

