

1 Einleitung: Ansätze und Ziele der Arbeit

Der vorliegenden Studie liegt ein mehrjähriger Forschungs- und Arbeitsaufenthalt in Namibia zugrunde. Ausgehend von einigen Studienreisen seit 1989 und einem viermonatigen Praktikum im Landwirtschaftlichen Labor des Ministry of Agriculture, Water and Rural Development (Windhoek) von Mai bis September 1993, war als Gegenstand dieser Arbeit ursprünglich ein geoökologisch-bodenkundlicher Schwerpunkt vorgesehen, der auch konkrete Anwendungsbezüge aufweisen sollte. Dies war und ist im Interesse der o. g. Praktikumsstelle, bei der sich eine Abteilung (Division Land Evaluation) mit der Erarbeitung der naturräumlichen Grundlagen für die Landnutzungsplanung in Namibia befaßt.

Aus politischen Gründen, die vermutlich in der bis 1990 dauernden südafrikanischen Mandatszeit liegen, ist Namibia das einzige Land des südlichen Afrika und eines der wenigen Länder weltweit, die (noch) nicht über eine ausreichend systematisierte und flächendeckende Inventarisierung dieser Grundlagen verfügen. Daher lag es nahe, in Form einer umfassenden Pilotstudie eines größeren Raumes zum Zweck der Kategorisierung des Relief, der Böden und der Vegetation unter dem Aspekt der Land-Degradation zu betrachten. Dies bildete den Leitgedanken des ersten Ansatzes. Für die organisatorische und logistische Durchführung wurde das Namibia Land Degradation Project (NLDP) gegründet, das sich vorwiegend mit der konkreten Anwendung von erzielten Forschungsergebnissen beschäftigt (KEMPF 1998), das aber gleichzeitig die Datenermittlung im Feld ermöglicht und fördert (siehe Vorwort).

Auf Basis der in aufwendigen Feld- und Laborarbeiten ermittelten Kategorien sollte eine naturräumliche Gliederung erarbeitet werden, deren Einheiten durch möglichst homogene Ausstattung und Prozeßgefüge charakterisiert werden. Dies sollte die Lösung konkreter, anwendungsbezogener Probleme erleichtern. Solche Probleme traten in der Abteilung Landnutzungsplanung des namibischen Landwirtschaftsministeriums vor allem dann auf, wenn es um die Beratung einzelner Landnutzer (z. B. Kommunalfarmer, Privatfarmer, Ackerbauern oder Bewässerungslandwirte) hinsichtlich bestimmter Nutzungsentscheidungen oder Nutzungsmaßnahmen ging. Oft wurden die Beratungen von den Landwirten allerdings erst dann in Anspruch genommen, wenn unter einem bestimmten Management die erhofften Erträge ausblieben oder kulturbedingte Schäden, z. B. beschleunigte Bodenerosion oder unerwünschte Vegetationsveränderungen auftraten.

Dabei wurde sehr häufig festgestellt, daß hinsichtlich der Landwirtschaft in Namibia eine bisweilen extreme „Klimagläubigkeit“ (zonales Klima als Standortfaktor) besteht. Viele Bestockungs- oder

Anbaumaßnahmen richteten sich in allen Jahren allein nach den langjährigen Durchschnittsniederschlägen am Standort. Und das, obwohl zum einen in Namibia eine bekanntermaßen hohe Variabilität der Niederschläge auftritt und zudem bisher keine, auf streng geökologischen Kriterien basierende agroökologische Zonierung existiert. Auch behördliche Empfehlungen und die Nutzung der staatlichen Landnutzungsflächen richteten sich in der Regel vornehmlich nach den statistisch zu erwartenden (mittleren) Niederschlägen.

Bei zahllosen Feldbegehungen in den unterschiedlichsten Regionen des Landes mit den unterschiedlichsten Managementformen sowie durch Gespräche mit den Landnutzern, konnte jedoch festgestellt werden, daß angesichts der erratischen Niederschläge auf denen viele der Systeme beruhen, der Faktor „zonales Klima“ in der Standortbewertung eher zurücktritt und vielmehr Faktoren, die den Meso- und Mikrostandort determinieren, klar in den Vordergrund rücken. Die Determinanten des Meso- und Mikrostandorts sind aber in allererster Linie im Boden und im Relief (bzw. der geomorphologischen Position) zu sehen. Gerade der Faktor Boden und mit ihm die reliefbestimmenden Einflüsse sind aber in Namibias Landwirtschaft sehr häufig „die großen Unbekannten“ im geökodynamischen System. Kommentare wie „*there is no soil erosion in this country; we have a severe bush problem*“ waren seitens der Landnutzer durchaus häufig zu hören, selbst wenn keine 100 Meter entfernt ein tiefer Donga die Weide zerschnitt und die Grashorste auf 20 Zentimeter hohen Hügeln standen. Daraus ist auch zu erklären, warum der Grad der bisherigen Erforschung von Boden und Relief in Namibia aus Sicht der Landnutzungsplaner in geradezu paradoxem Widerspruch zu deren tatsächlicher Bedeutung für die Landwirtschaft steht.

Hierzu einige Beispiele, um den Mißstand zu verdeutlichen:

1. Es existiert in Namibia keine landesweite Bodenkarte in einem für Landnutzungsplanung halbwegs akzeptablen Maßstab, lediglich die weitere Etosha-Region wurde systematisch erfasst (VERSTER 1981; BUCH 1990 unpubl, 1993a; BEUGLER-BELL 1996)
2. Außer für die weitere Etosha-Region existiert keine ausreichend angepaßte Bodenklassifikation, die eine Aufnahme und Bewertung des Naturraumpotentials Boden erleichtern würde.
3. Es existieren keine geomorphologischen Karten auf landschaftsgeschichtlicher Grundlage zur Gliederung der namibischen Naturräume.
4. Die bisherige landschaftsgeschichtliche Gliederung geht davon aus, daß mindestens seit dem ausgehenden Miozän (seit ca. 5-10 Millionen Jahren) in Namibia ein arides bis semi-arides Klima vorherrscht, das dem heutigen mehr oder weniger gleicht und das selbst im weltweit sehr

wechselhaften Quartär allenfalls Auslenkungen zu kürzeren oder schwächeren Feucht- bzw. Wüstenphasen zeigt (s. Kap. 4). Aus diesem Grund wurden die Böden Nambias bisher immer als „Wüsten-, Wüstensteppen-, Halbwüsten- oder trockene Savannenböden“ klassifiziert. Formen von Paläoböden wurden quasi nie beschrieben oder berücksichtigt. Eine zeitliche Einordnung von bestimmten Bodenbildungen unterblieb bisher weitgehend.

5. Die unzureichende, zum Teil widersprüchliche zeitliche Einordnung von Deckschichten, Substraten und Böden macht eine systematische Beurteilung von Landoberflächen hinsichtlich Nutzbarkeit/Fruchtbarkeit und Risikopotential gegenüber Degradationserscheinungen quasi unmöglich, da ein gliedernder „Aufhänger“, z. B. eine regionale, indizien-basierte Klima- und Landschaftsgeschichte im Sinne einer umfassenden Geochronologie fehlt.
6. Die existierende Landschaftsgeschichte geht davon aus, daß seit der angeblich miozänen Kalkinkrustierung der Rumpf- und Deckschichten-Flächen dort allenfalls pliozäne Dünenbildung und durch Hebung verursachte Zerschneidung das Relief formten. Alle weiteren Reliefeinheiten, also große Teile der pliozänen und quartären Reliefgenerationen befinden sich angeblich überwiegend in den Flußtälern als fluviales Relief. Damit wird für die Flächen gemeinhin eine mindestens 3 bis 5 Millionen Jahre währende Stabilität impliziert, die zu typischen Bodenbildungen geführt haben müßte. Ein pedologischer Nachweis für die bisher vorgeschlagene Landschaftsgeschichte fehlt jedoch fast völlig.

Im Verlauf der geoökologisch-bodenkundlichen Arbeiten wurde festgestellt, daß sich eine Reihe von Befunden nicht befriedigend in die existierende Geochronologie, wie sie z. B. bei WARD & CORBETT (1990) oder BESLER et al. (1994) u. v. a. publiziert wurde, einpassen lassen. Aus diesem Grund rückten während der Feldaufenthalte zunehmend geomorphologische Beobachtungen und die Durchforstung der verfügbaren geomorphologischen Literatur in den Vordergrund der Arbeiten, die lokal oder regional zu einer Bestätigung oder Ergänzung der publizierten Modellvorstellungen dienen sollten. Dies führte jedoch leider nicht zu einer Erhellung oder gar zu einer übergreifenden, belegenden Unterstützung der traditionellen Vorstellungen, sondern in „chaosnahe“ Verwirrungszustände. Bei fast jeder Feldbegehung wurden mehr geomorphologisch-landschaftsgeschichtliche Fragen aufgeworfen, als durch die geoökologisch-bodenkundlichen Aufnahmen beantwortet werden konnten.

Schließlich war keine andere Lösung mehr denkbar, als den (ungeliebten) Akt einer teilweisen thematischen Umformulierung vorliegender Arbeit zu wählen. Das ursprüngliche Konzept einer naturräumlichen Gliederung auf geoökologisch-pedologischer Basis mit direktem Anwendungsbezug (Ansatz 1), um Probleme wie agroökologische Zonierung oder Landdegradation angehen zu können, mußte neu gefaßt werden. Eine Durchsetzung dieses alten Konzepts hätte sehr wahrscheinlich zu kaum überbrückbaren Differenzen und zu einem Erklärungsnotstand gegenüber einigen bisher publizierten Darstellungen zu Geomorphogenese und Paläoklima geführt. Es war deshalb unumgänglich, den geoökologischen Ergebnissen eine möglichst geschlossene landschaftsgeschichtliche Darstellung voranzustellen, in die eigene und publizierte Befunde systematisch eingearbeitet werden konnten (zweiter Ansatz). Dabei konnte auf manche bisherigen Interpretationen kaum Rücksicht genommen werden, selbst wenn die Gefahr bestand, evtl. „heilige Kühe“ zur Schlachtbank zu führen. Es wurde notwendig, von einer *tabula rasa* aus die Landschaftsgeschichte Zentral-Namibias von alt nach jung neu aufzubauen. Letzten Endes handelt es sich bei dem geomorphologischen Teil der vorliegenden Arbeit um den subjektiven Versuch, die vergangene Realität zu deuten, wie bei anderen geomorphologischen Arbeiten auch.

Konkrete Feldbefunde wurden nach bestem Wissen und Gewissen zitiert, eigene Aufnahmen sind nachprüfbar. Sämtliche in dieser Arbeit zitierten Nachweise lagen physisch vor (bis auf wenige genannte Ausnahmen, die trotz langer Suche nicht beschafft werden konnten und als Sekundärzitat behandelt werden). Es ließ sich nicht immer vermeiden, daß in manchen Kapiteln beim Leser evtl. tiefergehende Sach- oder Lokalkenntnisse vorausgesetzt werden (möglicherweise manchmal auch unbewußt), insbesondere wenn auf Befunde oder Interpretationen dritter nur anhand der Literaturstelle verwiesen wird, ohne den exakten Inhalt und die Gründe des Befunds nochmals auszuformulieren oder Referenzlokalitäten zu beschreiben. Insbesondere in Nebenbereichen mußte aber aus Platzgründen so verfahren werden. Der Großteil der zitierten Literatur dürfte aber zumindest im südlichen Afrika ohne besondere Mühen beschafft werden können. Bibliotheken folgender Institutionen wurden bei der Recherche u. a. zu Rate gezogen: National Archives of Namibia, National Library, University of Namibia, Namibia Scientific Society, Agriculture Information Centre, Archaeological Library of the State Museum, Namibia Development Corporation, Geological Survey of Namibia (alle Windhoek), Sam Cohen Library (Swakopmund), Transvaal Museum (Pretoria), Public Library (Sandton City, Johannesburg), University of Zimbabwe (Harare). Verwiesen sei auch auf die Bibliothek der Desert Research Foundation, Gobabeb.

Die Verlagerung eines Schwerpunkts der vorliegenden Studie auf die Landschaftsgeschichte hatte zur Folge, daß der konkret anwendungsbezogene Teil sehr eingeschränkt werden mußte, um das Thema nicht zu weit ausufern zu lassen. Die Ergebnisse zu Degradationsgefährdung und Landschaftsrahmenplanung sollen in einer separaten Studie behandelt werden. Letztlich hat sich bei den Feldarbeiten gezeigt, daß aufgrund der standortbestimmenden Dominanz der landschaftsgenetischen Zusammenhänge eine sinnvolle naturräumliche Gliederung ohne Einbezug der Landschaftsgeschichte nicht möglich ist. „Sustainability“, Nachhaltigkeit kann nur durch möglichst gutes Verständnis des Gesamtsystems in seiner historisch-genetischen Entwicklung erreicht werden. Diese These soll vorliegender Arbeit voranstellen.

Daraus ergibt sich eine klare Zielvorgabe:

1. Erarbeitung der Geoökosystem-Zusammenhänge mit Inventarisierung des Formenschatzes
2. Klärung des Ablaufs der Landschaftsgeschichte unter Einbezug der lithologischen und geomorphologischen Ausgangsbedingungen in Zentral-Namibia von „alt nach jung“
3. Versuch der Verknüpfung von Landschaftsgeschichte im Ökosystemabläufen

Punkt 2. kommt die höchste Gewichtung zu. Erst wenn diese Arbeit abgeschlossen ist, können aus geoökologischer Sicht Problemkreise näher beleuchtet werden, die sich mit der agroökologischen Zonierung oder auch lokalen Dynamiken, z. B. den Auswirkungen und Formen der Land-Degradation, befassen. Die Frage nach der Anfälligkeit für bestimmte Degradationserscheinungen in Namibia muß daher zwangsläufig zu einer eher naturräumlich orientierten Betrachtung führen. Die anthropogenen Aspekte der Landschaftsformung können hier nicht berücksichtigt werden.

2 Methodik der Untersuchung

2.1 Theoretische Einbindung

Zu Beginn der Arbeit (erster Ansatz) mußte die Frage beantwortet werden, ob es für die Bearbeitung landschaftsökologischer Fragestellungen und anwendungsorientierter Probleme, wie zum Beispiel der Land-Degradation überhaupt notwendig ist, einen morphogenetischen Ansatz zu verfolgen. Schließlich gibt es innerhalb der Physischen Geographie heute einen ausgedehnten Fachbereich „Landschaftsökologie“, der bewußt nicht morphogenetisch arbeitet, sondern das aktuelle, gegebene Relief allenfalls zum Zweck der Naturraumgliederung und im Rahmen des

Stofftransports einbezieht (vgl. LESER 1997: 436f). Ähnliches gilt für die landschaftsökologisch orientierte Bodenkunde (vgl. GERRARD 1981). ROHDENBURG (1989: 2) hält die dadurch entwickelte „Frontstellung Genese - Ökologie“ sachlich für nicht gerechtfertigt: „Denn erst ein Verständnis der Reliefentstehung kann auch ein volles Verständnis für den Beziehungskomplex Relief - Sediment - Boden und dessen räumliche Ordnung liefern und dessen vollständige Erhebung [...] wesentlich beschleunigen.“

Bereits BÜDEL (1971: 119) bezog des „Pflanzenkleid“ (heute würde man es wohl die „Ökologie“ nennen) in seinen Wechselbeziehungen zu Bodenbildung und Wasserhaushalt als ein wesentliches Element des Formungsmechanismus in das „Natürliche System der Geomorphologie“ mit ein. Da - neben dem Relief der Erde - nach wie vor die reliefgestaltenden Prozesse *das* zentrale Thema der Geomorphologie darstellen, kann heute, in Zeiten, in denen Schlagworte wie „Umweltzerstörung“ und „Klimawandel“ gesellschaftspolitische Relevanz erhalten, sogar noch weiter gegangen werden: Weil beide Fachbereiche, Geomorphologie und Landschaftsökologie, heute mehr als bloße Methodiken zur Beschreibung von Form und Prozeß darstellen, sondern ein Milieubezug impliziert wird, sind sie, sobald es um die Beurteilungen von Milieuveränderungen und deren Auswirkungen geht, untrennbar verbunden. Das folgt aus der Erkenntnis, daß in einem bestimmten Milieu bestimmte morphologische und bestimmte ökologische Prozeßkombinationen in bestimmter zeitlicher Auflösung wirksam werden.

Auch wenn z. B. BÜDEL (1971, 1981) den Milieubegriff, also die Gesamtheit aller auf den Standort einwirkenden biotischen und abiotischen Faktoren, eher zonal (horizontal) auffaßt, ROHDENBURG (1970, 1989) u. a. eher funktional (vertikal) als Kombination von verschiedenen Prozessen unterschiedlicher Intensität, besteht jedoch allgemeine Einigkeit über die bedeutende Rolle von Reliefgenese und Ökologie als Einheit. Diese Einheit wird in vorliegender Arbeit als Axiom betrachtet.

Vereinfacht bietet sich so vielleicht die Möglichkeit, Erkenntnisse über Paläomilieu oder ihre Determinanten für Zukunftsszenarien anzuwenden bzw. aktuelle Prozesse einzuordnen. Manchem mag dies zu aktualistisch klingen, muß doch davon ausgegangen werden, daß insbesondere bei lange zurückliegenden Paläomilieu gänzlich andere Prozeßkombinationen milieu- und damit formbestimmend waren, als rezent. Außerdem kann über die zeitliche Konstanz der Milieu und damit über Stabilitätskriterien des Ökosystems oftmals nur spekuliert werden. Dennoch muß geklärt werden, ob und in wie weit aktualistisch argumentiert werden kann bzw. ob der Aktualismus für Details oder nur für übergeordnete Begriffe gelten kann.

Ein weiteres Argument für den Einbezug von Morphogenese in die Landschaftsökologie und umgekehrt, bietet die Erkenntnis, wonach nicht nur endogene Determinanten (geologisch – pedologisch - tektonische Prozesse) oder exogene Determinanten (Klima - Wasserhaushalt etc.) für jeweils aktuelle Milieuprozesse verantwortlich zeichnen, sondern auch der historische Ablauf, den das Milieu in seiner räumlichen Dimension genommen hat. Besonders deutlich wird diese Rolle der Reliefgeschichte bei einem Milieuwechsel, beispielsweise infolge einer klimatischen Veränderung. Als These soll formuliert werden: Morphodynamische Änderungen, z. B. im Verwitterungsregime, Vorflut- und Grundwasserniveau oder der Hangdynamik, ziehen ökodynamische Veränderungen nach sich. Umgekehrt können auch letztere zum Indikator oder gleichfalls zur Ursache von Milieu- oder morphodynamischen Änderungen werden (v. a. bei Katastrophenereignissen oder rezent bei anthropogenem Eingriff).

Durch den von BÜDEL (1971), ROHDENBURG (1989) und anderen postulierten engen wechselseitigen Bezug von Ökologie (Geoökologie) und Landschaftsgeschichte (Geomorphogenese) ergibt sich für jede Untersuchung mit landschaftsökologischem Anspruch die Untersuchung des morphodynamischen Prozeßgeschehens in Vergangenheit und Gegenwart gewissermaßen zwingend. Ohne den morphogenetischen Rückschluß auf Paläomilieus ist in Regionen, die aus Mangel an fossilem biotischen Material kaum konkrete paläoökologische Befunde liefern, die rezente ökologische Ausstattung allenfalls beschreibbar, jedoch kaum in ihrer Genese zu erklären, geschweige denn zu prognostizieren. Für die ökologische Ausstattung eines Raumes gilt wie auch für die morphologische Ausstattung: sie baut auf den Vergangenheitsformen und -prozessen deterministisch auf. So haben z. B. in Namibia noch heute die in Vorzeiten tiefgreifend verwitterten Gesteinsschichten, die Herausbildung ehemaliger Flächen- oder Terrassenniveaus oder Bodenbildungen unabdingbare Konsequenzen für Wasserhaushalt, Bodenchemismus etc. und damit direkte Auswirkungen auf Ökodynamik, Nutzung und Nutzungsfolgen.

Darin liegt die Begründung, warum in vorliegender Studie der möglichst genauen Klärung des morphochronologischen Verlaufs unbedingter Vorrang gewährt wird. In der historisch-genetischen Reliefbildung wird ein essenzieller Ansatzpunkt zur Beurteilung von Ökosystemstabilität und Naturraumpotential gesehen. Andere solche Ansatzpunkte zu deren Beurteilung, wie zum Beispiel das Kriterium „klimatische Ausstattung“, werden aufgrund ihrer hohen intrinsischen Variabilität in tropisch-subtropischen Trockengebieten (und der daraus folgenden notwendigerweise sehr langen Untersuchungszeiträume) als weniger geeignet angesehen. Zudem bleiben geomorphologische Grenzen und Einheiten über wesentlich längere Zeiträume unverändert, während sich z. B. die

Niederschlagsverhältnisse von Saison zu Saison unterscheiden (Kap. 3). So wirken die Reliefverhältnisse geökologisch als Puffer stark schwankender Klimaverhältnisse, indem sie zum bestimmenden Faktor werden.

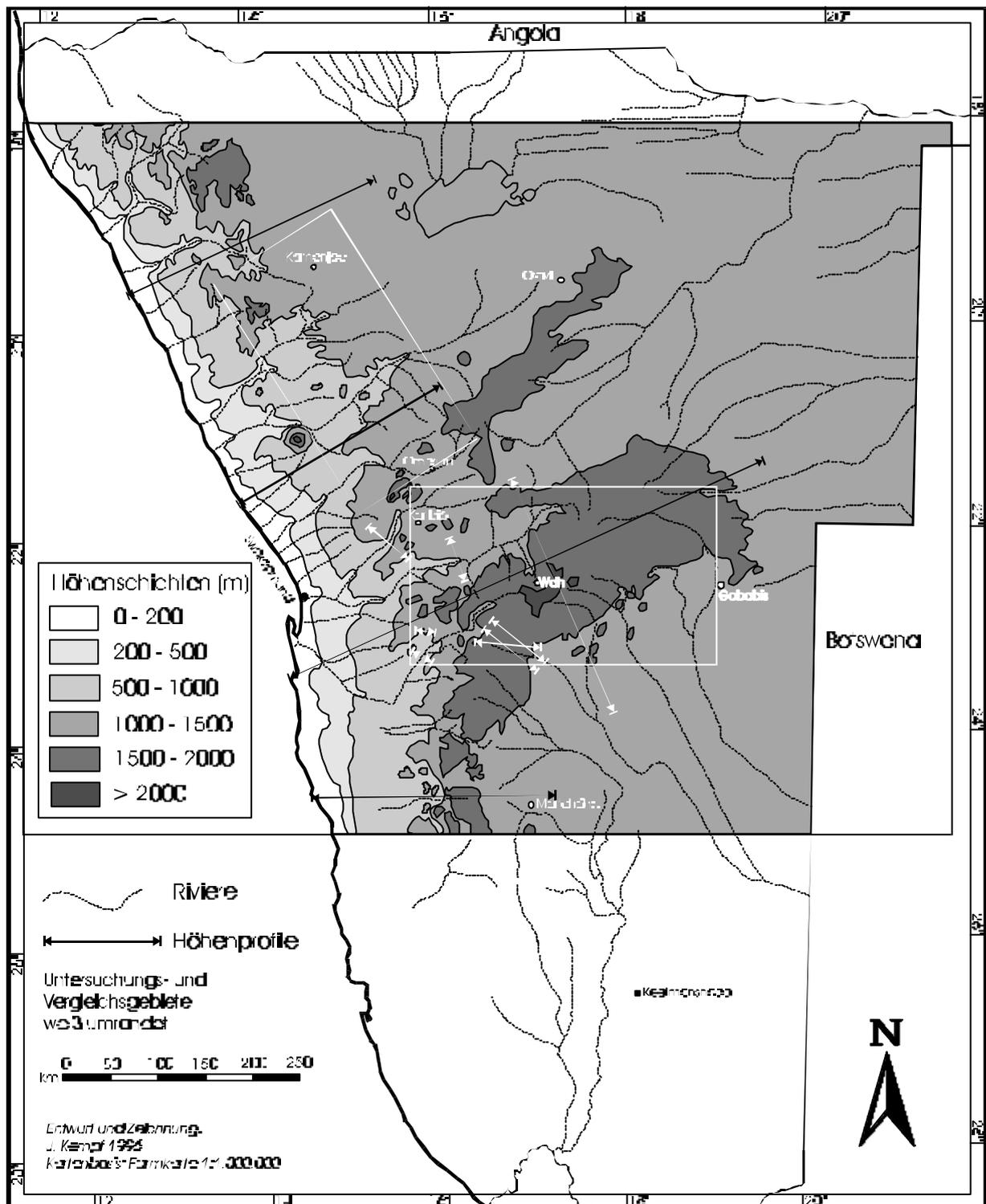
2.2 Methodisches Vorgehen und Arbeitsweisen

2.2.1 Transektkonzept

Um einen übergeordneten geomorphologischen und geökologischen Raum- und Funktionszusammenhang zu erarbeiten, den es nach LESER (in BESLER et al. 1994: 14) „bis heute immer noch nicht gibt“, bietet sich in Namibia ein geomorphologisches Transektkonzept von den Gebieten der Wüsten- und Halbwüstenklimare in Namib und Prä-Namib über die der Hochlandsklimare bis zu den Savannenregionen des Kalahari-Beckens an. Dieses Transekt beschreibt einen morphologischen Übergang von der Küstenabdachung über die Randstufe und Randstufenhochflächen zur Kalahari-Abdachung und zu deren kontinentalen Sedimentationsräumen. Eine quasi ideale Anordnung für ein solches Transekt bieten die Landschaften Zentral-Namibias zwischen etwa dem 21. und dem 23. Grad südlicher Breite (vgl. Karte 1). Mit dem westlichen Kalahari-Becken, dem Escarpment-Vorland westlich der Randstufe und den Rivierterrassen existieren Sedimentationsräume, mit den Hochflächen und Talnetzen Abtragungsbereiche, die reliefgeschichtlich untersucht werden können. Parallel dazu berührt dieser Untersuchungsraum die sog. Randstufenlücke, in der Sedimentationsbereiche sehr selten und schwach ausgeprägt sind. Vergleichend dazu können Beobachtungen aus den nord- und südnamibischen Randstufendlandschaften herangezogen werden, wo ebenfalls umfassende Feldarbeiten durchgeführt wurden, die hier nicht in vollem Umfang berücksichtigt werden.

Die rezenten langjährigen Isohyeten im zentralnamibischen Transekt bilden einen stetig ansteigenden küstenparallelen Gradienten von ca. 10 Millimeter Jahresdurchschnittsniederschlag an der Namib-Küste, über 50-100 Millimeter in der Prä-Namib und 350 Millimeter auf dem Hochland bis zu ca. 500 Millimeter im Sandveld (Kap. 3.2. und 3.3). Dementsprechend geht die potentielle natürliche Vegetation von sehr vegetationsarmer „Vollwüste“ (Dünen- und Flächennamib) und annuellen Hartgrasländern - bei Hinzunahme von Formationen mit Karoo-Florenelementen auch Sukkulenten-Steppen - über in Kurzstrauch-, Dorn- und Trockensavannen mit schwankenden Gehölzanteilen bis hin zu Trockenwaldformationen (s. Kapitel 3.6 zur Vegetationsökologie); bei häufiger frostgefährdeten Hochländern (das Khomas-Hochland erreicht über 2000 Meter Höhe) bildet sich eine Hochlandsavanne (im strengen Sinne Hochlandsteppe) aus.

Die Geoökosysteme eines solchen Transekts repräsentieren einen beträchtlichen Teil der Landschaften Namibias, insbesondere der nördlichen Hälfte (nördlich des Steinbock-Wendekreises). Anlässlich einer Überblicksaufnahme, bestehend aus einer Befliegung und



Karte 1: Namibia mit Höhenschichten der untersuchten Gebiete und Kennzeichnung einiger der aufgenommenen Höhenprofile. Die engeren und sehr häufig begangenen Untersuchungsregionen sind weiß eingerahmt. Generell werden aber Befunde aus dem gesamten, hier mit Höhenschichten belegten Raum zur Erklärung der Morphogenese herangezogen.

zahlreichen umfangreichen Vorerkundungen, wurde festgestellt, daß sich eine Vielzahl von Relief-einheiten und sog. Geoökochoren (mesoskalige Einheiten gleicher oder ähnlicher Prozeßdynamiken, z. B. Catenen) ausgliedern lassen.

Der rezente ökologische Zustand weiter Teile des Transekts würden wohl nach ROHDEN-BURG (1970) aufgrund der schütterten Vegetationsdecke, der extrem schwachen Bodenneubildungsrate und der stark akzentuierten Niederschlagsverteilung als „morphodynamisch aktiv“ eingestuft werden. Eine Ausnahme bilden die extrem ariden Gebiete, wegen der dortigen geringen Niederschlagsaktivität (ROHDENBURG 1970: 91). Sie gelten als morphodynamisch „trockenstabil“ (Kap. 3.5). Die klimamorphologischen Zonen der Gegenwart nach BÜDEL (1981) weisen das Untersuchungsgebiet der „Warmen Trockenzone der Flächenerhaltung und traditionellen Weiterbildung, vorweg durch Sandschwemmebenen“ zu.

Mit dem Transektkonzept wird also ein eher als „klassisch“ zu bezeichnender, großräumiger methodischer Ansatz gewählt, in den auch verfügbare Befunde aus Neben- und Teildisziplinen, wie der Geologie, Geotektonik, Paläoökologie, Geoökologie oder auch der Ozeanographie, eingearbeitet werden können. Zusätzlich soll es möglich sein, auch die Befunde aus Vergleichsgebieten einzupassen. Dieser Ansatz war für ein Einzelprojekt nur deshalb wählbar, weil bei Projektbeginn bereits umfangreiche Literatur- und Raumkenntnisse aus früheren Aufenthalten zur Verfügung standen und die Möglichkeit gegeben war, über einen Zeitraum von fast vier Jahren quasi kontinuierlich Feldaufnahmen durchzuführen (s. Vorwort).

Kleinräumige Untersuchungen dienten der Vertiefung von Detailfragen. Der Gesamtaufenthalt in Namibia im Untersuchungszeitraum März 1993 bis März 1997 betrug etwa 27 Monate, wobei 5 Monate auf die Vorerkundungen von 1993 bis Juli 1994 entfielen. Zusätzlich wurde von Juni bis September 1999 eine viermonatige Nachbegehung durchgeführt. Für die Erkundungs- und Feldarbeiten wurden weit über 100.000 Kilometer zurückgelegt.

2.2.2 Methoden der Vorerkundung

Die Vorerkundung geschah unter geomorphologischen und geoökologisch-pedologischen Aspekten. Es werden also auch Informationsquellen aufgeführt, deren Nutzen über rein geomorphogenetische Fragestellungen hinausgehen kann. Das erleichtert die Weiterarbeit mit den morphologischen Erkenntnissen sowie eine naturräumliche Gliederung. Die Schwerpunkte der Arbeiten von

1993 bis 1995 lag auf der pedologischen Detailaufnahme. Nach Auftreten der geomorphologischen Problematik wurden ab 1995 diesbezügliche Informationen gesammelt.

2.2.2.1 Daten und Kartensätze als Hilfsmittel

Für die untersuchten Gebiete gibt es eine Anzahl von Klimadatenreihen verschiedener Länge, die vom namibischen Transportministerium/Wetterbüro bzw. seinen Vorläuferinstitutionen aufgenommen wurden. Aus diesen Datensätzen wurde vom DEPARTMENT OF WATER AFFAIRS (1992b) eine Isohyetenkarte (1:1 Mill.) berechnet. Demnach erhält der Untersuchungsraum in West-Ost-Differenzierung einen Jahresdurchschnittsniederschlag von 10-500 mm (Kap. 3). Dafür liegen die analogen Reihen von 15 Niederschlagsmeßstationen vor, deren kontinuierliche Länge 25 Jahre überschreitet. Des weiteren werden in Kap. 3 Meßwerte von privaten Stationen (meist auf Farmen) verwendet, die oft nicht nur in monatlicher, sondern sogar in täglicher Auflösung über Jahre hinweg erhoben wurden. Die Daten wurden digitalisiert und in aussagekräftigen Grafiken dargestellt. Ähnliche Meßreihen gibt es von hydrologischen Daten, vor allem Rivierpegel-Abflußmessungen (vgl. LÜCK 1997a).

Für die Gewinnung von Vorinformationen und die Lokalisierung von Merkmalen und Aufschlüssen wurde eine Anzahl von topographischen und thematischen Karten verwendet:

- Namibia-Farmkarte 1:1 Mill. (SURVEYOR GENERAL 1978, 1994), 1 Blatt
- Topographische Karte 1:250.000 (SURVEYOR GENERAL 1982ff), 15 Blätter (1912 Sesfontein, 1914 Kamanjab, 1916 Tsumeb, 1918 Grootfontein, 2014 Fransfontein, 2016 Otjiwarongo, 2018 Eiseb, 2114 Omaruru, 2116 Okahandja, 2118 Steinhausen, 2214 Walvis Baai, 2216 Windhoek, 2218 Gobabis, 2314 Kuiseb, 2316 Rehoboth)
- Topographische Karten 1:50.000 (SURVEYOR GENERAL 1976ff), 111 Blätter aus den Untersuchungsgebieten
- Straßenkarte 1:2 Mill. (DEPARTMENT OF TRANSPORT 1992, 1994), 1 Blatt
- Geologische Karte 1:1 Mill. (GEOLOGICAL SURVEY 1980), 4 Blätter (A-D)
- Geologische Karten 1:250.000 (GEOLOGICAL SURVEY 1988ff), 4 Blätter (1916 Tsumeb als Blaupause, 1918 Grootfontein als Blaupause, 2216 Windhoek als Blaupause, 2218 Gobabis)
- Geologische Karte 1:250.000 (CONSOLIDATED DIAMOND MINES 1979), 1 Blatt (2219 Gobabis und Hereroland)
- Geologische Karte des Damara-Orogens 1:500.000 (GEOLOGICAL SURVEY 1988)
- Vegetationskarte von GIESS (1971, 1998) 1:5 Mill., 1 Blatt

- Vegetationskarte 1:100.000 (DEPARTMENT OF FORESTRY 1994), 16 Blätter (1914A-1918D als Blaupausen)
- Landschaftstypenkarte 1:1 Mill. (FAO 1983), 2 Blätter
- Verdunstungskarte von CRERAR & CHURCH (1988) 1:2 Mill., 1 Blatt.

Ergänzend zu den Karten wurde digitale Geländemodelle (*digital elevation models*) der Untersuchungs- und Vergleichsgebiete ausgewertet, die unter Verwendung eines von Dr. Holger Schinke (Graduiertenkolleg „Geowissenschaftliche Gemeinschaftsforschung in Afrika“, Universität Würzburg) geschriebenen FORTRAN-Programms aus Rohdaten der *Defense Mapping Agency* (DMA, Washington) erstellt wurden (s. Vorwort).

2.2.2.2 Fernerkundung

Zusätzlich zur Karteninterpretation wurden im Rahmen der Vorerkundung und der geomorphologisch-geoökologischen Gliederung Fernerkundungsmethoden eingesetzt. Zur Verfügung standen mehrere Landsat-MSS- und Landsat-TM-Vollszene in unterschiedlichen Formen (Hardcopies als Farbausdrucke oder panchromatische Schwarz-Weiß-Ausdrucke verschiedener Bandkombinationen in hoher optischer Qualität; Digitale Datensätze auf Magnetband-Datenträger oder CD-Rom).

Die verwendeten Satellitenaufnahmen stammen sämtlich vom *Remote Sensing Centre* des *Centre for Scientific and Industrial Research* (CSIR), Johannesburg. Im einzelnen wurden folgende Szenen verwendet (alle Angaben bei den Abbildungen und im Text beziehen sich auf die vorangestellte Nummerierung):

1. LANDSAT-MSS-Szene ID 22143-08134 vom 04.12.1980 (10h14 GMT), LANDSAT 3, Vollszene-Hardcopy: Bandkombination 4-5-7 (BGR), linear kontrastverstärkt; Bildmittelpunkt 20°13' S - 15°46' E (UTM-Zone 33).
2. LANDSAT-MSS-Szene ID 22160-08081 vom 21.12.1980 (10h08 GMT), LANDSAT 3, Vollszene-Hardcopy: Bandkombination 4-5-7 (BGR), linear kontrastverstärkt; Bildmittelpunkt 21°40' S - 16°51' E (UTM-Zone 33).
3. LANDSAT-MSS-Szene ID 22430-08045 vom 17.09.1981 (10h05 GMT), LANDSAT 3, Vollszene-Hardcopy: Bandkombination 4-5-7 (BGR), linear kontrastverstärkt; Bildmittelpunkt 21°40' S - 16°48' E.
4. LANDSAT-MSS-Szene ID 22430-08045 vom 17.09.1981 (10h05 GMT), LANDSAT 3, monochromatische Vollszene-Hardcopy von Band 7 (Wellenlänge 0,8-1,1 µm, nah-infrarot) in Graustufen; Bildmittelpunkt 21°40' S - 16°48' E.
5. LANDSAT-MSS-Szene ID 22431-08101 vom 18.09.1981 (10h10 GMT), LANDSAT 3, Vollszene-Hardcopy: Bandkombination 4-5-7 (BGR), linear kontrastverstärkt; Bildmittelpunkt 20°13' S - 15°43' E (UTM-Zone 33).

6. LANDSAT-MSS-Szene ID 40057-08233 vom 12.09.1982 (10h23 GMT), LANDSAT 3, monochromatische Vollszenen-Hardcopy von Band 7 (Wellenlänge 0,8-1,1 μm , nah-infrarot) in Graustufen; Bildmittelpunkt $20^{\circ}14' \text{ S} - 15^{\circ}56' \text{ E}$.
7. LANDSAT-MSS-Szene ID 40369-08312 vom 20.07.1983 (10h31 GMT), LANDSAT 4, Ausschnitt-Hardcopy ($16^{\circ}30' \text{ S} - 18^{\circ}30' \text{ S}, 14^{\circ}30' \text{ E} - 15^{\circ}30' \text{ E}$): Kanalkombination 4-5-7 (BGR), linear kontrastverstärkt; Bildmittelpunkt $17^{\circ}22' \text{ S} - 15^{\circ}01' \text{ E}$.
8. LANDSAT-MSS-Szene ID 40369-08312 vom 20.07.1983 (10h31 GMT), LANDSAT 4, monochromatische Ausschnitt-Hardcopy ($16^{\circ}30' \text{ S} - 18^{\circ}30' \text{ S}, 14^{\circ}30' \text{ E} - 15^{\circ}30' \text{ E}$): Kanal 7 in Graustufen; Bildmittelpunkt $17^{\circ}22' \text{ S} - 15^{\circ}01' \text{ E}$.
9. LANDSAT-MSS-Szene ID 50928-08165 vom 15.09.1986 (10h17 GMT), LANDSAT 4, Vollszenen-Hardcopy: Kanalkombination 4-5-7 (BGR), linear kontrastverstärkt; Bildmittelpunkt $20^{\circ}16' \text{ S} - 15^{\circ}58' \text{ E}$ (UTM-Zone 33).
10. LANDSAT-MSS-Szene ID 41523-08103 vom 16.09.1986 (10h11 GMT), LANDSAT 4, Vollszenen-Hardcopy: Kanalkombination 4-5-7 (BGR), linear kontrastverstärkt; Bildmittelpunkt $21^{\circ}42' \text{ S} - 17^{\circ}04' \text{ E}$ (UTM-Zone 33).
11. LANDSAT-TM-Szene 180-075 vom 21.06.1993 (LANDSAT 5), Vollszenen-Datensatz aller 7 Kanäle auf 3 CCT (*Computer Compatible Tapes*); systematisch geokodiert (Korrekturniveau 5); Eck-Koordinaten: OL $20^{\circ}45'54'' \text{ S} / 13^{\circ}14'50'' \text{ E}$; OR $21^{\circ}02'00'' \text{ S} / 15^{\circ}05'46'' \text{ E}$; UL $22^{\circ}17'48'' \text{ S} / 12^{\circ}58'58'' \text{ E}$; UR $22^{\circ}34'06'' \text{ S} / 14^{\circ}51'03'' \text{ E}$.
12. LANDSAT-TM-Szene 179-075 vom 30.06.1993 (LANDSAT 5), Vollszenen-Datensatz aller 7 Kanäle auf 3 CCT; systematisch geokodiert (Korrekturniveau 5); Eck-Koordinaten: OL $20^{\circ}45'37'' \text{ S} / 14^{\circ}49'10'' \text{ E}$; OR $21^{\circ}01'44'' \text{ S} / 16^{\circ}39'53'' \text{ E}$; UL $22^{\circ}17'33'' \text{ S} / 14^{\circ}33'17'' \text{ E}$; UR $22^{\circ}33'48'' \text{ S} / 16^{\circ}25'10'' \text{ E}$.
13. LANDSAT-TM-Szene 180-075 vom 21.06.1993 (LANDSAT 5), Vollszenen-Hardcopy der Kanäle 3-5-7 (RGB) als hochauflösende *Fire*-Ausgabe der Gesellschaft für Angewandte Fernerkundung (GAF, München) auf Ciba-Chrome[®]-Film (Koordinaten s. Bild 11).
14. LANDSAT-TM-Szene 178-075 vom 14.01.1987 (LANDSAT 5), Vollszenen-Datensatz aller 7 Kanäle auf CD-rom; systematisch geokodiert; Eck-Koordinaten: OL $20^{\circ}47'32'' \text{ S} / 16^{\circ}27'52'' \text{ E}$; OR $21^{\circ}02'48'' \text{ S} / 18^{\circ}13'21'' \text{ E}$; UL $22^{\circ}16'50'' \text{ S} / 16^{\circ}06'08'' \text{ E}$; UR $22^{\circ}32'15'' \text{ S} / 17^{\circ}52'41'' \text{ E}$.

Die aufgeführten Satellitenbild-Szenen decken weite Teile der untersuchten Gebiete gut ab und unterstützen die Ausgliederung naturräumlicher Einheiten in hohem Maße. Digitale Datensätze der *Thematic-Mapper*-Bilder ermöglichten eine eigene Bildverarbeitung am Geographischen Institut der Universität Würzburg, der DLR Oberpfaffenhofen (im September 1994, ERDAS-IMAGINE[®]) und dem *Environment and Remote Sensing Institute* (ERSI) Harare (im Juni/Juli 1995, TNTmips[®] durch Dr. A. Lück). Ergänzend wurden die Daten im Herbst 1997 und Frühjahr 1998 am Rechenzentrum der Universität Würzburg (ENVI[®]) bearbeitet. LÜCK (1997a: 32-36) erläutert die eingesetzten Methoden der Bildverarbeitung in der Vorerkundungsphase, die bei der abschließenden Extrapolation in Verbindung mit dem *ground truthing* in ähnlicher Weise zur Anwendung kamen. Methodisch wurden die Verarbeitungsmodi allerdings beschränkt auf die Zusammenstellung verschiedener Kanalkombinationen im erfahrungsgestützten *Try-and-error*-Verfahren vor dem Hintergrund der zu bearbeitenden Fragestellungen. Häufig verwendete Kompositen waren

Echtfarbenbilder (Kanäle 3-2-1, RGB) und die Kombinationen 4-5-1 (RGB), 4-5-3 (RGB) und 4-5-1 (RGB) für Vegetations- und Bodenuntersuchungen sowie die Kompositen 7-5-1 (RGB) und 7-5-3 (RGB) für Relief und Boden. Kanal 6 (thermales Infrarot) wurde nicht verwendet, da zum jeweiligen Bildaufnahmezeitpunkt keine vergleichenden Bodenfeuchte-Untersuchungen im Untersuchungsgebiet stattfanden und diesbezügliche Informationen folglich nicht zuverlässig kalibriert werden können.

Die jeweiligen Farbkompositen wurden durch Reduzierung der Grauwerte und Manipulation der Verteilungshistogramme kontrastverstärkt, um die Informationsdichte zu erhöhen. Eine aufwendigere Hauptkomponenten-Transformation fand aufgrund des geringen zu erwarteten Informationszuwachses zum Zweck der morphologischen Gliederung nicht statt. LÜCK (1997a: 158) zeigt ein Farbkomposit mit Hauptkomponenten (Szene 12) einem Falschfarbenkomposit ohne Hauptkomponenten-Transformation gegenübergestellt. Der Gehalt an kalibrierbarer Information ist bei letzterem für die Fragestellung deutlich höher, da morphologische Einheiten besser abgrenzbar sind.

Allerdings kann nicht ausgeschlossen werden, daß Bilder aus Hauptkomponenten-Kompositen für die funktionale Ökosystemanalyse (Naturräumliche Ordnung) hinsichtlich von Prozessen der Teilsysteme zur Beurteilung einer eventuellen räumlichen Verbreitung heranziehbar sind. Dieser Aspekt wurde im Feld berücksichtigt, jedoch nicht vertiefend untersucht. LÜCK (1997a) hat die Hauptkomponenten-Kompositen zur hydrogeographischen Charakterisierung und Regionalisierung von Einzugsgebietskenngrößen mitverwendet. Eine Verwendbarkeit für andere funktionale aber auch gliedernde Systemanalysen ist also durchaus wahrscheinlich.

Die MSS-Szenen 1-10 (*Multi-spectral Scanner*) aus den Jahren 1980 bis 1986 (LANDSAT 3+4) haben im Gegensatz zu den TM-Szenen 11-14 (reale Pixelgröße ca. 30x30 m, im Thermalkanal 6 ca. 120x120 m) nur eine reale Auflösung von 79x50 m (entspr. 240 Pixel pro km²), sind aber für den großräumigen Überblick aufgrund der geringeren Datenmasse hervorragend geeignet. Zumindest für die gliedernde Voruntersuchung war es kaum von Bedeutung, ob die Satellitendaten durch *multi-spectral scanning* (MSS) oder *thematic mapping* (TM) aufgenommen wurden. Für die weitere Bearbeitung bietet jedoch der TM wegen der höheren Auflösung und vor allem der erweiterten Bandgliederung gegenüber dem MSS - bei genügend Speicherkapazität der Verarbeitungsmodule und entsprechend hochauflösenden Ausgabemedien - deutliche Vorteile. Unter Berücksichtigung von Überlagerungs- und Oaseneffekten bei der Pixelinformation sind bereits Flächen im Hektarbereich in Teilen Namibias eindeutig klassifizierbar.

Die Möglichkeit des temporären Vergleichs zwischen den Szenen mindert das zeitliche Methodenproblem, d. h. das Problem einer eingeschränkten Vergleichbarkeit von Untersuchungszeiträumen in einem hochvariablen Naturraum. Es überlagern sich räumlich zumindest teilweise die Szenen 1, 5, 6 und 9 (Vergleichsregion Mittlerer Ugab) sowie die Szenen 2, 3, 4, 10 und 14 (Region Okahandja-Omatako-Vorsandveld) bei unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten. Die Bilder 7, 8 (Oshana-Region, nur vergleichend eingesetzt), 12 und 13 (Erongo-Omaruru-Swakop-Pränamib) sowie 11 (Brandberg-Pränamib) erlauben keine multitemporalen Vergleichsaussagen. Zumindest für die morphologische Gliederung scheint dies auch nicht nötig, da sich ja der Großraum im Untersuchungszeitrahmen nicht wesentlich verändert.

Weil aus atmosphärischen Gründen nur Winter- und Frühjahrsbilder (Höhepunkt der Trockenzeit) ausgewählt wurden, ist für geoökologische Fragestellungen insgesamt eine hervorragende Vergleichbarkeit gegeben. Allerdings kann, wie bei Szene 11, die erhöhte äolische Aktivität und der atmosphärische Materialtransport die Pixelwerte beträchtlich stören (vgl. Foto bei LÜCK 1997a: 46 + 126). Ohne den Vergleich mit Bodendaten (*ground truthing*) zur Kalibrierung muß der Einsatz von Satellitendaten jedoch als wenig erkenntnisfördernd angesehen werden.

2.2.2.3 Luftbilder

Neben Karten- und Satellitenbildinterpretation kommt der Analyse von Senkrecht- und Schrägluftbildern für die naturräumliche Grobgliederung in den Vorarbeiten eine enorme Bedeutung zu, da anders als bei Satellitenszenen, eine Maßstabsnähe zum Arbeitsmaßstab 1:50.000 besteht. Besonders für die stereoskopische Reliefanalyse sowie die visuelle Beurteilung von Boden- und Vegetationsausstattung wurden über 300 Senkrechtluftbilder aus mehreren Befliegungen der Untersuchungsgebiete ausgewertet.

Die verfügbaren Senkrechtluftbilder waren sämtlich panchromatische Graustufenabzüge des *Directorate Surveys and Mapping*, Mowbray/Südafrika von Befliegungen aus den Jahren 1974 bis 1988 im Maßstab von etwa 1:50.000 bis 1:160.000. Für einige Detailgebiete wurden Vergrößerungen im Maßstab 1:25.000 angefertigt. Sie dienen als Übersicht im Feld und zusammen mit den topographischen Karten als Kartiergrundlage. Daneben wurden Halbton-Laserfotokopien zu größeren Luftbildplänen zusammengefügt. Unterstützend zur Luftbildinterpretation kam eine vereinfachte Klassifikationsmethodik nach VAN GILS et al. (1991) zur Anwendung.

Zusätzlich zu den älteren südafrikanischen Senkrechtaufnahmen mit Reihenmeßkammern wurden eigene Schrägluftbilder angefertigt. Von enormem Vorteil war die Tatsache, daß der Windhoek

International Airport inmitten des Untersuchungsgebiets liegt. So konnte der östliche Teil des Untersuchungsgebiets bei insgesamt 18 An- und Abflügen in Richtung Johannesburg aus der Luft observiert werden. Dabei wurden während des gesamten Untersuchungszeitraums mehrere hundert Dokumentationsfotos geschossen. Außerdem erfolgte am 23.07.1994 im Rahmen der Vorerkundung eine achtstündige Überblicksbelegung des kompletten Untersuchungsgebiets Zentral-Namibia auf der Route Gobabis - Sandveld - nördliches Neudammer Hochland - Ombotzu - Omaruru - Erongo - Hentiesbaai - Swakopmund - Rössing - Khomas-Hochland - Windhoek - südliches Neudammer Hochland - Gobabis mit knapp 500 Einzelaufnahmen aus dem Gesamttransekt (total ca. 800 farbige Schrägluftbilder). So konnte bereits bei den Vorarbeiten ein genauer Einblick in die geomorphologische Ausstattung der zu untersuchenden Landschaften gewonnen werden.

2.2.3 Erarbeitung des geomorphologisch-landschaftsgeschichtlichen Überblicks

Gemäß der in der Einleitung entwickelten Zielsetzung einer geoökologisch orientierten Geomorphologie, war es notwendig, einen landschaftsgeschichtlichen Überblick zu gewinnen, um zum einen Geländeoberflächen mit ihrer pedologischen Ausstattung zuverlässig zeitlich einordnen zu können und damit dynamische Rückschlüsse zu begründen und zum anderen die lithologischen Standorteigenschaften zu erarbeiten. Zwar ist für Namibia reichlich geomorphologische und klimageschichtliche Literatur verfügbar, aber bei deren Durchsicht wurde ja eine Anzahl z. T. widersprüchlicher oder mit eigenen Beobachtungen nicht in Einklang zu bringenden Angaben entdeckt (s. Einleitung). Deshalb war in Teilen eine Neuinterpretation der in Publikationen dokumentierten relevanten Fakten und Analyseergebnisse zusammen mit eigenen Aufnahmen unumgänglich. Diese Neuinterpretation ist also in keinem Fall als Zweifel an der wertungsfreien Einzelbeobachtung anzusehen, sondern als Ordnungsversuch unter Einbezug zahlreicher klima- und reliefhistorisch relevanter Teildisziplinen. Bis zur endgültigen Klärung der Reliefgeschichte Namibias gilt der in Kapitel 7 vorgestellte und begründete Versuch als subjektiv-indiziengestützte Annahme, gleichberechtigt gegenüber ähnlichen und unähnlichen indiziengestützten Interpretationen.

Für die landschaftsgeschichtliche Gliederung werden die in der Literatur bekannten ozeanisch-sedimentlogischen Befunde zur Klimaentwicklung im Endtertiär und Quartär herangezogen und mit den Reliefgenerationen der Escarpment-Vorlandsedimente und Terrassenkörpern der westwärts entwässernden Riviere verglichen. Dafür erfolgten sedimentstratigraphische Aufnahmen bzw. die Begehung bereits literaturbekannter Lokalitäten, unterstützt durch geoarchäologische und paläontologische Indizien. Für die Arbeitsmethodik wurden Werke wie LESER (1977) und

GOUDIE (1981) herangezogen, wobei Profilaufnahmen und Profileinmessungen (z. B. Schichtung, Neigung, Substratstruktur, Klasten- und Matrixlithologie, Verkalkung etc.) den Hauptteil der eigenen Untersuchungen einnahmen. Neben den Terrassen- und Sedimentkörpern wurde der Verwitterungszustand der Abtragungsgebiete und Verkarstungsphasen untersucht. Dafür wurden auch einige Höhlen begangen (z. B. Uisib-Grotte, Märchenhöhle, Münsterland-Höhle, Albrechtshöhle auf Farm Okongue, Arnhem-Höhle etc.). Des Weiteren wurden allgemeine Hangneigung, Exposition, Wölbung, Relieftyp und Mikrorelief ebenso aufgenommen wie Landnutzung und eventuelle Artefaktvorkommen *in situ* und als möglicherweise gestörte Oberflächenvorkommen.

2.3 Pedologische Feld- und Laborarbeiten

2.3.1 Bodenkundliche Aufnahme

Den zweiten Teil der Arbeiten nach der geomorphologischen Aufnahme umfaßte die möglichst detaillierte bodenkundliche Aufnahme von geochronologisch differenzierten Reliefeinheiten, um Erkenntnisse zum Boden-Relief-Zusammenhang zu erlangen. Sie wurde mit Hilfe eigens konzipierter Formblätter (Anhang A 1) auf Grundlage der FAO-Richtlinien (FAO 1990) und der AG BODENKUNDE (1982, 1994) durchgeführt. Es wurden die Horizontbeschreibungen der AG BODENKUNDE (1994: 82ff) verwendet und für die Verhältnisse in Namibia erweitert (Matrix siehe Anhang A 3). Beurteilt und bewertet wurden Aufnahme- und Analyseergebnisse nach den Richtlinien für tropische und subtropische Böden bei LANDON (1991). Die Lokalisierung der Einzelstandorte (Aufschlüsse, Schurf- und Bohrstellen) erfolgte mit Hilfe von Karten, Luftbildern, bei Gelegenheit auch mit einem Höhenmesser und einem GARMIN®-75-GPS (*Global Positioning System*). Für eine zweiwöchige Feldperiode (August 1994) im westlichen Teil des Untersuchungsgebiets stand ein leistungsfähiges ENSIGN®-GPS zur Verfügung.

Im einzelnen wurde im Feld untersucht:

1. Generelle Einordnung des Profilstandorts: Morphoposition, Catena-Zusammenhang, Oberflächenkrusten, pelikulare Strukturen (Algen-, Flechten- und andere Organismenkrusten), Verschlämmung, Profilkappung (Erosionszustand)
2. Horizontansprache: Mächtigkeit, Horizontgrenzen, Gefüge, Hohlräume (v. a. Poren, Risse, Röhren), Durchwurzelung (potentieller und effektiver Wurzelraum nach Formationen), ggf. Edaphon, Verbackung, Mobilisierbarkeit (Blasversuch, Schwemmversuch)

3. Bodenfarbe (feucht und trocken) nach MUNSEL (1967), Matrixfarbe, Farbe von Schmitzen, Konkretionen, Verwitterungsrinden, Toncutanen etc.
4. Schätzung des Gehalts an CaCO_3 durch Schaumreaktion des Feinbodens mit zehnpromzentiger HCl (Salzsäuretest) nach AG BODENKUNDE (1994: 110). Unterscheidung von Carbonatkrusten in Calcrete, Dolocrete bzw. Gypcrete (Zerhämmern und Leckversuch).
5. Einfacher Schlämmversuch an kompakten Probenstücken (ca. 100g, nicht bei Sandböden): zehnminütige subaquatische Aufschlammung im Becherglas zur Beurteilung des Kolloidzerfalls. Mikroskopische Analyse des Schlämmrückstands mit Mikrometerlupe (in Einzelfällen später unter dem Mikroskop) nach Dekantierung und Lufttrocknung.
6. Vereinfachte Infiltrationsversuche: Zur Beurteilung der fluvialen Erosionsanfälligkeit sind Erkenntnisse über das Infiltrationsvermögen der Böden notwendig. Aufgrund logistischer Probleme (hoher Wasserverbrauch bei Sandböden, drei bis fünf Stunden kontinuierliche Meßzeit) konnte nur an wenigen Topoi eine korrekte Basisinfiltrationsrate ermittelt werden (durch Einsatz eines EIJKELKAMP®-Doppelring-Infiltrometers nach LANDON 1991: 59ff). Meist war es jedoch ausreichend, durch einfache Bewässerungsversuche zusammen mit der Abschätzung der Kf-Wertstufe (s. u.) den Grad von horizontaler und vertikaler Dynamik zuverlässig zu beurteilen. Im Zusammenhang mit den pedologischen Standortaufnahmen und -analysen wird deren Fehlerquelle nicht höher eingeschätzt als bei bloßen Infiltrationsmessungen. Die einzelnen Bewässerungsversuche erfolgten standortnah (bei der Profilgrube oder -bohrung des *locus typicus*) mindestens zweimalig auf vier abgesteckten Grundflächen von je 50x50 cm (1/4 m²) auf trockenem Boden (keine Niederschläge in den letzten drei Monaten). Zur Simulation unterschiedlich realistischer Niederschlagsereignisse wurden die Testflächen mit einer gröberen und einer feineren Tropfengröße jeweils genau 30 Sekunden lang aus Kannen beregnet. Nach Abschluß der Beregnung wurde die Zeit bis zur vollständigen Infiltration der Regenmenge gemessen und zur Messung der Infiltrationstiefe (5 Minuten nach Beregnungsbeginn) die Mitte der Testfläche so weit wie möglich aufgegraben. An schwachen Hanglagen wurde ablaufendes Wasser durch zwei Plastikrinnen weitgehend aufgefangen und in Container geleitet. In die Beurteilung der Erodierbarkeit des Bodens floß also die relative Fähigkeit des Bodens, eine bestimmte Niederschlagsmenge in einer bestimmten Zeit aufzunehmen und in möglichst große Tiefen abzuleiten ein. Das Ergebnis gilt nur für den jeweiligen Topos mit allen physikalischen und chemischen Eigenschaften (z. B. Hygroskopie, Krusten, Verschlammungen). Es dient vor allem der relativen Beurteilungen in catenarem Zusammenhang. Aufgrund der zu geringen Anzahl der

Versuche konnte kein allgemeingültiger Index für die jeweilige Bodenart ermittelt werden (Formblatt: siehe Anhang).

7. Messung der Oberflächenstrukturverteilung: Ein wichtiger morphodynamischer Faktor ist die Struktur der Bodenoberfläche als Kontaktbereich Pedosphäre-Atmosphäre-Biosphäre. Deshalb wurden häufig vereinfachte Schätzverfahren zur Dichte und Verteilung von Oberflächenphänomenen angewandt. Zur Anwendung kam das Flächentransektverfahren nach CHRISTIAN et al. (1996), das für die Vegetationsbestimmung entwickelt wurde, mit dem aber auch Oberflächenstrukturen zuverlässig geschätzt werden können. Die Strukturen wurden vorher kategorisiert in Festgesteinsoberflächen, Geröll- und Schotterpflaster sowie Feinmaterialoberflächen. Die Messung selbst erfolgte nach einer Zählmethode von TID-MARSH & HAVENGA (1955), wobei allerdings kein Zählrad, sondern ein Zählstock verwendet wurde. Ermittelt wurde das Verhältnis der Kategorien untereinander auf einem Flächentranssekt mit mindestens 250 Zählpunkten. Die graphische Darstellung erfolgt nach einem Verhältnisdiagramm (s. Abb. 1).

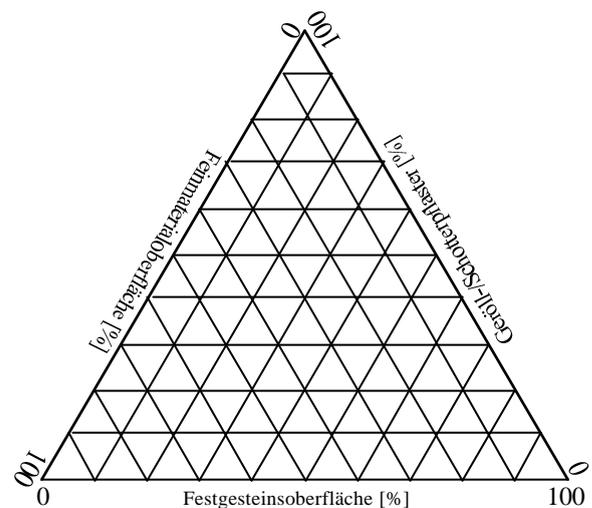


Abbildung 1: Oberflächenstruktur-Diagramm

2.3.2 Laboranalysen

Die Feldaufnahme und Beprobung der Horizonte folgte den methodischen Richtlinien von STOCKING (1983), LANDON (1991), der FAO (1990), der AG BODENKUNDE (1982, 1994) und SCHLICHTING et al. (1995). Von den einzelnen Horizonten wurden Bodenproben für die Laboranalyse entnommen. Diese umfaßte:

1. Trockensiebung der Bodenproben durch ein 2-mm-Sieb zur Trennung von Feinboden und Skelettanteil; Klassifikation nach AG BODENKUNDE (1994: 141), s. Abb. 2.
2. Naßsiebung der Fraktionen 0,063-2 mm (Sand), Pipettanalyse der Fraktionen <0,063 mm (Schluff- und Tonsedimentation nach KÖHN; Beschreibung bei HARTGE & HORN 1989 und SCHLICHTING et al. 1995) nach Dispergierung (Auflösung von Verbackungen und Kolloiden). Für einige Proben stand keine Pipettiermethode zur Verfügung. Sie wurden mit einer

Hydrometernmethode (nach ASTM 1985 und GEE & BAUDER 1986: 404-408) nur in Sand-, Schluff- und Tonfraktion getrennt (dann allerdings nach FAO-Einteilung, vgl. FAO 1990: 44f). Bei glimmerreichen Proben kann die Verlässlichkeit der Ergebnisse etwas schwanken, da Glimmerplättchen ein leicht differierendes Sedimentationsverhalten aufweisen.

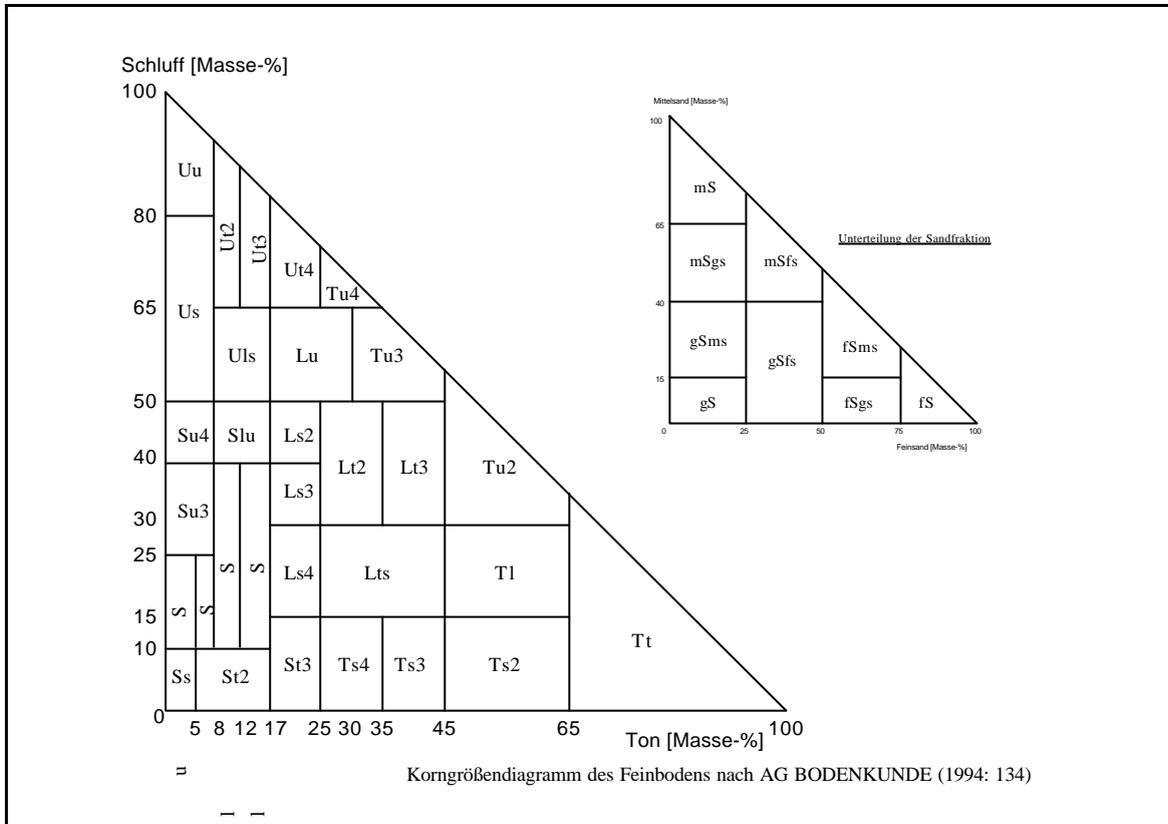


Abbildung 2: Verwendete Korngrößendiagramme und Bodenartbezeichnungen

Bei der Hydrometernmethode wird eine fünfprozentige Natrium-Hexametaphosphat-Lösung (Na-HMP) als Dispersionsmittel verwendet und die Bodenlösung eine Stunde elektrisch gerührt. Die Methode wurde verschiedentlich auch mit destilliertem Wasser ohne Rühren durchgeführt und zu den Ergebnissen mit Dispersionsmittel in Bezug gesetzt. Nach HEAD (1994, Vol. II: 143) kann so nach folgender Formel der relative Anteil an dispergierbaren Kolloiden im Boden errechnet werden:

$$\text{Dispersionsanteil [\%]} = \frac{\% \text{ Tonanteil [mit Dispersionsmittel]}}{\% \text{ Tonanteil [ohne Dispersionsmittel]}} \times 100$$

3. Mikroskopische Analyse der Sandfraktion(en): Kornform, Mattierung, Verwitterungshäutchen etc.
4. Gravimetrische Bestimmung des aktuellen Wassergehalts im ungesättigten Boden: Gewichtsverlust der Probe infolge Trocknung bei 105°C. Methode wurde nur an Proben durchgeführt, die noch

am Tag der Probennahme gewogen werden konnten, da ansonsten in Namibia die hohen Verdunstungsverluste die Ergebnisse zu sehr verfälschen (trotz luftdichter Verpackung am Probenort und kühler Lagerung). Genauigkeitsschwankungen von 10% des Meßwertes kommen vermutlich vor.

5. Messung des pH-Werts des Bodens in 1n-Kaliumchlorid-Lösung ($1 \text{ mol dm}^{-3} \text{ KCl}$) und/ oder in H_2O mit Glas-Calomel-Elektrodensystem (Messung des Grenzflächenpotentials, Verhältnis Boden-Suspendierlösung 1:2,5) an Böden in feldfrischem Zustand. Berechnung des Gehalts an aktiven H^+ -Ionen nach der Formel: $\text{cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1} [\text{H}^+] = 250 \cdot 10^{-\text{pH}}$ (SCHLICHTING et al. 1995: 312)
6. Messung des Gesamtpotentials an wasserlöslichen Kationen im Sättigungsextrakt (1:2,5 bei 25°C Labortemperatur) der Bodenprobe mit Hilfe eines Konduktometers (SSSSA 1990: Part 4). Beurteilung des Versalzungsstatus nach LANDON (1991) und FAO (1979).
7. Bestimmung der Kationenaustauschkapazität (KAK) und der Anteile austauschbarer Kationen des Feinbodens (gemäß SSSSA 1990: Part 12) durch Eintausch mit Ammoniumazetat ($1 \text{ mol dm}^{-3} \text{ NH}_4^+\text{CH}_3\text{COO}^-$ bei pH 7); Rücktausch mit Mg^{2+} -Ionen (potentielle Kationenaustauschkapazität KAK_{pot}) bzw. anderen Ionen (Ca^{2+} , K^+ , Na^+); Bestimmung des ausgetauschten NH_4^+ durch Titration mit Schwefelsäure ($0,05 \text{ mol dm}^{-3} \text{ H}_2\text{SO}_4$); Messung mit Atomabsorptions-Spektrometer (AAS) bei 285,2 nm (Mg^{2+}), 422,7 nm (Ca^{2+}), 589,0 bzw. 589,6 nm (Na^+) und 766,5 nm (K^+). Die Vorgehensweise im Detail ist bei STOCKING (1983: 60ff) beschrieben.
8. Abschätzung der effektiven Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) nach SCHLICHTING et al. (1995: 42f) unter Einbezug von Humus- und Skelettgehalt.
9. Berechnung des Basensättigungsgrads (prozentualer Anteil der basischen Kationen an der KAK_{pot}) nach Tabelle bei SCHLICHTING et al. (1995: 43) und der Summe der austauschbar gebundenen basischen Kationen (S-Wert) nach der Formel:

$$\text{S-Wert} [\text{cmol}_c/\text{kg}] = \frac{\text{KAK}_{\text{pot}} \cdot \text{BS}}{100}$$
10. Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphors (Phosphat) nach der Methode von OLSEN & DEAN (1965): Extraktion mit $0,5 \text{ mol dm}^{-3}$ Natriumbicarbonat (pH 8,5), Spektrophotometrie bei 882 nm im AAS.
11. Bestimmung des Gehalts an organischem Kohlenstoff nach WALKLEY-BLACK (vgl. NELSON & SOMMERS 1982): Oxidation des organischen Kohlenstoffs in der Bodenprobe mit einem erhitzten Gemisch von Schwefelsäure und Kaliumdichromat, Titration des über-

schüssigen Dichromats mit $0,5 \text{ mol dm}^{-3}$ Eisen-II-Ammoniumsulfat-Hexahydrat und Messung als Äquivalent zum C_{org} -Gehalt. Die Methode ist als relativ sicher anzusehen, da Verfälschungen durch andere Kohlenstoffquellen in Namibia kaum vorkommen. Bei Böden mit hohem Aschegehalt (z. B. durch Brennen) ist die Methode nur unter Vorbehalt anwendbar (SCHLICHTING et al. 1995: 159ff: „nasse Veraschung“).

12. Bestimmung des Humusgehalts (Gesamtanteil organischen Materials) durch Kalkulation nach SPRINGER & KLEE (vgl. LANDON 1991: 114 und AG BODENKUNDE 1994: 104):

$$\text{org. Mat. [\%]} = C_{\text{org}} [\%] \cdot 1,72$$

Bei Proben ohne Bestimmung von C_{org} erfolgte verschiedentlich eine Kalkulation durch gravimetrische Bestimmung des Glühverlusts nach STOCKING (1983: 57ff).

13. Bestimmung des Stickstoffgehalts nach KJELDAHL (H_2SO_4 -Aufschluß) nach SCHLICHTING et al. (1995: 165f + 228ff) und Berechnung des C/N-Verhältnisses als Maß für die Beurteilung der Rohhumus-Mineralisation.

Zur Beurteilung ökosystemarer Zusammenhänge wurden an diversen Proben einige ökologische Parameter des Solums ermittelt. Hier wurde v. a. auf Feldschätzverfahren, wie sie z. B. AG BODENKUNDE (1982, 1994) anbietet, zurückgegriffen und unter Zuhilfenahme bodenphysikalischer Analysedaten die nachfolgenden Kennwerte errechnet. Sie sind stark lokalitätsbezogen und im Zusammenhang mit dem beobachteten Makrogefüge zu betrachten (vgl. RENGER 1971).

1. Bestimmung der effektiven Lagerungsdichte ($\rho_b [\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$) nach dem tabellarischen Schlüssel bei AG BODENKUNDE (1994: 126) unter Verwendung der Methodiken von SCHLICHTING et al. (1995: 36f) und HARTGE & HORN (1989: 48ff). Nur in einigen Fällen konnten ungestörte Proben mit Hilfe eines Stechzylinders (*Core sampler*) gewonnen werden, da insbesondere bei den schwachbindigen, tonarmen Sandböden Namibias Aufnahme und ungestörter Transport sehr erschwert waren. Bei solchen edaphisch trockenen, humus- und tonarmen Böden genügte auch die einfache Gewichtsbestimmung der durch einen Stechzylinder oder ein Stechkästchen (100 cm^3) gewonnenen ungestörten Probe nach Trocknung. Soweit kein Materialverlust auftritt, kann eine solche Probe auch im Nachhinein, z. B. beim Transport gestört werden, ohne daß das Volumen-Gewichtsverhältnis verfälscht wird.

2. Da die festen Bodenbestandteile solcher Sand- aber auch vieler skelettreicher Rohböden im wesentlichen aus Quarz (Dichte: $\rho_Q = 2,65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) bestehen, kann durch einfache Subtraktion der effektiven Lagerungsdichte (s. 1.) von der Dichte der Festbestandteile das Gesamtporenvolumen (GPV als Prozentwert) annähernd ermittelt werden (vgl. SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1992: 146f):

$$\text{GPV} = 1 - \frac{n_b}{\rho_Q} \quad (\text{Porosität})$$
3. Berechnung der Trockenrohdichte: Zwischen effektiver Lagerungsdichte und der Trockenrohdichte (ρ_t) besteht ein lineares Verhältnis (AG BODENKUNDE 1994: 127): T entspricht dem Tongehalt in %:

$$\rho_t = \rho_b - 0,009 \cdot T$$
4. Abschätzung von Feldkapazität (FK, Speicherfeuchte), nutzbarer Feldkapazität (nFK) und Luftkapazität (LK) in Abhängigkeit von der ermittelten effektiven Lagerungsdichte (ρ_b) und der Bodenart unter Zuhilfenahme der Tabellen in AG BODENKUNDE (1994: 296-303). Als nFK wird der prozentuale Wassergehalt im Boden bezeichnet, der einem pF-Wert [$\lg \text{ hPa}$] von 1,8-4,2 (Saugspannung) widersteht, also vom Boden festgehalten wird (Adsorptions-, Kapillarwasser etc.) und der Vegetation zur Verfügung steht.
5. Berechnung des nicht nutzbaren Bodenwasseranteils an der Feldkapazität (Totwasser, TW, bzw. Permanenter Welkepunkt PWP bei pF 4,2) nach der Formel:

$$\text{TW} = \text{FK} - \text{nFK}$$
6. Berechnung des Gesamtporenvolumens (GPV) für Nicht-Sandböden mit heterogener Textur (vgl. Punkt 2.) nach der Formel:

$$\text{GPV} = \text{LK} + \text{FK}$$
7. Berechnung des effektiven Wurzelraums nach SCHLICHTING et al. (1995: 57f) unter Einbezug der aktuellen Durchwurzelung.
8. Beurteilung der Durchwurzelbarkeit aus dem Eindringwiderstand (trocken und feucht) nach SCHLICHTING et al. (1995: 37 + 58). Klassifikation nach einfachem Stechversuch.
9. Berechnung der nutzbaren Feldkapazität des effektiven Wurzelraums (nFKWe) aus 4. und 7. bei grundwasserfernen Böden oder Substraten, die tiefgründiger als der effektive Wurzelraum sind (z. B. Arenosols, Regosols, mächtigere Kolluvisols etc.)
10. Ermittlung der Wasserdurchlässigkeit (bei Wassersättigung) in Abhängigkeit von Trockenrohdichte oder effektiver Lagerungsdichte (Kf-Wertstufen nach AG BODENKUNDE 1994: 305)
11. Bei grundwassernahen Böden, z. B. Rivieralluvionen oder Terrassenböden in Riviertälern Abschätzung der kapillaren Aufstiegsrate bis zur Untergrenze des effektiven Wurzelraums nach AG BODENKUNDE (1994: 308ff).

Welche der hier genannten Analysen an der jeweiligen Bodenprobe durchgeführt wurde richtete sich nach der konkreten Fragestellung im Feld. Generell wurde aber versucht, ein möglichst breites Spektrum anzuwenden, um eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen. So konnte die Grundlage einer Bodenklassifikation im Untersuchungsgebiet erarbeitet werden. Der wichtigste Teil der Analyseergebnisse ist tabellarisch im Anhang wiedergegeben. Insgesamt wurden seit 1993 166 Profile detailliert aufgenommen. Davon entfallen 104 auf das zentrale Hochland (Khomas Hochland, Windhoeker Becken, Neudammer Hochland), 40 auf Namib und Randstufenlücke sowie 22 auf den Kalahari-Bereich. Dazu kommen 49 Profile, an denen keine über Feldmethoden hinausgehende Untersuchungen durchgeführt wurden.

Diese Profile bilden zusammen mit den bereits von GANSSEN (1963) und SCHOLZ (1993, 1968a/b/c/d, 1972) publizierten Daten die pedologische Basis der reliefgenetischen Ausarbeitungen. Berücksichtigt wurden neben der ansonsten spärlichen bodenbezogenen Literatur Namibias, auch die jüngeren Arbeiten von VERSTER (1980) und BUCH et al. (1993, unpubl.) und BEUGLER-BELL (1995) aus der nördlich an die untersuchten Gebiete angrenzenden Etosha-Region.

2.4 Aufbau der Arbeit

Vorliegende Arbeit gliedert sich in mehrere Hauptkapitel. Zunächst wird auf die rezente klimatisch-ökologische Ausstattung eingegangen und auf Ökosystemzusammenhänge in ihrer historischen und aktuellen Dimension hingewiesen (Kapitel 3). Es ist gegliedert in die Aspekte Klima und dessen Parameter (3.2, 3.3, 3.4), Modellentwicklung (3.5) und Vegetation (3.6). Dies wird deswegen als wichtig angesehen, weil vermutet wird, daß im Gesamtzusammenhang Morpho-Ökosystem wechselseitige Bezüge herzustellen sind, die evtl. paläo-geoökologische Hypothesen stützen. Darüber hinaus wird hier ein während der Feldarbeiten „empirisch“ konstruiertes Arbeitsmodell zur Deutung der ökologischen und morphologischen Befunde und Beobachtungen methodisch entwickelt.

In Kapitel 4 folgt eine geomorphologische Beschreibung des gesamten West-Ost-Transekts in Zentral-Namibia. Dabei werden Probleme und Hypothesen herausgearbeitet und auf Dissonanzen in der publizierten Literatur hingewiesen. Das Kapitel umfaßt auch den beschreibenden Teil der eigenen Befunde zum Formenschatz, wie er im Untersuchungszeitraum von 1993 bis 1997 (mit Vor- und Nachuntersuchungen von 1989-1999) vorgefunden wurde. Dabei wurde unterschieden zwischen dem interfluvialen (Flächen-) Relief und dem fluvialen Relief. Aus Gründen des Verständnis-

zusammenhangs wurden in einigen Unterkapiteln (insbesondere beim Rumpfflächenformenschatz, Kap. 4.2), z. B. bei den Teilkapiteln über Gipskrusten (4.2.1.5) oder Verwitterung (4.2.1.7), über die reine beschreibende Darstellung hinausgegangen und auch morphogenetische Aspekte berücksichtigt. Gleiches gilt für das Kapitel über Kalkkrusten (Kapitel 5), dem für die Betrachtung der Reliefgenerationen eine hohe Bedeutung zukommt.

Kapitel 4 wird gemäß des methodischen Ansatzes in die Transektabschnitte Marin und Litoral (4.1), Rumpfflächen der Prä-Namib und Namib (4.2), Escarpment und Khomas-Hochland (4.3), Windhoeker Becken (4.4), Neudammer Hochland (4.5) und Kalahari (4.6) gegliedert. Allgemeinere Aspekte der Flächenbildung und der Flächenanordnung im Untersuchungsraum werden im ersten Rumpfflächenkapitel (4.2) behandelt.

Nach den Ausführungen zur Kalkkrustenbildung (Kapitel 5) wird in Kapitel 6 auf den Stand der geoarchäologischen Forschung eingegangen, da im Rahmen der eigenen Feldarbeiten solche Argumente unterstützend herangezogen wurden. Hier wurde in paläontologische (osteoarchäologische) und siedlungsgeschichtliche Befunde unterschieden. Insbesondere bei der quartären Morphochronologie spielen aus Mangel an absolut datierbarem Material an verschiedenen Typlokalitäten geoarchäologische Nachweise eine wichtige Rolle. Auch für einige Krustengenerationen stellen sie den einzigen konkreten Altershinweis dar.

Kapitel 7 umfaßt die geochronologisch-morphogenetische Deutung der vor allem in Kapitel 4 dargelegten Feldbefunde unter Neuinterpretation der erläuterten Befunde aus der Literatur. Zunächst wird auf die geologisch-petrographisch-tektonische Ausstattung des Untersuchungsraums eingegangen, die für die Morphogenese wichtige Primärdeterminanten stellt (Kapitel 7.1). In diesem Kapitel finden sich die Angaben zur Geologie des Untersuchungsraums als Teil der älteren Landschaftsgenese. Aufbauend auf dieser Ausstattung wird die historische Entwicklung in morphochronologischer Dimension von alt nach jung unter Einbezug der tektonischen Ereignisse (Kapitel 7.3) erläutert.