

**BIOMASSEINVENTUR AUF DER BASIS VON TERRESTRISCHEN
AUFNAHMEN UND LUFTBILD-STICHPROBEN - DARGESTELLT IN
EINEM TANSANISCHEN MIOMBO-WALDGEBIET**

**TITLE: Bio-mass inventory on the basis
of terrestrial surveys and aerial
photographs - Illustrated on the
example of a Tanzanian Miombo
Woodland.**

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades
der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie
der Georg-August-Universität Göttingen

Vorgelegt von
Yusufu H.M.B. Malende
geboren in Ifakara/Tansania

Göttingen, im Mai 1997

12/2/97

20 APR 2001

Malende, Yusufu H.M.B.:

Biomasseinventur auf der Basis von terrestrischen Aufnahmen und Luftbild-Stichproben - dargestellt in einem tansanischen Miombo-Waldgebiet / vorgelegt von Yusufu H.M.B. Malende.- Göttingen : Cuvillier, 1997

Zugl.: Göttingen, Univ., Diss., 1997

ISBN 3-89588-921-0

D 7

1. Berichterstatter:	Prof. Dr. A. Akça
2. Berichterstatter:	Prof. Dr. J. Saborowski
Tag der mündlichen Prüfung:	04. Juli 1997

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 1997

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 1997

Gedruckt auf säurefreiem Papier

ISBN 3-89588-921-0

VORWORT

Die Vorliegende Arbeit wurde unter Anleitung von Herrn Professor Dr. Alparslan Akça am Institut für Forsteinrichtung und Ertragskunde der Universität Göttingen durchgeführt. Ich danke ihm hiermit für seine vielen Anregungen, Hinweise und Gespräche bei der Feldarbeit und der Anfertigung dieser Arbeit.

Meinen herzlichen Dank auch an Professor Dr. Joachim Saborowski für beratende Gespräche sowie für Hinweise zur Bearbeitung mathematisch-statistischer Probleme.

Dem Institutsleiter Herrn Professor Dr. Klaus von Gadow möchte ich für sein Entgegenkommen danken, besonders für sein menschliches Verständnis, daß mich während meines Aufenthalts in Göttingen moralisch unterstützte.

Dem DAAD möchte ich meinen Dank für die finanzielle Unterstützung während meines Studiums in der Bundesrepublik Deutschland aussprechen.

Für die stets hilfreiche Unterstützung, vor allem bei der Auswertung des umfangreichen Luftbildmaterials und für zahlreiche wichtige Hinweise, bei meiner Einarbeitung in Arc/Info bedanke ich mich besonders bei Herrn Diplom-Forstwirt Christoph Feldkötter.

Mein besonders herzlicher Dank gilt Herrn Forstassessor Klaus Halbritter für seine verständnisvolle Hilfe, für die kritische Durchsicht des Manuskript und für die Korrektur des Textes in sprachlicher Hinsicht.

Ebenso möchte ich allen Mitarbeitern des Instituts, die mir in vielerlei Weise geholfen haben, meinen Dank aussprechen.

Mein Dank gilt auch Familie Burba, Familie Achilles, Frau Cellina Krannich und Frau Heike Steckel. Sie brachten mir immer menschliches Verständnis entgegen und gewährten moralische Unterstützung, wann immer es nötig war.

Nicht zuletzt möchte ich meiner Frau Salome Chamla und meinen Kinder für ihr Verständnis und ihre Geduld während der mehrjährigen Trennung danken.

Diese Arbeit widme ich meiner Mutter, Frau Salima Hassan die am 09. Mai 1993 starb, zu früh, um den Abschluß der Dissertation mitzuerleben.

Göttingen, im Juli 1997

Yusufu Malende

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung, Problemstellung und Zielsetzung	1
2 Bisherige Untersuchungen	7
2.1 Terrestrische Stichprobenerhebungen für Biomasseschätzungen	7
2.2 Biomasseschätzung aus Luftbildern	8
2.3 Direkte Messungen zur Ermittlung der Holzbiomasse	9
2.4 Die Schätzung der Bestandesbiomasse	10
2.5 Modelle und Variablen zur Biomasseschätzung im Miombo-Wald	12
2.6 Waldbiomasseinventuren	13
2.7 Der Einsatz von Fernerkundung bei Forstinventuren	13
2.8 Der Einsatz von Luftbildern in Tansania	15
2.9 Baum- und Bestandesmessungen in Luftbildern	16
2.91 Die Messung von Baum- und Bestandeshöhen	16
2.92 Die Ermittlung der Baumzahl	17
2.93 Die Ermittlung des Kronenschlußgrades	18
2.10 Geographische Informationssysteme (GIS)	20
2.11. Das geographische Informationssystem ARC/INFO	24
3 Das Untersuchungsgebiet	28
3.1 Forstwirtschaft in Tansania	28
3.2 Wälder im Untersuchungsgebiet	29
3.3 Lage des Untersuchungsgebietes	30
3.4 Geologie und Böden	31
3.5 Klima	32
4 Material und Methoden	34
4.1 Material und Instrumente	34
4.2 Analytisches photogrammetrisches Auswertesystem KERN DSR 11-18, und Stereoskop WILD Aviopret	35
4.3 Paßpunktbeschaffung	37
4.4 Aerotriangulation	38
4.5 Orientierung der Luftbildmodelle im KERN DSR 11-18	42

4.6 Bildinterpretation	43
4.7 Auswahl der Stichprobenpunkte	44
4.8 Baumhöhenmessung im KERN DSR 11-18	46
4.9 Messung des Kronendeckungsgrades und der Stammzahl eines Probekreises	47
4.10 Erstellung des Digitalen Geländemodells (DGM)	48
4.11 Messungen im Gelände	48
4.111 Identifikation der Probeflächenmittelpunkte im Gelände	48
4.112 Messungen in den Probeflächen	49
4.113 Ermittlung des Kronenschlußgrades im Gelände	50
4.114 Biomassemessung der gefällten Baume	51
4.115 Stichprobenahme für die Ofentrocknung	52
4.116 Ofentrocknung und Trockenmasseermittlung	52
4.12 Auswertung	52
4.121 Die Höhenkurve	53
4.122 Regressionsmodell zur Schätzung der frischen und trockenen Biomasse für Einzelbäume	53
4.123 Die Kriterien bei der Auswahl der geeigneten Modelle	55
4.13. Zweiphasige Stichprobe	57
4.131 Allgemeines	57
4.132 Grundlagen der zweiphasigen Stichprobe in Forstinventuren	58
4.133 Zweiphasige Stichprobe mit Regressionsschätzer	59
4.14 Wirtschaftlichkeit der zweiphasige Stichprobe	60
4.15 Modellauswahl für den Regressionsschätzer	61
4.16 Die Biomasseschätzung in den Probekreisen	62
4.17 Die Analyse der Verteilung der Biomasse über das Untersuchungsgebiet in Abhängigkeit von Exposition und Hangneigung	62
5 Ergebnisse	63
5.1 Die Höhenkurve	63
5.2 Regressionsmodelle	64
5.21 Regressionsmodelle zur Schätzung der frischen Biomasse der Einzelbäume	64
5.22 Regressionsmodelle zur Schätzung der trockenen Biomasse der Einzelbäume	67

5.23 Regressionsmodelle zur Biomasseschätzung der Einzelbäume mit der Rückwärts-Eliminierungsmethode	69
5.231 Regressionsmodelle mit Rückwärts-Eliminierungsmethode zur Schätzung der trockenen Biomasse der Einzelbäume	71
5.232 Regressionsmodelle mit Rückwärts-Eliminierungsmethode zur Schätzung der frischen Biomasse der Einzelbäume	74
5.3 Modelle mit polynomialen, exponentiellen und potentiellen Gleichungen	74
5.4 Auswahl der optimalen Modelle	78
5.41 Residualanalyse der ausgewählten Modelle	79
5.5 Biomasse funktionen und -tafeln	82
5.51 Lokale Biomassefunktionen und -tafeln	83
5.52 Allgemeine Biomassefunktionen und -tafeln	83
5.6 Zweiphasige Stichprobe	84
5.61 Bestandesparameter im Luftbild und im Gelände	85
5.611 Stammzahl	85
5.612 Kronenschlußgrad	86
5.613 Mittelhöhe	87
5.62 Beziehung zwischen Biomasse und Hilfsgrößen aus dem Luftbild	88
5.63 Regressionsmodelle zur Schätzung von flächenbezogenen Biomassen	89
5.64 Modellauswahl zur Schätzungen von flächenbezogenen Biomassen mit Rückwärts- Eliminierung	91
5.641 Ergebnisse der Modellauswahl für die probekreisbezogene Schätzung der trockenen Biomasse der Astholz, Schft Holz und Baumholz	91
5.642 Ergebnisse der Modellauswahl für die probekreisbezogene Schätzung der frischen Biomasse der Astholz, Schft Holz und Baumholz	95
5.65 Die Residualanalyse der verwendeten Modelle	95
5.66 Flächenbezogene Biomassen	98
5.661 Verteilung der Biomassen pro Hektar nach Durchmesserklassen	100
5.662 Stammzahlverteilung nach Durchmesserklassen	101

5.7 Umrechnungsfaktoren zwischen frischen und trockenen Biomassen	102
5.8 Biomasseverteilung in Abhängigkeit von Exposition und Hangneigung	104
6 Diskussion und Folgerungen	110
6.1 Material	110
6.2 Datenerhebung aus den Luftbildern	110
6.21 Ermittlung der Stammzahl	110
6.22 Ermittlung des Kronenschlußgrades	112
6.23 Ermittlung der Bestandeshöhe	113
6.24 Erstellung von Biomassetafeln	114
6.241 Modellauswahl	114
6.242 Logarithmische Gleichungen	116
6.243 Das Modell für die Schätzung der frischen und trockenen Biomasse des gesamten Baumes	117
6.25 Bestandesbiomasseschätzung	118
6.26 Biomasseverteilung innerhalb einzelner Bäume	119
6.27 Die Verteilung der Biomasse nach Durchmesserklassen im Untersuchungsgebiet: eine Managementproblematik	120
6.28 Verjüngungs- und Nachhaltigkeitsproblematik im Miombo-Wald	121
6.29 Vergleich der hier angewandten Methode mit anderen Methoden zur Biomasseschätzung im Miombo-Wald	122
6.210 Einfluß von Exposition und Hangneigung auf den Biomassevorrat	123
7 Zusammenfassung	125
8 Literaturverzeichnis	129
9 Anhang	143

1 Einführung, Problemstellung und Zielsetzung

Die Bewohner von Entwicklungsländern stellen den größten Teil der Weltbevölkerung dar, von denen ca. 80% unmittelbar in ländlichen Gebieten lebt (HULSCHER 1990). Besonders kennzeichnend für diese Bevölkerung ist der sehr geringe Energieanteil, der ihnen zur Verfügung steht und der hauptsächlich nur zur Deckung der täglichen Grundbedürfnisse, wie z.B. fürs Kochen und Heizen, gebraucht wird. Die Deckung des Bedarfs kann in der Regel nur von nicht kommerziellen Brennmaterialien, in den meisten Fällen ausschließlich durch frei verfügbares Holz, gewährleistet werden. Da Holz mittlerweile zunehmend zu den knappen Gütern zählt, ist in vielen Orten die Brennholzversorgung bereits ein großes Problem und wird es in Zukunft auch bleiben. DE MONTALEMBERT und CLEMENT (1983) schätzten für das Jahr 1980, daß ungefähr 2 Milliarden Menschen direkt von Brennholz abhängig waren. Von diesem Teil der Weltbevölkerung konnten ungefähr 1.16 Milliarden Menschen, also mehr als 50%, ihre Grundbedürfnisse nur durch Übernutzung der verfügbaren Holz-Ressourcen decken. Nach der von der FAO veröffentlichten Karte (FAO 1981) über die Situation der Brennholzversorgung in Entwicklungsländern kann die Lage in diesen Ländern von befriedigender Versorgung bis zu einem krassen Brennstoffmangel variieren. Von einer extremen Mangelsituation, die für ungefähr 96 Million Leute zutrifft, sind besonders die Bewohner der ariden und semiariden Regionen betroffen. Hierzu zählen in Afrika neben dem Bereich südlich der Sahara auch der Osten und Südosten sowie die Berggebiete und Inseln. In Asien liegen die Mangelgebiete vor allem in der Himalaya-Region, und den trockenen Zonen an der pazifischen Küste, während die kritischen Gebiete Lateinamerikas sich besonders in den dichtbevölkerten Gebieten Mittelamerikas und der Karibik befinden. Die Brennholzdefizite in diesen Ländern sind so extrem, daß nicht einmal die Deckung der täglichen Grundbedürfnisse an Energie gewährleistet werden kann.

Bei der von den Vereinten Nationen (UNO) organisierten 'Konferenz über Neue und Erneuerbare Energiequellen', die 1981 in Nairobi stattfand, wurde die große Bedeutung von Brennholz und Holzkohle für die Weltbevölkerung besonders hervorgehoben. In dem durch das 'Program of Action' (UNO 1981) erstellten Rahmenplan wird die Notwendigkeit nationalen Handelns durch die einzelnen Regierungen betont. Seine Durchführung sollte beginnen mit der Inventur neuer und erneuerbarer Ressourcen, um die notwendigen Informationen und Daten als Grundlage für Planungs- und Entscheidungsprozesse für die Bewältigung des globalen Energieproblems

zusammenzutragen. Hierbei wurden die Bereiche Vermessung und Kartierung explizit angesprochen. Für eine Reihe technischer Disziplinen wurden spezifische Maßnahmen empfohlen. Hinsichtlich des Brennholzes und der Holzkohle wurde festgestellt, daß adäquates Management forstlicher Ressourcen zur Deckung des Bedarfes an Energie, Nahrung und Bauholz es erfordern, daß zunächst der voraussichtliche Vorrat und Bedarf herzuleiten und Defizitregionen zu identifizieren sind.

In dem von der FAO 1985 initiierten 'Tropical Forestry Action Plan' (FAO 1985) festgesetzten (fünf) vordringlichen Zielen mit besonderem Handlungsbedarf wird auch dem Thema der nachhaltigen Erzeugung von Brennholz eine besondere Bedeutung zugemessen. Zur Lösung der Krisensituation wird vor allem ein verbessertes Management der vorhandenen Umweltressourcen empfohlen. Vorlage für diese Empfehlung waren die internationalen Foren, die seit 1981 auf die Notwendigkeit eines verbesserten Managements der Rohstoffe hinwiesen. Voraussetzung für ein verbessertes Management sind die Kenntnis wichtiger und ausreichend genauer Informationen über die Ressourcen und ihren Bedarf. Der derzeit noch vorhandene Mangel an zuverlässigen Informationen auf diesem Gebiet ist eine der Hauptursachen, an denen die Durchführung eines verbesserten Managements bisher noch scheitert.

Holz ist die wichtigste Energiequelle in Tansania, die ungefähr 90% des Gesamtenergiebedarfs deckt. Über 90% der in Tansania lebenden Bevölkerung benutzt Holz für Heizung und Kochen. Für die Bewohner ländlicher und periurbaner Räume nimmt Brennholz zur Deckung der Grundbedürfnisse einen ebenso wichtigen Stellenwert ein wie das tägliche Wasser. Nach OPENSHOW (1971) beträgt der Brennholzverbrauch in ländlichen Gebieten Tansanias 0.5 bis 1.8 m³ pro Kopf und Jahr. 97% aller Holz-Produkte werden für thermische Zwecke verwendet (MAKUNDI 1984), weshalb der Forstwirtschaft in Tansania eine große wirtschaftliche Bedeutung zukommt. Bedingt durch die Schwierigkeiten, die Wohlfahrtswirkungen des Waldes zu quantifizieren, fällt der offizielle Anteil der Forstwirtschaft an allen im Land produzierten Gütern und Dienstleistungen mit nur 3% des Bruttosozialprodukts sicherlich zu niedrig aus. Jedoch zählt Brennholz, das wenige Jahrzehnte zuvor reichlich vorhanden war, heute in fast allen Regionen zu den knappen Verbrauchsgütern. Dieser Mangel ist besonders durch die in der Vergangenheit nicht erkannte Notwendigkeit, eine bedarfsgerechte Planung einer nachhaltigen Brennholzproduktion zu organisieren, entstanden. Das Ergebnis dieses Prozesses ist die Übernutzung der natürlichen Wälder, die sich in Form von Entwaldung sowie Umweltzerstörung

äußert (TEMU et al. 1984). Es gibt bis heute keine Anzeichen dafür, daß Holz in Tansania als Energieträger zum Beispiel von Sonne, Wind oder Biogas ersetzt werden könnte, da deren gegenwärtiger Beitrag am Gesamtenergieaufkommen nur unbedeutend ist (KAHAMA 1984). Außerdem erfordert der Einstieg in die Nutzung dieser regenerativen Energiequellen anfänglich sehr hohe Investitionskosten, die häufig nur mit beträchtlichem Anteil von Fremdwährung getätigt werden können, so daß ihr Nutzen besonders für die ländliche Bevölkerung sehr fraglich erscheint (MNZAVA 1984, KAHAMA 1984). Aus diesem Zusammenspiel von Faktoren wird klar ersichtlich, daß eine große Notwendigkeit besteht, nachhaltig nutzbare Bestände zu gewährleisten; dies gilt ganz besonders vor dem Hintergrund einer rasant voranschreitenden sozio-ökonomischen Entwicklung. Um dieses Ziel sicher zu erreichen, müssen jedoch zuerst verlässliche Informationen über die verfügbaren Holz-Biomassevorräte der Wälder vorliegen.

Brennholz ist mengenmäßig das bedeutendste Produkt des Miombo-Waldes (TEMU 1979). Deshalb ist es offensichtlich, daß die Bedeutung dieser Wälder für die Produktion und Lieferung von Brennholz größer ist als diejenige als Holzlieferanten für nicht-thermische Zwecke. Diese natürlichen Wälder produzieren nachhaltig schätzungsweise 19 Millionen m³ Brennholz für die Bevölkerung Tansanias (KAALÉ 1984). Schätzungen haben ergeben (KILAHAMA 1985), daß der Brennholzbedarf der Landbevölkerung in Tansania jedoch bei einer groben Schätzung von 38 Millionen m³ liegt. Das heißt, daß der Bedarf doppelt so groß ist wie das Angebot bei einer nachhaltigen Bewirtschaftung im eigenen Land. Eine Übernutzung der Holzvorräte in der Vergangenheit dürfte hierfür eine Hauptursache sein.

Weitere Gründe für das Schwinden der Holzvorräte in Tansania, besonders in der Nähe von Siedlungen, sind neben der bereits dargelegten Nutzung von Brennholz auch landwirtschaftliche Aktivitäten. Dies betrifft besonders die Rodung der Wälder für anbaufähige Kulturen sowie als Viehweiden genutzte Flächen, denen der Wald allmählich zum Opfer fällt. So ist es nicht verwunderlich, daß in einigen Teilen Tansanias Frauen und Kinder mehr als 5 Kilometer gehen müssen, um ihren Brennholzbedarf zu decken. (KESSY 1988, ISHENGOMA 1989). KESSY (1988) schätzte für einige Dörfer in der Region um den Kilimanjaro, daß gegenwärtig ungefähr 173 Manntage pro Jahr und Haushalt für die Sammlung von Brennholz aufgewendet werden. Diese Zeit könnte, sofern es keine Probleme mit der Versorgung des Brennholzes gäbe, auf andere produktive Aktivitäten der Bevölkerung verwendet werden. Obwohl die Notwendigkeit für die Umkehrung dieses Trends längst erkannt wurde, verhindern sowohl die wirtschaftliche

Situation als auch das begrenzte Potential von qualifizierten Arbeitskräften eine angemessene Realisierung der geplanten Programme seitens der Forstverwaltung.

Für die Mehrheit der ländlichen Bevölkerung ist die Übernutzung von Wald und Buschbeständen die einzig logische Konsequenz, um ihre essentiellen Energiebedürfnisse zu decken. Bestimmte Waldtypen in Tansania, z.B. Plantagen, sind jedoch geeignet, auch nachhaltig größere Nutzungsraten zu liefern, falls diese sorgfältig und angepaßt bewirtschaftet werden. Andererseits sind andere Waldtypen, z.B. geschlossene feuchte Naturwälder im Meru Naturwaldgebiet oder West-Kilimanjaro Naturwaldgebiet kurz vor dem ökologischen Kollaps. Dafür gibt es sowohl historische als auch zeitgenössische Gründe, sowohl innerhalb als auch außerhalb der Forstwirtschaft, von denen einige nicht nur auf die interne wirtschaftliche Situation in Tansania zurückzuführen sind.

Eine sorgfältige Planung ist deshalb besonders notwendig, um einen leistungsfähigen und wirksamen Gebrauch der nur begrenzten Ressourcen zu garantieren. Eine solche Planung setzt jedoch das Vorhandensein genauer Informationen über das Ausmaß der regionalen Nachfrage nach Energie (aus Biomasse) voraus. Dies erfordert einen qualitativ wie quantitativ guten Überblick über die verfügbaren Biomasseressourcen. Verlässliche Angaben über das Holzbiomasse vorkommen sind jedoch in Tansania, ebenso wie in vielen anderen Entwicklungsländern, praktisch nicht vorhanden bzw. nicht verfügbar. Die Notwendigkeit, Inventurmethode zur Schätzung der Holz-Biomasse zu entwickeln, wird zunehmend erkannt, da sich der Mangel an Waldbeständen als Holz- und Futterquelle zuspitzt.

Untersuchungen über Biomassevorräte waren lange Zeit ausschließlich von großem Interesse für Untersuchungen von Ökologen, während die quantitative Erfassung von Biomassen zur Entwicklung von Konzepten unter dem Aspekt ihrer Nutzung im Forstsektor eine relativ neue Entwicklung darstellen. BROWN (1965) benutzte Biomassedaten, um Aussagen über die Schätzung von Brennmaterialien und Voraussagen über das Verhalten von Waldbränden zu machen. Außerdem wurden Biomassedaten häufig dafür benutzt um Vergleiche von Pflanzengesellschaften anzustellen und um biologische und physikalische Prozesse, welche die Produktivität, den Energiefluß und die Nutzbarmachung der Ökosysteme beeinflussen, zu studieren (STANEK und STATE 1978). Ferner wurden Biomassevorräte und Biomassezuwächse zur Untersuchung der genauen Zusammenhänge der Nährstoffkreisläufe in den Wäldern

herangezogen. Ein solches Verständnis über das Funktionieren von Waldökosystemen ist eine wichtige Voraussetzung zu einem verantwortungsvollen Umgang mit erneuerbaren Ressourcen. Als Ergebnis dieses Prozesses werden die erhobenen Biomassedaten häufig dafür verwendet, um die Ergebnisse derartiger Studien im Forstmanagement zu nutzen, wie beispielsweise für Düngung und Durchforstung (SATO und MADGWICK 1982).

Während des vergangenen Jahrzehntes hat weltweit ein tiefgreifender Wandel stattgefunden, weg von der Betrachtung des Waldes als ausschließlichen Stammholzproduzenten und hin zum Bewußtsein, daß die gesamte organische Produktion zu berücksichtigen ist. Sowohl die vermehrte Nachfrage von Waldprodukten als auch die Suche nach erneuerbaren Rohstoffquellen sowie ein gesteigertes Bewußtsein für ein intaktes Waldökosystem haben die Untersuchungen zur Erfassung von Waldbiomassen vorangetrieben (MADGWICK 1976). Außerdem führte die Energiekrise der 70er Jahre zu der Einsicht, daß auch die fossilen Energieträger nur in begrenzter Menge zur Verfügung stehen und daß deshalb die Nutzung der lebenden Biomasse als erneuerbare und nachwachsende Rohstoffquelle eine echte und notwendige Alternative darstellt.

Die in der mitteleuropäischen Forstwirtschaft gebräuchliche Stammvolumen-Schätzung mit Hilfe von Ertragstafeln ist ein Ansatz für die Schätzung der Biomasse von Wäldern. Diese Erhebungsmethode hat sich durchgesetzt und die Ergebnisse von Waldinventuren werden in der Regel in Volumeneinheiten frischen Stammholzes ausgedrückt. In Hinblick auf die gesamte Nutzung der Bäume, wie z.B. als Brennholz, für die Herstellung von Fasern und als Laubträger für die Futtergewinnung, ist die zusätzliche Einbeziehung des gesamten Astholzes notwendig. Dies gilt ganz besonderes für die Wälder und Buschwälder, wo der größte Teil der Biomasse in Form von Astholz vorliegt, sodaß eine zuverlässige Erfassung des Volumens ohne Astholz praktisch kaum durchführbar ist (BONNOR 1985). Da in der Regel der Brennholzverbrauch in Gewichtseinheiten angegeben wird (PHILIP 1983), sollte im Rahmen dieser Untersuchung eine eindeutige Beziehung zwischen den verschiedenen unabhängigen und abhängigen Variablen, dem Frischgewicht und dem Trockengewicht, entwickelt werden. Auf Grundlage dieser Daten wird es möglich sein, sowohl ausführlichere als auch genauere und realistischere Schätzungen über die potentiellen und erneuerbaren Ressourcen zu machen.

Untersuchungen über Biomasse für Energieplanungen basieren in Tansania in erster Linie auf groben Statistiken der nationalen Forstwirtschaft und sind nur selten Grundlage ökologischer Studien. Solche von den Forstbehörden erhobene Daten sind in der Regel recht unzuverlässig, da die Zielsetzung der Aufnahmen die Nutzung der kommerziellen Holzvorräte ist und nur in seltenen Fällen die Brennholzproduktion dabei berücksichtigt wird. Eine umfassende und zuverlässige Erfassung der Holz-Biomassevorräte ist daher zur Lösung der Brennholzproblematik von besonderer Bedeutung.

Die vorliegende Untersuchung wurde unter diesen Aspekten in Miombo-Wäldern ausgeführt. Die Hauptziele, die als wichtige Schritte für die Verwirklichung und konsequente Durchführung eines angepassten Managements der natürlichen Walder zur Produktion von Brennholz erachtet werden, sind:

- die Erfassung der verfügbaren Biomasse
- die Ermittlung der räumlichen Verteilung der Biomasse
- die Erstellung einer Biomasse-Tafel für Miombo-Wälder in den südlichen Teilen von Tansania.
- die Ableitung von Empfehlungen über die zukünftige mögliche Bewirtschaftung des Miombo- Waldes zur nachhaltigen Brennholz-Produktion basierend auf den Ergebnissen dieser Studie.

2 Bisherige Untersuchungen

Grundlagen zur Schätzung von Biomasse sowie deren Zuwachs, eingeschlossen entsprechender Feldstichprobenaufnahmen, Behandlung der Proben und Datenauswertung liegen vor von KIRA et al. (1967), NEWBOULD (1967), MILNER und HUGHES (1968), DUVIGNEAUD (1971), WHITAKER und WOODWELL (1968), ALEMDAG (1980) PELLINEN (1986), AKÇA und ATHARI (1992) sowie AKÇA und MENCH (1994).

Bei ART und MARKS (1971) findet sich ein Überblick über die wesentlichen bisherigen Biomasseuntersuchungen. Die Autoren erläutern verschiedene Methoden zur Biomasseschätzung in Wäldern. YOUNG et al. (1964), YOUNG (1976) präsentiert einen weltweiten Überblick über Biomasseuntersuchungen bei verschiedenen Baumarten. HITCHKOCK und McDONNEL (1979) liefern eine Zusammenstellung von Literatur zum Thema Biomasseschätzung in Wäldern.

Eine Reihe von Untersuchungen und wissenschaftlichen Veröffentlichungen weist aus, daß im allgemeinen zuverlässige Methoden für die stichprobenhafte Datenerhebung über die Biomasse einzelner Baumkomponenten zur Verfügung stehen.

2.1 Terrestrische Stichprobenerhebungen für Biomasseschätzungen

YOUNG (1976) wies anhand einer Studie in Maine nach, daß bei gleichmäßiger Verteilung über den gesamten Durchmesserbereich etwa 30 Probestämme für die Erstellung einer baumartenspezifischen Biomassetafel benötigt werden. In der Praxis reicht die Spannweite untersuchter Probestämme von 10 (MACLEAN und WEIN 1976), SCHLAEGEL 1975) bis zu mehreren hundert Exemplaren einer Art (BURKHART et al. 1972). Der Trend zeigt, daß für den BHD-Bereich 13-70 cm eine Stichprobe von 20 bis 40 Bäumen hinreicht, um bei der Erstellung von Biomassetafeln Bestimmtheitsmaße von 0,95 oder sogar besser zu erzielen. (CLARK und TARAS 1976, KING und SCHNELL 1972, WIANT et al. 1978 und BROWN 1976).

YOUNG (1977) schlägt vor, für die Repräsentation einer jeden Durchmesserklasse innerhalb eines voll bestockten Bestandes gezielt herrschende und mitherrschende Bäume zu untersuchen. SINGH und SHARMA (1976) analysierten drei durchschnittliche Bäume in jeder Durchmesserklasse. SCHNELL (1979) wählte bereits im Zuge eines regulären Hiebes gefällte

Bäume nach deren Zugänglichkeit und Eignung für die Entnahme der gewünschten Biomasseproben aus. WIANT (1977), MACLEAN und WEIN (1976) selektierten typische Bestände nach deren Repräsentanz der Bestandesalter aller Bestände einer Region aus, in welchen sie dann bestandesweise Bäume zufällig auswählten. BRENNEMAN et al. (1978) untersuchte alle Bäume innerhalb zufällig verteilter Stichprobenflächen von 0.1 acre (ca. 0,005 ha) Fläche und hängte Durchmesserverteilungen benachbarter Bestände ein um bestandesweise Biomassentafeln zu erstellen. CLARK und TARAS (1976) zogen nach Vollkluppung Einzelbaumstichproben aus Durchmesserstraten einiger Bestände. BROWN (1976) und HONER (1971) wählten zufällig Bäume aus verschiedenen Standortstypen und unterschiedlicher Bestockungsdichte aus. Sie ließen jedoch Individuen mit außergewöhnlichen Eigenschaften, wie z.B. Protzen, stark deformierte oder entlaubte Bäume und auch solche mit Kronenbrüchen, außer acht. PELLINEN (1986) untersuchte Bäume nach deren Zugehörigkeit zu Durchmesserklassen in ihren Untersuchungsbeständen. Dabei unterteilte sie die Durchmesserverteilung ihrer Bestände in Stufen von 4 cm und selektierte hieraus die Probehäume.

2.2 Biomasseschätzung aus Luftbildern

Es gibt nur wenige veröffentlichte Untersuchungen über den Einsatz von Luftbildauswertung für forstliche Biomasseschätzungen. STOREY (1969) erachtete den maximalen Kronendurchmesser als den besten Einzelparameter für die Schätzung der oberirdischen Biomasse von *Pinyon* Buschwald. Da diese Größe sich am einfachsten aus dem Luftbild erheben läßt, empfiehlt sich dieses Verfahren für die Biomasseschätzung. MEELWIG et al. (1979) befanden Kronenmantelfläche und Kronendurchmesser als die wichtigsten Parameter. ALEMDAG (1986) korrelierte Stamm- und Kronenbiomasse sowie die Gesamtbiomasse einzelner Bäume mit der Baumhöhe und Kronenmantelfläche aus Luftbildmessungen. Er empfiehlt dieses Verfahren unter der Voraussetzung, daß die Aufnahmequalität gut und der Bildmaßstab groß sei (größer als 1:10000). Der Einsatz von Luftbildern für Forstinventuren wird in den nachfolgenden Kapiteln behandelt.

2.3 Direkte Messungen zur Ermittlung der Holzbiomasse

CUNIA (1979b) wertete die bekannten Methoden für die direkte Messung von Baumbiomasse aus. Der gefällte Baum wird üblicherweise in kleinere Bestandteile zerlegt. Stammholz wird nach Volumen und Frischgewicht vermessen, Äste und Laub dagegen nur nach Gewicht. Große Abschnitte werden weiterhin zerlegt und das Frischgewicht der Einzelteile ermittelt. Waagen für sehr große Gewichte sind hierbei von Vorteil, wenn große Mengen Holz gewogen werden sollen. Dies erspart dann die zusätzliche stichprobenweise Entnahme von kleineren Holzproben für die Ermittlung des totalen Frischgewichtes eines Baumes. Für die Ermittlung des ofentrockenen Gewichtes (atro-Gewicht) jedoch ist die Entnahme kleiner Holzstichproben unentbehrlich. Das normale Vorgehen für Stammholz ist die systematische Entnahme von Stammscheiben in regelmäßigen Abständen voneinander. ALEMDAG (1980) stellte fest, daß die Ergebnisse aus diesen Messungen wegen der Veränderung der spezifischen Holzdichte mit zunehmender Stammhöhe einen systematischen Fehler aufweisen: Die Stichproben aus der Gesamtheit der Äste werden in der Regel zufällig aus einem Haufen Astreisig entnommen und gewogen. Für die Ofentrocknung werden dann auch hieraus Scheibchen entnommen. CUNIA (1979b) stellte systematische Fehler auch in der stichprobenhaften Ermittlung des Astgewichtes fest. Nach der Ofentrocknung der Astabschnitte wird deren Trockengewicht (atro) gemessen und zu deren Frischgewicht ins Verhältnis gesetzt. Der somit gewonnene Faktor wird dann als Verhältnisschätzer verwendet, um das Trockengewicht (atro) der Gesamtheit der Biomasse zu schätzen. COCHRAN (1977) ist der Ansicht, daß der systematische Fehler bei der Verwendung von Verhältnisschätzern einer relativ großen Stichprobe vernachlässigt werden kann. Mess-technisch bedingte systematische Fehler dagegen sollten in Betracht gezogen werden, wenn z.B. vor der Messung des Frischgewichtes Holzfeuchtigkeit entwichen ist. Das ist oft der Fall, wenn das Zerlegen der Bäume in wägbare Komponenten relativ viel Zeit in Anspruch genommen hat. Es ist daher sehr empfehlenswert, daß bei der praktischen Durchführung der Arbeitsschritte, aber auch bei der statistischen Auswertung der Daten, größte Sorgfalt anzuwenden ist. Die Genauigkeit der Meßdaten ist von großer Wichtigkeit, da aus den Stichprobendaten Biomassen zunächst für einzelne Bäume, dann je Hektar und schließlich für eine größere Fläche durch Hochrechnung abgeschätzt werden und sich damit kleinere Fehler entsprechend vergrößern können.

Die verbreitetste Methode zur indirekten Messung jeglicher Art von Baumbiomasse ist die Erstellung von Biomassegleichungen und Biomassetafeln, die mittels Regressionsmodellen aus den Einzelbaum-Stichproben erstellt sind. Baumbiomasse wird dabei als Funktion einer oder mehrerer unabhängiger Variablen ausgedrückt, welche sich als ausreichend stark mit der abhängigen Variablen korreliert erwiesen haben. Die Regression kann einfach sein (bei nur einer unabhängigen Variable, wie z.B. BHD oder Höhe), oder multipel, auch durch Kombination mehrerer Variablen, wie z.B. h und d , hd^2 , d^2h etc. Wenn die Stichprobe tatsächlich repräsentativ für eine größere Population ist, dann kann die Biomasse für alle Bäume der Population allein durch die Aufnahme der leicht meßbaren unabhängigen Variablen geschätzt werden.

Diese Methode ist seit langer Zeit in Gebrauch und wird in Europa und Japan (KIRA und SHIDEI 1967) mit „Allometry“ und in Nordamerika mit „Dimensional Analysis“ (WHITAKER und WOODWELL 1968) bezeichnet. Die Qualität der Populationsschätzung hängt von dem ausgewählten Gleichungsmodell ab.

2.4 Die Schätzung der Bestandesbiomasse

Eine Biomassetafel wird auf eine Biomasseschätzung angewandt, indem die Anzahl der Stämme innerhalb einer jeden Klasse mit dem aus der Biomassetafel entnommenen Gewicht dieser Klasse multipliziert wird.

Eine der Methoden zur Schätzung von Holzvorräten in Volumeneinheiten bei Forstinventuren ist die Herleitung von Volumengleichungen für Einzelbäume. Diese Gleichungen werden dann auf die Inventurdaten von Stichprobenflächen angewandt. Ähnliche Prozeduren können bei Biomasseschätzungen eingesetzt werden (BONNOR 1985). Demnach sind auf der Grundlage von Baumstichproben einzelbaumbezogene Biomassegleichungen aufzustellen, mit welchen dann die Biomasse der Flächenstichproben, wie z.B. Probekreise, geschätzt wird. Hieraus können dann Mittelwert und Varianz der Stichprobe hergeleitet und auf die Gesamtpopulation angewandt werden. Aus den Ergebnissen einer großräumigen Aufnahme können unter Umständen Bestandesbiomassetafeln erstellt werden.

Ein anderer Ansatz beruht auf der Korrelation zwischen Probeflächenvolumen und Probeflächenbiomasse. Konvertierungsfaktoren und/oder Beziehungsgleichungen können hieraus

berechnet und auf die bereits existierenden Volumenwerte der Probestfläche angewandt werden, woraus sodann die entsprechenden Werte je Hektar ermittelt werden können. Nach BONNOR (1985) ist diese Methode vermutlich einfacher und schneller durchzuführen als das Zugrundelegen primärer Inventurdaten (z.B. Höhe und BHD), liefert jedoch auch weniger genaue Ergebnisse.

Eine Vielzahl von Techniken wurde für die Ermittlung von Bestandesbiomassen auf Grundlage einzelbaumweiser Stichprobenuntersuchungen eingesetzt (z.B. OVINGTON und MADGWICK 1959, ANDO 1962, CROW 1971, SWANK und SCHREUDER 1974, EGUNJOBI 1976).

ART und MARKS (1971) beschreiben sechs allgemeine Methoden um von einzelbaumweisen Stichproben auf ganze Populationen größerer Gebiete zu schließen. Einzelheiten dieser Methoden finden sich bei SATOO und MADGWICK (1982). Ungeachtet der verwendeten Methode sind stets eine Anzahl Bäume zu fällen und komplett zu wiegen um die Summe der Biomasse aller ihrer Komponenten zu ermitteln.

CUNIA und MICHELAKACKIS (1983) analysierten die zwei Hauptfehlerquellen bei der flächen- bezogenen Biomasseschätzung. Eine Fehlerquelle ist die Variabilität der Stammdurchmesser innerhalb von Waldbeständen, die andere liegt im Aufstellen der Biomasseregressionsgleichung. Der erstere Fehler entstammt der ursprünglichen BHD-Stichprobennahme, falls der Bestand nicht vollgekluppt wird, während der andere dadurch entsteht, daß für die Durchführung des tatsächlichen Wiegevorganges aus der Uraufnahme wiederum eine Stichprobe gezogen wird, welche dann in die Regressionsgleichung eingeht.

Die verschiedenen Fehlerquellen wurden auch von CUNIA und MICHELAKACKIS (1985) analysiert. Ein Ergebnis ihrer Untersuchungen ist die Erkenntnis, daß der Einfluß systematischer Fehler bei solchen zweiphasigen Stichproben vernachlässigt werden kann, sofern die Regressionsgleichung optimal aufgestellt worden ist. Sie stellen ferner fest, daß die gewöhnliche Methode der kleinsten Quadrate sowie die gewogene Methode der kleinsten Quadrate zu besseren Schätzern führten als deren modifizierte Varianten.

2.5 Modelle und Variablen zur Biomasseschätzung im Miombo-Wald

Die meisten Modelle für die Schätzung der Biomasse im Miombo-Wald sind allometrisch oder polynomisch bis zum dritten Grad. STROMGAARD (1985, 1986) verwendete in Sambia zwei Modelle:

$$\log w = a + b \log BHD + c \log H \quad 2.1$$

und

$$\log w = a + b \log BHD + c \log BHD^2 + d \log H + e \log H^2 \quad 2.2$$

wobei

\log = Logarithmus zur Basis 10

w = Biomasse (kg/Baum)

BHD = Brusthöhendurchmesser (cm)

H = Baumhöhe (m)

Er beobachtete wie erwartet, daß polynomische Modelle im Miombo-Wald relative höhere Werte für R^2 und niedrigere Fehler ergeben als allometrische. Auch CHIDUMAYO (1988) arbeitete in Sambia. Er entwickelte lineare Funktionen aus dem Stammdurchmesser in 0,3 m Höhe (Stockdurchmesser) und der Baumhöhe. Seine Ergebnisse ergaben große Fehler (Standardfehler der Schätzung SEE=35%). Später (1992) ersetzte er den Stockdurchmesser durch den BHD und erhielt bessere Resultate. In Simbabwe schätzte GRUNDY (1995) Biomasse im Miombo-Wald für zwei Baumarten *Brachystegia spiciformis* und *Jurbenadia globiflora*. Im Miombo-Wald treten diese beiden Arten stets gemeinsam auf. Als unabhängige Variable in den Regressionsmodellen verwendete er die logarithmische Transformation der Summe einzelner

Stammabschnittsvolumina $\sum_{i=1}^n d_i^2 L_i$, als einen groben Schätzer des Schaftvolumens.

$$\log Bm = a + b \log \sum_{i=1}^n d_i^2 L_i \quad 2.3$$

wobei

Bm = Biomasse

d = Stammdurchmesser in 0,3 m Höhe (Stockdurchmesser)

L = Länge des Stammes

Es fand sich eine gute Beziehung zwischen den Summenwerten der Stammabschnitte ($\sum_{i=1}^n d_i^2 L_i$) und der Holzbiomasse, welche die Erstellung verlässlicher Biomassetafeln erlauben. MALIMBWI et al. (1994) schätzte die Holzbiomasse des Miombo-Waldgebietes Morogoro in Tansania. Ihre Modelle ähnelten denjenigen von STROMGAARD (1986) sowie denen von MARKLUND (1988). Die Autoren kamen ebenso wie GRUNDY (1995) zu dem Schluß, daß sich kombinierte Modelle für alle Baumarten im Miombo-Wald eignen. Diese Erkenntnis ist angesichts der hohen Artenvielfalt dieses Waldtyps von großer Bedeutung.

2.6 Waldbiomasseinventuren

YOUNG et al. (1976) führte im US-Bundesstaat Maine die erste Biomasseinventur in Verbindung mit einer Holzvorratsinventur durch. Zusätzlich zu den für die herkömmliche Holzvorratsinventur erfaßten Bäumen wurden auf Probeflächen von 0,001 ha Fläche auch kleine Bäume sowie Buschvegetation aufgenommen. Die zusätzliche Aufnahme der kleineren Holzpflanzen sowie die Erstellung von Gewichtstabellen sind die einzigen Voraussetzungen, um Waldbiomasse-schätzungen auf der Grundlage von herkömmlichen Waldinventuren durchzuführen. Auf diese Weise können aus regionalen und nationalen Waldinventuren Waldbiomassen geschätzt werden. Großraum-Biomasseinventuren sind von großer Bedeutung, da sie Daten über die biologischen Massen in Wäldern liefern. Auf solche Daten können sich dann forstpolitische Strategien für die Energieversorgung (fossile gegenüber erneuerbare Energieträger), nicht nur in Entwicklungsländern, stützen.

2.7 Der Einsatz von Fernerkundung bei Forstinventuren

Seit etwa einem Jahrhundert finden Luftbilder Verwendung in der Forstwirtschaft. Der Einsatz von Luftbildmessung und Interpretation bietet eine bedeutende Möglichkeit zur Arbeitsrationalisierung, insbesondere bei der Anwendung von modernen Verfahren der digitalen Luftbildauswertung. Die Luftbilder können bei Waldinventuren dabei in vielfältiger Weise eingesetzt werden, wie z.B. (nach HUSS et al. 1984):

- als Orientierungshilfe bei rein terrestrischen Aufnahmen
- als Hilfe zur Stratifizierung eines Waldgebietes
- als alleinige Informationsquelle einer Inventur (die wenigen terrestrischen Aufnahmen dienen hierbei nur der Aufstellung von Interpretationsschlüsseln oder der Verifizierung von Ergebnissen)
- in einem kombinierten Verfahren zwischen Luftbildauswertung und terrestrischer Aufnahme zur Erzielung eines optimalen Kosten-Nutzen-Verhältnisses unter Berücksichtigung von Arbeitsaufwand, Leistungsstärke und Genauigkeitsanforderungen

Somit haben Luftbilder einen festen Platz in der Planungsphase einer Forstinventur. Kombination zunehmend verfeinerter Bildauswerteverfahren mit terrestrischen Inventuren führten zu erheblichen Zeitersparnissen und Kostensenkungen bei Forstinventuren.

In den Tropen wurden Luftbilder im wesentlichen zur Stratifizierung, Flächenschätzung und Lokalisierung von Aufnahmeflächen eingesetzt. Im Zuge der Entwicklungen des forstlichen Luftbildwesens wurde es inzwischen möglich, konkrete forstliche Inventurgrößen, wie z.B. Bestandesvorräte, aus Luftbildern zu schätzen (z.B. HILDEBRANDT 1964). Unter Einsatz der sich rapide entwickelnden elektronischen Datenverarbeitung wurde die Fernerkundung immer wirkungsvoller (z.B. AKÇA 1980, HILDEBRANDT 1970, KENNEWEG 1970). Dendrometrische Meßverfahren in Stereoluftbildern, welche bereits früher entwickelt worden waren (HUGERSHOFF 1933) kamen mehr und mehr zur Anwendung, in größerem Umfang zur Schätzung von Baum- und Bestandeshöhen, Kronendurchmesser, Stammzahl und Kronenschlußgrad (SPELLMANN 1986, SPELLMANN und AKÇA 1983, KAHLEYSS und KLIER 1968, WOLF 1966). Aus den genannten Größen sowie zusätzlichen Informationen konnten dann Vorratsschätzungen aus Luftbildern vorgenommen werden.

Seit den frühen siebziger Jahren stehen zusätzlich Satellitenaufnahmen für Waldinventuren zur Verfügung. Man erkannte bereits bald einen großen Vorteil in der Kombination dieser Aufnahmen mit Luftbildern. Aufgrund der ständig steigenden geometrischen Auflösung der Satellitensensoren treten beide Medien heutzutage zunehmend in Konkurrenz zueinander. Aus diesem Grund, besonders unter zusätzlicher Anwendung ausgefeilter mehrstufiger und mehrphasiger Stichprobeninventurverfahren, reichen Inventuren aus Satellitenaufnahmen

zunehmend in den Maßstabsbereich von Luftbildern hinein. Trotzdem kommt für die Beschaffung hochdetaillierter Informationen über Waldbestände dem modernen Standard-Luftbild aus großformatigen Reihenmeßkammern noch immer größte Bedeutung zu, vor allem wenn eine hochgenaue Bildgeometrie und Objektdetails bei großer Bildschärfe gefordert werden.

Im südlichen Afrika wurden zwei regionale Biomasseinventuren in den SADCC-Staaten¹ bzw. in den Sub-Sahara Staaten durchgeführt, bei welchen die Daten durch Auswertung von Satellitenbildern gewonnen wurden (MILLINGTON et al. 1989, 1994). Diese beiden Inventuren lieferten Karten und Datenbestände für strategische Planungen, wie z.B. die Intensivierung der Brennholzversorgung in Prioritätsgebieten, welche detailliertere Biomasseinventuren sowie eingehende Untersuchungen über deren tatsächlichen Brennholzbedarf erfordern (MILLINGTON 1994).

2.8 Der Einsatz von Luftbildern in Tansania

Bei Inventuren, Kartierungen und der Überwachung natürlicher Ressourcen ist in Tansania die Auswertung von Luftbildern seit langem fester Bestandteil der erforderlichen Arbeiten (MGENI 1990b). Bereits 1947 (KING 1984) wurden in der Usangu-Ebene im Süden des Landes Luftbilder für die Entwicklung eines Bewässerungssystems landwirtschaftlich intensiv genutzter Flächen ausgewertet. Eine Übersicht über die bis 1971 mit Hilfe von Luftbildauswertung in Tansania durchgeführten Arbeiten findet sich bei COOK (1974). Daraus geht hervor, daß ein großer Teil der Landesfläche, teilweise mehrfach, befliegen wurde. Die Aufnahmen wurden im Rahmen von Trinkwasser-Explorationen, Bewässerungsprojekten, Staudammprojekten, verschiedenen landwirtschaftlichen Vorhaben, Nationalparkprojekten, Siedlungskartierungen, Straßen- und Eisenbahnplanungen, Flugplatzbau und forstlichen Kartierungsarbeiten durchgeführt.

Für Großraum-Waldinventuren wurden Luftbilder erstmals 1971 durch SHULTZ & Co. und 1978 von JAAKKO PÖYRI eingesetzt (MGENI 1990b). Beide Consultants verwendeten dabei Luftbilder im Maßstab 1: 40.000 für die nationale Naturwaldinventur. Die Bilder wurden hauptsächlich verwendet für die Klassifikation und Stratifizierung der Waldtypen sowie zum Planen und Auffinden der Stichprobepunkte. Ebenfalls in den 70er Jahren wurden zusätzlich die

meisten Forstplantagen inventarisiert. Im Miombo-Wald der Region Tabora wurde von TEMU (1979) eine mehrphasige Stichprobeninventur zur Holzvorratsschätzung mittels Auswertung von Luftbildern im Maßstab 1:20.000 durchgeführt. Aus den Luftbildern wurden Bestandeshöhe, Kronenschlußgrad und Stammzahl ermittelt. Der Vorrat konnte mit einem Standardfehler von 10% geschätzt werden. Neben dem gesamten Holzvorrat wurde dabei auch der Brennholzanteil ermittelt. Die Durchführung mehrphasiger Stichproben wurde als brauchbar für derartige Inventuren im Miombo-Wald bezeichnet. Als weitere Voraussetzung gelten ferner eine hohe Qualität des Bildmaterials sowie qualifiziertes Personal (TEMU 1981).

2.9 Baum- und Bestandesmessungen in Luftbildern

2.91 Die Messung von Baum- und Bestandeshöhen

Baum- und Bestandeshöhen sind wichtige Eingangsgrößen für die Schätzung von Holz- und Biomassevorrat, aber auch für die Klassifikation, Stratifizierung und Bestandeskartierung (LOETSCH 1953, HUSCH et al. 1974, PHILIP 1983). Höhen können stereoskopisch aus Luftbildern gemessen werden mittels einfacher Spiegelstereoskope und Stereomikrometer oder Parallaxenmeßkeil, oder aber mittels hochgenauer photogrammetrischer Auswertegeräte, wie z.B. dem KERN DSR 11-18 (HILDEBRANDT 1970, AKÇA et al. 1971, BONES 1976). Anders als frühere Untersuchungen (GOTTHARDT 1941, POPE 1957 und JOHNSON 1958) stellte AKÇA (1973) fest, daß Fehler bei der Höhenmessung in Luftbildern hauptsächlich auf schlechter Qualität der Luftbilder, ungünstigem Bildmaßstab, zu hoher Bestandesdichte und die bei der Messung angewendeten Techniken beruhen. Fehlerstudien von SHULTZ (1971), WORLEY und LANDIS (1954), Klier (1970) und PERLWITZ (1970) ergaben bei verschiedenen Bildmaßstäben Höhenfehler von 0,4 m bis 3,2 m. Die Verwendung photogrammetrischer Präzisionsgeräte kann den Höhenfehler erheblich reduzieren. AKÇA (1973) zeigte, daß Präzisionsgeräte gegenüber einfachen Meßgeräten Höhenfehler von 1,0 m bzw. 1,59 m auf 0,5 m bzw. 1,0 m verbessern können.

Daß es zwischen photogrammetrisch und terrestrisch gemessenen Baumhöhen bzw. Bestandeshöhen einen guten stochastischen Zusammenhang gibt (lineare Korrelationen von um

¹ SADCC-Staaten: South African Development Coordination Conference, i.e. Angola, Botswana, Lesotho, Malawi, Mosambik, Swasiland, Tansania, Sambia und Simbabwe

$r = 0,9$), belegen verschiedene Arbeiten (PERLWITZ und FROMHOOD 1976, STÜBER 1981, BRAUN 1982, AKÇA 1983a, SPELLMANN 1984). Die dort angegebenen Fehler der im Luftbild gemessenen Mittel- bzw. Oberhöhen liegen zwischen 2% und 7%. Diese Fehlergröße ist für Zwecke der Forsteinrichtung und Großrauminventur ohne weiteres akzeptabel, zumal sie nur gering über dem Fehlerprozent der sonst üblichen terrestrischen Verfahren liegt (AKÇA 1983). SOEDIRMAN (1989) ermittelte in Indonesien bei photogrammetrisch ermittelten Bestandesmittelhöhen einen Standardfehler von ± 2 m. Baumhöhenfehler sind nach WORLEY und LANDIS (1954) geringer in Laubholzbeständen als in Nadelholzbeständen. In sehr dichten Beständen ist die Baumhöhenmessung äußerst problematisch, da der Baumfußpunkt dort nicht sichtbar ist. Dies gilt auch in mehrstufigen Wäldern mit Zwischen- und Unterstand. In geschlossenen tropischen Wäldern ist daher die photogrammetrische Baumhöhenmessung recht problematisch, was aber auch für die terrestrische Messung gilt. Im allgemeinen wird jedoch die photogrammetrische Baumhöhenmessung empfohlen (AKÇA 1983).

Wie bei terrestrischen, so können auch bei photogrammetrisch ermittelten Bestandeshöhen verschiedene Arten unterschieden werden: Mittelhöhen, Oberhöhen und Spitzenhöhen. Untersuchungen von AKÇA (1983) an Fichtenbeständen zeigten, daß die Oberhöhe gegenüber der Mittelhöhe photogrammetrisch rationeller ermittelt werden kann.

2.92 Ermittlung der Stammzahl

Eine intensive Untersuchung über die Ermittlung der Stammzahl in Waldbeständen durch Luftbildinterpretation findet sich bei TANDON (1974). Systematische Fehler können leicht entstehen durch folgende Umstände: Bildqualität, Bildmaßstab, Topographie, Bestandesalter und Bestandesstruktur, Kronenschlußgrad, Kronenform und Baumart. Bereits früher (SPURR 1952, SAYN-WITTGENSTEIN und ALDRED 1967, OTT 1967) wurden Bildqualität und Bildmaßstab als wichtige Ursachen für systematische Fehler genannt. Letztere ermittelten in Laubbeständen einen durchschnittlichen Fehler von 11% und in Nadelbeständen von 8%. Obwohl sich in Waldbeständen eine gute Korrelation zwischen Baumzahl und Bestandesvolumen ergibt (TANDON 1974, SPELLMANN 1984) weisen verschiedene Autoren (z.B. VERSTEEGH 1974 und TEMU 1992) darauf hin, daß in tropischen Wäldern die Ermittlung der Stammzahl sehr schwierig sein kann, da kleinflächig beträchtliche Unterschiede in der Kronendichte und

Kronenform der abgebildeten Bäume auftreten. Dabei können Bäume mit gegabelten Starkästen Kronen ausbilden, welche das Vorhandensein mehrerer Bäume mit kleineren Kronen vortäuschen können, was bei der Stammzahlermittlung dann zu einer Überschätzung führt. Nach REMEIJN (1989) kann die Stammzahlermittlung im Luftbild nur dann zuverlässig sein, wenn

- Baumkronen groß genug abgebildet sind
- Waldbestände nicht so dicht sind, daß die Kronen einander berühren
- Baumkronen eher Kegel- oder spindelförmig als rund sind
- Bestände eine relativ einheitliche Höhe der Einzelbäume aufweisen, wie dies z.B. in Monokulturen und gleichaltrigen Beständen der Fall ist.

Diese Voraussetzungen liegen jedoch nur ausnahmsweise vor. Deshalb ist zu empfehlen, sich zunächst einen guten Überblick über die spezifischen und strukturellen Verhältnisse, vor allem über die Verzweigungs- und Kronenbildungscharakteristiken, des zu bearbeitenden Waldgebietes zu verschaffen. SPELLMANN (1984) fand in einem jungen Kiefern-Reinbestand eine Unterschätzung der Stammzahl von 17,7%. ZIEGER (1928) ermittelte einen systematischen Fehler von bis zu 30,3% in jungen Kiefernbeständen. In einem Buchen-Fichten Mischbestand erzielte AL HOMAID (1978) eine Unterschätzung der Baumzahl von 34,8%. In einem tropischen Wald wurde die Baumzahl um 17% unterschätzt (SOEDIRMAN 1989). Die Korrelation zwischen der im Luftbild ermittelten und der tatsächlichen Baumzahl lag dabei bei 0,9. Eine Überschätzung der Stammzahl wird jedoch nur selten berichtet, z.B. bei STELLINGWERF (1962), HOSIUS (1973) oder OTT (1987).

2.93 Die Ermittlung des Kronenschlußgrades

Der Kronenschlußgrad ist das Verhältnis der von Baumkronen überschirmten Fläche zu der Gesamtfläche des Bestandes. Neben der Baumhöhe und der Kronenzahl gehört der Kronenschlußgrad zu den am häufigsten für die Holvorratsschätzung verwendeten Hilfsgrößen (z.B. ROGERS 1959, STELLINGWERF und BENESSALAH 1977, SPELLMANN 1984, AKÇA und DONG 1985). Daneben wird er auch häufig zur Stratifizierung von Waldgebieten (z.B. LOETSCH 1953, WOLFF 1960, HILDEBRANDT 1962, NYSSÖNEN 1967) und zur Bestimmung der Durchforstungsnotwendigkeit verwendet. Zwischen dem Kronenschlußgrad und dem Bestockungsgrad besteht ein straffer Zusammenhang (z.B. KURTH und OLDANI 1962,

DFNSTORF 1980 und AHLBORN 1981). Der Kronenschlußgrad kann auf unterschiedliche Weise ermittelt werden, z.B. durch einen Meßkeil auf Klarsichtfolie und mit Hilfe der Winkelzähl-probe (KLIER 1969), Punktraster (SAMOJLVIC 1964) oder durch einfache okulare Schätzung (SPURR 1952, WORLEY und MEYER 1954, TEMU 1979, SOEDIRMAN 1989). AKÇA (1981) stellt fest, daß die Genauigkeit der verwendeten Methode von der Erfahrung des Auswerters und seinen Kenntnissen über den Waldbestand abhängt. Der in den meisten Veröffentlichungen angegebene Fehler bewegt sich zwischen 5% und 20%. SPELLMANN (1984) berechnete einen Fehler von 12%, HASELHUHN (1983) von 11%, KLIER (1969) von 5%. Nach AKÇA (1981) kann die erzielbare Genauigkeit in der Größenordnung um 10% liegen, je nach Erfahrung und Kenntnissen des Interpreten. Tabelle 2.1 gibt eine Übersicht über die bei verschiedenen Untersuchungen erzielten Genauigkeiten für unterschiedliche dendrometrische Größen.

Tabelle 2.1: Die Genauigkeiten für unterschiedliche dendrometrische Größen (SPELLMANN 1986)

Dendrometrische Bestandsdaten		Fehlergrößen		Art der Erfassung
Im Gelände	Im Luftbild	Direkte Vewendung der Luftbildaten bzw Meßgenauigkeit (Präzision)	Regressions-schätzung	
Stammzahl	Kronenzahl	systematisch negativ (-10 bis -20%)	±10 bis ±15%	zählbar
Grundflächen-mittelhöhe	photogr. Mittelhöhe	±3 bis ±7%	±2 bis ±5%	meßbar
Weise sche Oberhöhe	photogr. Oberhöhe	±3 bis ±7%	±3 bis ±5%	meßbar
-	Kronen-durchmesser	±2%	-	meßbar
-	Kronenlänge	±3%	-	meßbar
-	Kronen-schirmfläche	±5%	-	zählbar (Punktraster)
Kronen-schlußgrad	Kronen-schlußgrad	±10% bis ±20%	-	zählbar (Punktraster) oder Visuelle Schätzung
Bestandes-grundfläche	-	-	±10 bis ±15%	meßbar
-	Wuchsraum-profil	-	-	meßbar
Alter	natürl. Altersstufe/ Altersklasse	6 Stufen/ doppelte Alterklassen	-	schätzbar

2.10 Geographische Informationssysteme

Ein „Geographic Information System“, kurz GIS, ist „... ein rechnergestütztes System, das aus Hardware, Software, Daten und Anwendungen besteht. Mit ihm können raumbezogene Daten digital erfaßt und redigiert, gespeichert und reorganisiert, modelliert und analysiert sowie alphanumerisch und graphisch präsentiert werden“ (BILL u. FRITSCH 1991). Kurzgefaßt unterstützt ein GIS den Benutzer in vier Teilbereichen: Input, Management, Analyse und Präsentation („IMAP- Modell“). Ein GIS besteht somit „... aus mehreren Daten Schichten. Diese Sammlung von Daten wird erst durch ein Datenbankverwaltungssystem (Data base management system -DBMS) zu einer Datenbank; das DBMS gruppiert den auf Dauer angelegten Datenbestand, schützt ihn und macht ihn unterschiedlichen Benutzern zugänglich. Um diese Datenbank gruppieren sich eine Reihe von Software-Werkzeugen, wie Transformationen, Algorithmen zur Verschneidung, zur Interpolation, zur graphischen Aufbereitung usw. Der Anwender hat die Möglichkeit, sowohl einzelne Daten wie auch einzelne Werkzeuge, die ihm das Informationssystem bietet, in seine Anwendung einzubauen“ (BARTELME 1989).

Das Hauptmerkmal eines GIS ist die Hervorhebung analytischer Operationen. GOODCHILD (1988) stellt fest, daß die Fähigkeit eines GIS, räumliche Daten zu analysieren oft als das Hauptmerkmal seiner Definition gesehen wird. Diese Eigenschaft ist als das wesentliche Kriterium zur Abgrenzung eines GIS von anderen topographischen Systemen zu betrachten, deren Hauptaufgabe darin besteht, Landkarten zu produzieren. In einem GIS treffen digital gespeicherte Informationen verschiedener Art aufeinander. Die Integration von Informationen erfolgt als Synthese geographischer Informationen in einem Computersystem, deren Qualität sehr stark von der Qualität der Datenverknüpfung innerhalb eines kohärenten Datenmodells abhängt (SHEPERD 1992). Hierbei werden Informationen aus sehr unterschiedlichen Quellen zusammengetragen. Dies erfordert eine Abstimmung nur anscheinend gleichartiger Daten und möglichst hohe Konsistenz innerhalb und zwischen den Quelldatenbeständen. Die Verinnerlichung der Charakteristika eines GIS im Vergleich zu anderen Informationssystemen, wie z.B. Computerkartographie, Computerunterstütztes Zeichnen und Konstruieren (CAD), Datenbasis-Management-Systeme (DBMS) und Fernerkundungs-Informationssysteme, ist notwendig um ein effektives GIS zu entwerfen.

Dateneingabe ist der Vorgang, Daten in einem vom jeweiligen System lesbaren Format einzulesen. Diese Daten sind grundsätzlich zweierlei Natur: räumliche Daten und assoziierte Sachdaten. Nach WEIR (1988) und ARONOFF (1989) sind in einem GIS fünf Arten der Dateneingabe zu unterscheiden: Koordinateneingabe per Tastatur, manuelles Digitalisieren per Digitalisieretafelt, Scannen, Sachdateneingabe per Tastatur und durch Einlesen einer existierenden digitalen Datei. Der Entwurf einer korrekten und gut kommentierten Datenbasis ist für die Qualität eines GIS von großer Bedeutung. Ein wesentlicher Faktor in der technologischen Entwicklung von GIS ist der rasch gewachsene Kenntnisstand der potentiellen GIS-Nutzergemeinschaft. GIS haben modernste Grafikverfahren, leistungsstärkere Computer, kompetenteren Datenaustausch und Datenbank-funktionen adoptiert und sogar bis zu einem gewissen Grad auch Expertensysteme integriert um den menschlichen Arbeitsaufwand zu reduzieren.

Wie der Abbildung 2.1 zu entnehmen ist, stehen zur Akquisition von Daten für GIS neben der Vermessung/Geodäsie, dem Digitalisieren/Scannen von Karten und Plänen, der Extraktion von Informationen aus Statistiken, Tabellen etc. auch die Methoden der Photogrammetrie und Fernerkundung zur Verfügung. Systeme der Photogrammetrie und Fernerkundung erzeugen bildhafte Darstellungen der aufgenommenen Objekte mit einem sehr hohen Informationsgehalt. Aus den Grauwerten und ihren gegenseitigen Beziehungen lassen sich eine Fülle unterschiedlicher Informationen entnehmen und auf eine gemeinsame geometrische Basis beziehen. Gegenüber den anderen Methoden handelt es sich also um echte Mehrzweckvermessungssysteme.

18/2/98

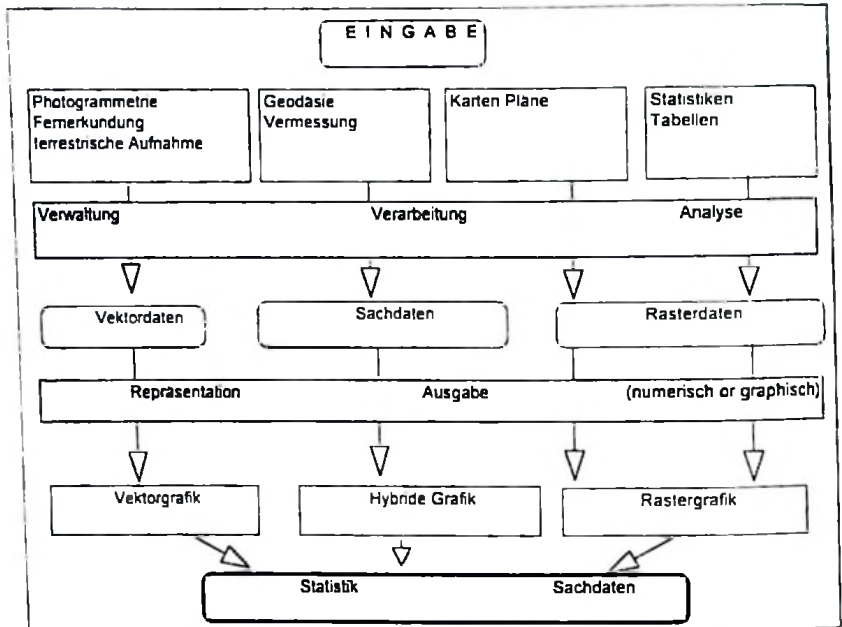


Abb. 2.1: Komponenten moderner Geoinformationssysteme (GRÜN 1991)

Als wichtigster Gesichtspunkt bleibt hier noch zu vermerken, daß Systeme der Photogrammetrie und Fernerkundung nicht nur Methoden und Sensoren zur Primärdatenakquisition zur Verfügung stellen, sondern weit darüber hinaus eine große Anzahl Verarbeitungsalgorithmen anbieten, welche zur Datenverarbeitung im Geoinformationssystem vorteilhaft genutzt werden können. Für diejenigen der Informationssysteme also, welche Rasterdatenstrukturen akzeptieren, stellen Photogrammetrie und Fernerkundung nicht nur Datenakquisitionsmethoden dar, sondern leisten erhebliche Beiträge zur Datenverarbeitung sowie zur Repräsentation und Visualisierung von Situationen, Vorgängen und Zusammenhängen von Objekten.

Ein digitales Geländemodell (DGM) ist die digitale Darstellung der Erdoberfläche durch Messung von Geländehöhen bei ausreichender Meßdichte. Die üblichen Modelle basieren auf Raster-, Gitter- oder Dreiecks- Darstellungen. Eine detaillierte Diskussion über digitale Geländemodelle findet sich bei WEIBEL und HELLER. (1991). Digitale Geländemodelle werden in den Geowissenschaften bereits seit den 50er Jahren eingesetzt (MILLER und LAFLAME 1958). Seither sind sie ein wesentlicher Bestandteil von GIS geworden. In einem GIS

liefert das DGM die Möglichkeit, die Erdoberfläche und deren topographische Eigenschaften dreidimensional darzustellen und in die verschiedenen GIS-Operationen einzubeziehen. Luft- und Satellitenbilder werden häufig dazu verwendet, die erforderlichen dreidimensionalen Geländekoordinaten zum Import in ein GIS zu gewinnen.

Um über Landressourcen hinreichende Informationen zu erhalten, lautet die Fragestellung „Was befindet sich wo?“. Hieraus ergeben sich zwei Deskriptoren eines Objektes: seine Eigenschaften und seine topographische Lage. Über Jahrhunderte geschah die Verbindung zwischen diesen beiden Deskriptoren durch Verknüpfung topographischer oder thematischer Landkarten. Moderne geographische Informationssysteme liefern die methodische Grundlage für quantitatives Modellieren räumlicher Zusammenhänge. Durch sie wurde das Schwergewicht in Informationssystemen verlagert von der reinen Inventur hin zur Analyse der Gegebenheiten. BERRY und RIPPLE (1994) bezeichnen diesen revolutionären Prozeß als einen Übergang von einem beschreibenden zu einem normativen System, von der Fragestellung „Was ist wo?“ hin zu einem „Was ist nun wo zu tun?“.

Die Geo-Informationssysteme gewinnen in der forstlichen Forschung und Praxis, und insbesondere in Verbindung mit der Fernerkundung immer mehr an Bedeutung. LACHOWSKI et al. (1992) beschrieben anhand von Beispielen aus dem USDA Forest Service, in welchem Maße Fernerkundung und GIS alle Phasen der Arbeiten unterstützen können. Sie illustrierten damit einen sich stets ausdehnenden Einsatz von Luftbildern, Satellitenaufzeichnungen, flugzeug-getragenen Video und Satellitennavigationssystemen (GPS). Weitere Beispiele finden sich bei HEIT und SHORTEID (1991), RIPPLE (1987, 1989) sowie MAGUIRE et al. (1991). GIS-Technologie, besonders in Verbindung mit digitalen Datenbanken, erleichtert die Gewinnung und Verarbeitung umfassender Informationen über Naturressourcen erheblich, da die Gewinnung vergleichbarer Informationen in der Vergangenheit zu kostspielig bzw. deren Analyse zu zeitaufwendig waren (DANGERMOND 1991).

CONGALTON et al. (1983) beschreiben die Arbeiten zur Erstellung einer Datenbank für ein GIS, welches in den Staaten Oregon und Washington eine Waldfläche von insgesamt 30 Millionen acres (7,5 Mio Hektar) abdecken sollte. In Kanada erfolgt die Forsteinrichtung in neunjährigem Zyklus stets unter Verwendung von Luftbildern. Jährlich werden Forstkarten mittels LANDSAT-Aufnahmen aktualisiert. Auch die Abnahme der Produktionsfläche durch

großräumige Kahlschläge und Waldbrände wird direkt aus Satellitenbildern ermittelt. Veränderungen werden am Bildschirm interaktiv kartiert und die forstlichen Datenbestände anschließend auf den neuesten Stand gebracht, sodaß sich das Informationssystem über die Waldfläche alle neun Jahre erneuert (ARONOFF 1989). MACLEAN et al. (1992) und OLSSON (1989) geben Beispiele für Inventuren über die Zustandsänderung von Waldbeständen (*change detection*). Holzvorräte werden oft exzessiv genutzt, sodaß effektive Systeme eingesetzt werden müssen um die Flächen- und Vorratsänderungen zu dokumentieren. GIS wurden eingesetzt um Baumarten- und Vitalitätsverteilung in Wäldern im Zusammenhang mit unterschiedlichen Umweltfaktoren in Verbindung zu bringen (z.B. DAVIS und GOETZ 1990, AKÇA et al. 1990, 1991, 1995). SCHNURR und TUINIVANUA (1992) setzten GIS bei der Nationalen Waldinventur in Fidschi ein. FELDKÖTTER (1994) führte eine Studie über GIS bei der Überwachung städtischer Baumbestände durch.

2.11 Das geographische Informationssystem *ARC/INFO*

ARC/INFO ist ein GIS-Software-Paket, welches auf Vektorbasis arbeitet. *ARC/INFO* unterscheidet beim Datenmanagement die Konzepte:

- Datenstrukturen für Geometrie und Topologie ("ARC")
- Datenstrukturen für thematische Attribute ("INFO")

Die Datenstrukturen für Geometrie und Topologie haben ein programmspezifisches Format. Die Attributinformationen werden dagegen in relationalen Datenbanken abgelegt, die z.B. mit dem Standard-Datenbanksystem dBASE verwaltet werden können. Das Konzept der getrennten Speicherung ermöglicht es, "die Geometrie und Topologie ... als ... Kern des Informationssystems anzusehen, dem verschiedene Themen (und damit verschiedene benutzerspezifische Datenbanken) überlagert werden können" (BARTELME 1989).

ARC/INFO realisiert ein Layer-Prinzip, indem die unterschiedlichen thematischen oder topographischen Informationen, bezogen auf eine gemeinsame Geometrie in separaten Ebenen (sogenannten "*Coverages*") organisiert werden. In der PC-Version des Programms wird jedes Coverage als MS-DOS Verzeichnis unter benutzerdefiniertem Namen gespeichert.

Abbildung 2.2 zeigt das Daten-Managementkonzept von *ARC/INFO* am Beispiel eines Polygon-Coverage (dabei ist in einem Punkt-Coverage die Datenverwaltung ähnlich wie in einem Polygon-Coverage).

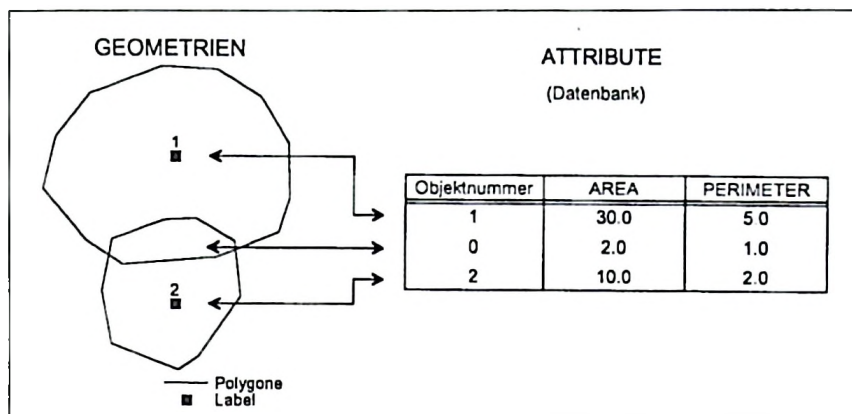


Abb. 2.2: Die Datentypen, welche von *ARC/INFO* verarbeitet werden (FELDKÖTTER 1994)

Geometrie- und Topologiedaten werden von *ARC/INFO* bei Neuanlegen eines *Coverages* selbstständig strukturiert. Der Inhalt des Feldes Objektnummer ist benutzerdefiniert und erhält bei Ausbleiben einer besonderen Definition durch den Benutzer den Wert "0". In Polygon-Coverages werden bei der Datenbankerstellung für jedes Polygon die Attribute "Fläche" (AREA) und "Umfang" (PERIMETER) automatisch errechnet und gespeichert. Die eindeutige Zuordnung von Geometrie- und Attributinformation eines als Punkt oder Polygon erfaßten Objektes wird durch zwei verschiedene, einander ergänzende, Verfahren realisiert:

- a) *Programmintern*: Eine Objektnummer wird automatisch vergeben und recordweise zusammen mit der Geometrie- und Attributinformation abgespeichert
- b) *Benutzerdefiniert*: Eine vom Benutzer selbst vergebene Objektnummer wird zusammen mit der Geometrie- und Attributinformation abgespeichert

Ein Benutzer hat zwei Möglichkeiten der Erweiterung einer Attribut-Datenbank:

- *Permanente Erweiterung* der Datenbank durch Einfügen weiterer Spalten in die Datenbankstruktur.
- *Temporäre Erweiterung* der Datenbank durch "Relation-Joins". Hierbei werden der Datenbank selbst keine weiteren Spalten hinzugefügt, sondern es erfolgt eine reversible logische Veknüpfung mit einer anderen Datenbank. Als Bindeglied fungiert hierbei in beiden Datenbanken gemeinsames Schlüsselfeld (Attribut), in der Regel die Objektnummer (FELDKÖTTER 1994).

Zum Zwecke einer GIS-gestützten Analyse werden normalerweise mehrere Datenebenen angelegt, welche dann im weiteren Verlauf der Arbeiten in unterschiedlicher Weise miteinander kombiniert werden können, je nach dem Ziel der jeweiligen Analyse. Durch die Kombination verschiedener Ebenen werden Informationen unterschiedlicher Art miteinander verschnitten, woraus sich dann problembezogene Schlußfolgerungen ableiten lassen (siehe Abbildung 2.3).

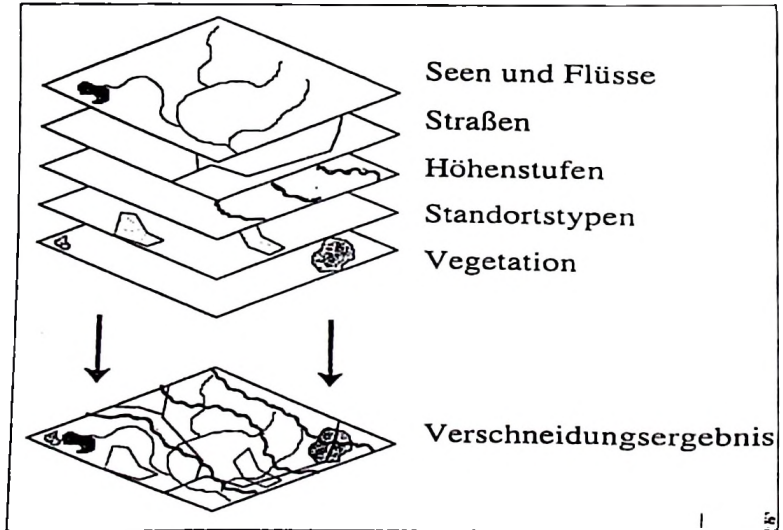


Abb. 2.3: Beispiel für verschiedene Datenebenen ("Coverages") und deren Kombination

Die Fernerkundungsdaten können direkt mit kartographischen Daten kombiniert bzw. verschnitten werden (z.B. ZOBRIST 1983, JACKSON 1987, LOGAN und BRYANT 1988, GOODENOUGH 1988, ANNONI et al. 1990 in SHEPHERD 1990). Zum Beispiel kann das GIS *ARC/INFO*, mit dem Modul *Image Integrator* Vektordaten mit Rasterdaten vereinigen.

3. Untersuchungsgebiet

3.1 Forstwirtschaft in Tansania

Etwa 50% der gesamten Landfläche von Tansania ist mit Wald- und Buschvegetation bedeckt. Der Anteil der unter Kontrolle stehenden Wälder beträgt dabei nur 15%. Diese Anteile schließen auch Aufforstungen für industrielle Zwecke ein. Die Waldressourcen Tansanias sind eines der bedeutendsten Produktionsmittel in der gesamten Wirtschaftsentwicklung (TANU 1967). Neben zahlreichen Dienstleistungen, wie Umweltschutz, Boden- Wasser- und Klimaschutz, dienen die Wälder v.a. der Bereitstellung von Rundholz, der Deckung des Bedarfs an Brenn- und Baumaterial sowie zur Gewinnung industrieller Güter (z.B. Fasern). Ferner produzieren sie Nahrungsmittel für Mensch und Tier als auch pharmazeutisch verwertbare Stoffe sowie Honig, Bienenwachs, und Pilze. Nach der Klassifizierung von TRAPANEL und LANGDALE - BRAUN (1969) sind in Tansania eine Vielzahl von verschiedenen Vegetationszonen bzw. -typen anzutreffen. Nach einer Zusammenstellung von GREENWAY (1943) kann die dortige Vegetation in folgende Typen klassifiziert werden:

- afroalpines Heide- und Moorland,
- geschlossene Wälder
- offene Wälder,
- Savannen und Grasland, Buschland und Dickicht
- Mangroven.

Abbildung 1 im Anhang dieser Arbeit zeigt die Anteile verschiedener Vegetationszonen sowie von Waldbeständen am Gesamtgebiet Tansanias. Die dazugehörigen Zahlen werden in Tabelle 3.1 angegeben.

Tab. 3.1: Anteile der verschiedenen Vegetationszonen sowie der Waldbeständstypen am Gesamtgebiet Tansanias

Waldtyp	Gesamtfläche (ha)	Produktive Fläche (ha)	Unproduktive Fläche (ha)
geschlossene Wälder	936.000	337.000	599.000
Savannen	32.641.000	25.803.000	6.838.000
offene Wälder	10.714.000	8.406.000	2.308.000
Mangroven	80.000	80.000	-
Total	44.371.000	34.626.000	9.745.000
gesetzlicher Status der Wälder			
Waldreservate	13.024.000	11.410.000	1.614.000
Wälder in National parks	2.000.000		2.000.000
Öffentlicher Wald	29.347.000	23.216.000	6.131.000
Total	44.371.000	34.626.000	9.745.000

Die als unproduktiv klassifizierten Wälder umfassen sowohl Einschränkungen der Nutzung aus physikalischen Gründen, z.B. Unzugänglichkeit, Standorts- und Geländeeigenschaften, aber auch gesetzlich geschützte Wälder, wie zum Beispiel alle Reservate, Nationalparks und Wasserschutzwälder.

Eine genaue Beschreibungen der in Kapitel 1 dieser Arbeit genannten Vegetationstypen in Tansania sind bei AHLBACK (1986) zu finden. Jedoch soll hier eine kurze Beschreibung der verschiedenen Waldtypen gegeben werden, da diese Formationen einerseits die Hauptvegetation in Tansania bilden und andererseits als dominante Pflanzengesellschaften im Untersuchungsgebiet auftreten.

3.2 Waldvegetation im Untersuchungsgebiet

Miombo-Wald ist eine Gesellschaft von Bäumen mit einer oder meist zwei Schichten, in denen sich die Kronen mehr oder weniger berühren um so einen leichten aber i.d.R. ununterbrochenen Kronenschirm zu bilden (TRAPNELI und LANGDALE - BRAUN 1969). Die Bäume besitzen ausgedehnte Kronen und eine Gesamthöhe von ungefähr 8 bis 18 m. Die Miombo-Vegetation bildet den größten Teil der Wälder in Tansania. Ihr Anteil liegt bei knapp 90% der gesamten Waldfläche bzw. bei 13% der gesamten Landfläche Tansanias (TEMU 1979). Zu den besonders dominanten Holzarten zählen *Julbernardia* und *Brachystegia spp.*, die bis zu 80% der Bäume repräsentieren (LUNDGREN 1975). Große Teile der Miombo-Wälder sind sowohl wegen des Vorkommens der Tse-Tse-Fliege als auch aufgrund der meist unfruchtbaren Böden und wegen des Wassermangels nur gering bevölkert. Häufige Feuer in Miombo-Wäldern lassen Zweifel daran aufkommen, daß dieser Vegetationstyp klimatisch bedingt ist. Heute wird eher angenommen, daß es sich um einen Feuerklimaxtyp handelt (TRAPNELL 1959). Wie zahlreiche Experimente zeigen, entwickeln sich Miombo-Wälder bei Ausbleiben von Feuer zu trockenen laubbabwerfenden Wäldern mit geringem Graswachstum und mit einem komplexeren Strukturaufbau, besonders in Gebieten mit höheren Niederschlägen.

Eine andere Waldgesellschaft stellen die *Combretum*-Wälder dar. Dieser Vegetationstyp tritt in Regionen mit einem trockeneren Klima oder trockeneren Böden an die Stelle von Miombo-Wäldern. Wenn der Einfluß von Feuer und Holznutzung aus den Miombo-Wäldern verbannt wird, könnten sich diese zu *Combretum*-Wäldern entwickeln. Das Wachstum von *Combretum*-

Wäldern wurde von STROMGAARD (1985, 1986), POCS (1976), LIND und MORRISON (1974) ausführlich studiert.

Die Untersuchungen wurden in Miombo-Wäldern durchgeführt. Die meisten dieser Wälder sind zu einem geringen Maß regulär bewirtschaftet um die illegale Holzentnahme zumindest einzudämmen. Jedoch wird die Entwicklung eines intensiven Management bisher noch nicht praktiziert, was hauptsächlich darauf zurückzuführen ist, daß bisher wissenschaftliche Daten über natürliche Wälder nur in geringem Umfang in Tansania vorhanden sind.

3.3 Lage des Untersuchungsgebietes

Die Untersuchung wurde in einem Teilgebiet des Kimani-Wassereinzugsgebietes ("catchment area") ausgeführt. Der Wald liegt in der Region Mbeya, im Süden Tansanias, welcher zur sogenannten "südlichen Hochlandregion" gehört. Das Kimani-Wassereinzugsgebietes läßt sich bezüglich seiner ökologischen Funktion in zwei unterschiedliche Teile, das obere und das tiefer gelegene Einzugsgebiet, trennen. Das gesamte Untersuchungsgebiet erstreckt sich von 34°5' bis 34°20' östlicher Länge und 8°35' bis 9°10' südlicher Breite. Die Gesamtfläche des Wassereinzugsgebietes beträgt 90728 ha, von denen der größte Teil von steilen Bergen gebildet wird, sodaß die meisten Teile unzugänglich sind. Die Untersuchungen wurden in einem zugänglichen Teil des oberen Reservoirs in der Höhenregion zwischen 1000 bis 2100 m ü.NN durchgeführt, die von ungefähr 5000 ha relativ dichtem Miombo-Wald bedeckt wird. Das Untersuchungsgebiet wird von den westlichen Hängen der Lugala-Berge und den östlichen und nördlichen Hängen der Kipengere-Berge begrenzt.

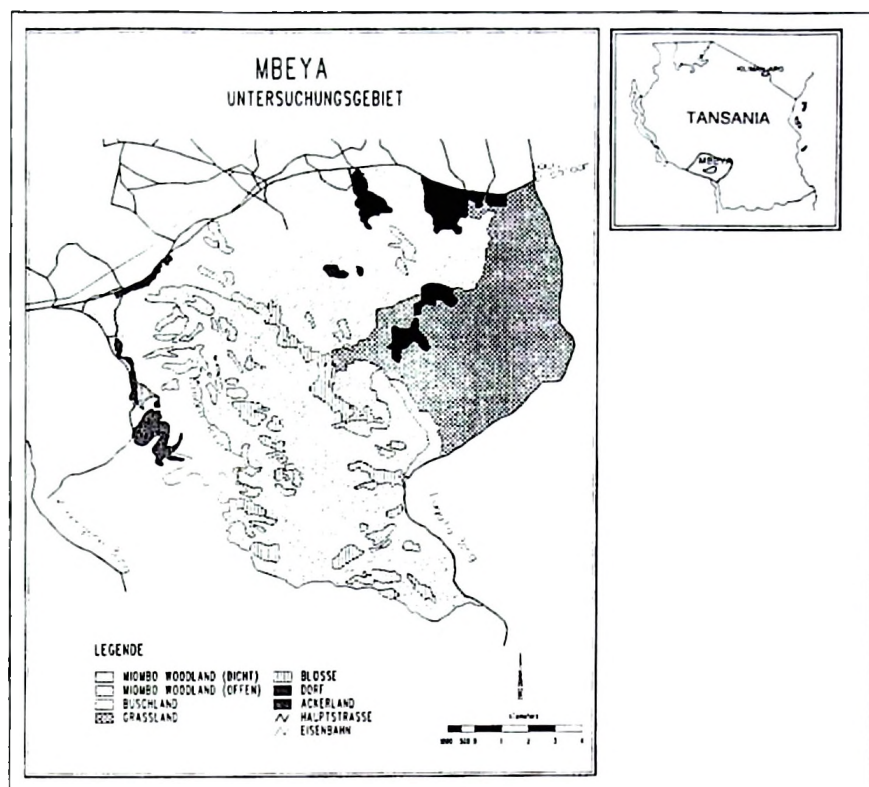


Abb.3.1: Karte des Untersuchungsgebietes mit Vegetationszonen

3.4 Geologie und Böden

Einen guten Überblick der Geologie des Untersuchungsgebietes vermittelt das Kartenwerk 'Geologische Übersicht von Tansania' in den (Viertel-Grad-) Blättern 71SW (Chimala) und 79NW (Ndumbi), welches im Maßstab von 1: 125000 vorliegt (ANON. 1989). Die Bildung des ostafrikanischen Rift-Valley Systems begann im Präkambrium. Seine weitere Ausdehnung und Vertiefung hielt jedoch bis ins Jurazeitalter an, also bis zu dem Zeitpunkt, als Gondwana zerbrach und die Kontinentaldrift einsetzte. Die Vertiefungen, die sich durch Sperren und durch das Zusammenschieben der Landmassen bildeten, entstanden während des Paläozoäns, des Tertiärs und des Quartärs. Dieses Gebirgssystem hat seit seiner Entstehung durch verschiedenartige Prozesse der Erosion und Ablagerung zahlreiche Modifikationen erfahren. So stellt das Kipengere-Gebiet die

ursprüngliche Gondwana- und Nach-Gondwana Oberfläche dar. Durch die lang andauernden Erosionsvorgänge des Kimani-Flusses entstanden die Wasser-Terrassen (Pediains) oberhalb der Usangu-Ebene, die auf ungefähr 1300-1500 m über dem Meeresspiegel gelegen sind. Der Kimani Fluß bildet, gemeinsam mit seinen zahlreichen Nebenflüssen, das größte Flußsystem im Untersuchungsgebiet.

Die meisten Böden im Untersuchungsgebiet sind hauptsächlich sandige Lehme, deren (negative) physikalische Eigenschaft besonders durch eine unvollkommene Drainage gekennzeichnet ist. Allgemein sind die Böden der Miombo-Wälder als nährstoffarm einzustufen und zeigen meist keine organische Auflagen, da die organischen Abfälle jährlich durch Brände oder durch Termiten aufgezehrt werden (TRAPNEL et al. 1976). Außerdem sind die Böden der Miombo-Wälder auch durch einen niedrigen Stickstoff- und Phosphorgehalt charakterisiert. Im Untersuchungsgebiet kommen in den tieferen Lagen auch Leimböden vor, die sich vermutlich aus dem ursprünglichen Seeböden entwickelt haben. Im südlichen Teil des tiefer gelegenen Einzugsgebietes kommen zusätzlich rezente Alluvialböden vor, die ihr Material aus dem oberen Einzugsgebiet durch die Sedimentfracht der Flüsse von den Kipengere-Bergen erhalten und ihrerseits Teile des unteren Einzugsgebietes in sandig-lehmige Böden verwandeln. Zur weiteren Darstellung der geomorphologischen Situation im Untersuchungsgebiet soll auch das Geländemodell (DGM), (siehe Abbildung 5.15 in Kapitel 5) dienen.

3.5 Klima

Das Untersuchungsgebiet ist durch ein semi-rides Klima charakterisiert. Kontinuierliche Aufzeichnungen der Niederschläge werden seit 1956 im Kimani-Wald durchgeführt. Ferner liegen auch Daten über Regenmessungen für die nahegelegenen Einzugsgebiete Mbarali, Chimala, Igawa und Rujewa vor. Sowohl Temperatur als auch Niederschlagsmenge variieren stark in Abhängigkeit von der Meereshöhe, so daß die jährlichen Gesamtniederschläge im Einzugsgebiet von 700 mm in den tieferen und 1200 mm in den höheren Lagen betragen.

In Abbildung 3.2 sind die durchschnittlichen monatlichen Niederschläge für Kimani dargestellt.

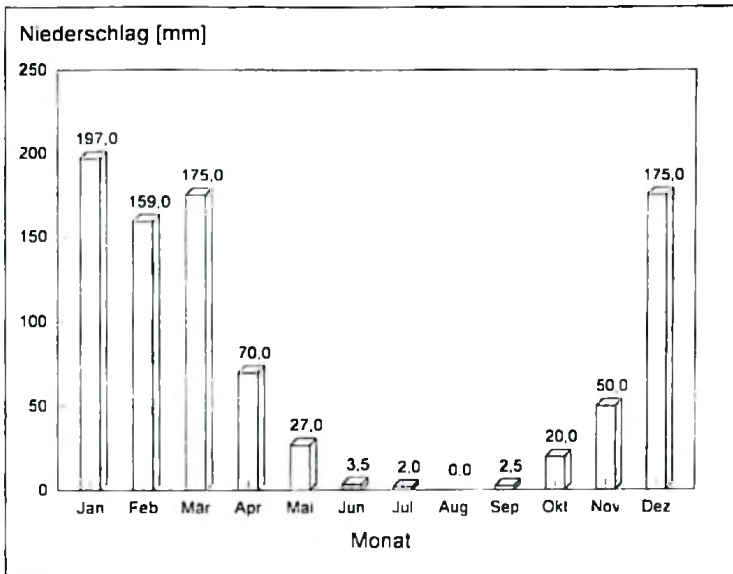


Abb. 3.2: Mittlerer monatlicher Niederschlag der Jahre 1955 bis 1987 im Kimani-Gebiet (KIP 1989)

Das Maximum der Niederschläge fällt in den Monaten November bis April, während in der übrigen Zeit des Jahres Trockenheit herrscht. Seit Beginn der Aufzeichnungen von Klimadaten in Tansania wird deutlich, daß die Niederschläge stets ein unregelmäßiges Verteilungsmuster aufweisen (ANON. 1977). Die höchsten Temperaturen werden in den Monaten Oktober und November erreicht, wobei die durchschnittliche Minimumtemperatur 19°C und das Maximum 32°C betragen. Die kühlest Monate sind Juni und Juli mit durchschnittlich 12°C (Minimaltemperatur) bzw. 24°C (Maximaltemperatur).

4 Material und Methoden

4.1 Material und Instrumente

Für die Untersuchung fand schon vorhandenes Luftbildmaterial Verwendung, welche von der Firma Photomap in Kenia im Rahmen eines Bewässerungsprojektes aufgenommen wurden. Nach Angaben des Vermessungsamtes in Tansania waren dies die aktuellsten Luftbilder für das Testgebiet. Die Aufnahmen sind von mäßiger, jedoch für die durchgeführten Untersuchungen ausreichender Qualität. Die technischen Daten für den Bildflug sind in der Tabelle 4.1 aufgeführt.

Tab. 4.1: Technische Angaben der verwendeten Luftbilder

Aufnahmedatum	August 1989
Uhrzeit	8 ⁴⁰ Uhr Ortszeit
Filmtyp	PAN schwarz /weiß
Kamera	Wild Uag 1053
Brennweite	153,30 mm
Mittlerer Bildmaßstab	1:20000
Flughöhe	ca. 3050 m über Grund
Flugrichtung	N ->S bzw. S ->N
Längsüberdeckung	60%
Querüberdeckung	20%
Bilder zur Verfügung gestellt von	Kimani Irrigation project / Survey and Mapping Division Dar-es-Salaam

Die der Planung zugrunde liegenden topographischen Karten aus dem Jahre 1982 haben den Maßstab 1:50000 und stammen aus einer Befliegung des Jahres 1977. Die sechs verwendeten Kartenblätter, welche das Testgebiet vollständig abdeckten, sind: Rujewa, Mabadaga, Ndumbi, West Kidugalo, Chimala und Igawa. Diese angegebenen Namen bezeichnen ebenfalls die Namen derjenigen Ortschaften, welche zur Deckung des Eigenbedarfs vollständig von der Forstwirtschaft abhängig sind. Die genauen Bezeichnungen der Kartenblätter sind der Tabelle 4.2 zu entnehmen.

Tab. 4.2: Spezifikation der verwendeten Kartenblätter

Kartenblatt - Nr.	Kartenblatt - Name	Serie	Ausgabe
246/1	Mabadaga	Y 742	1 - TSD
246/2	Rujewa	Y 742	1 - TSD
246/3	Chimala	Y 742	1 - TSD
246/4	Igawa	Y 742	1 - TSD
260/1	Ndumbi river	Y 742	1 - TSD
260/2	Kidugalo west	Y 742	1 - TSD

Weitere Angaben

Gitternetz	UTM Zone 36
Projektion	Transvers Mercator
Maßeinheit	Meter
Bezugsmeridian	33° 00' östl. von Greenwich
Bezugsbreitengrad	Äquator

Sämtliche Kartenblätter des Testgebietes wurden vom Vermessungs- und Kartenamt Dar-es-Salaam, Tansania bezogen.

4.2 Analytisches photogrammetrisches Auswertesystem KERN DSR 11-18, und Stereoskop WILD Aviopret

KERN DSR 11-18

Das KERN DSR 11-18 erlaubt eine rechnergesteuerte Luftbildstereoauswertung, wobei mathematische Beziehungen zwischen Bild-, Modell- und Geländekoordinaten durch die in das System vollintegrierten Rechner realisiert werden. Die Rechner übernehmen dabei die Aufgabe der räumlich-mechanischen bzw. optischen Lenker der sogenannten Analoggeräte. Eine optisch-geometrische Nachbildung des Stereomodells, die bei der klassischen Luftbildauswertung einen erheblichen Zeitaufwand erfordert, erübrigt sich (HUSS u.a., 1984 in AKÇA 1989). Mit Hilfe der entsprechenden Programme erlaubt dann das DSR 11-18 die Sammlung von Daten in digitaler Form aus dem stereoskopischen Paar photographischer Bilder. Ein Hauptrechner (VAX II der Firma DEC) kontrolliert das System, wobei er von einigen Hilfsprozessoren bei der Kontrolle bestimmter Funktionen innerhalb des Auswertungsgerätes unterstützt wird. Abbildung 4.1 zeigt den schematischen Aufbau des verwendeten analytischen Auswertungsgerätes. Das Auswertungsgerät besteht im wesentlichen aus 3 Hardware-Komponenten:

- einem optisch-mechanischen Grundgerät zur Betrachtung der Bilder und zur Messung von Bildkoordinaten und einem photogrammetrischen Bedienungsfeld.

- einem in das System vollintegrierten Hauptrechner (einschließlich Hilfsprozessoren) mit Bildschirm
- und peripheren Geräten wie Drucker, Plotter und Bandeinheit.

Das im Institut für Forsteinrichtung und Ertragskunde der Universität Göttingen zur Verfügung stehende Gerät hat große Bildträger (23 cm x 46 cm) und ermöglicht das gleichzeitige Orientieren und Auswerten zweier Bildpaare des gängigen Formats 23 cm x 23 cm. Die Orientierungsdaten beider Bildpaare können abgespeichert und jederzeit aufgerufen werden. Anhand der Orientierungsdaten kann von einem Stereomodell zum anderen gefahren werden. Dies ermöglicht im Bedarfsfall die gleichzeitige Untersuchung desselben Gebiets bzw. desselben Objekts zu zwei verschiedenen Aufnahmezeitpunkten, was für Zeitreihenanalysen von großem Vorteil sein kann.

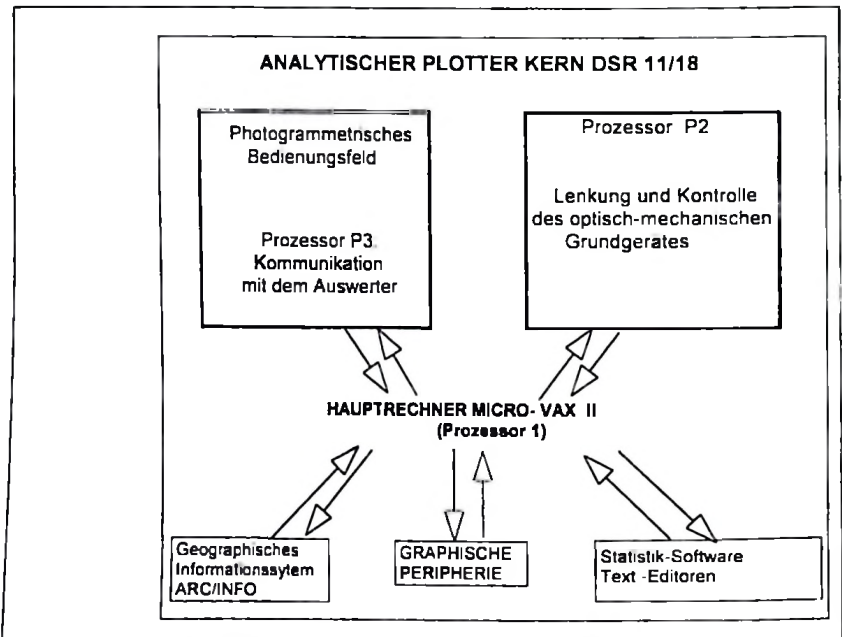


Abb. 4.1: Schematische Darstellung des Analytischen Auswertungsgerätes DSR 11-18 der Firma KERN

Die verschiedenen in dem Auswertesystem integrierten Programme erfüllen folgende Aufgaben:

- innere Orientierung der Luftbilder
- äußere Orientierung der Luftbilder
 - relative Orientierung
 - absolute Orientierung
- Auswertung der Luftbilder
 - Kartierung der Lage von Punkten, Linien und Flächen
 - Kartierung der Höhenkurven
- Aerotriangulation
- ggf. Einbindung von Spezialprogrammen

Die Meßdaten aus dem absolut orientierten Bildpaar werden in digitaler Form abgespeichert und stehen zur weiteren Verwendung innerhalb oder außerhalb des Systems DSR 11-18 zur Verfügung. In der vorliegenden Arbeit wurden beispielsweise die Daten in das Geographische Informationssystem ARC/INFO exportiert um dort topologische Beziehungen zwischen den kartierten Objekten herzustellen und mit Sachdaten zu verknüpfen.

WILD Aviopret APTI

Der WILD Aviopret ist ein Instrument zur stereoskopischen Betrachtung und visuellen Interpretation von Luftbildern. Es können mit ihm sowohl Diapositive als auch Kontaktabzüge betrachtet werden. Es erlaubt eine stufenlose Vergrößerung mit einem Faktor zwischen 3 und 15,5. Mit einem Kameraadapter können Bildausschnitte mit hoher Qualität abphotographiert werden.

4.3 Paßpunktbeschaffung

Die für die absolute Orientierung der Luftbilder notwendigen Paßpunkte wurden auf dem Aviopret ausgewählt und auf der zugehörigen topographischen Karte für die spätere Wiedererkennung im KERN DSR eingetragen. In einem weiteren Arbeitsschritt wurden die Koordinaten (Ostwert, Nordwert, Höhe ü.NN) eines jeden Punktes auf der Karte abgegriffen. Als besonders geeignet erwiesen sich dabei Wegekrenzungen, Wasserreservoirs, Flußeinmündungen und -gabelungen und Eckpunkte von Brücken. Die Verteilung der so ausgewählten Paßpunkte über das Untersuchungsgebiet zeigt die Abbildung 4.2.

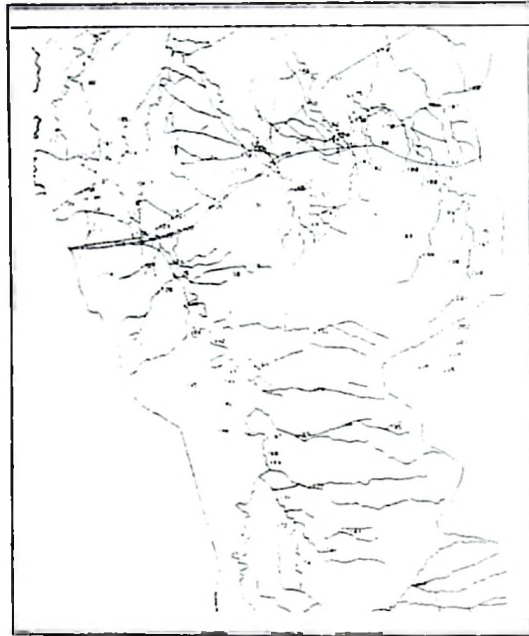


Abb. 4.2: Die Verteilung der Paßpunkte im Untersuchungsgebiet

4.4 Aerotriangulation

Wie aus der Abbildung 4.2 ersichtlich, konnten nur relativ wenige Punkte sowohl in den Luftbildern als auch in den Karten identifiziert werden. Daher mußte das Paßpunktnetz mit einer Aerotriangulation weiter verdichtet werden.

In dieser Untersuchung wurde die Aerotriangulation auf dem KERN DSR 11-18 mit Hilfe des Programms AETRI ausgeführt. Das Programm durchläuft vier Phasen zur Verdichtung des Paßpunktnetzes:

- Datenerhebung
- Streifenbildung
- Streifenausgleich
- Blockausgleich

Datenerhebung

Datenerhebung erfolgt in einzelnen relativ orientierten Modellen eines Streifens. Nach der relativen Orientierung wurden in der vorliegenden Untersuchung sechs aus der topographischen Karte 1:50000 abgegriffene Paßpunkte im ersten Luftbildmodell eingemessen. Das Programm AETRI schlägt dann die Position der zusätzlichen Modellverknüpfungspunkte vor. Nachdem der Auswerter an dieser Stelle einen gut definierten Punkt in diesem ersten Modell gefunden hat, wird im Nachbarmodell überprüft, ob sich auch dort dieser Punkt einwandfrei erkennen und einstellen läßt. Wenn dann später das jeweilige Nachbarmodell (im selben oder im Nachbarflugstreifen) im Auswertegerät liegt, wird der Auswerter vom Programm automatisch zu diesem Punkt geführt. Dabei werden die Identifikationsnummern der jeweilige Punkte vom Programm AETRI vorgegeben. Dieselbe Prozedur wird dann streifenweise für alle weiteren Modelle des Blockes durchgeführt, bis alle Stereomodelle des Blockes fest miteinander verknüpft sind.

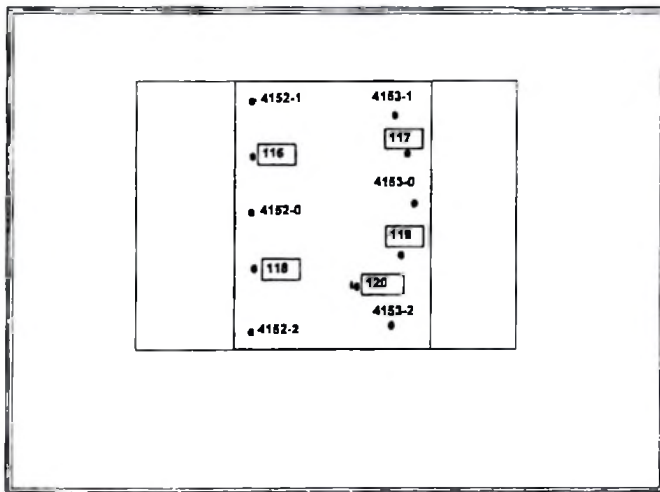


Abbildung 4.3: Nummerierung der Paßpunkte und der Verknüpfungspunkte in einem Modell. Linkes Stereobild ist das Photo Nr. 4152, rechtes Stereobild ist Bild Nr. 4153. Bekannte Paßpunkte bzw. Referenzpunkte für die Aerotriangulation sind in diesem Modell: 116, 117, 118, 119, 120. Verknüpfungspunkte sind dabei: 4152-1, 4152-0, 4152-2 und 4153-1, 4153-0, 4153-2

Streifenbildung

Nachdem für den gesamten Streifen Verknüpfungspunkte eingemessen wurden, wird eine Serie unabhängiger Modelle gebildet. Dabei hat jedes Modell sein eigenes Koordinatensystem (im Gegensatz zum Bildanschlußverfahren). Da nun aber benachbarte Stereomodelle durch Verknüpfungspunkte miteinander verbunden sind, besteht eine feste geometrische Beziehung zwischen ihnen, welche durch das Programm mathematisch hergestellt wird.

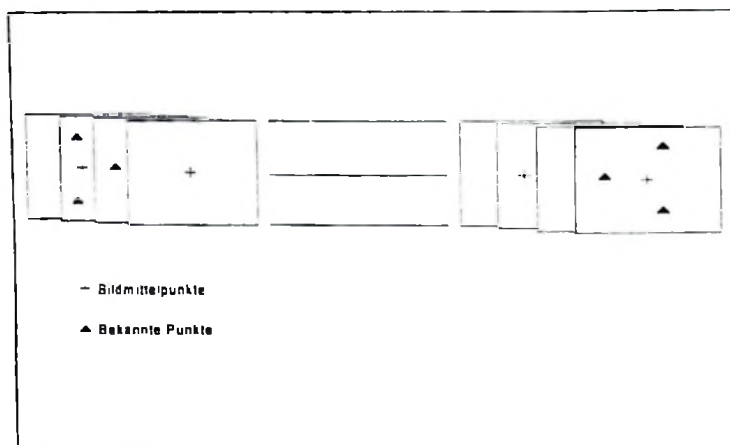


Abb. 4.4: Streifenbildung

Das Programm berechnet die Koordinaten der Punkte innerhalb eines ganzen Streifens relativ zu den Koordinaten des ersten Modells und bildet damit eine kontinuierliche Geometrie innerhalb eines Streifens. Anhand der ausgedruckten Residuen kann die Qualität der Streifenbildung beurteilt werden. Bis zu diesem Zeitpunkt liegen nur Modell- bzw. Streifenkoordinaten vor, jedoch keine Geländehöhen. Hierfür ist ein weiterer Schritt erforderlich.

Streifenausgleichung und Blockausgleichung

In Verbindung mit den Paßpunkten, für welche auch die Geländehöhen bekannt sind, berechnet das Programm aus den planimetrischen Koordinaten der Verknüpfungspunkte im Streifenkoordinatensystem auch die Höhenwerte der Verknüpfungspunkte. Auch für diese Berechnungen werden Residuen ausgedruckt, sodaß der Auswerter entscheiden kann, ob das Resultat akzeptabel ist, oder ob einige der Punkte überprüft werden müssen.

Für das Untersuchungsgebiet sollte die Lagegenauigkeit (RMS) zwischen 10 m und 15 m (entsprechend der Zeichengenauigkeit der Karte 1:50.000) und die Höhengengenauigkeit besser als 3 m betragen. Wo diese Werte nicht erreicht wurden, wurden die Fehler gesucht, bereinigt und die Berechnungen erneut ausgeführt. Aus den Verknüpfungspunkten entstanden auf diese Weise neue Paßpunkte, welche bei der späteren einzelmodellweisen Auswertung wie die ursprünglichen Paßpunkte für die absolute Orientierung verwendet werden konnten. Für jedes Modell wurden mindestens sechs Paßpunkte gewonnen. Die Dichte und Verteilung aller Paßpunkte über das Untersuchungsgebiet sind auf der Karte der Abbildung 4.5 dargestellt.

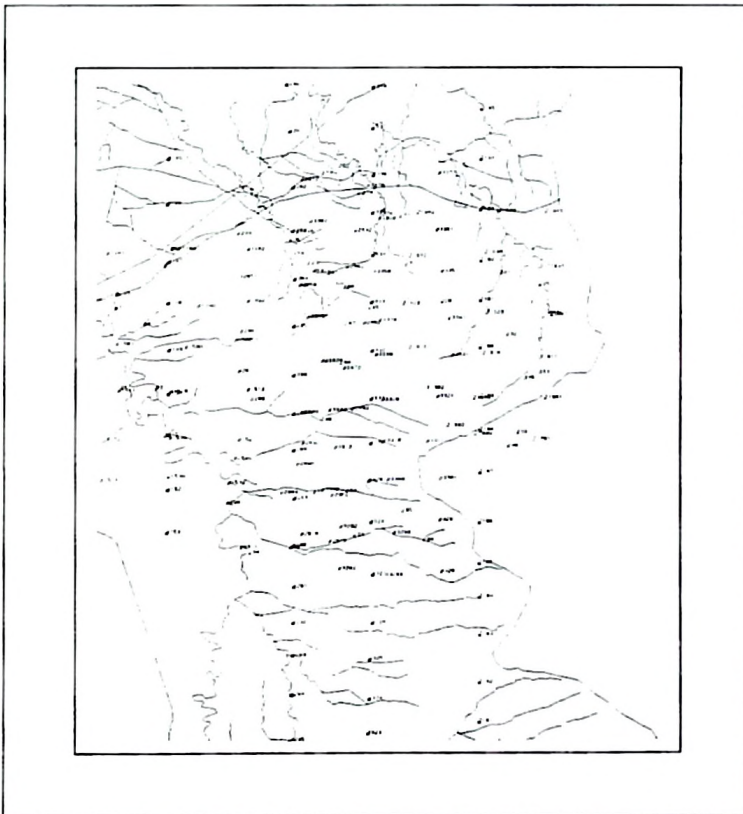


Abb. 4.5: Verteilung der Paßpunkte im Untersuchungsgebiet Zahlen repräsentieren die Lage der Paßpunkte (ursprüngliche und mit Hilfe des Programmes AETRI gewonnene neue Paßpunkte)

4.5 Orientierung der Luftbildmodelle im KERN DSR 11-18

Für die absolute Orientierung der Luftbildmodelle standen nach der Aerotriangulation eine ausreichende Zahl von mindestens sechs Paßpunkten zur Verfügung, welche in einer für das Orientierungsprogramm zugänglichen Datei mit Paßpunktnummern sowie x-, y-, und z-Koordinaten abgespeichert waren. Vor der Orientierung werden menügesteuert Angaben über Projektname, Daten der Aufnahmekammer, Flugrichtung und durchschnittliche Flughöhe über Grund eingegeben.

Innere Orientierung

Durch eine innere Orientierung wird das jeweilige Strahlenbündel der Luftbildaufnahme rekonstruiert. Dabei sind die Positionen der Rahmenmarken jedes der Luftbilder zu messen. Mittels Messung der Rahmenmarken werden unter Berücksichtigung der bekannten Kameradaten die Aufnahmenstrahlenbündel mathematisch rekonstruiert. Die Genauigkeit sollte mindestens 3 μm betragen. Dieser Wert konnte für alle Modelle eingehalten werden.

Relative Orientierung

Durch die relative Orientierung wird die Lage der Stereobildpartner relativ zueinander wiederhergestellt, wie sie in den beiden Aufnahmezeitpunkten bestand. Hierdurch wird das optische Strahlenbündel im gesamten Modellbereich zum Schnitt gebracht. Hierzu werden die y-Parallaxen im Bereich der sechs Gruber-Punkte durch den Operateur beseitigt. Wenn im gesamten Modellbereich keine y-Parallaxen mehr auftraten, ist das Stereomodell orientiert und die relative Orientierung ist abgeschlossen. Als maximale Toleranz war hier ebenfalls der Wert 3 μm an jedem Meßpunkt einzuhalten. Die Werte lagen jedoch meistens bei 0 oder 1 μm .

Absolute Orientierung

Durch die absolute Orientierung wird das Stereomodell in einem geodatischen System lage- und höhenmäßig definiert. Dazu werden im Luftbild eindeutig identifizierbare Referenzpunkte (Paßpunkte) benötigt, deren Koordinaten im geodatischen Bezugssystem bekannt sind. Bei der Bestimmung und Einmessung der Paßpunkte wurde die vom DSR 11-18 gebotene Option der getrennten Gewichtung von Lage- und Höhenkoordinaten eines Paßpunktes mit Werten zwischen 0 und 1 genutzt. Pro Modell wurden sechs bis acht Paßpunkte identifiziert, gemessen und den jeweiligen in der Referenzpunktdatei abgespeicherten Koordinaten im terrestrischen

Bezugskoordinatensystem zugeordnet. Bei der Auswahl der verwendeten Punkte ist auf deren gleichmäßige Verteilung über den Modellbereich zu achten. Die Resultate aller dieser Orientierungsschritte werden dauerhaft gespeichert und können bei abermaliger Auswertung desselben Modells einfach aufgerufen und geladen werden. Es ist dann nur noch die innere Orientierung der Bilder nötig, wodurch erheblich Zeit gespart werden kann. Die verschiedenen Orientierungsschritte im analytischen Auswertungsgerät KERN DSR 11-18 sind in der Abbildung 4.6 schematisch dargestellt.

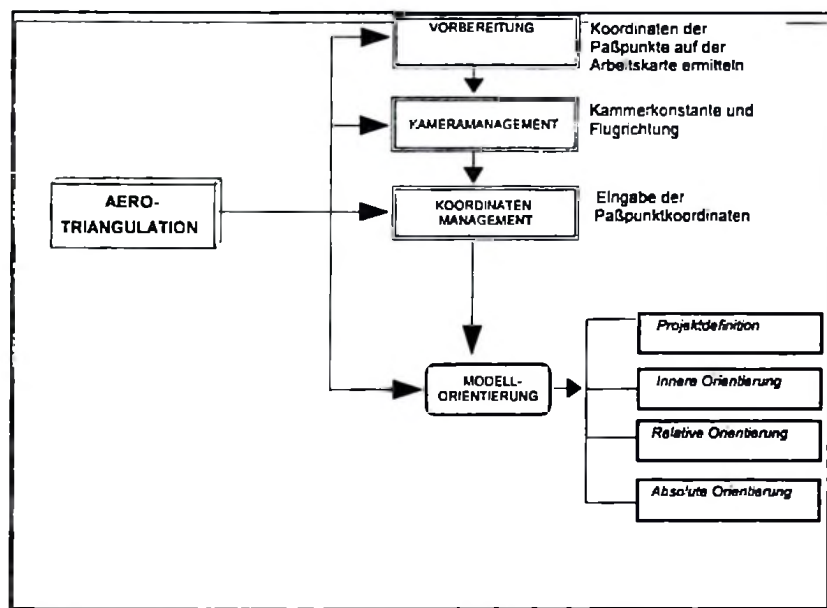


Abb 4.6: Schematische Darstellung der Luftbildorientierung im KERN DSR 11-18

4.6 Bildinterpretation

Die Bildinterpretation wurde im Aviopret APT-1 vorgenommen. Das Ziel der Interpretation war die Stratifizierung des Untersuchungsgebietes und Delinierung der Strätengrenzen in den Luftbildern. Das Unterscheidungskriterium war hierbei die Kronendachdichte der Waldflächen. Auf einem der Stereobildpartner wurde eine Transparentfolie angebracht, auf welcher im Verlauf der Interpretation die Delinierung mit einem permanenten Faserstift festgehalten wurde.

Der Miombo Wald des Untersuchungsgebietes, wurde nach unterschiedlichen Kronenschlußgraden klassifiziert. Hierzu wurden drei Klassen ausgeschieden:

- | | |
|---------------|---------------------------|
| - dicht | (Kronenschlußgrad >60%) |
| - mitteldicht | (Kronenschlußgrad 30-50%) |
| - offen | (Kronenschlußgrad <30%) |

Weitere Landnutzungsarten, welche ebenfalls deliniert wurden, waren: Landwirtschaftlich genutzte Fläche, Siedlungsgebiete, Buschwald und Savanne. Die Delinierungen wurden dann im KERN DSR 11-18 stereoskopisch digital kartiert. Die Koordinatendateien wurde danach in das Format ARC/INFO konvertiert und eine Karte des Untersuchungsgebietes erstellt (siehe Abbildung 3.1).

4.7 Auswahl der Stichprobenpunkte

Ein rechtwinkliges Punktraster mit einer Maschenweite von 500 m x 250 m wurde definiert und im ARC/INFO System auf der Ebene der Karte überlagert. Es resultierten 507 regelmäßig verteilte Punkte, an denen später die Probekreismessungen im Luftbild durchgeführt wurden. In jedem Probekreis wurde die Anzahl von Bäumen ermittelt und die Baumhöhen gemessen sowie der Kronenschlußgrad geschätzt. Für die terrestrischen Messungen wurden aus dieser Grundgesamtheit 43 Stichproben gezogen. Hieraus ergab sich eine Verteilung der terrestrischen Stichprobenmessungen von 1500 m x 1000 m. Die Probekreise umfaßten jeweils bei einem Radius von 17,84 m eine Fläche von 0,1 ha. Der Probekreismittelpunkt wurde durch die Koordinate eines jeden selektierten Rasterpunktes bestimmt.

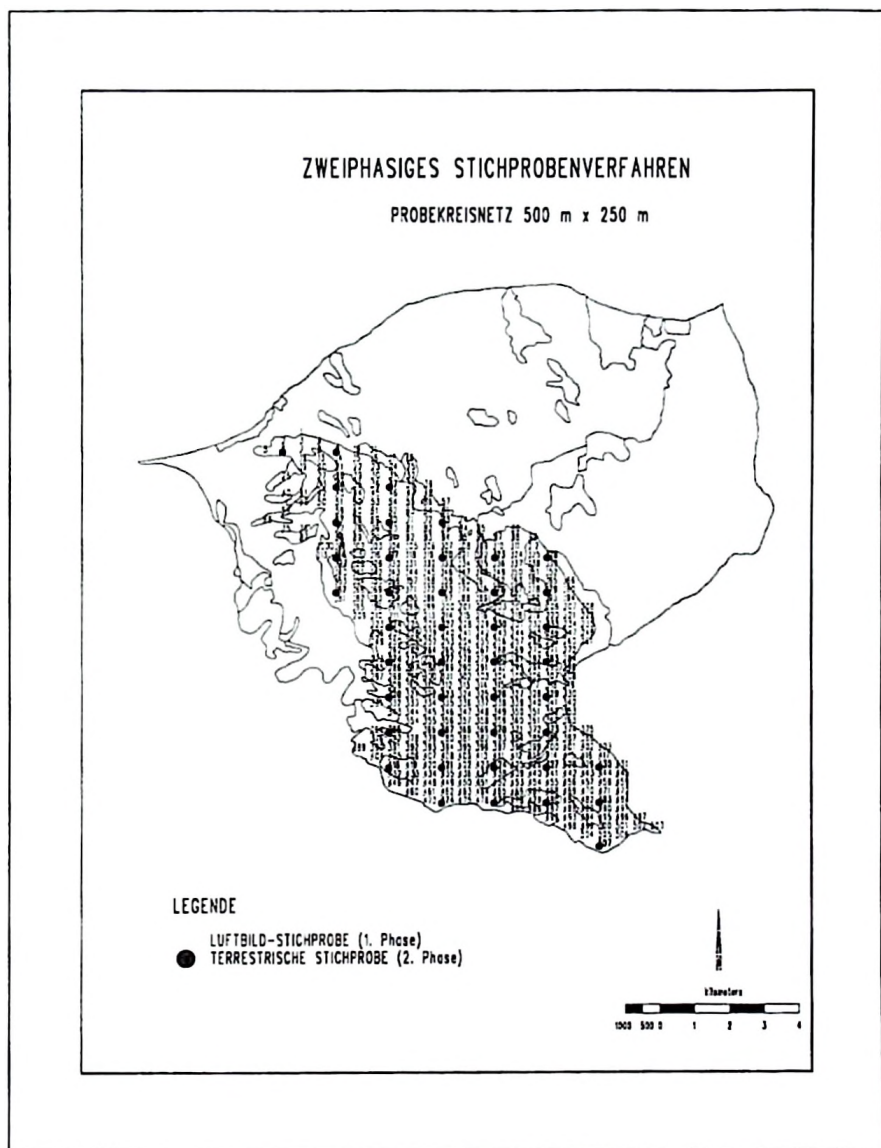


Abb. 4.7: Schema der Stichprobenpunkte im Untersuchungsgebiet

4.8 Baumhöhenmessung im KERN DSR 11-18

Die Koordinaten der Stichprobenpunkte wurden in der VAX II gespeichert und in das KERN DSR 11-18 geladen. Der Auswerter wird dann vom System direkt zu jedem einzelnen Stichprobenmittelpunkt gefahren. Von einem Probekreiszentrum aus wurde im Stereomodell ein Radius von 17,84 m definiert. Höhenmessungen wurden dann nur noch innerhalb des definierten Kreises durchgeführt.

Die Baumhöhe wird definiert als der Höhenunterschied zwischen der Höhe des Baumwipfels und der Höhe des Stammfußes. Das Problem, welches sich bei der Luftbildauswertung in dichten Waldbeständen stellt, ist, daß sich der Stammfuß oft nicht präzise erkennen und einstellen läßt. Um trotzdem akzeptable Messergebnisse zu erhalten, wurde für jeden Probekreis aus den Meßwerten deutlich erkennbarer Stellen des Waldbodens in der Nähe des eigentlichen Probekreises eine Regressionsebene berechnet. Hierdurch konnte für jeden gemessenen Baum die Höhe seines Stammfußes mit der Regressionsgleichung

$$z = f(x_i, y_i) \quad 4.1$$

geschätzt werden. Der Kronenwipfel wurde angefahren und dreidimensional gemessen. Aus dessen planimetrischer Koordinate (X, Y) und der Höhe der Regressionsebene an dieser Stelle wurde die Höhe des Stammfußes geschätzt. Aus der an der definierten Stelle ermittelten Geländehöhe wurde mit Hilfe eines speziellen Programms (in *Turbo Pascal* geschrieben) die Baumhöhe berechnet.

Das geschilderte Meßverfahren für Bäume in dichten Bestandesteilen wird in Abbildung 4.8 dargestellt.

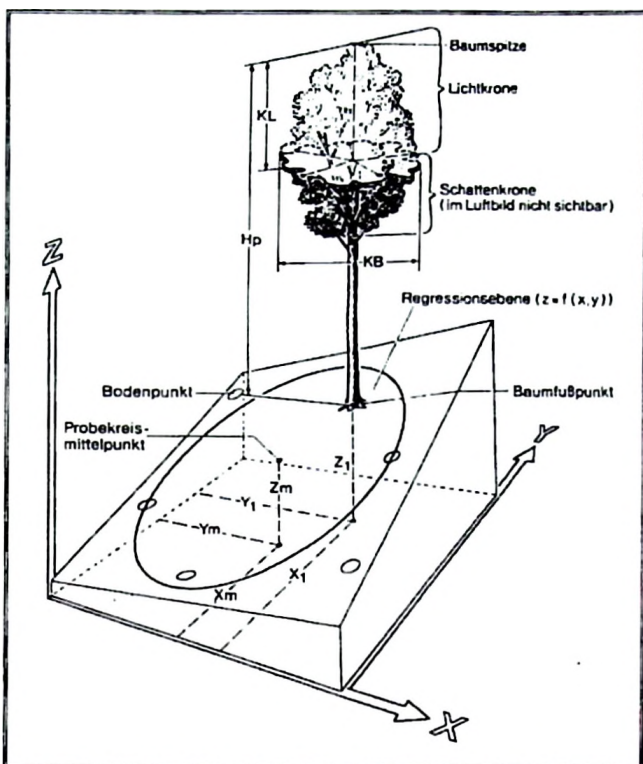


Abb. 4 8: Schematische Darstellung der Regressionsebene zur Ermittlung der Baumfußpunkthöhe (AKÇA 1989, WOLF 1992)

4.9 Schätzung des Kronendeckungsgrades und der Stammzahl eines Probekreises

Der Kronendeckungsgrad wurde im Stereomodell in 10%-Stufen visuell geschätzt indem die Kronendeckung im jeweiligen Probekreis mit einer Kronendichteskala (siehe Abbildung 4.9) verglichen wurde. Die Stammzahl wurde durch einfache Auszählung ebenfalls im Stereomodell des KERN DSR 11-18 ermittelt. Die Eingabe der beiden genannten Meßwerte in eine Datei erfolgte am Terminal des KERN DSR 11-18. Sie standen dann für weitere Auswertungen in digitaler Form zur Verfügung.

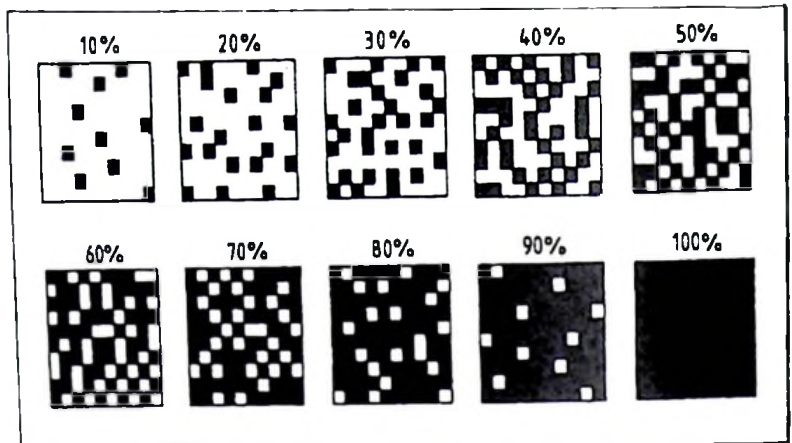


Abb. 4.9: Kronendichteskala (HUSS u.a. 1984)

4.10 Erstellung eines Digitalen Geländemodells (DGM)

Für das Untersuchungsgebiet wurde ein digitales Geländemodell mit einer Rasterweite von 50 m x 50 m angefertigt. Die planimetrischen Positionen für die insgesamt mehr als 30.000 Höhenmessungen wurden mit ARC/INFO generiert. Die Datei wurde in das KERN DSR 11-18 importiert, wo mit ihrer Hilfe der Auswerter an jede Meßposition gefahren wurde um dort die jeweilige Geländehöhe zu messen. Die Höhenmessungen wurden zusammen mit den planimetrischen Werten in einer neuen Datei gespeichert, welche im nächsten Schritt in ARC/INFO importiert wurde um dort mit dem Programm TIN das digitale Geländemodell in Form eines Drahtgittermodells zu erstellen (siehe Kapitel 5, Abbildung 5.16).

4.11 Geländeaufnahmen

4.111 Identifikation der Probeflächenmittelpunkte im Gelände

Für die Feldarbeit wurden die ausgewählten Probeflächenmittelpunkte unter einem Spiegelstereoskop auf die Kontaktkopien der Luftbilder und später auf die topographischen Karten übertragen. Bei den Feldarbeiten wurden sowohl die Karten als auch die Luftbilder mitgeführt. Im Gelände wurden die Luftbilder zur besseren Erkennung von Details mit einem Taschenstereoskop betrachtet. Zusätzlich zu den topographischen Originalkarten wurde ein weiterer Kartensatz in das Gelände genommen, in welchen bereits die Befunde der vorangegangenen Luftbildinterpretation eingezeichnet worden waren.

Zum Auffinden der Probekreise im Gelände erfordert die Identifizierung des ersten Probekreises besonders große Sorgfalt. Die jeweils benachbarten Probeflächen konnten dann relativ zum Zentrum des ersten Probekreises einfach unter Berücksichtigung der im Luftbild erkennbaren Gegebenheiten mit Hilfe des Richtungswinkels und der Entfernung eingemessen werden. Der Einsatz der drei Orientierungsmedien (topographische und thematische Karte sowie Kontaktabzüge der Luftbilder) zusammen mit der beschriebenen Methode der Identifikation gewährleistete ein sicheres Auffinden der Punkte im Gelände.

4.112 Messungen in den Probeflächen

Nachdem der Probekreismittelpunkt sicher bestimmt war, war ein Kreis mit dem horizontalen Radius von 17,84 m abzustecken. In Hanglagen wurde dabei der Radius mit der Hangkorrekturformel

$$r' = \frac{r}{\sqrt{\cos \alpha}} \quad 4.2$$

r = Geländestrecke des Radius vor der Korrektur (17,84 m)

α = mittlere Hangneigung

r' = Radius für die Fläche 0,1 ha nach der Korrektur im Gelände korrigiert.

In den terrestrischen Probekreisen wurden folgende Messungen vorgenommen:

- Brusthöhendurchmesser (BHD) aller Baume, getrennt nach Baumarten
- Baumhöhen von 3 bis 5 Bäumen aus dem gesamten Durchmesserbereich

Der BHD wurde mit Hilfe eines 1,3 m langen Stocks und einer Kluppe ermittelt. Die Höhenmessung der Probebäume erfolgte mit dem Suunto Höhenmesser. Zur Bestimmung der Biomasse wurden ein bis drei Bäume je Probekreis gefällt.

Aufgrund der großen Artenvielfalt im Miombo-Wald ist die Baumartenbestimmung relativ schwierig. In einigen Fällen konnte der botanische Name eines Baumes nicht direkt vor Ort notiert werden. In einem solchen Fall wurde der lokale Name verwendet, eine Probe (Blätter, Borke oder Früchte) gesammelt und nummeriert und zur genauen Bestimmung in das Herbarium geschickt.

4.113 Ermittlung des Kronenschlußgrades im Gelände

Die Ermittlung der Baumkronenprojektion im Gelände ist relativ aufwendig. Ablotungen der Kronenperipherie sind schwierig vorzunehmen, weil der gemittelte Perimeter oft schwierig zu schätzen ist, da die Kronen im allgemeinen nicht kompakt geformt und oft mit Ästen benachbarter Bäume verzahnt sind.

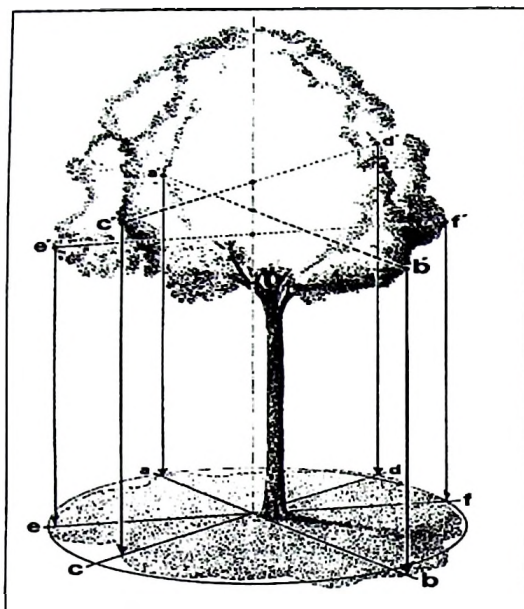


Abb. 4.10: Geländemessung des Kronenschlußgrades

Die Kronenprojektionsfläche wurde als die Fläche bestimmt, welche begrenzt wird von einem Kreis, der den mittleren Kronenumfang beschreibt. Dieser Durchschnittswert kann auf unterschiedliche Weise hergeleitet werden:

- der Mittelwert aus Maximal- und Minimaldurchmesser
- der Mittelwert aus dem zweifachen Minimal- und zweifachen Maximalradius vom Stammbasiszentrum zum Kronenrand
- der Mittelwert aus zwei rechtwinklig zueinander gemessenen Kronendurchmessern, deren Richtung unterschiedlich zu bestimmen ist, z.B. Nord-Süd- und Ost-West-Richtungen

KRAMER und DONG (1987) empfahlen drei verschiedene Methoden: Dreiecksmodell, Mittelkreismodell und Teilkreismodell. Die in dieser Untersuchung verwendete Methode ähnelt dem Mittelkreismodell. Für jeden Baum innerhalb des Probekreises wurden drei Seitenäste für die Kronendurchmesserbestimmung ausgewählt. Zwei dieser drei ausgewählten Äste waren stets der jeweils längste und kürzeste aller Äste des zu untersuchenden Baumes. Der dritte wurde dann so ausgewählt, daß auch der Bereich zwischen den beiden ausgewählten Ästen gut repräsentiert wurde. Die Spitzen der ausgewählten Äste wurden mit Fluchtstangen abgelotet und die Lotfußpunkte mit einem Meßband eingemessen. Der Kronendurchmesser wurde berechnet als das arithmetische Mittel aus den drei Meßwerten. Die Kronenprojektionsfläche wurde dann berechnet nach der Formel

$$A = \pi \frac{d^2}{4} \quad 4.3$$

Die Summe aller Kronenprojektionsflächen des Probekreises, dividiert durch 1000 m² multipliziert mit 100 ergibt dann den prozentualen Kronenschlußgrad je Hektar.

4.114 Biomasseschätzung der gefällten Bäume

Die Länge der gefällten Bäume wurde mit dem Maßband gemessen. Die Äste wurden glatt am Stamm abgetrennt und dann nach ihrer Größe in zwei Gruppen sortiert. Eine Gruppe umfaßt Äste mit einem Astansatzdurchmesser von weniger als 7 cm, die andere solche mit einem größeren Durchmesser. Dann wurde der Stamm in Abschnitte zerlegt. Der unterste Abschnitt erhielt eine Länge von 1,3 m, alle folgenden von zwischen 1,5 und 2,0 m Länge, je nach Form und Länge des tatsächlich vermarktungsfähigen Sortiments.

Die Abschnitte wurden mit einer 100 kg-Waage gewogen. Daher mußten schwerere Abschnitte wiederum in wägbare Abschnitte getrennt werden. Zuvor wurden Länge und Enddurchmesser gemessen und alle Meßwerte notiert. Auch das Frischgewicht der Äste wurde gegliedert erhoben für Äste geringer als 7 cm und solche stärker als 7 cm Durchmesser am Astansatz. Die Laubmasse konnte nicht ermittelt werden, da zur Zeit der Feldarbeiten die Bäume im unbelaubten Zustand waren. Die Frischgewichte wurden unmittelbar nach der Fällung und sehr rasch gemessen, damit der Gewichtsverlust durch Flüssigkeitsverdunstung möglichst gering gehalten werden konnte. Das Gesamtfrischgewicht eines Baumes wurde dann durch Addition aller Teilgewichte ermittelt.

4.115 Stichprobennahme für die Ofentrocknung

Eine Stammscheibe wurde an jedem Endstück eines Abschnittes (auch der Äste) abgetrennt und aus diesen ein keilförmiges Holzstück entnommen. Daher hing die Anzahl der Probestücke pro Baum jeweils von der Anzahl der Teilstücke ab, in welche der Baumstamm bzw. dessen stärkere Äste zerlegt worden war. Von dünneren Ästen wurden jeweils 4 bis 8 Abschnitte entnommen, je nach Größe der jeweiligen Krone. Alle Proben wurden gekennzeichnet, in Plastikbeuteln an einem kühlen Ort aufbewahrt und später ins Meßlabor gebracht, wo von jedem Holzstück die Borke entfernt und das Frischgewicht von Holz und Borke getrennt ermittelt wurde. Der Meßwert wurde schriftlich dem jeweiligen, durch eine eindeutige Nummer zu identifizierenden, Teilstück zugeordnet.

4.116 Ofentrocknung und Trockenmasseermittlung

Die Holz- und Rindenproben wurden für mindestens 24 Stunden bei 103° C getrocknet und die Meßwerte notiert. Danach wurden die Stücke im Ofen abermals getrocknet und danach nochmals gewogen. Dieser Vorgang wurde so oft wiederholt, bis die Meßwerte sich nicht mehr veränderten. Insgesamt verblieben dabei die Proben 48 bis 72 Stunden im Trockenofen. Während der Messungen wurde sichergestellt, daß die Proben keine Feuchtigkeit aus der Luft aufnehmen würden, indem sie in einem "Desiccator" (Trockenapparat) zwischengelagert wurden.

Anschließend wurde das Trockengewicht für den gesamten Baum ermittelt. Hierzu wurde zunächst für jedes Teilstück das Verhältnis von Trockengewicht zu Frischgewicht und hieraus wiederum der Mittelwert der berechneten Verhältnisse berechnet. Dieser Mittelwert wurde dann zur Berechnung des Trockengewichts des gesamten Stückes verwendet. Die Summe der Trockengewichte sämtlicher Teilstücke eines Baumes ergab schließlich das Trockengewicht des Baumes.

4.12 Auswertung

Die Auswertungen erfolgten mit verschiedenen Programmen, je nach Zweckmäßigkeit für die jeweilige Berechnung. Das mathematisch-statistische Auswertungsprogramm SAS wurde vor allem verwendet für die Regressionsanalysen, Variablensuche und Modellerstellung. Microsoft EXCEL wurde für die graphische Darstellung der Werte verwendet und für andere

Berechnungen, wie deskriptive Statistik und einfache Regressionen, wurde WINSTAT eingesetzt.

4.121 Die Höhenkurve

Für die Erstellung der Höhenkurve für das Untersuchungsgebiet wurden insgesamt 231 Höhen- und BHD-Messungen vorgenommen. Die Auswahl der Bäume erfolgte unter dem Gesichtspunkt einer ausreichenden Repräsentation der gesamten Durchmesserverteilung aller Bestände. Nach MICHAÏLOW (1943) müssen die gewählten Funktionen für die Erstellung einer Höhenkurve drei Voraussetzungen erfüllen:

- (1) Die Funktion soll die Ordinate (Y-Achse bzw. Höhenachse) bei 1,3 m schneiden.
- (2) Die Funktion soll sich bei zunehmendem BHD asymptotisch einem Grenzwert nähern.
- (3) Die Funktion soll einen Wendepunkt haben.

Unter diesen Gesichtspunkten wurden die folgenden Funktionen geprüft:

Prodan Funktion:

$$h = 1.3 + \frac{d^2}{A + B \cdot d + C \cdot d^2} \quad 4.4$$

Peterson Funktion:

$$h = 1.3 + \left(\frac{d}{A + B \cdot d} \right)^k \quad 4.5a$$

Diese grundlegende Funktion wurde von Peterson in zweierlei Weise modifiziert:

$$h = 1.3 + \left(\frac{d}{A + B \cdot d} \right)^2 = 1.3 + \frac{d^2}{A^2 + ABd + B^2 d^2} \quad 4.5b$$

$$h = 1.3 + \left(\frac{d}{A + B \cdot d} \right)^{1.75} \quad 4.5c$$

Die Gleichung 4.5 b ist ein Spezialfall der Prodan-Funktion (4.4) mit Zusatzbedingung an die Parameter A, B und C.

Die in den genannten Funktionen verwendeten Abkürzungen sind:

h	Höhe in Metern
d	BHD
A, B, C	Koeffizienten der Funktion

4.122 Regressionsmodell zur Schätzung der frischen und trockenen Biomasse für Einzelbäume

Für die Erstellung des Modells zur Schätzung der frischen und trockenen Biomasse von Einzelbäumen und ihrer Bestandteile (Äste und Stämme ab 7 cm BHD) wurden die Daten von 148 Bäumen verwendet, deren BHD zwischen 7 cm und 35 cm lagen.

In Streudiagrammen wurden zunächst die Gewichte von Stamm, Ästen und des gesamten Baumes dem leicht zu messenden BHD zur visuellen Überprüfung des Zusammenhangs zwischen dem BHD und diesen Variablen gegenübergestellt. Anschließend wurden verschiedene Modelle mit unterschiedlicher Anzahl von Variablen getestet und die drei besten Modelle mit jeweils zwischen einer und fünf Variablen ausgewählt. Die dabei verwendeten Kriterien waren R^2 , (einfaches bzw. multiples Bestimmtheitsmaß), C_p -Wert und MSE (mittlerer quadratischer Fehler). Diese Methode ähnelt der von FURNIVAL und WILSON (1974) vorgestellten, welche von den Autoren als "best subset method" bezeichnet wurde. Dabei werden die besten Kombinationen von Schätzvariablen durch Regression ermittelt. Das SAS-Programm berechnet alle möglichen geeigneten Regressionen mit Hilfe der Kriterien R^2 , angepasstem R^2 und C_p (MALLOWS 1973). Parallel wurde die Methode der Rückwärts-Eliminierung ("backward elimination procedure") des SAS Pakets angewendet. Die besten Modelle aus den beiden Methoden wurden danach weiter miteinander verglichen.

Die verwendeten Variablen waren BHD und Höhe, Kombinationen in ihrer ersten und zweiten Potenz sowie ihre Produkte (BHD^2 , H^2 , $BHD \cdot H$, $BHD^2 \cdot H$, $BHD \cdot H^2$ und $BHD^2 \cdot H^2$).

Die überprüften Modelle sind:

<i>Exponentialmodell</i>	$Y = \text{Exp}(BHD)$ $Y = e^{BHD}$	4.6
--------------------------	--	-----

<i>Potentialmodell</i>	$Y = b_0 BHD^{b_1}$	4.7
------------------------	---------------------	-----

<i>Polynom zweiten Grades</i>	$Y = a + bBHD + cBHD^2$ (CUNIA 1979)	4.8
-------------------------------	--------------------------------------	-----

<i>Allometrisches Modell</i>	$Y = aBHD^b H^c$	4.9
------------------------------	------------------	-----

Logarithmisches Modell der Form

$\ln Y = a + b \ln BHD + c \ln BHD$	4.10
-------------------------------------	------

Nichtkonstantes Modell (SLOBODA 1984)

$$Y = H(a + b \cdot BHD + c \cdot BHD \cdot H)$$

$$Y = a \cdot H - b \cdot BHD \cdot H + c \cdot BHD \cdot H^2$$

4.11

Die Variablen für alle genannten Modelle sind

Y	Biomasse (frisch und trocken)
BHD	Brusthöhendurchmesser
H	Baumhöhe
ln(BHD)	Logarithmus naturalis des BHD
ln(H)	Logarithmus naturalis der Höhe
a, b, c	Koeffizienten

4.123 Die Kriterien bei der Auswahl der geeigneten Modelle

Für die Auswahl der endgültigen Regressionsmodelle für die Biomasseschätzung des Einzelbaumes wurden die folgenden Aspekte berücksichtigt:

- Die Variablen sollten biologisch sinnvoll sein
- Das Modell sollte so wenige Variablen wie möglich beinhalten
- Die Variablen sollten möglichst leicht und billig zu messen sein
- Residuenverteilung: es soll eine Residualanalyse durchgeführt werden um die Verteilung, Standardabweichung, Autokorrelation und Ausreißer zu überprüfen
- Bestimmung von R^2 : das Bestimmtheitsmaß R^2 wurde nur in untransformierten Modellen verwendet
- $C(p)$ Werte nach MALLOWS (1973): Vergleicht die Fehlerquadratsumme eines auf p unabhängige Variablen reduzierten Modells mit der des vollständigen Modells. Idealfall wäre $C(p) = p$

Die $C(p)$ Statistik nach MALLOWS (1973) hat Bedeutung erlangt bei der Auswahl von Variablen und Modellen. $C(p)$ -Werte berücksichtigen die Gesamtheit der Fehler (zufälliger Fehler und systematischer Fehler).

Der $C(p)$ -Wert wird über

$$C_p = \frac{RSS_p}{s^2} - (n - 2p) \quad 4.12$$

hergeleitet, wobei

RSS_p = die Summe der Residuenquadrate eines Modells mit $p-1$ unabhängigen Variablen

p = die Anzahl unabhängiger Variablen, inclusive des Interzepts

s^2 = die Summe der Fehlerquadrate im vollständigen Modell mit sämtlichen Variablen

n = Stichprobenumfang

Wenn das Modell mit p Parametern korrekt ist, gilt

$$E(RSS_p) = (n - p)\sigma^2 \quad 4.13$$

Im vollständigen Modell gilt $E(s^2) = \sigma^2 \quad 4.14$

und das Verhältnis

$$RSS_p / s^2 \quad 4.15$$

hätte im Idealfall den Wert

$$(n - p)\sigma^2 / \sigma^2 = n - p \quad 4.16$$

sodaß

$$(C_p) = p \quad 4.17$$

Das angemessenste Modell ist dann dasjenige mit dem niedrigsten $C(p)$ -Wert von allen, deren $C(p)$ -Wert am besten der Anzahl der Parameter (p) entspricht (DRAPER und SMITH 1981).

KENNARD (1971) stellte fest, daß die $C(p)$ Statistiken in engem Zusammenhang mit dem korrigierten ("adjusted") Bestimmtheitsmaß stehen (siehe Gleichungen 4.13 und 4.14).

Das korrigierte Bestimmtheitsmaß R_a^2 ist definiert durch

$$R_a^2 = 1 - \frac{(n-1)RSS_p}{(n-p)CTSS} = 1 - (1 - R^2) \left(\frac{n-1}{n-p} \right) \quad 4.18$$

Das Bestimmtheitsmaß R^2 ist definiert durch

$$R^2 = 1 - \frac{RSS_p}{CTSS} \quad 4.19$$

wobei

CTSS = die korrigierte Gesamtsumme der Abweichungsquadrate (Corrected Total Sum of Squares): $\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$

n = Stichprobenumfang

Abschließend ist jedoch noch zu prüfen, ob das Modell auch biologisch sinnvoll ist.

4.13. Zweiphasige Stichprobe

4.131 Allgemeines

Die zweiphasige Stichprobe wird häufig bei Forstinventuren als eine rationelle Methode vorgeschlagen, wenn eine Inventurzielgröße y nur schwierig oder teuer meßbar ist, jedoch stark mit einer leicht zu erhebenden Hilfsgröße x korreliert. Eine solche Methode erscheint ideal für die ungünstigen Gelände- und Erschließungsverhältnisse in Tansania geeignet zu sein. Bei Inventuren wird die zweiphasige Stichprobe besonders in Verbindung mit der Luftbildauswertung eingesetzt. Die erste Phase ist hierbei die große Stichprobe vom Umfang n_1 , welche zufällig aus der Gesamtpopulation N gezogen wird. Hierdurch wird eine akzeptable Schätzung des Populationsmittelwertes EX erzielt. In dieser Phase werden alle Daten aus dem Luftbild erhoben. Die zweite Phase erfolgt dann im Gelände, wo die Inventurzielgröße y aus n_2 Unterstichproben aus der Stichprobe der ersten Phase n_1 erhoben wird. Aus den n_2 Wertepaaren (x_i, y_i) wird dann die Regressionsgleichung für die Gesamtpopulation aufgestellt, oder auch über Verhältnisschätzer der Mittelwert der Gesamtpopulation hergeleitet.

TEMU (1992) bestätigte die Anwendbarkeit der zweiphasigen Stichprobe im Miombowald zur Erstellung von Luftbildertragstafeln mit Kronenschlußgrad, Stammzahl und Baumhöhe als unabhängige Variablen. COCHRAN (1977) und AKÇA (1995) weisen darauf hin, daß diese Methode nur dann sinnvoll eingesetzt werden kann, wenn die Genauigkeitssteigerung durch Regressionsschätzung mindestens den Genauigkeitsverlust durch Reduzierung des Stichprobenumfangs in der zweiten Phase ausgleicht. In der vorliegenden Studie wurde die zweiphasige Stichprobe mit Regressionsschätzung verwendet. Sie wird daher im folgenden genauer erläutert.

Bezüglich weiterführender Lektüre über Inventuren als Kombination von terrestrischen und photogrammetrischen Datenerhebungen wird auf die Publikationen von SPELLMANN (1984), AKÇA (1989), KÄTSCH (1990) WOLFF (1992) und EILERMANN (1995) des Institutes für Forsteinrichtung und Ertragskunde der Universität Göttingen sowie auf SABOROWSKI (1994) verwiesen.

4.132 Grundlagen der zweiphasigen Stichprobe zur Regressionsschätzung in Forstinventuren

1. Phase (Voruntersuchung)

Eine relativ große Stichprobe mit dem Umfang n_1 wird aus der Gesamtpopulation gezogen (systematisch oder zufällig) und in den einzelnen Stichproben nur die Hilfsvariable x_i aufgenommen. Die Stichprobe liefert dann die folgenden Statistiken:

$$\bar{x}_1 = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} x_i \quad 4.20$$

und

$$s_{x_1}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} (x_i - \bar{x}_1)^2}{n_1 - 1} \quad 4.21$$

2. Phase (Hauptuntersuchung)

Eine Unterstichprobe mit dem Umfang n_2 wird aus der großen Stichprobe der ersten Phase gezogen und die Zielgröße y_i an den einzelnen Stichprobeorten aufgenommen. Die Unterstichprobe liefert die folgenden Statistiken:

$$\bar{x}_2 = \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} x_i \text{ und } s_{x_2}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_2} (x_i - \bar{x}_1)^2}{n_2 - 1} \quad 4.22$$

$$\bar{y}_2 = \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} y_i \quad 4.23$$

und die geschätzte Varianz der Zielgröße

$$s_{y_1}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_2} (y_i - \bar{y}_2)^2}{n_2 - 1} \quad 4.24$$

Das Prinzip der zweiphasigen Stichprobe verdeutlicht die nachfolgende Abbildung 4.11.

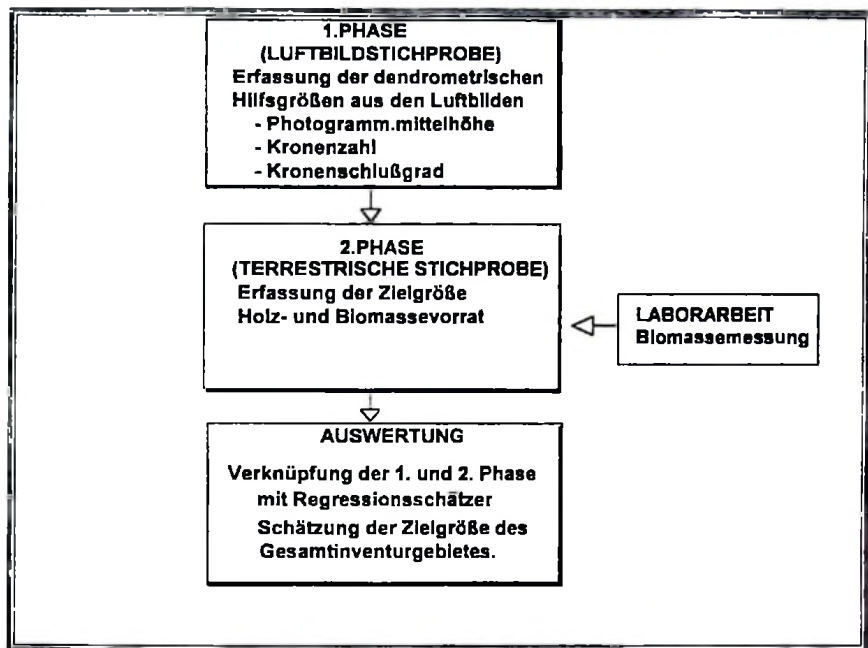


Abb. 4.10: Zweiphasige Stichprobe zur Biomasseschätzung

Zunächst wird mit Hilfe der Stichprobendaten der Hauptuntersuchung (2. Phase) eine Regressions-gleichung zwischen der Zielgröße y und der Hilfsvariablen x erstellt.

$$y' = A + Bx \quad 4.25$$

Durch Einsetzen des geschätzten Mittelwertes \bar{X} der Hilfsvariablen x aus der Voruntersuchung kann der Mittelwert der Zielgröße (\bar{Y}) geschätzt werden.

$$\bar{Y}_{dt} = A + B\bar{X}_1 \quad 4.26$$

Ist die Populationsgröße N bekannt, so kann der Populationsgesamtwert über

$$Y_{dt} = N\bar{Y}_{dt} \quad 4.27$$

hergeleitet werden.

Die Varianz der Schätzung kann näherungsweise über

$$s_{\bar{Y}_{dt}}^2 = \frac{s_{y2}^2 (1 - r^2)}{n_2} + \frac{r^2 \cdot s_{y2}^2}{n_1} - \frac{s_{y2}^2}{N} \quad 4.28$$

geschätzt werden, wobei r der Korrelationskoeffizient zwischen y und x ist. Diese Varianzgleichung gilt, wenn in beiden Phasen die Stichprobenumfänge groß sind und die Werte $\frac{1}{n_1}$ und $\frac{1}{n_2}$ vernachlässigt werden können. Wenn der Stichprobenumfang in der zweiten Phase klein ist und $\frac{1}{n_2}$ nicht vernachlässigt werden kann, so muß die Varianz der Schätzung über

$$s_{\bar{y}_w}^2 = s_y^2 \left[\frac{1}{n_2} + \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)^2}{\sum_{i=1}^{n_1} (x_i - \bar{x}_2)^2} \right] + \frac{s_{y_1}^2 - s_{y_2}^2}{n_1} - \frac{s_{y_1}^2}{N} \quad 4.29$$

geschätzt werden. (siehe COCHRAN 1977)

Das Verfahren der zweiphasigen Stichprobe kann auch mit mehr als einer Hilfsvariablen (z.B. werden in der ersten Phase p Hilfsvariablen aufgenommen) angewendet werden. In diesem Fall wird der Populationsmittelwert über einen multiplen Regressionsschätzer geschätzt. Die Varianz der Schätzung wird dann mit Hilfe der Gleichung

$$s_{\bar{y}_w}^2 = \frac{s_{y_1}^2 (1 - R^2)}{n_2} \left[1 + \frac{n_1 - n_2}{n_1} + \frac{p}{n_2 - p - 2} \right] + \frac{R^2 s_{y_1}^2}{n_1} - \frac{s_{y_1}^2}{N} \quad 4.30$$

geschätzt, wobei R der multiple Korrelationskoeffizient zwischen y und den p x -Variablen ist. (COCHRAN 1977).

4.14 Wirtschaftlichkeit der Zweiphasige Stichprobe.

Eine zweiphasige Stichprobe erweist sich als wirtschaftlich sinnvoll, wenn:

- Die Aufnahme einer Luftbildstichprobe kostengünstiger ist als die einer terrestrischen Aufnahme,
- der Genauigkeitsgewinn durch die Regressionsschätzung größer ist als der Genauigkeitsverlust, der durch den im Vergleich zur rein terrestrischen Aufnahmen verringerten Stichprobenumfang entsteht (COCHRAN 1977 und AKÇA 1995).

Als kritische Grenze für den Genauigkeitsgewinn gilt die Ungleichung (COCHRAN 1977):

$$K = \frac{c_2}{c_1} \geq \frac{r^2}{(1 - \sqrt{1 - r^2})^2} \quad 4.31$$

wobei

K = Kostenverhältnis

c_1 = Kosten einer Stichprobe in der ersten Phase

c_2 = Kosten einer Stichprobe in der zweiten Phase

r^2 = Bestimmtheitsmaß der Regression zwischen Hilfs- und Zielvariablen

Die Optimierung des Stichprobenumfanges für die erste und zweite Phase kann hinsichtlich der maximalen Genauigkeit der Zielgröße bei vorgegebenen Gesamtkosten oder hinsichtlich der minimalen Kosten bei vorgegebener Genauigkeit der Zielgrößen erfolgen. Die optimalen Stichprobenumfang für die Variante „minimale Kosten bei vorgegebener Genauigkeit der Zielgrößen“ für die Luftbildstichproben und terrestrischen Stichproben lassen sich über Formel (4.32 und 4.33.) berechnen:

-Luftbildstichproben:
$$n_1 = \frac{s_y^2}{s_{\hat{y}}^2} \left[\sqrt{K \cdot r^2 (1 - r^2)} + r^2 \right] \quad 4.32$$

-terrestrische Stichproben:
$$n_2 = n_1 \cdot \sqrt{\frac{1 - r^2}{r^2}} \cdot \frac{1}{k} \quad 4.33$$

wo bei

n_1 = Umfang der Stichprobe in der erste Phase

n_2 = Umfang der Stichprobe in der zweite Phase

K = Kostenverhältnis

r^2 = Bestimmtheitsmaß der Regression zwischen Hilfs- und Zielvariablen

4.15 Modellauswahl für den Regressionsschätzer

Die hier verwendeten Methoden für die Modellauswahl sind die gleichen wie die für die Einzelbaumschätzung verwendeten, d.h. die Kombination von Suchmethoden durch Bewertung von R^2 , MSE und MALLOWS' $C(p)$ sowie die Rückwärts-Eliminierungsmethode aus dem Programm SAS. Zunächst wurden jedoch die Korrelationskoeffizienten für die abhängigen und unabhängigen Variablen in ihren transformierten und kombinierten Formen dargestellt. Die Variablen mit den besten Korrelationskoeffizienten wurden dann weiter verwendet um die besten Modelle für die Schätzung der Biomasse zu ermitteln.

4.16 Die Biomasseschätzung in den Probekreisen

Die mittlere Biomasse der Probekreise wurde mit Formel 4.26 geschätzt. Wenn mehr als eine Hilfsvariable vorlagen, dann wurde der Standardfehler für jeden Probekreis mit der Gleichung 4.29 berechnet. Der nach dieser Methode berechnete Standardfehler wurde später verglichen mit dem nach Gleichung 4.30 ermittelten. Die Terme mit N wurden dabei vernachlässigt.

4.17 Die Analyse der Verteilung der Biomasse über das Untersuchungsgebiet in Abhängigkeit von Exposition und Hangneigung

Im Hinblick auf einen später zu erstellenden Managementplan für die Holznutzung im Untersuchungsgebiet wurde der Einfluß von Hangneigung und Exposition auf die Biomasseproduktion untersucht. Die Analyse wurde durchgeführt mit Hilfe des geographischen Informationssystems ARC/INFO. Auf der Grundlage des ARC/INFO Moduls TIN wurden die Daten des digitalen Geländemodells nach Hangneigung und Exposition klassifiziert. Für die Exposition wurden vier Klassen gebildet:

<u>Klasse</u>	<u>Segment</u>
1	0 - 90 NO
2	90 - 180 SO
3	180 - 270 SW
4	270 - 360 NW

Auch die Hangneigung wurde in vier Klassen mit einer Spannweite von jeweils 20% unterteilt:

<u>Klasse</u>	<u>Hangneigung (%)</u>
1	0% - 19%
2	20% - 39%
3	40% - 59%
4	> 60%

Der erste Schritt der Datenanalyse bestand aus der Erstellung von Häufigkeitstabellen des Biomassevorrats für jede Expositions-kategorie sowie für die Kombination von Exposition und Hangneigung. Dann wurden die Ergebnisse für weitergehende Betrachtungen in Säulendiagrammen dargestellt (siehe Kapitel 5).

Eine weitere Analyse der Biomassenverteilung wurde anhand der Durchmesser-Verteilung durchgeführt. Hierbei wurde ermittelt, welchen Anteil die verschiedenen Durchmesser-Klassen an der gesamten Biomasse haben. Aus der Erkenntnis dieser Beziehung können eventuell Schlüsse auf die Ursachen für die Biomasseverteilung gezogen und waldbauliche Empfehlungen ausgesprochen werden.

5 Ergebnisse

5.1 Die Höhenkurve

Die Höhenkurve wurde konstruiert unter Anwendung der Petterson-Funktion. Die Kurve konnte dann dazu verwendet werden, die Höhen von Bäumen auch auf Probestflächen zu schätzen, in welchen keine Höhenmessungen vorgenommen worden waren. Die Streuung der Höhen war sehr gering, sodaß eine Stratifizierung nicht erforderlich wurde.

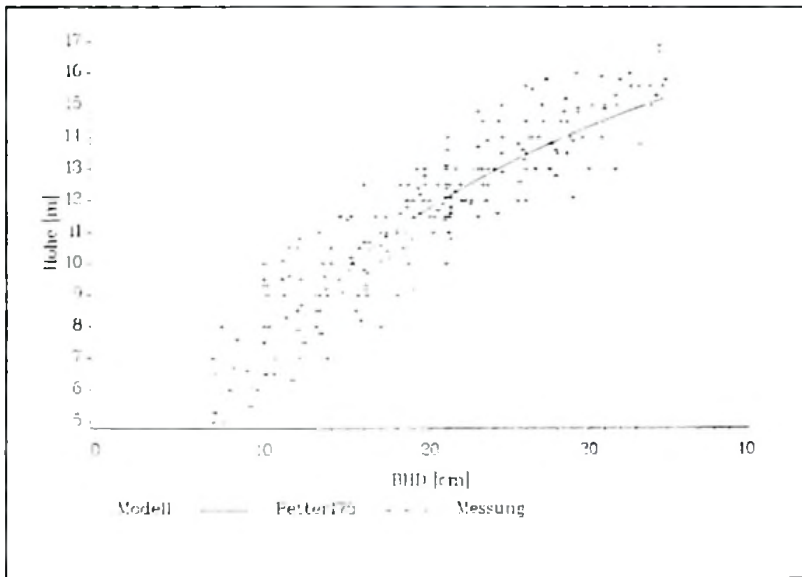


Abb. 5.1: Die Höhenkurve unter Verwendung der Petterson-Funktion

Nach einer Überprüfung der Höhen-Durchmesserwerte von einer Teilpopulation erwies sich die Petterson-Funktion mit dem Exponenten 1,75 als beste Anpassung (Abb. 5.1). Die Funktion hat eine Standardabweichung von $\pm 0,9$ m und ein Bestimmtheitsmaß r^2 von 0,8.

5.2 Regressionsmodelle

5.21 Regressionsmodelle zur Schätzung der frischen Biomasse der Einzelbäume

Um die Zusammenhänge zwischen der unabhängigen und der abhängigen Variable zu verdeutlichen, wurden Streudiagramme erstellt. Die Abhängigkeit der Biomasse vom BHD weist bekanntlich einen exponentiellen Verlauf auf. Durch Quadrieren der Variablen BHD wurde die Beziehung linearisiert. Abbildung 5.2 zeigt das Streudiagramme der grünen Biomasse des Einzelbaumes sowie dessen Bestandteile in Abhängigkeit vom Brusthöhendurchmesser (in der Form BHD^2).

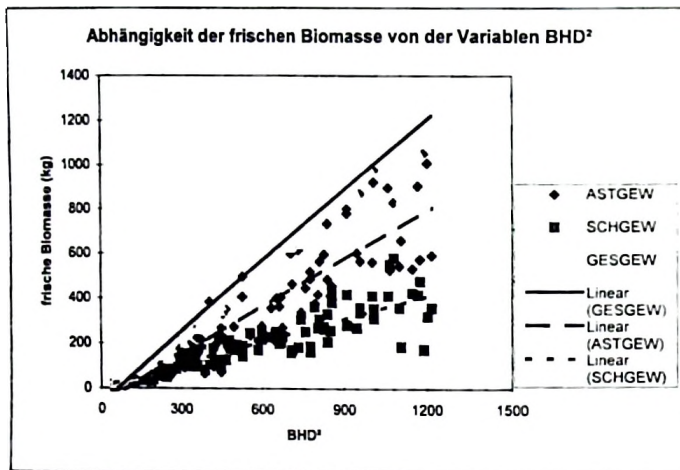


Abb. 5.2: Die Zusammenhänge zwischen der grünen Biomasse des Einzelbaumes sowie dessen Bestandteile in Abhängigkeit von der Variablen BHD^2

Dabei bedeuten:

ASTGEW = Astgewicht (frisch)
 SCHGEW = Schaftgewicht (frisch)
 GESGEW = Gesamtgewicht (frisch)

Verschiedene Regressionsmodelle mit bis zu fünf Variablen wurden auf ihre Eignung für die Schätzung der frischen Biomasse des Stammes, der Äste und des gesamten Baumes anhand der Kriterien $C_{(p)}$ (MALLOWS), MSE und R^2 geprüft. Als unabhängige Variablen wurden BHD, Baumhöhe und deren Kombination herangezogen. In den nachfolgenden Tabellen -5.1 a, b, c werden die Ergebnisse so angeordnet, daß stets die drei besten Resultate für die drei

genannten Kriterien angezeigt werden, und zwar in aufsteigender Reihenfolge für Modelle mit ein bis fünf Variablen. Die besten Resultate sind dabei diejenigen mit dem höchsten Wert für R^2 , dem niedrigsten Wert für MSE und einem Wert für $C(p)$, welcher am nächsten an der Anzahl verwendeter Variablen in dem jeweiligen Modell liegt.

Tab. 5.1 a Die besten Modelle für die Schätzung der frischen Biomasse der Äste

Anzahl Variablen	r^2 bzw. R^2	$C(p)$	MSE (kg ²)	Unabhängige Variablen
1	0.8591	3.06	9127,47	BHD2,
1	0.8566	5,68	9289,80	BHD2*H
1	0.8450	17,76	10039,70	BHD2*H2
2	0.8646	-0,63	8833,69	BHD2*H,BHD*H2
2	0.8639	0,03	8876,06	H2,BHD2*H
2	0.8638	0,12	8881,36	BHD,BHD2
3	0.8651	0,77	8858,37	H2,BHD2*H,BHD2*H2
3	0.8650	0,90	8866,36	BHD2,H2,BHD2*H
3	0.8650	0,91	8867,22	BHD*H,BHD2*H,BHD*H2
4	0.8652	2,70	8915,41	BHD,BHD2,H2,BHD*H
4	0.8652	2,70	8915,99	H2,BHD*H,BHD2*H,BHD*H2
4	0.8651	2,74	8918,28	H2,BHD2*H,BHD*H2,BHD2*H2
5	0.8654	4,48	8964,47	BHD,H2,BHD*H,BHD2*H,BHD*H2
5	0.8652	4,64	8974,59	BHD,BHD2,H2,BHD*H,BHD2*H2
5	0.8652	4,64	8974,87	BHD,BHD2,H2,BHD*H,BHD2*H

Definitionen der verwendeten Abkürzungen:

BHD	= Brusthöhendurchmesser
BHD2	= Quadrat des Brusthöhendurchmessers
H	= Gesamthöhe des Baumes
H2	= Quadrat der Gesamthöhe des Baumes
BHD*H	= BHD multipliziert mit der gesamten Baumhöhe
BHD2*H	= Quadrat des Brusthöhendurchmessers multipliziert mit der Baumhöhe
BHD2*H2	= Quadrat des Brusthöhendurchmessers multipliziert mit dem Quadrat der Baumhöhe
BHD*H2	= Brusthöhendurchmesser multipliziert mit dem Quadrat der Baumhöhe
r^2	= einfaches Bestimmtheitsmaß
R^2	= multiples Bestimmtheitsmaß

Tab. 5.1 b: Die besten Modelle für die Schätzung der frischen Biomasse des **Schaftholzes**

Anzahl Variablen	r^2 bzw. R^2	$C(p)$	MSE (kg^2)	Unabhängige Variablen
1	0,8193	-1,62	2661,36	BHD2
1	0,8099	5,80	2800,23	BHD*H
1	0,8098	5,85	2801,24	BHD2*H
2	0,8220	-1,72	2640,27	BHD2,H2
2	0,8217	-1,52	2644,02	BHD2,BHD*H
2	0,8209	-0,88	2656,04	BHD2*H,BHD2*H2
3	0,8221	0,16	2656,54	BHD2H,BHD*H2
3	0,8221	0,18	2656,89	BHD2H,BHD2*H2
3	0,8221	0,19	2657,10	BHD2,H2,BHD2*H
4	0,8221	2,16	2675,02	BHD2,H2,BHD2*H,BHD2*H2
4	0,8221	2,16	2675,05	BHD2,H2,BHD2*H,BHD*H2
4	0,8221	2,16	2675,08	BHD,BHD2,H2,BHD*H2
5	0,8223	4,06	2692,05	BHD,H2,BHD*H,BHD2*H,BHD2*H2,
5	0,8222	4,14	2693,53	BHD2,H2,BHD*H,BHD2*H,BHD2*H2,
5	0,8222	4,14	2693,56	BHD2,H2,BHD2*H,BHD*H2,BHD2*H2

Tab. 5.1 c: Die besten Modelle für die Schätzung der frischen Biomasse des **Baumholzes**

Anzahl Variablen	r^2 bzw. R^2	$C(p)$	MSE (kg^2)	Unabhängige Variablen
1	0,9308	4,44	8874,60	BHD2
1	0,9292	7,84	9077,70	BHD2*H
1	0,9096	49,74	11582,90	BHD2*H2
2	0,9338	0,01	8548,80	BHD2, BHD2*H2
2	0,9337	0,17	8558,30	BHD2, BHD2*H
2	0,9335	0,48	8576,70	BHD, BHD2
3	0,9345	0,52	8517,70	H2, BHD2*H, BHD2*H2
3	0,9345	0,53	8518,20	BHD*H, BHD2*H, BHD*H2
3	0,9344	0,58	8521,20	BHD2*H, BHD*H2, BHD2*H2
4	0,9345	2,44	8572,40	H2, BHD*H, BHD2*H, BHD*H2
4	0,9345	2,46	8573,90	BHD2, BHD*H, BHD2*H, BHD*H2
4	0,9345	2,47	8574,50	BHD, BHD2*H, BHD*H2, BHD2*H2
5	0,9345	4,37	8628,40	H2, BHD*H, BHD2*H,BHD*H2,BHD2*H2
5	0,9345	4,37	8628,70	BHD, H2, BHD*H, BHD2*H, BHD*H2
5	0,9345	4,42	8631,40	BHD2, H2, BHD*H, BHD2*H, BHD*H2

Die Ergebnisse zeigen deutlich, daß bereits der BHD alleine eine Variable ist, welche die frische Biomasse sehr genau schätzt. Ein aufwendiges Hinzunehmen weiterer Variablen trägt nicht wesentlich zur Erhöhung des Bestimmtheitsmaßes r^2 bzw. R^2 bzw. zur Senkung des mittleren quadratischen Fehlers MSE bei. In dieser Untersuchung zeigt der Wert $C(p)$ kein eindeutiges Reaktionsschema bei seiner Zunahme bzw. Abnahme. Es ist jedoch zu beobachten, daß dieser Wert zunimmt, wenn die Variable BHD2 mit der Variablen H2 kombiniert wird und keine weiteren Variablen hinzukommen.

5.22 Regressionsmodelle zur Schätzung der trockenen Biomasse der Einzelbäume

Die Wahl der Modelle für die Schätzung der trockenen Biomasse entspricht dem Vorgehen für die Schätzung der frischen Biomasse. Das entsprechende Streudiagramm zeigt Abbildung 5.3.

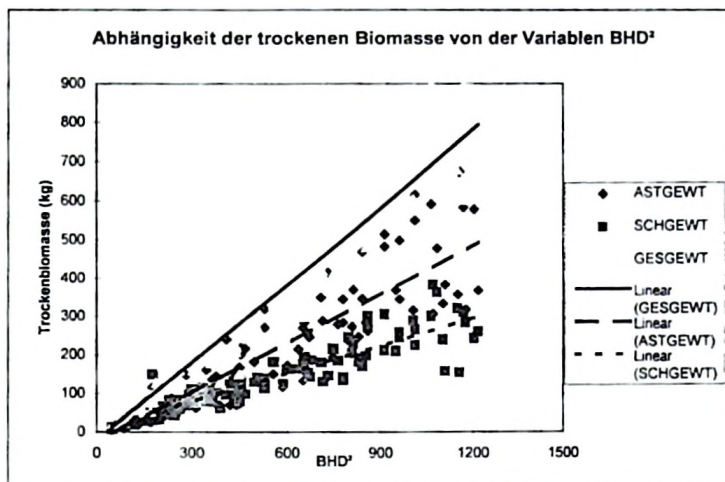


Abb. 5.3: Die Zusammenhänge zwischen der trockenen Biomasse des Einzelbaumes sowie dessen Bestandteile in Abhängigkeit von der Variablen BHD²

Dabei bedeuten:

ASTGEWT = Astgewicht (trocken)

SCHGEWT = Schaftgewicht (trocken)

GESGEWT = Gesamtgewicht des Baumes (trocken)

Die Tabellen 5.2 a, 5.2 b und 5.2 c zeigen die Zusammenfassung der Ergebnisse der drei besten Modelle mit jeweils ein bis fünf Variablen. Die Modelle dienen zur Bestimmung der trockenen Biomasse des Stammes, der Äste und des gesamten Baumes. Die Definitionen der verwendeten Abkürzungen entsprechen denen der Schätzung der frischen Biomasse.

Tab. 5.2 a: Die besten Modelle für die Schätzung der trockenen Biomasse des Astholzes

Anzahl Variable n	r^2 bzw. R^2	C(p)	MSE	Unabhängige Variablen
1	0,8397	1,17	3751,86	BHD2
1	0,8382	2,49	3786,05	BHD2*H,
1	0,8220	17,15	4164,84	BHD2*H2,
2	0,8444	-1,11	3666,02	BHD, BHD2,
2	0,8435	-0,27	3687,97	BHD2*H, BHD*H2,
2	0,8425	0,64	3711,85	BHD2, BHD2*H2,
3	0,8448	0,48	3681,08	BHD2*H, BHD*H2, BHD2*H2,
3	0,8448	0,49	3681,31	BHD*H, BHD2*H, BHD*H2,
3	0,8448	0,49	3681,32	BHD2, BHD2*H, BHD*H2,
4	0,8449	2,43	3705,55	BHD, BHD2, H2, BHD*H,
4	0,8449	2,45	3705,98	H2, BHD2*H, BHD*H2, BHD2*H2,
4	0,8449	2,46	3706,37	BHD2, BHD2*H, BHD*H2, BHD2*H2,
5	0,8449	4,40	3730,74	BHD, BHD2, H2, BHD*H, BHD*H2,
5	0,8449	4,42	3731,37	BHD, H2, BHD*H, BHD2*H, BHD*H2,
5	0,8449	4,43	3731,45	BHD, BHD2, BHD*H, BHD*H2, BHD2*H2,

Tab. 5.2 b: Die besten Modelle für die Schätzung der trockenen Biomasse des Schaftholzes

Anzahl Variablen	r^2 bzw. R^2	C(p)	MSE	Unabhängige Variablen
1	0,8509	2,20	1081,86	BHD2
1	0,8485	4,60	1099,64	BHD2*H,
1	0,8463	6,73	1115,35	BHD*H,
2	0,8571	-1,89	1043,84	BHD BHD2*H2,
2	0,8565	-1,27	1048,51	BHD BHD2*H,
2	0,8555	-0,28	1055,83	BHD2 BHD*H2,
3	0,8572	0,07	1050,87	BHD BHD2*H BHD2*H2,
3	0,8571	0,08	1051,00	BHD BHD*H BHD2*H2,
3	0,8571	0,09	1051,04	BHD BHD*H2 BHD2*H2,
4	0,8572	2,02	1057,85	BHD H2 BHD*H BHD2*H2,
4	0,8572	2,03	1057,92	BHD BHD2 BHD2*H BHD2*H2,
4	0,8572	2,04	1057,99	BHD BHD2*H BHD*H2 BHD2*H2,
5	0,8572	4,00	1065,12	BHD BHD2 H2 BHD*H BHD2*H2,
5	0,8572	4,00	1065,12	BHD H2 BHD*H BHD2*H BHD2*H2,
5	0,8572	4,01	1065,20	BHD H2 BHD*H BHD*H2 BHD2*H2,

Tab 5.2 c: Die besten Modelle für die Schätzung der trockenen Biomasse des gesamten Baumes

Anzahl Variablen	r^2 bzw. R^2	C_p	MSE	Unabhängige Variablen
1	0,9220	1,91	4049,47	BHD2
1	0,9200	5,62	4152,33	BHD2*H,
1	0,9014	40,31	5115,05	BHD2*H2,
2	0,9247	-1,24	3933,04	BHD2, BHD2*H2,
2	0,9246	-0,96	3940,95	BHD2, BHD2*H,
2	0,9236	0,81	3990,76	BHD2*H, BHD2*H2,
3	0,9249	0,38	3950,05	BHD, BHD2*H, BHD*H2,
3	0,9249	0,45	3951,91	BHD2, H2, BHD2*H2,
3	0,9249	0,48	3952,80	BHD2, H2, BHD2*H,
4	0,9250	2,30	3975,40	BHD2, BHD*H, BHD*H2, BHD2*H2,
4	0,9249	2,38	3977,51	BHD, H2, BHD2*H, BHD*H2,
4	0,9249	2,38	3977,54	BHD, BHD2, BHD2*H, BHD*H2,
5	0,9250	4,23	4001,38	BHD2, H2, BHD*H, BHD*H2, BHD2*H2,
5	0,9250	4,30	4003,30	BHD2, BHD*H, BHD2*H, BHD*H2, BHD2*H,
5	0,9250	4,30	4003,33	BHD, BHD2, BHD*H, BHD*H2, BHD2*H2,

Wie bereits bei den Ergebnissen für die frische Biomasse, zeigen auch diese Ergebnisse eindeutig, daß bereits der BHD alleine eine Variable ist, welche auch die trockene Biomasse sehr genau schätzt. Ein aufwendiges Hinzunehmen weiterer Variablen trägt auch hier nicht wesentlich zur Erhöhung des Bestimmtheitsmaßes R^2 bzw. zur Senkung des mittleren quadratischen Fehlers MSE bei. Wie bereits zuvor, zeigt auch hier der Wert C_p kein eindeutiges Reaktionsschema bei seiner Zunahme bzw. Abnahme. Es ist hier gleichfalls zu beobachten, daß dieser Wert zunimmt, wenn die Variable BHD2 mit der Variablen H2 kombiniert wird und keine weiteren Variablen hinzukommen.

5.23 Regressionsmodelle zur Biomasseschätzung der Einzelbäume mit der Rückwärts-Eliminierungsmethode

Wenn in einer Regressionsanalyse mit mehreren Variablen nicht jede Variable in gleichem Maße zu dem höchsten erzielbaren Grad an Schätzgenauigkeit beiträgt, ist der Auswerter bestrebt, diejenigen Variablen bzw. die Variable zu identifizieren, welche den besten Beitrag für das beste Modell leisten. Das Statistik-Programmpaket SAS bietet in den Prozeduren PROC RSQUARE und PROC STEPWISE die Möglichkeit zur Minimierung der Anzahl aussagestärkster Variablen für das Regressionsmodell. Die Selektion der besten Variablen erfolgt hier nach unterschiedlichen Verfahren, die nicht grundsätzlich zu den gleichen

Resultaten führen. Eines der möglichen Verfahren für die vorliegende Untersuchung ist die Rückwärts-Eliminierung. Dieses Verfahren beginnt damit, die Regressionsmodelle mit allen unabhängigen Variablen zu erstellen. Die resultierende Statistik wird daraufhin überprüft, welche der verwendeten Variablen den geringsten Beitrag zum Modell liefern. Dies geschieht mit Hilfe partieller Korrelationen. Die partielle Korrelation erklärt dabei die Beziehung zwischen einer abhängigen und einer unabhängigen Variablen unter Ausschluß weiterer Einflußgrößen. Entfernt wird dabei die Variable, deren F-Wert am kleinsten ist und unterhalb des vorgegebenen Signifikanzniveaus liegt. Es erfolgt dann ein neuer Rechengang, in welchem mit dem reduzierten Modell ebenso verfahren wird. Diese Schritte werden so oft wiederholt, bis alle im Modell verbleibenden Variablen das zuvor festgelegte minimale Signifikanzniveau erreicht haben. Wenn ein sehr niedriges Niveau vorgegeben wird, so verbleiben nach einer Rückwärts-Eliminierung unter Umständen nur wenige Variablen im Modell. Die Angabe " $Prob > F$ " in der letzten Tabellenspalte beschreibt die Wahrscheinlichkeit, daß ein Regressand ohne tatsächlichen Einfluß mindestens zu dem beobachteten F-wert führt. Das heißt, daß nur Variablen mit kleinen Werten von $Prob > F$ für das Regressionsmodell von signifikantem Einfluß sein können.

Die Tabellen 5.3 a, b, c und 5.4 a, b, c sowie 5.5 a, b, c zeigen eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Rückwärts-Eliminierung für die abhängigen Variablen Biomasse der Äste, des Schaftes und des gesamten Baumes. In den jeweiligen Tabellen "a" wird angezeigt, in welchem Schritt des oben genannten Verfahrens welche Variablen entfernt wurden. Die jeweiligen Tabellen "b" stellen die Ergebnisse der Varianzanalysen des besten erzielten Modells dar. Die jeweiligen Tabellen "c" zeigen die Ergebnisse des Signifikanztests der selektierten besten Variablen. Da die effektive Biomasse am besten nicht durch ihre frische Masse, sondern durch ihre Trockenmasse charakterisiert ist, sind im folgenden nur Tabellen für die getrockneten Biomassen dargestellt, während diejenigen für die frische Biomasse im Anhang 2 aufgeführt werden.

5.231 Regressionsmodelle mit Rückwärts-Eliminierungsmethode zur Schätzung der trockenen Biomasse der Einzelbäume

Die Tabellen 5.3 a, b, c und 5.4 a, b, c sowie 5.5 a, b, c zeigen eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Rückwärts-Eliminierung für die abhängigen Variablen trockenen Biomasse der Äste, des Schaftes und des gesamten Baumes.

Tab. 5.3 a. Übersicht über die Prozedur der Rückwärts-Eliminierung für die abhängige Variable "trocken Biomasse des Astholzes"

Schritt	eliminierte Variablen	Anzahl verbleibender Variablen	R ² (Partiell)	Modell R ²	C(p)	F	Prob>F
1	BHD2*H	6	0.0003	0.8451	6.23	0.2295	0.6326
2	BHD2*H2	5	0.0002	0.8449	4.40	0.1758	0.6757
3	BHD*H2	4	0.0000	0.8449	2.44	0.0343	0.8534
4	H2	3	0.0005	0.8444	0.86	0.4267	0.5146
5	BHD*H	2	0.0000	0.8444	-1.12	0.0267	0.8704
6	BHD	1	0.0047	0.8397	1.18	4.4187	0.0373

Das schließlich ausgewählte Modell ist

$$Y' = -26.450 + 0.4283DBH2$$

5.1

Tab. 5.3 b. Die Ergebnisse der Varianzanalyse für das Modell 5.1

Fehler-ursache	Freiheitsgrade (FG)	Quadratsummen (SQ)	mittlere Quadratsummen (MQ)	F	Prob>F
Regression	1	2868465.79	2868465.79	764.54	0.0001
Error	146	547772.11	3751.86		
Total	147	3416237.90			

Tab. 5.3 c: Ergebnisse des Signifikanztests der ausgewählten besten Variable bei 0.0001 Einschlussniveau für das Modell 5.1

Variable	Parameter Schätzung	Standard fehler	Quadratsummen (SQ)	F	Prob>F
INTERCEPT	-26.4504	8.43	36937.87	9.85	0.0021
BHD2	0.4283	0.015	2868465.79	764.54	0.0001

Tab. 5.4 a: Übersicht über die Prozedur der Rückwärts-Eliminierung für die abhängige Variable "trocken Biomasse des Schaftholzes"

Schritt	eliminierte Variablen	Anzahl verbleibender Variablen	R ² (Patiell)	Modell R ²	C(p)	F	Prob>F
1	BHD*H2	6	0,0000	0,8572	6,00	0,0002	0,9874
2	BHD2*H	5	0,0000	0,8572	4,00	0,0001	0,9930
3	BHD2*H2	4	0,0000	0,8572	2,02	0,0244	0,8763
4	H2	3	0,0001	0,8571	0,09	0,0669	0,7962
5	BHD*H	2	0,0000	0,8571	-1,89	0,0128	0,9101
6	BHD	1	0,0002	0,8397	1,18	4,4187	0,0373

Das schließlich ausgewählte Modell ist

$$Y = 5.9067 - 0,2401 \text{BHD2}$$

5.2

Tab. 5.4 b: Die Ergebnisse der Varianzanalyse für das Modell 5.2

Fehler-ursache	Freiheitsgrade (FG)	Quadratsummen (SQ)	mittlere Quadratsummen (MQ)	F	Prob>F
Regression	1	2868465,79	2868465,79	2766	0,0001
Fehler	146	151356,76	1036,70		
Total	147	3019822,55			

Tab 5.4 c. Ergebnisse des Signifikanztests der ausgewählten besten Variable bei 0.0001 Einschlußniveau für das Modell 5.2

Variable	Parameter Schätzung	Standardfehler	Quadratsummen (SQ)	F	Prob>F
INTERCEPT	-29,4776	13,6717	4852,5232	4,65	0,0327
BHD	5,3966	1,0296	28677,1656	27,47	0,0001
BHD2 H2	0,0004	0,0009	24634,5545	23,60	0,0001

Tab. 5.5 a: Übersicht über die Prozedur der Rückwärts-Eliminierung für die abhängige Variable "trockene Biomasse des Baumholzes"

Schritt	eliminierte Variablen	Anzahl verbleibender Variablen	R ² (Partiell)	Modell R ²	C(p)	F	Prob>F
1	BHD	6	0.0000	0.9254	6.00	0.0098	0.9213
2	BHD2*H	5	0.0001	0.9253	4.10	0.0971	0.7558
3	BHD*H	4	0.0007	0.9247	3.33	1.2435	0.2667
4	H	3	0.0002	0.9244	1.76	0.4304	0.5128
5	H2	2	0.0014	0.9230	2.46	2.7482	0.0995
6	BHD*H2	1	0.0010	0.9220	2.37	1.9140	0.1686

Das schließlich ausgewählte Modell ist

$$Y = -20.5437 + 0.6684DBH2$$

5.3

Tab. 5.5 b: Die Ergebnisse der Varianzanalyse für das Modell 5.3

Fehler-ursache	Freiheitsgrade (FG)	Quadratsummen (SQ)	mittlere Quadratsummen (MQ)	F	Prob>F
Regression	1	6985978.0350	6985978.035	1725.16	0.0001
Error	146	591223.2029	4049.473		
Total	147	7577201.2380			

Tab. 5.5 c: Ergebnisse des Signifikanztests der ausgewählten besten Variable bei 0.0001 Einschlußniveau für das Modell 5.3

Variable	Parameter Schätzung	Standardfehler	Quadratsummen (SQ)	F	Prob>F
INTERCEPT	-20.54	8.75	22282.52	5.50	0.0203
BHD2	0.67	0.01	6985978.04	1725.16	0.0001

5.232 Regressionsmodelle mit Rückwärts-Eliminierungsmethode zur Schätzung der frischen Biomasse der Einzelbäume

Für die Modellbildung zur Schätzung der frischen Biomasse mit Hilfe der Rückwärts-Eliminierung wurde ebenso vorgegangen wie bei der Schätzung der trockenen Biomasse. Im folgenden werden nur die ausgewählten Gleichungen angegeben, während die dazugehörigen Tabellen im Anhang 2 zu finden sind.

Tab. 5.6: Die Modelle zur Schätzung der verschiedenen frische Biomassekomponenten (lokale Biomassetafeln)

Komponenten	Modelle	R ² %	SEE %
frische Biomasse			
Äste	$Y = -70,9738 + 0,7218\text{BHD2}$	86	7,0
Schaftholz	$Y = 3,7514 + 0,3366\text{BHD2}$	86	5,9
Ganzbaum	$Y = 67,2223 + 1,0585\text{BHD2}$	93	7,0

SEE% = Standardfehler der Schätzung in Prozent (Standard error percentage of the estimate)

5.3 Modelle mit polynomialen, exponentiellen und potentiellen Gleichungen

Da die Biomasse sich bereits bei der Anwendung der SAS-Programme "Variablenselektierung" sowie "Rückwärts-Eliminierung" alleine anhand des BHD als hinreichend bestimmbar erwies, so erscheint es sinnvoll, auch die polynomialen, exponentiellen und potentiellen Gleichungen für die Schätzung der Biomasse des Einzelbaumes und seiner Bestandteile hinsichtlich der Stärke der Variable BHD zu prüfen.

Da einige Tests von Polynomen von mehr als zwei Graden keine signifikanten Verbesserungen gegenüber einem Polynom zweiten Grades ergaben, werden im folgenden nur Polynome zweiten Grades verwendet. Um deren unterschiedliche Charakteristika zu verdeutlichen, werden in den nachstehenden Abbildungen jeweils nicht nur die Kurve der polynomialen, sondern auch die der exponentiellen und potentiellen Gleichungen nebeneinander abgebildet. So präsentieren die Abbildungen 5.4 a, b und c sowie 5.5 a, b und c die Ergebnisse der verschiedenen Tests für die Schätzung der frischen, respektive der trockenen, Biomasse der Äste, des Schaftes und des gesamten Baumes. Zunächst wird der Zusammenhang zwischen dem BHD und der frischen Biomasse dargestellt (Abbildungen 5.4 a, b und c).

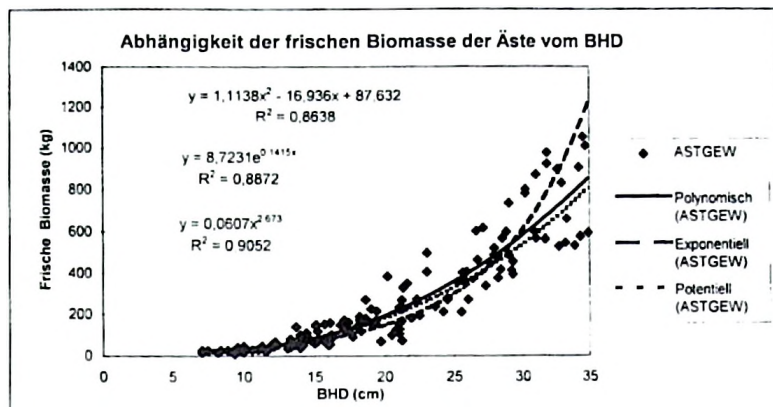


Abbildung 5.4 a: Der Zusammenhang zwischen dem BHD und der frischen Biomasse des Astholzes

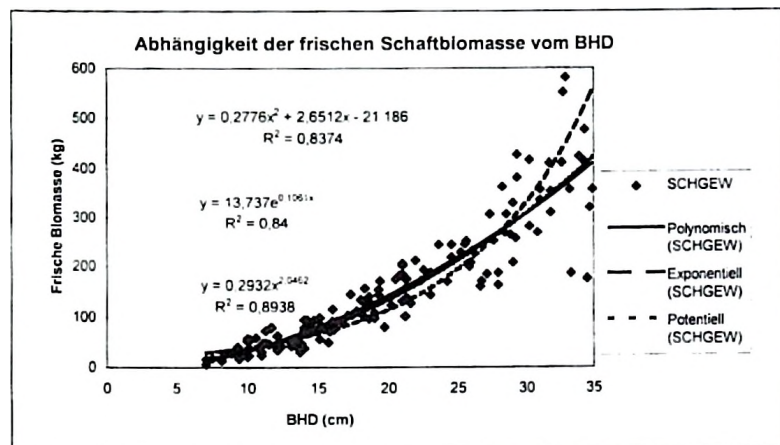


Abbildung 5.4 b: Der Zusammenhang zwischen dem BHD und der frischen Biomasse des Schaftholzes

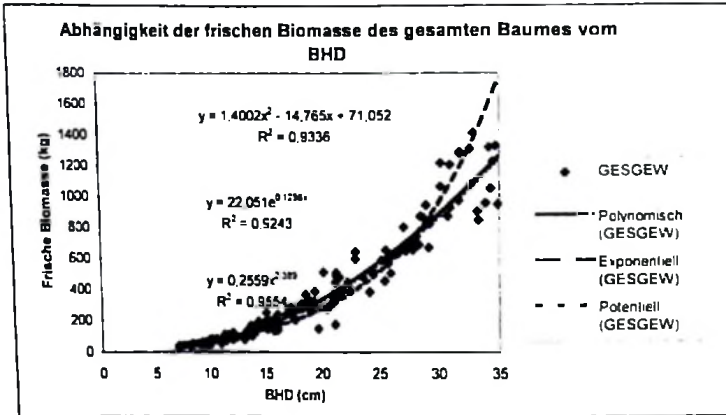


Abbildung 5.4 c: Der Zusammenhang zwischen dem BHD und der frischen Biomasse des Baumholzes

Sodann wird der Zusammenhang zwischen dem BHD und der trockenen Biomasse dargestellt (Abbildungen 5.5 a, b und c).

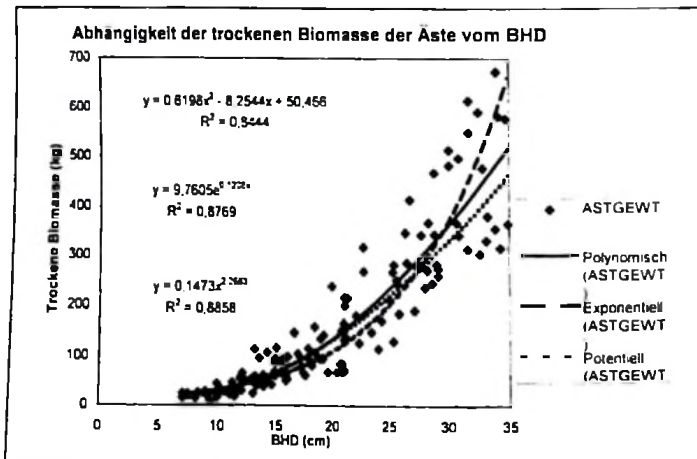


Abbildung 5.3-2 a: Der Zusammenhang zwischen dem BHD und der trockenen Biomasse des Astholzes

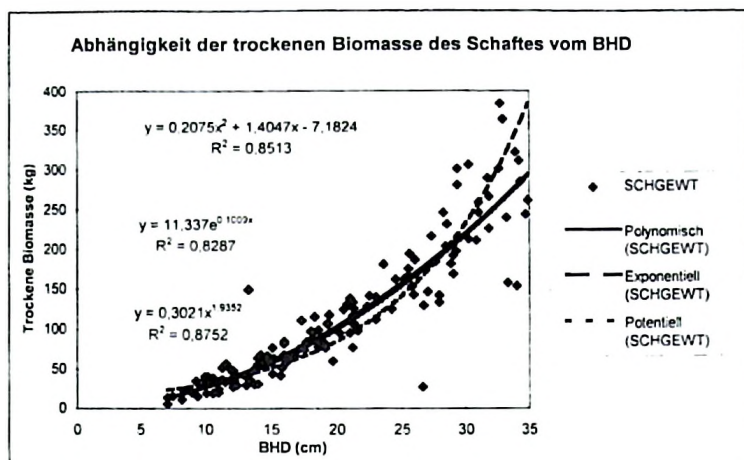


Abbildung 5.5 b: Der Zusammenhang zwischen dem BHD und der trockenen Biomasse des Schaftholzes

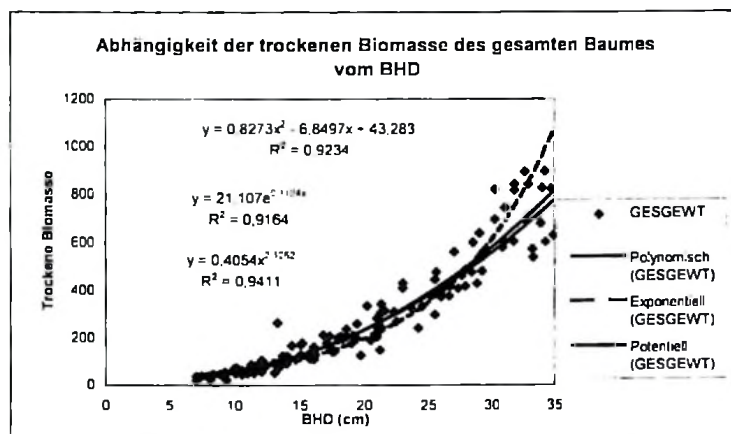


Abbildung 5.5 c: Zusammenhang zwischen dem BHD und der trockenen Biomasse des Baumholzes

Für die drei Modelle, nämlich polynomisch zweiten Grades, exponentiell und potentiell, wurde eine Analyse des Bestimmtheitsmaßes R^2 und der Residuen durchgeführt. Es zeigte sich hierbei, daß das potentielle Modell gut paßt und eine relativ gute Verteilung der Residuen aufweist.

5.4 Auswahl der optimalen Modelle

Bei der Betrachtung der Ergebnisse fällt kein signifikanter Unterschied zwischen den eingesetzten Regressionsvariablen auf, weder hinsichtlich deren Treffgenauigkeit noch deren Präzision der Schätzwerte. Wenn also folglich im konkreten Fall der Biomasseschätzung die Wahl zwischen einem Modell mit nur dem BHD und einem Modell mit einer Kombination aus BHD und der Baumhöhe freigestellt ist, wird man sich in der Praxis für das Modell mit nur dem leicht und schnell zu ermittelnden BHD entscheiden. Die Ersparnis an Aufwand und Zeit bei der Datenerhebung ist zum Zwecke der Biomasseschätzung im Mionibo-Wald höher zu bewerten als die unwesentliche Verbesserung der Ergebnisse, wenn dabei zusätzlich auch die Baumhöhe zu messen ist. Für den Mionibo-Wald ist folglich die Variable BHD² mathematisch wie auch operationell als für die Biomasseschätzung geeignet zu erachten.

Die endgültige Auswahl der Modelle und Variablen erfolgte, nachdem die Modelle bezüglich R^2 und Standardfehler miteinander verglichen wurden. Die Tabellen 5.7 a und b fassen die Ergebnisse zusammen.

Tab. 5.7 a: Übersicht über die Ergebnisse der verschiedenen Modelle zur Schätzung der frischen Biomasse

Gleichung	Komponenten	R^2 %	$S_{y,x}$ %	Gute d. Modells
Polynomisch $y = b_0 + b_1 D + D^2$	Aste	86	7,7	
	Schaftholz	84	5,9	
	Ganzbaum	93	7,0	
Exponentiell $y = b_0 (\exp)^{b_1 D}$	Aste	88	9,6	
	Schaftholz	80	6,7	
	Ganzbaum	92	8,4	
Potentiell $y = b_0 D^{b_1}$	Aste	90	7,8	
	Schaftholz	85	6,0	
	Ganzbaum	95	6,9	
$y = aH + b_1 DH + b_2 + DH^2$ SLOBODA (1984)	Aste	92	7,5	2 (zweitbestes)
	Schaftholz	87	5,8	
	Ganzbaum	94	7,1	
Rückwärts-Eliminierung $y = b_0 + b_1 D^2$	Aste	86	7,7	3 (drittbestes)
	Schaftholz	82	5,9	
	Ganzbaum	93	7,0	
Logarithmisch* $\ln y = a + b \ln D + c \ln H$	Aste	90*	7,3	1. (bestes)
	Schaftholz	87*	6,0	
	Ganzbaum	95*	6,8	

* Nicht im R^2 vergleichbar wegen Transformation

Tab. 5.7 b. Übersicht über die Ergebnisse der verschiedenen Modelle zur Schätzung der trockenen Biomasse

Gleichung	Komponenten	R ² %	S _{xx} %	Güte d. Modells
Polynomisch $y = b_0 + b_1 D + D^2$	Aste	84	7,1	
	Schaftholz	86	5,8	
	Ganzbaum	92	6,6	
Exponentiell $y = b_0 (\exp)^{b_1 D}$	Aste	87	8,2	
	Schaftholz	82	6,9	
	Ganzbaum	91	7,8	
Potentiell $y = b_0 D^{b_1}$	Aste	88	6,3	
	Schaftholz	87	5,8	
	Ganzbaum	94	6,3	
$y = aH + b_1 DH + b_2 + DH^2$ SLOBODA (1984)	Aste	90	6,2	3 (drittbestes)
	Schaftholz	92	5,7	
	Ganzbaum	96	5,9	
Rückwärts-Eliminierung $y = b_0 + b_1 D^2$	Aste	84	5,6	2. (zweitbestes)
	Schaftholz	85	5,5	
	Ganzbaum	92	5,5	
Logarithmisch* $\ln y = a + b \ln D + c \ln H$	Aste	88*	5,1	1. (bestes)
	Schaftholz	89*	5,4	
	Ganzbaum	95*	5,3	

* Nicht im R² vergleichbar wegen Transformation

Hierbei bedeuten:

y	= Biomasse (frisch bzw. trocken)
ln	= natürlicher Logarithmus
a, b, c, b ₀ , b ₁ , b ₂	= Koeffizienten von verschiedenen Variablen
D	= BHD (Brusthöhendurchmesser in cm)
H	= Baumhöhe (m)
S _{xx} %	= Geschätzter Standardfehler in Prozent

5.41 Residualanalyse der ausgewählten Modelle

Die Güte der ausgewählten Modelle wurde sodann anhand ihrer Restfehler bewertet. Hierzu wurden die Schätzungsergebnisse der Modelle gegen ihre Residuen aufgetragen um ihre Verteilung zu beurteilen. Abbildung 5.6 a, b und c zeigen die Ergebnisse der Residualanalyse der jeweils ausgewählten Modelle für die frische Biomasse der Bäume bzw. deren Einzelbestandteile.

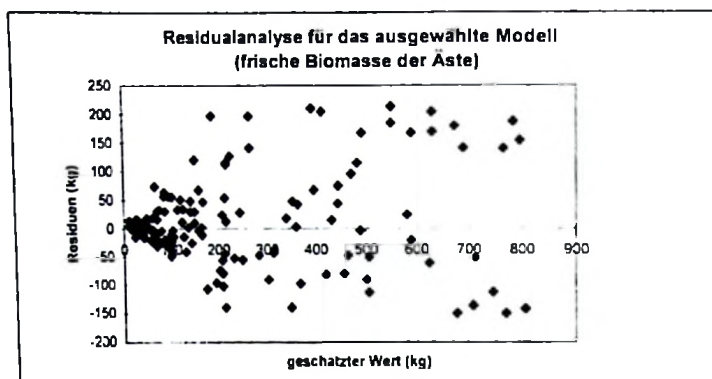


Abb. 5.6 a: Ergebnis der Residualanalyse der frischen Biomasse des Astholzes
Modell: $\ln Y = -2.8146 + 2.6627 \ln BHD - 0.0181 \ln H$

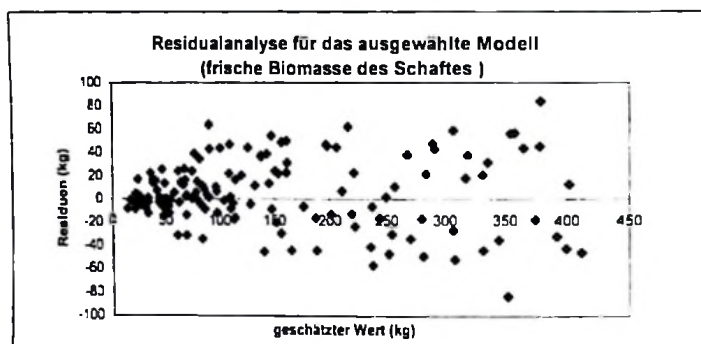


Abb. 5.6 b: Ergebnis der Residualanalyse der frischen Biomasse des Schaftholzes
Modell: $\ln Y = -1.7463 + 1.5171 \ln BHD + 0.8506 \ln H$

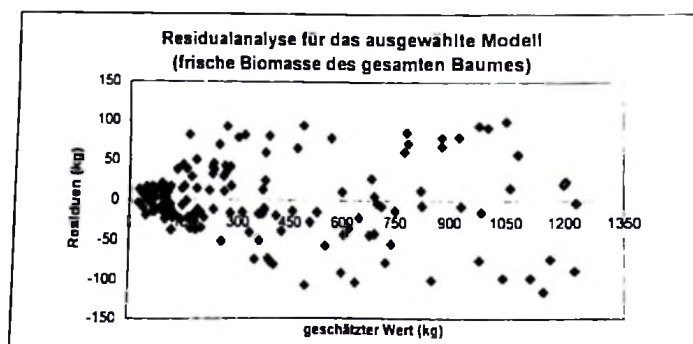


Abb. 5.6 c: Ergebnis der Residualanalyse der frischen Biomasse des Baumholzes
Modell: $\ln Y = -1.7002 + 2.1006 \ln BHD + 0.4898 \ln H$

Die Residualanalyse für die frische Biomasse der Äste, des Stammes und des ganzen Baumes zeigen keinen signifikanten Unterschied in ihrer Verteilung, da sie homogen verteilt sind. Die Residuen für Schäfte und ganze Bäume haben niedrigere Beträge als die der Äste, welche zwar ebenfalls homogen verteilt sind, jedoch relativ hohe Beträge aufweisen. Diese Beobachtung könnte Grund zu der Vermutung geben, daß hier mehr, oder sogar andere, Variablen zu verwenden sind um geringere Residuen zu liefern.

Die Abbildungen 5.7 a, b und c zeigen die Ergebnisse der Residualanalyse der jeweils ausgewählten Modelle für die trockene Biomasse der Bäume bzw. deren Einzelbestandteile

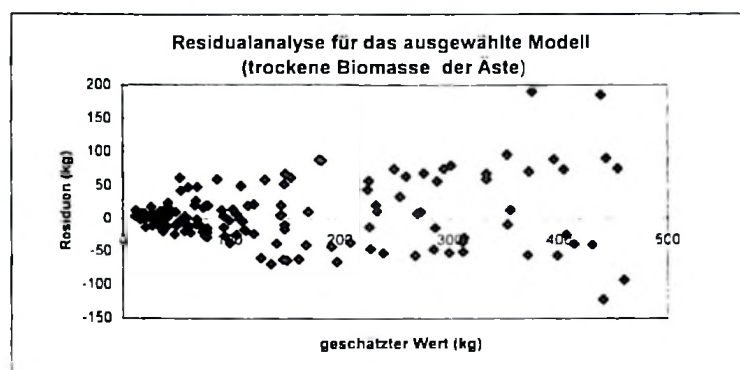


Abb. 5.7 a: Ergebnis der Residualanalyse der trockenen Biomasse des Astholzes
Modell: $\ln Y = -2,0327 + 2,1699 \ln BHD + 0,1651 \ln H$

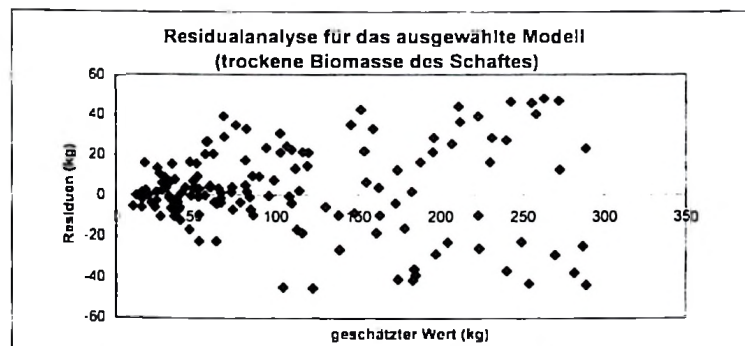


Abb. 5.7 b: Ergebnis der Residualanalyse der trockenen Biomasse des Schaftholzes
Modell: $\ln Y = -1,7789 + 1,4596 \ln BHD + 0,816 \ln H$

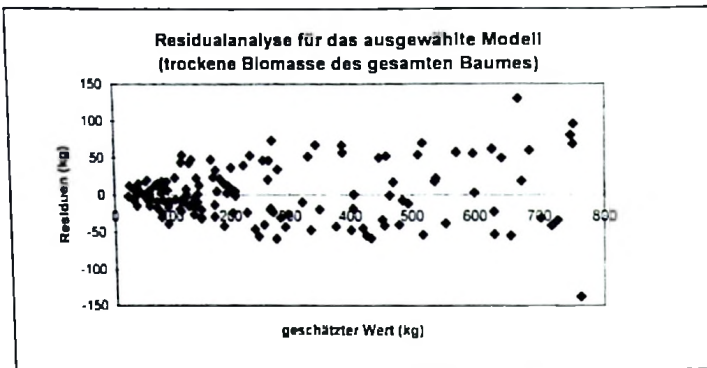


Abb. 5.4-2 c: Ergebnis der Residualanalyse der trockenen Biomasse des **Baumholzes**
 Modell : $\ln Y = -1.2601 + 1.8356 \ln BHD + 0.4994 \ln H$

Sowohl für die Bestimmung der frischen als auch der trockenen Biomasse erwies sich das logarithmische Modell als das günstigste. Dabei wurden die beiden Variablen BHD und Baumhöhe verwendet. Dieses Modell wurde ausgewählt aufgrund der relativen Qualität seiner Ergebnisse für r^2 und den Standardfehler. Die Residualanalyse wies eine geringere Heterogenität auf als bei den übrigen Modellen. Die SLOBODA-Gleichung mit den genannten beiden Variablen erwies sich als ebenfalls geeignet für die Schätzung der Biomasse. Sie rangierte an zweiter, respektive dritter Stelle für die Schätzung der trockenen bzw. frischen Biomasse.

Für die Modelle mit nur einer Variablen wurden die mittels der Rückwärts-Eliminierung erstellten Gleichungen ausgewählt. Die dabei verwendete Variable war stets der BHD². Die polynomischen und potentiellen Gleichungen mit nur einer Variable wurden verworfen, da sie eine Tendenz zur Heterogenität in der Verteilung der Residuen sowie relativ große Standardfehler aufwiesen.

5.5 Biomassefunktionen und -tafeln

Zur Schätzung der Biomasse im Miombo-Wald und innerhalb dieser Region wurden Biomassetafeln erstellt. Hierbei war zu unterscheiden zwischen der relativen Homogenität der kleinklimatischen und standörtlichen Gegebenheiten innerhalb des Untersuchungsgebietes einerseits und dem Wunsch, die Ergebnisse dieser Arbeit auch auf angrenzende Gebiete mit ähnlicher Waldformation anwenden zu können andererseits. Somit entstanden eine lokale und eine "Standard"-Biomassetafel für Miombo-Wald. Die Tafeln finden sich im Anhang dieser

Arbeit, die zugrundeliegenden Gleichungen werden in den folgenden Unterkapiteln 5.51 und 5.52 angegeben.

5.51 Lokale Biomassefunktionen und -tafeln

Für die Erstellung der lokalen Biomassetafel wurde die Methode der Rückwärts-Eliminierung angewendet, wobei der BHD als Variable ausgewählt wurde. Die resultierenden Tafeln haben lediglich lokale Gültigkeit für den Miombo-Wald im Untersuchungsgebiet. Tabelle 5.8 zeigt die verschiedenen Modelle.

Tab. 5.8: Modelle zur Schätzung der verschiedenen Biomassekomponenten (lokale Biomassetafeln)

Komponenten	Modelle	R ² %	SEE %
frische Biomasse			
Astholz	$Y = -70,9738 + 0,7218BHD^2$	86	7,0
Schaftholz	$Y = 3,7514 + 0,3366BHD^2$	86	5,9
Baumholz	$Y = -67,2223 + 1,0585BHD^2$	93	7,0
trockene Biomasse			
Astholz	$Y = -26,450 + 0,4283BHD^2$	84	5,6
Schaftholz	$Y = 5,9067 + 0,2401BHD^2$	86	5,5
Baumholz	$Y = -20,5437 + 0,6684BHD^2$	92	5,5

5.52 Allgemeine Biomassefunktionen

Um eine gewisse Gültigkeit der Biomassetafel auch über das engere Untersuchungsgebiet hinaus zu ermöglichen, wurde eine entsprechende Tafel durch das Hinzuziehen der individuellen Baumhöhe entworfen, bei deren Anwendung auch dem Ertragspotential anderer Standorte Rechenschaft getragen wird. Für die Erstellung der Standard-Biomassetafeln wurden logarithmische Modelle ausgewählt. Tabelle 5.9 zeigt die verschiedenen Modelle.

Tab. 5.9: Modelle zur Schätzung der verschiedenen Biomassekomponenten
(Standard- Biomassetafeln)

Komponenten	Modelle	R ² %	SEE %
frische Biomasse			
Astholz	$\ln Y = -2.8146 + 2.6627 \ln BHD + 0.0181 \ln H$	90	7,3
Schaftholz	$\ln Y = -1.7463 + 1.5171 \ln BHD + 0.8506 \ln H$	87	6,0
Baumholz	$\ln Y = -1.7002 + 2.1006 \ln BHD + 0.4898 \ln H$	95	6,0
trockene Biomasse			
Astholz	$\ln Y = -2,0327 + 2,16991 \ln BHD + 0,1651 \ln H$	88	5,1
Schaftholz	$\ln Y = -1,7789 + 1,4596 \ln BHD + 0,816 \ln H$	89	5,4
Baumholz	$\ln Y = -1,2601 + 1,8356 \ln BHD + 0,4994 \ln H$	95	5,3

Ermittlung des Bias

Die Ermittlung des Bias basiert auf der Standardabweichung der Schätzung und em mittleren Unterschied zwischen beobachtetem Wert und dem geschätzten Wert der transformierten logarithmischen Gleichung.

Tabelle 5.10 faßt die Ergebnisse der Bias Prozent für Frisch-und Trockenbiomasse zusammen

	Komponenten	Mittler unterschied (beobach – geschätzt)	Standard Abweichung der geschätzt wert	Bias in Prozent %
Frischbiomasse	Astholz	15,20	219,60	6,9
	Schaftholz	5,20	109,20	4,8
	Baumholz	7,70	336,50	2,3
Trockenbiomasse	Astholz	10,40	124,40	8,3
	Schaftholz	3,30	77,90	4,2
	Baumholz	7,00	208,00	3,4

Die Ergebnisse aus tabelle 5.10 zeigen, daß der bias der logarithmischen Gleichung zu vernachlässigen ist, da der Wert stets unter 10% der standardabweichung der Schätzung liegt (COCHRAN 1977)

5.6 Zweiphasige Stichprobe

Die Ergebnisse der verschiedenen Arbeitsschritte für die endgültigen Berechnungen werden in den Tabellen 5.11 und 5.12 dargestellt. Tabelle 5.11 zeigt die deskriptive Statistik der Daten aus Phase 1 und Tabelle 5.12 zeigt diejenige aus Phase 2. Die Tabellen enthalten auch die Werte für frische und trockene Biomasse der Bäume und ihrer Komponenten aus Phase 2.

Tab. 5.11: Deskriptive Statistik der Daten aus Phase 1

VARIABLE	MITTELWERT	STANDARD- ABWEICHUNG	STANDARD- FEHLER	VARIANZ
LB-KSG	60,00	24,20	1,08	586 (KSG) ²
LB-Stammzahl	12,29	6,49	0,29	42,1 (stamz) ²
LB-Höhe	9,89	3,42	0,15	11,72 m ²

Hierbei bedeuten:

- LB-KSG = Kronenschlußgrad, ermittelt aus Luftbildern
- LB-Stammzahl = Stammzahl, ermittelt aus Luftbildern
- LB-Höhe = Bestandesmittelhöhe, ermittelt aus Luftbildern

Tab. 5.12: Deskriptive Statistik der Daten aus Phase 2 sowie dendrometrische Werte und Biomassewerte

VARIABLE	MITTELWERT	STANDARD- ABWEICHUNG	STANDARD- FEHLER	VARIANZ
Terr-KSG	69,42	19,95	3,04	597,87 (KSG) ²
Terr-Stammzahl	17,00	7,30	1,12	53,52 (Stamz) ²
Terr-Höhe	10,50	3,27	0,49	10,7 m ²
Stichprobe frische Astholzbiomasse	2860,25	1733,86	264,41	3006298,63 (kg/ha) ²
Stichprobe frische Schaftholzbiomasse	2767,98	1596,64	243,4855	2549262,49 (kg/ha) ²
Stichprobe frische Baumholzbiomasse	6073,65	3634,18	554,20	1,3207 * 10 ⁷ (kg/ha) ²
Stichprobe trockene Astholzbiomasse	2113,95	1208,86	184,34	1461347,78 (kg/ha) ²
Stichprobe trockene Schaftholzbiomasse	2035,01	1155,18	176,16	1334444,41 (kg/ha) ²
Stichprobe trockene Baumholzbiomasse	4322,76	377,51	2475,52	6128208,13 (kg/ha) ²

Hierbei bedeuten:

- Terr-KSG = Kronenschlußgrad, terrestrisch ermittelt
- Terr-Stammzahl = Stammzahl, terrestrisch ermittelt
- Terr-Höhe = Bestandesmittelhöhe, terrestrisch ermittelt

5.61 Bestandesparameter im Luftbild und Gelände

Als Hilfsvariable zur Biomasseschätzung mit Hilfe eines zweiphasigen Stichprobenverfahrens wurden im Luftbild die Kronenzahl, der Kronenschlußgrad und die Bestandesmittelhöhe ausgewählt. Die Ergebnisse der Aufnahmen im Luftbild und im Gelände werden im folgenden vergleichend dargestellt.

5.611 Stammzahl

Die Stammzahl läßt sich im Luftbild im Prinzip einfach durch Zählen der sichtbaren Baumkronen ermitteln. In der Diskussion dieser Arbeit (Kapitel 6) wird auf die hierbei auftretenden Probleme in der Praxis detailliert eingegangen. An dieser Stelle sei lediglich darauf hingewiesen, daß aufgrund der grundsätzlichen Problematik des Verfahrens nur durchschnittlich 71% der tatsächlichen Stammzahl im Luftbild erfaßt wurden. Es besteht jedoch ein linearer und relativ strenger Zusammenhang zwischen beiden Variablen und zwischen im Luftbild und terrestrisch erfaßten Stammzahlen von $r^2 = 0,8$. Abbildung 5.8 zeigt den Zusammenhang zwischen der terrestrisch und photogrammetrisch ermittelten Stammzahl.

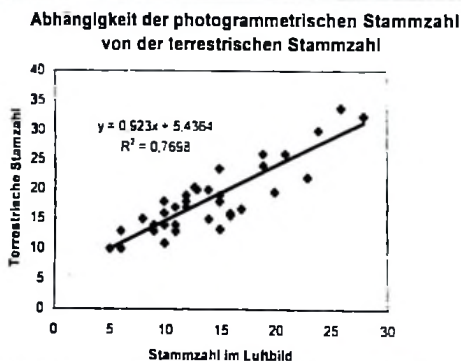


Abb. 5.8 Zusammenhang zwischen den terrestrischen und im Luftbild ermittelten Stammzahlen

5.612 Kronenschlußgrad

Die im Luftbild und terrestrisch ermittelten Kronschlußgradwerte haben ebenfalls einen linearen und mit $r^2 = 0,92$ strengen Zusammenhang. Wie bereits bei der Ermittlung der Stammzahl, so wurde auch der Kronenschlußgrad im Luftbild unterschätzt. Abbildung 5.9 zeigt den Zusammenhang zwischen den terrestrisch und photogrammetrisch ermittelte Kronenschlußgraden

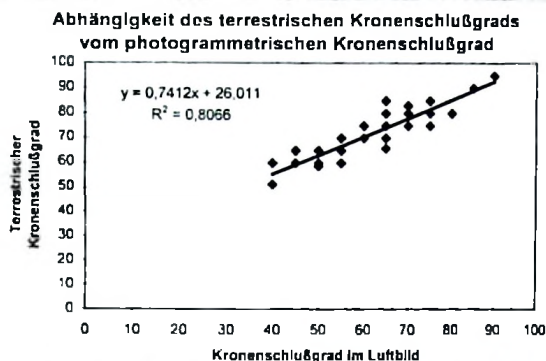


Abb. 5.9: Zusammenhang zwischen im Luftbild und terrestrisch ermittelten Werten für den Kronenschlußgrad

5.613 Mittelhöhe

Mit dem Datenmaterial der terrestrischen und photogrammetrischen Probekreisaufnahmen wurden die mittleren Höhen probeflächenweise hergeleitet. Der Zusammenhang zwischen beiden Datensätzen ist mit $r^2 = 0,89$ straff. Die Mittelhöhe wurde im Luftbild wie erwartet ebenfalls unterschätzt. Abbildung 5.10 zeigt den Zusammenhang zwischen den terrestrisch und photogrammetrisch ermittelten Mittelhöhen.

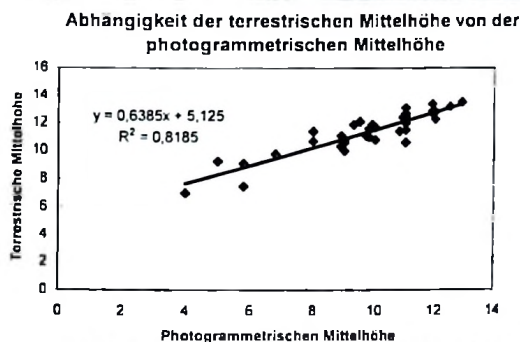


Abb. 5.10: Der Zusammenhang zwischen den terrestrisch und im Luftbild ermittelten Mittelhöhen

5.62 Beziehung zwischen Biomasse und Hilfsgrößen aus dem Luftbild

Die im Luftbild ermittelten drei Variablen weisen straffe lineare Zusammenhänge zur den entsprechenden und terrestrisch ermittelten Größen auf. Bei einem weiteren Schritt wurden die Beziehungen von Hilfsvariablen aus dem Luftbild und daraus abgeleiteten weiteren Variablen zu den als Zielgröße definierten Ast-, Schaft- und Baumbiomassen mit Hilfe der PEARSON - Korrelationskoeffizienten überprüft. Die Ergebnisse werden in Tabelle 5.12 dargestellt.

Die verwendeten Variablen und die entsprechenden Abkürzungen sind.

STZ	=	Stammzahl der Stichprobenfläche
STZ2	=	Quadrat der Stammzahl der Stichprobenfläche
KSG	=	Kronenschlußgrad der Stichprobenfläche
KSG2	=	Quadrat des Kronenschlußgrades der Stichprobenfläche
H	=	Bestandesmittelhöhe der Stichprobenfläche
H2	=	Quadrat der Mittelhöhe der Stichprobenfläche
KSG2*STZ	=	Produkt aus dem Quadrat des Kronenschlußgrades und der Stammzahl der Stichprobenfläche
KSG*STZ	=	Produkt aus Kronenschlußgrad und Stammzahl der Stichprobenfläche
KSG*H	=	Produkt aus Kronenschlußgrad und Mittelhöhe der Stichprobenfläche

Tab. 5.13: Zusammenhang zwischen den Zielgrößen (Ast-, Schaft- und Ganzbaum-biomassen) und den Luftbild-Hilfsgrößen für n = 507

(r = Pearson-Korrelationskoeffizient)

Unabhängige Variable	Frische Biomasse			Trockene Biomasse		
	Astholz r	Schaftholz z r	Baumholz r	Astholz r	Schaftholz r	Baumholz r
STZ	0,738	0,714	0,737	0,707	0,734	0,715
STZ2	0,714	0,719	0,714	0,692	0,713	0,698
STZ2*H	0,745	0,749	0,745	0,727	0,744	0,732
STZ*H2	0,777	0,780	0,777	0,761	0,776	0,765
STZ*H	0,777	0,781	0,777	0,753	0,774	0,759
KSG	0,765	0,767	0,764	0,744	0,761	0,748
KSG2	0,866	0,867	0,865	0,853	0,864	0,855
KSG*STZ	0,832	0,836	0,832	0,810	0,830	0,816
KSG*H	0,776	0,777	0,775	0,762	0,773	0,765
KSG2*H	0,771	0,776	0,772	0,771	0,705	0,728
KSG*STZ2	0,759	0,763	0,760	0,744	0,759	0,748
KSG2*STZ	0,863	0,866	0,863	0,834	0,860	0,832
H	0,569	0,571	0,568	0,560	0,569	0,568
H2	0,560	0,561	0,560	0,560	0,563	0,561
H2*STZ2	0,760	0,764	0,761	0,758	0,762	0,754
STZ2*KSG2	0,779	0,782	0,779	0,778	0,784	0,769
H2*KSG2	0,818	0,817	0,817	0,808	0,815	0,814
H2*KSG	0,756	0,755	0,755	0,755	0,753	0,752

Wie aus der Tabelle 5.13 ersichtlich, weisen die meisten unabhängigen Variablen eine relativ starke Korrelation mit den drei Biomassekomponenten auf. Die Korrelationskoeffizienten haben eine Spanne von $r = 0,56$ (für die mittlere Bestandeshöhe) und $r = 0,86$ (für den Kronenschlußgrad). Die mittlere Bestandeshöhe hat erwartungsgemäß die niedrigste Korrelation, da sie innerhalb des Untersuchungsgebiets nur gering variiert. Ebenso erwartungsgemäß ist die hohe Korrelation des Kronenschlußgrades, da die Äste einen relativ großen Teil der gesamten Biomasse repräsentieren.

5.63 Regressionsmodelle für flächenbezogene Biomasseschätzungen

Bei der Auswahl der Regressionsmodelle zur Schätzung der Biomasse auf einzelnen Probeflächen wurde vorgegangen wie bei der einzelbaumweisen Ermittlung der Biomasse. Das heißt, verschiedene Modelle mit ein bis fünf Variablen wurden auf ihre Eignung für die Schätzung der frischen und trockenen Biomasse des Stammes, der Äste und des gesamten Baumes geprüft. Dabei wurden mit Hilfe des Programmpakets SAS anhand der Kriterien $C_{(p)}$ (MALLOWS), MSE und R^2 die für die Biomasseschätzung geeignetste Variable oder Kombination mehrerer Hilfsvariablen, wie Stammzahl, Kronenschlußgrad und Höhe aus dem Luftbild ermittelt. In den nachfolgenden Tabellen werden die Ergebnisse so angeordnet, daß stets die drei besten Resultate für die drei genannten Kriterien angezeigt werden und zwar, in aufsteigender Reihenfolge, für Modelle mit ein bis fünf Variablen. Die Tabellen 5.14 a, b und c zeigen die Zusammenfassungen der Ergebnisse der drei besten Modelle, welche zur Bestimmung der Biomasse des Stammes, der Äste und des gesamten Baumes dienen. Im folgenden werden exemplarisch nur die Modelle für die trockene Biomasse dargestellt, während die Ergebnisse für die frische Biomasse sich im Anhang 5. befinden.

Tab. 5.14 a: Ergebnisse der Variablenselektion und der besten Modelle für die Ermittlung der trockenen Biomasse des gesamten **Astholzes** innerhalb einer Stichprobefläche

Anzahl Variablen	r^2 bzw. R^2	$C(p)$	MSE (Kg/ha) ²	Unabhängige Variablen
1	0,75	46,26	374968	KSG2
1	0,740	48,14	383207	KSG2*STZ
1	0,69	65,90	461342	KSG*STZ
2	0,82	24,44	276959	STZ2, KSG2*STZ
2	0,82	25,57	282062	KSG2, KG2*STZ2
2	0,81	26,19	284853	KSG*STZ2, KSG2*STZ
3	0,84	20,66	257347	STZ*H, KSG*STZ, H2*KSG
3	0,84	20,91	258476	H2*STZ, KSG2*STZ, H2*KSG
3	0,83	22,60	266321	KSG2, KSG*STZ2, KG2*STZ2
4	0,85	19,40	248654	KSG, H2*KSG, KG2*STZ2, HOH
4	0,85	19,53	249273	KSG, KSG*H, H2*KSG2, KG2*STZ2
4	0,85	19,78	250462	KSG, KSG*H, KSG*STZ2, H2*KSG2
5	0,86	17,34	235591	KSG, KSG*H, H2*KSG, H2*KSG2, KG2*STZ2
5	0,87	17,69	237303	KSG, KSG*H, KSG*STZ2, H2*KSG, H2*KSG2
5	0,86	18,06	239103	KSG, KSG*H, KSG2*STZ, H2*KSG, H2*KSG2

Tab. 5.14 b: Ergebnisse der Variablenselektion und der besten Modelle für die Ermittlung der trockenen Biomasse des gesamten **Schaftholzes** innerhalb einer Stichprobefläche

Anzahl Variablen	r^2 bzw. R^2	$C(p)$	MSE (Kg/ha) ²	Unabhängige Variablen
1	0,75	47,42	339324	KSG2
1	0,74	48,22	342455	KSG2*STZ
1	0,69	65,89	411865	KSG*STZ
2	0,87	25,05	249749	STZ2, KSG2*STZ
2	0,83	25,55	251770	KSG2, KG2*STZ2
2	0,81	26,51	255605	KSG*STZ2, KSG2*STZ
3	0,83	21,02	231272	STZ*H, KSG*STZ, H2*KSG
3	0,83	21,33	232518	H2*STZ, KSG2*STZ, H2*KSG
3	0,83	22,96	239249	KSG2, KSG*STZ2, KG2*STZ2
4	0,84	19,66	223125	KSG, H2*KSG, KG2*STZ2, HOH
4	0,84	19,81	223758	KSG, KSG*H, H2*KSG2, KG2*STZ2
4	0,84	20,06	224786	KSG, KSG*H, KSG*STZ2, H2*KSG2
5	0,86	17,65	211683	KSG, KSG*H, H2*KSG, H2*KSG2, KG2*STZ2
5	0,85	18,00	213218	KSG, KSG*H, KSG*STZ2, H2*KSG, H2*KSG2
5	0,85	18,40	214972	KSG, KSG*H, KSG2*STZ, H2*KSG, H2*KSG2

Tab. 5.14 c: Ergebnisse der Variablenselektion und der besten Modelle für die Ermittlung der trockenen Biomasse der **baumholz** innerhalb einer Stichprobenfläche

Anzahl Variablen	r^2 bzw. R^2	$C(p)$	MSE (Kg/ha) ²	Unabhängige Variablen
1	0,74	46,79	1576776	KSG2
1	0,74	48,22	1603005	KSG2*STZ
1	0,69	66,18	1933073	KSG*STZ
2	0,81	24,54	1159311	STZ2, KSG2*STZ
2	0,81	25,74	1181999	KSG2, KG2*STZ2
2	0,81	26,44	1195108	KSG*STZ2, KSG2*STZ
3	0,84	20,80	1078251	STZ*H, KSG*STZ, H2*KSG
3	0,84	21,01	1082281	H2*STZ, KSG2*STZ, H2*KSG
3	0,83	22,64	1113729	KSG2, KSG*STZ2, KG2*STZ2
4	0,85	19,51	1041427	KSG, H2*KSG, KG2*STZ2, HOH
4	0,85	19,54	1041827	KSG, KSG*H, H2*KSG2, KG2*STZ2
4	0,85	19,81	1047187	KSG, KSG*H, KSG*STZ2, H2*KSG2
5	0,86	17,30	983699	KSG, KSG*H, H2*KSG, H2*KSG2, KG2*STZ2
5	0,86	17,67	991225	KSG, KSG*H, KSG*STZ2, H2*KSG, H2*KSG2
5	0,85	18,06	999294	KSG, KSG*H, KSG2*STZ, H2*KSG, H2*KSG2

Die Ergebnisse zeigen auch, daß der $C(p)$ Wert hier keine zuverlässige Aussage über die Qualität des Modells machen kann, weil alle $C(p)$ -Werte in dieser Untersuchung weit über den erwarteten Werten liegen (in allen Fällen waren die $C(p)$ -Werte wesentlich größer als die Zahl der Variablen ($P+1$)). Die MSE-Werte für Modelle mit zwei Variablen unterscheiden sich nicht wesentlich von denen mit mehreren Variablen. Es besteht lediglich die Tendenz höherer MSE-Werte für Modelle mit nur einer Variablen. Daher konnte mit der SAS Variablenauswahl-Methode (*variable selection method*) kein eindeutiger Weg zur Identifizierung des geeignetsten Modells und dessen Variablen gefunden werden. Deshalb wurde auch die Rückwärts-Eliminierung des SAS Paketes angewandt.

5.64 Modellauswahl zur Schätzungen von flächenbezogenen Biomassen mit Rückwärts-Eliminierung

5.641 Ergebnisse der Modellauswahl für die probekreisbezogene Schätzung der trockenen Biomasse der Astholz, Schftholz und Baumholz

Die Ergebnisse der Auswahl der Modelle und Variablen für die trockene Biomasse der Äste, des Schaftes und der gesamten Bäume auf der Stichprobenfläche werden in den Tabellen 5.15- a, b und c exemplarisch dargestellt. Die entsprechenden Ergebnisse für die frische Biomasse befinden sich im Anhang 5.

Tab. 5.15 a: Übersicht über die Prozedur der Rückwärts-Eliminierung für die abhängige Variable "trockene Biomasse des Astholzes" auf der Probekreisfläche

Schritt	eliminierte Variablen	Anzahl verbleibender Variablen	R ² (Partiell)	Modell R ²	C(p)	F	Prob>F
1	STZ2	16	0,00	0,93	16,00	0,0025	0,9609
2	KSG2*H	15	0,00	0,93	14,10	0,1029	0,7509
3	KSG*STZ	14	0,00	0,92	12,79	0,7412	0,3969
4	KSG2*STZ	13	0,01	0,92	11,03	0,2584	0,6152
5	STZ2*H	12	0,01	0,91	12,47	3,8334	0,0599
6	KSG*STZ2	11	0,02	0,90	15,65	5,2711	0,0288
7	KG2*STZ2	10	0,00	0,90	14,32	0,6007	0,4442
8	H2*KSG	9	0,01	0,88	17,02	4,2591	0,0472
9	H	8	0,03	0,86	24,11	7,4949	0,0099
10	H2	7	0,00	0,85	22,83	0,4988	0,4849
11	KSG2	6	0,01	0,84	24,46	2,5523	0,1191
12	STZ	5	0,00	0,84	23,09	0,4229	0,5196
13	H2*STZ	4	0,00	0,84	21,45	0,2433	0,6247
14	STZ*H	3	0,03	0,81	30,56	7,7593	0,0083

Das schließlich ausgewählte Modell ist

$$TBM_{\text{trock}} = 36,0 - 8613,60KSG - 102180KSG \cdot H + 61,9H^2 \cdot KSG2$$

5.4

Tab. 5.15 b: Ergebnisse der Varianzanalyse für das Modell 5.4

Fehler-ursache	Freiheitsgrade (FG)	Quadratsummen (SQ)	mittlere Quadratsummen (MQ)	F	Prob>F
Regression	3	49555545,52	16518515,17	54,50	0,0001
Error	39	11821061,55	303104,142		
Total	42	61376607,08			

Tab. 5.15 c: Ergebnisse des Signifikanztests der ausgewählten besten Variable für das Modell 5.4

Variable	Parameter Schätzung	Standard-fehler	Quadratsummen (SQ)	F	Prob>F
INTERCEPT	-36,0	309,51	4099,25	0,01	0,9080
KSG	8613,6	1626,35	8502281,54	28,05	0,0001
KSG*H	-1021,8	215,32	6825383,01	22,52	0,0001
H2*KSG2	61,9	9,8	11999930,66	39,59	0,0001

Alle Variablen des Modells sind höchst signifikant

Tab. 5.16 a: Übersicht über die Prozedur der Rückwärts-Eliminierung für die abhängige Variable "trockene Biomasse des Schaftholzes" für die Stichprobenfläche

Schritt	eliminierte Variablen	Anzahl verbleibender Variablen	R ² (Partiell)	Modell R ²	C(p)	F	Prob>F
1	STZ2	16	0,00	0,93	16,0026	0,0026	0,9594
2	KSG2*H	15	0,00	0,93	14,1004	0,1017	0,7524
3	KSG*STZ	14	0,00	0,93	12,7889	0,7406	0,3970
4	KSG2*STZ	13	0,00	0,92	11,0310	0,2628	0,6122
5	STZ2*H	12	0,01	0,91	12,5151	3,8814	0,0584
6	KSG*STZ2	11	0,02	0,90	15,7220	5,2925	0,0285
7	KG2*STZ2	10	0,00	0,89	14,40802	0,6126	0,4398
8	H2*KSG	9	0,01	0,89	17,0959	4,2365	0,0478
9	H	8	0,03	0,86	24,3193	7,5911	0,0095
10	H2	7	0,00	0,86	23,0858	0,5284	0,4723
11	KSG2	6	0,01	0,85	24,8100	2,6025	0,1157
12	STZ	5	0,00	0,84	23,4144	0,4044	0,5289
13	H2*STZ	4	0,00	0,84	21,8111	0,2697	0,6066
14	STZ*H	3	0,03	0,80	31,8960	8,3784	0,0063

Das schließlich ausgewählte Modell ist

$$Y = -35,0 + 8275,6 \text{KSG} - 975,8 \text{KSG_H} + 58,8 \text{H2_KSG2}$$

5.5

Tab. 5.16 b: Ergebnisse der Varianzanalyse für das Modell 5.5

Fehlerursache	Freiheitsgrade (FG)	Quadratsummen (SQ)	mittlere Quadratsummen (MQ)	F	Prob>F
Regression	3	45277780,02	15092593,34	54,66	0,0001
Error	39	10768885,01	276125,25		
Total	42	56046665,03			

Tab. 5.16 c: Ergebnisse des Signifikanztests der ausgewählten besten Variable bei 0.0001 Einschnübniveau für das Modell 5.5

Variable	Parameter Schätzung	Standardfehler	Quadratsummen (SQ)	F	Prob>F
INTERCEPT	-35,0	295,42	3841,51	0,01	0,9067
KSG	8275,6	1552,28	7848142,71	28,42	0,0001
KSG*H	-975,8	205,51	6225461,77	22,55	0,0001
H2*KSG2	58,8	9,38	10854479,27	39,31	0,0001

Alle Variablen des Modells sind signifikant

Tab. 5.17 a: Übersicht über die Prozedur der Rückwärts-Eliminierung für die abhängige Variable "trockene Biomasse des Baumholzes" für die Stichprobenfläche

Schritt	eliminierte Variablen	Anzahl verbleibender Variablen	R ² (Partiell)	Modell R ²	C(p)	F	Prob>F
1	STZ2	16	0,00	0,93	16,00	0,0023	0,9622
2	KSG2*H	15	0,00	0,93	14,11	0,1137	0,7386
3	KSG*STZ	14	0,00	0,93	12,79	0,7302	0,4003
4	KSG2*STZ	13	0,00	0,92	11,05	0,2835	0,5986
5	STZ2*H	12	0,01	0,91	12,50	3,8409	0,0597
6	KSG*STZ2	11	0,02	0,90	15,72	5,3066	0,0284
7	KG2*STZ2	10	0,00	0,90	14,44	0,6422	0,4290
8	H2*KSG	9	0,01	0,88	17,18	4,2822	0,0467
9	H	8	0,03	0,86	24,22	7,4252	0,0102
10	H2	7	0,00	0,85	22,97	0,5200	0,4758
11	KSG2	6	0,01	0,84	24,57	2,5194	0,1214
12	STZ	5	0,00	0,84	23,17	0,4049	0,5286
13	H2*STZ	4	0,00	0,84	21,50	0,2271	0,6365
14	STZ*H	3	0,03	0,81	30,73	7,8241	0,0080

Das schließlich ausgewählte Modell ist

$$Y_{\text{Biom}} = -71,1975 + 17683,1544\text{KSG} - 2100,7856\text{KSG} \cdot \text{H} + 127,0835\text{H}^2 + \text{KSG}^2 \quad 5.6$$

Tab. 5.17 b: Ergebnisse der Varianzanalyse für das Modell 5.6

Fehlerursache	Freiheitsgrade (FG)	Quadratsummen (SQ)	mittlere Quadratsummen (MQ)	F	Prob>F
Regression	3	207854176,90	69284725,63	54,55	0,0001
Error	39	49530564,75	1270014,48		
Total	42	257384741,66			

Tab. 5.17 c: Ergebnisse des Signifikanztests der ausgewählten besten Variable bei 0.0001 Einschlussniveau für das Modell 5.6

Variable	Parameter Schätzung	Standardfehler	Quadratsummen (SQ)	F	Prob>F
INTERCEPT	-71,20	633,57	16038,18	0,01	0,9111
KSG	17683,15	3329,06	35833164,17	28,21	0,0001
KSG*H	-2100,78	440,74	28853376,39	22,72	0,0001
H2*KSG2	127,08	20,13	50634602,88	39,87	0,0001

Alle Variablen des Modells sind signifikant

5.642 Ergebnisse der Modellauswahl für die probekreisbezogene Schätzung der frischen Biomasse der Äste, Schäfte und ganzer Bäume

Für die Modellbildung zur Schätzung der **frischen** Biomasse mit Hilfe der Rückwärts-Eliminierung wurde ebenso vorgegangen wie bei der Schätzung der trockenen Biomasse. Im folgenden werden nur die ausgewählten Gleichungen angegeben, während die dazugehörigen Tabellen im Anhang 6 zu finden sind

Tab. 5.18: Modellauswahl für die probekreisbezogene Schätzung der frischen Biomasse des Astes, Schaftes und -Baumholzes

Komponente	Modell	R ² %
fr Biomasse	FBM = Frische Biomasse	
Astholz	$FBM_{ast} = 75,0 + 8637,6KSG + 37,7H^2 * KSG - 617,7H$	78
Schaftholz	$FBM_{sch} = 56,0 + 8157,9KSG + 32,6H^2 * KSG - 549,6H$	79
Baumholz	$FBM_{baum} = 130,0 + 16795,5KSG + 70,3H^2 * KSG - 1167,4H$	79

5.65 Residualanalyse der verwendeten Modelle

Die Ergebnisse der Residuen der für die Biomasseschätzungen der Bäume und ihrer Komponenten pro Hektar verwendeten Modelle werden in den Abbildungen 5.11. a, b, c und 5.12 a, b, c dargestellt.

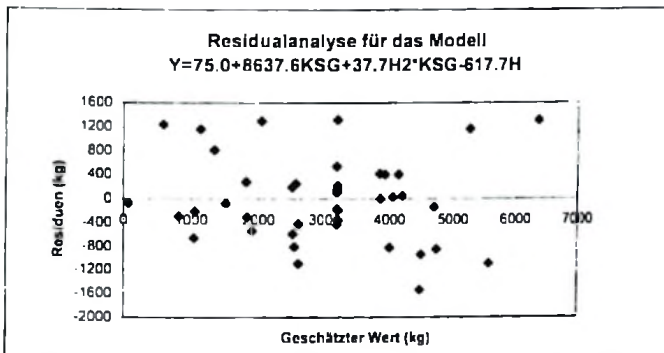


Abb. 5.11 a: Ergebnisse der Residualanalyse des Modells für die Schätzungen der frischen Biomasse der Astholzes pro Hektar

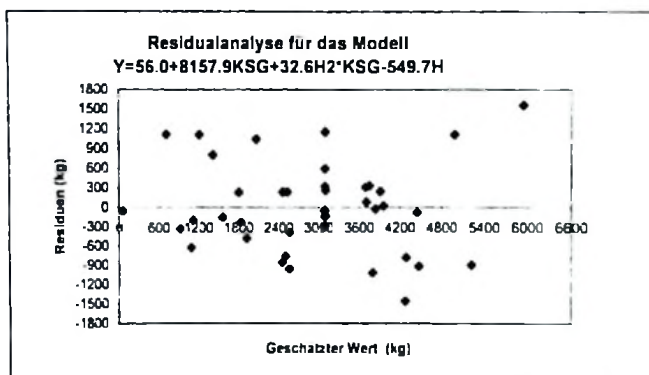


Abb. 5.11 b: Ergebnisse der Residualanalyse des Modells für die Schätzungen der frischen Biomasse der Schafholzes pro Hektar

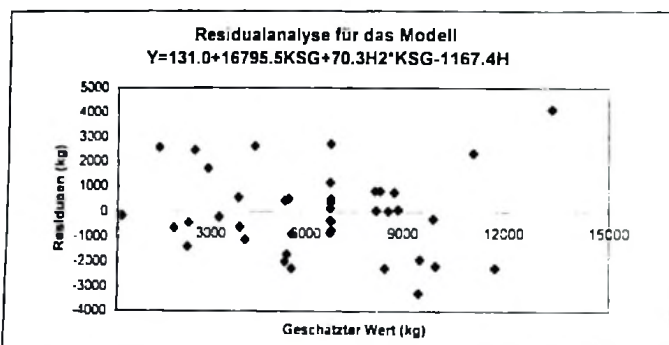


Abb. 5.11 c: Ergebnisse der Residualanalyse des Modells für die Schätzungen der frischen Biomasse des Baumholzes pro Hektar

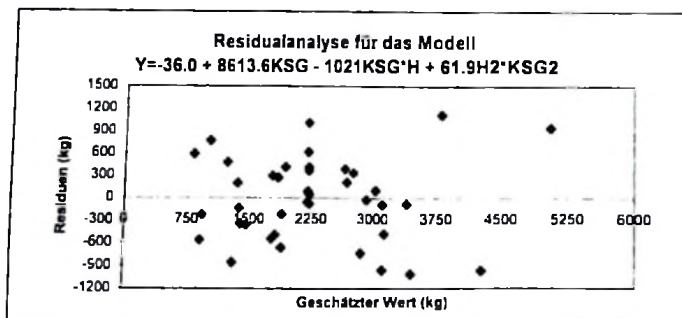


Abb. 5.12 a: Ergebnisse der Residualanalyse des Modells für die Schätzungen der trockenen Biomasse des Astholzes pro Hektar

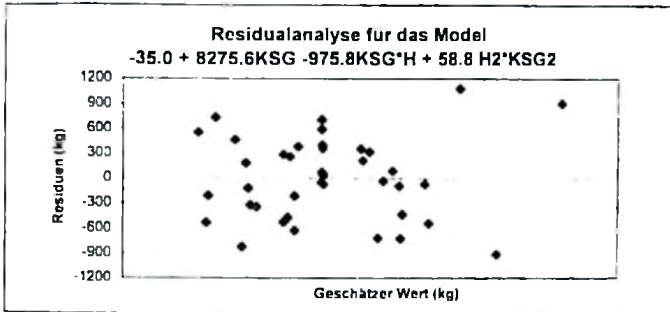


Abb. 5.12 b: Ergebnisse der Residualanalyse des Modells für die Schätzungen der trockenen Biomasse des **Schafftholzes** pro Hektar

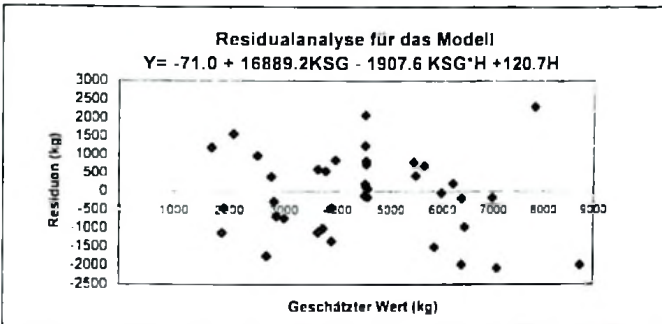


Abb. 5.12 c: Ergebnisse der Residualanalyse des Modells für die Schätzungen der trockenen Biomasse des **Baumholzes** pro Hektar

Die Residuen weisen keinen bestimmten Trend auf. Sie sind relativ zufällig verteilt. Dies bedeutet, daß die Modelle adäquat sind und sich für die Anwendung für das Untersuchungsgebiet eignen. Aufgrund der, im Gegensatz zur SAS Modell-Auswahlmethode (siehe Kapitel 4), hohen Qualität der Ergebnisse der Rückwärts-Eliminierung wurden die durch letztere Methode ausgewählten Modelle für die endgültige Biomasseschätzung verwendet. Sie erfüllen alle Voraussetzungen für optimale Modelle und Variablen. Die Resultate weisen jedoch eine Inkonsistenz auf, indem die Summe der geschätzten Biomassen der Einzelkomponenten nicht die gesamten Baumbiomassen ergibt. Dieser Umstand wird in Kapitel 6.243 noch eingehend diskutiert. Das Problem kann jedoch gelöst werden, indem das Regressionsmodell für die gesamte Biomasse der Bäume modifiziert wird. Hierfür sind die Regressionskoeffizienten der beiden Einzelkomponenten Äste und Schäfte zu addieren. Durch dieses einfache Additionsverfahren (CUNIA und BRIGGS) ergibt sich die Gesamtp Biomasse exakt aus der

Summe der beiden Teilkomponenten. Diese letztendlich ausgewählten Modelle werden in Tabelle 5.19 dargestellt.

Tab. 5.19: Darstellung der für die Biomasseschätzung ausgewählten Modelle

Komponente	Modell	R ² %
fr. Biomasse	FBM=Frischbiomasse	
Astholz	$FBM_{Ast} = 75,0 + 8637,6KSG + 37,7H^2 * KSG - 617,7H$	78
Schaftholz	$FBM_{Sch} = 56,0 + 8157,9KSG + 32,6H^2 * KSG - 549,6H$	79
Baumholz	$FBM_{Baum} = 130,0 + 16795,5KSG + 70,3H^2 * KSG - 1167,4H$	79
tr. Biomasse	TMB = Trockenbiomasse	
Astholz	$TBM_{Ast} = -36,0 + 8613,6KSG - 1021,8KSG * H + 61,9H^2 * KSG^2$	81
Schaftholz	$TBM_{Sch} = -35,0 + 8275,6KSG - 975,8KSG * H + 58,8H^2 * KSG^2$	81
Baumholz	$TBM_{Baum} = -71,0 + 16889,2KSG - 1997,6KSG * H + 120,7H^2 * KSG^2$	81

5.66 Flächenbezogene Biomassen

Die Ergebnisse zeigen, daß die Äste bei der gesamten Biomasse mit mehr als 50% Prozent beteiligt sind. Der Standardfehler, welcher sich aus der Berechnung nach der einfachen Formel (Formel 4.28) und derjenige, welcher sich aus der Formel für das multivariate Modell ergab (Formel 4.29), sind einander sehr ähnlich. Es gibt in dieser Untersuchung keinen signifikanten Unterschied zwischen diesen beiden Formeln für die jeweilige Anzahl verwendeter Variablen. Die Ergebnisse der Biomasseschätzungen pro Hektar werden zusammen mit den aufgetretenen Standardfehlern in Tabelle 5.20 dargestellt.

Tab. 5.20. Ergebnisse der Biomasseschätzungen pro Hektar

Komponenten	Biomasse (kg/ha)	SEE%	
		Multivariates Modell	Univariates Modell
frische Biomasse			
Äste	25750	5,6	5,4
Schäfte	24300	5,3	5,2
Ganzbaum	50050	5,6	5,4
trockene Biomasse			
Äste	16550	5,8	5,7
Schäfte	15900	5,8	5,6
Ganzbaum	32450	5,7	5,6

Wirtschaftlichkeit

Für die Beurteilung der verfahren muß somit neben bereits bekannten Beziehungen (S. kap 5.62) zwischen den Luftbild- und Zielgrößen die Kostenstruktur bekannt sein. Die Kosten den Zweiphasigen Luftbildgestützten Regressionsstichprobe setzen sich zusammen aus Kosten für die

1. Inventurphase

- Luftbildererstellung
- Geräteabschreibung
- Luftbildauswertung und für

2. Inventurphase

- Terrestrische Stichprobenaufnahme und auswertung
- Material
- Logistik (Transport)

Nach Wolf (1992) ist die Abschreibung des Gerätes betrag etwa 0,17 DM pro minute. In der vorliegenden arbeit wurde 12 minuten pro stichprobe gebraucht

Tabelle 5.21 zeigt die Gesamtkosten für die erste und zweite phase

Inventurphase	komponente	Kost (DM)	Kost pro stichprobe	K = c ₂ /c ₁	
1. Inventurphase	Luftbildheshaffung	1300	6,70 DM	1:14	
	Geräteabschreibung	1060			
	Luftbildauswertung	1040			
	Total	3400			
2. Inventurphase	terrestrische Stichprobeaufnahme	2400	95,35		
	Logistik	1500			
	Material	200			
	Total	4100			

Optimaler Stichprobenumfang

Bei einem einfach erweiterten Vertrauensbereich (t -wert =1) und einem Kostenverhältnis von 1:14 ergab sich für die Schätzung der Biomasse der folgende optimale Stichprobenumfang (minimale Kosten bei Vorgegebener Genauigkeit der Zielgröße) der ersten und zweiten Inventurphase:

$$S_y = \pm 196 \text{ kg/ha}$$

$$S_y \% = 49.5$$

$$S_y \% = 5.6$$

$$R^2 = 0.85 \text{ und } k = c_2/c_1 = 14$$

Umfang der Stichproben für den Zweiphasen Stichproben:

$$n_1 = 170 \quad (\text{nach Formel 4.32})$$

$$\text{und } n_2 = 5 \quad (\text{nach Formel 4.33})$$

rein terrestrische Stichproben

$$n = \frac{s_1^2 \%}{s_2^2 \%} = 78$$

Vergleich von zweiphasiger und einphasiger rein terrestrischer Stichprobe:

$5 + (170:14) = 17$ terrestrische Stichproben können für die Kosten der zweiphasigen Stichprobe durchgeführt werden.

5.661 Verteilung der Biomassen pro Hektar nach Durchmesserklassen

Die Stammzahlverteilung über dem Durchmesser zeigt im allgemeinen an, ob die untersuchte Wald eher die Charakteristik eines Wirtschafts- oder eines Naturwaldes aufweist.

Abbildung 5.13 zeigt das Ergebnis der Auswertung einer entsprechenden Untersuchung.

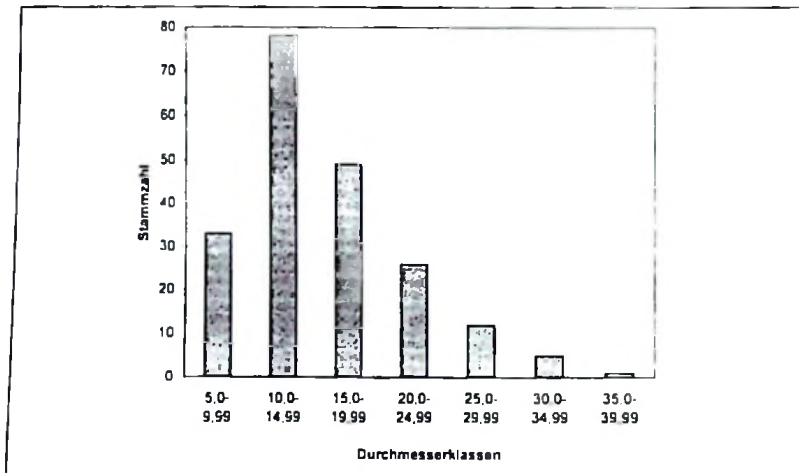


Abb. 5.13 Stammzahlverteilung nach Durchmesserklassen

Die Stammzahlverteilung der untersuchten Bestände zeigen eine Asymmetrie mit einem Maximum bei geringeren Durchmesserklassen. Im Miombo-Wald liegt eine Ungleichaltrigkeit vor, so daß eine invertierte J-förmige Verteilung erwarten wäre, was sich jedoch hier nicht bestätigt hat. In der niedrigsten Durchmesserstufe von 5,0 bis 9,9 cm ist die Stammzahl, anscheinend verursacht durch häufige Brände, erheblich reduziert. Auf der anderen Seite waren Bäume mit einem BHD größer als 30 cm im Untersuchungsgebiet selten, wofür grundsätzlich zwei Gründe in Frage kommen. Entweder wurden die stärksten Bäume selektiv entnommen, oder die Bäume erreichen in diesem Gebiet aus physiologischen Gründen nur selten einen BHD von mehr als 30 cm. Welcher Grund auch immer vorliegt, kann im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht werden.

5.662 Verteilung der Biomasse pro Hektar nach Durchmesserklassen

Die Verteilung der Biomasse pro Hektar nach Durchmesserklassen ist in der Abbildung 5.14 dargestellt. Dabei bedeuten:

- BAUM_BIO = Biomasse der gesamten Bäume
- AST_BIO = Biomasse der Äste
- SCHAFT_BIO = Biomasse der Schäfte

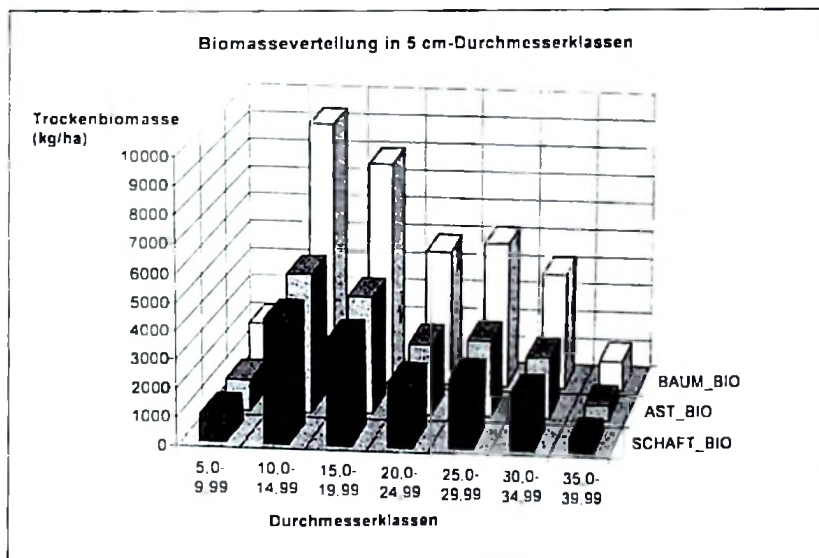


Abb. 5.14: Verteilung der Biomasse pro Hektar nach Durchmesserklassen

Die größten Biomassen finden sich in Bäumen mit einem mittleren Durchmesser zwischen 10 cm und 25 cm BHD. Interessant ist der hohe Anteil der Astholzbiomasse. Für alle BHD-Klassen repräsentieren die Äste mehr als 50% der gesamten Biomasse. Diese Feststellung entspricht den Erfahrungen von TEMU (1981) über Vorrats-schätzungen im Miombo-Wald.

5.7 Umrechnungsfaktoren zwischen frischen und trockenen Biomassen in Abhängigkeit vom Durchmesser

Die Abhängigkeit des Konvertierungsfaktors von der frischen zur trockenen Biomasse vom Durchmesser wurde überprüft. Dies war notwendig, da es für möglich gehalten werden mußte, daß das Verhältnis nicht konstant ist, sondern sich in Abhängigkeit vom Stammdurchmesser, auch entlang eines einzelnen Schaftes, verändert. Die Vermutung hierbei war, daß der Wassergehalt des Holzes in Schaftabschnitten mit höherem BHD eventuell größer ist als in Abschnitten mit geringerem BHD. Die Abbildungen 5.15 a, b und c zeigen die Verhältnisse zwischen frischer und trockener Biomasse der Äste, der Schaftes und der gesamten Bäume zum BHD.

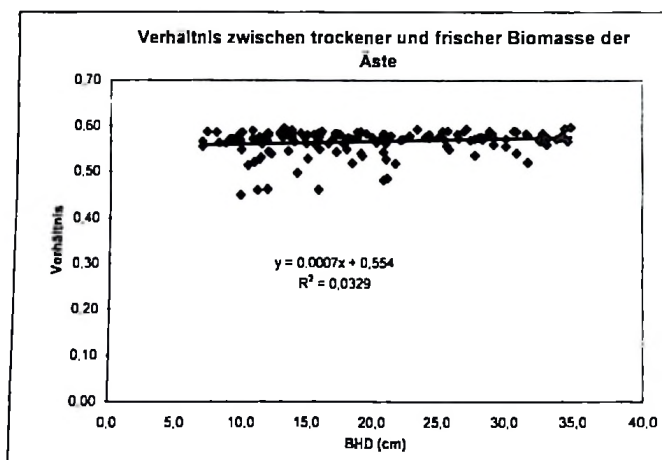


Abb. 5.15 a: Verhältnis zwischen frischer und trockener Biomasse des Astholzes zum BHD

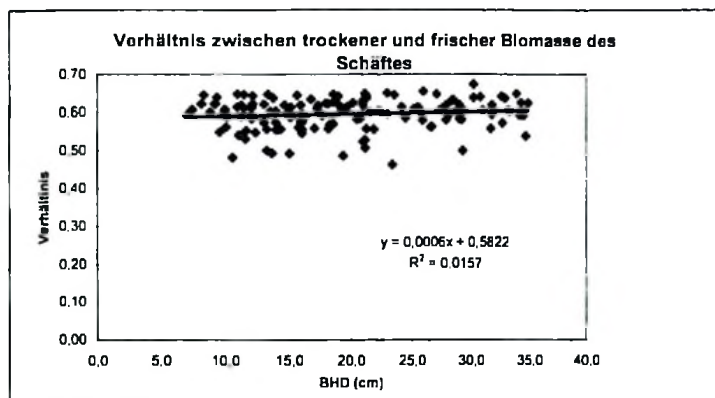


Abb. 5.15 b: Verhältnis zwischen frischer und trockener Biomasse des Schaftholzes zum BHD

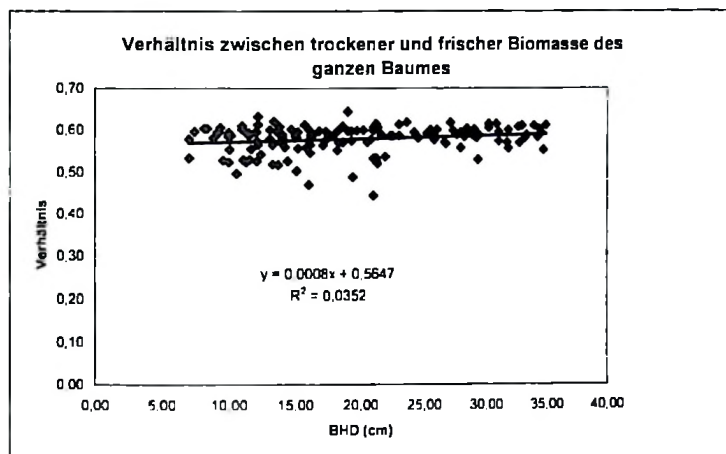


Abb. 5.15 c: Verhältnis zwischen frischer und trockener Biomasse des Baumholzes zum BHD

Der Konvertierungsfaktor liegt, abgesehen von einigen Ausreißern, zwischen 0,57 und 0,60. Der Steigungsfaktor der Regressionsgeraden für die verschiedenen Komponenten liegt nahe bei 0. Der Korrelationskoeffizient liegt zwischen 0,03 und 0,3. Der Konvertierungsfaktor ist also unabhängig vom BHD Da der Einfluß der Veränderung der Dimension (Durchmesser) innerhalb eines Baumes bzw. innerhalb einer Population von Bäumen keinen signifikanten Einfluß auf den Konvertierungsfaktor hat, kann der Faktor einfach anhand seines

arithmetischen Mittels ermittelt werden. Die somit ermittelten Konvertierungsfaktoren (trockene Biomasse = frische Biomasse \times f) sind

<u>Komponente</u>	<u>Faktor</u>
- Äste:	0.56
- Schäfte:	0.58
- ganze Bäume:	0.60

5.8 Biomasseverteilung in Abhängigkeit von Exposition und Hangneigung

Exposition und Hangneigung haben grundsätzlich einen gewissen Einfluß auf das Produktionspotential des Standortes. Das Ausmaß des Einflusses hängt davon ab, wie extrem diese beiden Größen ausgeprägt sind. Die Exposition wird auf das standörtliche Wuchspotential bei einem steilen Hang einen stärkeren Einfluß haben als bei einem flachen, zumal wenn eine bestimmte Windrichtung über größere Zeiträume hinweg vorherrscht, wenn die Luftströmung deutlich in Luv- und Leebereich differenziert ist (z.B. durch quer zur Windrichtung verlaufende Gebirgskzüge) und wenn die Sonne einen relativ schrägen Einstrahlungswinkel hat. Auf einem steilen Hang sind auch Nährstoff- und Wasserhaushalt vertikal stärker differenziert als auf einem flachen Hang oder in der Ebene.

Die Topographie des Untersuchungsgebietes ist nicht einheitlich, was zu der Frage führte, ob hier die Biomassevorräte in Abhängigkeit von Exposition und Hangneigung variieren. Zur Klärung dieser Frage wurde die Verteilung der Biomassevorräte in Abhängigkeit von den Geländeverhältnissen der untersuchten Bestände untersucht. Die Biomassevorräte der Stichprobenkreise waren daher nach ihrer Exposition und Hangneigung zu klassifizieren. Für diese Untersuchung wurde das digitale Geländemodell (DGM) mit einer Rasterweite von 50m \times 50m herangezogen (siehe Kapitel 4.10). Abbildung 5.16 veranschaulicht die Topographie des Untersuchungsgebietes.

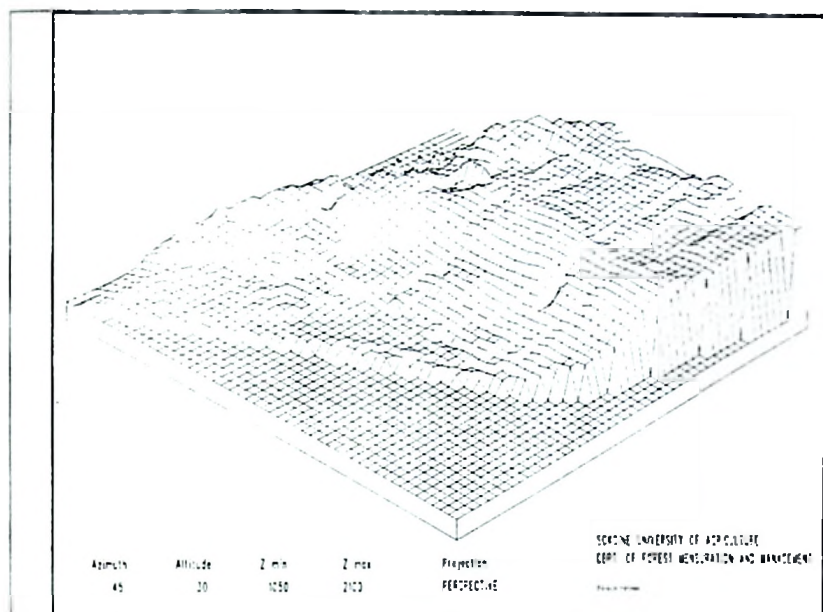


Abb. 5.16: Topographie des Untersuchungsgebietes

Die Verteilung der mit Hilfe des Regressionsmodells geschätzten Biomasse wird in der Abbildung 5.16 dargestellt. Dies geschieht zum einen zur reinen Visualisierung der Ergebnisse um sich einen räumlichen Gesamteindruck der Verhältnisse zu verschaffen, andererseits aber auch, um eine Kartengrundlage für die weitere Betrachtung der Gründe für unterschiedliche Biomassevorräte innerhalb des Untersuchungsgebietes zu erhalten.

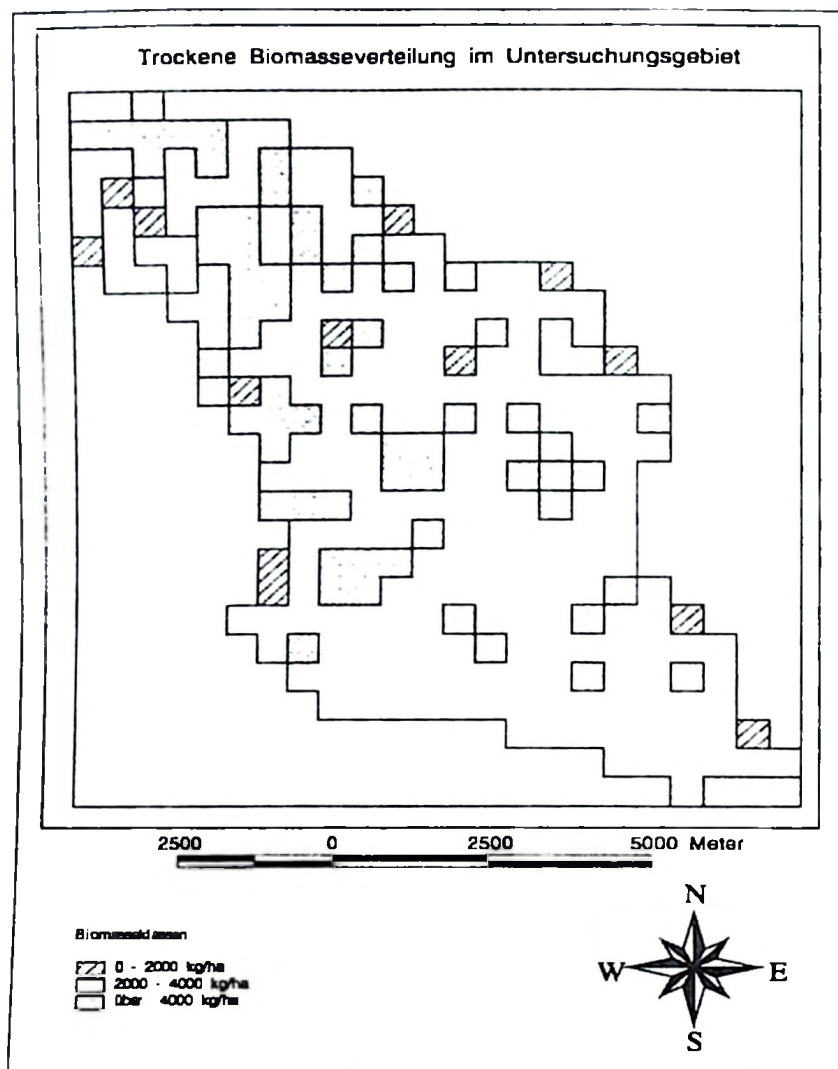


Abb. 5.17: Verteilung der Biomassevorräte im Untersuchungsgebiet (Trockenmasse)

Die Tabellen 5.22 und 5.23 sowie die Histogramme der Abbildungen 5.18 und 5.19 geben einen Überblick über die Verteilung der Biomassevorräte im Untersuchungsgebiet in Abhängigkeit von den Parametern Exposition und Hangneigung. Die zugehörigen Karten finden sich im Anhang 7 für Exposition und 8 für Hangneigung. Es werden die Vorräte der

trockenen Biomasse verwendet, weil diese die Effektivbeträge darstellen und der Umrechnungsfaktor zwischen der trockenen und frischen Biomasse konstant ist.

Tab. 5.22: Biomassevorräte der Probekreise in Abhängigkeit von der Exposition

Exposition (Azimuth°)	Biomasse (frisch)	Biomasse (trocken)	Anzahl Probekreise	Mittelwerte	
				Biomasse (frisch)	Biomasse (trocken)
0 - 90°	828895	603905	166	4993	3638
90 - 180°	75577	52604	16	4724	3288
180 - 270°	1122646	804700	186	6036	4326
270 - 360°	819645	592038	139	5897	4259
Total	2843914	2050794	507		

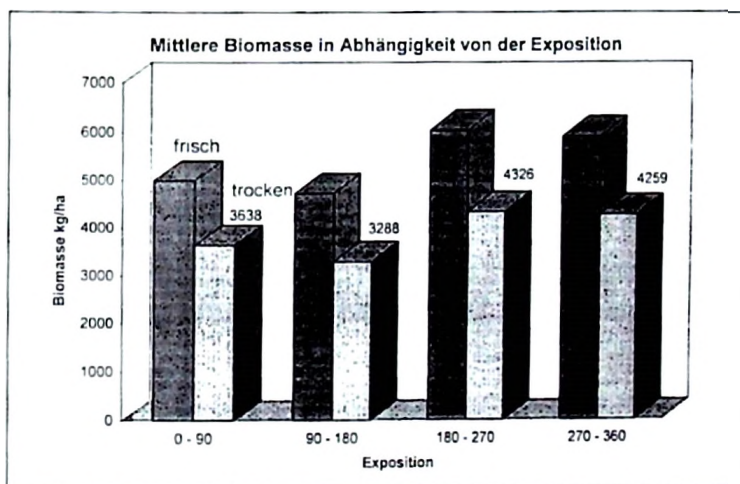


Abb. 5.14: Mittelwert der Biomassevorräte in Abhängigkeit von der Exposition

Die Biomassevorräte liegen zwischen 3288 kg/ha und 4326 kg/ha für die Trockenmasse, wobei die westlichen Expositionen (180-270° und 270-360°) um ca. 23 % höhere Vorräte aufweisen als die östlichen.

Tab. 5.23: Biomassevorräte der Probekreise in Abhängigkeit von der Hangneigung

Hangneigung g (%)	Biomasse (frisch)	Biomasse (trocken)	Anzahl Probekreise	Mittelwerte	
				Biomasse (frisch)	Biomasse (trocken)
0 - 20	2619333	1890345	463	5657	4082
20 - 40	86845	61738	19	4570	3249
40 - 60	20075	14571	3	6691	4857
Über 60	120510	86593	22	5477	3936
Total	2846763	2053247	507		

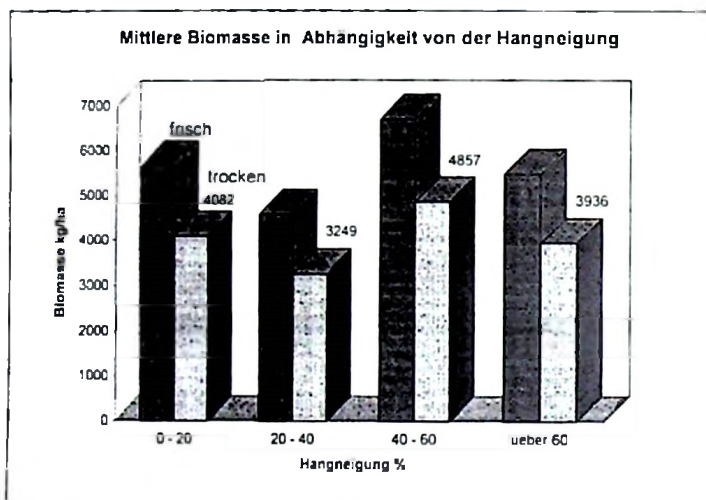


Abb. 5.19: Mittelwert der Biomassevorräte in Abhängigkeit von der Hangneigung

Die mittlere trockene Biomasse reicht von 3249 kg/ha bis 4857 kg/ha. Die größten Vorräte finden sich auf Hangen mit 40-60 % Neigung. Diese beruhen aber auch nur auf 3 Probekreise. Auffällig ist, daß die Vorräte auf Hangen mit mehr als 60 % Neigung beinahe identisch sind mit denen in der Ebene. Die Differenzierung des Untersuchungsgebietes hinsichtlich der Hangneigung ist weniger stark ausgeprägt als hinsichtlich der Exposition. 90% der Probekreise liegen in ebenem Gelände mit weniger als 20% Hangneigung. Eine entsprechende Abbildung findet sich im Anhang 8.

Auf die Eigenheiten des Untersuchungsgebietes hinsichtlich der genannten Faktoren, besonders in Bezug auf das Phänomen der gleichen Vorratshöhe in Steillagen und in ebenem Gelände, wird in der Diskussion (Kapitel 6) näher einzugehen sein. Wie aus den Tabellen und den Histogrammen hervorgeht, ergibt sich bei Verschneidung der Biomassewerte mit der Exposition, nicht aber mit der Hangneigung, ein gewisser systematischer Zusammenhang mit der Topographie des Geländes.

6 Diskussion und Folgerungen

6.1 Material

Für die durchgeführte Untersuchung wurden schwarz-weiß Luftbilder im Maßstab 1:20 000 ausgewertet. Nach TEMU (1981) ist dieser Maßstab ausreichend für eine derartige Untersuchung im Miombo-Wald, da ein größerer Maßstab bei diesem Waldtyp keinen signifikanten Informationsgewinn erbringt. Nach AKÇA (1983 c) und SPELMANN (1984) sollte der Bildmaßstab bei Kronenmessungen nicht kleiner als 1:10000 oder 1:15000 sein. Zur Messung der Baumhöhe, Ermittlung der Stammzahl sowie des Kronenschlußgrades kann der Luftbildmaßstab bei sonst günstigen Verhältnissen jedoch auch bis 1:25000 betragen (AKÇA 1983). Die höheren Kosten für eine großmaßstäbliche Befliegung waren also im vorliegenden Fall nicht zu rechtfertigen. Die Qualität der Luftbilder war, abgesehen von einigen Stellen, welche aufgrund starken Dunstes weniger gut interpretierbar waren, ausreichend. Alle photogrammetrischen Messungen wurden im analytischen photogrammetrischen Auswertegerät KERN DSR 11-18 vorgenommen. Hinsichtlich näherer Informationen über die Meßgenauigkeit dieses Geräts wird auf AKÇA (1983) verwiesen. Das Gerät ist für derartige Untersuchungen ausgezeichnet geeignet. Trotz der nicht optimalen Qualität der Luftbilder wurden aufgrund der hohen Präzision des photogrammetrischen Auswertesystems und des fortgeschrittenen Trainingsstandes des Auswerters durchaus zufriedenstellende Ergebnisse erzielt. Ein einfacheres Auswertungssystem könnte für die Luftbildauswertung ohne weiteres herangezogen werden.

6.2 Datenerhebung aus den Luftbildern

6.2.1 Ermittlung der Stammzahl

Daß die aus Luftbildern ermittelte Kronenzahl zur Schätzung des Vorrats eine gute Variable ist, ist aus den bisherigen Untersuchungen bekannt. In der vorliegenden Arbeit wurden mehr als 70% der terrestrisch gezählten Stämme auch im Luftbild ermittelt. Dies ist zwar erheblich weniger als von SPELMANN (1984) berichtet wurde, welcher über 80% der tatsächlichen Stammzahl erreichte, doch bestand zwischen der terrestrisch festgestellten Stammzahl und der im Luftbild ermittelten Kronenzahl eine straffe Beziehung von $r=0,89$ ($r=0,97$ bei SPELMANN). Auch TANDON (1974) kam bei vergleichbaren Untersuchungen in Nadelholz (Fichte und Tanne) und Laubholz (Buche und Eiche) zu günstigeren Ergebnissen.

Der mittlere Stammzahlfehler betrug dort für Nadelbäume 8% und für Laubbäume 11%. Folglich wurden im Luftbild 92% bzw. 89% der tatsächlichen Stammzahl ermittelt, wobei die Korrelation der terrestrisch und im Luftbild ermittelten Stammzahl mit $r=0,99$ sehr straff war. Nach AKÇA (1979) sind ein zu geringes Auflösungsvermögen der Luftbilder sowie Überschirmungen, Kronenballungen, Beschattungen, Verdeckungen innerhalb der untersuchten Bestände die Hauptursachen für die in der Regel zu gering ermittelten Luftbildstammzahlen. Weil man nur die Kronen der oberen Baumklassen in Luftbild sieht und zählt, ist diese systematische Unterschätzung der Baumzahl für derartige Holz- Vorrats- und Biomassen-Inventuren ohne Bedeutung. Wie TANDON (1974) und die Arbeiten in Göttingen gezeigt haben, korrelieren im Luftbild hergeleitete Stammzahlen mit dem flächenbezogenen Holzvolumen straffer als die tatsächlichen Stammzahlen, welche auch die unterdrückten Stämme mit geringerem Volumen bzw. Masse mit berücksichtigen.

Als Gründe für die im Vergleich zu den genannten Autoren schlechteren Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung kommen demnach in Betracht der Bildmaßstab und die Qualität des Bildmaterials, aber auch die Charakteristika der jeweils untersuchten Bestände. Die Qualität der von SPELLMANN und TANDON ausgewerteten Luftbilder war gegenüber den in der vorliegenden Untersuchung verwendeten erheblich besser und der Bildmaßstab größer. Während die Bestände bei SPELLMANN und TANDON ordnungsgemäß bewirtschafteter Nadel- bzw. Laubwald der gemäßigten Breiten waren, ist der Miombo-Wald ein tropischer Laubwald ohne ordnungsgemäße Bewirtschaftung. Die einzelnen Bäume des Miombo-Waldes unterscheiden sich beträchtlich in Hinblick auf deren Kronenform, Verzweigungsstruktur und Belaubungsdichte von Beständen in einem Land der gemäßigten Breiten, in welchem es seit über einem Jahrhundert eine ordnungsgemäße Forstwirtschaft gibt. Im Miombo-Wald berühren die meisten benachbarten Kronen einander und überlappen sich sehr häufig in beträchtlichem Maße. Dort, wo unter dem Kronenschirm zusätzlich eine Strauchschicht vorhanden war, waren die Kronenränder oft schwierig zu bestimmen. Ein weiteres Problem gilt für alle mehr oder weniger geschlossenen Laubwaldbestände. Die Baumkronen sind hier oben gerundet und oft visuell nicht gut gegeneinander abgrenzbar (die Oberflächen von Laubbäumen werden in der Literatur oft mit einem Blumenkohl verglichen). In den meisten Nadelwaldbeständen hingegen, besonders bei Fichte, laufen die Kronen nach oben spitz zu. Da flache Rundungen mit dem Auge weniger gut zu separieren sind als Spitzen, ergibt sich für die Kronenzahlbestimmung in Laubholzbeständen generell eine höhere Irrtums-

wahrscheinlichkeit als in Nadelholzbeständen. Dies kommt auch in der Untersuchung von TANDON (1974) durch einen gegenüber Nadelholz größeren Stammzahlfehler bei Laubholz zum Ausdruck. Fehler bei der Schätzung der Stammzahl durch Auszählung der luftbildsichtbaren Kronen gegenüber einer terrestrischen Stammzählung werden in der Fachliteratur seit langem diskutiert (YOUNG 1953, STELLINGWERF 1962, SAYN-WITTGENSTEIN und ALDRED 1967, TANDON 1974, CHEN 1979, SPELLMANN 1984, SIEBERT 1984 und 1985, POSO 1988, SUVANTO und KIEMA 1989 sowie HERING 1991). Im Miombo-Wald kommt zu den genannten Faktoren noch eine relativ ausgeprägte Verzweigungstendenz der Hauptstämme erschwerend hinzu. Diese setzt meistens in einer Höhe von 2,5 m bis 3,5 m ein, kann jedoch auch bereits in einer Höhe unter 1,3 m erfolgen. Wenn die Verzweigung über einer Höhe von 1,3 m beginnt, wird terrestrisch ein einzelner Stamm gezählt, während im Luftbild durchaus mehrere Kronen erkannt werden können. Setzt die Verzweigung jedoch bereits in einer geringeren Höhe als 1,3 m an, so werden terrestrisch mehrere Stämme gezählt, im Luftbild aber kann die gesamte Belaubung der verschiedenen Äste zusammen eventuell als eine einzelne Krone angesprochen werden. Trotz dieser Schwierigkeiten bei der Baumzahlermittlung bestand die genannte straffe Korrelation zwischen der terrestrisch ermittelten Stammzahl und dem Ergebnis der Kronenausählung im Luftbild (siehe Abbildung 5.8). Es erscheint trotz TEMU's (1981) Anmerkung nicht ausgeschlossen, daß ein größerer Bildmaßstab, allerdings bei damit verbundenen höheren Inventurkosten, bessere Ergebnisse liefern kann.

6.22 Ermittlung des Kronenschlußgrades

Die Schätzung des Kronenschlußgrades in mehrstufigen Waldbeständen stellt immer ein Problem dar. Das im Luftbild sichtbare oberste Kronendach wird von den vorherrschenden, herrschenden und mitherrschenden Bäumen gebildet; zwischen- und unterständige Bäume sind in der Regel nicht sichtbar. Auch wenn es bei der Bestimmung des Kronenschlußgrades eines Bestandes nicht darauf ankommt einzelne Bäume zu identifizieren, so ist es doch notwendig, herauszuinterpretieren, wo der Boden von Baumkronen beschirmt wird und wo nicht. Durch die oberen Baumkronenbereiche erzeugter Schattenwurf kann, je nach dessen Intensität, die Schätzung des Kronenschlußgrades behindern, indem innerhalb der beschatteten Bereiche nicht immer mit Sicherheit festgestellt werden kann, ob sich darin Kronenteile befinden oder ob direkt darunter nur noch Waldboden ist.

In der vorliegenden Arbeit hat sich der Kronenschlußgrad wie erwartet als eine wichtige Variable zur Schätzung der Bestandesbiomasse erwiesen. Der Kronenschlußgrad hat bei seiner Verwendung als einzelne Variable ein Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 0,74$ erzielt. In der multiplen Regression mit dem Kronenschlußgrad als eine der Variablen betrug das Bestimmtheitsmaß sogar $R^2 = 0,76$. Hohe signifikante Beziehung zwischen dem Holzvorrat und dem Kronenschlußgrad wird von TEMU (1981), SOEDIRMAN (1989) und anderen bestätigt. Die obersten, luftbildsichtbaren, Kronendachbereiche beinhalten den höchsten Anteil der Biomasse und sind somit sowohl mit dem Holzvorrat als auch mit der Gesamtbiomasse stark korreliert. Der Kronenschlußgrad wies einen akzeptablen Standardfehler von 10% auf. Es ist unwahrscheinlich, daß ein größerer Bildmaßstab hierbei bessere Ergebnisse liefern würde. Nach SOEDIRMAN (1989), SPELLMANN (1984) und TEMU (1981) liefern die Modelle nur mit dem Kronenschlußgrad verständlicherweise keine guten Ergebnisse. Auch in der vorliegenden Untersuchung wurde er deshalb in Kombination mit der Bestandeshöhe verwendet. Für die Konstruktion von Bestandesbiomassetafeln könnte er jedoch aufgrund seiner relativ leichten Bestimmbarkeit als alleinige Variable eingesetzt werden. In Europa wurde diese Variable häufig erfolgreich zur Schätzung der Bestandesgrundfläche, des Bestockungsgrades und des Vorrats verwendet.

6.23 Ermittlung der Höhen

Die Baumhöhe ist eine im Luftbild im allgemeinen gut zu bestimmende Größe. Sie kann verwendet werden zur Schätzung der Biomasse und des Holzvorrates, zur Bonitierung von Standorten und zur Stratifizierung von Wäldern. Für die photogrammetrische Höhenermittlung ist es notwendig, die Höhen des Baumwipfels und des Baumfußpunktes zu messen. Die Messung des Wipfels stellt normalerweise kein Problem dar, wohl aber die direkte Messung des Baumfußpunktes (siehe Kapitel 4), wie es auch im vorliegenden Untersuchungsgebiet der Fall war. Aufgrund von Zwischen- und Unterstand sowie der Beschattung konnten nur wenige Baumfußpunkte direkt gesehen und gemessen werden. Zur Schätzung der Höhen der Baumfußpunkte wurde daher durch eine größere Zahl sichtbarer Bodenpunkte eine Regressionsebene gelegt. An der Position der gemessenen Wipfelunkte wurde dann die jeweilige Regressionshöhe als Höhe des Baumfußpunktes übernommen. Die arithmetische Mittelhöhe aus photogrammetrischen Messungen korrelierte sehr gut mit derjenigen aus terrestrischen Messungen ($r = 0,81$). Für die Schätzung der Biomasse des gesamten Untersuchungsgebietes und für die Konstruktion von Biomassetafeln wurde daher

stets mit der photogrammetrischen Mittelhöhe gearbeitet. Diese errechnet sich als arithmetisches Mittel aller im Luftbild gemessenen Baumhöhen. Der Standardfehler der photogrammetrisch ermittelten Höhen betrug 0,5 m - 1,5 m je nach Luftbildmaßstab und Meßverfahren und derjenige der terrestrischen Höhen 0,5 m.

SPELLMANN (1984) bestimmte die Mittelhöhe in einem Kiefernbestand mit einem mittleren Höhenfehler von 4% bis 7%. BRAUN (1982) erreichte in Fichtenbeständen 2% bis 4%. AKÇA (1983) erhielt ähnlich gute Ergebnisse. Er empfahl, die photogrammetrische Mittelhöhe als Bestandesoberhöhe zu betrachten. Für tropische Wälder werden photogrammetrische Baumhöhenmessungen nur mit gewissem Vorbehalt empfohlen (BONES 1976, VERSTEEGH 1974, LOETSCH 1953). Die Ergebnisse der hier mit dem hochpräzisen analytischen photogrammetrischen Auswertegerät KERN DSR 11-18 durchgeführten Messungen zeigt, daß im Miombo-Wald Baumhöhen photogrammetrisch optimal hergeleitet werden können. Hinsichtlich dieser Meßgröße kann ein größerer als der hier verwendete Luftbildmaßstab die Meßgenauigkeit steigern.

Für die Konstruktion der Bestandeshöhenkurve wurde die Petterson-Funktion verwendet, da sie sich als am besten für den Miombo-Wald geeignet erwies. Diese Funktion wurde den terrestrischen Daten angepaßt und hatte ein Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 0,80$. Die Höhenunterschiede der Baume im Miombo-Wald sind relativ gering, obwohl die Altersdifferenzierung in diesem Naturwald erheblich sein dürfte. Daher war anzunehmen, daß eine Funktion mit asymptotischem Kurvenverlauf am geeignetsten sei, was durch die guten Ergebnisse der Petterson-Funktion bestätigt wurde.

6.24 Erstellung von Biomassetafeln

6.241 Modellauswahl

Zweierlei Arten von Biomassetafeln wurden in dieser Arbeit erstellt: eine "lokale" und eine "Standard"-Biomassetafel. Erstere basiert auf nur einer Variablen, dem BHD, während letztere zwei Variablen, BHD und Baumhöhe, enthält. Die Gründe hierfür sind ökonomischer Natur: man ist einerseits bestrebt, mit möglichst wenigen, günstigstenfalls nur einer, Variablen auszukommen, muß jedoch andererseits dabei eine nur lokal begrenzte Gültigkeit zugestehen. Will man dagegen eine Biomassetafel mit regionaler Gültigkeit erstellen, muß

man den unterschiedlichen standörtlichen Wuchspotentialen Rechnung tragen, welche sich am besten in der Baumhöhe widerspiegeln. Betrachtet man in Tabellen 5.2 a bis c das Bestimmtheitsmaß, so wird deutlich, daß die Variable BHD² mehr als andere Variablen zur Schätzung der frischen und trockenen Biomasse beiträgt. Das Bestimmtheitsmaß betrug für die Modelle mit nur dieser Variablen $r^2 = 0,85$ und für die Modelle mit mehreren Variablen $R^2 = 0,84$ bis $0,85$ für die Biomasse des Stammes und $R^2 = 0,92$ für den gesamten Baum. Dies zeigt, daß die übrigen Variablen nur geringfügig zur Verbesserung der Schätzung der Biomasse beitragen. Auch der mittlere quadratische Fehler (MSE) zeigt keinen wesentlichen Unterschied zwischen der Verwendung des BHD als einziger Variable und deren Kombination mit anderen Variablen. Im ersteren Fall beträgt der MSE 3751 kg/ha und im letzteren MSE 3730 kg/ha.

Der $C_{(p)}$ -Wert erbrachte keine befriedigenden Vorschläge zur Wahl der geeigneten Modelle, da er stets Modelle mit hoher Variablenzahl selektierte. Dies wird bei Betrachtung der Tabelle 5.2 b deutlich, wo der $C_{(p)}$ -Wert das Modell mit 5 Variablen (BHD, BHD², H², BHD*H und BHD*H²) auswählte. Dieses Modell hatte jedoch mit $R^2 = 0,85$ dasselbe Bestimmtheitsmaß wie dasjenige mit nur dem BHD² ($r^2 = 0,85$). Bei der Modellauswahl kann bei der vorliegenden Untersuchung allein nach dem $C_{(p)}$ -Wert nicht verfahren werden. Der Unterschied der mittleren quadratischen Fehler (MSE = 3751 kg/ha bzw. 3730 kg/ha) ist zu gering um den deutlich höheren Aufwand zu rechtfertigen.

Der Schätzwert der Biomasse folgt mehr dem BHD als der Baumhöhe, weil die Baumhöhe im Miombo-Wald kaum Variationen zeigt. Daher kann der BHD als einzige Schätzvariable für den Miombo-Wald verwendet werden. CROW (1971) stellte fest, daß die Verwendung multipler Regressionen anstelle allometrischer Funktionen mit nur dem BHD als einzelner Variable keinen Vorteil besitzt. Er wies ferner darauf hin, daß die Hinzunahme der Höhe als zweite Variable keine merkliche Reduktion der Residuen ergibt. Seine Untersuchungen in Thailand (CROW 1978) über Schaft- und Astholzgewicht basierten auf Regressionen mit dem quadrierten BHD.

In der vorliegenden Arbeit wird festgestellt, daß auch für die Schätzung der Biomasse im Miombo-Wald die Hinzunahme der Höhe weder das Bestimmtheitsmaß noch die Residuen signifikant verbessert hat. Dies mag darauf zurückzuführen sein, daß BHD und Höhe stark miteinander korreliert sind, was für derartige Inventuren in tropischen Wäldern mit hoher

Dichte und kuppelartige Kronenform der Bäume von großer Bedeutung ist, da Höhenmessungen somit verzichtbar werden. Unter den dort herrschenden Bestockungsbedingungen ist die Höhenmessung selbst mit hochpräzisen Instrumenten ein Problem, da nicht nur die Stammfußhöhe, sondern auch die Höhe des Kronenwipfelpunktes kaum erkennbar ist. Der BHD hingegen ist auch dort einfach meßbar und kann daher als optimale Variable betrachtet werden.

6.242 Logarithmische Gleichungen

Die verbreitetste Methode zur Biomasseschätzung ist die Verwendung von Regressionsschätzern. Die Qualität des mathematischen Modells hängt dabei ab sowohl vom mathematischen Modell zur Beschreibung der Beziehung zwischen abhängigen und unabhängigen Variablen als auch vom statistischen Modell zur Beschreibung der Fehler. Die allometrische Gleichung in ihrer logarithmischen Form wurde zuerst von KITTREDGE im Jahre 1944 verwendet und seither von zahlreichen Wissenschaftlern herangezogen. Sie repräsentiert gut den Zusammenhang zwischen der Biomasse und eindimensionalen Variablen, wie dem BHD, entspricht der Annahme der Varianzhomogenität, welche der Fehlerschätzung zugrundeliegt und ist biologisch sinnvoll. Da die abhängige Variable vor ihrer Verwendung im Regressionsmodell transformiert wird, ist diese Methode mit einem gewissen systematischen Fehler belastet. Obwohl eine exakte Korrektur des systematischen Fehlers möglich ist (KILKKI 1979) wird die Verwendung angenäherter Korrekturen unter der Annahme, daß die Fehler log-normalverteilt sind, empfohlen (FLEWELLING und PIENAAR 1981). Es gibt jedoch Hinweise darauf, daß diese Korrekturen dazu neigen, den tatsächlichen Bias zu überschätzen (HEPP und BRISTER 1982).

Da der systematische Fehler der nichtlinearen Modelle in der vorliegenden Untersuchung gering ist, ist zu prüfen, ob die Biaskorrektur in diesem Fall von Bedeutung ist oder vernachlässigt werden kann. Der Biaseffekt kann als unerheblich gelten, wenn der Bias geringer ist als 10% der Standardabweichung (COCHRAN 1977). Im vorliegenden Fall betrug der prozentuale Biomassen-Bias (frisch) für das Astholz 6,9%, für Schaftholz 4,8% und für Baumholz 2,3% und bzw für trockene Biomasse das Astholz 8,3%, für Schaftholz 4,2% und für Baumholz 3,4% (Vgl. Tab. 5.10 S. 84). Daraus ergibt sich, daß für die hier durchgeführten Untersuchungen auf eine Biaskorrektur verzichtet werden kann und daß logarithmische Modelle sich für Biomasseschätzungen im Miombo-Wald gut eignen.

6.243 Modell für die Schätzung der frischen und trockenen Biomasse des Baumholzes

Ein allgemeines Problem bei Bioinasseinventuren ist der Umstand, daß die Summe der Schätzwerte für die Einzelkomponenten nicht mit dem Schätzwert übereinstimmen, welcher separat für deren Gesamtheit berechnet wurde. Da die Regressionen unabhängig voneinander berechnet werden, wobei in jede einzelne ein Stichprobenfehler einfließt, wird in der Literatur immer wieder angemerkt, daß die Sets der Regressionsfunktionen sich irrational verhalten, wenn man sie in Beziehung zueinander setzt. Man würde eigentlich erwarten, daß der Gesamtwert sich aus der Summe der Werte für die einzelnen Komponenten ergibt, was aber im hier beschriebenen Verfahren nicht der Fall ist. Um die Addierbarkeit einzelner Regressionsfunktionen zu gewährleisten, wurden von CUNIA (1979) und später von JACOBS und CUNIA (1980) drei Verfahren vorgeschlagen. Der erste Ansatz sieht vor, nach Berechnung der Regressionsfunktionen für alle Einzelkomponenten in der Regression für die Schätzung des Gesamtwertes alle zuvor verwendeten Regressionskomponenten aufzusummieren. Voraussetzungen hierfür sind jedoch, daß alle Regressionsgleichungen linear sind, daß sie mittels der Methode der kleinsten Quadrate berechnet werden und daß nur statistisch signifikante unabhängigen Variablen verwendet werden. Ein zweiter Ansatz gewährleistet die Addierbarkeit, indem bei der Methode der kleinsten Quadrate stets dieselben unabhängigen Variablen eingesetzt werden, auch wenn sie nicht statistisch signifikant sind. Bei Verwendung der gewichteten Methode der kleinsten Quadrate, müssen stets dieselben Gewichte verwendet werden. Der dritte Ansatz basiert auf der Verwendung von Hilfsvariablen (Dummys) des bei JACOBS und CUNIA (1980) beschriebenen Typs. Eine Wertung der genannten Verfahren findet sich bei CUNIA und BRIGGS (1984).

In der vorliegenden Arbeit wurde das erste der genannten Verfahren angewandt, weil nach CUNIA und BRIGGS (1984) die Unkompliziertheit der Anwendung sowie Präzision der Schätzung für die Wahl ausschlaggebend sein sollen, da die drei Ansätze Schätzwerte liefern, welche sich nicht signifikant voneinander unterscheiden. Weil im vorliegenden Fall allometrische Funktionen verwendet werden, empfiehlt sich die erste Methode. Diese hat den generellen Vorteil, daß Regressionsfunktionen jeglicher Form, linear oder nonlinear, verwendet werden können um Biomassetafeln für alle Komponenten sowie deren Gesamtheit zu erstellen. Weitere Vorteile sind die Verwendbarkeit von Stichproben mit fehlenden Werten für Biomassekomponenten einzelner Bäume und auch die Möglichkeit, gänzlich andere Datensätze für die Biomasseschätzung einzelner Komponenten zu verwenden.

6.25 Bestandesbiomasseschätzung

Zur Schätzung der Bestandesbiomasse anhand von Stichprobenbäumen sind eine ganze Reihe von Methoden eingesetzt worden. Es gab Untersuchungen, in denen mehrere Methoden nebeneinander angewendet wurden, welchen jedoch stets gemeinsam war, daß zunächst die Masse eines einzelnen Baumes, und erst danach die Bestandesmasse geschätzt wurde (siehe Kapitel 2.5). Welche der Methoden schließlich zu wählen ist, hängt von technischen, zeitlichen und ökonomischen Aspekten ab. Die meisten Autoren haben für die Einzelbaumschätzung zweiphasige Stichproben durchgeführt. In der vorliegenden Arbeit wurde ebenso vorgegangen, jedoch wurden auch für die bestandesweise Schätzung zweiphasige Stichproben gezogen. Die Variablen der ersten Phase (Luftbildphase) waren hierbei Kronenschlußgrad, Baumhöhe und Stammzahl. Gute Beiträge zur Schätzung der Biomasse leisteten der Kronenschlußgrad sowie die Höhe in Kombination mit diesem, da beide Größen photogrammetrisch sehr gut meßbar und mit den entsprechenden terrestrischen Messungen hoch korreliert waren. Die Stammzahl dagegen leistete einen geringeren Beitrag zur Schätzung der Bestandesbiomasse. Der Standardfehler betrug bei der Schätzung der trockenen und frischen Biomasse 5,6%, (Vgl Kap 5.66) was als guter Wert betrachtet werden kann. Die Analyse der Residuen für bestandesweise Schätzung ergab dabei eine größere Homoskedastizität als für die einzelbaumweisen Aussagen. Aufgrund dieser Ergebnisse läßt sich daher feststellen, daß mittels zweiphasiger Stichprobe mit Luftbild- und terrestrischer Stichprobennahme die Biomasse im Miombo-Wald mit ausreichender Genauigkeit ermittelt werden kann. Diese Erfahrung eröffnet einen neuen Weg zur Biomasseschätzung in derartigen Waldgebieten und kann somit als Alternative zu den in Kapitel 2.5 genannten Verfahren gelten.

Der Vorteil mehrphasiger Stichprobeninventuren mit Luftbildstichprobe zur Schätzung der Biomasse liegt in der Zeit- und Kostenersparnis einer solchen Methode. Die Aufnahme terrestrischer Probeflächen ist zeitaufwendig und somit teuer, eine Reduktion der Feldarbeit also höchst wünschenswert. In der vorliegenden Untersuchung wurden im Luftbild insgesamt 507 Probekreise aufgenommen, im Gelände aber nur 43. Dies ist eine relativ geringe Anzahl terrestrisch aufzunehmender Flächen, wenn man bedenkt, daß bei einer rein terrestrischen Stichprobennahme die in der vorliegenden Arbeit erzielte Genauigkeit von $\pm 196 \text{ kg/ha}$ (Standardfehler 5,6%, Varianz $6128200 \text{ (kg/ha)}^2$) nur durch eine wesentlich größere

Stichprobe zu erzielen gewesen wäre. Unter Anwendung der Formel für die Ermittlung der Anzahl der Probekreise

$$n = \frac{t^2 s_f^2}{I s_e^2}$$

wobei

$t \approx 2$ (kritischer Wert für 95 % Konfidenzintervall)

s_f^2 = Varianz

s_e^2 = Standardfehler

wären dann 319 Probeflächen terrestrisch aufzunehmen gewesen. Die tatsächlich aufgenommene Anzahl von 43 Flächen bedeutet eine Reduktion des terrestrischen Stichprobenumfangs um 87%, also eine erhebliche Einsparung an zu leistendem Aufwand. Eine Betrachtung des Kostenverhältnisses $C_t : C_{LB}$ zwischen einer rein terrestrischen Inventur (C_t) und der Vorgehensweise dieser Arbeit (C_{LB}) ergab einen Wert von 14 : 1. (Vgl Tab. 5.21 S. 99)

6.26 Biomasseverteilung innerhalb einzelner Bäume

Die Besonderheiten des Miombo-Waldes mit seinem geschlossenen Kronendach, gebildet aus Arten der Gattungen *Brachystegia* und *Jurbenadia*, wurden detailliert beschrieben von CELANDER (1983). Beim Betrachten der Biomassetafeln mit den Eingangsgrößen BHD und Höhe fällt auf, daß die Biomasse weiter zunimmt, auch wenn die Höhenwerte bereits stagnieren. Der Grund hierfür wird darin gesehen, daß ab einem gewissen Alter der Höhenzuwachs im Miombo-Wald stagniert, aber die Ast- und die Laubbildung weiter fortschreitet. Im Miombo-Wald des Untersuchungsgebietes entfallen 53% der Holzbiomasse auf das Astholz. Da starke Stämme eine größere Astmasse tragen als schwächere, leisten sowohl der Kronenschlußgrad als auch der Stammdurchmesser gute Beiträge zur Schätzung der Biomasse aller Komponenten sowie des gesamten Baumes.

6.27 Die Verteilung der Biomasse nach Durchmesserklassen: eine Managementproblematik

Die Verteilung der Biomasse nach Durchmesserklassen wurde in Abbildungen 5.17 und 5.18 dargestellt. Aus beiden Abbildungen geht hervor, daß der größte Teil der Biomasse von Bäumen geringen und mittleren Durchmessers (10 cm bis 25 cm BHD) stammt und stärkere Bäume nur einen geringen Anteil haben, was eine linksseitige Schiefe der Verteilung ergibt. Dieser Beobachtung sollte bei einer zukünftigen planmäßigen und nachhaltigen Bewirtschaftung des Miombo-Waldes Rechnung getragen werden. Bäume von relativ geringer Stärke eignen sich gut zur Deckung des lokalen Bedarfs an Brennholz und zur Gewinnung von Baumaterial für Hüttenwände und -dächer sowie für Zäune. Sie lassen sich überdies mit den relativ einfachen Holzermtegeräten leichter fällen und anschließend leichter transportieren. Im übrigen trocknet schwaches Holz schneller als starkes. Zum heutigen Zeitpunkt ist die Besiedlungsdichte in dieser Region noch nicht zu hoch, jedoch wächst die Bevölkerung rasch und mehr Schwachholz wird zukünftig benötigt, sodaß der Nutzungsdruck auf den Wald wächst und viel mehr Schwachholz geerntet werden wird als heutzutage.

Bäume mit starken Dimensionen hingegen bilden nur einen relativ geringen Teil der Biomasse. Aus ihnen wird vorwiegend Bauholz, aber auch Holzkohle gewonnen. Aufgrund der besseren Verwendbarkeit für größere Bauwerke und, dem Stückmassegesetz beim Transport folgend, geht das Starkholz in den regionalen Handel und wird in der Regel nicht vor Ort verarbeitet. Bei solchen Starkholznutzungen liegt der minimale Durchmesser bei etwa 20 cm bis 30 cm BHD. Da solche Dimensionen relativ rar sind, besteht im Miombo-Wald seit langem schon eine Übernutzung dieses Sortiments, was in den oben erwähnten Verteilungen zum Ausdruck kommt. Jegliche Holznutzung in dieser Region geschieht ungeregelt und mehr oder weniger unkontrolliert, ohne Planung und effektive behördliche Überwachung. Während die Bäume des Miombo-Waldes für die Deckung des unmittelbaren täglichen Bedarfs ansässiger Familien auch behördlicherseits als "freie Güter" betrachtet werden, unterliegt deren Nutzung zu gewerblichen Zwecken der Genehmigung durch die Forstverwaltung. Die Kontrolle über ein relativ großes Waldgebiet durch nur relativ wenige Förster kann einer Mißachtung dieser traditionellen Regelung jedoch nicht Einhalt gebieten. Das Resultat ist der gegenwärtige waldbauliche und ertragsmäßig ungünstige Zustand des Miombo-Waldes. Dies stellt ein sozio-ökonomisches Problem dar, welches, wenn überhaupt, nur auf politisch-administrativer Ebene zu lösen ist. Eine Verbesserung des Waldzustandes

erfordert ein einfühlsames Vorgehen seitens der Forstverwaltung, welches sich an den Bedürfnissen der Bevölkerung und deren Nutzungsgewohnheiten zu orientieren hat und trotzdem eine Sanierung der Waldbestände und letztendlich deren nachhaltige Nutzbarkeit auf lange Sicht erreicht. Unter den anzustrebenden Maßnahmen befindet sich mit großem Gewicht die Förderung der derzeit spärlichen Naturverjüngung.

6.28 Verjüngungs- und Nachhaltigkeitsproblematik im Miombo-Wald

Die Naturverjüngung des Miombo-Waldes unterliegt vielfältigen Einflüssen, wie z.B. Waldbrand, Dürre und Dormanz des Saatgutes (MUNYANZIZA 1994). In der Tat ist die Keimrate der Samen hier sehr gering (VAN DAALEN 1991). Nach BOALER (1966) keimen im Miombo-Wald unter den üblichen Bedingungen lediglich 2% der produzierten Samen. Neuzeitliche waldbauliche Strategien, wie z.B. Anpflanzung fremdländischer ertragsreicher Baumarten, versagen hier häufig, da die klimatischen und standörtlichen Verhältnisse extrem sind. MUNYANZIZA (1994) hält häufige Waldbrände für das schwerwiegendste aller diesbezüglichen Probleme. Das Feuer vernichtet nicht nur Samen, Keimlinge und Jungpflanzen, sondern vernichtet oder beschädigt zudem das übrige organische Material, welches zahlreichen nachgewiesenen Organismen eine Lebensgrundlage bietet, die das Keimen der Samen fördern oder überhaupt erst ermöglichen. Ein Bewirtschaftungsplan für den Miombo-Wald muß diesen Faktor der natürlichen Verjüngung ebenso berücksichtigen wie die genannten sozio-ökonomischen Rahmenbedingungen. Die hier vorherrschenden Pflanzen verfügen über angepaßte Überlebensstrategien für diesen Lebensraum, zu welchen ein ausgedehntes Wurzelsystem mit gutem Nährstoff- und Wasserspeichungsvermögen gehört. Ein intensives Studium dieses komplexen Systems ist dringend erforderlich um den Fortbestand des Miombo-Waldes für künftige Generationen zu gewährleisten. Die Einrichtung und Unterhaltung permanenter Stichprobenflächen wäre der Überwachung der Lebensvorgänge und Waldentwicklung in dieser Region sehr förderlich. Eine genaue Kenntnis über die Produktivität des Miombo-Waldes ist erforderlich um Zeitpunkt und Masse der Holzernte zu planen. Hierfür ist eine solide Datenbasis vonnöten, auf welcher eine verantwortungsvolle Nutzungsplanung basieren kann. Wachstum und Zuwachs eines Waldbestandes oder -gebietes können dann bestimmt werden durch wiederholtes Messen relevanter Parameter wie Durchmesser, Höhe und Bestandesdichte. Für die meisten Naturwälder Tansanias liegen solche Informationen nicht vor. Das Fehlen ausgeprägter jährlicher Wachstumszyklen und der Einfluß des jährlich unterschiedlichen

Regenaufkommens, auf zwei Regenzeiten verteilt, erschweren hier Untersuchungen dieser Art. Permanente Stichprobenflächen wären sehr gut geeignet um eine Datenbasis zu schaffen, anhand derer Informationen für eine nachhaltige Bewirtschaftung gewonnen werden können.

6.29 Vergleich der hier angewandten Methode mit anderen Methoden zur Biomasseschätzung im Miombo-Wald

Die bisher für die Schätzung der Biomasse im Miombo-Wald verwendeten Modelle stützten sich auf terrestrisch ermittelte Variablen. Keine der bekannten vorangegangenen Untersuchungen setzte dabei Luftbilddauswertung ein. STROMGARD (1985 und 1986) entwickelte Modelle für den Miombo-Wald in Zambia und verwendete dabei den BHD und die Oberhöhe, ohne aber das Bestimmtheitsmaß für seine Schätzungen anzugeben. Seine Höhenangaben liegen über denen der vorliegenden Untersuchung, wofür das Vorherrschen anderer Baumarten verantwortlich sein kann. Während in Zambia *Jurbenadia spp* und *Brachystegia speciformis* vorherrschen, ist es in der vorliegenden Untersuchung *Brachystegia microphylla*. Die Wuchscharakteristika der genannten Arten sind vergleichbar. CHIDUMAYO (1988) führte ebenfalls Biomasseschätzungen im Miombo-Wald Zambias durch, wobei er den Stammumfang in 30 cm Höhe (Stockumfang) und Baumhöhe als Modellvariablen verwendete, ebenfalls ohne Angabe des Bestimmtheitsmaßes. 1992 entwickelte er im gleichen Gebiet weitere lineare Funktionen, deren Variablen der Durchmesser in 30 cm Höhe (Stockdurchmesser) sowie der BHD waren. Er stellte dabei fest, daß der BHD als alleinige Variable ausreicht um die Biomasse zu schätzen, was durch die vorliegende Untersuchung sowie durch die Arbeiten von CUNIA (1971) und CROW (1978) bestätigt wird. MALIMBWI et al. (1994) führte in Tansania Untersuchungen durch, deren Modellbildung für Einzelbaumschätzungen mit denen der vorliegenden Arbeit insofern vergleichbar ist, als diese Autoren ebenfalls allometrische logarithmische sowie nicht-logarithmische Gleichungen verwendeten. Die logarithmischen Gleichungen für Bestandesbiomasseschätzungen lieferten Schätzwerte der trockenen Biomasse im Miombo-Wald von 32900 kg/ha mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,88 bis 0,96, im Vergleich zu 34500 kg/ha bei einem Bestimmtheitsmaß von 0,88 bis 0,95 in der vorliegenden Untersuchung. Der geringe Stichprobenumfang von 17 Bäumen mag für den niedrigeren Wert bei MALIMBWI mitverantwortlich sein. Die bei seinen einzelbaumweisen Biomasseschätzungen mit dem BHD als einziger Variable erzielten hohen Bestimmtheitsmaße

von 0,84 bis 0,94 bestätigen die Erfahrung der vorliegenden Untersuchung, daß der BHD als alleinige Variable befriedigende Schätzwerte liefert.

6.210 Einfluß von Exposition und Hangneigung auf den Biomassevorrat

Durch GIS-gestützte Analyse der räumlichen Verteilung der Biomasse innerhalb des Testgebietes konnten die Unterschiede im Biomassevorrat wohl teilweise mit der Exposition, nicht aber mit der Hangneigung der jeweiligen Flächen erklärt werden. Mesoklimatisch ist das Untersuchungsgebiet als relativ einheitlich zu betrachten, da es sich in Äquaturnähe und ganzheitlich auf der Windschattenseite der Lugalla- und Kipengere-Berge befindet. Es scheinen jedoch gewisse mikroklimatische Einflüsse zu bestehen.

Die Bodenqualität ist, bedingt durch Massenverlagerung, in ebenen Lagen grundsätzlich besser zu bewerten als in Steillagen. Daher wären auf ebenen Flächen höhere Biomassevorräte zu erwarten als in steileren Hanglagen. Dieser natürliche wuchsfördernde Effekt wird jedoch im Untersuchungsgebiet überlagert durch das Ergebnis menschlichen Verhaltens: die Holzernte geht mit den lokal üblichen relativ primitiven Holzernteverfahren in der Ebene leichter vonstatten als an Hängen und wird daher dort auch intensiver betrieben.

Umgekehrt wird an Hängen weniger Biomasse entnommen, sodaß der gegenüber der Ebene geringere Biomassevorrat geringfügiger dezimiert wird als dort. Durch menschliche Einwirkung wird also der natürlicherweise zu erwartende Unterschied in der Verteilung der Biomassevorräte in Abhängigkeit von der Geländeneigung nivelliert und kann somit auch durch eine sorgfältige GIS-gestützte Analyse nicht nachgewiesen werden. Die GIS-gestützten Analysen ergaben jedoch, daß westexponierte Flächen (180-360°) einen um durchschnittlich 23 % höheren Biomassevorrat aufweisen als ostexponierte (0-180°). Unter Berücksichtigung des über die mesoklimatischen Verhältnisse gesagten, kommen hier als Erklärung nur mikroklimatische Faktoren in Betracht, welchen in dieser Untersuchung jedoch nicht nachgegangen werden kann. Diese Beobachtung könnte in einer anderen Arbeit näher untersucht werden.

Möglichkeiten zur Verbesserung des Verfahrens werden vor allem darin gesehen, die Identifizierung der Probeflächen im Gelände zu erleichtern. Dies kann z.B. geschehen durch Markieren der terrestrischen Probekreismittelpunkte vor einer Befliegung, oder, was noch

günstiger wäre, durch den Einsatz satellitengestützter Navigationssysteme (GPS) zum Einmessen der Probekreismittelpunkte im Gelände. Auch die Einrichtung permanenter Probekreise zum Monitoring des Zuwachses und der Entnahme von Biomasse im Miombo-Wald erscheint empfehlenswert, und im Zusammenhang hiermit ebenso die Durchführung von GIS-gestützten Verbrauchsuntersuchungen der Biomasse in dieser Region zur Begründung eines nachhaltigen Bewirtschaftungssystems zur langfristigen Deckung des ständig wachsenden Biomassebedarfs.

7 Zusammenfassung

Wie in den meisten Ländern Afrikas, stellt Holz die wichtigste erneuerbare Energiequelle Tansanias dar. Mehr als 90% der Bevölkerung verwendet Holz als Energiegewinnung. Da aufgrund des hohen Bevölkerungswachstums die Holzversorgung zunehmend schwieriger wird, ist eine planmäßige und nachhaltige Nutzung erforderlich, welche wiederum auf zuverlässige Kenntnisse über die Waldbestände sowie des tatsächlichen Holzbedarfes gestützt sein muß. Da die Verwendung des Holzes für Bau- und Konstruktionszwecke gegenüber der Energiegewinnung von nachgeordneter Bedeutung ist, interessieren nicht nur der Vorrat und der Zuwachs des Stammholzes allein, sondern der gesamten Holz-Biomasse. Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist daher die Untersuchung der oberirdischen Holz- Biomassevorräte in einem für Ostafrika wichtigen Waldtyp, dem Miombo-Wald.

Ergebnisse dieser Untersuchung sind die Baum- und Bestands Biomassetafeln mit lokaler und allgemeiner Gültigkeit für den Miombo-Wald. Dabei wird unterschieden zwischen der Biomasse des gesamten Baumes sowie dessen Komponenten Stammholz- und Astholzbiomassen. Während die einzelbaumweisen Schätzungen ausschließlich auf terrestrischen Stichproben beruhen, wurden die Bestandeswerte sowohl aus terrestrischen als auch luftbildgestützten Stichproben ermittelt. Da für die regionale Planung die Lage der Bestände bedeutsam ist, wurde überprüft, ob Geländemerkmale wie Exposition und Hangneigung einen Einfluß auf die Biomassevorräte haben.

Eine eingehende Auswertung bisheriger Untersuchungen ergab, daß bereits umfangreiche Erfahrungen über terrestrische Stichprobeninventuren zur Biomasseschätzung von Waldbeständen, einzelner Bäume und deren Einzelkomponenten vorlagen, jedoch kaum deren Schätzung aus Luftbildern untersucht wurde.

Als Untersuchungsgebiet wurde ein relativ dichter Miombo-Wald mit einer Fläche von 6000 ha im Kimani-Gebiet in Tansania ausgewählt. Bei den Arbeiten kamen Luftbilder im Maßstab 1:20000 und Karten des Maßstabs 1: 50000 zur Anwendung. Die Probekreisfläche betrug 0,1 ha, sowohl für die Luftbild- als auch für die terrestrischen Stichproben. Der Abstand der 507 aeralen Probekreise betrug 500 m x 250 m. Aus den Luftbild- Probekreisen wurden Baumhöhen, Kronenzahl und der Kronenschlußgrad als Hilfsvariablen ermittelt. Der Abstand der 43 terrestrischen Probekreise betrug 1500 m x 1000 m. Hier waren die aufgenommenen

Größen: der Brusthöhendurchmesser aller Bäume, die Höhe von zwei bis drei Bäumen, der Kronenschlußgrad und die Stammzahl. Weiterhin wurde das Frischgewicht der Holzbiomasse von zwei bis drei Bäumen pro Stichprobe ermittelt. Zur Herleitung des Umrechnungsfaktors von frischer zu trockener Biomasse wurden Stamm- und Astscheiben entnommen und ofengetrocknet. Zur Schätzung der Höhe wurde eine gemeinsame Höhenkurve mittels der Peterson-Funktion erstellt. Die Datenanalyse erfolgte mit den Statistikprogrammen SAS und WINSTAT.

Die lokale Biomassetafel basiert auf einfachen linearen Gleichungen, während die allgemeingültige auf logarithmischen Gleichungssystemen beruht. Zur Auswahl der Variablen und Modelle der lokalen Tafel wurde die Rückwärtseliminierung des Programmpaketes SAS verwendet. Der Standardfehler der lokalen Biomassetafel liegt zwischen 5% und 7% (vgl. Tabelle 5.8, S. 83) für Einzelbäume und ihre Komponenten und derjenige der allgemeinen Biomassetafel liegt zwischen 5% und 8% (vgl. Tabelle 5.9, S. 84). Da in der Literatur darauf hingewiesen wird, daß Schätzungen aus logarithmisch transformierten Modellen eine relativ hohe Verzerrung aufweisen können, wurde das Vorhandensein eines systematischen Fehlers und dessen Betrag geprüft. Für frische wie auch für trockene Biomasse lag der Bias unter 10% der Standardabweichung, wobei für die Einzelkomponenten 6,9% Astholzbiomasse, 4,8% Schaftholzbiomasse und 2,3% Baumholzbiomasse (bzw. für die trockene Biomasse 8,3% Astholzbiomasse, 4,2% Schaftholzbiomasse und 3,4% Baumholzbiomasse) errechnet wurden (vgl. Tabelle 5.10, S. 84). Diese Werte zeigen, daß zumindest für den Miombo-Wald logarithmische Modelle keinen hohen Bias aufweisen. Die lokale und allgemeine Biomassetafel unterscheiden sich nicht bezüglich der Werte für Astholz, wohl jedoch hinsichtlich des Schaft- und Baumholzes bei einem Signifikanzniveau von 95%.

Die Inventur der Biomasse von Waldbeständen beruht auf dem Konzept der zweiphasigen Stichprobe zur Regressionsschätzung. Der Vorteil eines solchen Verfahrens liegt in einer Senkung des Inventuraufwandes und somit der Inventurkosten. Hierbei werden in der ersten Phase in Luftbildern photogrammetrische Hilfsgrößen aufgenommen, welche eng mit der Zielgröße Biomasse korreliert sind. In einer zweiten Phase wird dann für eine geringere Anzahl von Probekreisen die Zielgröße Biomasse aufgenommen und mit den Hilfsvariablen der ersten Phase über mathematische Modelle regressionsanalytisch verknüpft. Die Grundvoraussetzung hierfür ist, daß die Stichproben in der zweiten (terrestrischen) Phase aus

exakt den Probekreisen der ersten (Luftbild-) Phase gezogen werden. Eine andere wichtige Voraussetzung für diese Verknüpfung ist, daß eine ausreichend hohe Korrelation zwischen den im Luftbild und den im Gelände erhobenen Werten für Baumhöhe, Kronenschlußgrad und Stammzahl besteht, was mit einem Korrelationskoeffizienten von mehr als 0,8, außer bei der Stammzahl ($r = 0,76$), in dieser Untersuchung der Fall war. Der Grund für die etwas geringere Korrelation bei der Stammzahl liegt im Identifikationsfehler der Einzelkronen im Luftbild, was wahrscheinlich auf den relativ kleinen Maßstab von 1:20000 und die nur mäßige Bildqualität zurückzuführen ist.

Um die Auswahl der geeigneten Regressionsmodelle nicht nur von mathematischen Kriterien abhängig zu machen, sondern hierbei auch Aspekte der Operationalität und der biologischen Plausibilität zu berücksichtigen, wurden verschiedene Variablen (Höhe, Kronenschlußgrad, Stammzahl) und deren Kombinationen untereinander getestet.

Bei der bestandweisen Mittelwertschätzung der frischen und trockenen Biomasse betrug der Standardfehler 5% bis 6% (vgl. Tabelle 5.20, S. 98) für die Baumholzbiomasse und seine Komponenten. Derart überzeugende Ergebnisse rechtfertigen die Empfehlung eines solchen Vorgehens für Biomasseschätzungen im Miombo-Wald. Eine rein terrestrische Stichprobe würde für dieselbe Genauigkeit 319 Probeflächen erfordern. Die tatsächlich erhobene Anzahl von 43 stellt also eine erhebliche Reduktion des Arbeitsaufwandes und somit auch der Inventurkosten dar. Das Verhältnis der Kosten für eine rein terrestrische Inventur (C_t) gegenüber dem in der vorliegenden Arbeit angewandten Verfahren (C_{LB}) beträgt 14 : 1. Die berechneten Hektarwerte der Biomasse des Miombo-Waldes dieser Untersuchung stimmen sehr gut mit Angaben aus der Literatur überein, obwohl nicht jeder Autor dieselben Variablen bzw. deren Kombinationen verwendete. Die Zuverlässigkeit der in dieser Untersuchung berechneten Werte dürfte im Vergleich mit den bisherigen Untersuchungen im Miombo-Wald erheblich höher sein, da für die Ermittlung von Referenzbiomassen eine größere Anzahl Bäume im Labor analysiert wurde als bei anderen Autoren. Außerdem konnte durch Anwendung einer zweiphasigen Inventurmethode in Verbindung mit einer Luftbildauswertung die Effizienz weiter gesteigert werden.

Eine Analyse möglicher Einflüsse von Exposition und Hangneigung auf die Biomassevorräte des Untersuchungsgebietes mit Hilfe des geographischen Informationssystems ARC/INFO

ergab keine signifikanten Zusammenhänge zwischen der Geländetopographie und dem Biomassevorrat. Da die natürliche Standortsproduktivität in der Ebene höher sein müßte als in Hanglagen, dieser Effekt aber durch die GIS-Analyse nicht nachweisbar ist, liegt die Schlußfolgerung nahe, daß die höhere Standortproduktivität in der Ebene durch dort intensivere Biomasseentnahme und die geringere Standortproduktivität der Hanglagen durch dort geringere Biomasseernte kompensiert werden. Die Exposition der untersuchten Bestände wirkt sich wahrscheinlich deshalb nicht signifikant auf die Biomasseleistung aus, weil das gesamte Gebiet in Äquatornähe sowie im Windschattenbereich der Gebirgszüge Lugalla und Kipengere mit einheitlichen Niederschlags- und Insolationsverhältnissen gelegen ist.

Die Diskussion unterzieht die Untersuchungsmethode und deren Ergebnisse einer kritischen Betrachtung hinsichtlich Vor- und Nachteilen der verwendeten Aufnahme- und Auswertungsverfahren sowie deren Ergebnisse vor dem Hintergrund der Charakteristika des Untersuchungsgebietes, betrachtet dabei die speziellen regionalen Erfordernisse und vergleicht die hierbei gewonnenen Erfahrungen mit denen anderer Autoren. Es werden Vorschläge zur Verbesserung des Verfahrens gemacht, z.B. die Erleichterung der Identifizierung der Probeflächen im Gelände durch Markieren der terrestrischen Probekreismittelpunkte vor einer Befliegung, oder im Zuge aktueller technischer Entwicklungen auch durch den Einsatz satellitengestützter Navigationssysteme (GPS) zu diesem Zweck. Auch die Einrichtung permanenter Probekreise zur kontinuierlichen Erfassung und Kontrolle der Entwicklung im Miombo-Wald wird empfohlen.

Literaturverzeichnis

- Ahlback, A.J. (1986): Industrial plantation forestry in Tanzania - Facts, problems and challenges. Ministry of Natural Resources and Tourism, Dar es Salaam
- Ahlborn, H. (1981) Ermittlung der Bestandesgrundfläche und des Bestockungsgrades aus aerophotogrammetrischen Bestandesparametern in Fichtenreihbeständen des Sollings. Dip. Arbeit Göttingen
- Akça, A., Hildebrandt und Reichert, P. (1971): Baumhöhenbestimmung aus Luftbildern durch einfache Parallaxenmessung. Forstw. Cbl., 90 Jg 3, S. 210-215
- Akça, A. (1973): Baumhöhenmessung mit einem Stereoauswertegerät II. Ordnung. IUFRO - Symposium of Subject Group 6.05, Freiburg, S. 179-185
- Akça, A. (1979): Aerophotogrammetrische Messung der Baumkrone. Dtsch. Verb. Forstl. Forsch. Anst. - Sektion Ertragskunde, Jahrestagung in Mehring, S. 79-91
- Akça, A. (1980): Digitale Waldkartierung und Einzelsatzmöglichkeiten in der Forsteinrichtung AFZ, 27, S. 725-728
- Akça, A. (1981): Erfassung des Rohstoffes Holz mit Hilfe moderner Luftbildtechniken. Sch. Aus der Forstl. Fak. Univ. Gött. und Nieders. FVA (69), S.93-106
- Akça, A. (1983a): Rationalisierung der Bestandeshöhenermittlung in der Forsteinrichtung und bei Großrauminventuren. Forstarchiv 54 Jg H 3, S.103-106
- Akça, A. (1983b): Aerophotogrammetrische Messung der Baumkrone. AFZ, 38, S 772-773
- Akça, A. (1989): Permanente Luftbildstichprobe. AFJg. 160 (4) 65-69
- Akça, A. und Zindel U. (1987): Zur Vorratsschätzung mit Hilfe von digitalen Luftbilddaten und Regressionsmodellen bei der Baumart Fichte. AFZJg. S. 109-115
- Akça, A. und Dong, P.H. (1985): Ergebnisse der terrestrischen Vorrats- und Schadinventur im Hils. Schriftenr. der Forstzeitschr. 13.Jg. 46/47 S. 1244-1246
- Akça, A. und Athari, A. (1992): Auswirkungen forstlicher Maßnahmen (Auflichtung des Bestandes zur Einleitung der Naturverjüngung, Bodenbearbeitung und Düngung) und damit verbundener Stoffhaushaltsveränderungen auf die oberirdische Holzbiomasse-Entwicklung. In: Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe B. Bd. 31, Hrsg.: Ulrich, B.
- Akça, A. und Mench, A. (1994): Biomasseentwicklung in umweltbelasteten Fichtenbeständen des Einzugsgebietes Lange Bramke. In: Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe b, Bd. 37, Hrsg.: Gravenhorst, G
- Akça, A., Pahl, A. und Setje-Eilers, U. (1990): Auswertung einer CIR-Luftbild-Zeitreihe des Fichten-Kalkungsversuchs im Forstamt Hilchenbach, Nordrhein-Westfalen. Untersuchung im Auftrag der LÖLF. Inst. f. Forsteinr. U. Ertragskunde d. Univ. Göttingen, 116 S

- Akça, A., Pahl, A. und Setje-Eilers, U. (1991): Analytische Auswertung von Luftbildzeitreihen zum Nachweis von Veränderungen in Waldschaden. In: OESTEN/KUNTZ/GROSS (ed.) Fernerkundung in der Forstwirtschaft. Karlsruhe: Wichman Verlag. 277 S.
- Akça, A., Feldkötter, C., Henjes, M. (1995): Auswertung einer CIR-Luftbildzeitreihe (1991-1994) des Fichten-Kalkungsversuchs an der Waldmeßstation Elberndorf im Hochsauerland. Untersuchung im Auftrag der LÖBF. Inst. f. Forsteinr. u. Ertragskunde d. Univ. Göttingen. 155 S.
- Al Homaid, N. (1978): Untersuchungen zur Möglichkeiten der Erkennung und Klassifizierung von Brachflächen in Luftbildern. Diss. Forstwiss. Fak. Uni: Freiburg
- Alemdag, I.S.(1980): Manual of data collection and processing for the development of forest biomass relationships. Information report PI-X-4. Petawawa National Forestry Institute, Canadian Forestry Service
- Alemdag, I.S. (1985): Estimating oven-dry mass of trembling aspen and white birch using measurements from aerial photographs. Canadian Journal of Forest Research. 16(1) 163-165
- Alemdag, I.S. und Bonnor, G.M (1985): Biomass inventory of federal forest lands at Petawawa: A case study. For. Chron., 61 (2) 81-86
- Alemdag, I.S.(1986) Estimating oven-dry mass of trembling aspen and white birch using measurements from aerial photographs. Can. J.For. 16.163-165
- Allison, G.W und Breadon, R. E (1958) Provisional aerial photo stand volume tables for interior British Columbia. For. Chron., 77-83
- Allison, G.W und Breadon, R. E. (1960): Timber volume estimations from aerial photographs. Brit. Col. For. Serv. Department of lands and Forests, Victoria, Forest survey Notes 5
- Ando, T. (1962) Growth analysis on the natural stands of Japanese red pine (*Pinus densiflora* Sieb. Et Zucc.). II. Analysis of stand density and growth. Government Forest Experiment Station Bulletin 147: 45-77.
- Anon. (1977) Kimani Irrigation Project, Annual report. Kimani, Mbeya Region-Tansania
- Anon. (1989): Annual District Forestry report, Hai district. District forestry Office, Hai Kilimanjaro region - Tansania
- Aronoff, S. (1989) Geographical Information System: A Management Perspective. WDL Publications, P.O. Box 8457, Station "T", Ottawa, Ontario, Canada, K1G 3H8, 286 S
- Art, H.W.und P.L.Marks, (1971): A summary table of biomass and net annual primary production in forest ecosystems of the world. IUFRO: In: Young, H.A. (ed.) Forest Biomass Studies, University of Maine at Orono, USA. Life sciences and Agricultural Experiment Station; 3-32
- Bartelme, N. (1989): GIS - Technologie. Berlin, Heidelberg, New York, Springer 280 S

- Baskerville, G.L.(1972): Use of logarithmic regression in the estimation of the plant biomass. *Can. J. For. Res.* 2:49-53
- Berry K. J. und Ripple W.J. (1994): Emergence and role of GIS in natural resources. *Compendium: The GIS application book examples in natural resources*. American Soc. for Photogram. and Remote Sensing 3-20 S
- Bill, R. und Fritsch, D. (1991): Grundlagen der Geo-Informationssysteme (Band 1: Hardware, Software und Daten). Karlsruhe: Wichmann. 414 S
- Braun, U. (1982): Untersuchungen zur aerophotogrammetrischen Ermittlung ertragskundlich relevanter Bestandeshöhen in Fichtenbeständen des Solling. Diplomarbeit Forstl. Fak. Univ. Göttingen
- Boaler, S. B. (1966): Ecology of miombo site, Lupa North forest reserve, Tanzania. *J. Ecol.* 54:447-463
- Bones, T. J., (1976): Selection of the stand variables for constructing Aerial Stand Volume tables for tropical hard wood Forest in Columbia. *Proc. IUFRO World Congress*, Oslo
- Bonnor, G. M. (1985): Inventory of forest biomass in Canada. ISBN 0-662-144203-9
- Born, M. (1990): Verfahren zur zerstörungsfreien Abschätzung der Biomasse. Beiträge für die Forstwirtschaft. Institut für Forstwissenschaften Eberswalde
- Brown, J.K (1965): Estimating crown fuel weights of red pine and Jack pine. St. Paul, Minn: USDA Forest service, Lake States Forest Experiment Station; Research paper LS-20, S. 12
- Brown, J.K (1976): Estimating shrub biomass from basal stem diameters. *Canadian Journal of Forest Research* 6 (2) : 153-158
- Burkhart, H.E.; Parker, R.C.; Oderwald, R.G.(1972): Yields for natural stands of loblolly pine. Blacksburg, Virginia. Virginia Polytechnic Institute and state University. Division of Forest and Wildlife; Research publication FWS-2-72: 63 S
- Celander, N. (1983): Miombo woodland in Africa - Distribution, ecology and patterns of land use. Swedish university of agricultural sciences, International Rural Development Centre, Uppsala, Working paper 16, 54 S.
- Chen, Z.Y. (1979): Ermittlung von Holzvorratsdaten aus dem Luftbild für Kieferndurchforstungsbestände der Lüneburger Heide. Dissertation Forstl. Fak. Univ. Göttingen
- Chidumayo, E. N (1992): Above ground woody biomass structure and productivity in Zambian woodland. *For. Ecol. and Manage.* 36:33-46
- Chidumayo, E. N. (1988): Estimating fuel wood production and yield in regrowth dry miombo woodland in Zambia. *For. Ecol. and Manage.* 24:59-66
- Chinyenda; S.S., Kozak, A. (1982): Some comments on choosing regression models for biomass prediction equation. *For. Chron.* 58 (5) 203-204

- Clark, A. (1979): Suggested procedures for measuring tree biomass and reporting tree prediction equations. In: IUFRO, Forest Resource Inventories II Colorado state Univ. s 615-628
- Clark, A., und Toras, M.A. (1976): Comparison of above ground biomass of the four major southern pines. *Forest products journal* 26(10): 25-29
- Cochran, G. (1977): *Sampling Techniques*. John Wiley and Sons, New York, S 428
- Congalton, R.G., Oderwald, R. und Mead, R. (1983): Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate analysis statistical techniques. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 6:169-173
- Cook, A. (1974): The use of photointerpretation in the assessment of physical and biological resources in Tanzania. Bureau of Resource Assessment and Land Use Planning, University of Dar-es-Salaam, Research paper 31
- Crow T. R., (1971): Estimation of biomass in an even aged stand – Regression and "mean tree" techniques. In: *Forest Biomass Studies*. Life Sciences and Agriculture Experiment Station, University of Maine Orono, S. 33-48
- Crow T. R., (1978): Common regressions to Estimate Tree Biomass in tropical stands. *Forest Sci.* 24:110-114
- Crow, T. R. and Schlaegel, B.E (1988) A guide to using regression equations for estimating tree biomass. *Northern Journal of Applied Forestry* 5(1) 15-22
- Cunia, T. und Michelakackis, J. (1983): On error of tree biomass tables constructed by a two-phase sampling design. *Canadian Journal of Forest Reserach* No. 13, S. 303-313
- Cunia, T. (1979a): On tree biomass tables and regression: Some statistical comments. In: Frayer, W.E. (ed.) *Forest resource Inventories. Workshop Proceedings*, Vol. II pp 629-642. Colorado State University, Fort Collins, Colorado 80523
- Cunia, T. (1979b): On sampling trees for biomass table construction: Some statistical comments. In: Frayer, W.E. (ed.) *Forest resource Inventories. Workshop Proceedings* Voll.II.pp.643-664. Colorado State University Fort Collins Colorado 80523
- Cunnia, T. and Briggs, R. D. (1984): Forcing additivity of some biomass tables some empirical results. *Canadian Journal of Forest Research* 14 (3) 376-384
- Dangermond, J. (1991): Where is technology leading us? *The For. Chron.* 67(6):599-603
- Davis, F. W und Goetz, S. (1990): Modelling vegetation patterns using digital terrain data. *Landscape Ecology* 4 (1):69-80
- De Montalembert, M.R. and J. Clement (1983): Fuelwood supplies in the developing countries. *FAO Forestry Paper* 42, FAO Rome
- Denstorf, O. (1981): Ermittlung des Bestockungsgrades aus aerophotogrammetrischen Bestandesparametern am Beispiel von Kiefern- und Laubholzbeständen. Diplomarbeit, Forstl. Fak. d. Univ. Göttingen

- Duvigneaud, P. (1971): Symposium on the productivity of forest ecosystems. Proceedings of Brussels Symposium. Ecology and Conservation No. 4, 707 S. UNESCO Paris
- Draper, N.R. und Smith, H. (1981): Applied regression analysis. 2nd Aufl. John and Sons Wiley, New York
- Egunjobi, J.K. (1976): An evaluation of five methods for estimating biomass of an even-aged plantation of *Pinus caribaea* L. Oecologia Plantarum 11(2): 109-116
- Eilemann, F. (1995) Holzvorratsschätzung durch zweiphasige Stichprobenverfahren mit kleinmaßstäbigen CIR-Luftbildern, am Beispiel der Baumart Fichte und Bildern im Maßstab 1:35000 aus einer Hochbefliegung. Diplomarbeit Göttingen
- FAO (1973): Manual of forest inventory. FAO, Rome
- FAO (1981): Map of the fuelwood situation in the developing countries. FAO, Rome
- FAO (1985): Tropical Forestry Action Plan. FAO, Rome
- Flewellling, J.W. und Pienaar, L.V. (1981): Multiplicative regression with lognormal errors. For. Sci. 27, 281-289
- Fumival, G.M. und Wilson R.W. (1974) Regression by leaps and bounds. Technometrics, 16, 499-511
- Feldkötter, C. (1994). Ein photogrammetrisches Gehölzkataster für das Monitoring städtischer Gehölzvegetation unter stadtoökologischen Aspekt. Diplomarbeit Institut für Forsteinrichtung und Ertragskunde, Universität Göttingen, 120 S
- Goodchild, M.F. (1988): Spatial analytical perspective on Geographical Information Systems. International Journal of Geographic Information Systems, 1:327-334
- Goodenough, D.G.(1988) Thematic mapper and APOT Intergration with a Geographic Information System. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol 54, No. 2, s 167-176
- Gorman, J. W. und Toman, R. J. (1966): Selection of variables for fitting equations to data. Technometrics 8, 27-51
- Gothardt, E. (1941): Fehler bei der stereoskopischen Messung von Haushöhen aus Senkrechtbildern. Institutsber. Nr. 48 des Institutes f. Photogrammetrie der TH Berlin
- Greenway, P.J. (1943): Second draft report on vegetation classification. E. Afr. Pasture Research Conference, Nairobi
- Grün, A. (1991): Digital photogrammetrie und Fernerkundung als Komponenten von Geo-Informationssysteme. Internationales Seminar, Photogrammetrie und Geographische Informationssysteme. 8-12 April 1991, Technische Hochschule Zürich, Hönggerberg, HIL - Gebäude
- Grundy, I.M (1995): Wood biomass estimation in dry miombo woodland in Zimbabwe. Forest Ecology and Management 72:109-117

- Harding, R. B. und Grigal, D. F. (1985): Individual tree biomass estimation equations for plantation- grown to white spruce in Northern Minnesota. Canadian Journal of For. Res 15(9)738-739
- Haselhuhn, F. (1983) Vorratsermittlung mit Hilfe der Luftbild- Ertragsstafel- Methode in Fichtenbeständen. Diplomarbeit Forstl. Fak. Univ. Göttingen
- Heit M. und Shortreid, A. (Hrsg.) 1991 GIS applications in Natural resources. GIS world, Fort Collins, Colorado
- Hepp, T.E. und Brister, G.H. (1982): Estimating crown biomass in loblolly pine plantations in the Carolina flatwoods. For. Sci. 28, 115-127
- Hering, A. (1991): Methoden zum Einsatz von Luftbildern für die Holzvorratsschätzung - Möglichkeiten rechnergestützter Kronenzahlermittlung. Diss. Fachgebiet Geographie der Brandenburgischen Landeshochschule Potsdam, 88 S.
- Hitchcock, H.C. und J.P. McDonnel (1979): Biomass measurement: a synthesis of the literature. Division of Land and Forest Resources Tennessee Valley Authority. Norris TN 37828, USA
- Hildebrandt, G. (1962a): Luftbilddauswertung bei Waldinventuren im Gebiet der Sommer- und Nadelwälder. AFZ. 17. Jg., S.20-26
- Hildebrandt, G. (1964): Forstliche Großrauminventuren. AFZ (7), S.100 - 107
- Hildebrandt, G., (1970): Remote sensing. Luft bild- Interpretation, Photogrammetrie AFZ 35 S 723.
- Honer, T.G. (1971): Weight relationship in open and forest- grown balsam fir tree. IUFRO Working Group of Forest Biomass Studies. University of Maine. Life Sciences and Agricultural Experiment Station; S 65-78
- Hosius, A. (1973): Holzvorratsermittlung mit Hilfe der Luftbilder (Laubbäume) Diplomarbeit Forstl. Fak. Univ. Freiburg
- Hugershoff, R. (1933): Die Photogrammetrische Vorratsermittlung. Tharandter Forstliches Jahrbuch, Bd. 84, S. 159-166
- Hulseher, W.S. (1990): Energy for rural development. ITC Journal 1990-4 S. 373 - 381
- Husch, B.; C.I. Miller und T.W. Beers (1974): Forest Mensuration. Ronald Press, New York
- Huss, et al. (1984): Luftbildmessung und Fernerkundung in der Forstwirtschaft Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe, 406 S
- Ishengoma, R.C. (1989): Energy supply through fuelwood. Management, problems, over-exploitation and soil erosion. IASS Soil Conservation Seminar, Sokoine University of Agriculture, Morogoro. MECCA publication

- Jacobs, M.W. und Cunia, T (1980): Harmonizing biomass tables for New York. M.Sc. Thesis, State University of New York, College of Environmental Science and Forestry, Syracuse, NY
- Jaakko Pöyry Oy (1978): Report on the industrial forest inventory in Tabora, Tanzania Tanzania Wood Industries Corporation, K. Setala/KSS/PVT/1(10), Dar-es-Salaam
- Jackson, M.J. and D.C. Mason, (1987): The development of Integrated Geo-Information Systems. *International Journal of Remote Sensing*, 7(6):723-740
- Jeffers J.N.R. and Boaler, S.B. (1966): Ecology of miombo site Lupa North Forest. *J. Ecol.* 54:465-479
- Johnson, E. W. (1958): Effect of photographic scale on precision of individual tree-height measurement. *Photogramm. Engn.*, 24, S. 142-152
- Kaale, B.K. (1984): Trees for village forestry. Forest Division, Dar-es-salaam
- Kahama, C.G. (1984): Opening address. In: Temu, A.B. Kaale, B.K. und Maghembe, J.A. (Hrsg.) *Proceedings of National Seminar on Wood-Based Energy for Development*. 26th-28th March, Dar-es-Salaam, Tanzania
- Kätsch, C. (1991): Zweiphasige Stichprobenverfahren für Zwecke der Betriebsinventur auf der Basis einfacher Luftbilddauswertung. Diss. Forstl. Fak. d. Univ. Göttingen
- Khaleys, D. und Klier, G. (1968): Untersuchungen zur Ermittlung holzmeßkundlicher Daten aus Luftbildern bei der Holzart Fichte. *Arch. Forstw.*, 17(4), S. 369- 380
- Kenneweg, H. (1970): Was kostet das Luftbild? *AFZ* S 724-725
- Kenneweg, H. (1992): Concepts and trends of global forest monitoring. In: Bericht des Trainingskurses "Application of Remote Sensing and Geographical Information Systems in Environmental and Natural Resources Management " April 6-Mai 1992 Feldafing-Germany. S 23-30
- Kessy, J. F. (1988): Social-economic implications of improving land use strategies in a mountainous community. Unpublished special project. Faculty of Forestry, Sokoine University of Agriculture, Morogoro
- Kilahama, F.B. (1985): The need of large fuelwood plantations in Tanzania: a social-economic undertaking. Ministry of Lands, Natural Resources and Tourism, Dar-es-salaam
- Kilikki, P. (1979) Outline for data processing system in forest mensuration. *Silva Fenn.* 13, S. 368-384
- King, R. B. (1984): Remote sensing manual of Tanzania. Institut of Resource Assessment. University of Dar-es-Salaam. 206 p
- King, W. W.; and Shnell, R. (1972): Biomass estimates of Black Oak tree components. Tannesse Valley Authority, Division of Forestry. Fisheries and Wildlife, Development Technical Note B1, 24 S.

- Kira, T., und Shidei, T. (1967): Primary production and turnover of organic matter in different forest ecosystems of the Western Pacific. Jap. J. Ecology 17, 70-87
- Klier, G. (1969): Bestimmung des Kronenschlußgrades im Luftbild. Arch. Forstw., Bd. 18, 8, S. 871-876
- Klier, G. (1970): Aerophotogrammetrische Messungen an Einzelbäumen bei der Holzart Fichte. Archiv für Forstwesen, S 543-553
- Kramer, H.A. und Akça, A. (1987): Leitfaden für Dendrometrie und Bestandesinventur. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main
- Kramer, H.A. und Dong, P. H.. (1985): Kronenanalyse für Zuwachsuntersuchungen in immissionsgeschädigten Nadelholzbeständen. Forst und Holz 40, S 115-118
- Kurt, H. und Oldani, K. (1962): Die Beurteilung der Durchforstungsbedürftigkeit mit dem Luftbild. Mitt. Schweiz. Anst. Forstl. Versuchsw., 38, S. 109-114
- Lachowski, Henry, M. Paul und B. Platt (1992): Integrating remote sensing with GIS procdures and examples from the forest service. Journal of Forest 90(12) 16-21
- Lind, E.M. und M.E.S. Morrison (1974): East Africa vegetation. London, 257 S
- Loetsch F und. Haller, E. (1964): Forest inventory, Bd. 1, Bayer Landw. Verlag, München
- Loetsch, F. (1953): Die Anwendung des Luftbildes als Grundlage von Vorratsinventuren in den USA. Forstarchiv, 24. Jg., S. 75-85.
- Logan, T L. und Bryant, N. A. (1988): Spatial data software integration: Merging CAD/CAM mapping with GIS and image processing. Photogram. Engineering and Remote Sensing, 53(10) : 1391-1395
- Lundgren, B. (1975): Landuse in Kenya and Tanzania, the physical background, present situation and an analysis of the needs for its national planning. Royal College of Forestry, International Rural Development Division, 352 S.
- Maclean, D.A., und Wein R. W. (1976): Biomass of Jack pine and mixed hardwood stands in north eastern New Brunswick. Canadian Journal of Forest Research 6 (4) 441-447
- Maclean, A.L, D.R. David, G.D. Mroz, G.W. Lyon, und Edison, T. (1992): Using GIS to estimate forest resource changes: A case study in Northern Michigan. Journal of Forestry, Vol. 90, No. 12 S 22-26
- Madgwick, H.A. I (1976): Mensuration of forest biomass. In: Young, A. (cd), Oslo Biomass Studies, University of Maine at Orono, USA.
- Madgwick, H.A.; Oliver, G. und Holten-Anderson, P. (1982): Aboveground biomass, nutrients, and energy content of trees in a second -growth stand og *Agathis australis*. New Zealand J. For. Sci. (12) 1:3-6

- Maguire, D.J., Goodchild, M.F. and Rhind, D.W. (Hrsg.). (1991) Geographic Information Systems: Principles and Applications. John Wiley and Sons, Inc., 605 Third Avenue, New York, NY 10158.
- Makundi S.J. (1984) Energy situation in Tanzania. In: Temu, A.B. Kaale, B.K. und Maghembe, J.A. (Hrsg.) Proceedings of National Seminar on Wood-Based Energy for Development. 26th-28th March, Dar-es-Salaam, Tanzania
- Malimbwi R.E.; Solberg, B., und Luoga, E. (1994): Estimation of biomass and volume in miombo woodland at Kitulung'alo forest reserve, Tanzania. Journal of Tropical Forest Science 7 (2):230-242
- Mallows, C. L (1973): Some comments on C_{ip} . Technometrics 15, 661-675
- Marklund, L.,G (1988): Biomass functions for pines, spruce and birch in Sweden Department of Forest Survey report 45. Swedish University of Agricultural Sciences Umeå
- Meeliwig, R.O; Miller, E.L und Budy J.D (1979): Estimating pinyon (*Pinus monophylla*) and Juniper (*Juniperus osteosperma*) fuel and Biomass from aerial photographs Research Note. Intermountain Forest and Range Experiment Service Station,USDA Forest Service No. INT-274, 9S
- Meyer, H.A. (1944): A correction for a systematic error occurring in the application of logarithmic volume equation. Penn. State For. Sch. Res. Paper 7
- Mgeni, A.S.M (1990b): Forest resources assessment in Tanzania Current inventory and monitoring methods applied. problems and possible futurology. In: Lund, H.G. und Preto (Hrsg.). Global Natural Resource Monitoring and Assessments. Preparing for the 21st Century. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Vol 2: 546-556
- Michailow, I. (1943): Zahlenmäßiges Verfahren für die Ausführung der Bestandeshöhenkurve. Forstwiss. Centralblatt und Tharandter Jahrbuch, Heft 6: 273-279. In: Prodan (1965)
- Milner, C. und Hughes, R.E.(1968): Methods for measurement of the land Oxford Blackwell Scientific Publications ; 10 S. (IBP Taschenbuch 6)
- Miller, C.L und Laflamme, R. A. (1958): The digital terrain model- Theory and applications. Photogrammetric Engineering 24 (3): 433-442
- Millington, A. C.;Townshend, J.R:G., Kennedy, P., Saul, R., Prine, S., Madams, R. (1989): Biomass assessment in the SADCC region Earthscan Publications, London.
- Millington, A. C., Crichley, R., Douglas, T.D. und P.Ryan (1994): Estimating woody biomass in Sub-Saharan Africa. The Worldbank Publications Washington, D.C
- Mnzava, E.M (1984) The role of wood energy in the Tanzanian economy. In: Temu, A.B. Kaale, B.K. und Maghembe, J.A. (Hrsg.) Proceedings of National Seminar on Wood-Based Energy for Development. 26th-28th March, Dar-es-Salaam, Tanzania
- Munyanziza, E. (1994): Miombo trees and Mycorrhizae. MSc. Thesis, Wagenigen University, Netherlands. 193 S.

- Newbould, P.J. (1967): Methods of estimating primary production of forests. Oxford, Blackwell Scientific Publications, 62 S (IBP Handbook 2)
- Nyyssönen, A. (1967): Photographic volume estimation in forest inventory. XIV. IUFRO-Kongress München, Section 25, S. 410-425
- Olsson, J.S. (1989): World ecosystems. W.E.O. NOAA/ National geographical Data Centre, Boulder, Colorado
- Openshaw, K. (1971): Present and future requirements of wood in Tanzania. FAO Technical Report No. 3 SF/TAN 15 Rome
- Ott, M. (1987): Möglichkeiten des Luftbildeinsatzes für Flurholzinventuren. Beitr. f. d. Forstwes. 21(1), S. 9-13
- Ovington, J. D. und Madgwick, H. A. I. (1959): Distribution of organic matter and plant nutrients in a plantation of scots pine. For. Sci. -Washington 5, S. 344-355
- Pellinen, P. (1986): Biomasseuntersuchungen im Kalkbuchenwald. Diss. Forstl. Fak. Univ. Göttingen
- Perlwitz, W. (1970): Meßinterpretation von forstlichen Bestandesdaten auf Luftbildern und die Möglichkeit ihrer Automatisierung. Beiträge für die Forstwissenschaft, 4. Jg., 3, S. 51-54
- Perlwitz, W. und Fromhold, H. (1976): Bestimmung der forstlichen Bestandeshöhe am Topocart B. Inst. F. Forstwissenschaften, Eberswalde. Abt. Photogrammetrie, J.R. 2, S. 71 - 73
- Philip, M.S. (1983): Measuring trees and forests. Division of Forestry, University of Dar-es-Salaam, Tanzania
- Pöcs, T. (1976): Vegetation mapping in the Uluguru Mountains (Tanzania, East Africa). Bissiera 24:477-498
- Pope, R.B. (1957): The effect of photoscale on the accuracy of forest measurement. Photogramm. Engn., 23.Jg., S. 869 - 873
- Poso, S. (1988): Numerical interpretation of trees on color-infrared aerial photographs. Proceedings Symposium IUFRO S.6.05, Kyoto
- Remeijn, J.M. (1988): Forest measurements on aerial photographs and maps. ITC Enschede. Lecturer Notes for Courses N 7/8.1 N 7.2 and N 8.2
- Rhody B (1982): Ein kombiniertes Verfahren mit photogrammetrischen und terrestrischen permanenten Stichproben für intensive - und Großrauminventuren. Forstl. Cbl., 101 (1), S. 36-38
- Ripple, W.J. (Hrsg.) (1987): Geographic Information Systems for Resource Management: A Compendium. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 5410 Grosvenor Lane, Suite 210, Bethesda, MD 20814-2160

- Ripple, W.J. (Hrsg.) (1989): Fundamentals of Geographic Information Systems: A compendium. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 5410 Grosvenor Lane, Suite 210, Bethesda, MD 20814-2160
- Rogers, E.J. (1959) Proposed forest survey applying aerial photographs in regression technique Photogrammetric Eng., 25 Jg., S 443-445
- Saborowski, J. (1994): Möglichkeiten zur Effektivitätssteigerung zweiphasiger Stichprobeninventuren: Biometrische Beiträge zu statischen und dynamischen Modellaussätzen in der Forstwissenschaft und der Praxis, Tagungsbericht der Sektion Forstliche Biometrie und Informatik, Martin CSF 1994, S.28-44
- Samojlovic, G.G. (1964): Primenie aerofotosemki i awcazii lesnom chozjajstve. "Isdatelstow Lesnaja Promyslennost", Moskau (mit engl. Zus.fassung)
- Sayn-Wittgenstein, L. und Aldred, A. H. (1967): Tree volume from large scale photos. Photogramm. Engn. 33, 33.Jg., 69-73
- Satoo, T. and Madgewick, H. A. T (1982): Forest Biomass. Martinus Nijhoff / Dr. W. Junk Publishers, The Hague, Boston, London, 152 S.
- Schade, J. (1980): Ein merphasiges Stichprobensystem für forstliche Großrauminventuren, gestützt auf Landsat MSS Daten, Luftbilder 1:50.000 u. ergänzende terrestrische Messungen. Diss. Forstwiss. Fak. Univ. Feiburg
- Schnell, R. L (1979): Biomass estimates of hickory tree components. Norris, Tennessee: Tennessee Valley Authority. Division of Forestry, Fisheries and Wildlife Development; Technical Note B-30
- Schnurr, J. und Tuinivanua O. (1992): National forest inventory in Fiji based on GIS applications and remote sensing. In: Bericht des Trainingskurses „Application of Remote Sensing and Geographic Information Systems in Environment and Natural Resources Management and Monitoring“, Feldafing, 6.April - 6.Mai 1992
- Schreuder, H. T. und Swank, W.T.A (1972): Comparison of several statistical model in forest biomass and surface area estimation. Ashville, N. Carolina, USA- Southeastern Forest Experiment Station, 12 S.
- Schultz, G. (1970): Die Baumhöhe als photogrammetrische Meßgröße. AFZ. S. 754-755
- Shultz and Co. (1971): Tanzania indigenous forest inventory report Vol.1 Vancouver, Canada.
- Siebert, R. (1984): Ableitung und Nutzung von Texturmerkmalen. Forschungsbericht. AdW, ZIPE, Postdam
- Singh, R.P. ; und Sharma, V. K. (1976): Biomass estimation in five different aged plantation in *Eucalyptus tereticornis* (Smith) in Western Uttar Pradesh. Proceedings IUFRO. S4.01; XVIth Congress Oslo Juni 22, 1976

- Sloboda, B. (1984): Bestandesindividuelles biometrisches Schaftformmodell zur Darstellung und zum Vergleich von Förmigkeit und Sortimentenausbeute sowie Inventur. Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde. Bericht über die Jahrestagung, 4.-7. Juni 1984 Neustadt an der Weinstrasse. S. 4/1-4/36
- Soedirman S. (1989): Anwendungsmöglichkeiten der Luftbildauswertung zur Feststellung von Zustandsänderungen im Schutzwald von Bukit Soeharto, Ostkalimantan, Indonesien. Dissertation Forstl. Fak. d. Univ. Göttingen, 125.S
- Spors, H.J.; Stock, R und Sloboda, B. (1992): Räumliche Informationssysteme als Entscheidungsbasis für die forstliche Praxis. Forstarchiv 63:33-39
- Spellmann H. (1984): Zustanderfassung in Kiefernbeständen mit Hilfe des Luftbildes. Dissertation. Forstl. Fak. d. Universität Göttingen
- Spellmann H. (1986): Zur Genauigkeit der Vorratsermittlung aus Luftbildern Forstarchiv, 57, S. 56-61
- Spellmann H. und Akça, A (1983): Verbesserungsmöglichkeiten in der Forsteinrichtung AFZ, 17, S 427-43
- Spurr, S. H. (1952): Forest Inventory. The Ronald Press Company, New York.
- Stanek, W. und State, D. (1978): Equations predicting primary Productivity (biomass)of trees, shrubs and lesser vegetation, based on the current literature. Canadian Forest Service, Pacific Forest Service, Pacific Forest Research Centre. Victoria BC
- Stellingwerf, D.A (1962): Holzmassenbestimmung von *Pinus Silvestris* aus Luftbildern in den Niederlanden. Allg. Forstzeitschr., 17Jg.,1/2, S. 229-250
- Stellingwerf, D.A und Benessala, D. (1977): Ermittlung des Zuwachses aus Volumenbestimmungen in permanenten Photo-Stichproben. Berichte Eidg. Anst. Forstl. Versuchsw., Nr. 171, S. 53-63
- Storey, T.G. (1969): Tree weights and fuel size distribution of Pinyon Pine and Utah Juniper. Final report of the project on investigation of mass fire (1964-1967). USDA For.Serv Pacific Southwest For. and Range Exp. Stn. Berkley, California 15-32 S.
- Stromgaard, P (1985): Biomass estimation equations for Miombo woodland. Agrofor. Syst. 3:3-13
- Stromgaard, P (1986): Biomass equations reviewed. Agrofor. Syst. 4: 375-379
- Stüber, V. (1981): Aerophotogrammetrische Bestandeshöhenermittlung zwecks Schätzung der Holzmasse in Kiefern- und Laubholzbeständen des nordwestdeutschen Tieflandes. Diplomarbeit Forstl. Univ. Göttingen
- Suvanto, R und Kiema, P. (1989): A method for numerical interpretation of single trees on aerial photograph. In: Wolf, B. (1992): Betriebs-und bestandesweise Holzvorratsinventur auf der Basis von permanenten terrestrischen und Luftbild-Stichproben. am Beispiel des Forstamtes Seesen, Niedersachsen. Diss. Forstl. Fak., Univers. Göttingen

- Swank, W.T. und Schreuder H. T. (1974): Comparison of the methods of estimating surface area and biomass for forest of young eastern white pine. *Forest Sc.* 20, (1): 90-100
- Tandon, M.N. (1974): Untersuchungen zur Stammzahlermittlung mit Luftbildern und darauf aufbauender Holzvorratsermittlung. Diss. Forstl. Fak. Univers. Freiburg
- TANU. (1967): The Arusha Declaration and TANU's policy on Socialism and Self-Reliance. Government Printer, Dar-es-Salaam, 29 S.
- Temu, A.B. (1979): Estimation of millable timber volume in Miombo woodlands. Division of Forestry. Record No. 7, Morogoro
- Temu, A.B. (1981): Double sampling with aerial photographs in estimating wood volume in Miombo woodlands. University of Dar-es-Salaam. Division of Forestry, Rec No. 22, Morogoro
- Temu, A. B. (1992): Stand Inventory techniques in Africa. Proc. of Stand Inventory Technologies. World Forestry Center 13 Sept - 17 sept 1992
- Tomlison, R. F. (1989): Current and potential uses of geographical information systems - the North American experience. *Int. J. of Geographical Information systems*, Vol 1(3), S. 203-218
- Trapanell, C.G. (1959): Ecological results of woodland burning experiments in Northern Rhodesia. *J. Ecol.* 47: 129-168
- Trapanell, C.G und Langdale-Brown, (1969): Natural Vegetation. In: Morgan, W.T.W 1969 East Africa. Its peoples and resources. Oxford University Press S. 128-139
- United Nations (1981): Report of the United Nations Conference on new and renewable source of energy, Nairobi, 10th - 21st August 1981. United Nations, New York
- Van Daalen, J.C. (1991): Germination of *Pterocarpus angolensis* seeds. *South African Forestry Journal*, 158:33-36
- Versteegh, P.J.D. (1974) Assessment of volume characteristics of tropical rain forests with large scale aerial photographs. *ITC Journal*, 3, S. 312-323
- Weibel, R. und Heller, M. (1991) Digital terrain modelling In: (Hrsgs): Maguire, D.J., Goodchild, M.F. and Rhind, D.W. *Geographic Information Systems: Principles and Applications*. John Wiley and Sons, Inc., 605 Third Avenue, New York, NY 10158.
- Weir, M. J.C. (1988) More advanced technology needed. *Journal of Forestry*, 87(7):20-25
- Wiant, H.V; Jr.; Sheetz, C.E.; Colannino, A. Demoss, J.C. und Costaneda, F. (1977): Procedures for estimating weights of some appalachian hardwoods. Morgantown, West Virginia: West Virginia University. Agricultural Experiment Station. Bulletin 659t, 36 S.
- Whitaker, R.H. und Woodwell, G.M (1968): Estimating Primary productivity in terrestrial ecosystems. *Amer. Zool.* (8) 19-30.

- Wolf, B. (1992): Betriebs-und bestandesweise Holzvorratsinventur auf der Basis von permanenten terrestrischen und Luftbild-Stichproben. am Beispiel des Forstamtes Seesen, Niedersachsen. Diss. Forstl. Fak. Univers. Göttingen.
- Wolff, G. (1960): Zur Verbesserung der Methodik von Holzvorratsinventuren mit hilfe des Luftbildes. Arc. Forstw., Bd. 9, S. 365-380
- Wolff, G. 1966 : Möglichkeiten und Grenzen der Meßinterpretation forstlicher Luftbilder. Archiv. f. Forstwes. S 169-181
- Worley, D.P. und Landis, G.H. (1954): The accuracy of height measurement with instruments on 1:12.000 photographs. Photogramm. Engn. 20 Jg., S. 823-829
- Worley, D.P. und Meyer, H.A., (1955) Measurements of crown diameter and crown cover and their accuracy for 1:20000 photographs. Photogramm Engn. 21.jg., 3, S. 372-375
- Young, H.E., Strand, L. und Altenberger, R. (1964): Preliminary fresh and dry weight tables for seven tree species in Maine. Techn. Bull. 12, Maine Agr. Exp. Station, 76 S.
- Young, H.E. (1976): A summary and analysis of weight tables studies. In: Yound, H.E (Hrsg.), IUFRO Oslo Biomass Studies. Univ. of Maine at Orono
- Young, H.E. (1977): Hardwoods within the complete forest concept. For. Chron. 53:204-207
- Zieger, E. (1928): Ermittlung von Bestandesmassen aus Flugbildern mit Hilfe des Hegershoff-Heydeschen Autokartographen. Mitt. Sachs. Forstl. Vers.Anst. Tharandt. Sonderdruck, Verlag P. Parey, Berlin, Bd. 3, 3, S. 97-127
- Zobrist, A.L. (1983): Intergration of Landsat image data with geographic data bases. In: Maguire, D.J., M.F. Goodchild and D.W. Rhind. (eds). (1991) Geographic Information Systems: Principles and Applications. John Wiley and Sons, Inc., 605 Third Avenue, New York, NY 10158

Anhang

Anhang 1: Vegetationskarte von Tansania

Anhang 2: Ergebnisse der Rückwärts-Eliminierungsmethode zur Schätzung der frischen Biomasse der Einzelner Bäume

Anhang 3: Lokale Biomassetafel

Anhang 4: Allgemeine Biomassetafel

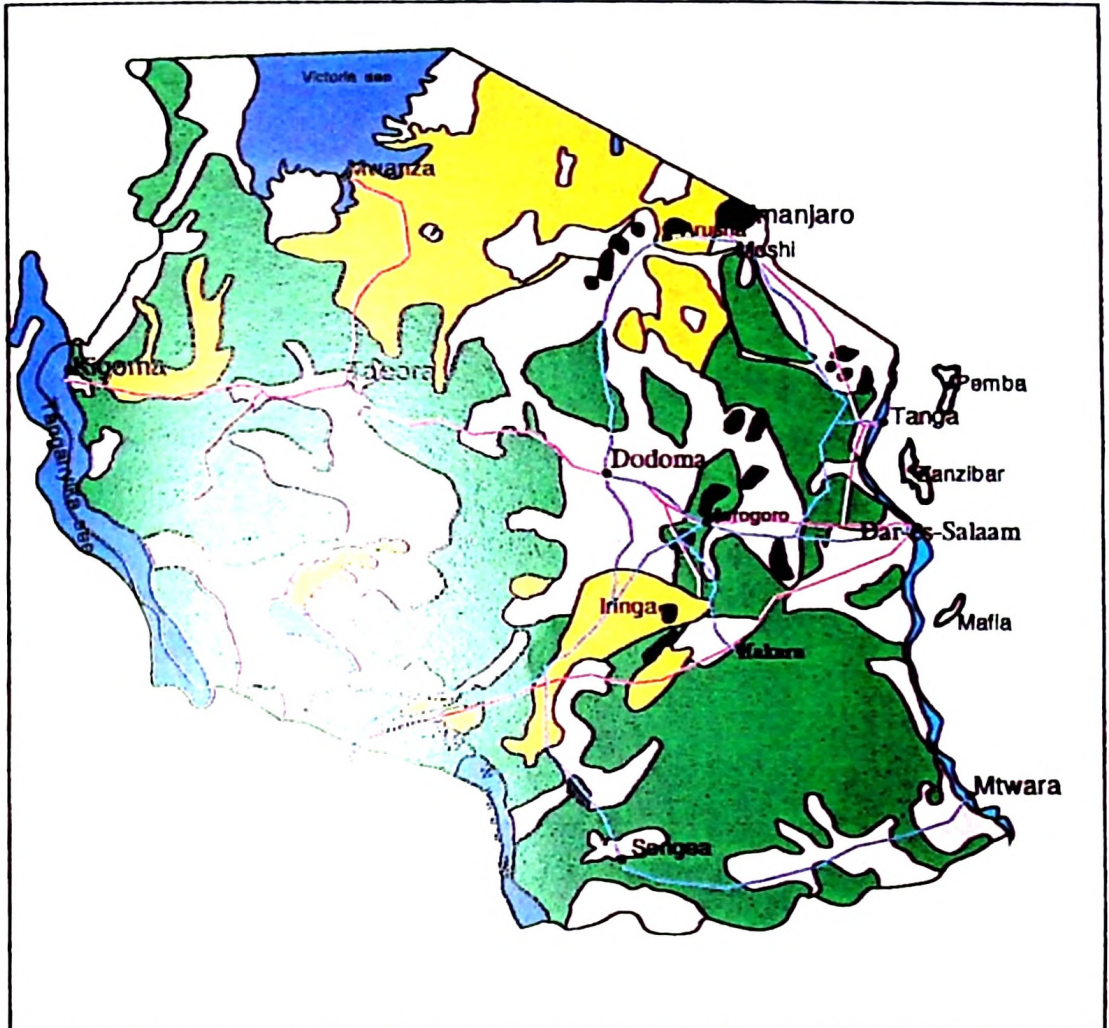
Anhang 5: Die Ergebnisse der Variablenselektion und der besten Modelle für die Ermittlung der frischen Biomasse aller Ast, Schaft und Baumholz innerhalb einer Stichprobefläche

Anhang 6: Ergebnisse der Modellauswahl für die flächenbezogene Schätzung der frischen Biomasse mit der Rückwärts-Eliminierungsmethode

Anhang 7: Karte der Biomasseverteilung in Abhängigkeit von Exposition

Anhang 8: Karte der Biomasseverteilung in Abhängigkeit von der Hangneigung

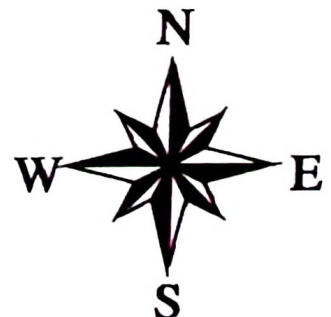
Anhang 1: Vegetationskarte von Tansania

TANSANIA
VEGETATIONS-TYPEN

Masstab (ca.) 1:250000

Legende

- Seen
- Geschlossener Hochwald
- Miombo Woodland
- Buschland
- Grassland
- Mangroven
- Strassen
- Eisenbahn



Anhang 2: Ergebnisse der Rückwärts-Eliminierungsmethode zur Schätzung der frischen Biomasse der Einzelner Bäume

Tabelle 2.1 a: Übersicht über die Prozedur der Rückwärts-Eliminierung für die abhängige Variable "frische Biomasse des Astholzes"

Schritt	eliminierte Variablen	Anzahl verbleibender Variablen	R ² (Partiell)	Modell R ²	C(p)	F	Prob>F
1	BHD2*H	6	0,0003	0,86	6,32	0,3237	0,5703
2	BHD*H2	5	0,0003	0,86	4,64	0,3220	0,5713
3	BHD2*H2	4	0,0001	0,86	2,70	0,0572	0,8114
4	HOH2	3	0,0012	0,86	1,92	1,2470	0,2660
5	BHD*H	2	0,0002	0,86	0,12	0,1988	0,6563
6	BHD	1	0,0072	0,85	5,68	7,7143	0,0062

Das schließlich ausgewählte Modell ist

$$Y = -70.9738 + 0.7218DBH2$$

2.1

Tabelle 2.1 b: Die Ergebnisse der Varianzanalyse für das Modell 2.1

Fehler ursache	Freiheitsgrade (FG)	Quadratsummen (SQ)	mittlere Quadratsummen (MQ)	F	Prob>F
Regression	1	8100740,283	8100740,2833	872,00	0,0001
Fehler	146	1356311,076	9289,8018		
Total	147	9457051,360			

Tabelle 2.1 c: Ergebnisse des Signifikanztests der ausgewählten besten Variable bei 0.0001 Einschlussniveau für das Modell 2.1

Variable	Parameter-Schätzung	Standard-fehler	Quadratsummen (SQ)	F	Prob>F
INTERCEPT	-70,9738	13,34239716	262866,378	28,30	0,0001
BHD2	0,7218	0,02444529	8100740,283	872,00	0,0001

Tabelle 2.2 a: Übersicht über die Prozedur der Rückwärts-Eliminierung für die abhängige Variable "frische Biomasse des **Schaftholzes**"

Schritt	eliminierte Variablen	Anzahl verbleibender Variablen	R ² (Partiell)	Modell R ²	C(p)	F	Prob>F
1	BHD2*H	6	0,0001	0,8223	6,0428	0,0428	0,8364
2	BHD*H2	5	0,0000	0,8223	4,0685	0,0259	0,8723
3	BHD*H	4	0,0003	0,8220	2,2782	0,2126	0,6454
4	BHD	3	0,0002	0,8218	0,4205	0,1450	0,7039
5	H2	2	0,0009	0,8209	-0,8857	0,7115	0,4003
6	BHD2*H2	1	0,0111	0,8098	5,8553	8,9818	0,0032

Das schließlich ausgewählte Modell ist

$$Y = 3,7514 + 0,3366BHD2$$

2.2

Tabelle 2.2 b: Die Ergebnisse der Varianzanalyse für das Modell 2.2

Fehler-ursache	Freiheitsgrade (FG)	Quadratsummen (SQ)	mittlere Quadratsummen (MQ)	F	Prob>F
Regression	1	1741654,3814	1741654,3814	621,74	0,0001
Fehler	146	408981,6252	2801,2440		
Total	147	2150636,0066			

Tabelle 2.2 c: Ergebnisse des Signifikanztests der ausgewählten besten Variable bei 0,0001 Einschlußniveau für das Modell 2.2

Variable	Parameter Schätzung	Standardfehler	Quadratsummen (SQ)	F	Prob>F
INTERCEPT	3,7514	6,4330	75706,2084	27,03	0,0001
BHD2	0,3366	0,00081	1741654,381	621,74	0,0001

Die Variable des Modells ist hochsignifikant Einschlußniveau von 0,0001.

Tabelle 2.3 a: Übersicht über die Prozedur der Rückwärts-Eliminierung für die abhängige Variable "frische Biomasse des gesamten Baumes"

Schritt	eliminierte Variablen	Anzahl verbleibender Variablen	R ² (Partiell)	Modell R ²	C(p)	F	Prob>F
1	BHD2*H	6	0,0001	0,93	6,12	0,1245	0,7248
2	BHD*H2	5	0,0002	0,93	4,48	0,3582	0,5504
3	BHD2*H2	4	0,0000	0,93	2,51	0,0312	0,8601
4	H2	3	0,0003	0,93	1,19	0,6966	0,4053
5	BHD*H	2	0,0006	0,93	0,48	1,3101	0,2543
6	BHD	1	0,0028	0,93	4,44	6,0709	0,0149

Das schließlich ausgewählte Modell ist

$$Y = -67.2223 + 1.0585BHD2 \quad 2.3$$

Tabelle 2.3 b: Die Ergebnisse der Varianzanalyse für das Modell 5.2.3-3

Fehler-ursache	Freiheitsgrade (FG)	Quadratsummen (SQ)	mittlere Quadratsummen (MQ)	F	Prob>F
Regression	1	17419039,897	17419039,897	1962,80	0,0001
Fehler	146	1295688,3508	8874,5777		
Total	147	18714728,248			

Tabelle 2.3 c: Ergebnisse des Signifikanztests der ausgewählten besten Variable bei 0.0001 Wahrscheinlichkeitsniveau für das Modell 2.3

Variable	Parameter Schätzung	Standard-fehler	Quadratsummen (SQ)	F	Prob>F
INTERCEPT	-67,222	13,0408	235,926	,57	0,0001
BHD2	1,0585	0,0238	17419039,897	1962,80	0,0001

Die Variable des Modells ist hochsignifikant bei einem Einschlussniveau von 0,0001.

Anhang 3: Lokale Biomassetafel

Tabelle 3 a. Lokale Biomassetafel für den Miombo Wald

Astholz, Schaftholz und Baumholz frisch kg/Baum

BHD [cm]	Astholz kg/Baum	Schaftholz kg/Baum	Baumholz kg/Baum
7		20	20
8		25	25
9		31	31
10		37	37
11	16	44	60
12	33	52	85
13	51	61	112
14	70	70	140
15	91	79	171
16	114	90	204
17	138	101	239
18	163	113	276
19	190	125	315
20	218	138	356
21	247	152	400
22	278	167	445
23	311	182	493
24	345	198	542
25	380	214	594
26	417	231	648
27	455	249	704
28	495	268	763
29	536	287	823
30	579	307	885
31	623	327	950
32	668	348	1017
33	715	370	1085
34	763	393	1156
35	813	416	1229
36	864	440	1305
37	917	465	1382

Tabelle 3 b Lokale Bimassetafel für den Miombo Wald

Astholz, Schaftholz und Baumholz trocken kg/Baum.

BHD [cm]	Astholz kg/Baum	Schaftholz kg/Baum	Baumholz kg/Baum
7		18	18
8		21	21
9		25	25
10	16	30	46
11	25	35	60
12	35	40	76
13	46	46	92
14	57	53	110
15	70	60	130
16	83	67	151
17	97	75	173
18	112	84	196
19	128	93	221
20	145	102	247
21	162	112	274
22	181	122	303
23	200	133	333
24	220	144	364
25	241	156	397
26	263	168	431
27	286	181	467
28	309	194	503
29	334	208	542
30	359	222	581
31	385	237	622
32	412	252	664
33	440	267	707
34	469	283	752
35	498	300	798
36	529	317	846
37	560	335	894

Anhang 4: Allgemeine Biomassentafel

Tabelle 4a-1: Biomassentafeln für den Miombo Wald (Astholz frische, kg/Baum)

BHD	H O H E (m)																	
(cm)	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18				
7	11	11	11	11														
8	16	16	16	16														
9	21	21	22	22														
10	28	28	29	29														
11	37	37	37	37	37	37												
12	46	46	46	46	47	47												
13	57	57	57	57	58	58												
14	69	70	70	70	70	70												
15	83	84	84	84	84	84												
16				100	100	100	100	101	101	101	101							
17				117	118	118	118	118	118	118	119							
18				137	137	137	137	138	138	138	138							
19				158	158	158	159	159	159	159	159							
20				181	181	182	182	182	182	182	183							
21				206	207	207	207	208	208	208	208	208						
22				234	234	234	235	235	235	235	236							
23				263	263	264	264	265	265	265	265							
24				294	295	296	296	296	296	297	297							
25				328	329	329	330	330	330	331	331							
26					365	366	366	367	367	367	368	368						
27					404	404	405	406	406	406	407	407						
28					445	445	446	447	447	447	448	449						
29					488	489	490	491	491	491	492	492						
30					534	535	536	537	538	538	539	539						
31					583	584	585	586	587	587	588	589	589					
32					635	636	637	638	638	639	640	641	641					
33					689	690	691	692	693	694	695	695	696					
34					746	747	748	749	750	751	752	753	754					
35					805	807	808	809	810	811	812	813	814					
36					868	870	871	872	873	875	876	877	877					
37					934	935	937	938	940	941	942	943	944					

Tabelle 4a-2. Biomassentafeln für den Miombo Wald **Schaftholz frische** kg/Baum

BHD					H O H E m												
(cm)	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18			
7	13	15	17	20													
8	16	19	21	24													
9	19	22	26	29													
10	23	26	30	34													
11	26	30	35	39													
12	30	35	40	44	49	54											
13	34	39	45	50	55	61											
14	38	44	50	56	62	68											
15	42	49	56	62	69	75											
16				69	76	83	90	97	104	110							
17				75	83	91	99	106	114	121							
18				82	91	99	108	116	124	132							
19				89	98	108	117	126	135	143							
20				96	106	116	126	136	146	155							
21					115	125	136	146	157	167	177						
22					123	135	146	157	168	179	190						
23					132	144	156	168	180	192	203						
24					140	154	166	179	192	204	217						
25					149	163	177	191	204	217	231						
26						173	188	202	217	231	245	259					
27						184	199	214	229	244	259	274					
28						194	210	226	242	258	274	289					
29						205	222	239	256	272	289	305					
30						215	234	251	269	287	304	321					
31						226	245	264	283	301	320	338					
32						237	258	277	297	316	335	354	373	392			
33						249	270	291	311	331	351	371	391	410			
34						260	282	304	325	347	368	388	409	429			
35						272	295	318	340	362	384	406	427	449			
36						284	308	332	355	378	401	424	446	468			
37						296	321	346	370	394	418	442	465	488			

Tabelle 4a-3. Biomassentafeln für Miombo Wald **Baumholz frische kg/Baum**

BHD	H O H E (m)																
(cm)	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18			
7	23	25	27														
8	29	32	34														
9	36	39	42														
10	43	48	51														
11	52	57	61	65	69												
12	61	66	72	77	81												
13	70	77	83	89	94												
14	80	88	95	102	108												
15	91	100	108	115	122												
16				130	138	145	152	159	166	172							
17				145	154	162	170	178	185	192							
18				161	171	180	189	198	206	213							
19				178	189	199	209	218	227	236							
20				196	208	219	230	240	250	259							
21					227	239	251	262	273	283	293						
22					247	261	274	286	297	309	319						
23					268	283	297	310	323	335	346						
24					290	306	321	335	349	362	375						
25					313	330	346	361	376	390	404						
26						354	372	388	404	419	434	448					
27						380	398	416	433	449	465	480					
28						406	426	445	463	480	497	513					
29						433	454	474	494	512	530	548					
30						461	483	505	525	545	564	583					
31						489	513	536	558	579	599	619	638	656			
32						519	544	568	591	614	635	656	676	696			
33						549	576	601	626	649	672	694	716	736			
34						580	608	635	661	686	710	733	756	778			
35						612	641	670	697	723	749	773	797	820			
36						644	675	705	734	762	789	814	839	864			
37						677	710	742	772	801	829	856	883	908			

Tabelle 4b-1: Biomassentafeln für den Miombo wald (Äste trocken) kg/Baum.

BHD	H O H E (m)																
(cm)	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18			
7	12	12	12	13													
8	16	16	16	17													
9	20	21	21	22													
10	25	26	27	27													
11	31	32	33	34	34	35											
12	38	39	40	41	41	42											
13	45	46	47	48	49	50											
14	52	54	55	57	58	59											
15	61	63	64	66	67	68											
16				76	77	79	80	81	82	83							
17				86	88	90	91	92	94	95							
18				98	100	101	103	105	106	107							
19				110	112	114	116	118	119	121							
20				123	125	127	129	131	133	135							
21					139	142	144	146	148	150	152						
22					154	157	159	162	164	166	168						
23					170	173	175	178	180	182	185						
24					186	189	192	195	198	200	202						
25					203	207	210	213	216	219	221						
26					221	225	229	232	235	238	241						
27						244	248	252	255	258	261	264					
28						265	269	273	276	280	283	286					
29						285	290	294	298	302	305	309					
30						307	312	317	321	325	329	332					
31						330	335	340	345	349	353	357	360	364			
32						353	359	364	369	374	378	382	386	389			
33						378	384	389	395	399	404	408	412	416			
34						403	410	415	421	426	431	436	440	444			
35						429	436	442	448	454	459	464	469	473			
36						456	464	470	477	482	488	493	498	503			
37						484	492	499	506	512	518	523	529	534			

Tabelle 4b-2 Biomassentafeln für den Miombo wald (Schaftholz trocken) kg/Baum.

BHD	H O H E (m)																
(cm)	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18			
7	11	12	14	16													
8	13	15	17	19													
9	16	18	20	23													
10	18	21	24	27													
11	21	24	27	31	34	37											
12	24	27	31	35	38	42											
13	27	31	35	39	43	47											
14	30	34	39	43	48	52											
15	33	38	43	48	53	58											
16				53	58	63	68	73	78	83							
17				58	63	69	75	80	86	91							
18				63	69	75	81	87	93	99							
19				68	75	81	88	94	101	107							
20					80	88	95	102	108	115							
21					86	94	102	109	116	124	131						
22					92	101	109	117	125	132	140						
23					99	107	116	125	133	141	150						
24					105	114	124	133	142	150	159						
25					111	121	131	141	150	160	169						
26					128	139	149	159	169	179	188	198	208				
27					136	147	157	168	179	189	199	209	219				
28					143	155	166	177	188	199	210	221	231				
29					151	163	175	187	198	210	221	232	243				
30					158	171	184	196	208	220	232	244	256				
31					166	179	193	206	219	231	244	256	268				
32					174	188	202	215	229	242	255	268	281				
33					182	197	211	225	239	253	267	280	294				
34					190	205	220	235	250	265	279	293	307				
35					198	214	230	246	261	276	291	306	320				
36					207	223	240	256	272	288	303	318	334				
37					215	232	249	266	283	299	315	331	347				

Tabelle 4b-3 Biomassentafeln für den Miombo wald (Baumholz trocken) kg/Baum.

BHD	H O H E (m)																
(cm)	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18			
7	23	25	27	29													
8	29	32	34	36													
9	36	39	42	45													
10	43	48	51	55													
11	52	57	61	65	69	73											
12	61	66	72	77	81	86											
13	70	77	83	89	94	99											
14	80	88	95	102	108	114											
15	91	100	108	115	122	129											
16				130	138	145	152	159	166	172							
17				145	154	162	170	178	185	192							
18				161	171	180	189	198	206	213							
19				178	189	199	209	218	227	236							
20				196	208	219	230	240	250	259							
21					227	239	251	262	273	283	293						
22					247	261	274	286	297	309	319						
23					268	283	297	310	323	335	346						
24					290	306	321	335	349	362	375						
25					313	330	346	361	376	390	404						
26						354	372	388	404	419	434	448					
27						380	398	416	433	449	465	480					
28						406	426	445	463	480	497	513					
29						433	454	474	494	512	530	548					
30						461	483	505	525	545	564	583					
31						489	513	536	558	579	599	619	638	656			
32						519	544	568	591	614	635	656	676	696			
33						549	576	601	626	649	672	694	716	736			
34						580	608	635	661	686	710	733	756	778			
35						612	641	670	697	723	749	773	797	820			
36						644	675	705	734	762	789	814	839	864			
37						677	710	742	772	801	829	856	883	908			

Anhang 5: Die Ergebnisse der Variablenselektion und der besten Modelle für die Ermittlung der frischen Biomasse aller Ast, Schaft und Baumholz innerhalb einer Stichprobeffläche

Tab. 5.1 a: Die Ergebnisse der Variablenselektion und der besten Modelle für die Ermittlung der frischen Biomasse aller Astholz innerhalb einer Stichprobeffläche

Anzahl Variablen	r^2 bzw. R^2	$C(p)$	MSE (kg/ha) ²	Unabhängige Variablen
1	0,72	33,79	840308	KSG2
1	0,72	35,72	862594	KSG2*STZ
1	0,67	50,18	1029528	H2*KSG2
2	0,81	13,91	602408	STZ2, KSG2*STZ
2	0,79	17,97	650446	KSG*STZ2, KSG2*STZ
2	0,79	18,22	653433	KSG2, KG2*STZ2
3	0,82	12,82	580435	KSG2, KSG*STZ2, KG2*STZ2
3	0,82	13,10	583791	STZ2, KSG2, KG2*STZ2
3	0,82	13,26	585747	STZ2, KSG2*H, KSG2*STZ
4	0,84	10,82	545883	KSG, KSG*H, H2*KSG2, KG2*STZ2
4	0,84	11,23	550960	KSG, KSG*H, KSG*STZ2, H2*KSG2
4	0,83	11,53	554668	STZ2*H, KSG, KSG*H, H2*KSG2
5	0,84	10,53	531236	KSG, KSG2, H2*KSG2, KG2*STZ2, HOH
5	0,84	11,24	540432	KSG, KSG2, H2*KSG, KG2*STZ2, HOH2
5	0,84	11,34	541658	KSG, KSG2, H2*KSG2, KG2*STZ2, HOH2

Tab. 5.1 b: Ergebnisse der Variablenselektion und der besten Modelle für die Ermittlung der frischen Biomasse aller Schaftholz innerhalb einer Stichprobeffläche

Anzahl Variablen	r^2 bzw. R^2	$C(p)$	MSE (kg/ha) ²	Unabhängige Variablen
1	0,759	34,09	663338	KSG2
1	0,74	34,99	671515	KSG2*STZ
1	0,67	54,18	845601	KSG*STZ
2	0,82	15,06	484293	STZ2, KSG2*STZ
2	0,81	16,46	497321	KSG2, KG2*STZ2
2	0,81	17,01	502409	KSG*STZ2, KSG2*STZ
3	0,83	13,75	465237	KSG, KSG*STZ2, KG2*STZ2
3	0,83	13,97	466938	STZ2, KSG2, KG2*STZ2
3	0,83	13,96	467122	KSG, KSG*STZ, KSG2*STZ
4	0,85	11,59	436586	KSG, KSG*H, H2*KSG2, KG2*STZ2
4	0,84	11,87	439407	KSG, KSG*H, KSG*STZ2, H2*KSG2
4	0,84	12,21	442652	STZ2*H, KSG, KSG*H, H2*KSG2
5	0,85	10,96	421973	KSG, KSG2, H2*KSG2, KG2*STZ2 HOH
5	0,85	11,09	423264	KSG, KSG2, H2*KSG, KG2*STZ2 HOH2
5	0,85	11,63	428747	KSG, KSG2, H2*KSG2, KG2*STZ2 HOH2

Tab. 5.1 c: Ergebnisse der Variablenselektion und der besten Modelle für die Ermittlung der frischen Biomasse der **Baumholz** innerhalb einer Stichprobenfläche

Anzahl Variablen	r^2 bzw. R^2	$C(p)$	MSE (kg/ha) ²	Unabhängige Variablen
1	0,73	34,02	3624664	KSG2
1	0,73	35,52	3699303	KSG2*STZ
1	0,67	52,01	4517795	H2*KSG2
2	0,81	14,21	2605562	STZ2, KSG2*STZ
2	0,80	17,77	2786742	KSG*STZ2, KSG2*STZ
2	0,80	17,78	2787540	KSG2, KG2*STZ2
3	0,82	13,08	2509235	KSG2, KSG*STZ2, KG2*STZ2
3	0,82	13,34	2522582	STZ2, KSG2, KG2*STZ2
3	0,82	13,63	2537632	STZ2, KSG2*H, KSG2*STZ
4	0,84	11,02	2357570	KSG, KSG*H, H2*KSG2, KG2*STZ2
4	0,84	11,41	2378418	KSG, KSG*H, KSG*STZ2, H2*KSG2
4	0,84	11,71	2394978	STZ2*H, KSG, KSG*H, H2*KSG2
5	0,84	10,63	2290006	KSG, KSG2, H2*KSG2, KG2*STZ2, HOH
5	0,85	11,22	2322227	KSG, KSG2, H2*KSG, KG2*STZ2, HOH2
5	0,84	11,41	2333023	KSG, KSG2, H2*KSG2, KG2*STZ2, HOH2

Anhang 6: Ergebnisse der Modellauswahl für die flächenbezogene Schätzung der frischen Biomasse mit der Rückwärts-Eliminierungsmethode

Tab.6.1 a: Übersicht über die Prozedur der Rückwärts-Eliminierung für die abhängige Variable "frische Biomasse der Astholz" für Probekreisfläche

Schritt	eliminierte Variablen	Anzahl verbleibender Variablen	R ² (Partiell)	Modell R ²	C(p)	F	Prob>F
1	H2*KSG2	16	0,0000	0,9063	16,0023	0,0023	0,9618
2	STZ2	15	0,0001	0,9062	14,0170	0,0152	0,9027
3	KSG2*STZ	14	0,0001	0,9061	12,0423	0,0273	0,8699
4	KSG2*H	13	0,0018	0,9044	10,5156	0,5291	0,4730
5	KSG*STZ	12	0,0038	0,8986	10,0637	1,7596	0,1950
6	H2	11	0,0065	0,8920	9,8061	1,9314	0,1748
7	KSG2	10	0,0027	0,8894	8,5175	0,7656	0,3883
8	STZ2*H	9	0,0162	0,8732	10,8315	4,6768	0,0382
9	STZ	8	0,0287	0,8445	16,4929	7,4731	0,0100
10	H2*STZ	7	0,0050	0,8395	15,8229	1,0898	0,3039
11	STZ*H	6	0,0017	0,8378	14,2679	0,3637	0,5504
12	KSG*STZ2	5	0,0038	0,8341	13,2714	0,8350	0,3669
13	KSG*H	4	0,0110	0,8230	14,2163	2,4612	0,1252
14	KG2*STZ2	3	0,0426	0,7804	23,5774	9,1435	0,0045

Das schließlich ausgewählte Modell ist

$$FBM_{\text{fr}} = 75 + 8637,6KSG + 37,7H2 * KSG - 61H$$

6.1

Tab.6.1 b: Die Ergebnisse der Varianzanalyse für das Modell 6.1

Fehler-ursache	Freiheitsgrade (FG)	Quadratsummen (SQ)	mittlere Quadratsummen (MQ)	F	Prob>F
Regression	3	98540466,4034	32846822,1344	46,21	0,0001
Fehler	39	27724076,2708	710873,7505	-	-
Total	42	126264542,6743	-	-	-

Tab.6.1 c: Ergebnisse des Signifikanztests der ausgewählten besten Variable bei 0.0001 für das Modell 6.1

Variable	Parameter Schätzung	Standard-fehler	Quadratsummen (SQ)	F	Prob>F
INTERCEPT	74,8921	483,4258	17061,0344	0,02	0,8777
KSG	8637,6374	1436,0125	25719702,393	36,18	0,0001
H2*KSG	37,6934	7,2384	19276803,882	27,12	0,0001
H	-617,7144	105,9969	24142444,814	33,96	0,0001

Alle Variablen des Modells sind höchst signifikant und bei einem Einschlussniveau von 0,0001 gesichert.

Tab 6.2 a: Übersicht über die Prozedur der Rückwärts-Eliminierung für die abhängige Variable "frische Biomasse der Schaftholz" für die Stichprobenfläche

Schritt	eliminierte Variablen	Anzahl verbleibender Variablen	R ² (Partiell)	Modell R ²	C(p)	F	Prob>F
1	H2*KSG2	16	0,0001	0,9130	16,0258	0,0258	0,8737
2	KSG2*STZ	15	0,0000	0,9130	14,0389	0,0136	0,9080
3	STZ2	14	0,0000	0,9130	12,0438	0,0053	0,9425
4	KSG2*H	13	0,0009	0,9120	10,3158	0,3041	0,5857
5	KSG*STZ	12	0,0054	0,9067	9,8564	1,7648	0,1944
6	HOH2	11	0,0054	0,9012	9,4194	1,7460	0,1964
7	KSG2	10	0,0027	0,8985	8,1993	0,8506	0,3635
8	STZ2*H	9	0,0162	0,8824	10,8522	5,0992	0,0309
9	KSG*STZ2	8	0,0286	0,8538	17,0842	8,0248	0,0078
10	KSG2*STZ2	7	0,0072	0,8466	17,1513	1,6700	0,2050
11	H2*STZ	6	0,0134	0,8331	19,0219	3,0683	0,0886
12	STZ	5	0,0002	0,8329	17,0849	0,0473	0,8291
13	KSG*H	4	0,0099	0,8230	17,9412	2,1978	0,1467
14	STZ*H	3	0,0354	0,7875	26,1422	7,6096	0,0089

Das schließlich ausgewählte Modell ist

$$FBM_{Sch} = 56 + 8157,9KSG + 32,6H2 \cdot KSG - 549,7H$$

6.2

Tab. 6.2 b: Die Ergebnisse der Varianzanalyse für das Modell 6.2

Fehler-ursache	Freiheitsgrade (FG)	Quadratsummen (SQ)	mittlere Quadratsummen (MQ)	F	Prob>F
Regression	3	84320666,4056	28106888,8018	48,19	0,0001
Fehler	39	22748358,4176	583291,2414		
Total	42	107069024,8230			

Tab. 6.2 c: Ergebnisse des Signifikanztests der ausgewählten besten Variable bei 0,0001 Einschlußniveau für das für das Modell 6.2

Variable	Parameter Schätzung	Standard-fehler	Quadratsummen (SQ)	F	Prob>F
INTERCEPT	56,2012	437,9014	9607,831	0,02	0,8985
KSG	8157,9492	1300,7826	22942355,0259	39,33	0,0001
H2*KSG	32,5785	6,5567	14400134,2380	24,69	0,0001
HOH	-549,6906	96,0151	19118003,9447	32,78	0,0001

Alle Variablen des Modells sind höchst signifikant bei einem Einschlußniveau von 0,0001 gesichert.

Tab. 6.3 a: Übersicht über die Prozedur der Rückwärts-Eliminierung für die abhängige Variable "frische Biomasse der **Baumholz**" für die Stichprobenfläche

Schritt	eliminierte Variablen	Anzahl verbleibender Variablen	R ² (Partiell)	Modell R ²	C(p)	F	Prob>F
1	H2*KSG2	16	0,0000	0,9083	16,0066	0,0066	0,9360
2	STZ2	15	0,0001	0,9082	14,0214	0,0155	0,9020
3	KSG2*STZ	14	0,0001	0,9081	12,0369	0,0167	0,8982
4	KSG2*H	13	0,0016	0,9066	10,4643	0,4781	0,4950
5	KSG*STZ	12	0,0057	0,9008	10,0270	1,7796	0,1926
6	H2	11	0,0063	0,8946	9,7337	1,8945	0,1789
7	KSG2	10	0,0027	0,8919	8,4637	0,7876	0,3817
8	STZ2*H	9	0,0162	0,8757	10,8697	4,7853	0,0361
9	KSG*STZ2	8	0,0288	0,8469	16,7313	7,6597	0,0092
10	H2*STZ	7	0,0088	0,8381	17,1200	1,9461	0,1721
11	STZ*H	6	0,0002	0,8379	15,1769	0,0451	0,8330
12	STZ	5	0,0011	0,8368	13,4745	0,2425	0,6254
13	KSG*H	4	0,0101	0,8267	14,2309	2,2932	0,1384
14	KG2*STZ2	3	0,0445	0,7823	24,3502	9,7507	0,0034

Das schließlich ausgewählte Modell ist

$$FBM_{\text{baum}} = 150 + 18235,5KSG + 77,75 H2*KSG - 1284,3H$$

6.3

Tab. 6.3 b: Die Ergebnisse der Varianzanalyse für das Modell 6.3

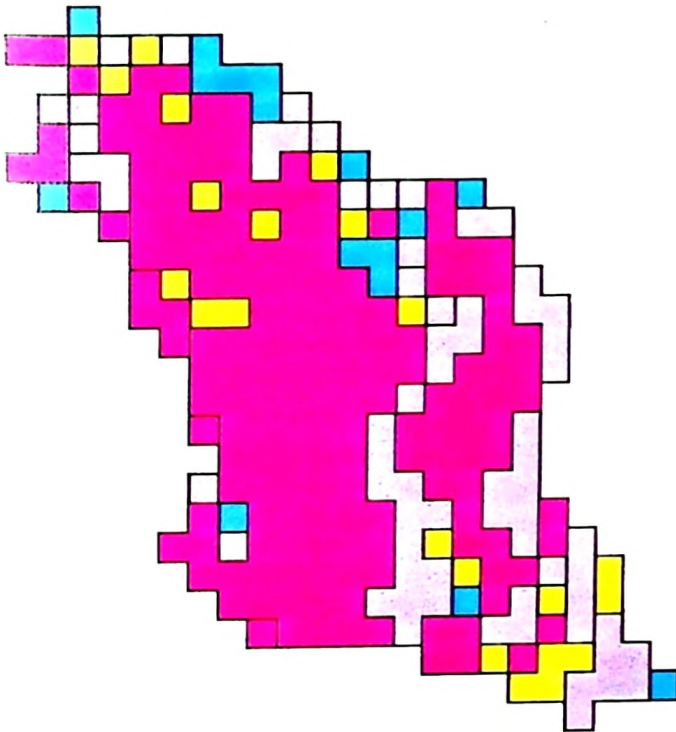
Fehler-ursache	Freiheitsgrade (FG)	Quadratsummen (SQ)	mittlere Quadratsummen (MQ)	F	Prob>F
Regression	3	433823242,4607	14461080,8202	46,70	0,0001
Error	39	120783216,4221	3097005,5492		
Total	42	54706458,8828			

Tab. 6.3 c: Ergebnisse des Signifikanztests der ausgewählten besten Variable bei 0,0001 Einschlussniveau für das Modell 6.3

Variable	Parameter Schätzung	Standard-fehler	Quadratsummen (SQ)	F	Prob>F
INTERCEPT	150,1332	1009,0312	68562,5193	0,02	0,8825
KSG	18235,5302	2997,3191	114633825,9671	37,01	0,0001
H2*KSG	77,7500	15,1084	82017957,3900	26,48	0,0001
H	-1284,2703	221,2422	104356311,7026	33,70	0,0001





Alle Variablen des Modells sind höchst signifikant und bei einem Einschlussniveau von 0,0001 gesichert,

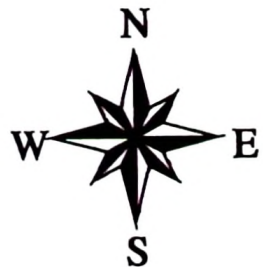
Biomasseverteilung in Abhängigkeit von der Exposition



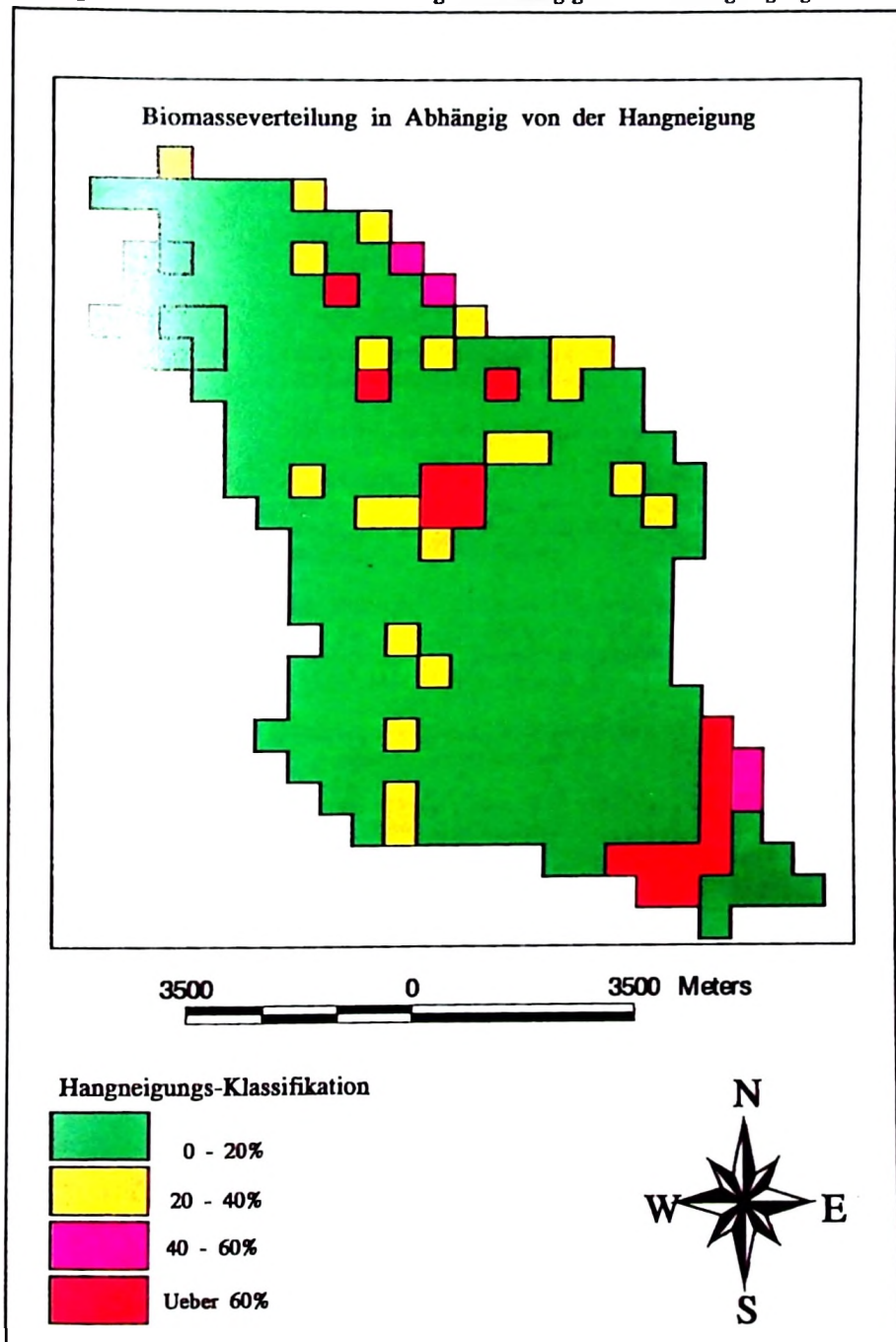
3500 0 3500 7000 Meter

Expositionsklassifikation (Grad)

	0 - 90
	90 - 180
	180 - 270
	270 - 360



Anhang: 8 Karte der Biomasseverteilung in Abhängig von der Hangneigung



LEBENS LAUF

Name:	Malende
Vorname:	Yusufu
Geburtsdatum:	24.08.1955
Geburtsort:	Ifakara / Kilombero
Eltern:	Mutter: Salima Ali Hassani, Vater: Hassani Malende
Familiestand:	Verheiratet seit 28.12. 1985 mit Salome Chamla, 2 Kinder (Ali und Jasmin)
1963 - 1969	Grundschule in Ifakara, Kilombero district
1970 - 1973	Mzumbe Secondary School Morogoro, (Ordinary level School Certificate)
1974 - 1975	Mkwawa High School Iringa (Advanced School Certificate)
1976 - 1977	Militärdienst
Juli 1977 - Juni 1979	Studium: Institut für Forstwirtschaft Olmotonyi - Tansania (National Diploma in Forestry)
Juli 1979 - 1982	Beschäftigt am „Teak Project in Longuza Tanga-Tansania“
Juni 1982 -Juli 1984	Studium: Sokoine University of Agriculture - Morogoro Tansania (Bachelor of Science in Forestry)
Juli 1984 - Juni 1987	Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Sokoine University of Agriculture - Morogoro Tansania
Juni 1985 - Juli 1987	Studium: Sokoine University of Agriculture - Morogoro Tansania (Master of Science in Forestry)
Seit Juli 1987	Beschäftigt als Universitätsdozent am „Department of Forest Mensuration and Management“ der Sokoine University of Agriculture - Morogoro Tansania
1988 - 1989	Stipendiat Niederlande, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC) Enschede - Niederlande (Postgraduate Diploma in Forest Surveys)
1992 -	Stipendiat DAAD, Beginn der Doktorarbeit im Institut für Forsteinrichtung und Ertragskunde der Georg-August-Universität Göttingen

SPE
QK 938
F6
M3