Hypsometrischer Klima- und Bodenwandel in Bergregenwaldökosystemen Boliviens

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultäten
der Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von

Marcus Schawe
aus Osnabrück

Göttingen 2005

D7

Referent: Prof. Dr. G. Gerold

Korreferent: PD Dr. S. Glatzel

Tag der mündlichen Prüfung:

„Die Physik der Erde hat ihre numerischen Elemente wie das Weltsystem, und man wird erst allmählich durch die vereinigten Arbeiten reisender Botaniker zur Kenntniß der wahren Gesetze gelangen, welche die geographische und klimatische Vertheilung der Pflanzenformen bestimmen.“

ALEXANDER VON HUMBOLDT „Ansichten der Natur“ Berlin, 1849

Inhaltsverzeichnis

1. Allgemeine Einleitung	1
2. Untersuchungsgebiet	3
2.1 Nationalpark Cotapata	3
2.2 Klimatische Rahmenbedingungen	5
2.3 Geologie und Reliefverhältnisse	7
2.4 Vegetationshöhenstufung	8
2.5 Allgemeine Methodik der Untersuchung	9
3. Verbreitung und Genese der Böden	13
3.1 Einleitung	13
3.2 Methodik	14
3.2.1 Bodentransekte und Feldbodenaufnahme	14
3.2.2 Messung der volumetrischen Bodenfeuchte	14
3.2.3 Labormethodik	15
3.3 Ergebnisse und Diskussion	17
3.3.1 Geländebeobachtung	17
3.3.2 Bodendifferenzierung und Leitboden-Profiltypen (Feldansprache)	19
3.3.3 Bodenchemische Parameter	21
3.3.4 Bodentextur und Porenraum	27
3.3.5 Bodenfeuchte	31
3.3.6 Dynamik der Sesquioxide, Podsolierung, Hydromorphierung	33
3.4 Schlussfolgerungen	38
4. Hydrometeorologische Untersuchung	39
4.1 Einleitung	39
4.2 Methodik	40
4.3 Ergebnisse	41
4.3.1 Strahlungsverhältnisse	41
4.3.2 Temperatur und Luftfeuchtigkeit	44
4.3.3 Bestandsklima	49
4.3.4 Niederschlag	52
4.3.5 Windgeschwindigkeit und Windrichtung	55
4.4.6 Potentielle Evapotranspiration	55
4.4 Diskussion	56
4.4.1 Strahlung	56
4.4.2 Windgeschwindigkeit und Windrichtung	60
4.4.3 Evapotranspiration	61

4.4.4 Niederschlag und Bodenfeuchte	61
4.5. Schlussfolgerungen	63
5. Streufall und Nährstoffumsatz in der organischen Auflage	64
5.1 Einleitung	64
5.2 Methodik	65
5.3 Ergebnisse	67
5.3.1 Organische Auflage	67
5.3.2 Streumenge und Streurate	69
5.3.3 Streu- Auflage (Oi - Horizont) und deren jährliche Zersetzung	71
5.3.4 Nährstoffkonzentrationen	73
5.3.5 Nährstoffumsatz	79
5.4 Diskussion	80
5.4.1 Organische Auflage	80
5.4.2 Streufall	81
5.4.3 Streu – Auflage (Oi-Horizont) und deren jährliche Zersetzung	83
5.4.4 Nährstoffkonzentrationen	84
5.4.5 Nährstoffumsatz	87
5.5 Schlussfolgerung	90
6. Der Zusammenhang zwischen der Vegetationsverbreitung und den abiotischen Faktoren im Höhenwandel	94
6.1 Einleitung	94
6.2 Methodik	95
6.3 Ergebnisse	96
6.4 Diskussion	101
6.5 Schlussfolgerung und Ausblick	104
7. Zusammenfassung	105
8. Danksagung	108
9. Literaturverzeichnis	110
10. Anhang	127

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Lage des Untersuchungsgebietes	4
Abb. 2 Höhenstufung der Anden-Ostabdachung in den Yungas	5
Abb. 3 Bestandesstruktur des Waldes im Untersuchungsgebiet	9
Abb. 4 Klimastation 2 in 2600m Höhe im UMCF.	10
Abb. 5 Lage des Untersuchungsgebietes am südöstlichen Hang des Cerro Hornuni.	12
Abb. 6 Differenzierung der Bodenprofile und Klassifizierung der Böden	18
Abb. 7 pH (CaCl ₂)- Werte des A-Horizontes und O-Horizontes	21
Abb. 8 C/N-Verhältnis des A-Horizontes und der organischen Auflage	24
Abb. 9 Verteilung der Kohlenstoffmengen innerhalb des Bodenprofils.	25
Abb. 10 Anteil des Kohlenstoffs der organischen Auflage.....	26
Abb. 11 Verteilung des Porenvolumens	30
Abb. 12 Gravimetrischer Wassergehalt der organische Auflage	31
Abb. 13 Verlauf der volumetrischen Bodenfeuchte im LMF	32
Abb. 14 Gesamteisengehalte des A-Horizontes und C-Horizontes	35
Abb. 15 Konzentration des dithionitlöslichen Fe-Oxids (Fe _d).....	36
Abb. 16 Durchschnittliche tägliche Reduzierung der kurzwelligen Strahlung.....	42
Abb. 17 Der durchschnittliche Jahresverlauf	45
Abb. 18 Der durchschnittliche Tagesverlauf während eines bewölkten Tages:	46
Abb. 19 Der durchschnittliche Tagesverlauf	47
Abb. 20 Der durchschnittliche Tagesverlauf während eines Strahlungstages:	48
Abb. 21 Tagesgang der durchschnittlichen Temperaturen im Vertikalprofil des Bestandes	51
Abb. 22 Durchschnittliche minimale tägliche relative Luftfeuchtigkeit im Höhenverlauf	52
Abb. 23 Monatlicher Gesamtniederschlag in den drei Vegetationseinheiten	53
Abb. 24 Durchschnittliche tägliche Verteilung der relativen Regenmengen	53
Abb. 25 Häufigkeitsverteilung der Windrichtung.....	54
Abb. 26 Durchschnittlicher Tagesgang der Windgeschwindigkeit	54
Abb. 27 Wandel des Nebelniederschlags	56
Abb. 28 Vergleich eines wolkenfreien Strahlungstages mit zwei Tagen mit aufgelockerter Bewölkung im LMF	58
Abb. 29 Vergleich der Niederschlagsverteilung mit der Höhe zwischen dem Untersuchungsgebiet und der Andenostabdachung in Südecuador	62
Abb. 30 Mächtigkeit der organischen Boden-Auflage	67
Abb. 31 Monatlicher Streufall untergliedert in die Anteile an Laub, Holz, Früchten, Epiphyten und Rest.	72
Abb. 32 Monatliche Schwankungen der Elementkonzentrationen in den Laubstreu- Anteil	76

Abb. 33 Monatliche Schwankungen der Elementkonzentrationen in dem Reststreu – Anteil	77
Abb. 34 Monatliche Schwankungen der Elementkonzentrationen Ca, Mg und K in dem Laubstreu- Anteil und in dem Reststreu- Anteil	78
Abb. 35 Anteil der skleromorphen Arten bei Melastomatacae	89
Abb. 36 Das C/N - und C/S- Verhältnis der organischen Auflage	99
Abb. 37 Gravimetrischer Wassergehalt der organischen Auflage	99
Abb. 38 Der hypsometrische Wandel aller Vegetationsarten	100
Abb. 39 Hypsometrischer Wandel der relativen Luftfeuchtigkeit und der Lufttemperatur im Bestand	100

Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Chemische Bodendaten der Leitprofile	22
Tab. 2 Physikalische Bodendaten der Leitprofile im Höhenwandel.	28
Tab. 3 Durchschnittliche Konzentration der Sesquioxide	34
Tab. 4 Strahlung und Temperatur in den drei Vegetationseinheiten.	43
Tab. 5 Durchschnittliche Konzentration der Elemente im A-Horizont	68
Tab. 6 Durchschnittliche Konzentration der Elemente in der organischen Auflage	68
Tab. 7 Jahresraten der Gesamt-Streumenge (in $t\ ha^{-1}\ a^{-1}$) und ihrer Anteile an Laub, Holz und Rest und die Masse des Oi- Horizontes (in $t\ ha^{-1}$) im internationalen Vergleich	70
Tab. 8 Durchschnittliche Konzentrationen in der aufgefangenen Streu, gegliedert nach Laub, Holz und Rest	74
Tab. 9 Reihenfolge der Zersetzungsrate	80
Tab. 10 Vergleich der durchschnittlichen Konzentration an Elementen (in $mg\ g^{-1}$) in der Laubstreu von verschiedenen feuchten tropischen Bergwäldern.	85
Tab. 11 Vergleich des Elementeintrags mit dem Gesamt- Streufall (in $kg\ ha^{-1}\ a^{-1}$, Laub, Holz, Epiphyten, Früchte und Rest) in verschiedenen feuchten tropischen Bergwäldern.	87
Tab. 12 Elementkonzentration des Oi-Horizontes	92
Tab. 13 Elementvorrat des Oi-Horizontes	92
Tab. 14 Quotient der Nährstoffmengen der jährlichen Streueinträge und der Streuauflage Oi (Feinstreu K_i , Holz K_h , Gesamt K_{oi})	93
Tab. 15 Elementvorrat der organischen Auflage in $kg\ ha^{-1}$	93
Tab. 16 Vergleich zwischen der Vegetationsverbreitung aller untersuchten Arten und den abiotischen Faktoren Bestandsklima, volumetrische Bodenfeuchte, der organischen Auflage und des A- Horizontes	98
Tab. 17 Leitbodenprofil 1850m Dystrudept	128
Tab. 18 Leitbodenprofil 2270m spodic Dystrudept	129
Tab. 19 Leitbodenprofil 2600m histic Humaquept	130
Tab. 20 Leitbodenprofil 3000m typic Placaquod	131
Tab. 21 Leitfähigkeit, pH ($CaCl_2$, KCl, H_2O), Lagerungsdichte (LD) und Korngrößenverteilung der Profile 1-10.	132
Tab. 22 Leitfähigkeit, pH ($CaCl_2$, KCl, H_2O), Lagerungsdichte (LD) und Korngrößenverteilung der Profile 11-19.	133
Tab. 23 Leitfähigkeit, pH ($CaCl_2$, KCl, H_2O), Lagerungsdichte (LD) und Korngrößenverteilung der Profile 20-29.	134
Tab. 24 Effektive Kationenaustauschfähigkeit (ECEC) der Profile 1-10.	135
Tab. 25 Effektive Kationenaustauschfähigkeit (ECEC) der Profile 11-19.	136

Tab. 26 Effektive Kationenaustauschfähigkeit (ECEC) der Profile 20-29.	137
Tab. 27 Gesamtgehalte der Profile 1-10.	138
Tab. 28 Gesamtgehalte der Profile 11-19.	139
Tab. 29 Gesamtgehalte der Profile 20-29.	140
Tab. 30 Sesquioxide, Kohlenstoff und Stickstoffgesamtgehalte der Profile 1-10.	141
Tab. 31 Sesquioxide, Kohlenstoff und Stickstoffgesamtgehalte der Profile 11-19.	142
Tab. 32 Sesquioxide, Kohlenstoff und Stickstoffgesamtgehalte der Profile 20-29.	143
Tab. 33 Geräteausstattung der Klimastationen 1850, 2600, 3050m ü.M.	144

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung	Einheit
Al _d	Dithionitlösliches Aluminium	mg kg ⁻¹
Al _o	Oxalatlösliches Aluminium	mg kg ⁻¹
AS	Aluminiumsättigung	
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit	
BS	Basensättigung	%
C/N	Kohlenstoff- / Stickstoffverhältnis	
C/S	Kohlenstoff -/ Schwefelverhältnis	
d _B	Lagerungsdichte	g cm ⁻³
DEM	Digitale Höhenmodell	
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft	
EBT	Forschungsstation Tunquini	
ECEC	Effektive Kationenaustauschfähigkeit	cmol _c kg ⁻¹
FAO	Food and Agriculture Organisation	
FDR	Frequently domain Reflectometry	Ohm
Fe _d	Dithionitlösliches Eisen	mg kg ⁻¹
Fe _o	Oxalatlösliches Eisen	mg kg ⁻¹
Fe _t	Eisengesamtgehalt	g kg ⁻¹
fS	Feinsand	Vol %
fU	Feinschluff	Vol %
Ge K	Gesamtgehalt Kalium	g kg ⁻¹
Ge Mn	Gesamtgehalt Mangan	g kg ⁻¹
Ge P	Gesamtgehalt Phosphor	g kg ⁻¹
Ge S	Gesamtgehalt Schwefel	g kg ⁻¹
GPS	Global Positioning System	
gS	Grobsand	Vol %
GTZ	Gesellschaft für technische Zusammenarbeit	
gU	Grobschluff	Vol %
In prep.	In Vorbereitung	
ITC	Innertropische Konvergenzzone	
k _i	Verhältnis zwischen dem jährlichen Laubeintrag und der Menge an Laub auf der Oberfläche des Bodens	
k _h	Verhältnis zwischen dem jährlichen Holzeintrag und der Menge an Holz auf der Oberfläche des Bodens	

k_{oi}	Quotient von Jahres-Streueintrag durch Gesamtmenge Oi-Horizont	g kg^{-1}
LAI	Blattflächenindex	$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$
LD	Lagerungsdichte	g cm^{-3}
LF	Leitfähigkeit	$\mu\text{S cm}^{-3}$
LMF	Unterer Bergregenwald	
m ü.M.	Meter über Meeresspiegel	m
MS	Mittelsand	Vol %
mU	Mittelschluff	Vol %
nFkWe	Nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes	mm
P	Niederschlag	mm
PAR	Photosynthetisch aktive Strahlung	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
PCA	Hauptkomponentenanalyse	
pET	Potentielle Evapotranspiration	mm d^{-1}
PPFD	Photosynthetische-Photonen-Flussdichte	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
RFD	Strahlungsflussdichte	W m^{-2}
RH	Relative Luftfeuchtigkeit	%
Rn	Strahlungsbilanz	Wm^{-2}
Rs	Kurzwellige Globalstrahlung	Wm^{-2}
R_s	Tägliche kurzwellige Strahlungsmenge	MJ m^{-2}
s.Br.	südliche Breite	°
SCF	Subalpiner Bergnebelwald	
SD	Standardabweichung	
T	Temperatur	°C, K
UMCF	Oberer Bergnebelwald	
UMSA	Universidad de Mayor de San Andres (La Paz)	
USDA	United States Department of America	

1. Allgemeine Einleitung

Tropische Bergregenwälder gehören zu den weltweiten Hotspots der Biodiversität (MYERS ET AL. 2000, CHURCHILL ET AL. 1995, BARTHLOTT ET AL. 1996). GENTRY (1992) betrachtet die Anden als ein Gebiet mit einer außergewöhnlich hohen Vegetationsdiversität aufgrund der hohen Anzahl an endemischen Arten. Von geschätzten 10.000 Arten, die in den Bergregenwäldern der Yungas vorkommen, sind ungefähr 7000 bekannt, was der Hälfte aller Pflanzenarten Boliviens entspricht (KESSLER & BECK 2001).

Gleichzeitig ist die weltweite Ausbreitung von Bergregenwäldern mit 380.000 km² (0.28% der weltweiten Landoberfläche) gering (BUBB ET AL. 2004).

Bergwälder sind sehr wichtige Wassereinzugsgebiete, sie bedingen hohe Wasserqualität und konstante Wasserflüsse (REASONER ET AL. 2002). Tropische Bergnebelwälder haben einen zusätzlichen Wasserinput, da die Vegetation das Wasser aus dem Niederschlag bzw. dem Nebel auskämmt, aufgrund der Epiphyten, wie Moose, Farne und Bromelien, die sich im Stamm und Astbereich der Bäume befinden. Dieses Auskämmen ist insbesondere während der Trockenphasen oder in Gegenden mit geringem Niederschlag und hohem Nebelbeitrag entscheidend, da durch das Auskämmen des Nebels zusätzliches Wasser akkumuliert wird. Die Vegetation schützt vor Bodenerosion und gewährleistet einen gleichmäßigen Wasserfluss (ALDRICH ET AL. 2000).

Tropische Bergregenwälder sind besonders anfällig für den klimatischen Wandel (MARKHAM 1998). Der Temperaturanstieg bewirkt eine Verschiebung der Vegetationszonen und eine verringerte Bewölkung in den unteren Bereichen des Nebelwaldes, was zu trockeneren Bedingungen in den Ökosystemen führt (POUNDS & CAMPBELL 1999, FOSTER 2001).

Weiterhin ist die montane Stufe einem enormen Bevölkerungs- und Landnutzungsdruck ausgesetzt. Bergregenwälder werden zu Agrar- oder Weideflächen umgewandelt, Bäume werden als Wert- oder Brennholz verwendet und Minen werden zum Abbau der Erze angelegt (BUBB ET AL. 2004). Es kommt zu einer Habitatfragmentierung und Störung der Ökosysteme. Bis 1990 wurden in den montanen Wäldern der Anden 90% der ursprünglichen Waldbedeckung zerstört (HENDERSON ET AL. 1991). Die jährliche Abholzungsrates der tropischen Bergregenwälder beträgt 1.1 % gegenüber 0.8 % für alle tropischen Wälder (DOUMENGE ET AL. 1995).

Um die Bedeutung dieser Ökosysteme zu betonen bzw. deren Erhalt und die nachhaltige Nutzung zu fördern, ist im Rahmen der Rio- Konferenz der UNCED 1992 in der Agenda 21 Kap. 13 die Thematik „Managing fragile ecosystems- Mountains sustainable development“ mit aufgenommen worden. Weiterhin ist das Jahr 2002 von der UN Food and Agriculture Organisation (FAO) zum „International Year of Mountains“ ausgeschrieben worden.

Für die Erhaltung dieser Bergregenwälder ist ein Verständnis der ökologischen Zusammenhänge von entscheidender Bedeutung. Es besteht nach wie vor noch großer Forschungsbedarf über diese sensiblen Ökosysteme (BRUIJNZEEL 2001, BRUIJNZEEL & HAMILTON 2000, WHITMORE 1998).

Zielsetzung dieser Dissertation ist die Untersuchung des hypsometrischen Wandels, d.h. die „Höhengliederung landschaftlicher Erscheinungen“ (LESER 1998) von Klima und Boden und die Abhängigkeit der Vegetationsverbreitung von diesen abiotischen Faktoren. Es werden folgende Fragen im Detail erläutert:

1. Wie verläuft die Bodengenese mit zunehmender Höhe?
2. Wie wandelt sich das Klima mit zunehmender Höhe?
3. Wie verändert sich die Nährstoffdynamik über den Streufall in den drei Vegetationseinheiten?
4. Steht die Vegetationsverbreitung in einem Zusammenhang mit der Strahlungsintensität?
5. Ist die Vegetationsverbreitung begründet durch unterschiedliche Nährstoffverfügbarkeit im Höhenwandel?

Diese Dissertation wurde im Rahmen des interdisziplinären Projektes „Hypsometrischer Wandel naturnaher Bergnebelwaldökosysteme“ erstellt, finanziert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) und durch das Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit (BMZ). Kooperierende Projektpartner sind zwei Institute der Universität Göttingen, das Geographische Institut, Abteilung Landschaftsökologie, Prof. Dr. G. Gerold, und das Albrecht - von - Haller - Institut, Abteilung Systematische Botanik, Prof. Dr. R. Gradstein. Ebenfalls ist die Universität Major de San Andres (UMSA), La Paz, Bolivien, mit dem Ökologischen Institut, Dr. M. Baudoin beteiligt.

Der Aufbau der Dissertation ist in zehn Kapitel gegliedert. Nach der Einleitung folgt die allgemeine Beschreibung des Untersuchungsgebietes. In den nachfolgenden vier Hauptkapiteln werden die Themen Boden (Kapitel 3), Klima (4) , Streufall (5) und der Zusammenhang zwischen Vegetation und abiotischen Faktoren mit einem Forschungsausblick (6) behandelt. In diesen Kapiteln ist der Forschungsstand des jeweiligen Themas in der Einleitung behandelt worden. Die Hauptkapitel sind so aufgebaut, dass sie einzeln als Publikationen veröffentlicht werden können. Daher sind geringfügige inhaltliche Wiederholungen nicht zu vermeiden. In dem Kapitel 7 erfolgt die Zusammenfassung.

2. Untersuchungsgebiet

2.1 *Nationalpark Cotapata*

Das Untersuchungsgebiet liegt in der Provinz Nord Yungas an der Andenostabdachung Boliviens, 80 km nordöstlich von La Paz (siehe Abb. 1). Es befindet sich im Zentrum des Nationalparks Cotapata. Dieser Nationalpark ist 1993 als Ausgleichsmaßnahme für den Bau einer Hauptverkehrsstraße gegründet worden. Auf der Fläche von 586 km² ist ein Höhengradient von 1100m bis 5600 m ü.M. vorhanden (RIBERA 1995) und stellt damit eine Übergangszone vom Amazonastiefland und der randandinen Sierrenzone zum Altiplano dar. Die Heterogenität des Reliefs bedingt eine hohe floristische und faunistische Diversität mit zahlreichen endemischen Arten (BECK 1998).

Die Bevölkerungsdichte ist aufgrund der schweren Zugänglichkeit des Gebietes und der hohen Hangneigungen sehr gering, sie lag 1992 bei 2.75 Einwohner km⁻² (CUELLAR ET AL. 1995). Die landwirtschaftliche Nutzung erfolgt in kleinbäuerlichen Betriebsformen zur Subsistenzwirtschaft bzw. Belieferung lokaler und regionaler Märkte. Dominierende Anbauprodukte sind Zitrusfrüchte, Kaffee, Mais, Bananen, Locoto (CUELLAR ET AL. 1995) (siehe Abb. 2). Als Anbauflächen werden vorrangig strahlungsexponierte Nordhänge genutzt. Viehwirtschaft spielt nur eine untergeordnete Rolle. Es werden in der Trockenzeit jedoch regelmäßig Brände gelegt, um Bergweiden offen zu halten. Ungefähr 50% der ursprünglichen Waldfläche ist davon betroffen (RIBERA 1995). Die sehr feuchten Südhänge spielen als Anbaufläche nur eine untergeordnete Rolle und stellen damit die am besten erhaltenen montanen Ökosysteme im Nationalpark dar.

Abb. 1 Lage des Untersuchungsgebietes (schraffiert „investigation area“) und der Forschungsstation „Tunquini“ (EBT) auf Grundlage der topographischen Karte „A new map of the Cordillera Real de los Andes“ im Maßstab von 1:135.000

Höhe [m ü.M.]	Klima (Jahresmittel T, N)		Vegetation	Landnutzung
	thermisch	hygrisch		
ab 4000m	tierra helada Frost- wechseltage > 100 d 10/12°	500-900mm	Feuchtpuna Präpuna/ Polylepis	Extensive Weidewirtschaft Bitterkartoffel, Oca, Quinoa, Gerste
2500m – 4000m	tierra fria 16/18°	Wolken- und Nebelbildung 1500-5000mm	Subalpiner Bergregenwald	Getreide- und Obstanbau
1000m – 2400m	tierra templada 22/24°	1800-2300mm 2000-2700mm	Hochmontaner und Montaner Bergregenwald	Kaffee, Coca, Orangen, Mais, Maniok, Bohnen, Mango, Papaya, Zuckerrohr
1000m	tierra caliente 1500-	2000mm	Tieflandsregen- wald und Beni- Feuchtsavanne	Reis, Mais, Maniok, Bohnen; Bananen, Zitrusfrüchte, Zuckerrohr, Pfeffer

Abb. 2 Höhenstufung der Anden-Ostabdachung in den Yungas (TROLL 1959, LAUER & ERLNBACH 1987, GEROLD 1987) (zitiert aus GEROLD ET AL. 2003)

2.2 Klimatische Rahmenbedingungen

Die Yungas, die sich östlich der Andenkordillere erstrecken, befinden sich mit 16° 10' s.Br. im Bereich der äußeren Tropen. Es herrscht bei einer täglichen Temperaturamplitude von durchschnittlich 8°C gegenüber der jährlichen Amplitude von 4°C ein Tageszeitenklima vor. Es ist eine bimodale Niederschlagsverteilung gegeben: eine relative Trockenzeit von Mai bis September und eine Regenzeit von November bis Februar mit maximalen Niederschlägen im Januar und Februar und minimalen Niederschlägen im Mai und Juli (ROCHE ET AL. 1992). Niederschlagsaufzeichnungen in den Yungas Boliviens des „Servicio Nacional de Caminos“ von 1995 bis 2001 in Chuspipata (3000m ü.M.) haben eine durchschnittliche Jahressumme von 3928mm mit Minimalwerten von 2600mm im Jahr 1999 bis Maximalwerten von 4885mm im Jahr 2000 ergeben.

Das Mesoklima ist hauptsächlich beeinflusst durch die unterschiedliche Druckverteilung über der innerandinen Hochebene, dem Altiplano, und dem östlich anschließenden Amazonastiefland.

Im Südwinter steht das Gebiet im Einfluss der Passatinversion. Die SO- Passate bilden eine stabile Schichtung, die durch Abwärtsbewegung trockene Luftmassen mit sich führen. Als Folge kommt es zu einer ausgeprägten Trockenheit über dem Tiefland Boliviens.

Diese sehr stabilen Passatwinde werden jedoch aufgrund des Druckunterschiedes zwischen dem Hitzetief über dem Altiplano und dem Hochdruckgebiet über den Yungas unterbrochen.

Die Ausgleichswinde können die Passatinversion durchbrechen und führen zu orographischen Niederschlägen an den Andenosthängen, so dass sich keine stabile Passatinversion ausbilden kann.

Die Innertropische Konvergenzzone (ITC) verlagert sich im Südsommer (Dezember bis Februar) extrem südlich aufgrund des Chaco – Hitzetiefs (GEROLD 1987). So können Nordostpassate den Äquator überschreiten und über dem brasilianischen Tiefland Feuchtigkeit aufnehmen. Die sommerliche Konvektion führt zu wesentlich höheren Niederschlägen als die winterliche. Die Ausgleichswinde, die durch die Sogwirkung entstehen, führen auch im Sommer zu höheren Niederschlägen an der Ostabdachung der Anden als im vorgelagerten Tiefland.

Die Niederschlagsgenese ist dominiert durch den advektiven Luftmassentransport aus dem Amazonastiefland. Täler, die in Ost - West - Richtung exponiert sind, erhalten Niederschläge von 2000mm bis über 4000mm aus dem Amazonasbecken. Diese longitudinale Ausrichtung der Talprofile führt zu orographisch bedingten Niederschlägen der feuchten Luftmassen, insbesondere nordöstlich von La Paz (ROCHE ET AL. 1992).

KESSLER (1999) vermutet mehr als 8000mm a^{-1} an den NO - orientierten Hängen. IBISCH (1996) sieht Niederschlagsmaxima in der Region Chapare Carrasco und den nordöstlich exponierten Wäldern mit Niederschlägen von mehr als 5000mm a^{-1} . Die Niederschlagsverteilung in der Andenostabdachung ist sehr heterogen, entsprechend der Ausrichtung der Hänge zur Hauptwindrichtung. Hänge in Leelage, die durch Bergzüge abgeschirmt werden und dadurch im Regenschatten liegen, haben Niederschlagsmengen von weniger als 400mm a^{-1} (IBISCH 1996).

2.3 Geologie und Reliefverhältnisse

Das Untersuchungsgebiet befindet sich an der östlichen Grenze der Cordillera Real. Es besteht aus klastischen, marinen Sedimenten aus dem Ordovizium (Paläozoikum), örtlich aus Grauwacken und granitähnlichen, plutonischen Intrusionen der oberen Trias bis unteren Jura (GEOBOL 1993).

In der sogenannten „Coroico Formation“ dominieren metamorphe Schluffsteine (massiv oder in Bändern) und Sandsteine, vereinzelt auch Schiefergesteine. In der Formation „Amutara“ ist zusätzlich noch metamorpher Quarzit vorhanden. Es resultieren sehr schluffreiche, bzw. sandige, saure und nährstoffarme Böden. Das Ausgangsgestein der Bodenbildung kann mit der dominanten Gesteinsformation „Coroico“ als homogen im engeren Untersuchungsgebiet angesehen werden.

Abgebaute Bodenschätze in diesem Gebiet sind Wolfram, Cassiterit (Zinnerz) und Gold.

Der Hang des Untersuchungsgebietes ist durchgehend südöstlich exponiert. Das longitudinale Hangprofil ist vorwiegend linear mit durchschnittlichen Hangneigungen von 25° bis 30°, teilweise mit extremen Neigungen über 40° (siehe Abb. 5). Der Hang ist gegliedert in drei vertikale Kämme, die sich von 2300m Höhe bis zum Hangfuß (1200 m) erstrecken. Die Kämme haben eine horizontale Breite von 100m bis 150m. Die Quertäler sind V - förmig eingeschnitten. Die Länge des untersuchten Vertikaltransektes beträgt 3950m. Der gesamte Hang hat eine Länge von 5010m und eine horizontale Breite von 1650m.

Die Reliefverhältnisse des Gebietes sind durch die hohen Hangneigungen von 20° bis 40° von hoher Reliefenergie geprägt. Natürlich vorkommende Rutschungen prägen die Dynamik des Ökosystems. Nach lang anhaltenden Regenfällen werden sie auf den Talflanken der Quertäler ausgelöst. Die Kämme bleiben in der Regel ungestört.

2.4 Vegetationshöhenstufung

Nach der Studie von SOLOMON (1999) (zitiert in MORAES & BECK 1992) kommen 1414 Pflanzenarten in den Yungas in den Höhen zwischen 1000m bis 5000m vor.

Auf Grundlage von Luftbildinterpretationen sind drei Waldstufen im Nationalpark Cotapata gebildet worden (RIBERA 1995). Die Nebelwaldstufe, die „Ceja de Monte“, verläuft zwischen 2400m bis 3400m. Die Ceja de Monte entspricht ungefähr der Tierra fria (2500m bis 4000m) in der tropischen Höhengliederung nach TROLL (1959) (siehe Abb. 2). Dominierende Arten sind *Weinmania boliviiana*, *Weinmania crassifolia*, *Podocarpus rusbyi*, *Podocarpus ingensis*, *Oreopanax pentlandianus*, *Bocconia frutescens*, *Clethra revoluta*, *Solanum acuminatum*, *Thibaudia crenaluta* und *Gaiadendrum punctatum* (RIBERA 1995).

Die montane humide Bergwaldstufe (Bosque húmedo montañoso de Yungas) verläuft nach RIBERA (1995) von 1200m bis 2400m, vergleichbar mit der Tierra templada, die zwischen 1000 bis 2400m definiert ist (TROLL 1959) (siehe Abb. 2). Zu den wichtigsten Arten gehören *Podocarpus oleifolius*, *Byrsonima indorum*, *Inga velutina*, *Palicourea bryolophila*, *Clethra revoluta*, *Myroxylon balsamum* und *Ceiba salmonea*.

BACH (2004) hat aufgrund von Transektaufnahmen folgenden hypsometrischen Wandel der Vegetation im Cotapata - Nationalpark festgestellt: Die höchste Diversität bei allen untersuchten Pflanzengruppen ist unterhalb von 2100m erreicht. Die Zahl der Arten nahm mit zunehmender Höhe ab. Die Waldgrenze im Untersuchungsgebiet befindet sich bei ca. 3100m (siehe 6.3).

In dem Höhentransekt von 1700m bis 3400m sind drei Vegetationseinheiten differenziert worden: Die montane Waldstufe (LMF), die hochmontane Waldstufe (UMCF) und die subalpine Waldstufe (SCF). Diese Vegetationszonierung ist nicht durch klare Grenzen, sondern durch Übergangszonen gegliedert. Die Benennung der Vegetationsformen ist angelehnt an die Definitionen von GRUBB ET AL. (1963) und GRUBB & WHITMORE (1966), die auch von BRUIJNZEEL & HAMILTON (2000) verwendet wurde: dem unteren montanen Berg - (Nebel)- Wald (Lower montane (cloud) forest, LMF), dem oberen montanen Bergnebelwald (Upper montane cloud forest UMCF) und dem subalpinen (Nebel-) Wald (Subalpine Cloud Forest SCF).

Die montane Stufe (LMF), die sich bis ungefähr 2150m erstreckt, hat eine dreischichtige Bestandesstruktur (siehe Abb. 3) mit einem dichten Kronendach von 20m und Überstehern von 35m mit Arten wie *Hedyosmum*, *Inga* und *Ficus*.

Der Kronenraum in der hochmontanen Waldstufe ist mit 15m deutlich niedriger als im montanen Wald, Übersteher erreichen die Wuchshöhe von 25m (siehe Abb. 3). Dominante Baumarten sind *Podocarpus oleifolius*, *Weinmania crassiflora* und *Clusia multiflora*. In der hochmontanen Waldstufe ist der Epiphytenbewuchs am ausgeprägtesten. Vorherrschende

Arten sind die Sträucher *Miconia aff. Hirta* und *Miconia plumifera* und die epiphytischen Farne *Elaphoglossum lingua*, *Micropolypodium blepharideum* und *Zygophlebia mathwesii*. Oberhalb von ungefähr 2900m beginnt der subalpine Wald mit einem lichten Kronendach von durchschnittlich ca. 10m Höhe und dominanten Arten wie *Myrsine coriacea* und *Podocarpus rusbyi*. Der Anteil an skleromorphen Arten nimmt stark zu, wie z. B. *Miconia sp. KB 1059*, *Gaultheria pernettyoides*, *Gynoxys ssp.*, *Ilex ssp.* und *Escalonia myrtilloides*. Der Anteil an skleromorphen Melastomataceen ist siebenfach so hoch wie in 2300m. In den Moosauflagen dominieren Arten der Gattung *Sphagnum*.

Abb. 3 Bestandesstruktur des Waldes im Untersuchungsgebiet in Höhenintervallen von 200m nach BACH (2004)

2.5 Allgemeine Methodik der Untersuchung

Die Untersuchung wurde an dem südostexponierten Hang des Cerro Hornuni (3647m ü.M.) im Nationalpark Cotapata durchgeführt. Es ist ein gestreckter Hang in einheitlicher Exposition (siehe 2.3) und mit vergleichbarem geologischen Ausgangsgestein. Der ungestörte montane Wald beinhaltet die Vegetationseinheiten Lower Montane Forest (LMF), Upper Montane Forest (UMCF) und Subalpine Cloud Forest (SCF). Die Studie erfolgte von zwei Basislagern aus: Basislager 1 in 1800m ü.M. und Basislager 2 in 2600m ü.M. Diese

waren von der Forschungsstation Tunquini (Ökologisches Institut La Paz) in zwei bzw. drei Stunden zu Fuß zu erreichen.

Im Untersuchungsgebiet waren damit gute Voraussetzungen für die Analyse des klimatischen, pedologischen und botanischen Wandels von montanen Wäldern gegeben.

Die meteorologischen Klimastationen sind jeweils auf Freiflächen (ca. 500 m²) in den Kernzonen der Vegetationseinheiten unter Berücksichtigung der Nationalparkauflagen und Reliefsituation (ebene Lage) installiert worden: im LMF in 1850m, im UMCF in 2600m (siehe Abb. 4) und im SCF in 3050m. Folgende Parameter sind an den drei baugleichen Stationen im 10min - Rhythmus aufgenommen worden: Globalstrahlung, Strahlungsbilanz, photosynthetisch aktive Strahlung (PAR), UVB- Strahlung, relative Luftfeuchte, Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit und Windrichtung, Niederschlag, Nebeleintrag, Bestandsniederschlag, Bodentemperatur in vier Tiefen und volumetrischer Wassergehalt des Bodens in fünf Tiefen (ausführlichere Beschreibung siehe 4.)

Abb. 4 Klimastation 2 in 2600m Höhe im UMCF.

Die Untersuchungen fanden an drei Transekten statt, die für die Studie neu angelegt wurden. Das vertikale Haupttransekt erstreckt sich von 1700m bis 3400m im Zentrum des Süd- Ost - Hanges. Die zwei vertikalen Nebentransekte verlaufen parallel zum Haupttransekt an der westlichen und östlichen Grenze des Hanges von 1700m bis 2600m. Zur flächenhaften

Untersuchung sind drei Horizontaltransekte eingerichtet worden auf Höhe der drei Klimastationen: 1850m, 2600m und 3050m (siehe Abb. 5).

In diesen Transekten sind auf denselben Untersuchungsflächen botanische, bodenkundliche und klimatische Untersuchungen vorgenommen worden, so dass ein direkter Vergleich der Ergebnisse möglich ist.

Die Vegetationsaufnahmen wurden von Frau K. Bach durchgeführt (BACH 2004). Es wurden im 50m - Höhenabstand Aufnahmeplots von 400m² angelegt. In sehr artenreicher Vegetation sind zusätzlich im 25m - Höhenabstand Aufnahmen gemacht worden.

Für die Vegetationsaufnahme wurden sechs floristische Gruppen für die Analyse der α - und β - Diversität ausgewählt. Die Aufnahmen konzentrierten sich auf ausgewählte Pflanzengruppen, welche die Verteilung der Gesamtflora widerspiegelt (KESSLER & BACH 1999): Pteridophyta, Melastomataceae, Araceae, Bromeliaceae, Arecaceae (Palmae) und Cataceae. Weiterhin wurden Strukturmerkmale und der Deckungsgrad nach BRAUN BLANQUET (1964) und VAN DER HAMMEN (1989) aufgenommen.

Für die bodenkundliche Untersuchung wurden im 50m - bis 100m - Höhenabstand umfangreiche Pürckhauerbeprobungen durchgeführt und anschließend Bodenprofile angelegt. Im Haupttransekt wurden alle 100m und im Nebentransekt alle 200m 1m tiefe Profile gegraben. Sie wurden nach AG BODEN (1996) horizontweise beprobt und nach Lagerungsdichte, Bodenfarbe, Textur, Struktur, Skelettgehalt, Wurzelintensität und Bodenfeuchte analysiert. Die Bodenproben wurden luftgetrocknet und im physikalischen Labor des Geographischen Instituts Göttingen analysiert auf folgende Parameter: pH, Leitfähigkeit, effektive Kationenaustauschkapazität, Korngrößenverteilung, Gesamtkohlenstoff und -stickstoff, Gesamtgehalte der Makro- und Mikroelemente, Oxalat Fe, Al und Mn, Dithionit Fe, Al und Mn (siehe 3).

Abb. 5 Lage des Untersuchungsgebietes am südöstlichen Hang des Cerro Hornuni. Die Vegetationsaufnahmen sind mit Dreiecken, die Bodenaufnahmen mit Punkten und die drei Klimastationen mit Kreisen dargestellt

3. Verbreitung und Genese der Böden

3.1 Einleitung

Tropische Bergregenwälder gehören weltweit zu den am stärksten gefährdeten Ökosystemen. Bis 1991 sind 90% des ursprünglichen Waldbestandes zerstört worden (HENDERSON ET AL. 1991) und die jährliche Abholzungsrate beträgt 1.1% gegenüber 0.8% in allen tropischen Regenwäldern (DOUMENGE ET AL. 1995).

In den bolivianischen Anden ist in Abhängigkeit von der Höhenlage eine sehr hohe Vegetationsdiversität vorhanden (BACH ET AL. 2003). Der effektive Schutz der Biodiversitätshotspots tropischer Bergregenwälder erfordert ein bodengenetisches Prozessverständnis. Die Bodengenese als Produkt des komplexen Wirkungsgefüges von Ausgangsgestein, Klima und Vegetation stellt einen guten Indikator für langfristige ökologische Zusammenhänge dar. Nur wenige Studien haben sich mit der Bodengenese in Bergregenwäldern beschäftigt (WHITMORE & BURNHAM 1969, GRIEVE ET AL. 1990, HETSCH & HOHEISEL 1976, SCHRUMPF ET AL. 2001).

Publizierte Studien über die Bodengenese in tropischen Bergregenwäldern stellen Hydromorphie und Podsolierung als dominante Bodenprozesse heraus. In den Bergregenwäldern Malayas untersuchte BURNHAM (1974) Böden mit dünnen Eisenbändern in Höhen von 1500 bis 2900m ü.M. und schwach podsolierte Böden in höheren und trockenen Lagen. Die Untersuchung von BARSHAD & ROJAS-CRUZ (1950) in den kolumbianischen Anden zeigt typische Podsole, die sich aber von den Podsolen der nördlichen Hemisphäre durch den mächtigen Ae-Horizont unterscheiden. Von den montanen Regenwäldern von Neuguinea berichtete REYNDERS (1964) ebenso über das Vorkommen von Spodosols. Nach WHITMORE & BURNHAM (1969) dominieren rötlich gelbe podsolierte Böden (Udults), saure Braunerden (Trophepts) und Spodosols in montanen Regenwäldern auf granitischem Ausgangsgestein in der Nähe von Kuala Lumpur (Malaysia). HETSCH (1976) schliesst auf hydromorphe Bedingungen als den dominanten Faktor für die Bodengenese und klassifiziert diese Böden als Oxic Dystropepts in Venezuela.

SCHRUMPF ET AL (2001) berichten aus ecuadorianischen Bergregenwäldern über Böden, die mit zunehmender Meereshöhe stärker hydromorphe Merkmale aufzeigen, wie Eisenbändchen (placic Horizont), d.h. sogenannte Placic Petraquepts oder Humaquepts. Oberhalb von 3000m ü.M. dominieren Epiaquepts, flachgründige und gering entwickelte Böden.

Vorliegendes Kapitel beschreibt (i) die Art der Bodengenese und (ii) die Prozesse, die diese Bodengenese in Bergregenwäldern Boliviens bedingen.

3.2 Methodik

3.2.1 Bodentransekte und Feldbodenaufnahme

In den neu angelegten Vertikal- und Horizontaltransekten wurden zur ersten Orientierung ca. 80 Pürckhauerprofile gesetzt und protokolliert. Dies wurde die Grundlage für die Auswahl repräsentativer Leitprofile, die im mittleren Transekt alle 100 Höhenmeter angelegt worden sind. In den beiden äußeren kürzeren Transekten wurden im Abstand von 200 Höhenmeter Bodenprofile angelegt. Die Leitprofile hatten eine Tiefe von 100 cm oder reichten bis zum anstehenden Gestein und wurden horizontweise beprobt. Im Gelände wurden folgende Parameter nach der „Bodenkundlichen Kartieranleitung“ (AG BODEN 1996) aufgenommen: Textur, Bodenfarbe nach Munsell, Bodengefüge, Bodenfeuchte, Lagerungsdichte, Intensität der Durchwurzelung, oxidative und reduktive Merkmale, geomorphologische Lage. Der Skelettanteil der Horizonte wurde volumetrisch geschätzt. Weiterhin wurde die Lage mit Hilfe eines Global Positioning Systems (GPS) bestimmt.

Die Bodenproben wurden luftgetrocknet und zur weiteren Analyse nach Deutschland ins Geographische Institut Göttingen transportiert. Die Bodentypen wurden nach der US Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF 1998) klassifiziert.

3.2.2 Messung der volumetrischen Bodenfeuchte

Der Jahresgang des volumetrischen Wassergehaltes des Bodens wurde mit Hilfe von FDR - (Frequency Domain Reflectometry) Sonden (ThetaProbe ML-2, Delta T Devices) auf einer Freifläche in den Höhen 1850m, 2600m und 3050m gemessen.

Die Messung erfolgte in den Bodentiefen 10 cm, 20 cm, 30 cm, 50 cm und 80 cm und umfasst damit die organische Auflage und den Mineralboden.

Der volumetrische Wassergehalt der organischen Auflage wurde zusätzlich in einer höheren räumlichen Auflösung gravimetrisch gemessen. Grundlage der Untersuchung bildete eine dreiwöchige Messkampagne vom 24.07.2002 bis zum 12.08.2002. In diesem Zeitraum wurden in dem Transekt von 1800m bis 3000m im 200m Höhenabstand täglich Proben genommen. Diese wurden an der ökologischen Forschungsstation bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und gewogen.

Zur Bestimmung der Lagerungsdichte wurde ein ca. 20 cm x 20 cm x 10 cm großer Quader aus der organischen Auflage entnommen und bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und gewogen.

3.2.3 Labormethodik

3.2.3.1 Physikalische Bodenparameter

Zur Probenaufbereitung wurden die Bodenproben luftgetrocknet und der Feinboden vom Skelettanteil mit Hilfe eines 2mm Siebes getrennt. Die Korngrößenanalyse erfolgte im kombinierten Sieb- und Pipettverfahren nach Köhn (SCHLICHTING ET AL. 1995). Die organische Substanz wurde mit H_2O_2 zerstört, und die Bodenaggregate wurden durch Zugabe von $\text{Na}_2\text{P}_4\text{O}_7$ aufgelöst. Der Korngrößenanteil von 2000 - 63 μm wurde durch Siebung abgetrennt, während die Korngrößen <63 μm durch Schlämmen und Pipettierung ermittelt wurden.

Die Messung der Lagerungsdichte (d_B in g cm^{-3}) erfolgte entweder mit Stechzylindern (100 cm^3) oder wurde bei zu hohem Skelettgehalt im Gelände geschätzt. Die Schätzung erfolgte aufgrund der Textur, des Gefüges, der Bodenfeuchte und des Eindringwiderstandes durch ein Penetrometer. Die Proben der Stechzylinder wurden bis zur Gewichtskonstanz bei 105°C getrocknet. Das Porenvolumen ist nach RINGER (1971) mit Hilfe der Korngrößenzusammensetzung, der Lagerungsdichte und des organischen Anteils errechnet worden.

3.2.3.2 Chemische Bodenparameter

Der pH - Wert der wässrigen Bodenlösung wurde jeweils nach einer Stunde potentiometrisch mit einer Glaselektrode gemessen (GPHR 1400), im Verhältnis 1:2.5 für mineralische Proben und 1:5 für organische Proben in 0.01M CaCl_2 bzw. destilliertem Wasser.

Die Gesamtgehalte von Kohlenstoff und Stickstoff wurden an Proben, die mit der Kugelmühle gemahlen und homogenisiert worden waren, mit Hilfe des CHN- Analysators (Leco) ermittelt.

Die Messung der effektiven Kationenaustauschkapazität (ECEC) erfolgte durch die Extraktion mit 1 M NH_4Cl (LÜER & BÖHMER 2000) und die anschließende Analyse am ICP-OES (Optima 4300 DV, Perkin Elmer). Die Konzentration der H^+ Ionen wurde über den pH-

Wert in der Austauschergläsung bestimmt. Die Basensättigung (BS) wird als Summe der basischen Kationen dividiert durch ECEC X 100 angegeben.

Die Analyse der Gesamtgehalte an Eisen und Aluminium wurde über den Picotrace Druckaufschluss mit HF, HNO₃ und HCl (Salpetersäure-Leaching) und der anschließenden Messung am ICP-OES (HEINRICHS ET AL. 1986) durchgeführt. Die Probenvorbereitung erfolgte mit der Kugelmühle (Homogenisierung).

Oxalat - Eisen (Fe_o) und - Aluminium (Al_o) wurden nach der Methode Tamm (SCHLICHTING ET AL. 1995) mittels Extraktion in oxalsaurem NH₄ Oxalat und anschließender Messung ICP-OES bestimmt.

Dithionit - Eisen (Fe_d) und - Aluminium (Al_d) wurden nach Mehra & Jackson (SCHLICHTING ET AL. 1995) analysiert und auch am ICP-OES gemessen.

3.2.3.3 Differenzierung der Sesquioxide

Der Gesamtgehalt an Fe beinhaltet Fe, das als Silikat gebunden ist (geogener Ursprung) und freie Fe - Oxide, zum großen Teil pedogenen Ursprungs, entstanden durch den Übergang von silikatisch gebundenem Eisen zu FeOOH. Freie Fe - Oxide, die durch Dithionit Citrat aufgeschlossen werden (Fe_d), beinhalten den kristallinen und den amorphen Teil der Oxide. Der amorphe Teil ist extrahierbar durch Ammoniumoxalat und beschreibt die Intensität des organischen Materials auf die Eisenoxidentwicklung (Reduzierung, Komplexierung, Acidität). Die Differenz zwischen Fe_d und Fe_o stellt den kristallinen Teil der Fe - Oxide dar, (Fe_t>Fe_d>Fe_o). Der Fe_d/Fe_o Quotient wird als Aktivitätsgrad des Bodens bezeichnet (BLUME & SCHWERTMANN 1969). Die Differenz zwischen Fe_t und Fe_d zeigt den Anteil des silikatischen und geogenen oxidischen Eisens am Gesamteisengehalt. Für das Kriterium spodic nach USDA 1998 ist eine Konzentration von Al_o+0.5 Fe_o von über 0.5 % erforderlich.

Vorherrschende Pseudogleybedingungen, d.h. permanente oder temporäre Wassersättigung durch Niederschläge können mit dem Fe_o/Al_o - Verhältnis dargestellt werden (BLUME UND SCHWERTMANN 1969). Die Verlagerung unter reduzierenden Bedingungen erfolgt bei Al stärker als bei Fe.

3.3 Ergebnisse und Diskussion

3.3.1 Geländebeobachtung

Der Hang des Untersuchungsgebietes ist durchgehend südöstlich exponiert (siehe Abb. 5). Das longitudinale Hangprofil ist vorwiegend linear mit durchschnittlichen Hangneigungen von 25° bis 30°, mit extremen Neigungen über 40°. Der Hang ist gegliedert in drei Kämme, die sich von 2300m Höhe bis zum Hangfuß (1200 m) senkrecht zu den Isohypsen erstrecken. Die Kämme haben eine horizontale Breite von 100m bis 150m. Die Quertäler sind V-förmig eingeschnitten. Die Länge des untersuchten Haupttransektes, das sich von 1700m ü.M. bis 3400m ü.M. erstreckt, beträgt 3950m. Der gesamte Hang hat eine Länge von 5010m und eine horizontale Breite von 1650m.

Die geomorphologischen Verhältnisse lassen sich mit denen aus anderen Studien nur begrenzt vergleichen, da diese häufig nicht im Detail beschrieben worden sind (SEVINK 1984, BURNHAM 1974a, REYNDERS 1964). Die Ausmaße und die Hangneigung der Transekte des Untersuchungsgebietes ähneln am ehesten denen der Studie von GRIEVE ET AL. (1990) in Costa Rica, der 5 Profile zwischen 100m und 2600m aufnahm und SCHRUMPF ET AL. (2001), deren Studie in Ecuador zwischen 1850m und 3050m durchgeführt wurde. KITAYAMA (1992) untersuchte die Bodenentwicklung zwischen 2350m und 3400m in Malaysia und 1994 zwischen 600m und 2600m in Hawaii.

Abb. 6 Differenzierung der Bodenprofile und Klassifizierung der Böden (USDA 1998) im Höhenverlauf

3.3.2 Bodendifferenzierung und Leitboden-Profiltypen (Feldansprache)

Ähnlich der Vegetationszonierung (siehe 2.4) differieren die Bodentypen in dem untersuchten Transekt.

Im unteren Bergregenwald (LMF, 1700m ü.M. bis 2100m ü.M.) sind schluffige, braune Böden dominierend mit organischen Auflagen von 10 cm bis 30 cm. Repräsentativ für diese Vegetationseinheit steht das Boden- Profil im mittleren Transekt in 1850m. Es gliedert sich in drei Horizonte: Ah, Bv1 und Bv2. Ein sehr dunkler schwarzer Lehm (10 YR 1.7/1) im Ah - Horizont, 35 cm mächtig, schwache Durchwurzelung geht mit deutlicher Grenze in den 8 cm mächtigen, dunkelbraunen (10 YR 3/4), lehmig schluffigen Bv1 - Horizont über, dem dann ein heller brauner (7.5 YR 5/6) sandig schluffiger Bv2 - Horizont folgt. Der Boden wird als Humic Dystrudept (SOIL SURVEY STAFF 1998) klassifiziert.

Der Übergang der Böden vom LMF zum UMCF ist sehr deutlich. Die dominierenden Böden im oberen Bergregenwald (UMCF, 2100m ü.M. bis 2900m ü.M.) unterscheiden sich von den Böden des LMF durch eine mächtigere organische Auflage (30-40 cm) und durch das Vorhandensein eines grauen Ae - Horizontes mit einem darunter folgenden Bhs - Horizont. Als Beispiel für die Böden im UMCF dient das Profil in 2200m Höhe im mittleren Transekt: Ein dunkelbrauner schluffig - lehmiger Ah - Horizont (10 YR 3/4) mit einer mittleren Durchwurzelungsintensität, 12 cm mächtig, darunter ein 13 cm mächtiger, schluffig lehmiger, graubrauner Aeh (2.5 YR 6/1), dem mit deutlicher Begrenzung ein schluffig lehmiger, grauer Ae- Horizont (2.5 YR 6/3) folgt, der dann in einen lehmigen braunen Bs- Bh- Cv - Horizont (7,5 YR 5/8) übergeht. Dieser Boden wird als Spodic Dystrudept definiert.

Zum Teil sind die Horizonte im UMCF deutlicher ausgeprägt, und es ist ein Bs - Horizont entwickelt mit einem durchgehenden Eisenband. Es dominieren Podsol- Prozesse, wie die Verlagerung von metall- organischen Komplexen in den Bhs - Horizont und Elution im Ae- Horizont.

In den Nebelwäldern Malayas ist Podsolierung in Verbindung mit Koniferen und intensiven Verwitterungsprozessen auf quarzitischem Ausgangsgestein festgestellt worden (BURNHAM 1974b). Vorherrschende Koniferenarten im Untersuchungsgebiet sind *Podocarpus rusbyi*, *Podocarpus ingensis* und *Podocarpus oleifolius*. Diese Koniferenarten sind im Transekt von 1900m bis 3100m verteilt, mit einem vermehrten Auftreten im UMCF (BACH pers. Mitteilung, Ruiz 2000). Die Verlagerung der organischen Komplexe in den Bh- Horizont lassen auf einen Zusammenhang zwischen der Podsolierung und der Acidität produzierenden Streu schließen.

In neutralen bzw. sauren Böden Neuguineas ist die Mobilität von Sesquioxiden in Verbindung mit organischen Säuren festgestellt und die Podsolierung über das abnehmende Si:Al -Verhältnis mit zunehmender Bodentiefe definiert worden (REYNDERS 1964). In den

Zentralkordillere Kolumbiens hat JENNY (1948) „Andino Podzols“ gefunden, die er mit den alpinen Podzolen in Zentraleuropa verglichen hat.

Oberhalb von 2500 m ü.M. nimmt die hydromorphe Beeinflussung mit der Höhe zu, gekennzeichnet durch Marmorierung und Fe- Konkretionen. Diese Beobachtungen stimmen mit den Untersuchungen von SCHRUMPF ET AL. (2001) überein, nach denen ebenfalls in den Böden der ecuadorianischen Anden mit zunehmender Höhe eine verstärkte Wassersättigung und Bildung von Eisenbändern auftritt.

Im subalpinen Nebelwald (SCF, 3000-3400 m) sind hydromorphe Böden dominierend. In dem repräsentativen Profil in 3200 m Höhe ist folgende Horizonteinteilung gegeben: Aa/Ah-Ae/Sw-Bs/Sd-Cv/Sd. Der schwarze, lehmige Aa/Ae - Horizont (10 YR 3/1) hat eine Mächtigkeit von 20 cm mit einer extrem starken Durchwurzelung (Wurzelfilz). Er geht in den dunkelgrauen Sw/Aeh - Horizont (10 YR 4/1) über mit schluffig- lehmiger Textur und 35 cm Mächtigkeit. Der darunter folgende Sw/Bs - Horizont (10 YR 2/3) besteht aus mehreren Eisenbändern, welche die Durchwurzelung begrenzen. Im sandig lehmigen, braunen Cv/Bbs/Sd - Horizont (10 YR 5/1) zeigen Fe – Oxidkonkretionen die bessere Durchlüftung dieses Horizontes an. Dieser Bodentyp wird als Spodosol klassifiziert, bei temporärer oder permanenter Wassersättigung der Böden weiter als Aquod spezifiziert, der bei Vorhandensein von Eisenbändern zum Placaquod wird.

WHITMORE & BURNHAM (1969) haben aus Malaya in 1590m Höhe über torfartige Gleypodsole mit dünnen Eisenbändern berichtet. In Kolumbien und Costa Rica sind hydromorphe Böden mit podsoligen Eigenschaften untersucht worden (SEVINK 1984, GRIEVE ET AL. 1990). In den Böden des oberen montanen Bergnebelwaldes Venezuelas sind ebenso hydromorphe Prozesse dominierend (HETSCH & HOHEISEL 1976).

Zusammenfassend lässt sich für das Untersuchungsgebiet eine charakteristische Bodengenese feststellen: Im LMF dominieren die Dystrudepts mit geringmächtigen organischen Auflagen und keiner temporären Wassersättigung, im UMCF sind klassische Spodosols ausgebildet, mit mächtigen organischen Auflagen und Sesquioxidverlagerung, während im SCF aufgrund der ganzjährigen Wassersättigung hydromorphe Böden dominieren, auch mit mächtigen organischen Auflagen und Sesquioxidverlagerung. Die Differenzierung der Bodentypen kann trotz einer etwas anderen Höhenverteilung der SCF (3000 bis 3300m) den Vegetationseinheiten zugeordnet: LMF: 1700-2100m, UMCF: 2200m-2600m, und SCF: 2700m bis 3300m.

3.3.3 Bodenchemische Parameter

Die Böden der Region sind sauer bis sehr sauer. Der pH - Wert (CaCl_2) der organischen Auflage liegt zwischen 2.4 und 3.5 (siehe Abb. 7). In Mineralhorizonten steigt der pH - Wert mit der Bodentiefe. Der sehr niedrige pH - Wert im O-Horizont ist möglicherweise bedingt durch die H^+ -Ionen, die durch die mikrobielle Zersetzung der organischen Auflage an der Oberfläche entstehen. Im LMF zwischen 1850m und 2000m liegt der pH - Wert im A-Horizont bei durchschnittlich 4 und sinkt in Höhen über 2000m auf 3 ab (siehe Abb. 7, Tab. 1). Der pH - Wert zwischen 2000m und 3000m liegt permanent unter 3.2, während der Wert oberhalb 3100m wieder auf 3.5 steigt. Der pH - Wert des B- Horizontes sinkt im Höhenverlauf leicht von 4.5 im LMF auf 4.3 im UMCF bzw. 4.0 im SCF.

Abb. 7 pH (CaCl_2)- Werte des A-Horizontes (schwarze Rauten) und O-Horizontes (weisse Quadrate) im Höhenwandel

Bei einer großen Spannweite an pH (CaCl_2)- Werten in tropischen Bergnebelwäldern (BRUIJNZEEL & PROCTOR 1995), liegt der Schwerpunkt der pH - Werte zwischen 3.0 und 4.7 (SCHRUMPF ET AL. 2001, VENEKLAAS & VAN EK 1990 und GRIEVE ET AL. 1990).

Niedrige pH-Werte können nach SCHRUMPF ET AL. (2001) bedingt sein durch die organischen Säuren mit niedrigen pK_a - Werten und Protonenfreisetzung über N - und S - Mineralisierung und Oxidation. Nach HETSCH & HOHEISEL (1976) ist die Vegetation und der Streueintrag der Hauptgrund für die Acidität der Böden. Nach FÖLSTER & FASSBENDER (1978) führt dieser

Einfluss von niederpolymeren organischen Substanzen zu einer substratunabhängigen Versauerung.

Die hohe Acidität der Böden vermindert vermutlich die Artendiversität und Masse der Bodenfauna im Untersuchungsgebiet (PENDRY & PROCTOR 1996). Ferner führt ein ganzjährig vertikal gerichteter Sickerwasserstrom zur Basenauswaschung und damit zur pH-Verringerung. Ein Indiz für die geringe biologische Aktivität ist die deutliche Grenze zwischen der organischen Auflage und dem A-Horizont, d.h. ohne eine faunale Vermischung mit tieferen Bodenabschnitten (WILCKE ET AL. 2002).

Tab. 1 Chemische Bodendaten der Leitprofile im Höhenwandel (fettgedruckte Daten stellen die Mittelwerte, normalgedruckte Daten die Standardabweichung dar.)

Höhe [m ü.M.]	Horizont	pH [CaCl ₂]	C	N	C/N	ECEC Summe	ECEC BS	ECEC Al-
			[% Trockenmasse]			[cmol _c kg ⁻¹]	[% ECEC]	
1700-2100	O	3.0	42.1	2.7	16.0	15.0	36.7	47.5
		0.4	2.6	0.2	1.9	7.4	19.1	17.9
	A	4.0	9.2	0.6	15.9	9.3	5.2	92.2
		0.4	1.9	0.1	1.8	4.1	2.3	2.4
	B	4.5	3.8	0.3	13.2	2.5	11.7	86.5
		0.2	3.1	0.2	5.4	1.4	7.6	7.4
	C	4.7	2.1	0.1	17.4	1.6	20.7	76.9
		0.4	1.0	0.0	7.0	1.0	19.3	20.1
	O	2.5	44.7	2.5	19.5	12.9	38.3	40.2
		0.1	2.8	1.2	4.8	3.3	15.7	13.3
2200-2600	A	2.9	4.4	0.3	17.1	5.9	8.4	66.8
		0.2	2.5	0.1	6.3	4.8	6.1	22.8
	Ae	3.5	1.4	0.1	14.8	3.3	5.1	63.3
		0.5	1.4	0.1	5.6	2.9	5.2	33.6
	Bhs	4.3	3.6	0.1	33.5	3.9	21.4	60.8
		0.6	1.9	0.1	18.2	4.6	25.8	22.4
	C	4.4	1.8	0.1	30.2	2.6	15.0	65.5
		0.4	0.7	0.0	11.6	4.1	23.0	32.5
	O	2.9	42.1	1.9	25.1	13.3	45.4	40.7
		0.4	2.5	0.6	10.2	4.7	23.7	25.5
2700-3300	A	3.0	8.9	0.4	20.9	4.0	32.4	46.9
		0.4	6.8	0.4	12.1	3.3	23.4	28.5
	Ae	3.4	1.6	0.1	20.0	2.2	32.6	59.2
		0.1	1.1	0.0	5.6	1.4	45.9	40.5
	Bs	4.0	1.7	0.1	27.8	3.1	7.4	87.3
		0.3	0.4	0.0	14.0	1.8	4.8	5.8
	C	4.5	1.1	0.0	28.4	0.9	18.2	65.7
		0.2	0.1	0.0	14.4	0.5	19.0	31.3

Die effektive Kationenaustauschkapazität (ECEC) ist im Untersuchungsgebiet sehr gering. Sie beträgt im A-Horizont $<15 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ und in der organischen Auflage $<25 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (siehe Tab.1). Zwischen 1800 und 2100m ü.M. liegt die ECEC im A-Horizont im Durchschnitt bei $9.3 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Oberhalb von 2100m ü.M. sinkt die ECEC im UMCF auf $5.9 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ bzw. $4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ im SCF. Der Rückgang der ECEC mit der Höhe ist möglicherweise bedingt durch die stark zunehmenden Niederschläge und den regelmäßig auftretenden Nebel. Diese bewirken die höheren Auswaschungsraten und Podsolierungseffekte (REYNDERS 1964) (siehe 4.4.4).

Die ECEC im A-Horizont des LMF ist dominiert durch Al-Ionen, die über 90% am Austauscher belegen (siehe Tab. 1). Hohe Al-Konzentrationen bzw. sehr niedrige Basensättigungen in mineralischen Bodenhorizonten prägen häufig die Böden von tropischen Bergregenwäldern (HAFKENSCHIED 2000, FÖLSTER & FASSBENDER 1978, GRIEVE ET AL. 1990). Die austauschbaren Al-Konzentrationen in den A-Horizonten nehmen mit zunehmender Höhe jedoch ab: Von 92% im A-Horizont des LMF auf 67% des UMCF, bzw. 47% im SCF (siehe Tab. 1). Dieser deutliche Rückgang lässt die Erklärung der Einschränkung des Pflanzenwachstums aufgrund einer Al-Toxizität als unwahrscheinlich erscheinen.

Die ECEC des Untersuchungsgebietes sind ähnlich denen der Oberböden eines indonesischen Typic Humitropept ($1.6 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) und eines A-Horizontes in Venezuela ($17.5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) (GRIMM & FASSBENDER 1981). Die CEC-Werte von $100.7 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ in dem A-Horizont eines Humitropept aus Costa Rica (GRIEVE ET AL. 1990) oder Werte von $22.1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ bis $78.7 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ in Malaysia (KITAYAMA 1992) sind damit nicht zu vergleichen, da hier die CEC -Werte bei pH 7 („potentielle CEC“) und nicht beim Boden- pH gemessen wurden. ECEC -Werte, die im A-Horizont in der ecuadorianischen Anden- Ostabdachung gemessen worden sind ($5.1 - 16.7 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) (SCHRUMPF ET AL. 2001), stimmen dagegen sehr gut mit den Werten der vorliegenden Studie überein.

Das C/N- Verhältnis in der organischen Auflage steigt in drei Abschnitten mit der Höhe: das durchschnittliche C/N- Verhältnis beträgt bis 2100m (LMF) 16, nimmt von 2100 bis 2600m (UMCF) auf 20, bzw. zwischen 2700 und 3400 (SCF) auf 25 zu (siehe Abb. 8). Die anmoorigen organischen Auflagen in 3100m und 3450m stellen Ausnahmen mit ihrem C/N -Verhältnis von 40 dar.

Das C/N - Verhältnis im Ah-Horizont folgt dem des O-Horizonts, nur mit etwas geringeren Werten (16,17,21). Das C/N - Verhältnis steht in einem engen Zusammenhang mit der Feuchte, der Temperatur des Bodens und der Streuqualität (siehe 3.3.5 und 5.4.4).

Abb. 8 C/N-Verhältnis des A-Horizontes (schwarze Rauten) und der organischen Auflage (weiße Quadrate) im Höhenwandel.

Die jährliche mittlere Bodentemperatur in 10 cm Mineralboden - Tiefe sinkt von 18°C in 1850m auf 15°C in 2600m bzw. 12°C in 3050m Höhe. Der volumetrische Wassergehalt steigt kontinuierlich von durchschnittlich 30% in 1800m auf 66% in 3000m an (siehe 3.3.5).

Das mit zunehmender Meereshöhe ansteigende C/N- Verhältnis wird nach MARRS ET AL. (1988) mit einer Abnahme der Mineralisierungsrate aufgrund hoher Bodenfeuchte und abnehmender Bodentemperaturen begründet. SCHRUMPF ET AL. (2001) beschreiben das ansteigende C/N- Verhältnis als Reaktion auf die niedrigen N-Gehalte im Boden unter einer skleromorphen Vegetation. BRUIJNZEEL ET AL. (1993) haben jedoch keinen klaren Zusammenhang zwischen der Höhe und dem N - Gehalt in der skleromorphen Vegetation gesehen.

Der abrupte Anstieg des C/N - Verhältnisses auf 40 in den Höhen von 3100m und 3450m zeigt das lokale Auftreten von anmoorigen Verhältnissen im SCF mit Dominanz von *Sphagnum* – Moosen. Das häufige Auftreten von anmoorigen Verhältnissen aufgrund von ganzjähriger Wassersättigung in höheren Lagen der tropischen Bergwälder wird von WHITMORE (1984) oder GRUBB & TANNER (1976) bestätigt.

Der Vergleich der Vorräte an Kohlenstoff im gesamten Profil zeigt ein differenziertes Bild der Verteilung (siehe Abb. 9). Die Vorräte an Kohlenstoff zwischen 1700m und 2000m liegen bei durchschnittlich 363 t ha⁻¹, mit maximalen Werten von bis zu 529 t ha⁻¹ (2000m). Von 2000m

bis 2900m sinkt der Vorrat auf durchschnittlich 323 t ha^{-1} bzw. über 2900m auf durchschnittlich 258 t ha^{-1} .

Die Vorräte liegen damit deutlich über denen aus Ecuador, deren Maximum mit 344 t ha^{-1} im UMCF ermittelt worden ist (SCHRUMPF ET AL. 2001).

Abb. 9 Verteilung der Kohlenstoffmengen innerhalb des Bodenprofils im Höhenwandel.

Die Verteilung des Kohlenstoffs im gesamten Profil im Verhältnis zum Kohlenstoffvorrat in der organischen Auflage zeigt deutliche Unterschiede in den unterschiedlichen Höheneinheiten (siehe Abb. 9, 10).

Unterhalb von 2000m sind nur 30% des Kohlenstoffs in der organischen Auflage gespeichert. Der Hauptanteil der C-Vorräte bis 2000m befindet sich im A-Horizont mit z.T. über 200 t ha^{-1} . In den oberen Vegetationseinheiten ist der überwiegende Anteil an C in der organischen Auflage gespeichert, mit 62% des Gesamt - C zwischen 2100m - 2600m und 57% am Gesamt - C zwischen 2700m-3300m.

Nach der nichtparametrischen Analyse nach Wilcoxon sind zwischen 1800m - 2100m und 2100m - 2600m signifikante Unterschiede ($p < 0.05^*$) in der Verteilung des Kohlenstoffs festgestellt worden, ebenso zwischen 1800m - 2100m und 2700m - 3300m, während zwischen 2200m - 2600m und 2700m - 3300m keine signifikanten Unterschiede zu erkennen sind.

Unterhalb von 2000m im LMF ist aufgrund der höheren Mineralisierungsraten der vorhandene Kohlenstoff im A-Horizont akkumuliert.

Abb. 10 Anteil des Kohlenstoffs der organischen Auflage am Gesamt C-Gehalt des Gesamtbodens in Prozent

Oberhalb von 2100m im UMCF ist der Hauptteil des C in der organischen Auflage akkumuliert. Hier liegt er mit durchschnittlich 203 t ha^{-1} unterhalb der aus Ecuador (WILCKE ET AL. 2002) und Jamaika (TANNER 1977) ermittelten Werte, die durchschnittlich 250 t ha^{-1} betragen. Als Ursache kann in der vorliegenden Studie die mit der Höhe zunehmende Vergleyung und Podsolierung der Böden im UMCF und im SCF betrachtet werden, die eine Auswaschung des Kohlenstoffs in tiefere Horizonte begünstigt.

Hohe C-Gehalte im gesamten Profil (2000m, 2400m, 3300m) sind z.T. auf lokal wirkende Vegetationsbrände zurückzuführen, die durch Holzkohlefunde im Profil bestätigt wurden, deren mechanische Beimengung in untere Horizonte durch die regelmäßigen Erdbeben zu erklären ist.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Böden des Untersuchungsgebietes durch eine sehr große Acidität und eine niedrige ECEC bei hoher Al-sättigung geprägt sind. Das mit zunehmender Höhe steigende C/N- Verhältnis zeigt die abnehmende Rate der

Mineralisierung in höheren Bereichen, als Folge erhöhter Bodenfeuchte und abnehmender Temperatur. Die maximalen Vorräte an Kohlenstoff sind zwischen 2000m und 2500m Höhe vorhanden, wobei die Hauptvorräte des Kohlenstoffs im LMF im Mineralboden vorliegen und im UMCF und SCF in der organischen Auflage akkumuliert sind.

3.3.4 Bodentextur und Porenraum

Die Textur der untersuchten Böden ist in Tab. 2 zusammengefasst. Die Böden haben einen hohen Schluffanteil bei einem z.T. hohen Skelettanteil. Der volumetrische Skelettanteil ist heterogen im Transekt verteilt, steigt jedoch in der Regel mit zunehmender Bodentiefe an. Es zeigt sich kein direkter Zusammenhang zwischen Hangneigung und Skelettanteil.

Im Oberboden dominieren hohe Gehalte an Schluff (58%) und Feinsand (17%) (siehe Tab. 2). Diese Korngrößenzusammensetzung lässt auf äolisch eingetragenen Löss schließen. Der hohe Feinsandanteil deutet auf ein nahe gelegenes Ursprungsgebiet hin, möglicherweise die östlich gelegene Hochebene, das Altiplano. Diese Erkenntnisse stimmen mit den Untersuchungen von (GRAF 1986) überein, der auch Löss- Akkumulationen in den Yungas vorgefunden hat. Die Mächtigkeit dieser lösshaltigen Horizonte lässt sich in zwei Gruppen unterscheiden: Auflagen von zum Teil über 1m sind bis 2200m Höhe vorhanden. Ab 2200m nimmt die Feinbodenmächtigkeit auf 40cm ab und sinkt kontinuierlich auf ca. 20cm über 3000m Höhe.

Die Korngrößenzusammensetzung verändert sich mit zunehmender Höhe. Während mit zunehmender Höhe im Oberboden der Feinsandanteil kontinuierlich von 14% auf 22 % steigt, sinkt der Tonanteil von 27% auf 15%. Der Schluffanteil bleibt relativ konstant, jedoch verschieben sich mit der Höhe die Anteile innerhalb der Fraktion mehr zum Grobschluff (siehe Tab. 2).

Die unterschiedliche Zusammensetzung der Textur im Oberboden lässt auf ungleiche Sedimentationsbedingungen schließen. Während sich am Gipfel und am Oberhang Sandfraktionen stärker abgelagert haben, finden sich am Unterhang und im Tal stärker feinkörnige Sedimente. Höhere Windgeschwindigkeiten haben möglicherweise dazu geführt, dass sich am Oberhang nur schwerere, gröbere Fraktionen ablagern konnten, während mit abnehmender Höhe die feineren Fraktionen akkumuliert worden sind.

Unter der Annahme, dass im Hinblick auf das einheitliche Ursprungsgebiet die Zusammensetzung und das Alter des Lösses relativ homogen gewesen sind, lässt sich die Veränderung der Textur, d.h. insbesondere des Tonanteils durch eine zunehmende Verwitterung und Pedogenese (Verlehmung) mit abnehmender Höhe erklären (SEVINK 1984).

Im A-Horizont sind die höchsten Tonanteile vorhanden, mit einem deutlichen Unterschied gegenüber dem B-Horizont. Diese Tonanreicherung im Oberboden lässt auf eine organisch-chemische Verwitterung schließen, als Folge des Einflusses organischer Säuren aus dem Streueintrag auf den Boden. Eine Tonverlagerung wurde aufgrund der Geländeansprache und der Analyse der Korngrößen nicht festgestellt und ist auch wegen der durch Säure bedingten Al-Flockung wenig wahrscheinlich.

Tab. 2 Physikalische Bodendaten der Leitprofile im Höhenwandel.

Höhe	Horizont	Neigung	Tiefe	Bodenfarbe	Skelett		Sand			Schluff			Ton
					feucht	>2mm	gS	mS	fS	gU	mU	fU	
[m a.s.l.]		[Grad]	[cm]			[% Vol]	2000 630	630- 200	200-63	63-20	20-6	6-2	<2
1800	Ah	27	0-35	10 YR 1.7/1	1.5		3.7	7.0	21.2	35.6	0.8	13.3	18.4
	Bv1		35-43	10 YR 3/4	2.6		4.7	3.3	11.0	30.7	23.3	10.0	17.0
	Bv2		43-125	7.5 YR 5/6	26.3		30.7	27.9	16.6	5.8	9.9	1.1	8.1
2000	Ah	22	0-25	10 YR 1.7/1	1.4		1.3	1.2	12.1	37.5	0.1	18.0	29.8
	Ahe		25-58	10 YR 2/3	2.3		0.7	0.9	9.8	32.1	31.3	11.7	13.6
	Bs/Cv		58-70	10 YR 5/4	2.6		1.5	1.7	11.4	37.4	5.7	8.1	34.2
	Cv		70-100	7.5 YR 5/8	2.1		41.5	16.8	11.4	10.7	6.4	3.7	9.6
2200	Ah	29	0-12	10 YR 3/2	16.5		1.7	1.8	14.0	32.4	2.4	21.2	26.5
	Ahe		12-25	10 YR 3/4	22.2		6.3	2.3	14.0	22.6	20.0	16.2	18.6
	Ae		25-40	2.5 YR 6/3	35.2		3.0	2.0	13.6	18.9	16.2	19.6	26.7
	Bs/Bh/C		40-100	7.5 YR 5/8	48.6		11.2	10.4	18.4	12.2	10.9	10.0	26.9
2400	Ah	23	0-5	10 YR 2/2	0.3		0.9	2.5	29.7	28.3	2.1	16.4	20.1
	Aeh		5-20	10 YR 4/1	43.2		1.2	1.5	43.0	23.5	13.9	10.6	6.2
	Sw/Ae1		20-41	10 YR 4/1	45		1.6	3.0	30.6	17.8	16.4	16.0	14.6
	Sd/Cv		41-73	2.5 YR 5/4	56		6.4	5.0	20.4	18.0	17.9	16.7	15.6
2600	Ah	23	0-10	7.5 YR 2/2	0		0.9	1.5	12.2	29.2	25.6	17.1	13.5
	Sw/Ae		10-25	10 YR 4/2	6.8		11.9	1.8	13.6	19.3	25.2	17.0	11.2
	Bs/Bh		25-28	5 YR 3/6	10.3		12.6	5.8	6.8	14.3	20.1	15.7	24.6
	Sd/Cv		28-100	10 YR 5/8	70.3		19.1	13.8	11.2	15.2	18.4	11.7	10.7
2700	Ah	37	0-5	10 YR 5/2	0.6		1.2	1.5	32.1	34.5	16.6	7.0	7.2
	Sw/Ae		5-75	10 YR 6/2	78.1		1.0	2.4	50.1	26.1	12.4	4.1	3.9
	Cv/Sd		75-100	10 YR 5/3	62		1.2	3.7	65.3	17.3	5.9	3.1	3.4
2900	Aeh	27	0-5	10 YR 3/3	1.1		2.4	5.5	51.1	19.1	0.7	9.4	11.8
	Sw/Ae		5-22	10 YR 6/2	19.2		4.2	4.6	62.5	13.7	6.1	3.1	5.7
	Bh/Bs		22-29	10 YR 2/2	43.5		15.0	11.1	39.3	11.3	5.3	2.6	15.4
	Cv		60-100	5 YR 5/8	63.8		28.0	11.8	13.7	14.8	10.5	7.1	14.1
3200	Aa/Sw	31	0-20	10 YR 3/1	21.5		4.4	4.0	26.5	23.7	13.1	9.4	18.9
	Sw/Aeh		20-55	10 YR 4/1	35.6		5.0	3.8	21.8	26.5	17.1	12.2	13.7
	Sd/Bs/Bh		55-65	10 YR 2/3	52.4		15.5	6.7	17.5	15.6	16.3	10.9	17.6
3300	Oh/Ah	20	0-15	10 YR 1.7/1	1.1		1.2	1.5	1.8	42.4	3.3	18.1	31.6
	Ae		15-32	7.5 YR 3/1	76.4		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	Bh		32-49	7.5 YR 2/2	44.1		2.7	2.6	30.2	26.6	7.1	6.1	24.7
	Sw/Bs		49-79	10 YR 4/6	43.6		n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	Sd/Sv		70-100	10 YR 6/1	47.3		7.9	4.7	40.6	20.8	8.6	5.6	11.8

Der Porenraum wurde entsprechend der Zusammensetzung der Korngrößen, der Lagerungsdichte und des C-Gehaltes bestimmt (RENGER 1971). Das durchschnittliche Gesamtvolumen der Poren bleibt konstant hoch bei 55% im gesamten Profil. Die engen Poren (Durchmesser $<0.2 \mu\text{m}$) nehmen jedoch mit zunehmender Meereshöhe ab, während die Grobporen (Durchmesser $> 50\mu\text{m}$) zunehmen (siehe Abb. 11). In den venezolanischen Anden ist auch ein sehr hohes Gesamtporenvolumen von teilweise über 60% insbesondere im humosen Oberboden festgestellt worden (HETSCH & HOHEISEL 1976).

Innerhalb der Profile ist teilweise ein Sprung bei den Grobporen zwischen den Oberböden und den Cv- Horizonten zu erkennen (siehe Abb. 11). Die Cv-Horizonte haben aufgrund des hohen Sandanteils einen großen Anteil an Grobporen und damit eine gute Durchlüftung. Dieser zusätzliche Anteil an Grobporen von 4-6 % im C-Horizont kann zu einem Kapillarsprung mit Wasserstau im Übergang zwischen den Horizonten führen (mdl. Mitteilung B. Meyer).

Die nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes (n_{FkWe}) hat für den LMF eine ökologische Bedeutung, da es bei der relativen Trockenzeit von April bis Oktober zu temporären Austrocknungsphasen kommen kann. Die Böden bis 2000m Höhe zeichnen sich aufgrund des hohen Lehm - und Schluffanteils und des tiefreichenden Wurzelraumes durch eine relativ hohe n_{FkWe} , mit einem durchschnittlichen Wert von 141mm aus. Nach der klimatischen Wasserbilanz, d.h. der Differenz zwischen Freilandniederschlag und der modellmäßig berechneten Evapotranspiration, liegt die längste Trockenphase im August und September, mit einer klimatischen Wasserbilanz von -110mm (siehe 4.5.3). Der Vergleich zwischen Wasserbilanz und n_{FkWe} zeigt, dass eine Limitierung des pflanzenverfügbaren Wassers in der Trockenphase in einigen Reliefpositionen des LMF möglich ist, und zwar strahlungsbedingt als auch aufgrund eines hohen Skelettanteils in den Bodenhorizonten.

Mit zunehmender Höhe steigen die Niederschläge, so dass nicht die pflanzenverfügbare Speicherwassermenge der Böden der limitierende Faktor ist, sondern die Drainfähigkeit des Bodens. Weite Grobporen entwässern innerhalb von 3 Tagen, während enge Grobporen das Wasser mehrere Wochen halten und mittlere Poren so gut wie keine Drainfähigkeit aufweisen. Während der Anteil an engen Grobporen relativ konstant bei durchschnittlich 7% im gesamten Transekt liegt, steigt der Anteil der Grobporen von durchschnittlich 13% im LMCF auf 15% im UMCF und auf 17% im SCF. Trotz des konstant bleibenden Anteils der engen Grobporen und des leicht zunehmenden Anteils an Grobporen nimmt die Hydromorphie (Bleichung, Fe-Dynamik) der Böden mit der Höhe zu. Dieses zeigt die übergeordnete Bedeutung des steigenden Niederschlags und der sinkenden Evapotranspiration für die Genese der Böden.

In dem Untersuchungsgebiet herrschen skelettreiche Böden mit einer Feinbodentextur von schluffigem Lehm im Oberboden und einem deutlichen Wechsel zu sandigem Lehm bis

lehmigem Sand im Unterboden vor. Der schluffige Lehm ist möglicherweise als äolischer Löss eingetragen worden. Die Böden haben ein durchschnittlich hohes Gesamtporenvolumen mit 55%, dennoch kommt es im LMF zu temporärer Austrocknung des Bodens, und im SCF sind trotz eines hohen Grobporenvolumens Stauwassermerkmale vorhanden.

Abb. 11 Verteilung des Porenvolumens (in % des Gesamtporenvolumens) in Profilen der Leitprofile in unterschiedlichen Höhen (Micropores $< 0.2\mu\text{m}$, Mesopores $0.2-50\mu\text{m}$, Macropores $> 50\mu\text{m}$).

3.3.5 Bodenfeuchte

Mit zunehmender Höhe steigen die Jahres-Niederschlagshöhen von 2300mm in 1850m über 3900mm in 2600m auf 5300mm in 3000m Höhe drastisch an (siehe 4.5.4). Gleichzeitig sinkt die potentielle Evapotranspiration (pEt) von 3.3 mm d^{-1} in 1850m auf 1.4 mm d^{-1} in 2600m und 1.3 mm d^{-1} in 3000m Höhe. Die klimatische Wasserbilanz (Differenz aus Niederschlag und pEt) wird mit steigender Höhe stark positiv, d.h. die Versickerungsrate steigt mit zunehmender Höhe. Durch den ganzjährigen Sickerwasserstrom bei hohen Bodenfeuchten wird die Pedogenese stark beeinflusst. Abb. 12 zeigt die Ergebnisse der Messung des Bodenwassergehaltes der organischen Auflage im Höhenwandel. Der Wassergehalt der organischen Auflage steigt entsprechend dem Niederschlagsinput mit der Höhe linear an ($r^2 = 0.92$), nämlich von 2 g g^{-1} im LMF bis auf über 6 g g^{-1} im SCF. Der Vergleich der Wassergehalte auf jeweils einer Höhe zeigt, dass bis 2200m die Exposition eine übergeordnete Bedeutung hat. Standorte mit östlicher Exposition, die den größten Strahlungsinput während des Tages aufweisen, haben die geringsten Wassergehalte in der organischen Auflage. Oberhalb 2200m ist keine Differenzierung durch die Exposition zu erkennen. Nach HETSCH & HOHEISEL (1976) haben die Hangneigung und die Reliefposition eine wichtige differenzierende Bedeutung für den Bodenwasserhaushalt. Die eigenen Messungen für den UMCF bestätigen dies jedoch nicht.

Abb. 12 Gravimetrischer Wassergehalt der organische Auflage im Höhenwandel.

Die gravimetrisch bestimmten Bodenfeuchtwerte bestätigen, dass der größte Teil der Wassermenge der Böden durchgehend in den organischen Auflagen gespeichert ist. Sie beträgt bis zu dem Sechs- bis Achtfachen des Trockengewichtes der Festsubstanz.

Die Messungen mit den FDR- Sonden in der Zeit von Februar 2002 bis September 2002 zeigen deutliche Unterschiede zwischen dem LMF und dem UMCF bzw. SCF.

In 1850 m ü.M. kommt es in den obersten 20cm des Mineralbodens zu einer temporären Trockenphase von Juni bis August 2002 (siehe Abb. 13). Die maximale Bodenfeuchte liegt bei 30 cm und sinkt bei 50 und 80 cm wieder unter diesen Wert. Der Anstieg der Bodenfeuchte in 30 cm ist mit dem Porensprung zu erklären, bedingt durch den deutlichen Anstieg des Sandanteils im Bv2 - Horizont (siehe 3.3.4). Der Vergleich mit dem Niederschlag zeigt deutlich, dass während der Regenzeit die oberen 20 cm des Bodens annähernd wassergesättigt sind und sich die Bodenfeuchte kaum ändert, während in der Trockenzeit die Bodenfeuchte nach Regenereignissen deutlich ansteigt.

Abb. 13 Verlauf der volumetrischen Bodenfeuchte (durchschnittlicher Tageswert in den Bodentiefen 10cm (hellgraue Linie), 20 cm (dunkelgraue Linie), 30 cm (dünne schwarze Linie), und 50 cm (dicke schwarze Linie)) im Vergleich zum Niederschlag im LMF in 1850m ü.M. von Okt. 2001 bis Sept. 2002

In 2600m und in 3000m Höhe sind die oberen Horizonte ganzjährig wassergesättigt. Die unteren Horizonte sind aufgrund des Sandgehaltes besser wasserdurchlässig, so dass in diesen Horizonten eine Luftzufuhr vorhanden ist, welche die oxidativen Merkmale im Cv -

Horizont erklärt. Nach WHITMORE & BURNHAM (1984) nimmt die Bodenfeuchte oberhalb der relativ scharfen Höhengrenze des regelmäßigen Nebelaufkommens in tropischen Bergregenwäldern abrupt zu bis zur Wassersättigung des Bodens.

3.3.6 Dynamik der Sesquioxide, Podsolierung, Hydromorphierung

Das Eisen hat im Boden eine Indikatorfunktion bzgl. der Redoxverhältnisse und der lösungsschemischen Verlagerung. Daher liegt der Schwerpunkt in der Beschreibung der Podsolierungs- und Hydromorphierungsprozesse bei den Fe- und Al-Verlagerungsprozessen. Podsolierungsprozesse treten bei niedrigem pH - Wert, starkem vertikalen Wasserfluss und dem reduzierenden und komplexierenden Einfluss von organischen Säuren auf. Ferner tritt besonders unter dem reduzierenden Einfluss von Stauwasser eine Fe-Verlagerung mit Nassbleichung auf. Eine temporäre oder permanente Wassersättigung der Böden führt zu einer Reduzierung von Fe^{3+} zu Fe^{2+} . Zweiwertiges Fe ist leichter löslich und wird in tiefere Horizonte verlagert (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1992).

Die Gesamtgehalte an Fe nehmen in den A-Horizonten mit zunehmender Höhe deutlich ab (siehe Abb. 14). Die relativ hohen Gehalte an Fe_t in den Oberböden des LMF von durchschnittlich 37.4 g kg^{-1} sinken im UMCF mit durchschnittlich 9.4 g kg^{-1} Fe_t auf ein Viertel und vom UMCF zum SCF mit 4.9 g kg^{-1} Fe_t noch einmal um etwa die Hälfte.

Im LMF steigen innerhalb der Bodenprofile die Fe_t - Gehalte mit zunehmender Bodentiefe zum C-Horizont nur geringfügig an, während im UMCF unter einem verarmten Ae- Horizont die höchsten Fe-Gehalte im Bs - Horizont vorhanden sind. Im SCF sind die höchsten Eisenwerte im C-Horizont vorhanden.

Die Eisengehalte nehmen im C-Horizont mit zunehmender Meereshöhe tendenziell zu. Sie sind der Infiltrationsanreicherung zuzuschreiben. Trotz dieser pedogenen Beeinflussung durch Infiltration von Eisen wird der Untergrundhorizont aber noch als Cv-Horizont bezeichnet.

Diese gegensätzlichen Tendenzen der Gehalte an Fe_t , d.h. die Lage der Gehaltsmaxima in den A-Horizonten in der Zone des LMF, in den B-Horizonten im UMCF und in den C-Horizonten des SCF zeigen die zunehmende Intensität der Verlagerung von Eisen mit ansteigender Höhe.

Tab. 3 Durchschnittliche Konzentration in g kg^{-1} (Angaben dick gedruckt) und deren Standardabweichung der Sesquioxide (Angaben normalgedruckt unter den Durchschnittswert gesetzt) in den Bodenhorizonten (Gesamt-, Dithionit- und Oxalat- Aufschluss) in den drei Höheneinheiten. Fe- und Al-Konzentrationsverhältnisse

		Fe_t	Fe_d	Fe_o	$\text{Fe}_d:\text{Fe}_t$	$\text{Fe}_o:\text{Fe}_d$	$\text{Fe}_o:\text{Al}_o$	Al_t	Al_d	Al_o	$\text{Al}_o:\text{Al}_t$	Al_o+ 0.5 Fe_o
		in g kg^{-1}						in g kg^{-1}				
1800m-	A	37.4	19.5	19.9	0.5	1.0	1.1	65.9	14.6	23.9	0.4	33.8
2100m		3.1	2.0	1.9	0.0	0.1	0.8	17.1	5.4	11.4	0.1	11.6
LMF	B	37.4	22.9	19.5	0.6	0.9	1.2	79.0	13.4	23.1	0.3	32.8
		11.3	5.8	5.9	0.1	0.2	0.6	23.8	7.5	17.5	0.2	20.1
	C	43.7	25.3	20.9	0.6	0.7	1.2	98.9	11.8	22.6	0.2	33.1
		7.8	11.2	13.7	0.3	0.3	0.5	15.2	8.1	22.1	0.2	28.6
2200m-	A	9.4	5.1	3.8	0.4	1.2	2.7	30.2	1.7	1.6	0.1	3.5
2600m		4.3	1.6	3.0	0.1	0.5	3.0	13.5	0.9	1.4	0.1	2.7
	Ae	11.7	11.1	5.0	0.5	0.9	1.4	38.5	6.8	4.3	0.1	6.8
UMCF		9.9	8.2	8.8	0.2	0.6	1.3	18.0	5.6	7.9	0.2	12.3
	Bhs	89.0	61.7	44.8	0.6	0.8	4.5	92.7	11.9	15.3	0.2	37.7
		42.7	36.6	21.0	0.0	0.2	4.1	25.6	4.4	8.9	0.1	11.0
	C	54.1	36.9	23.5	0.6	0.8	1.7	98.7	11.0	14.7	0.2	26.5
		13.0	13.8	11.5	0.0	0.1	0.6	14.9	3.7	6.9	0.1	11.1
2700m-	A	4.9	1.6	0.8	0.3	0.6	0.9	23.4	0.8	0.9	0.0	1.3
3300m		1.0	1.1	0.8	0.1	0.5	0.5	16.4	0.3	0.6	0.0	1.0
	Ae	6.0	2.0	0.4	0.3	0.4	1.1	28.8	0.7	0.5	0.0	0.7
		1.8	0.8	0.5	0.1	0.4	0.7	18.3	0.3	0.4	0.0	0.6
SCF	Bs	31.0	18.9	7.0	0.5	0.6	2.5	56.6	4.8	4.3	0.1	7.9
		21.6	16.8	6.2	0.2	0.2	3.4	37.3	3.1	2.6	0.1	4.7
	C	80.9	59.3	21.7	0.8	0.5	4.1	77.2	10.1	5.6	0.1	16.5
		27.6	29.7	3.5	0.1	0.2	0.8	34.1	3.9	1.7	0.0	3.3

Das Dithionit – lösliche Fe macht in den Bodenhorizonten des LMF rund 60% des Fe_t aus. Mit zunehmender Verarmung der A-Horizonte in UMCF und SCF an mobilem Fe sinkt hier der Anteil von Fe_d an Fe_t , steigt jedoch in den Fe- Anreicherungshorizonten auf die Ausgangswerte und darüber hinaus an. Der Anteil des noch mobileren Fe_o am Fe_d sagt dagegen wenig aus. Er ist relativ wenig differenziert.

In den mineralisierten A- Horizonten sinkt mit zunehmender Höhenlage der Gehalt an Fe_t von 37.4 g kg^{-1} über 11.7 g kg^{-1} auf 6.0 g kg^{-1} . Dabei geht dessen mobiler dithionit-löslicher Anteil von 52% über 45% auf 30% zurück. Silikatisches und oxidisches Fe werden also mobilisiert und abwärts verlagert, das oxidische etwas stärker. In den Anreicherungshorizonten Bhs (UMCF) und Bs (SCF) ist das von oben zugeführte Fe

hauptsächlich als Fe_d abgelagert, z.B. im Bhs (UMCF): Beim Fe- infiltrierte C-Horizont des SCF bestehen rechnerisch 91% des angereicherten Fe_t aus Fe_d , d.h. oxidisch gefälltem Fe. Dieses sekundär gebildete Fe- Oxid ist zu 50% - 80% oxalatlöslich.

Ein abnehmendes Verhältnis von freien Fe zu gesamt Fe ist auch durch GRIEVE ET AL (1990) in Bergregenwäldern Costa Ricas auf vulkanischem Ausgangsmaterial nachgewiesen worden.

Abb. 14 Gesamteisengehalte des A-Horizontes (weiße Rauten) und C-Horizontes (schwarze Quadrate) im Höhenverlauf

Anders als beim Eisen markiert die Al- Verteilung in den Bodenprofilen weniger gut den Vorgang der Podsolierung, da Reduktion und Oxidation keine Rolle bei der Verlagerung und Wiederausfällung spielen. Betrachtet man in Tab. 3 die Al_t - Gehalte, so zeigt sich eine mit zunehmender Hanghöhe fortschreitende Abnahme, die durch eine Al- Abfuhr in den Untergrund zu erklären wäre. Die Al_d - Gehalte haben hier gegenüber dem Fe_d wenig Aussagekraft und liegen erwartungsgemäß zumeist unter den Al_o - Werten. Diese nehmen im Hangverlauf ebenso wie das Al_t ab, in der Regel sogar etwas stärker, ohne dass sich wie beim Fe eine podsolierungsbedingte Anreicherung zu erkennen gibt.

Das Fe_o/Al_o - Verhältnis im Untersuchungsgebiet zeigt die unterschiedliche Verlagerungsintensität des Aluminiums gegenüber dem Eisen. Während im LMF das Fe_o/Al_o - Verhältnis relativ konstant ist, zeigt sich im UMCF die höhere Mobilität des Al gegenüber dem Fe im Bs-

Horizont und im SCF im Cv- Horizont. Das Al_o ist im Vergleich zum Fe_o in den Profilen des UMCF und des SCF tiefer verlagert, allein aufgrund der Veränderung des pH - Wertes mit zunehmender Bodentiefe.

Das Fe_o/Fe_d -Verhältnis ist im LMF nahe 1, es liegt daher annähernd kein gealtertes Eisenoxid vor, und die gesamten freien Fe - Oxide sind durch organische Säure mobilisiert worden, in einigen Fällen bis zu 1m Bodentiefe. Das Fe_o/Fe_d - Verhältnis im UMCF ist mit dem des LMF ähnlich bei wesentlich niedrigeren Fe - Konzentrationen. Im SCF sinkt das Fe_o/Fe_d - Verhältnis auf die Hälfte ab. Das Verhältnis zeigt, dass die Bedeutung der metallorganischen Komplexe im A-Horizont im Höhenverlauf abnimmt.

Der Vorgang der Fe-Verlagerung zeichnet sich auch beim Vergleich mit den C-Konzentrationen im Bs-Horizont ab (siehe Tab. 3): Während im UMCF der C-Gehalt von 1.4% im Ae auf 3.6% zunimmt, bleibt die C-Konzentration im SCF mit 1.6% im Ae zu 1.7% im Bs relativ konstant. Im SCF entsteht die Verlagerung des Fe vorrangig aufgrund der anaeroben Verhältnisse im Boden, die eine Reduzierung des Fe bedingen, und weniger die für die Podsolierung typische Fe - Verlagerung durch organische Säuren, wie sie im UMCF dominierend ist.

Abb. 15 Konzentration des dithionitlöslichen Fe-Oxids (Fe_d) innerhalb der Bodenprofile in den Höhen 2200m (schwarze Raute), 2400m (schwarzer Kreis), 2900m (weißes Quadrat) und 3300m (schwarzes Dreieck)

Höchste Eisenkonzentrationen in den untersuchten Bodenprofilen sind im Cv - Horizont vorhanden, deutlich sichtbar durch die dunkelrostfarbenen Flecken. Der hohe Sandanteil und der damit verbundene hohe Anteil an Grobporen bewirkt eine gute Durchlüftung dieses Horizontes mit wechselfeuchten Bedingungen. Dieses führt zu einer weiteren Ausfällung und Oxidation der Fe-Oxide im Unterboden (siehe Abb. 15).

Der Zusammenhang zwischen abnehmenden Fe_t - Werten im A- Horizont zu ansteigenden Fe_t - Werten im C-Horizont (siehe Abb. 15) im UMCF und im SCF lässt auf einen vorherrschend vertikalen Wasserfluss im Bodenprofil schließen. Diese These bestätigt sich in Vergleichen mit GOLLER ET AL. (2005), die mit Hilfe von Tracern in den Bergnebelwäldern Ecuadors ebenfalls vorherrschend vertikale Flüsse gemessen haben und nur bei Starkniederschlägen laterale Flüsse festgestellt haben. Auch WHITMORE & BURNHAM (1984) postulieren vorwiegend eine vertikale Wasserströmung in den Böden von Nebelwäldern. Vorliegende Untersuchung zeigt, dass in dem Untersuchungsgebiet die Fe-Dynamik im Boden als eine Art „fossiler Tracer“ angesehen werden kann, um damit Aussagen über vorherrschende Richtungen des Wasserflusses aufzuzeigen; indirekt die Intensität der Wassersättigung zu ermitteln und damit eine entscheidende ökologische Aussage für die Vegetationsverbreitung treffen zu können.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass in den Dystrudepts des LMF's mit leicht ansteigenden Fe - Werten bei zunehmender Bodentiefe erste Verlagerungstendenzen von Fe zu erkennen sind. Die Oberböden des UMCF haben deutlich niedrigere Fe - Werte. Die metallorganischen Komplexe haben sich in diesen Böden stärker verlagert und sind im Bs - Horizont in Form von Eisenbändern akkumuliert. Die Böden des SCF zeigen die deutlichste Verarmung von Fe - Oxiden im A - und B- Horizont durch die durch Stauwasser bedingte Reduzierung des Eisens (Whitmore & Burnham 1984) mit einer Fe - Akkumulation im C-Horizont.

3.4 Schlussfolgerungen

Die Untersuchung der Bodentransekte in den bolivianischen Yungas liefert die Grundlage für das Verständnis der Bodenbedingungen und Bodenprozesse in Bergnebelwäldern. Die Intensität der Bodenbildung in Beziehung zur Höhenlage hängt in den Yungas von der zunehmenden Bodenfeuchte und den abnehmenden Temperaturen ab.

Die Verbreitung der Böden mit variiert Bodengenese lässt sich in drei Abschnitte gliedern, die näherungsweise denen der Vegetationseinteilung entsprechen:

Im LMF von 1700m bis ca. 2100m sind Dystrudepts der dominierende Bodentyp, mit höheren Nährstoffkonzentrationen und pH- Werten, bei niedrigeren Niederschlägen und höheren Temperaturen im Vergleich mit den höheren Vegetationsstufen.

Der deutliche Klimawandel im Übergang zum UMCF mit regelmäßigem Nebelaufkommen und zunehmenden Niederschlägen zeigt sich auch in der unterschiedlichen Genese der Böden des UMCF. Diese Böden (2100m - 2600m) sind geprägt durch eine höhere Acidität, mächtigere organische Auflagen und eine zunehmende Sesquioxidverlagerung, so dass sie als spodic Dystrudepts klassifiziert werden können.

Der Übergang vom UMCF zum SCF stellt einen fließenden Übergang der bodengenetischen Differenzierung dar. Es handelt sich um hydromorphe Böden mit insgesamt niedrigen Mineralisationsraten (weites C:N - Verhältnis) und niedrigen Nährstoffkonzentrationen. In diesem Abschnitt dominieren Placaquods.

Die unterschiedliche Bodengenese auf gleichem Ausgangsgestein deutet auf differierende hydrologische Bedingungen in den Vegetationseinheiten hin. Über die Analyse der Fe -, Al - und C - Verteilung in den Bodenprofilen wurde die Wassersättigung des Bodens und die dominierende Richtung der Wasserflüsse abgeleitet. Es ergeben sich drei Stadien der Bodenentwicklung: Im LMF sind erste Tendenzen einer Sesquioxidverlagerung festzustellen. Die Verlagerung von Fe und Al im Boden nimmt mit zunehmender Höhe zu. Im UMCF dominieren podsolige Prozesse, wie die Bildung bzw. Verlagerung von metallorganischen Komplexen mit entsprechenden Bhs-Horizonten.

Im SCF wird durch die zunehmende Ausprägung eines stärker hydromorph geprägten Bodenmilieus die Reduzierung des Eisens und dessen Fe-Verlagerung infolge zunehmender Wasserperkolatation wirksam.

Das Vorhandensein oder Nichtvorhandensein von allochthonem Material (Löss), gravitativen Prozessen (Erdrutschungen) und Relieflagen modifizieren die Muster der Bodenbildung.

4. Hydrometeorologische Untersuchung

4.1 Einleitung

Tropische Bergregenwälder verändern sich in Bezug auf Pflanzendiversität (WOLF 1993; GENTRY 1995; KESSLER 2000b), Bestandesstruktur (KÖRNER ET AL. 1989; KITAYAMA 1992) und Blattgröße (KÖRNER et al. 1989). Dieser Wechsel der Vegetation zeigt sich im Höhenwandel der Vegetationseinheiten (GRUBB 1974; FRAHM & GRADSTEIN 1991; KAPPELLE ET AL. 1995, BACH 2004).

Die entscheidenden Ursachen für diesen Höhenwandel sind nach wie vor nicht genau bestimmt. Einigen Studien zufolge hemmen abnehmende Temperatur, ansteigende Luftfeuchtigkeit und die geringe kurzweilige Strahlung die photosynthetische Aktivität und Transpiration (GRUBB 1977; BRUIJNZEEL & VENEKLAAS 1998).

ODUM (1970) und KITAYAMA & MUELLER - DOMBOIS (1994) argumentieren hingegen, dass das dauerhaft niedrige Sättigungsdefizit der Luft die Nährstoff - und Wasseraufnahme der Vegetation behindert.

Diese und weitere klimatische Faktoren sind nur selten dokumentiert worden, aufgrund der Schwierigkeiten bei der Installierung und Wartung der meteorologischen Stationen unter den schlechten topographischen und infrastrukturellen Bedingungen in tropischen Bergregenwäldern (HAFKENSCHIED 2000; BRUIJNZEEL ET AL. 1993; CAVELIER & MEJIA 1990; PENDRY & PROCTOR 1996).

HETSCH & HOHEISEL (1976) und SANTIAGO ET AL. (2000) stellten einen Zusammenhang zwischen Wuchshöhe der Vegetation und dem Grad der Bodenwassersättigung her. Diese Ergebnisse zeigen, dass auch ungünstige Bodenbedingungen, bedingt durch erhöhten Wasserinput wichtige Faktoren für die Bestandesstruktur in perhumiden tropischen Bergregenwäldern sein können.

Das Ziel dieses Kapitels ist es, (i) den hypsometrischen Wandel des Klimas in den Yungas Boliviens darzustellen und (ii) den Einfluss der klimatischen Parameter auf die Struktur und Pflanzendiversität in den montanen Wäldern entlang eines Höhengradienten zu diskutieren.

4.2 Methodik

Grundlage der Analyse sind meteorologische Freilandmessungen während des Zeitraumes Oktober 2001 bis Oktober 2002 auf Freiflächen innerhalb der drei Vegetationseinheiten, in 1850m ü.M. (LMF), 2600m (UMCF) und in 3050m (SCF).

Niederschlag (P, mm) wurde mit einer Kippwaage (ARG 100, EM) in 1m Höhe und in einer Auflösung von 0.2 mm gemessen.

Die Messung der kurzwelligen Globalstrahlung (R_s , $W\ m^{-2}$) erfolgte mit einem Pyranometer (8101, Schenk), die Strahlungsbilanz (R_n , $W\ m^{-2}$) mit einem Nettoradiometer (NR Lite, Kipp & Zonen) und die photosynthetische Photonen - Flussdichte (PPFD, Wellenlänge: 400 - 700 nm, $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$) mit einem Quantum-Sensor (DK - PHAR, Deka). Die Strahlungssensoren wurden in 2m Höhe im Abstand von 1.5m zum Hauptmast installiert, um eine Beschattung zu vermeiden.

Die Lufttemperatur (T, °C) und die relative Luftfeuchtigkeit (RH, %) wurden in 2 m Höhe mit einem Hygro - Thermosensor (HTS 200, Klink) gemessen. Dieser Sensor wurde mit einem Zylinder aus Aluminiumlamellen gegen direkten Regen und direkte Strahlung geschützt. Die relative Luftfeuchtigkeit, die 100% überstieg, wurde auf 100% zurückgesetzt.

Ein Dreischalen - Anemometer (A100, Vector Instruments) wurde für die Aufnahme der Windgeschwindigkeit (WS, $m\ s^{-1}$) eingesetzt, die Windrichtung (WD, Grad °) wurde mit Hilfe einer potentiometrischen Windfahne (W200P, Vector Instruments) gemessen. Beide Messungen erfolgten in 2m Höhe.

Die Daten wurden in einem 10min - Intervall aufgenommen, mit Ausnahme der Windgeschwindigkeit (1 min). Sie wurden im Delta - T - Datalogger gespeichert. Die Durchschnittswerte und Standardabweichungen werden in 30min Werte zusammengefasst.

Die potentielle Evapotranspiration (PET) wurde nach PENMAN, modifiziert nach DOORENBOS & PRUITT (1988) ausgerechnet.

Die relative Luftfeuchtigkeit und die Lufttemperatur im Bestand sind mit Hilfe von kompakten Dataloggern (Hobo Pro RH/Temp, Onset) in einem durchgehenden Transekt von 1800m bis 3200m im 200m Höhenabstand gemessen worden. Die Datalogger wurden jeweils in Bodennähe in 50cm, im Stammbereich in 2m und im Kronenraum in ca. 15m Höhe installiert. Zum Schutz vor direkter Strahlung und Niederschlag wurden sie in einem weißen Plastikzylinder installiert, der nach vorn und nach unten geöffnet war. Der Messzeitraum erstreckte sich vom 24.November 2000 bis zum 15. April 2001. Weitere Informationen sind im Anhang zu ersehen.

Die Differenzierung in „bewölkter Tag“ und „Strahlungstag“ (siehe Abb. 18,20) bei den Parametern R_s , R_n , PPFD, PET und T erfolgte auf der Grundlage von jeweils 20 Tagen mit den geringsten (bewölkter Tag) und mit den höchsten (Strahlungstag) täglichen kurzwelligen

Strahlungssummen während des Untersuchungszeitraumes in den drei Vegetationseinheiten.

Das digitale Höhenmodell wurde auf Basis digitalisierter Isohypsen der topographischen Karte (Hoja 6045 III, Serie H731, Unduavi, Instituto Geografico Militar) im Maßstab von 1:50000 erstellt. Unter Verwendung der Software Saga 2.0 (Vollversion) wurde durch lineare Rasterinterpolation mit gewichteter Mittelwertbildung (Kriging) das Höhenmodell generiert.

Die Reduzierung der Globalstrahlung durch Bewölkung wurde nach BÖHNER ET AL. (1997) auf Grundlage des potentiellen kurzwelligen topographischen Strahlungsgenusses kalkuliert. Sie stellt die potentielle Strahlungsmenge dar, die bei wolkenfreiem Himmel an einem topographischen Punkt zu einem Zeitpunkt x vorhanden ist. Sie setzt sich zusammen aus der direkten Strahlung und der diffusen Strahlung. Der direkte Strahlungsgenuss wurde aus dem Produkt der Sonneninklination und dem Winkel zwischen Sonneninklination und der untersuchten topographischen Fläche errechnet. Zur Berechnung der Position der topographischen Fläche wurden die Parameter Exposition und Hangneigung aus der Rasterfläche des digitalen Höhenmodells (DEM) entnommen. Die Beschattung der Reliefposition im Tagesverlauf wurde über die Errechnung des Horizontwinkels in Azimutrichtung festgelegt. Zur Bestimmung der diffusen Strahlung wurden die Sonnenhöhe und die direkte Sonnenstrahlung in dem entsprechenden Höhenniveau errechnet, unter Berücksichtigung des Luftdruckniveaus, das den diffusen Strahlungsanteil reduziert, entsprechend der Atmosphärenmasse in der Höhe.

4.3 Ergebnisse

4.3.1 Strahlungsverhältnisse

4.3.1.1 Globalstrahlung

Die tägliche kurzwellige Strahlungsmenge, die durchschnittliche Variationsbreite und der tägliche Verlauf der durchschnittlichen kurzwelligen Strahlung (R_s) in den drei Vegetationseinheiten sind in Tab. 4 und Abb. 19 dargestellt.

Die durchschnittliche tägliche kurzwellige Strahlung (R_s) nimmt von $15.5 \pm 5.4 \text{ MJ m}^{-2}$ im LMF auf $10.4 \pm 4.3 \text{ MJ m}^{-2}$ im UMCF bzw. $9.9 \pm 3.8 \text{ MJ m}^{-2}$ im SCF ab (siehe Tab. 4). Minimale kurzwellige Strahlung ist im LMF zwischen Mai und August vorhanden mit Werten von 11 bis 14.1 MJ m^{-2} und maximalen Werten in den Monaten Oktober und November mit über 19 MJ m^{-2} (siehe Abb. 17). Im UMCF und SCF sind nur geringfügige saisonale Schwankungen zu erkennen. Die maximale Einstrahlung während eines durchschnittlichen Tages erfolgt im LMF um 12 Uhr mit 660 W m^{-2} und sinkt im UMCF auf 449 W m^{-2} um 10:30

Uhr und auf 377 W m^{-2} um 11:30 Uhr im SCF (siehe Abb. 19). Selbst an Strahlungstagen sinkt die maximale Einstrahlung von 1037 W m^{-2} (11:30) im LMF auf 856 W m^{-2} (12:00) im UMcF und 827 W m^{-2} (11:00) im SCF.

Im Vergleich zwischen den potentiellen, modellierten Strahlungswerten und den gemessenen Globalstrahlungswerten in den drei Vegetationseinheiten steigt die durchschnittliche Reduzierung der täglichen Strahlungssumme durch zunehmende Bewölkung im LMF von 37%, auf 58% im UMcF und 62 % im SCF (Abb. 16, 18). Die Strahlungsreduzierung war am ausgeprägtesten im SCF, wo die kurzwellige Strahlung während der Jahresaufnahme an 306 Tagen über 50% reduziert war. Eine Reduktion von 90% wurde an 4 Tagen erreicht.

Abb. 16 Durchschnittliche tägliche Reduzierung der kurzwelligen Strahlung (R_s , %). Vergleich zwischen der aktuellen Strahlung und der potentiellen Strahlung in den Höhen 1850m (schwarze Punkte), 2600m (weiße Dreiecke) und 3050m (schwarze Quadrate) zwischen Oktober 2001 bis Oktober 2002.

Die durchschnittliche tägliche Strahlungsbilanz (R_n) verringert sich von 8.8 MJ m^{-2} im LMF auf 5.0 MJ m^{-2} im UMcF und 3.8 MJ m^{-2} im SCF. Die durchschnittliche R_n beträgt während des Tages (6 - 18h) im LMF 9.7 MJ m^{-2} und damit 63.4 % der kurzwelligen Globalstrahlung (R_s) (siehe Abb. 18). Sie verringert sich im UMcF auf 5.8 MJ m^{-2} und 56.3% der R_s und im SCF auf 5 MJ m^{-2} und 50.2 % der R_s . Die nächtliche Ausstrahlung nimmt von -0.9 MJ m^{-2} im LMF und UMcF auf -1.2 MJ m^{-2} im SCF zu. Die Tageseinstrahlung übersteigt daher die nächtliche Ausstrahlung um das 10.7 fache im LMF, um das 6.9 fache im UMcF und um das 4.2 fache im SCF. Die nächtliche Ausstrahlung in einer bewölkten Nacht liegt bei -0.6 MJ m^{-2} im LMF, -0.4 MJ m^{-2} im UMcF und -0.73 MJ m^{-2} im SCF (siehe Abb. 18). Während einer

klaren Nacht steigen die Ausstrahlungen deutlich von -0.8 MJ m^{-2} im LMF auf -1.1 MJ m^{-2} im UMCF und -2 MJ m^{-2} im SCF. Hier zeigt sich der Zusammenhang zwischen Temperatur und langwelliger Strahlung.

Die photosynthetische – Photonen - Flussdichte (PPFD) nimmt mit zunehmender Höhe ab, ähnlich der Globalstrahlung (Tab. 4, Abb. 17 - 20). Die durchschnittliche Tages - PPFD (6 - 18h) beträgt $749 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ im LMF, $471 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ im UMCF und $455 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ im SCF.

Tab. 4 Strahlung und Temperatur während der Messphase Oktober 2001 bis Oktober 2002 in den drei Vegetationseinheiten.

Durchschnittliche, minimale und maximale Werte der täglichen kurzwelligen Strahlungsmenge (R_s , R_s Bereich, MJ m^{-2} , $\pm \text{SD}$), die durchschnittliche tägliche und das absolute Maximum der photosynthetischen – Photonen - Flussdichte (PPFD, Max PPFD, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), die durchschnittliche Menge der täglichen photosynthetischen – Photonen - Flussdichte (tägliche PPFD, $\text{mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), die durchschnittliche tägliche Temperatur T ($^{\circ}\text{C}$), die tägliche Amplitude der Temperatur ($^{\circ}\text{C}$), das durchschnittliche Minimum und die durchschnittliche Amplitude der Temperatur, das durchschnittliche Maximum und die durchschnittliche Variationsbreite der Temperatur.

	LMF	UMCF	SCF
	(1850 m)	(2600 m)	(3050 m)
R_s [MJ m^{-2}]	15.5 ± 5.4	10.4 ± 4.3	9.9 ± 3.8
R_s Bereich [MJ m^{-2}]	4.6 - 29.8	3.3 - 28.1	3.1 - 24.8
PPFD [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	749	471	455
Max PPFD [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	3316	3022	3396
PPFD [$\text{mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$]	33.6	22	20.5
T [$^{\circ}\text{C}$]	16.8 ± 1.7	15.6 ± 1.6	10 ± 1.5
Min T [$^{\circ}\text{C}$]	13.3 (7.7 - 17.2)	10.2 (5.7 - 14)	7.4 (2.1 - 10.8)
Max T [$^{\circ}\text{C}$]	22.8 (14.8 - 29)	16.8 (8.8 - 23.8)	13.3 (6.9 - 18.5)

Die tägliche durchschnittliche PPFD reduziert sich um 37% vom LMF zum UMCF, während sie vom UMCF zum SCF nur um 7% sinkt. Im LMF steigt die PPFD für 4.5 Stunden über $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ mit maximalen Werten um 12:00 h ($1470 \text{ mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), im UMCF für 4 Stunden mit maximalen Werten um 11:00 h ($958 \text{ mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), und im SCF für 3 Stunden mit maximalen Werten um 11:30 h ($805 \text{ mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

Die Maximalwerte steigen während eines Strahlungstages im LMF auf $2424 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (11:30 Uhr), im UMCF auf $2041 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (12:00 Uhr) und $1812 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (11:00 Uhr) im SCF (siehe Abb. 20). An bewölkten Tagen sinkt die durchschnittliche PPFD während der Zeit von 7:30 Uhr bis 17:00 Uhr auf $343 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ im LMF, auf $224 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ im UMCF und auf $231 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ im SCF.

4.3.2 Temperatur und Luftfeuchtigkeit

Das durchschnittliche tägliche Maximum, Minimum und die täglichen Durchschnittstemperaturen sind in der Tab. 4 dargestellt. Der Temperaturunterschied zwischen dem LMF und dem SCF mit $0.59 \text{ K } 100\text{m}^{-1}$ stimmt mit dem normalen feucht-adiabatischen Temperaturgradient von $0.56 \text{ K } 100\text{m}^{-1}$ überein (LAUER 1975). Die tägliche Temperaturamplitude nimmt mit zunehmender Meereshöhe ab: von 9.8 K im LMF auf 6.6 K im UMCF und 5.9 K im SCF. Die Temperaturamplitude sinkt bei bewölkten Tagen auf 3.3 K im LMF, 1.9 K im UMCF und 2.0 K im SCF.

Im jährlichen Temperaturverlauf sind minimale Lufttemperaturen im Juni gemessen worden mit durchschnittlich 13.9°C im LMF, 10.0°C im UMCF und 7.5°C im SCF (siehe Abb. 17). Temperaturen unter 0°C sind in dem gesamten Untersuchungszeitraum nicht gemessen worden (siehe Tab. 4). Wärmster Monat war in allen drei Vegetationseinheiten der Oktober mit 18.3°C im LMF, 14.1°C im UMCF und 11.2°C im SCF.

Die durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit steigt leicht von 89.7% im LMF auf 96.2% in UMCF und 97.4% in SCF. Die durchschnittliche tägliche Amplitude der Luftfeuchte nimmt mit zunehmender Höhe von 30% in 1850m auf 5% in 3050m ab.

Abb. 17 Der durchschnittliche **Jahresverlauf** folgender Parameter: Strahlungsflussdichte (RFD, W m⁻²), dargestellt durch die kurzwellige Globalstrahlung und Strahlungsbilanz (dicke Linie); photosynthetische Photonenflussdichte (PPFD, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); Temperatur (°C) und Penman Evapotranspiration (PET mm d⁻¹) zwischen dem 01.Oktober 2001 und dem 01.Oktober 2002 in den drei Vegetationseinheiten. Vertikale Linien stellen die Standardabweichung $\pm$ dar.

Abb. 18 Der durchschnittliche **Tagesverlauf** während eines **bewölkten Tages**: Strahlungsflussdichte (RFD, W m^{-2}), dargestellt durch die kurzwellige Globalstrahlung und Strahlungsbilanz (dicke Linie); photosynthetische Photonenflussdichte (PPFD, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); Temperatur ($^{\circ}\text{C}$) und Penman Evapotranspiration (PET mm d^{-1}) zwischen dem 01.Oktober 2001 und dem 01.Oktober 2002 in den drei Vegetationseinheiten. Vertikale Linien stellen die Standardabweichung $\pm$ dar.

Abb. 19 Der **durchschnittliche Tagesverlauf** folgender Parameter: Strahlungsflussdichte (RFD, W m^{-2}), dargestellt durch die kurzwellige Globalstrahlung und Strahlungsbilanz (dicke Linie); photosynthetischen Photonenflussdichte (PPFD, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); Temperatur ($^{\circ}\text{C}$) und Penman Evapotranspiration (PET mm d^{-1}) zwischen dem 01. Oktober 2001 und dem 01. Oktober 2002 in den drei Vegetationseinheiten. Vertikale Linien stellen die Standardabweichung $\pm$ dar.

Abb. 20 Der durchschnittliche **Tagesverlauf** während eines **Strahlungstages**: Strahlungsflussdichte (RFD, W m^{-2}), dargestellt durch die kurzwellige Globalstrahlung und Strahlungsbilanz (dicke Linie); photosynthetische Photonenflussdichte (PPFD, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); Temperatur ($^{\circ}\text{C}$) und Penman Evapotranspiration (PET mm d^{-1}) zwischen dem 01.Oktober 2001 und dem 01.Oktober 2002 in den drei Vegetationseinheiten. Vertikale Linien stellen die Standardabweichung $\pm$ dar.

4.3.3 Bestandsklima

Der durchschnittliche hypsometrische Temperaturwandel im Bestand liegt bei $0.58 \text{ K } 100\text{m}^{-1}$ in Bodennähe, $0.59 \text{ K } 100\text{m}^{-1}$ in 2m Höhe und $0.64 \text{ K } 100\text{m}^{-1}$ im Kronenraum. Diese Werte verdeutlichen die leicht höheren Einstrahlungs - wie Ausstrahlungsmengen im Kronenraum gegenüber dem Bestandesinneren.

Die Abb. 21 zeigt die Vertikalprofile in den Höhen 1800m bis 3200m. Das morgendliche Temperaturminimum ist bis zu den Höhen 2600m tendenziell im Kronenraum, wo die effektive Ausstrahlung am höchsten ist. In den Höhen von 2800m bis 3200m liegt das morgendliche Temperaturminimum in Bodennähe aufgrund der lockeren bzw. lückigen Bestände. Die maximalen Temperaturen treten zwischen 11 bis 14 Uhr auf. Sie treten dort auf, wo die stärkste Absorption vorhanden ist. In dichten und lockeren Beständen befindet sich die Absorption vor allem im Kronenraum, in lückigen Beständen im Bodenraum (siehe 3200m).

Entsprechend der Dichte des Bestandes und der Strahlungsintensität ist eine Schichtung der Temperatur vorhanden. Insbesondere während der bewölkten Tage ist aufgrund einer stark reduzierten Turbulenz im Bestand eine Temperaturschichtung bis 2400m deutlich. Oberhalb von 2400m ist die Temperatur in den drei Bestandshöhen homogen, aufgrund des offeneren Bestandes.

Im Vergleich der durchschnittlichen täglichen minimalen Luftfeuchtigkeit sind die Werte zwischen 1800m und 2000m am niedrigsten (siehe Abb. 22). Ab diesen Höhen steigt die Luftfeuchte linear an und erreicht in 2400m das Maximum. Ab der Höhe von 2400m bleibt die Luftfeuchtigkeit relativ konstant bei 90% - 95%. Der Verlauf der Luftfeuchtigkeit bestätigt die Beobachtungen im Gelände, dass in den Höhen von 2200m bis 2400m die Nebelhäufigkeit stark zunimmt.

Differenziert in die drei Bestandshöhen 50 cm, 2m und Kronenraum zeigt sich eine vertikale Abstufung der Luftfeuchtigkeit. Die bodennahe Luftfeuchtigkeit verbleibt nahe der Wasserdampfsättigung im gesamten Transekt. In 2m Höhe nimmt sie von 90% zwischen 1800m bis 2000m auf 95% in den Höhen von 2200m bis 3000m zu. Im Kronenraum steigt die Luftfeuchtigkeit in 1800m mit 76% auf 93% in 2400m an, um in 2800m wieder auf 83% abzusinken. Im Kronenraum zeigt sich die deutliche Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit von der Bestandesstruktur. In 2400m ist die höchste Luftfeuchtigkeit bei einem geschlossenen Kronenraum vorhanden, der Einstrahlung und Luftturbulenzen stark reduziert. Oberhalb von 2400m ist der Kronenraum offener und ein Luftaustausch bzw. die Einstrahlung kann stärker erfolgen.

1800m a.s.l.

2000m a.s.l.

2200m a.s.l.

2400m a.s.l.

2600m a.s.l.

2800m a.s.l.

3000m a.s.l.

3200m a.s.l.

Abb. 21 Tagesgang der durchschnittlichen Temperaturen im Vertikalprofil des Bestandes. Vergleich zwischen einem durchschnittlichen Strahlungstag (linke Abbildungen) und einem durchschnittlichen bewölkten Tag (rechte Abbildungen) (PAREJA 2005). Auf der linken Seite der Graphiken ist die Temperaturverteilung in der Grauskala dargestellt.

Abb. 22 Durchschnittliche minimale tägliche relative Luftfeuchtigkeit im Höhenverlauf. Die linke Abbildung stellt den Durchschnitt der gesamten Messreihe im Bestand dar, während in der rechten Abbildung die Luftfeuchtigkeit differenziert ist in 50 cm (schwarze Kreise), 2 m (weiße Kreise) und Kronenraum (schwarze Dreiecke).

4.3.4 Niederschlag

Die jährliche Niederschlagsverteilung ist in eine relative Trockenzeit von April bis September und in eine Regenzeit von Oktober bis März gegliedert (siehe Abb. 23). Die jährlichen Niederschlagssummen während des Untersuchungszeitraumes von Oktober 2001 bis Oktober 2002 ergeben im LMF 2310 mm a⁻¹, im UMCf 3970 mm a⁻¹ und im SCF 5150 mm a⁻¹. Im Vergleich mit den Niederschlagsdaten der Strassenbaufirma liegen die gemessenen Daten deutlich über dem Durchschnitt (Chuspipata 3000m ü.M., 3810mm), jedoch ist ein direkter Vergleich aufgrund der heterogenen Reliefsituation schwierig. Wie auch in den monatlichen Niederschlagssummen zu erkennen ist, steigt der jährliche Niederschlag deutlich mit der Höhe: UMCf hat 1.7 fach mehr Niederschlag und SCF 2 fach mehr als im LMF. Der Niederschlag steigt vom LMF zum UMCf mit 220 mm 100m⁻¹ und vom UMCf zum SCF mit 260 mm 100m⁻¹. Die durchschnittliche Niederschlagserhöhung von 1850m bis 3050m liegt dementsprechend bei 240 mm 100m⁻¹.

Die durchschnittliche Menge an Regen pro Regentag steigt von 7.4 mm d⁻¹ im LMF auf 11.8 mm d⁻¹ im UMCf und 16.6 mm d⁻¹ im SCF. Die Regenfallintensität ist niedrig im gesamten Untersuchungsraum, steigt jedoch leicht an aufgrund der unterschiedlichen Niederschlagsgenese mit ansteigender Höhe. Die maximalen täglichen Niederschläge im LMF und UMCf entstehen während der Nacht um 2:30 bis 3:00h als orographische Niederschläge und im SCF um 14:30 aufgrund von konvektiven Bewegungen (Abb. 24). Regenfallintensitäten von <1 mm h⁻¹ nehmen ab von 72% im LMF auf 60% im SCF, während

Intensitäten von 2 - 10 mm h⁻¹ von 15% auf 23% mit der Höhe zunehmen. Die Gesamtzeit des Regens steigt von 1025 h (11.7% des Untersuchungszeitraumes) im LMF auf 1085h (12.4%) im UMCF und 1322h (15.1%) im SCF. Durchgehende Trockenphasen (Tage ohne Niederschlag) nehmen von 9 Tagen in 1850m auf 7 Tage in 2600 m und 5 Tage in 3050 m ab.

Abb. 23 Monatlicher Gesamtniederschlag in den drei Vegetationseinheiten LMF (schwarze Balken), UMCF (hellgraue Balken) und SCF (dunkelgraue Balken).

Abb. 24 Durchschnittliche tägliche Verteilung der relativen Regenmengen im LMF (normale Linie), UMCF (dicke Linie) und SCF (gestrichelte Linie)

Abb. 25 Häufigkeitsverteilung der Windrichtung im LMF (1), UMCF (2), und SCF (3), differenziert in Windrichtung von 0:00 - 6:00 Uhr (schwarze Fläche), Windrichtung von 8:00 - 13:00 Uhr (hellgraue Fläche) und Windrichtung von 13:00 - 18:00 Uhr (dunkelgraue Fläche)

Abb. 26 Durchschnittlicher Tagesgang der Windgeschwindigkeit im LMF (durchgezogene Linie), UMCF (gepunktete Linie) und SCF (gestrichelte Linie)

4.3.5 Windgeschwindigkeit und Windrichtung

Die durchschnittliche Windgeschwindigkeit während des Untersuchungszeitraumes betrug im LMF 5.9 m s^{-1} , im UMCF 2.1 m s^{-1} und im SCF 2.7 m s^{-1} (siehe Abb. 26). Während des Tages steigt die Windgeschwindigkeit auf 8.0 m s^{-1} im LMF, auf 2.7 m s^{-1} im UMCF und 2.8 m s^{-1} im SCF. Während der Nacht sinkt die Geschwindigkeit auf 3.9 m s^{-1} im LMF, 1.5 m s^{-1} im UMCF und 2.6 m s^{-1} im SCF. Maximale Windgeschwindigkeiten werden während der Sonnenhöchststände in der Mittagszeit erreicht. Sie liegen im LMF bei durchschnittlichen 11.7 m s^{-1} , im UMCF bei 4.7 m s^{-1} und im SCF bei 3.6 m s^{-1} .

Die Windrichtung hat eine diurnale Verteilung im Untersuchungsgebiet. Während des Tages sind im LMF Ost - bis Nordost - Winde dominierend. Im UMCF und im SCF sind Ost - bis Südost - Winde vorherrschend. Während der Nacht schwankt die Windrichtung zwischen Westen und Norden im LMF, während im UMCF und SCF West - bis Nordwest - Winde vorherrschen.

4.4.6 Potentielle Evapotranspiration

Die durchschnittliche tägliche potentielle Evapotranspiration (PET) sinkt von 3.3 mm d^{-1} ($0.3 - 8.6 \text{ mm d}^{-1}$) im LMF auf 1.3 mm d^{-1} ($0.07 - 6.4 \text{ mm d}^{-1}$) im UMCF und 1.1 mm d^{-1} ($0.04 - 5.7 \text{ mm d}^{-1}$) im SCF. Die PET - Mengen im UMCF und SCF sind sehr ähnlich und 60% niedriger als im LMF.

Die durchschnittliche, potentielle stündliche Verdunstung sinkt von 0.14 mm h^{-1} im LMF auf 0.05 mm h^{-1} im UMCF und SCF (Abb. 19). Der tägliche Verlauf ähnelt dem der Globalstrahlung mit maximalen Verdunstungen während der Mittagszeit. Die PET steigt während strahlungsreicher Tage auf 0.54 mm h^{-1} im LMF, auf 0.3 mm h^{-1} im UMCF und SCF (Abb. 20) und sinkt während bewölkter Tage auf 0.09 mm h^{-1} im LMF, 0.05 mm h^{-1} im UMCF und SCF (Abb. 18).

Der jährliche Verlauf der PET im UMCF und SCF ist sehr gleichmäßig, während im LMF höhere Verdunstungswerte zwischen August und Dezember vorkommen. Die PET eines Jahres summiert sich im LMF auf 1190 mm a^{-1} , im UMCF auf 462 mm a^{-1} und im SCF auf 403 mm a^{-1} . Damit übersteigt der Niederschlag die PET um das 1.9 fache im LMF, um das 8.6 fache im UMCF und um das 13.2 fache im SCF.

4.4 Diskussion

4.4.1 Strahlung

Die potentielle Globalstrahlung steigt mit zunehmender Höhe aufgrund des abnehmenden Wasserdampfdrucks in höheren Meereslagen (BARRY 1992). Dieser durchgehende Anstieg konnte nur an zwei Tagen während der Messphase im Untersuchungsgebiet beobachtet werden (25.02.02, 21.07.02). Während dieser beiden Strahlungstage stieg die kurzweilige Globalstrahlung von 1850m auf 3050m um 16 %. Bei Strahlungstagen in den Alpen ist zwischen 1800m und 3000m ein durchschnittlicher Anstieg der Strahlung um 10% gemessen worden (REITER 1982).

Im Untersuchungsgebiet nimmt die Bewölkung mit ansteigender Höhe zu. Die Bewölkungsdichte steigt jedoch nicht linear mit der Höhe. Die Bestandsklimamessungen zeigen einen deutlichen Anstieg der relativen Luftfeuchtigkeit von 2000m bis 2400m und eine konstant hohe Luftfeuchte ab 2400m (siehe Abb. 22). Geländebeobachtungen zeigten, dass die Grenze der intensiven Bewölkung bzw. Nebelbildung bei ca. 2200m liegt. Innerhalb des

Abb. 27 Wandel des Nebelniederschlags mit der Höhe in der Andenostabdachung in Südecuador (Diagramm geändert nach ROLLENBECK ET AL. (2005, eingereicht))

UMCF steigt die Bewölkung mit der Höhe an. Eine ähnliche Verteilung der Nebelbildung wird in der Studie von ROLLENBECK ET AL. (2005 eingereicht) an der Andenostabdachung Ecuadors beschrieben: mit Hilfe von in situ Messungen wurden die Nebel - und Regenraten

im TMCF in Südecuador im Höhenwandel untersucht. Das Untersuchungsgebiet Südecuadors, das der vorliegenden Studie ähnelt, zeigt deutlich einen steilen Anstieg der Nebelmengen, hier in den Höhen von 2600m (siehe Abb. 27).

Die Intensität der Globalstrahlung (R_s) wird aufgrund dieser Bewölkungsdichte nicht nur reduziert, sie verläuft invers. So sinkt die R_s zwischen LMF und UMCF um $667 \text{ kJ m}^{-2} 100\text{m}^{-1}$ (absolute Differenz: 5 MJ m^{-2}). Damit ist die Differenz um das Sechsfache größer als zwischen UMCF und SCF, die $110 \text{ kJ m}^{-2} 100 \text{ m}^{-1}$ (0.5 MJ m^{-2}) beträgt. Der Verringerung der täglichen Strahlungsmenge zwischen dem LMF und dem SCF ist 5.5 MJ m^{-2} oder 36 %.

Dieses Phänomen ist auch in den perhumiden Bergen von Neuguinea beschrieben worden, wo in der alpinen Zone nur noch ein Drittel der Strahlung im Vergleich zu den niedrigen Höhen vorhanden ist (KÖRNER ET AL. 1983).

Der durchschnittliche kurzwellige Eintrag im LMF von $15.5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ übersteigt die Messungen in den Jamaikanischen Blue Mountains in 1850m ($13.8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 18° N) (HAFKENSCHIED 2000) und in Malaysia in 885m ($13.9 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 5° N) (BRUIJNZEEL ET AL. 1993). Die maximale Einstrahlungssumme von $29.8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ im LMF ist höher als die maximale Einstrahlung im LMF in Südecuador mit $27 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (MOTZER 2003). Die durchschnittliche Strahlungsreduktion im LMF (37%) ähnelt jedoch der Messung in Malaysia (34%) (BRUIJNZEEL ET AL. 1993). Die Strahlungsreduktion im UMCF und im SCF ist wesentlich höher als im LMF (58% resp. 62%) und übersteigt die berichteten Werte von MONTEITH & UNSWORTH (1990) (15 - 50%). Diese Reduzierung zeigt die extreme Bewölkung im UMCF und im SCF an.

Der gegenteilige Effekt der Bewölkung ist die temporäre Intensivierung der globalen kurzwelligen Strahlung (SEGAL & DAVIS 1992). An einigen Tagen mit aufgelockerter Bewölkung ist eine Steigerung der Strahlung im Vergleich zu einem Strahlungstag vorhanden. Dieses Phänomen tritt regelmässig im LMF auf, wie in Abb. 28 deutlich wird. Im direkten Vergleich mit dem wolkenfreien Strahlungstag am 21.07.02 ist eine temporäre Intensivierung der Einstrahlung über die erwarteten Werte an zwei Tagen mit aufgelockerter Bewölkung vorhanden. Es kommt zu einer Summierung der Einstrahlung über die direkte Strahlung bei Wolkenlücken und der zusätzlichen Reflexion der Strahlung durch die Wolken (diffuser kurzwelliger Strahlungsanteil). Die maximalen Werte der globalen Strahlung in den drei Vegetationseinheiten (LMF: 1425, UMCF: 1304, SCF: 1353 Wm^{-2}), die während der Regenzeit erreicht werden (Oktober bis März), übersteigen zum Teil die Solarkonstante von 1360 Wm^{-2} . Strahlungsintensitäten von bis zu 1500 Wm^{-2} sind in Innsbruck (Österreich) in 2600m Höhe gemessen worden (KÖRNER 2003).

Abb. 28 Vergleich eines wolkenfreien Strahlungstages (21.07.02, dicker schwarze Linie) mit zwei Tagen mit aufgelockerter Bewölkung (30.07.02, dünne schwarze Linie und 08.07.02 gestrichelte Linie) im LMF

Die Änderung der photosynthetischen Photonenflussdichte (PPFD) im Höhenverlauf wird durch die kurzwellige Gesamtstrahlung widerspiegelt. Durchschnittliche PPFD - Werte in den jamaikanischen Blue Mountains ($650 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, HAFKENSCHIED 2000) und im Tiefland von Ecuador ($530 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, CHAZDON & FETTER 1984) sind deutlich niedriger als im LMF des Untersuchungsgebietes ($749 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

Tägliche PPFD - Werte, die in Neuguinea gemessen wurden, nehmen von $38 \text{ mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ in 1100 m auf $22 \text{ mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ in 3480 m ab (KÖRNER ET AL. 1983), und ähneln damit den Einstrahlungsmengen im Untersuchungsraum ($33.6 \text{ mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ in 1850 m, 22.0 in 2650m, 20.5 in 3050 m). PEARCY (1983) berichtet von vergleichbaren täglichen PPFD Summen (35.4 mol m^{-2}) im subtropischen Regenwald in Oahu, Hawaii.

Im jamaikanischen oberen Bergnebelwald liegt die Lichtsättigung im Kronenbereich der *Cyrilla racemiflora* - und *Clethra occidentalis* - Bäume bei $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (AYLETT 1985). Für die photosynthetische Aktivität benötigen Baumspezies der venezuelanischen montanen Nebelwälder, die auf Waldlichtungen spezialisiert sind, Lichtsättigungen von $200 - 300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und Baumspezies des Unterwuchses Lichtsättigungen von $100 - 200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (GARCIA - NUNEZ ET AL. 1995).

LETTES & MULLIGAN (2005) sehen eine Reduktion der Photosynthese durch reduzierte photosynthetisch aktive Strahlungswerte (PAR) und intensive Blattbenetzung in den

Bergregenwäldern (LMCF) der kolumbianischen Anden, bei jedoch extrem hohen Niederschlagswerten von bis zu 8860mm. Demgegenüber steht die Studie von HOHMEIER & BRECKLE (2005), die in verschiedenen Baumlichtungen in einem Bergregenwald Südecuadors in 2100m bzw. 1950m keinen Zusammenhang zwischen Baumwachstum und Mortalitätsrate und relativer PPFD - Intensität gefunden haben.

Vergleichend mit den Voraussetzungen für den UMCF in Jamaika (AYLETT 1985) sind 64 % der durchschnittlichen Tageswerte des LMF höher als $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 52 % des UMCF und des SCF. Wird die beobachtete Zeitspanne auf die Tageszeit begrenzt, in der die kurzwellige Strahlung nicht aufgrund der Stellung der Sonne reduziert ist (7:30 –17:00 h), steigt der Anteil auf 80 % im LMF und 65 % im UMCF bzw. SCF. Wendet man die untere Grenze von $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ an, steigen die Werte von 76 % auf 95 % im LMF, 72% auf 90 % im UMCF und 76% auf 95% im SCF. Auch unter extrem bewölkten Bedingungen bleibt die PPFD über $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ für 8 h im LMF, 6.5 h im UMCF und 7h im SCF (siehe Abb. 18). Nach Körner (1982) sind zudem kurze Perioden mit intensiver PPFD wichtiger für das Wachstum von alpinen Riedgräsern als die niedrige durchschnittliche PPFD während des Jahres. Durchschnittliche Maximalwerte der täglichen PPFD sind mit $1470 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (12:00 Uhr, 1850m), $957 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (11:00 Uhr, 2600m) und $804 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (11:30 Uhr, 3050m) weit über den diskutierten Werten.

Die Auswertung der PPFD - Werte zeigt, abgesehen von den deutlichen Unterschieden in der Strahlung zwischen dem LMF und den höheren Vegetationseinheiten, dass die niedrige photosynthetische Photonen-Flussdichte nicht die Hauptursache für die Verbreitung der Pflanzendiversität oder der Bestandesstruktur darstellt.

4.4.2 Windgeschwindigkeit und Windrichtung

Die Windgeschwindigkeit und Windrichtung beeinflussen das Bestandsklima durch z.B. veränderte Evaporation, Niederschlags - oder Temperaturverteilung.

Die hohen Windgeschwindigkeiten im LMF (5.9 ms^{-1}) auf der Freifläche sind bedingt durch die exponierte Lage und das V - förmige Huarinillatal. Entsprechend der Einstrahlung während des Tages sind höchste Windgeschwindigkeiten während des Sonnenhöchststandes vorhanden, während sie sich in den Abendstunden abschwächen.

In der Nacht sinken die Windgeschwindigkeiten aufgrund des fehlenden thermischen Auftriebs und der stabilen Schichtung.

Die Windgeschwindigkeiten sinken vom LMF zu den höheren Vegetationseinheiten signifikant, da aufgrund der Reduzierung der Strahlung durch die Bewölkung die Thermik gleichermaßen stark reduziert ist (siehe Strahlung). Trotz niedrigerer Windgeschwindigkeiten sind die Temperaturunterschiede im Bestand geringer im UMCF und im SCF als im LMF (siehe Abb. 21). Jedoch ist nicht zu differenzieren, ob der geringere Temperaturgradient bedingt ist durch die stärkere Einstrahlung innerhalb des LMF oder durch den geschlosseneren Bestand, der eine höhere Windturbulenz verhindert.

Im montanen Bereich ist aufgrund des heterogenen und kleinräumig variierenden Reliefs ein diurnales lokales Berg - Talwindssystem ausgeprägt. Nach Sonnenaufgang erwärmen sich die strahlungsexponierten Hänge, es entstehen Hangaufwinde. Im UMCF und im SCF sind am Vormittag entsprechend der Hangexposition südöstliche Winde dominierend (siehe Abb. 25), während im LMF eine größere Variabilität gegeben ist. Diese Hangaufwinde werden im Laufe des Tages überlagert von einer talwärts gerichteten Strömung (Talwinde), wie im UMCF und im SCF durch stärker östliche Winde deutlich wird.

Die Abkühlung der exponierten Hangbereiche führt nachts zum Absinken der Luftmassen in die Täler, wo sie zusammenströmen und einen zum Talausgang gerichteten Bergwind erzeugen (BARRY 1992, WHITEMAN 2000). Diese Winde sind im UMCF und im SCF sehr konstant ausgeprägt mit westlicher Richtung, während im LMF wieder eine größere Variabilität vorhanden ist.

4.4.3 Evapotranspiration

Ähnlich anderer tropischen Bergnebelwälder nimmt die potentielle Evapotranspiration (PET) mit zunehmender Höhe ab, aufgrund von abnehmender Strahlung, Temperatur und Dampfdruckdefizit (BRUIJNZEEL & VENEKLAAS 1998; KITAYAMA 1992; KEIG ET AL. 1979). Die gesamte jährliche PET im Untersuchungszeitraum war 61 % niedriger im UMCF als im LMF, und nahm weiter um 13 % zum SCF ab (im Vergleich zu den UMCF - Werten).

Die jährliche PET im LMF ($1190 \text{ mm year}^{-1}$) liegt in dem Bereich der PET – Werte äquatorialer LMF's mit niedrigem Nebelaufkommen ($1155 \text{ to } 1380 \text{ mm year}^{-1}$, BRUIJNZEEL & PROCTOR 1995), die Werte im UMCF (461 mm yr^{-1}) übersteigen jedoch leicht die Werte aus vergleichbaren UMCF's ($310 - 390 \text{ mm year}^{-1}$, Bruijnzeel & Proctor 1995).

Die Hypothese, dass reduzierte Transpiration zu einer reduzierten Wasser - und Nährstoffaufnahme führt (ODUM 1979; KITAYAMA & MUELLER - DOMBOIS 1994), ist von GRUBB (1977) und TANNER & BEEVERS (1990) bereits theoretisch widerlegt worden.

Bei Anwendung eines Blatt - Energie - Gleichgewichts - Modells entlang eines Höhengradienten kalkulierte LEUSCHNER (2000), dass die höhenabhängige Reduzierung der Wasserdampfkonzentration zwischen Blatt und umgebender Luft deutlich niedriger ist als zu erwarten wäre. Stomatawiderstand für Wasserdampf sinkt um 30% von 0 - 5000 m als Konsequenz des niedrigeren Luftdrucks.

Selbst bei Evapotranspirationsraten von weniger als 0.5 mm d^{-1} sind Xylemflüsse in den Bäumen eines hawaiianischen Nebelwaldes gemessen worden (SANTIAGO ET AL. 2000). Die publizierten Resultate zeigen, dass die Wasseraufnahme durch die Pflanze im Untersuchungsgebiet nicht reduziert ist aufgrund der gemessenen niedrigen Evapotranspirationsrate.

4.4.4 Niederschlag und Bodenfeuchte

Die Zunahme der Niederschläge oberhalb von 2000m, wie es im Untersuchungsgebiet beobachtet wurde, wird von einigen Autoren als untypisch für tropische Regionen angesehen. Nach dem Übersichtsaufsatz von LAUSCHER (1976) sind die höchsten Niederschläge in tropischen Regionen zwischen 1000m und 2000m anzutreffen (bei Passatzirkulation, 1. Kondensationsniveau), mit einigen regionalen Unterschieden. VIS (1986) und VENEKLAAS & EK (1990) zeigten den Rückgang der Niederschläge in den Zentralkordillern der kolumbianischen Anden von 3150 mm a^{-1} in 1700 m Höhe auf 1700 mm a^{-1} in 3050 m.

WEISCHET (1969) berichtete dagegen von ansteigenden Niederschlägen zwischen 2600m und 3300m in den östlichen Kordillern der kolumbianischen Anden aufgrund eines zweiten

Maximums der Niederschläge, das durch die Erhitzung des Hochplateaus und der folgenden konvektiven Niederschläge an den Hängen hervorgerufen wird. Eine deutliche Zunahme des Niederschlags von 2000mm in 1900m auf 4000mm in 2650m und 5000mm in 3400m Höhe wurde ebenfalls in einem Höhengradienten der Anden in Südecuador festgestellt (RICHTER, pers. Mitteilung).

Der gemessene Niederschlagsverteilung in dem Untersuchungsgebiet wird bestätigt durch die Messungen von ROLLENBECK ET AL. (2005 eingereicht), die einen linearen Anstieg der Niederschläge, wiederum mit der kombinierten Methode aus Satellitenbildern, eines lokalen Wetter - Radars (LAWR) und in situ Messungen im südecuadorianischen Bergnebelwald ermittelt haben (siehe Abb. 29).

In den Yungas von Bolivien ist der lineare Anstieg wahrscheinlich bedingt durch das regelmäßige Aufheizen des Altiplano während des Tages, was zum Aufsteigen großer feuchter Luftmassen führt und die hohen Niederschläge an den östlichen Hängen der Anden bedingt. Die deutlichen hypsometrischen Änderungen in der klimatischen Wasserbilanz (Niederschlag, PET) führen zu einem erheblichen Wandel der Bodenfeuchte entlang des Höhengradienten.

Abb. 29 Vergleich der Niederschlagsverteilung mit der Höhe zwischen dem Untersuchungsgebiet (schwarze Raute) und der Andenostabdachung in Südecuador (weißes Quadrat) (ROLLENBECK ET AL. 2005 eingereicht)

Im LMF ist keine Wassersättigung des Bodens vorhanden, im UMCF sind die Böden während der Regenzeit wassergesättigt und in den SCF - Böden ist während des gesamten Jahres ein Wasserstau vorhanden (siehe 3.3.5).

Feuchte Bodenbedingungen in tropischen Bergwäldern sind häufig untersucht worden und deren Einfluss auf die Vegetation wurde kontrovers diskutiert. HETSCH UND HOHEISEL (1976) stellten abnehmende Baumhöhen und Pflanzendiversität mit zunehmender Bodenfeuchte entlang eines Höhengradienten in den venezuelanischen Bergnebelwäldern fest, während HAFKENSCHIED (2000) und PENDRY & PROCTOR (1996) keinen Zusammenhang zwischen Bodenfeuchte und Baumhöhe erkannten.

SANTIAGO ET AL. (2000) dokumentierte den Zusammenhang zwischen Wassersättigung im Boden und Reduktion der Blattfläche mit einer folgenden Reduzierung der Transpiration. Die Vermeidung der hohen Bodenfeuchte durch überirdische Wurzeln oder flachgründige Wurzeln ist in dem Elfenwald in Puerto Rico dokumentiert worden ($4500 \text{ mm year}^{-1}$; GILL 1969; LYFORD 1969). BRUIJNZEEL & VENEKLAAS (1998) argumentierten, dass die niedrige Biomassenproduktivität begründet ist durch die erhöhten „Kosten“ für das Wurzelwachstum aufgrund der ungünstigen Bodenbedingungen der Wassersättigung.

Vergleiche zwischen der Pflanzendiversität und den Bodenparametern in 100m - Höhenabständen mit Hilfe von Hauptkomponentenanalyse und multipler Regression zeigen signifikante Zusammenhänge zwischen dem Podsolierungsfaktor im A - Horizont und dem Mineralisierungsfaktor im O - Horizont und Änderungen der Pflanzendiversität entlang des Höhengradienten. Diese Faktoren sind indirekte Indikatoren für die ansteigende Bodenfeuchte und zunehmende Auswaschung. Daher kann geschlossen werden, dass die Bodenfeuchte einen wichtigen Faktor für die Pflanzendiversität in diesem Höhengradienten darstellt.

4.5. Schlussfolgerungen

Trotz der deutlichen Unterschiede in Bezug auf die kurzweilige Strahlung, die PPFD und die PET zwischen dem LMF und den höheren Vegetationseinheiten scheinen die meteorologischen Faktoren keinen direkten Einfluss auf die Vegetationsverteilung zu haben. Vielmehr scheinen die pedologischen Faktoren wie Mineralisierung, Auswaschung und Sauerstoffmangel die Hauptfaktoren für die Änderungen der Vegetationsstruktur und der Pflanzendiversität zu sein. Diese Parameter stehen in einer direkten Verbindung zur Wassersättigung des Bodens, welche wiederum durch Niederschlag und Evapotranspiration bedingt ist. Zukünftige Untersuchungen sollten den Fokus auf die Folgen des Bodenwassergehaltes, auf die Wurzelentwicklung und Nährstoffaufnahme durch die Nebelwaldpflanzen legen.

5. Streufall und Nährstoffumsatz in der organischen Auflage

5.1 Einleitung

Die Vegetation in den tropischen Bergregenwäldern der Yungas ändert sich in ihrer Diversität und in ihrer Bestandesstruktur mit zunehmender Höhe (BACH 2004, siehe 2.4). Solche Änderungen wurden auch in anderen Untersuchungsgebieten festgestellt (WHITMORE 1989, GRUBB 1977). Als eine der möglichen Ursachen wird der wachsende Mangel an Mineralstoffverfügbarkeit mit zunehmender Höhe aufgeführt (TANNER ET AL. 1998). Dieser kann durch eine Hemmung des Nährstoffumsatzes in der organischen Auflage bedingt sein, da ein hoher Anteil der Nährstoffe in der unzersetzten Streu bzw. dem nicht mineralisierten Humus gebunden ist (MARRS ET AL. 1988, BRUIJNZEEL ET AL. 1993).

Die Böden der tropischen Bergregenwälder sind durch eine temporäre Wassersättigung, eine sehr hohe Acidität und niedrige Nährstoffkonzentrationen geprägt (BRUIJNZEEL & PROCTOR 1995, siehe 3.3.3). Der Streufall und die organische Auflage stellen in tropischen Bergregenwäldern die primäre Nährstoffquelle dar (WILCKE ET AL. 2002, VITOUSEK & SANFORD 1986, GRUBB 1995). Die meisten Pflanzen wurzeln dicht in der organischen Auflage. Die Hauptdurchwurzelungstiefe sinkt von 30cm im LMF auf 20cm im UMCF und im SCF.

Zur Charakterisierung des Nährstoffumsatzes im Kreislauf von Streufall, Humusmineralisierung und Wiederaufnahme der Nährstoffe durch die Pflanze wird der Streufall nach Menge und Nährstoffkonzentration erfasst und andererseits der Humuskörper auf seine Mineralisationsrate hin charakterisiert (PROCTOR 1987).

Die Voraussetzung für die Untersuchung des Nährstoffumsatzes in den drei Vegetationseinheiten (Lower Montane Forest LMF, Upper Montane Forest UMCF, Subalpine Cloud Forest SCF) des Untersuchungsgebietes ist der Zustand des biologischen Fließgleichgewichtes. Dies besteht dann, wenn die Raten der Anlieferung von Nährstoffen mit der Streu und der Freigabe der Nährstoffe durch die Humusmineralisation gleich groß sind und keine Nährstoff-Festlegung in einer noch wachsenden Humusaufgabe des Bodens erfolgt. Unter diesen Bedingungen kommt die Leistungsfähigkeit (die Bodenfruchtbarkeit) der Vegetationseinheiten in der Rate des zyklischen Nährstoff-Umsatzes zum Ausdruck. Die Kreisläufe werden gestört, wenn während der Mineralisation der Streu durch Auswaschung Nährstoffe versickern und damit den Kreislauf verlassen. Sie sind nur durch eine erneute Freisetzung von Nährstoffen aus dem verwitterten Gestein kompensierbar.

Der Schwerpunkt dieses Kapitels beinhaltet die (i) Quantifizierung des Nährstoffinputs durch den Streufall und die (ii) Analyse der Umsatzraten in der organischen Auflage, um die mögliche Abhängigkeit der Vegetationsverbreitung von der Nährstoffversorgung zu diskutieren.

5.2 Methodik

Streufall

In der Nähe der meteorologischen Stationen wurden in 1900 m, 2600 m und 3000 m sieben Streusammler pro Fläche nach dem Zufallsprinzip auf ca. 1 ha im Bestand aufgestellt. Der Streusammler bestand aus einem 80 cm x 80 cm großen, 10 cm hohen Holzrahmen, in den ein Plastiknetz eingespannt war (Maschenweite 1mm). Das Netz hing in der Mitte ca. 20 cm durch, so dass die Streu nicht über den Rand herausfallen konnte. Der Rahmen wurde 80 cm über dem Boden installiert.

Die Messung erfolgte von Mai 2003 bis Mai 2004. Die Streuproben wurden im 4- Wochen - Rhythmus zu je einer Probe zusammengefasst und in La Paz bei 40°C getrocknet. Nach der Trocknung erfolgte die Separierung von Laub, Ästen bis zu einem Durchmesser von 3 cm, Epiphyten, Früchten und Restsubstanz. Die getrockneten Proben wurden gewogen. Die Proben der einzelnen Kompartimente wurden nach Göttingen, Deutschland, zur weiteren Analyse transportiert.

Im physisch - geographischen Labor wurden die Proben nochmals getrocknet (40°C) und anschließend in der Pflanzenmühle gemahlen. Die gemahlenen Proben wurden mit HNO₃ in der Druckaufschluss- Apparatur analysiert (HEINRICHS ET AL. 1986). Gesamtkonzentrationen an P, Ca, K, Mg, Mn, Al, Fe, S und Zn wurden mit Hilfe der ICP-OES (Optima 4300 DV, Perkin Elmer) gemessen.

Die Stickstoff- und Kohlenstoffgehalte der Proben wurden mit Hilfe des CHN- Analysators (Leco) ermittelt.

Organische Auflage

Die Berechnung der Menge an Elementen in der organischen Auflage wurde mit Hilfe der Lagerungsdichte errechnet, die über das Trockengewicht eines aus der organischen Auflage herausgeschnittenen Quaders (20x15x15cm) ermittelt wurde (siehe 3.2.3). Die Mächtigkeit der organischen Auflage wurde an über 100 Messpunkten in 100m Höhenabschnitten gemessen.

Streuauflage (Oi- Horizont)

Zur Ermittlung der Umsatzrate wurde der Oi - Horizont der organischen Auflage im April 2003 ebenfalls in den Höhen 1900 m, 2600 m und 3000 m in der Nähe der Streusammler aufgenommen. Hierzu dienten zwanzig zufällig gewählte Flächen, jede mit einer Größe von 40 cm x 40 cm. Die gesamte Streu des Oi - Horizontes einschließlich der Äste bis zu einem Durchmesser von 3 cm wurde bis hin zu den fragmentierten Blättern aufgesammelt. Die Proben wurden in La Paz zunächst an der Luft, dann anschließend bei 60°C getrocknet und in Holz und Blattstreu getrennt. Diese beiden Anteile wurden gewogen.

Berechnungen und Statistik

Die Zersetzung oder Umsatzrate (k_{oi}) der Streufall-Menge bzw. der Nährstoffe wird über den Quotienten: $\frac{\text{Jahres - Streumenge}}{\text{Oi - Horizont Streumenge}}$

errechnet. Die Zeitdauer der Zersetzung wird über den Quotienten $\frac{1}{k_{oi}}$ bestimmt.

Zur Analyse der Varianz wurde die Methodik ANOVA verwendet, um signifikante Unterschiede zu ermitteln. Zur Korrelation wurde die lineare Regression eingesetzt. Die statistische Signifikanz wurde auf $p < 0.05$ festgelegt.

5.3 Ergebnisse

5.3.1 Organische Auflage

Die organische Auflage im LMF hat eine Mächtigkeit von durchschnittlich 15- 35 cm, nimmt im UMCF auf 25-40 cm zu und sinkt leicht auf 20-35 cm im SCF (Abb. 30)

Abb. 30 Mächtigkeit der organischen Boden-Auflage in Abhängigkeit von der Höhenlage

Maximale Mächtigkeiten der organischen Auflage sind in 2300m mit über 40 cm vorhanden. Dominierende Bodentypen sind bis 2100m Dystric Cambisols, während ab 2100m vorrangig placic Spodosols vorherrschen (siehe 3.3.2).

Die durchschnittlichen Nährstoffkonzentrationen im A-Horizont und in der organischen Auflage sind aus Tab. 5 und 6 zu ersehen.

Tab. 5 Durchschnittliche Konzentration der Elemente im A-Horizont der drei Vegetationseinheiten (Maximum- und Minimumwerte in Klammern). Im LMF sind 9 Bodenprofile, im UMCF 15 und im SCF 4 untersucht worden (n.n.: nicht nachweisbar).

	C	N	Fe	Al	Ca	K	Na	Mg	Mn	P	S	Zn
Konzentration im A-Horizont in mg g ⁻¹												
LMF	89	5.92	36	64	0.37	6.2	1.02	2.41	0.22	0.70	0.70	0.03
	(73-110)	(4.4-7.2)	(32-41)	(37-83)	(0.21-0.52)	(2.45-9.26)	(0.71-1.37)	(1.02-3.89)	(0.11-0.45)	(0.55-1.01)	(0.56-0.81)	(n.n.-0.05)
UMCF	49	2.98	10.0	24	0.26	6.3	1.20	0.85	0.12	0.21	0.28	0.01
	(5.0-144)	(0.4-9.4)	(3.9-32)	(11-44)	(0.16-0.35)	(2.1-10.4)	(0.65-2.3)	(0.13-1.64)	(n.n.-0.25)	(0.07-0.5)	(0.13-0.6)	(n.n.-0.03)
SCF	82	2.74	5.4	35	0.40	10.3	1.30	1.05	0.10	0.19	0.31	0.003
	(28-172)	(1.2-4.2)	(3.5-6.8)	(15-55)	(0.14-0.94)	(4.8-17)	(1.2-1.5)	(0.37-1.63)	(n.n.-0.16)	(0.13-0.23)	(0.19-0.53)	(n.n.-0.1)

Tab. 6 Durchschnittliche Konzentration der Elemente in der organischen Auflage in den drei Vegetationseinheiten (Maximum- und Minimumwerte in Klammern). Im LMF sind 13 organische Auflagen, im UMCF 24 und im SCF 6 aufgenommen worden (n.n.: nicht nachweisbar). Signifikante Unterschiede (nach Anova, $p < 0.05$) oder Gemeinsamkeiten zwischen den drei Vegetationseinheiten bei den aufgeführten Parametern wurden durch die Buchstaben ^{a, b, c} bzw. ^{ab} differenziert.

	C	N	Fe	Al	Ca	K	Na	Mg	Mn	P	S	Zn
Konzentration in der organischen Auflage in mg g ⁻¹												
LMF	431	27^a	2.7	7.3	0.46	1.43	0.44	0.79^a	0.13	0.8	2.62^a	0.01
	(372-480)	(22-31)	(1.38-6.1)	(2.39-15)	(0.1-1.66)	(0.63-2.97)	(0.17-0.78)	(0.26-1.86)	(n.n.-1.09)	(0.51-1.41)	(2.2-2.96)	(n.n.-0.04)
UMCF	444	22^b	2.2	5.8	0.27	1.5	0.61	0.42^b	0.04	0.7	2.1^b	0.02
	(377-510)	(15-27)	(0.91-4.1)	(1.98-10)	(0.05-0.98)	(0.49-3.3)	(0.2-1.91)	(0.13-1.05)	(n.n.-0.29)	(0.44-1.14)	(1.75-2.55)	(n.n.-0.05)
SCF	439	16^c	1.7	6.2	1.33	1.76	0.57	0.67^{ab}	0.22	0.57	1.25^b	0.01
	(409-474)	(10-25)	(1.17-2.5)	(2.11-11)	(0.15-3.3)	(1.11-2.45)	(0.29-0.85)	(0.47-1.16)	(0.01-0.69)	(0.34-1)	(0.99-1.9)	(n.n.-0.03)

Die Konzentrationen an N, P, S, Fe und Al in der organischen Auflage sinken kontinuierlich von LMF über UMCF zu SCF (siehe Tab. 6). Die Ca -Konzentrationen im SCF sind signifikant höher als im LMF oder im UMCF (Anova, $p > 0.05$). Die N- Konzentrationen sinken in jeder Vegetationseinheit signifikant. Die S-Konzentrationen sind im LMF signifikant höher als im UMCF und im SCF. Zwischen dem LMF und dem UMCF sinken die Mg-Konzentrationen, während sich die Mg- Konzentrationen im SCF von den unteren beiden Einheiten nicht signifikant unterscheiden.

Der Vergleich der Nährstoffkonzentrationen zwischen der organischen Auflage und den entsprechenden A-Horizonten zeigt, dass die Gehalte an C, N, Ca, P und S in der organischen Auflage höher sind, die von Fe, Al, K, Na und Mg dagegen höher im A-Horizont. Der Vergleich der Vorräte an Nährstoffen zeigt: In der organischen Auflage sind bei allen Elementen die höchsten Mengen im UMCF gespeichert (siehe Tab. 15). Es bestehen keine signifikanten Unterschiede (Anova, $p > 0.05$) zwischen dem LMF und dem SCF mit Ausnahme von Ca und Mn, wo im SCF signifikant höhere Mengen vorhanden sind.

Im UMCF liegen signifikant höhere Mengen bei N, P und S vor als im SCF. Die organischen Auflagen des SCF haben signifikant höhere Mengen an Ca und Mn als im UMCF.

5.3.2 Streumenge und Streurate

Der gesamte jährliche Streufall liegt im LMF bei $12.2 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Sie sinkt im UMCF um 57% auf $5.3 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und von dort um 12% zum SCF auf $4.7 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (siehe Tab. 7). Der Rückgang in der Gesamt – Streufall - Rate und in der Laubfall-Rate zwischen dem LMF und den höher liegenden Vegetationseinheiten ist signifikant (Anova, $p < 0.05$), während sich UMCF und SCF nicht signifikant voneinander unterscheiden.

Der zeitliche Verlauf des Streufalls innerhalb des Jahres ist in den einzelnen Vegetationseinheiten sehr unterschiedlich. Die größten Schwankungen sind im LMF vorhanden, während im UMCF der gleichmäßigste Streufall vorliegt (siehe Abb. 31). Die maximale Streufall -Rate im LMF im Oktober 2001 ist 2.9 mal so hoch wie der Durchschnitt, während im UMCF die maximale Monatsrate nur 1.3 mal (November) und im SCF 1.4 mal (Dezember) so hoch wie der Durchschnittswert ist.

Der Laubfall dominiert den jährlichen Streufall und dessen Verlauf. Der Anteil des Laubes an der gefallenem Streu beträgt in allen drei Vegetationseinheiten etwa 70% (LMF 71%, UMCF 69%, SCF 69%). Die Jahresrate gefallenem Laubes sinkt von $8.1 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ im LMF auf $3.5 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ im UMCF bzw. $3.2 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ im SCF.

Die Streumengen an Holz und Rest sinken vergleichbar mit dem Laub mit zunehmender Höhe. Ihr Anteil an der Gesamtstreu beträgt 11-16 %. Ähnlich dem Jahresverlauf des Laubstreu hat auch der Verlauf von Holz - und Reststreu die maximalen Einträge im Oktober am Ende der Trockenzeit.

Die Jahresrate des Eintrags an Früchten sinkt von $0.13 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ im LMF auf $0.11 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ im UMCF und steigt dann wieder vom UMCF zum SCF um 135% auf $0.25 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Der Anteil der Früchte an der Streu steigt von 1 % im LMF auf 3% im UMCF und auf 5% im SCF.

Im Jahresgang zeigt sich, dass im UMCF die Rate des Fruchtefalls mit einem Eintrag von $0.24 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ während des Junis ihr Maximum hat, sie steigt im SCF von Juni bis August

kontinuierlich auf $0.21 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ an. Der späteste Zeitpunkt der maximalen Rate ist im LMF im Oktober mit $0.12 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ gegeben. (siehe Abb. 31)

Die Jahresrate des Epiphyten - Eintrages ist im UMCF am höchsten ($0.26 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Sie sinkt zum LMF auf $0.12 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und zum SCF auf $0.03 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Der Jahresverlauf ist sehr heterogen und zeigt keinen einheitlichen Trend. Im UMCF ist eine erhöhte Rate des Epiphyten- Streufalls während der Trockenzeit (Juli) und zu Beginn der Regenzeit (Sept-Nov.) gegeben. Epiphyten haben jedoch nur einen sehr geringen Anteil an der Gesamtstreu. Im UMCF liegt er bei 4.6 % und sinkt im LMF auf 1.1 % bzw. im SCF auf 1.6 %.

Tab. 7 Jahresraten der Gesamt-Streumenge (in $\text{t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) und ihrer Anteile an Laub, Holz und Rest und die Masse des Oi- Horizontes (in t ha^{-1}) im internationalen Vergleich. Hinzu kommt der Quotient von Jahres- Streueintrag durch Gesamtmenge Oi-Horizont (koi) und von Jahres- Nichtholzeintrag in der Streu durch Nichtholzmenge im Oi- Horizont (k_i).¹ eigene Untersuchung, ² STEINHARDT (1976), ³ VENEKLAAS (1991), ⁴ HAFKENSCHIED (2000).

Ort	Waldtyp	Höhe	Blätter	Holz	Rest	Gesamt	Anteil	Oi- Hor.	Oi-Hor.	k _L	Koi
		in m ü.M.					Laub	Laub	Gesamt		
				t ha ⁻¹ a ⁻¹							
Bolivien ¹	LMF	1900	8.1	2.5	1.6	12.2	71	3.8	5.7	2.6	2.1
Bolivien ¹	UMCF	2600	3.5	0.8	1.0	5.3	69	4.2	6.0	1.1	0.9
Bolivien ¹	SCF	3050	3.2	0.7	0.8	4.7	69	4.6	6.3	0.9	0.7
Venezuela ²	LMF	2300	3.4	2.3	1.1	7.0	49		38.0		0.2
Kolumbien ³	LMF	2550	4.6	1.0	1.1	7.0	66				
Kolumbien ³	UMCF	3370	2.8	0.8	0.5	4.3	65				
Weltweit ⁴	LMF	500 - 2000	2.3 - 8.4	0.3 -	0.4 -	3.6 - 11	52 - 96	2.4 - 11	4.2 - 11	0.67 -	0.56 -
				3.2	2.1						
Weltweit ⁴	UMF	2000 - 3370	3.4 - 6.5	0.7 -	0.5 -	4.3 - 7.4	49 - 87	3.7 - 6.1	6.3 -	1.07 -	0.18 -
				2.3	1.1						

5.3.3 Streu- Auflage (Oi - Horizont) und deren jährliche Zersetzung

Streu- Auflage (Oi-Horizont)

Die Masse des Oi - Horizontes, d.h. der Streu, die noch nicht oder nur gering zersetzt auf der Bodenoberfläche liegt, ist im UMCF maximal. Sie steigt von 5.9 t ha^{-1} im LMF auf 6.3 t ha^{-1} im UMCF und sinkt wieder leicht zum SCF auf 6.1 t ha^{-1} . Der Feinstreuanteil (Laub, Früchte, Epiphyten, Rest) steigt ebenfalls von 3.6 t ha^{-1} auf 4.1 t ha^{-1} bzw. 3.9 t ha^{-1} , wohingegen der Holzanteil in den Vegetationseinheiten mit 2.3 t ha^{-1} und 2.2 t ha^{-1} bzw. 2.3 t ha^{-1} sehr konstant ist. Der Anteil des Holzes am Gesamtstreu des Oi- Horizontes liegt zwischen 35% und 39%.

Beim Vergleich der Elementkonzentrationen der aufgefangenen Laubstreu mit der Konzentration im Feinstreuanteil des Oi - Horizontes (Tab. 10, 12) wird deutlich, dass die durchschnittlichen Gehalte an Ca, K, und Mg in der Laubstreu höher als im Oi-Horizont sind. N, P und S sind annähernd gleich. Fe-, Al- und Zn- Konzentrationen sind im Laubfall niedriger als im Oi-Horizont. Mn ist bei LMF und UMCF niedriger im Laubfall als im Oi-Horizont, während sie im SCF höher sind.

Der Vergleich der Elementvorräte des Oi- Horizontes zeigt (Tab. 13), dass trotz größerer Mächtigkeiten des Oi-Horizontes im UMCF und im SCF die Nährstoffvorräte in kg ha^{-1} mit Ausnahme von Zn, Fe und Na im LMF am höchsten sind, was auf den höheren Nährstoffkonzentrationen beruht.

Die jährliche Zersetzungsrate der anfallenden Streu

Die im Oi-Horizont enthaltene gesamte Streumenge beträgt in Prozent der jährlichen Streufallmenge bei LMF 48%, beim UMCF 110% und beim SCF 132%. Daraus ergibt sich der Zersetzungsquotient (Verhältnis zwischen dem jährlichen Streueintrag und der Menge an Streu auf der Oberfläche des Bodens = k_{oi}), bzw. die Zeitdauer der Zersetzung ($1/k_{oi}$). Über den Quotienten k_{oi} wird die Mobilität der Nährstoffe, d.h. die mineralisationsbedingte Freigabe der Nährstoffe dargestellt. Je höher der Quotient ist, desto schneller erfolgt die Nährstoffmineralisierung.

Der Zersetzungsquotient sinkt von 2.06 im LMF und 0.84 im UMCF auf 0.76 im SCF, d.h. die Zersetzungszeit beträgt 0.5 Jahre im LMF, 1.2 Jahre im UMCF und 1.3 Jahre im SCF. Der Quotient der Laubstreu (k_l) ändert sich von 2.70 im LMF auf 1.10 im UMCF und 1.02 im SCF, d.h. dass die Streu aus Laub und reproduktiven Teilen schneller zersetzbar ist als die der Gesamtstreuauflage. Sie sinkt aber wie bei der Gesamtstreuauflage mit zunehmender Höhe.

Der Zersetzungsquotient des Holzanteils ist in den Vegetationseinheiten wesentlich niedriger mit 1.07 (LMF), 0.35 (UMCF) und 0.32 (SCF).

Abb. 31 Monatlicher Streufall (in $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$) im Untersuchungszeitraum Mai 2003 bis Mai 2004 in den drei Vegetationseinheiten LMF, UMCF und SCF, untergliedert in die Anteile an Laub, Holz, Früchten, Epiphyten und Rest.

5.3.4 Nährstoffkonzentrationen

Laubstreu

Die gewichtsbezogene Konzentration der Elemente in der Laubstreu ist in Tab. 10 aufgeführt. Vom LMF zu den höheren Vegetationseinheiten hin nehmen die Gehalte der untersuchten Elemente in der Laubstreu mit Ausnahme von Mn, Fe und C generell ab. Die Unterschiede sind mit Ausnahme von Al, Fe, Na und Zn signifikant ($p < 0.05$, Anova).

Der höchste Rückgang an Nährstoff-Konzentration erfolgt von LMF zu UMCF bzw. SCF bei den Elementen Stickstoff (LMF - UMCF 39%, LMF - SCF 45%), Schwefel (43%, 43%), Kalium (40 %, 25%) und Magnesium (40%, 32%).

Die Unterschiede in der Elementkonzentration zwischen UMCF und SCF zeigen keine einheitliche Tendenz. Während z.B. die Nährstoffe N, P im SCF gegenüber UMCF abnehmen, steigen die Konzentrationen von Ca, K und Mg zum SCF hin an. Mit Ausnahme von Mn sind aber die Unterschiede nicht signifikant ($p < 0.05$, Anova).

Zusammenfassend finden sich die höchsten Elementkonzentrationen der Laubstreu beim LMF mit Ausnahme von Mn, Fe und C, während sich die Nährstoffkonzentrationen zwischen UMCF und SCF nicht signifikant unterscheiden und bei den Elementkonzentrationen keine einheitliche Tendenz besteht.

Im Monatsablauf sind in der Laubstreu deutliche Unterschiede der Nährstoffkonzentrationen festzustellen. Stickstoff-, Phosphor- und Schwefelgehalt korrelieren in allen drei Vegetationseinheiten signifikant miteinander ($p > 0.05$, lineare Regression) (siehe Abb. 32). Dabei sind die N, P und S- Gehalte im UMCF relativ konstant, während sich bei LMF und SCF zwischen August und Oktober gegensätzliche Entwicklungen abzeichnen. Im LMF sinken die Nährstoffwerte und im SCF steigen sie im gleichen Zeitraum an. Auch bei Ca und Mg sinkt die Konzentration der Laubstreu bei LMF kontinuierlich während der Trockenzeit und pendelt sich ab September auf ein wesentlich niedrigeres Niveau während der Regenzeit ein. Im SCF ist im gleichen Zeitraum eine leichte Erhöhung der Ca- und Mg-Werte festzustellen.

K und Mg korrelieren positiv im UMCF und im LMF. Im LMF korrelieren K und Mg zudem noch mit Ca und Al. C und Mg korrelieren im LMF und im UMCF positiv.

Tab. 8 Durchschnittliche Konzentrationen (dick gedruckt) in der aufgefangenen Streu (in mg g⁻¹), gegliedert nach Laub, Holz und Res in den Vegetationseinheiten LMF, UMCF und SCF. Die Standardabweichungen sind unter den Durchschnittswerten angegeben.

	C	N	P	Ca	K	Mg	Al	SiO ₂	S	Fe	Na	Mn	Zn	
Konzentration in Streufractionen in mg g ⁻¹														
Laub	LMF	0.47^a	17.75^a	0.88^a	10.73^a	3.86^a	3.97^a	1.33	25.05^a	1.49^a	0.22	0.09	0.68^a	0.02
		0.01	2.70	0.11	1.58	1.20	0.69	0.28	6.60	0.21	0.06	0.05	0.08	0.01
	UMCF	0.49^b	10.85^b	0.61^b	7.09^b	2.32^b	2.38^b	1.31	5.34^b	0.85^b	0.13	0.07	0.45^b	0.02
	0.01	0.49	0.06	0.53	0.52	0.24	1.17	2.55	0.06	0.03	0.03	0.05	0.02	
SCF		0.48^{ab}	9.71^b	0.57^b	8.59^b	2.88^{ab}	2.69^b	1.00	13.42^c	0.85^b	0.23	0.08	0.78^a	0.02
		0.01	4.49	0.19	1.37	0.81	0.54	0.46	5.60	0.29	0.17	0.03	0.17	0.01
Holz	LMF	0.46^a	12.94^a	0.54^a	8.32^a	3.18	3.05	0.76	13.79^a	1.03^a	0.14	0.07	0.65^a	0.03^a
		0.01	2.20	0.15	1.36	1.74	0.64	0.51	5.70	0.18	0.02	0.03	0.15	0.01
	UMCF	0.47^b	6.63^b	0.32^b	5.72^b	1.69	1.91	1.46	6.39^b	0.52^b	0.19	0.08	0.37^b	0.01^b
	0.02	1.77	0.10	2.33	1.01	1.62	2.65	4.64	0.17	0.14	0.05	0.15	0.01	
SCF		0.48^{ab}	7.91^b	0.44^{ab}	7.62^{ab}	3.03	2.00	0.57	7.16^b	0.65^b	0.20	0.08	0.67^a	0.01^b
		0.01	2.99	0.08	1.18	2.54	0.56	0.24	2.80	0.16	0.07	0.03	0.14	0.01
Rest	LMF	0.46^a	25.69^a	1.53^a	9.61^a	5.65	4.24^a	1.76^a	27.88	2.08	0.48	0.13	0.65	0.04^a
		0.01	2.25	0.21	1.32	2.01	0.47	0.38	8.97	0.15	0.13	0.07	0.21	0.01
	UMCF	0.47^{ab}	13.25^b	0.98^b	6.93^b	5.03	2.66^b	1.17^{ab}	15.95	1.16	0.43	0.11	0.49	0.01^b
	0.01	0.86	0.23	2.33	5.57	0.59	0.61	10.53	0.22	0.28	0.05	0.17	0.01	
SCF		0.47^b	12.56^b	0.77^b	7.41^{ab}	4.06	2.25^b	0.96^b	16.45	0.92	0.31	0.11	0.65	0.02^b
		0.02	4.97	0.23	1.97	2.57	0.65	0.56	13.42	0.34	0.17	0.05	0.20	0.01

Reststreu

Die höchsten Elementkonzentrationen (Tab. 8) finden sich tendenziell in der aufgefangenen Streufraktion „Rest“. Hier sinkt der Gehalt an allen Elementen mit zunehmender Meereshöhe vom LMF zum SCF ab. Zwischen dem UMCF und dem SCF sind jedoch keine signifikanten Unterschiede vorhanden.

Die monatlichen Schwankungen in der Konzentration von N, P, S, Ca und Mg in der Reststreu ähnelt sehr denen der Laubstreu, sind jedoch nicht signifikant. Zwischen LMF und SCF ist wieder der gegensätzliche Zeitgang der Nährstoffe ab August zu erkennen. Die ansteigenden Konzentrationen im SCF korrespondieren mit abfallenden Werten im LMF.

Es korrelieren signifikant in der Reststreu bei LMF und SCF die Elemente K, Na und Mn untereinander und Al und Mn miteinander.

Holzstreu

Die Holzfraktion hat tendenziell die geringsten Elementkonzentrationen (Tab.8). Auch sind die Unterschiede zwischen LMF und den höheren Vegetationsstufen am schwächsten. Im Vergleich von UMCF mit SCF sind keine einheitlichen Tendenzen zu erkennen, wobei auffällt, dass im Gegensatz zur Laubstreu und zur Reststreu beim Holz im SCF leicht höhere Konzentrationen von N, P und S vorhanden sind als im UMCF.

Im Holz korrelieren wie bei der Laubstreu im LMF und im UMCF die Elemente N, P und S signifikant miteinander. In allen drei Waldtypen zeigen N und S einen signifikanten Zusammenhang.

Ähnlich der Laubstreu zeigt sich bei LMF und UMCF ein Zusammenhang zwischen K und Mg.

Ein Zusammenhang zwischen Nährstoffkonzentrationen und Menge der aufgefangenen Streu ist möglicherweise in deren Laubanteil im UMCF (r^2 0.82 $P < 0.05$) und bei SCF (r^2 0.59 $P < 0.05$) beim Element Phosphor vorhanden, sowie im Reststreu- Anteil bei Stickstoff von LMF (r^2 0.77 $P < 0.05$) und bei dem Laubstreu- Anteil von UMCF (r^2 0.66 $P < 0.05$).

Abb. 32 Monatliche Schwankungen der Elementkonzentrationen in den Laubstreu- Anteil der von Mai 2003 bis Mai 2004 aufgefangenen Streu bei LMF (schwarze Kreise), UMCf (weiße Kreise) und SCF (schwarze Dreiecke). Alle Elemente sind in mg g^{-1} angegeben mit Ausnahme von C (g g^{-1}).

Abb. 33 Monatliche Schwankungen der Elementkonzentrationen in dem Reststreu – Anteil der von Mai 2003 bis Mai 2004 aufgefangenen Streu im LMF (schwarze Kreise), UMCf (weiße Kreise) und SCF (schwarze Dreiecke). Alle Elemente sind in mg g^{-1} angegeben mit Ausnahme von C (g g^{-1}).

Abb. 34 Monatliche Schwankungen der Elementkonzentrationen Ca, Mg und K in dem Laubstreu-Anteil und in dem Reststreu-Anteil der von Mai 2003 bis Mai 2004 aufgefangenen Streu im LMF (schwarze Kreise), UMC (weiße Kreise) und SCF (schwarze Dreiecke). Alle Elemente sind in mg g^{-1} angegeben.

5.3.5 Nährstoffumsatz

Der Vergleich der Jahresnährstoffmengen, die über die Streu eingetragen wurden, zeigt gemäß Tab. 11, dass diese bei LMF drei bis viermal so hoch sind wie in den Vegetationseinheiten UMCF und SCF. Die größten Unterschiede bestehen in der Gesamtstreu bei N (74% LMF - UMCF, 79% LMF - SCF), S (75%, 78%), Zn (76%, 77%) und Mg (73%, 75%). Die größten Differenzen bestehen bei allen drei Streu- Fraktionen in den Elementmengen von N, S und Zn.

Die Unterschiede zwischen UMCF und SCF sind wesentlich geringer. Am deutlichsten ist der Rückgang der Elementmengen bei Al (37%), N (18%), P (19%) und S (15%). Im SCF nehmen Mangan (47%) und Kalzium (6%) zu.

Die höchsten Jahresmengen an Nährstoffen, die über die abfallende Streu den Vegetationseinheiten zugeführt werden, betreffen N und Ca, gefolgt von K, Mg und S (siehe Tab. 11).

Der Unterschied in den Nährstoff- Jahresraten nivelliert sich dagegen deutlich , wenn man sie mit den Nährstoffmengen vergleicht, die in der in Zersetzung befindlichen Streu auf der Bodenoberfläche (Oi Horizont, Tab. 13) vorliegen. Der Unterschied zwischen diesen Nährstoffmengen bei LMF gegenüber UMCF und SCF beträgt nur noch das 1.2 - fache.

Beim Vergleich der Nährstoffmengen in der Oi - Auflage mit denen des Jahres-Streueintrages zeigt sich folgender Umsatz: Die durchschnittliche Zersetzungszeit ($1/k_{oi}$) für alle untersuchten Elemente steigt von 0.3 Jahren im LMF auf 1.0 Jahre im UMCF und 1.1 Jahre im SCF an.

Die längste Zeitdauer für die Zersetzungsdauer ist im SCF gegeben, mit Ausnahme von Fe, Mn und Zn, die ihre längste Zersetzungszeit im UMCF finden. Die größten Unterschiede in der Zersetzungsdauer bestehen zwischen LMF und SCF bei Zn (1.7 Jahre Differenz), bei Al und Fe bzw. bei N, P und S (jeweils 0.7 Jahre Differenz).

Die höchste „Mobilität“ der Nährstoffe, d.h. die schnellste Zersetzung ist bei den Makronährstoffen K, Mg und Ca gegeben, gefolgt von P und S und zwar in allen drei Höhenstufen. Fe ist im LMF und im UMCF und Zn im SCF am stärksten gebunden.

Das C/N Verhältnis der Feinstreu vom Laub des Oi Horizontes ist geringfügig kleiner als das C/N Verhältnis der aufgefangenen Laubstreu. Bei C/S und C/P ist das Verhältnis größer im Oi- Horizont als im Laubstreufall.

Im Vergleich zwischen dem Abbau der gesamten Streu mit dem Abbau einzelner Elemente zersetzt sich Kalium 2 bis 3 - fach und Magnesium 2 - fach so schnell wie die Streu in allen Vegetationseinheiten. Während Ca, P und S sich ungefähr 1.5 - fach so schnell zersetzt, gleicht die Stickstoffzersetzung sehr dem Streuabbau, bzw. der C-Zersetzung.

Bei N, Ca, K, Mg, Al, Fe, Mn wächst das Verhältnis zwischen Elementverlust und Streuzersetzung mit zunehmender Höhe, d.h. die Streu baut sich langsamer ab als die Nährstoffe freigesetzt werden.

Tab. 9 Reihenfolge der „Mobilität“, d.h. der Zersetzungsrate der untersuchten Elemente in den drei Vegetationseinheiten LMF, UMCF und SCF.

LMF:	K>	Mg>	S>	P>	Ca>	Zn>	C>	Mn>	N>	Na>	Al>	Fe
UMCF:	K>	Mg>	Ca>	P>	S>	Al>	C>	N>	Mn>	Na>	Fe>	Zn
SCF:	K>	Mg>	Ca>	P>	S>	Mn>	Fe>	Al>	N>	C>	Na>	Zn

5.4 Diskussion

5.4.1 Organische Auflage

Die Mächtigkeit des Auflagehumus steigt kontinuierlich zwischen 1700m und 2300m an und sinkt zwischen 2300m und 3400m mit kleinen Unterbrechungen wieder ab. Diese Ergebnisse stehen im Gegensatz zu Untersuchungen in anderen ähnlichen Bergnebelwäldern (WILCKE ET AL. 2002, GRIEVE ET AL. 1990, VENEKLAAS 1991), die eine mit der Höhe weiter fortschreitende Mächtigkeit der organischen Auflage festgestellt haben. Die zitierten Untersuchungen sind jedoch nur begrenzt vergleichbar, da die Transekte nicht bis in die Höhenstufen erfolgt sind, wie in der vorliegenden Untersuchung.

Vergleicht man den Verlauf des C/N- Verhältnisses, der Bodenfeuchte und der Bodentemperatur, so wäre eine kontinuierliche Zunahme der organischen Auflage aufgrund verlangsamter Mineralisierung zu erwarten. Ein Zusammenhang zwischen der Konzentration an Aluminium im O - und A-Horizont und der organischen Substanz, die möglicherweise verwitterungsresistente Komplexe bilden, konnte nicht festgestellt werden.

Die Mächtigkeit der organischen Auflage ist durch die Zuwachsrates der Vegetation bedingt. Die Zuwachsrates der Vegetation kann über den Streufall ausgedrückt werden (RAICH & NADELHOFFER 1989). Unter Einbeziehung der Zuwachsrates der Vegetation scheint sich in 2300m Höhe durch die Kombination von relativ hoher Streuproduktion und geringer Mineralisierung die höchste Akkumulation an organischer Auflage zu entwickeln. Nach FÖLSTER & FASSBENDER (1978) wird die Produktion der mit der Streu angelieferten

organischen Substanz durch die abnehmende Temperatur bei zunehmender Höhe weniger reduziert als die Abbaurate der organischen Substanz auf dem Boden.

Die Mineralisierung, ausgedrückt durch das C/N - , C/P - und C/S – Verhältnis, nimmt mit zunehmender Höhe kontinuierlich ab (Tab. 6). Eisen - und Aluminiumkonzentrationen nehmen ebenso mit zunehmender Höhe ab, bedingt durch hydromorphe bzw. podsolige Bedingungen im UMCF und im SCF. Diese Bedingungen führen zu einer Verlagerung von Fe und Al in tiefere Bodenschichten, verursacht durch die Bildung organischer Komplexe (siehe 3.3.6). Die Nährstoffmengen der organischen Auflagen (Tab. 15) liegen in der Varianz der Nährstoffmengen der organischen Auflagen an der Anden - Ostabdachung Ecuadors (WILCKE ET AL. 2002).

Die größten Nährstoffmengen sind in der organischen Auflage des UMCF akkumuliert. Der Vergleich zwischen dem SCF und dem LMF im Untersuchungsgebiet zeigt, dass signifikant größere Mengen an Ca und Mn im SCF vorhanden sind, während bei den übrigen Elementen vergleichbare Quantitäten bestehen.

Die geringere Nährstoffkonzentration in den oberen Vegetationseinheiten wird durch die höhere Mächtigkeit der Auflage ausgeglichen. Der höhere oder gleiche Vorrat an Nährstoffen in den oberen Vegetationseinheiten zeigt, dass die Änderung der Vegetation in Artenzahl und Bestandsstruktur nicht durch einen absoluten Nährstoffmangel bedingt ist.

5.4.2 Streufall

Die jährliche Rate (Menge : Zeit) an aufgefangener Gesamt- Streu liegt im LMF mit $12.2 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ höher als die im ecuadorianischen Bergregenwald an der Anden - Ostabdachung, wo Mengen von $8.5 \text{ bis } 9.7 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ gemessen wurden (WILCKE ET AL. 2002). Im Vergleich mit weiteren Studien über tropische Bergregenwälder (siehe Tab. 7) liegt der Wert des LMF des Untersuchungsgebietes auch über dem Maximalbereich der Streumengen- Raten, die mit $3.6\text{-}11 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (HAFKENSCHIED 2000, BRUIJNZEEL & PROCTOR 1995) angegeben worden sind. Die Biomassenproduktion im LMF des Untersuchungsgebietes ist ähnlich den Streufallmengen im tropischen Tieflandsregenwald ($7.5 - 13.3 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, PROCTOR 1987).

Die Streuraten des UMCF ($5.3 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) sind niedriger als im venezolanischen Bergregenwald, wo $6.97 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ von STEINHARDT (1979) gemessen wurden oder als in Kolumbien mit $7.03 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, von VENEKLAAS (1991) ermittelt. Sie stimmen jedoch sehr gut mit Messungen aus Costa Rica überein, wo $5.3 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ gemessen wurden (HEANEY & PROCTOR 1989).

Die Streuraten in 3050m Höhe im SCF ($4.67 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) ähneln den Streuraten im kolumbianischen Bergregenwald in 3370 m mit $4.37 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (VENEKLAAS 1991).

Während die maximale Streufall-Rate im LMF im Oktober am Ende der relativen Trockenzeit gegeben ist, die auch durch andere Untersuchungen bestätigt wird (BRUIJNZEEL 1983, TANNER 1980, PROCTOR ET AL 1989, PENDRY & PROCTOR 1996), erfolgt diese im UMCF und im SCF während der Regenzeit (November, Dezember) (STEINHARDT 1979, WEAVER ET AL 1986, VENEKLAAS 1991).

Die Verstärkung des Streufalls zum Ende der Trockenzeit deutet auf Trockenstress der Pflanzen hin, die auch durch die Nährstoffverlagerung in der Pflanze (siehe Nährstoffkonzentration) ersichtlich wird. Die höheren Monatsraten des Streufalls im UMCF und im SCF sind hier wahrscheinlich bedingt durch die intensiven Niederschläge während der Regenzeit, d.h. primär mechanisch und weniger physiologisch begründet (VENEKLAAS 1991).

Der Fall von Ästen im LMF ($2.48 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) ähnelt den $2.3 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, die in Venezuela gemessen wurden (STEINHARDT 1979), liegt jedoch bei weiteren Literaturvergleichen in entsprechenden LMF's weit über deren Maximalbereich von 0.9 bis $1.6 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Die Werte für UMCF ($0.77 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) und SCF ($0.71 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) sind in den mittleren Bereich der UMCF ($0.2 - 0.9 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) einzuordnen.

Der Fruchtefall zeigt unterschiedliche Reproduktionsphasen der einzelnen Vegetationseinheiten an. Die Phase maximalen Fruchtefalls beginnt im UMCF im Juni, im SCF dagegen im August und im LMF im Oktober. Der prozentuale Anteil der Früchte an der Gesamtstreu steigt mit zunehmender Höhe, bedingt durch die größeren und schwereren Früchte in höheren Gebieten und die absolute Abnahme der Gesamtstreu mit zunehmender Höhe.

Epiphytischer Streufall ist mit $261 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ im UMCF am höchsten und hat auch den höchsten relativen Anteil am gesamten Streufall mit 4.6% . Die absolute Menge gleicht den Ergebnissen aus Kolumbien und Venezuela, die eine Epiphyten-Streureate von $230 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ gemessen haben (VENEKLAAS 1991, STEINHARDT 1979).

Im Jahresverlauf ist eine erhöhte Rate des Epiphytenfalls während oder nach der Trockenzeit vorhanden. Dieses ist möglicherweise durch das Austrocknen von Epiphyten an strahlungszugewandten Standorten im Kronenraum bedingt und durch deren anschließendes Abfallen.

Der nur geringe Anteil der Epiphyten am gesamten Streufall zeigt, dass der Eintrag der Nährstoffe über die Epiphyten nur eine verhältnismäßig geringe Bedeutung hat (HAFKENSCHIED 2000), trotz der sehr großen Mengen an Nährstoffen, die direkt in dem Kronenraum durch die Epiphyten gebunden sind und welche die Mengen an Nährstoffen im Streufall um ein Vielfaches übertreffen (HOFSTEDTE, WOLF & BENZING 1993).

Die signifikant abnehmende Streufallrate zwischen dem LMF und den höheren Vegetationseinheiten in Höhe von 57% (UMCF) bzw. 62% (SCF) spiegelt die abnehmende

Produktivität der Vegetation mit zunehmender Höhe (VENEKLAAS 1991) wider. Diese Abnahme erfolgt jedoch nicht kontinuierlich. So sind die Unterschiede in der Produktivität zwischen dem UMCF und dem SCF nur geringfügig.

5.4.3 Streu – Auflage (Oi-Horizont) und deren jährliche Zersetzung

Der Vergleich mit weiteren tropischen Bergregenwäldern zeigt, dass die Streumengen im Oi-Horizont vom LMF zum SCF (5.9 t ha^{-1} bis 6.3 t ha^{-1}) in der Mitte der Spanne von 4.3 t ha^{-1} bis $10\text{-}11 \text{ t ha}^{-1}$ liegen (HAFKENSCHIED 2000). Die methodischen Unterschiede, z.B. aus welchem Teil der organischen Auflage Proben entnommen wurden, machen jedoch einen direkten Vergleich schwierig.

Der durchschnittliche Anteil des Fallholzes an der gesamten Oi Auflage liegt mit Werten von 35 bis 39 % im Literaturvergleich innerhalb der dort angegebenen Spanne von 36- 48% (HAFKENSCHIED 2000).

Die höchste Menge an Streu-Auflage- Material ist im UMCF mit 6.3 t ha^{-1} vorhanden. Sie spiegelt damit die Mächtigkeiten der organischen Auflagen wieder (siehe 5.4.1). Die Akkumulation ist im UMCF aufgrund der relativ hohen Primärproduktion und der relativ geringen Mineralisierungsrate der Streu am höchsten.

Zersetzung

Streuqualität, Bodentemperatur, Bodenfeuchte und Phenolkonzentration in der Streu sind mögliche Ursachen für die Abbaurate der organischen Auflage (GRUBB 1977, MARRS ET AL. 1988, BRUIJNZEEL 1993, STEINHARDT 1979). Der Quotient aus jährlicher Streufall- Rate (Menge/Jahr) und Streumenge des Oi - Horizontes ergibt unter der Voraussetzung, dass ein Fließgleichgewicht zwischen Zu- und Abfuhr besteht, die Umsatzrate k_{oi} . Andere tropische Bergregenwälder haben Werte von 0.56 bis 2.2 (HAFKENSCHIED 2000). In der vorliegenden Studie sinkt der k_{oi} - Wert sehr deutlich von 2.1 im LMF auf 0.8 im UMCF und im SCF. Abnehmende k_{oi} - Werte sind mit zunehmender Höhe auch auf dem Volcán Bravo, Costa Rica festgestellt worden (HEANEY & PROCTOR 1989) bzw. in Bukit Belalong, Brunei (PENDRY & PROCTOR 1996). Die Zeitdauer der Zersetzung von 0.5 Jahren im LMF auf 1.2 Jahre im UMCF und 1.3 Jahren im SCF zeigt signifikante Unterschiede zwischen dem LMF und den höher liegenden Vegetationseinheiten, während die Differenzen zwischen UMCF und SCF nur sehr gering sind.

5.4.4 Nährstoffkonzentrationen

Die Nährstoff – Konzentrationen in der Laubstreu des LMF liegen im Untersuchungsgebiet (Tab. 10) bei weltweitem Literaturvergleich im Maximalbereich (HAFKENSCHIED 2000, BRUIJNZEEL & PROCTOR 1995) mit Ausnahme von Ecuador (WILCKE ET AL. 2002). Die Elementkonzentrationen, die in Loja, Ecuador gemessen wurden, stimmen gut mit den hier vorliegenden Werten überein. Methodische Unterschiede in der Auffangtechnik der Streu, Unterschiede in der Wahl der Fraktionen und der Analysemethoden machen einen Vergleich schwierig (PROCTOR 1983, HAFKENSCHIED 2000). Da in Ecuador die gleiche Aufschlussmethode wie in dieser Untersuchung verwendet wurde (HEINRICHS ET AL. 1986), bietet sich ein direkter Vergleich an. Die Werte in Ecuador sind tendenziell leicht höher als im LMF des Untersuchungsgebietes mit Ausnahme von N, Al und Mn.

Die analysierten Konzentrationen lassen sich mit den vorwiegend fruchtbaren vulkanischen Böden vergleichen, z.B. Monteverde Costa Rica (NADKARNI & MATELSON 1992), Volcan Brava, Costa Rica (HEANEY & PROCTOR 1989) oder Zentral Java Indonesien (Bruijnzeel 1983). Sie sind dagegen höher als auf den stärker verwitterten Sedimentböden (Brunei, Bukit Belalong, PENDRY & PROCTOR 1996). Möglicherweise führt die verwendete Methodik zu einem intensiveren Aufschluss der Elemente, so dass ein Vergleich mit anderen Untersuchungen mit Ausnahme von WILCKE ET AL. (2002) schwierig ist.

Die Stickstoff -Konzentrationen der Blätter im UMCF ($N = 10.9 \text{ mg g}^{-1}$) stimmen jedoch weitgehend überein mit Werten aus Kolumbien: 11.1 mg g^{-1} (2550m, VENEKLAAS 1991) und aus Venezuela: 11.5 mg g^{-1} (2300m, STEINHARDT 1979). Der N- Wert im SCF ist mit 9.7 mg g^{-1} höher als der aus 3350m Höhe in Kolumbien: 7.8 mg g^{-1} (VENEKLAAS 1991).

Im Rest sind die relativ höchsten Konzentrationen an Nährstoffen enthalten, da z.B. Blüten oder Früchte einen relativ geringen Anteil an Kohlehydraten haben (VENEKLAAS 1991).

Im Gegensatz dazu sind die Nährstoffkonzentrationen im Holz am geringsten im Vergleich zu den Laub- oder Restkonzentrationen (LARCHER 2001), bedingt durch den hohen Anteil an nährstoffarmem Zellwandmaterial (VENEKLAAS 1991).

Die Konzentration der meisten Elemente der Laubstreu sinken signifikant vom LMF zu den höher liegenden Vegetationseinheiten. Diese deutliche Differenz ist möglicherweise begründet durch die großen klimatischen Unterschiede, wie die stark zunehmenden Niederschläge, die reduzierte Strahlung und Evapotranspiration, einhergehend mit einer permanent starken Bewölkung und Nebelbildung im UMCF und im SCF (siehe 4.5). Zunehmende Niederschläge und abnehmende Evapotranspiration führen zu feuchteren Böden und einer verminderten Mineralisierung bzw. einer verstärkten Auswaschung der Nährstoffe. Der Rückgang der Nährstoffe N, S, K und Mg, der am höchsten ist, bestätigt diese These: Stickstoff und Schwefel sind aufgrund der abnehmenden Mineralisierung im

UMCF und im SCF stark reduziert, während der Rückgang von Kalium und Magnesium bedingt ist durch die mit zunehmender Höhe erhöhte Auswaschung.

Zwischen UMCf und SCF zeigt sich eine uneinheitliche Tendenz. Bei Ca, K, Mg steigen die Konzentrationen vom UMCf zum SCF. Bei N und P gehen die Konzentrationen mit zunehmender Höhe zurück. Dieses wird durch eine Übersicht von TANNER ET AL. (1998) bestätigt, die eine geringere Konzentration von N und P im Streufall der montanen Wälder im Vergleich zu Tieflandswäldern und in Gebieten oberhalb von 1500m dokumentiert haben, begründet durch die geringeren Nährstoffeinträge durch den Streufall. Ein deutliches Absinken der N und P Konzentrationen im Streufall mit zunehmender Höhe (2550m auf 3370m) hat auch VENEKLAAS (1990) in den kolumbianischen Anden festgestellt.

Tab. 10 Vergleich der durchschnittlichen Konzentration an Elementen (in mg g^{-1}) in der Laubstreu von verschiedenen feuchten tropischen Bergwäldern. ¹vorliegende Untersuchung, ²WILCKE ET AL (2002) (Gesamtstreu), ³STEINHARDT (1979), ⁴VENEKLAAS (1991), ⁵HAFKENSCHIED (2000).

Ort	Wald- typ	Höhe	C	N	P	Ca	K	Mg	Al	S	Fe	Na	Mn	Zn
		in m ü.M.	in g g^{-1}	Konzentration in Laubstreu in mg g^{-1}										
Bolivien	LMF	1900	0.47	17.8	0.88	10.7	3.9	3.9	1.3	1.5	0.22	0.09	0.68	0.02
Bolivien	UMCF	2600	0.49	10.9	0.61	7.1	2.3	2.4	1.3	0.9	0.13	0.07	0.45	0.02
Bolivien	SCF	3050	0.48	9.7	0.57	8.6	2.9	2.7	1.0	0.9	0.23	0.08	0.78	0.02
		1900 -	0.44 -	19 -	0.94 -	12 -	6.1 -	3.5 -	0.5 -	2.3 -	0.21 -	0.08 -	0.21 -	0.04 -
Ecuador	LMF	2100	0.48	22	1.6	18	9.1	5.8	1.1	2.4	0.34	0.11	0.48	0.05
Venezuela	LMF	2300	-	11.8	0.62	7.3	5.7	2.6	1.8	-	-	-	-	-
Kolumbien	LMF	2550	-	11.1	0.74	-	8.9	-	-	-	-	-	-	-
Kolumbien	UMCF	3370	-	7.8	0.4	-	3.5	-	-	-	-	-	-	-
	LMF	610 -		6.8 -	0.20 -	1.9 -	0.9 -	1.8 -	0.74 -					
Weltweit		2600	-	14.7	0.95	21.6	8.9	4.8	1.83	-	-	-	-	-
	UMCF	1550 -		6.0 -	0.18 -	1.9 -	1.3 -	2.0 -	0.22 -					
Weltweit		3370	-	8.4	0.4	9.1	5.9	3.3	0.9	-	-	-	-	-

Die Abnahme der N-Gehalte in der aufgefangenen Streu steht zunehmenden N-Konzentrationen in den Blättern von Farnen gegenüber, die in dem gleichen Untersuchungsgebiet gesammelt wurden (WEGNER ET AL. 2003). Sie widersprechen der Übersicht Tanners 1998, dass in allen zitierten Untersuchungen auf einzelnen Bergen die Stickstoffkonzentrationen der Blätter mit zunehmender Höhe abnehmen. Die Farne haben anscheinend eine Sonderstellung, die auch in den Untersuchungen von VITOUSEK ET AL. (1995) bestätigt werden. Dessen Untersuchung zeigte am Beispiel des Baumfarnes Cibotium

einen überproportional hohen Anteil an Stickstoffeinträgen durch diesen Farn im Vergleich zum Biomassenanteil bzw. zur Streuproduktion, trotz eines allgemeinen N-Mangels. Die Ergebnisse weisen auf einen weiteren Forschungsbedarf zur Bedeutung der Farne für den Nährstoffeintrag hin, wobei die Symbiose mit N-bindenden Blaualgen denkbar wäre (mdl. Mitteilung MEYER).

Im allgemeinen Vergleich des Nährstoffbedarfs terrestrischer Pflanzen (LARCHER 2003) mit den vorliegenden Streufalldaten zeigt sich bei N, P und S ein deutlicher Mangel insbesondere im UMCF und im SCF. Jedoch wäre nach diesem Vergleich auch im LMF ein P und S- Mangel vorhanden. Kalium ist aufgrund der starken Auswaschungseffekte während der Streusammlung nicht in den Vergleich mit einbezogen worden.

Der monatliche Verlauf der Elementkonzentrationen im Streufall zeigt möglicherweise eine direkte Anpassung der Vegetation an die Verfügbarkeit der Nährstoffe in der organischen Auflage. In allen Vegetationseinheiten ist in den untersuchten Streuanteilen Laub und Holz ein eng korrelierter Zusammenhang zwischen N, P und S festgestellt worden. Dieses deutet auf gleiche und übergeordnete Mineralisierungsbedingungen in den jeweiligen Vegetationseinheiten hin, die sich jedoch deutlich voneinander unterscheiden:

Am Ende der relativen Trockenzeit ist im LMF ist eine deutlich geringere Konzentration im Laub und Reststreu an N, P und S zu erkennen. Anscheinend kommt es in dieser Periode zu einem Trockenstress der Vegetation, was zu einer Umlagerung der Nährstoffe aus den abfallenden Blättern in die Pflanze führt.

Die Erhöhung der Konzentration in der aufgefangenen Streu beim SCF nach der Trockenphase deutet möglicherweise auf eine verbesserte Mineralisierung von N, P und S in der organischen Auflage hin. Der Rückgang des Niederschlags in diesen Monaten verringert die Bodenfeuchte und führt zu einer erhöhten Durchlüftung des Bodens, so dass die Mineralisierung angeregt wird und so die Nährstoffaufnahme der Pflanzen verbessert ist.

Insgesamt zeigt die signifikante Korrelation von N mit P und S in den einzelnen Vegetationseinheiten eine direkte Reaktion der Nährstoffkonzentration im Streufall auf unterschiedliche Umweltbedingungen im Jahresverlauf. Die Abnahme der Konzentration mit zunehmender Höhe stellt die Abhängigkeit des Pflanzenwachstums von den Mineralisationsbedingungen und der zunehmenden Auswaschung in der organischen Auflage dar.

5.4.5 Nährstoffumsatz

Beim Vergleich des Nährstoffumsatzes mit dem anderer Bergregenwälder wird deutlich, dass wesentlich größere Mengen an Nährstoffen im LMF des Untersuchungsgebietes eingetragen werden (Tab. 11). Eine weitgehende Ähnlichkeit ist wieder mit dem LMF von Ecuador gegeben (WILCKE ET AL. 2002). Während die meisten eingetragenen Elemente im Untersuchungsgebiet ähnliche Raten aufweisen wie die in Ecuador, sind bei folgenden Elementen höhere Werte vorhanden: C, N, Al und Mn. Das einzige Element mit deutlich niedrigeren Werten, das Kalium, ist vermutlich durch erhöhte Auswaschungseffekte aufgrund unterschiedlicher Sammelabstände bedingt. Die höheren Al u. Mn-Werte gegenüber Ecuador deuten möglicherweise auf die Bodenbedingungen mit stärkeren Podsolierung und Staunässe hin (höhere Aufnahme von zweiwertigen Al und Mn).

Tab. 11 Vergleich des Elementeintrags mit dem Gesamt- Streufall (in $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$, Laub, Holz, Epiphyten, Früchte und Rest) in verschiedenen feuchten tropischen Bergwäldern. ¹vorliegende Untersuchung, ²WILCKE ET AL (2002), ³STEINHARDT (1979), ⁴VENEKLAAS (1991), ⁵HAFKENSCHIED (2000).

Ort	Waldtyp	Höhe	C	N	P	Ca	K	Mg	Al	S	Fe	Na	Mn	Zn
		in m ü.M.	Elementeintrag in $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ (gesamter Streufall)											
Bolivien ¹	LMF	1900	5692	218	11.0	123	48.4	46.6	15.5	18.0	2.92	1.08	8.19	0.31
Bolivien ¹	UMCF	2600	2569	57	3.4	36	14.6	12.5	6.9	4.6	1.05	0.43	2.34	0.08
Bolivien ¹	SCF	3050	2249	46	2.7	39	14.5	11.7	4.3	3.9	1.11	0.39	3.45	0.07
		1900 - 3780-	165-	8.8 -	113 -	57 -	34 -	4.7 -	20 -	1.9 -	0.82 -	1.8 -	0.35 -	
Ecuador ²	LMF	2100	4580	201	14	154	77	52	12	23	2.9	1.1	4.7	0.43
Venezuela ³	LMF	2300	-	69	4	43	33	14	9.3	-	0.8	0.3	3.7	-
Kolumbien ⁴	LMF	2550	-	81.9	6.07	-	59.3	-	-	-	-	-	-	-
Kolumbien ⁴	UMCF	3370	-	34.2	1.9	-	13.9	-	-	-	-	-	-	-
		610 -		23.9 -	0.7-	16.3 -	4.6 -	7.6 -						
Weltweit ⁵	LMF	2600	-	100.5	7.73	119.2	59.3	25	-	-	-	-	-	-
		1550 -		28.9 -	1.1-	6.7-	5.7 -	6.3 -						
Weltweit ⁵	UMCF	3370	-	80.8	2.9	50.2	33.0	18.2	-	-	-	-	-	-

Beim Vergleich des hier untersuchten UMCF mit dem montanen Bergregenwald in Venezuela (2300m, STEINHARDT 1979) sind die Werte des Untersuchungsgebietes durchgehend geringer. Erstaunlicherweise sind die N, P und K Werte höher bei 2550m in Kolumbien, während die Werte bei 3370m im Vergleich zum SCF geringer sind (VENEKLAAS

1991). Im weltweiten Vergleich mit weiteren UMCf (HAFKENSCHIED 2000) liegen die Elementmengen im mittleren Bereich der Spannbreite.

Die jährlichen Einträge an Nährstoffmengen sind im LMF 70% höher als in den oberen Vegetationseinheiten, wobei die Nährstoffeinträge der Elemente N, P, S, Zn und Mg die größten Unterschiede aufweisen. Der Vergleich mit der aufgefangenen Gesamtstreu in den einzelnen Vegetationseinheiten zeigt deutlich, dass primär die große Menge abgegebener Biomasse, die im LMF drei- bis viermal so groß ist wie die der oberen Waldformationen, und weniger die Nährstoffkonzentration dieser Streu für die starken Nährstoff-Flüsse entscheidend sind.

Die Ursachen für die wesentlich geringere Biomasseproduktion im UMCf und im SCF sind vermutlich zum einen auf die abnehmende Temperatur mit zunehmender Höhe zurückzuführen (KÖRNER 2003), zum anderen auf die temporären bzw. permanent staunassen Bodenverhältnisse, welche den Stoffumsatz im Bodenraum erheblich vermindern können (SCHINNER 1982).

Der höchste Rückgang im jährlichen Eintrag vom UMCf zum SCF ist bei den Elementen Al, N, P und S gegeben. Bei N, P und S deutet dies auf eine Verringerung der Verfügbarkeit dieser Nährstoffe mit zunehmender Höhe hin. Die deutliche Verringerung des Aluminiumeintrags über den Streufall in den oberen Vegetationseinheiten lässt darauf schließen, dass im Gegensatz zu anderen Bergregenwäldern (HAFKENSCHIED 2000) die Aluminiumtoxizität keine oder eine nur geringe Bedeutung für die Vegetationsdifferenzierung hat.

Im Gegensatz zu den deutlich unterschiedlichen Nährstoffmengen zwischen LMF und den oberen Waldformationen, die über den Streufall eingetragen werden, nivellieren sich die Unterschiede der Elementmengen im Oi- Horizont. LMF hat z.B. nur noch die 1.2 fache Menge an Nährstoffen im Vergleich zum UMCf und SCF. Diese wesentlich geringeren Unterschiede in den Nährstoffmengen der Streuauflage zeigen die unterschiedlichen Zersetzungszeiten in den drei Vegetationseinheiten an. Die wesentlich schnellere Verwesung und Mineralisierung der großen jährlich eingetragenen Streumenge im LMF bedingt den starken Umsatz im Gegensatz zu den oberen Formationen, wo eine längere Zeit der Zwischenlagerung und damit eine stärkere Akkumulation stattfindet. So erhöht sich die durchschnittliche Zersetzungszeit der Elemente von 0.3 Jahren im LMF auf 1.0 Jahre im UMCf und 1.1 Jahre im SCF, d.h. die Zersetzungszeit ist auf über das dreifache verlängert. Die größten Unterschiede in der Zersetzungszeit zwischen LMF und SCF sind bei Zn, Al, N, P und Fe vorhanden, d.h. pflanzenökologisch sind vor allem die Makroelemente N u. P betroffen.

Der Vergleich des Zersetzungsquotienten der Elemente innerhalb der drei Vegetationseinheiten zeigt eine ähnliche Reihenfolge in der Mobilität der Elemente. Trotz

großer Unterschiede in der Zersetzungszeit zwischen den Vegetationseinheiten ist in allen Höhen das mobilste Element K, gefolgt von Mg, Ca, S und P. Bei K, Mg und Ca dominieren wahrscheinlich die Auswaschungseffekte aufgrund der hohen Niederschläge, während bei S und P die Mineralisierung überwiegt.

Die relativ hohe Mobilität von Phosphor zeigt den erheblichen Anteil der P- Versorgung der Pflanze aus der Freisetzung organisch gebundenen Phosphors und weniger aus dem Aufschluss mineralisch gebundenen Phosphors.

Der sehr niedrige Quotient für Stickstoff in den drei Vegetationseinheiten zeigt eine sehr geringe Mobilität des Stickstoffs, die bei SCF noch hinter Fe und Al steht.

Die Mineralisierung von N im LMF ist gegenüber den anderen untersuchten Elementen auch relativ niedrig, N erweist sich jedoch im absoluten Vergleich mit $1/k_{oi} = 0.4$ Jahren immer noch als sehr mobil.

Im UMCF und im SCF ist die niedrige Umsatzrate des Stickstoffs möglicherweise verbunden mit der temporären oder permanenten Wassersättigung des Bodens (MARRS ET AL. 1988) bzw. der abnehmenden Luft - und Bodentemperatur mit zunehmender Höhe (TANNER 1981, EDWARDS 1982).

Abb. 35 Anteil der skleromorphen Arten bei Melastomataceae im Höhenverlauf. Differenzierung nach Grad der Skleromorphie (0=schwach, 0.5= mittel, 1= stark), morphologisch analysiert. Geändert nach BACH (2004).

Eine weitere Möglichkeit des verstärkten N-Mangels mit zunehmender Höhe besteht möglicherweise in einer erhöhten Konzentration von Oxyphenolen in der Streu. Wie aus der Untersuchung von BACH (2004) deutlich wird (siehe Abb. 35), steigt der Anteil der skleromorphen Arten, hier dargestellt an der Art *Melastomatacea*, mit zunehmender Höhe an. Der Anteil an Flavonoiden, die zur Gruppe der Polyphenole gehört, ist relativ hoch in den skleromorphen Blättern. Möglicherweise haben sie toxische Wirkung auf die Photosyntheserate, auf die Zellteilung in Feinwurzeln, und sie vermindern Stomataöffnung und Ionenaufnahme (BRUIJNZEEL ET AL. 1993). Eine der entscheidenden Wirkungen der erhöhten Phenolkonzentration ist die Reduzierung der N- Aufnahme durch die Pflanze. Dieses Phänomen kann in der vorliegenden Studie durch das weitere C/N Verhältnis des Laubstreu im Vergleich zum Oi- Horizont bestätigt werden. Demgegenüber steht die Arbeit von SCHMITT (2004) in LMF in Südecuador, die keinen Anstieg der Phenolkonzentration mit zunehmender Höhe festgestellt hat. Die Untersuchung bezieht sich allerdings nur auf die Höhe bis 2450m. Im Vergleich zu dem Skleromorphieanteil der *Melastomatacae* des Untersuchungsgebietes (Abb. 35) wird jedoch deutlich, dass ab der Höhe von 2700m der Anteil linear ansteigt, mit einer möglichen erhöhten Konzentration an Phenolen. Die Untersuchung zur Phenolkonzentration in der Streu und in der organischen Auflage stellt eine relevante Frage für zukünftige Fortsetzungen der vorliegenden Untersuchung dar. Beim Vergleich der N- Mineralisierung mit der P- und S- Mineralisierung zeigt sich eine ähnliche Abnahme mit zunehmender Höhe, ein absoluter Rückgang der Nährstoffmengen mit zunehmender Höhe, jedoch eine wesentlich schnellere Mineralisierung von P und S im Vergleich zu N in allen drei Vegetationseinheiten.

5.5 Schlussfolgerung

Die Ergebnisse zeigen große Unterschiede in der Nährstoffdynamik der drei höhenverschiedenen Vegetationseinheiten LMF, UMCF und SCF an. Diese Differenzen basieren hauptsächlich auf den unterschiedlichen Einträgen von Biomasse der abfallenden Streu und in der unterschiedlich schnellen Zersetzung dieser Streu. Im LMF sind die jährlichen Streueinträge drei bis viermal so hoch wie in den höheren Vegetationseinheiten. Die Zersetzung erfolgt nach durchschnittlich 0.5 Jahren im LMF, während sie sich im UMCF auf 1.2 Jahre bzw. 1.3 Jahre im SCF verlangsamt.

Im Oi-Horizont bzw. in der organischen Auflage der drei Vegetationseinheiten gleichen sich die Unterschiede in den Nährstoffmengen an oder kehren sich um. In den organischen Auflagen im UMCF und im SCF sind gleich viel oder mehr Nährstoffe akkumuliert wie im LMF, da die organischen Auflagen in den oberen Vegetationseinheiten wesentlich mächtiger sind als im LMF. Es besteht daher kein absoluter Nährstoffmangel.

Eine Abhängigkeit des Vegetationstyps und seiner Verbreitung von den absoluten Elementkonzentrationen scheint unwahrscheinlich, da insbesondere die Unterschiede in der Vegetation zwischen UMCF und SCF insofern nicht durch unterschiedliche Nährstoffmengen erklärt werden können, da sie annähernd gleich sind.

Die N- Mineralisierung wird mit zunehmender Höhe am stärksten reduziert, so dass wahrscheinlich neben einem P und S- Mangel der N-Mangel insbesondere in den oberen Vegetationseinheiten am gravierendsten wirkt.

Die Bodenfeuchte, die von einer nur temporären Wassersättigung im UMCF zu einer permanenten im SCF ansteigt bzw. die abnehmende Bodentemperatur reduzieren die Mineralisierung bzw. Nährstoffaufnahme in den oberen Vegetationseinheiten, und stellen damit mögliche limitierende abiotische Faktoren der Vegetationsgenese dar.

Die Nährstoffumsetzung in der organischen Auflage über die Mycorrhiza und die Wurzeldynamik ist ungeklärt. Hier zeigt sich weitergehender Forschungsbedarf, um die dadurch mögliche Limitierung des Pflanzenwachstums genauer zu quantifizieren.

Tab. 12 Elementkonzentration des Oi-Horizontes in den drei Vegetationseinheiten LMF (1900m), UMcF (2600m) und SCF (3050m)

Horizont	Höhe in m ü.M.	C	N	P	Ca	K	Mg	Al	SiO ₂	S	Fe	Na	Mn	Zn
in mg g ⁻¹														
Feinstreu Oi	LMF	468	20.6	0.70	8.12	1.81	2.49	1.61	17.77	1.11	0.44	0.10	0.72	0.02
Feinstreu Oi	UMcF	489	11.6	0.54	5.49	1.43	1.43	1.21	17.77	0.81	0.26	0.11	0.48	0.02
Feinstreu Oi	SCF	479	10.3	0.51	6.53	1.37	1.44	1.02	12.77	0.73	0.22	0.12	0.62	0.03
Holz Oi	LMF	479	11.5	0.37	7.30	1.03	2.04	1.11	6.57	0.82	0.09	0.05	0.39	0.02
Holz Oi	UMcF	485	5.3	0.20	2.12	0.68	0.46	0.21	12.42	0.33	0.07	0.05	0.12	0.01
Holz Oi	SCF	498	5.4	0.24	3.97	0.63	0.60	0.36	8.03	0.38	0.11	0.06	0.25	0.02

Tab. 13 Elementvorrat des Oi-Horizontes in den drei Vegetationseinheiten LMF (1900m), UMcF (2600m) und SCF (3050m)

Horizont	Höhe in m ü.M.	C	N	P	Ca	K	Mg	Al	SiO ₂	S	Fe	Na	Mn	Zn
in kg ha ⁻¹														
Feinstreu Oi	LMF	1778	78.6	2.63	30.75	6.96	9.40	6.09	67.26	4.15	1.70	0.40	2.72	0.09
Feinstreu Oi	UMcF	2030	48.2	2.25	22.79	5.96	5.97	4.99	73.61	3.34	1.09	0.44	1.97	0.10
Feinstreu Oi	SCF	2233	47.1	2.31	30.22	6.23	6.65	4.54	57.00	3.33	0.98	0.53	2.96	0.12
Holz Oi	LMF	911	21.4	0.66	13.51	1.84	3.65	1.75	11.01	1.50	0.16	0.09	0.68	0.04
Holz Oi	UMcF	882	9.4	0.35	3.77	1.15	0.78	0.38	20.67	0.59	0.13	0.10	0.20	0.02
Holz Oi	SCF	825	8.8	0.38	5.96	0.95	0.89	0.60	13.60	0.61	0.17	0.10	0.37	0.03
Gesamt Oi	LMF	2690	100.0	3.29	44.26	8.80	13.05	7.84	78.26	5.65	1.86	0.49	3.40	0.13
Gesamt Oi	UMcF	2912	57.6	2.60	26.57	7.11	6.75	5.38	94.29	3.94	1.22	0.54	2.17	0.12
Gesamt Oi	SCF	3058	55.9	2.68	36.18	7.18	7.54	5.14	70.59	3.94	1.16	0.63	3.33	0.15

Tab. 14 Quotient der Nährstoffmengen der jährlichen Streueinträge und der Streuaufgabe Oi (Feinstreu K_i, Holz K_h, Gesamt Koi)

Streueintrag Oi	Höhe in m ü.M.	C	N	P	Ca	K	Mg	Al	SiO ₂	S	Fe	Na	Mn	Zn
Feinstreu K _i	1800.00	2.56	2.36	3.66	3.33	5.81	4.16	2.24	3.69	3.73	1.52	2.29	2.42	2.58
Feinstreu K _i	2600.00	1.09	1.07	1.40	1.40	2.22	1.85	1.15	0.47	1.24	0.82	0.82	1.05	0.72
Feinstreu K _i	3050.00	0.85	0.86	1.05	1.09	1.98	1.55	0.86	0.97	1.03	0.99	0.63	1.00	0.52
Holz K _h	1800.00	1.26	1.50	2.05	1.53	4.30	2.07	1.08	3.11	1.71	2.15	1.86	2.37	1.80
Holz K _h	2600.00	0.41	0.55	0.71	1.17	1.14	1.91	2.94	0.24	0.68	1.14	0.61	1.41	0.32
Holz K _h	3050.00	0.42	0.64	0.82	0.91	2.26	1.59	0.68	0.37	0.76	0.81	0.59	1.28	0.29
Gesamt Koi	1800.00	2.12	2.18	3.34	2.78	5.50	3.57	1.98	3.61	3.19	1.57	2.21	2.41	2.36
Gesamt Koi	2600.00	0.88	0.98	1.30	1.37	2.05	1.85	1.28	0.42	1.16	0.86	0.78	1.08	0.64
Gesamt Koi	3050.00	0.74	0.83	1.02	1.06	2.01	1.56	0.84	0.86	0.99	0.96	0.62	1.04	0.48

Tab. 15 Elementvorrat der organischen Auflage in kg ha⁻¹ (bzw. t ha⁻¹)¹ vorliegende Untersuchung, ²WILCKE ET AL. (2002)

Land	Höhe	Anzahl	C	N	P	Ca	K	Mg	Al	S	Fe	Na	Mn	Zn
Profile			kg ha ⁻¹											
Bolivien ¹	LMF	13	128 ^a	7752 ^{ab}	186 ^b	106 ^b	395 ^a	193	2074	626 ^{ab}	742	128 ^a	22 ^{ab}	3.8 ^a
			(48-284)	(3677-16128)	(133-257)	(31-395)	(144-894)	(83-443)	(549-6536)	(379-769)	(316-1438)	(40-378)	(0.7-141)	(n. n.-8)
Bolivien ¹	UMCF	26	221 ^b	10700 ^a	397 ^a	126 ^b	647 ^b	190	2593	1123 ^a	993	262 ^b	18 ^a	11.1 ^b
			(59-535)	(3254-21472)	(160-518)	(15-490)	(261-1392)	(64-670)	(893-5180)	(614-1991)	(425-2486)	(71-956)	(1.3-160)	(n. n.--32)
Bolivien ¹	SCF	6	158 ^{ab}	5883 ^b	190 ^b	444 ^a	627 ^{ab}	229	2154	426 ^b	598	205 ^{ab}	72 ^b	5.1 ^{ab}
			(106-246)	(2834-13150)	(133-323)	(39-1249)	(360-1063)	(145-320)	(823-3892)	(258-619)	(405-1150)	(113-415)	(3-207)	(n. n.--16)
Ecuador ²	LMF	47	103	5530	215	975	674	335	1610	769	525	28	59	7.1
			11-332	(871-21200)	(31-701)	(92-3220)	(116-2540)	(66-1040)	(139-6470)	(78-4590)	(59-2080)	(2.5-105)	(5.7-340)	(0.76-23)

6. Der Zusammenhang zwischen der Vegetationsverbreitung und den abiotischen Faktoren im Höhenwandel

6.1 Einleitung

Die Vegetation verändert sich in der Artenzusammensetzung (WOLF 1993; GENTRY 1995; KESSLER 2000b), in der Bestandesstruktur (KÖRNER ET AL. 1989; KITAYAMA 1992) und in der Morphologie (KÖRNER ET AL. 1989) mit zunehmender Höhe in tropischen montanen Wäldern. Einige Studien zeigen einen linearen Rückgang der Diversität mit zunehmender Höhe auf (GENTRY 1988, HAMILTON 1975, STEVENS 1992), andere Studien haben eine glockenförmige Verteilung nachgewiesen (LIEBERMAN ET AL. 1996, GRYTNES & VETAAS 2002, ODLAND & BIRKS 1999). Die Gründe hierfür werden kontrovers diskutiert. GENTRY (1988), BROWN (1988), FRAHM & GRADSTEIN (1991) und ZOTZ & HIETZ (2001) sehen die Hauptfaktoren in der Humidität eines Gebietes, während LOMOLINO (2001) multiple klimatische und lokale Parameter für die Diversität in einer bestimmten Höhe verantwortlich sieht. Reduzierte Luft- und Blatttemperaturen sind für viele Autoren der entscheidende Parameter (GRUBB 1977, Bhattarai & Vetaas 2003, Gentry 1982, Gentry 1988).

Der Zusammenhang zwischen der Nährstoffversorgung und der Vegetationsverteilung wurde ebenfalls in mehreren Studien beschrieben (TUOMISTO & POULSEN 1996, OLIVEIRA – FILHO ET AL. 1994, SOLLINS 1998), insbesondere die Beziehung zwischen N-Mineralisierung und Artenverteilung (AERTS ET AL. 2003), aufgrund der abnehmenden Zersetzung des organischen Materials mit zunehmender Höhe und Bodenfeuchtigkeit (MARRS ET AL. 1988, CAVELIER ET AL. 2000).

Die zunehmende Bodenwasserfeuchte bis zur Wassersättigung des Bodens mit einhergehender Schädigung der Wurzeln stellt eine weitere These für die Vegetationsdifferenzierung dar (CABIDO ET AL. 1987, SILVER & VOGT 1993, SILVER ET AL. 1999, HETSCH & HOHEISEL 1976, HERRMANN 1971, SANTIAGO ET AL. 2000).

In diesem Kapitel wird der statistische Zusammenhang zwischen der Vegetationsverbreitung und (i) den klimatischen Parametern Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit (ii) und den Bodenparametern wie N - und S - Mineralisierung bzw. Bodenfeuchte analysiert und (iii) ein Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf gestellt.

6.2 Methodik

In dem Untersuchungsgebiet wurden im mittleren Transekt im 100m - Höhenabstand Vegetationsplots angelegt (siehe 2.4). Folgende Indikatorarten wurden analysiert: Pteridophyta, Melastomataceae, Araceae, Bromeliaceae, Arecaceae (Palmae) und Cataceae (BACH 2004). Für die statistische Untersuchung ist die α - Diversität der Vegetation herangezogen worden, d.h. die Zahl der Arten pro Höheneinheit. Die α - Diversität ist nach der rarefaction- Methode in den Höhenintervallen ausgerechnet worden, um unterschiedliche Sammlungsintensitäten auszugleichen (BACH 2004). Die komplette Vegetationsanalyse basiert auf den Ergebnissen von K. Bach, die diese Daten zur Verfügung gestellt hat.

Auf den gleichen Flächen sind Bodenanalysen durchgeführt worden. Die horizontweise genommenen Proben wurden auf folgende Parameter analysiert: pH, Leitfähigkeit, effektive Kationenaustauschkapazität, Korngrößenverteilung, Gesamtkohlenstoff und -stickstoff, Gesamtgehalte der Makro- und Mikroelemente, Oxalat - Fe, - Al und - Mn, Dithionit - Fe, - Al und - Mn (siehe 3.2). In der statistischen Analyse ist die organische Auflage (O – Horizont) und der Oberboden (A- Horizont) mit der Vegetationsverteilung verglichen worden, da die Hauptdurchwurzelung in diesen beiden Horizonten liegt. In der Datenreihe der organischen Auflage sind die Werte für die Höhen 2700m – 2900m herausgenommen worden, da hier eine anthropogene Beeinflussung (Weg zur Wolframmine) nicht ausgeschlossen werden kann.

Das Bestandsklima ist im 200m - Höhenabstand im gleichen Transekt mit Hobologger aufgenommen worden. In jeder Höhe sind in 50cm, 2m und im Kronenraum Lufttemperatur und relative Luftfeuchte gemessen worden. Der Messzeitraum war November 2000 bis April 2001 (siehe 4.2). Es wurden die durchschnittliche minimale tägliche relative Luftfeuchtigkeit der drei Messhöhen und die durchschnittliche tägliche Lufttemperatur in 2m Höhe in die statistische Untersuchung einbezogen.

Die gravimetrische Bodenfeuchte der organischen Auflage ist während einer dreiwöchigen Messkampagne vom 24.07.2002 bis zum 12.08.2002 von 1800m bis 3000m im 200m - Höhenabstand ebenfalls im gleichen Transekt aufgenommen worden (siehe 3.2).

Die identische Untersuchungsfläche zur Vegetations- Boden - und Klimaanalyse ermöglichen einen direkten statistischen Vergleich der verschiedenen Parameter.

Zur Untersuchung der Abhängigkeit der Vegetation von abiotischen Faktoren wurde eine Korrelation nach Pearson errechnet. In dem mineralischen Oberboden (A- Horizont) wurde zur Datenreduzierung eine Hauptkomponentenanalyse (PCA) durchgeführt, so dass mehrere Parameter zusammengefasst werden konnten. Hierfür wurden alle Parameter standardisiert

und auf Normalverteilung überprüft, ggf. wurden die Faktoren transformiert (Logarithmus, Wurzel, Potenz). Für die gesamte Analyse wurde die Software Systat 7.0 genutzt.

6.3 Ergebnisse

In der Abb. 38 wird die Vegetationsverteilung im hypsometrischen Wandel deutlich. Nach BACH 2004 sind insgesamt 326 Arten analysiert worden auf 101 Aufnahmeflächen. Die 326 Arten verteilen sich auf 220 Pteridophyta, 56 Melastomataceen, 22 Araceen und 21 Bromeliaceen. Diese differenzieren sich in 170 epiphytische Arten (152 Pteridophyta, 16 Bromeliaceae und 2 Cactaceae) und 145 terrestrische Arten (78 Pteridophyta, 56 Melastomataceae, 6 Bromeliaceae, 5 Araceae).

Die höchste α -Diversität der untersuchten Indikatorarten ist in 1900m Höhe gegeben. Die typische glockenförmige Verteilung ist ansatzweise zu erkennen. Alle untersuchten Arten nehmen grundsätzlich in ihrer α -Diversität mit zunehmender Höhe ab.

Im Vergleich der abiotischen Parameter mit der Vegetationsverbreitung sind nur die Korrelationen in der Tab. 16 aufgeführt worden, die signifikante Zusammenhänge ergeben haben.

In der Abb. 36 und wird die parallele Entwicklung der N - und S- Mineralisierung in der organischen Auflage deutlich. Das C/N Verhältnis (in Klammern das C/S Verhältnis) steigt stetig von 15 (150) im LMF auf 20 (250) im UMCF und deutlich auf 40 (450) im SCF (siehe 3.3.3).

Bei der Hauptkomponentenanalyse des A-Horizontes ist ein Faktor herausgebildet, der als „Sesquioxidfaktor“ bezeichnet wurde. Parameter dieses Faktors sind Gesamt - Al, - Fe und - P, Oxalat – Al und – Fe, Al- Sättigung, pH – Wert und austauschbare H – Ionen. Die untersuchten Gesamtnährstoffe bzw. die austauschbaren Nährstoffe zeigen mit Ausnahme von den Gesamtgehalten K und Mn in der organischen Auflage und den Nährstoffen, die in dem Sesquioxidfaktor zusammengefasst sind, keinen signifikanten Zusammenhang mit der Vegetationsverbreitung.

Zwischen dem Sesquioxidfaktor und den gesamten Arten, sowohl epiphytisch wie terrestrisch, besteht eine hohe positive signifikante Korrelation. Differenziert in die einzelnen Arten zeigt sich eine hohe Korrelation bei Araceen und Melastomataceen, während bei den Bromeliaceen nur eine signifikante Korrelation bei den epiphytischen Arten vorhanden ist. Pteridophyta zeigen einen Zusammenhang mit den gesamten epiphytischen Arten, jedoch nicht mit den terrestrischen.

Die durchschnittliche Tagestemperatur in 2m Höhe sinkt im Bestand konstant um 0.59 K 100m^{-1} (siehe 4.4.2). Die relative Luftfeuchte steigt deutlich mit der Nebelgrenze von minimalen 87% bis 2000m im LMF auf 96% in 2400m im UMCF, um dann leicht auf 92-94 %

im SCF zu sinken (siehe Abb. 39). Im Vergleich zwischen dem Bestandsklima und der Vegetationsverbreitung zeigt sich folgendes Bild: die Durchschnittstemperatur im Bestand, gemessen in 2m – Höhe, hat eine hohe positive Korrelation mit der Artenverbreitung. Mit Ausnahme der terrestrischen Bromeliaceae sind alle weiteren Arten positiv signifikant korreliert.

Der Vergleich zwischen der minimalen relativen Luftfeuchtigkeit, gemittelt aus den drei Messhöhen im Bestand (0.5m, 2m, 15m), zeigt ein unterschiedliches Bild: Während die gesamten epiphytischen Arten negativ korreliert sind mit diesem Parameter, zeigen die terrestrischen Arten keinen Zusammenhang. Je höher die relative Luftfeuchtigkeit im Bestand ist, umso geringer ist die α -Diversität der epiphytischen Arten!

In Abb. 37 ist die lineare Erhöhung der gravimetrischen Feuchte in der organischen Auflage deutlich zu erkennen. Der Wassergehalt der organischen Auflage im 200m - Höhenabstand von 1800m bis 3000m Höhe zeigt die höchste Korrelation mit der Vegetationsverbreitung. Alle untersuchten Arten, terrestrisch und epiphytisch, sind hoch signifikant negativ korreliert. Bei der Korrelation der Gesamtnährstoffe N und S, C/N und C/S-Verhältnis mit der Vegetationsverbreitung sind annähernd identische Zusammenhänge zu erkennen. Die Gesamtgehalte von N und S in der organischen Auflage sind hoch signifikant positiv korreliert mit fast allen terrestrischen und epiphytischen Arten. Nur die terrestrischen Bromelien und die terrestrischen Pteridophyta sind nicht korreliert.

Im C/N - und C/S - Verhältnis zeigt sich ein einfach korrelierter Zusammenhang mit allen Arten (terrestrisch, epiphytisch). Bei den Pteridophyta ist jedoch kein Zusammenhang festgestellt worden und bei den Bromelien nur ein Zusammenhang mit den epiphytischen Arten.

Der Zusammenhang zwischen den Gesamtgehalten K und Mn und der Vegetationsverbreitung ist negativ korreliert, d.h. die Gesamtgehalte nehmen mit der Höhe zu, während die Artenzahlen zurückgehen. Dieser Zusammenhang ist jedoch nur bei den Araceen und den Melastomataceen bei K vorhanden, während bei Mn nur ein Zusammenhang bei den Araceen zu erkennen ist.

Die terrestrischen Bromeliaceen sind möglicherweise in Abhängigkeit von der Al- Sättigung (AS) in der organischen Auflage verbreitet.

Abb. 36 Das C/N - (schwarze Quadrate) und C/S- Verhältnis (weiße Rauten) der organischen Auflage im hypsometrischen Wandel

Abb. 37 Gravimetrischer Wassergehalt der organischen Auflage im hypsometrischen Wandel

Abb. 38 Der hypsometrische Wandel aller Vegetationsarten (schwarze Quadrate), differenziert in die epiphytischen (weiße Rauten) und die terrestrischen Arten (schwarzes Dreiecke), verändert nach BACH (2004).

Abb. 39 Hypsometrischer Wandel der relativen Luftfeuchtigkeit (schwarze Quadrate) und der Lufttemperatur im Bestand

6.4 Diskussion

Zusammenhang zwischen Bestandsklima und Vegetationsverbreitung

Im Vergleich zwischen der hypsometrischen Verbreitung der Vegetationsarten und der relativen Luftfeuchtigkeit im Bestand zeigt sich eine hohe negative Korrelation bei der epiphytischen Vegetation, während bei den terrestrischen Arten kein Zusammenhang zu erkennen ist.

Trotz konstant hoher Luftfeuchtigkeit in den oberen Vegetationseinheiten ist ein Rückgang der epiphytischen Pteridophyta und der Araceen vorhanden. Der oft zitierte limitierende Faktor in der Verbreitung der Epiphyten, der temporäre Niederschlagsmangel bzw. die niedrige Luftfeuchtigkeit (FRAHM & GRADSTEIN 1991, ZOTZ & HIETZ 2001, GENTRY 1982, VAZQUEZ & GIVNISH 1998) kann in dem Untersuchungsgebiet in den oberen Vegetationseinheiten ausgeschlossen werden. Daher sind bei einer konstant hohen Luftfeuchtigkeit und hohen Niederschlägen andere abiotische Faktoren entscheidender.

Nach BENZING (1990) und STEVENS (1989) sind Epiphyten am besten in mittleren Höhen verbreitet. Die Diversität der Epiphyten erreicht ein Maximum in den Höhen mit niedriger Evapotranspiration und sinkt ab Temperaturen unter 18°C (BENZING 1990). In den peruanischen Anden in den Höhen von 3500m bis 5000m beträgt der Anteil der Epiphyten an der Gesamtflora nur noch 1% (GENTRY & DODSON 1987).

Wie in verschiedenen Untersuchungen schon aufgezeigt, besteht eine Abhängigkeit der Vegetation gegenüber der Temperatur (KÖRNER 2003, KESSLER 2000b, GENTRY 1988). Mit Ausnahme der terrestrischen Bromeliaceen zeigen alle untersuchten Arten eine deutliche Korrelation.

Vergleich mit Parametern des A-Horizontes und der Vegetationsverbreitung

Die Auswertung der Hauptkomponentenanalyse zwischen der Vegetationsverbreitung und Bodenparametern des A- Horizontes zeigen einen Zusammenhang zwischen der Abundanz der untersuchten Arten und der Komponente „Sesquioxidverlagerung“ im A-Horizont. Diese Komponente wird hauptsächlich durch die Fe - und Al -Dynamik im A-Horizont bestimmt. Obwohl die Sesquioxidverlagerung keine direkte ökologische Aussage für die Vegetationsverbreitung liefert, kann diese Komponente als ein indirekter Indikator für starke Versauerung und Wassersättigung des Bodens angesehen werden. Bei hohen Niederschlägen und geringer Evapotranspiration erhöht sich die Wassersättigung des Bodens. Je höher die Wassersättigung, umso stärker ist die Verlagerung von Fe und Al von den A- Horizonten in tiefere Horizonte durch Podsolierung bzw. Vergleyung. Die

ökologischen Folgen der zunehmenden Wassersättigung werden im folgenden Abschnitt erläutert.

Zusammenhang zwischen der Wassersättigung der organischen Auflage und der Vegetationsverbreitung

Im Vergleich zwischen der Wassersättigung der organischen Auflage und der Vegetationsverbreitung sind die höchsten Zusammenhänge korreliert worden. Der Zusammenhang zwischen Wassersättigung und Vegetationsverbreitung wird auch in den Studien SILVER & VOGT (1993), SILVER ET AL. (1999), HETSCH & HOHEISEL (1976), HERRMANN (1971), SANTIAGO ET AL. (2000) und CAVELIER ET AL. (2000) diskutiert.

CLINEBELL ET AL. (1995) haben einen dominanten Zusammenhang zwischen Niederschlag und Niederschlagsverteilung und der Vegetationsverbreitung festgestellt, jedoch mit einer Unabhängigkeit von der Bodenqualität. Die ökologische Folgen dieser Wassersättigung sind eine reduzierte Sauerstoffversorgung der Wurzeln (KOZLOWSKI & PALLARDY 1984), mit einem verringerten Blattflächenindex (LAI) (SANTIAGO ET AL. 2000), ein vermehrter Kohlenstoffinput für ein zunehmendes Wurzelwachstum (BRUIJNZEEL & VENEKLAAS 1998) und eine verringerte Mineralisierung. MARRS ET AL (1988) in Costa Rica und CAVELIER ET AL. (2000) in Kolumbien haben diesen Zusammenhang zwischen zunehmender Bodenfeuchte und abnehmender N-Mineralisierung in Bergregenwäldern dokumentiert.

Zusammenhang zwischen N - und S- Gehalt bzw. Mineralisierung und der Vegetationsverbreitung

Ausdruck der verringerten Mineralisierung ist das C/N - und das C/S – Verhältnis in der organischen Auflage mit zunehmender Höhe. Im Vergleich mit allen Vegetationsarten (terrestrisch, epiphytisch) zeigt sich eine negative Korrelation, mit Ausnahme der Pteridophyta.

Daher bestätigt sich der Zusammenhang, der im Kap. Streufall unter 5.4.5 schon diskutiert wurde: abnehmende Artenzahlen in den oberen Vegetationseinheiten und geringere Umsatzraten bzw. reduzierte Mineralisierung von N und S. Es ist kein absoluter Nährstoffmangel vorhanden, sondern die Verfügbarkeit nimmt mit zunehmender Höhe ab (siehe 5.5, BRUIJNZEEL ET AL. 1993).

Die Ausnahme der Pteridophyta wird durch die Untersuchung von WEGNER ET AL. (2003) bestätigt, die im gleichen Untersuchungsgebiet keinen N – Mangel der Pteridophyta im Höhenverlauf feststellen konnten. TUOMISTO & POULSEN (1996) haben demgegenüber einen

Zusammenhang zwischen Bodennährstoffen und Pteridophytenverbreitung in neotropischen Tieflandsregenwäldern festgestellt.

Es besteht eine Korrelation zwischen dem C/S -, C/N - Verhältnis bzw. der N -, S-Konzentration in der terrestrischen organischen Auflage mit der epiphytischen Vegetationsverbreitung. Der eingewehte Mineralboden und insbesondere der eingewehte Humus, der sich in den Astgabeln bzw. auf mächtigen Epiphytenmatten ablagert, ist ebenso durchwurzelt und unterliegt den gleichen klimatischen Bedingungen wie der darunter liegende terrestrische Boden (BENZING 1990). Weiterhin werden die Epiphyten über den Streufall bzw. durch Leachingeffekte mit Nährstoffen versorgt (ZOTZ & HIETZ 2001). Der Streufall und die Auswaschung der Blätter hängen wiederum direkt von den terrestrischen Bodenbedingungen ab (siehe 3.3.5). In der Studie von NADKARNI (1986) ist eine verringerte Mineralisierung des Canopy - Bodens gegenüber dem terrestrischen Boden festgestellt worden. Aufgrund dieser Bedingungen ist ein Zusammenhang zwischen der erhöhten Bodenfeuchte, der verringerten Mineralisierung in der organischen Auflage und der Epiphytenverbreitung möglich.

Während im Untersuchungsgebiet kein Zusammenhang zwischen Nährstoffgehalten und Vegetationsverbreitung festgestellt wurde, ist in tropischen Bergregenwäldern in Ecuador in einer Transektstudie bis 2400m Höhe ein Zusammenhang zwischen den Gesamtgehalten der organischen Auflage und der Zuwachsrate des Baumumfanges (WILCKE ET AL. 2005) gefunden worden. SOLLINS 1998 hat für den Regenwald im Tiefland einen Zusammenhang zwischen Artenzusammensetzung und P-, K-, Ca- und Mg -Verfügbarkeit, sowie Al-Toxizität und Wasserspeicherfähigkeit festgestellt. Auch OLIVEIRA – FILHO ET AL. (1994) hat einen Zusammenhang zwischen der Verbreitung von Baumarten und Ca, Mg, K und pH im amazonischen Tiefland vorgefunden. Nach GENTRY (1988) ist jedoch die Nährstofflimitierung im Tiefland stärker ausgeprägt als im Hochland.

Vergleich der Höhenstufendifferenzierung mit weiteren Studien über Bergregenwälder

Im Vergleich zu weiteren Studien in Bergregenwäldern ist in den Höhen zwischen 1700m bis 3400m häufig eine Dreiteilung der Vegetationsstufung vorhanden (GRUBB 1974, FRAHM & GRADSTEIN 1991, KAPPELLE ET AL. 1995). Der Übergang zwischen dem LMF zum UMCF zeigt hierbei eine größere Übereinstimmung, möglicherweise bestimmt durch das erste Kondensationsniveau, welches einen deutlichen Wechsel der abiotischen Faktoren (rel. Luftfeuchtigkeit, Strahlungsreduktion, Wassersättigung des Bodens) bewirkt.

Der Übergang vom UMCF zum SCF zeigt jedoch eine größere Varianz zwischen den Studien auf, z.B. bedingt durch unterschiedliche Reliefsituationen oder den Massenerhebungseffekt.

Die Übergänge zwischen den einzelnen Vegetationseinheiten sind häufig graduell (LIEBERMAN ET AL. 1996, KESSLER 2000a). BACH (2004) geht in ihrer Vegetationsstudie über das Untersuchungsgebiet umfangreich auf diese Vergleiche ein.

6.5 Schlussfolgerung und Ausblick

Die statistische Untersuchung des Zusammenhanges zwischen der Vegetationsverbreitung und den abiotischen Faktoren zeigt die übergeordnete Bedeutung des Wassereintrags in den oberen Vegetationseinheiten.

Die abnehmende Vegetationsdiversität zwischen dem LMF und den oberen Vegetationseinheiten ist bestimmt durch die abnehmende Temperatur und die zunehmende Bodenfeuchte, da diese zu ungünstigen Bodenbedingungen wie Sauerstoffarmut, geringere Nährstoffverfügbarkeit und reduzierte Mineralisierung führen. Auch wenn die Verbreitung der Vegetation nicht auf einen Faktor begrenzt werden kann, konzentriert sich die Vegetationsverbreitung auf diese Parameter.

Die Korrelation hat gezeigt, dass ein absoluter Nährstoffmangel nicht zu den dominanten Faktoren der Vegetationsverbreitung in dem Untersuchungsgebiet zählt. Weiterhin ist mit Ausnahme der terrestrischen Bromeliaceen kein Zusammenhang mit der AI- Sättigung im Boden festgestellt worden.

Zusammenfassend zeigt die statistische Analyse, dass die Vegetation in ihrer Verbreitung und in ihrer Bestandesstruktur hauptsächlich durch die hohe Bodenfeuchte in den oberen Vegetationseinheiten beeinflusst wird, aufgrund der verringerten Mineralisierung die Nährstoffverfügbarkeit reduziert ist und die niedrigen Sauerstoffgehalte zu ungünstigen Wurzelwachstumsbedingungen führen.

Die Schlussfolgerungen zeigen den weiteren Forschungsbedarf in tropischen Bergregenwäldern auf:

- Eine stärkere Fokussierung auf die N - und S - Mineralisierung in der organischen Auflage.
- Untersuchung der regionalen Verbreitung des Nebel- und Wolkeneintrags.
- Untersuchung der regionalen Verbreitung der Bodenfeuchte.
- Die Wurzeldynamik im hypsometrischen Wandel. Wie verhält sich die oberirdische zur unterirdischen Biomasse?
- Analyse der Kohlenstoffdynamik. Ist in den oberen Vegetationseinheiten aufgrund der ungünstigen Witterungsbedingungen mehr Energie für das Wurzelwachstum notwendig?
- Welche Bedeutung haben Erdrutschungen für die Bergnebelwaldökosysteme?

7. Zusammenfassung

In den Bergregenwaldökosystemen Boliviens wurde der hypsometrische Wandel von Boden, Klima und Streufall untersucht und der Zusammenhang der Vegetationsverbreitung mit den abiotischen Faktoren dargestellt.

Hypsometrische Bodengenese

Die Böden des Untersuchungsgebietes sind geprägt durch eine hohe Acidität, niedrige Kationenaustauschkapazität und eine hohe Al - Sättigung in den Mineralhorizonten und mächtigen organischen Auflagen von 30cm.

Die Verbreitung der Böden entsprechend der Bodengenese lässt sich in drei Abschnitte gliedern, die näherungsweise denen der Vegetationseinteilung entsprechen:

Im unteren Bergregenwald (LMF) sind von 1700m bis ca. 2100m Dystrudepts (SOIL SURVEY STAFF 1998) der dominierende Bodentyp. Dieser Bodentyp hat im Vergleich zu den höheren Vegetationsstufen höhere Nährstoffkonzentrationen, mit durchschnittlich $9.3 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ im A-Horizont und pH- Werten von durchschnittlich pH 4 (in CaCl_2), bei niedrigeren Niederschlägen und höheren Temperaturen.

Der deutliche Klimawandel im Übergang zum UMCF mit regelmäßigem Nebelaufkommen und zunehmenden Niederschlägen zeigt sich auch in der unterschiedlichen Genese der Böden des UMCF. Diese Böden (2100m - 2600m) sind geprägt durch eine höhere Acidität (pH 2.5 - 4.4), mächtigeren organischen Auflagen und eine zunehmende Sesquioxidverlagerung, so dass sie als spodic Dystrudepts klassifiziert werden können.

Der Übergang vom UMCF zum SCF stellt einen fließenden Übergang der bodengenetischen Differenzierung dar. Es handelt sich um hydromorphe Böden mit insgesamt niedrigen Mineralisationsraten (weites C:N - Verhältnis) und niedrigen Nährstoffkonzentrationen. In diesem Abschnitt dominieren Placaquods.

Die unterschiedliche Bodengenese auf gleichem Ausgangsgestein deutet auf differierende hydrologische Bedingungen in den Vegetationseinheiten hin. Über die Analyse der Fe -, Al - und C - Verteilung in den Bodenprofilen wurde die Wassersättigung des Bodens und die dominierende Richtung der Wasserflüsse abgeleitet. Es ergeben sich drei Stadien der Bodenentwicklung: Im LMF sind erste Tendenzen einer Sesquioxidverlagerung festzustellen. Die Verlagerung von Fe und Al im Boden nimmt mit zunehmender Höhe zu. Im UMCF dominieren podsolige Prozesse, wie die Bildung bzw. Verlagerung von metallorganischen Komplexen mit entsprechenden Bhs-Horizonten.

Im SCF wird durch die zunehmende Ausprägung eines hydromorph geprägten Bodenmilieus die Reduzierung des Eisens und dessen Fe-Verlagerung wirksam.

Das Vorhandensein oder Nichtvorhandensein von allochthonem Material (Löss), gravitativen Prozessen (Erdrutschungen) und Relieflagen modifizieren die Muster der Bodenbildung.

Hypsometrischer Wandel des Klimas

Das Klima des Bergnebelwaldes ist geprägt durch das regelmäßige Nebel - und Wolkenaufkommen ab den Höhen von 2200m.

Das regelmäßige Nebelaufkommen führt zu einer durchschnittlichen Reduktion der kurzwelligen Globalstrahlung im LMF um 37%, im UMCF 58% und im SCF 62% im Vergleich zur potentiellen Strahlung.

Die durchschnittliche potentielle Evapotranspiration (PET) sinkt von 3.3 mm d^{-1} auf 1.3 mm d^{-1} bzw. 1.1 mm d^{-1} . Trotz dieser niedrigen potentiellen Evapotranspiration ist die Wasser- bzw. Nährstoffaufnahme nicht reduziert (Grubb 1977, Santiago et al. 2000).

Die durchschnittliche photosynthetische Photonenflussdichte (PPFD) sinkt entsprechend der Globalstrahlung von $749 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ im LMF, $471 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ im UMCF auf $455 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ im SCF. Im Vergleich mit weiteren Studien in Ökosystemen der Bergregenwälder ist die PPFD jedoch ausreichend für eine Lichtsättigung der Pflanzen auch in den oberen Vegetationseinheiten (Aylett 1985, GARCIA - NUNEZ ET AL. 1995).

Die deutlich zunehmenden Jahresniederschläge von 2310 mm a^{-1} LMF, auf 3970 mm a^{-1} im UMCF und im SCF 5150 mm a^{-1} und die abnehmende PET führen zu einem linearen Anstieg der Bodenfeuchte. Die gravimetrische Feuchte in der organischen Auflage steigt von 2.6 g g^{-1} im LMF auf 4.5 g g^{-1} im UMCF und auf über 6 g g^{-1} im SCF.

Trotz der deutlichen Unterschiede in Bezug auf die kurzwellige Strahlung, die PPFD und die PET zwischen dem LMF und den höheren Vegetationseinheiten scheinen die meteorologischen Faktoren nur einen indirekten Einfluss auf die Vegetationsverteilung zu haben. Vielmehr scheinen die pedologischen Faktoren wie Mineralisierung, Auswaschung und Sauerstoffmangel die Hauptfaktoren für die Änderungen der Vegetationsstruktur und der Pflanzendiversität zu sein. Diese Parameter stehen in einer direkten Verbindung zur Wassersättigung des Bodens, welche wiederum durch Niederschlag und Evapotranspiration bedingt ist.

Streufall und Nährstoffumsatz in der organischen Auflage

Es bestehen große Unterschiede in der Nährstoffdynamik der drei Vegetationseinheiten LMF, UMCF und SCF. Diese Differenzen basieren hauptsächlich auf den unterschiedlichen Einträgen von Biomasse der abfallenden Streu und in der unterschiedlich schnellen Zersetzung dieser Streu. Im LMF sind die jährlichen Streueinträge drei bis viermal so hoch

wie in den höheren Vegetationseinheiten. Die Zersetzung erfolgt nach durchschnittlich 0.5 Jahren im LMF, während sie sich im UMCF auf 1.2 Jahre bzw. 1.3 Jahre im SCF verlangsamt.

Im Oi-Horizont bzw. in der organischen Auflage der drei Vegetationseinheiten gleichen sich die Unterschiede in den Nährstoffmengen an oder kehren sich um. In den organischen Auflagen im UMCF und im SCF sind gleich viel oder mehr Nährstoffe akkumuliert wie im LMF, da die organischen Auflagen in den oberen Vegetationseinheiten wesentlich mächtiger sind als im LMF. Es besteht daher kein absoluter Nährstoffmangel.

Eine Abhängigkeit des Vegetationstyps und seiner Verbreitung von den absoluten Elementkonzentrationen scheint unwahrscheinlich, da insbesondere die Unterschiede in der Vegetation zwischen UMCF und SCF nicht durch unterschiedliche Nährstoffmengen erklärt werden können, da sie annähernd gleich sind.

Die N- Mineralisierung wird mit zunehmender Höhe am stärksten reduziert, so dass wahrscheinlich neben einem S- Mangel der N-Mangel insbesondere in den oberen Vegetationseinheiten am gravierendsten wirkt.

Zusammenhang zwischen der Vegetationsverbreitung und abiotischen Faktoren

Die statistische Untersuchung des Zusammenhanges zwischen der Vegetationsverbreitung und den abiotischen Faktoren zeigt die übergeordnete Bedeutung des Wassereintrags in den oberen Vegetationseinheiten.

Die abnehmende Vegetationsdiversität zwischen dem LMF und den oberen Vegetationseinheiten ist bestimmt durch die abnehmende Temperatur und die zunehmende Bodenfeuchte, da sie zu ungünstigen Bodenbedingungen wie Sauerstoffarmut, geringere Nährstoffverfügbarkeit und reduzierte Mineralisierung führen. Auch wenn die Verbreitung der Vegetation nicht auf einen Faktor begrenzt werden kann, konzentriert sich die Vegetationsverbreitung auf diese Parameter.

Die Korrelation hat gezeigt, dass ein absoluter Nährstoffmangel nicht zu den dominanten Faktoren der Vegetationsverbreitung in dem Untersuchungsgebiet zählt. Weiterhin ist mit Ausnahme der terrestrischen Bromeliaceen kein Zusammenhang mit der Al- Sättigung im Boden festgestellt worden.

Zusammenfassend zeigt die statistische Analyse, dass die Vegetation in ihrer Verbreitung und in ihrer Bestandesstruktur hauptsächlich durch die hohe Bodenfeuchte in den oberen Vegetationseinheiten beeinflusst wird, aufgrund der verringerten Mineralisierung die Nährstoffverfügbarkeit reduziert ist und die niedrigen Sauerstoffgehalte zu ungünstigen Wurzelwachstumsbedingungen führen.

8. Danksagung

Ich möchte an dieser Stelle den vielen Personen und Organisationen danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben:

Das Projekt wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und dem Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit (BMZ) finanziert. Vielen Dank für die Förderung dieses Projektes.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. G. Gerold, für seine langjährige Unterstützung und Förderung und für die regelmäßige Betreuung bei inhaltlichen und organisatorischen Fragen. Herzlichen Dank an PD Dr. Stephan Glatzel für die gute Zusammenarbeit bei der Erstellung gemeinsamer Publikationen, für sein großes Interesse und seine ständige Bereitschaft, mich in diesem Projekt zu unterstützen und inhaltlich zu diskutieren.

Dr. Kerstin Bach möchte ich herzlich danken für die gute Kooperation während des Projektes, der Geländeaufenthalte, der Vorträge und der gemeinsamen statistischen Auswertung. Vielen Dank für die Ausgabe der Vegetationsdaten zur α -Diversität. Eine wirklich interdisziplinäre Zusammenarbeit!

Prof. Dr. R. Gradstein danke ich herzlich für die gute interdisziplinäre Kooperation und für die Unterstützung bei Vorträgen bzw. Publikationen.

Vielen Dank an Prof. em. Dr. B. Meyer für die ausführlichen inhaltlichen Diskussionen und Korrekturen des Streu- und Bodenteils der Dissertation.

Weiterhin möchte ich mich bei den Wissenschaftlern und Studenten des Instituto de Ecologia in La Paz herzlich bedanken: Dr. Stephan Beck für seinen ständigen Einsatz und seine Unterstützung, Dr. Monica Moraes und Dr. Mario Baudoin als Leiter des Institutes, Guillermina Miranda, Emilia García, Heidi Resnikowski, Narel Paniagua, Carla Maldonado, Jaime Chinchero, Patricia Amurrio, Rosa Isela Meneses, Pablo Blacutt, Alberto Pareja, Ivan Jiménez und Claudia Chumacero.

Herzlichen Dank an Carolina Garcia für die monatliche Trocknung und Wiegung der Streuproben sowie für die große Hilfe bei der Konferenzorganisation in La Paz.

Dank auch an die GTZ-Leitung in La Paz: Herrn Dr. von Braun und insbesondere dem Mitarbeiter Hugo Flores für die unbürokratische Hilfe.

Weiterhin möchte ich Jan Kirsten Biener, Jan Raddatz, Peter Just und Lars Joachim für die extrem harte Arbeit im Bergnebelwald und für die nachfolgenden Arbeiten im Institut herzlich danken. Besondere Anerkennung gebührt Lars Joachim, Uta Fritzen und Alberto Pareja, die mit ihren Diplomarbeiten wichtige Grundlagen im Bereich Boden und Bestandsklima gelegt haben.

Herzlichen Dank an die Bewohner von Chairó für die Arbeit im Gelände, insbesondere Vincente Paredes, Herminio Paredes, Elena Paredes und Rene Calisaya.

Vielen Dank an Dr. Thorsten Krömer und Carola Krömer für ihre Unterstützung in Bolivien und in Göttingen über das Fachliche hinaus.

Dank an den Leiter der Forschungsstation Dr. Luis Pacheco für die Kooperation.

Eine wichtige Hilfe boten mir die wissenschaftlichen Mitarbeiter an der Forschungsstation Tunquini Eddy Perez und Luis Arteaga bei der monatlichen Wartung und Auslesung der drei Klimastationen, ihnen auch vielen Dank.

Herzlichen Dank an Georg von Unold (Firma UMS, München) für die schnelle und verlässliche Beratung bei Wartungsfragen zu den meteorologischen Geräten.

Für die Analyse der Boden – und Streuproben im physisch - geographischen Labor danke ich Petra Voigt und Anja Södje unter der Leitung von Dr. Jürgen Grotheer.

Ich danke allen Kolleginnen und Kollegen der Abteilung Landschaftsökologie für die gute Zusammenarbeit.

Zum Schluss möchte ich mich ganz herzlich bei meinen Eltern und bei meiner Schwester Julia bedanken für ihre ständige Unterstützung und Hilfe.

Marcus Schawe

9. Literaturverzeichnis

- AERTS, R., DE CALUWE, H. & BELTMAN, B. (2003): Is the relation between nutrients supply and biodiversity co-determined by the type of nutrient limitation? *OIKOS*, 101: 489-498.
- AG BODEN (1996): *Bodenkundliche Kartieranleitung*. (392 S.). Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Hannover.
- AHNERT, F. (1987): *Beiträge zur Landeskunde Boliviens*. Aachen.
- ALDRICH, M., BUBB, P., HOSTETTLER, S. & VAN DE WIEL, H. (2000): *Tropical Montane Cloud Forests. Time for action*. (28 S.). WWF International / IUCN, Gland.
- AYLETT, G. (1985): Irradiance interception, leaf conductance and photosynthesis in Jamaican upper montane rain forest trees. *Photosynthetica*, 19: 323-337.
- BACH, K. (2004): *Vegetationskundliche Untersuchungen zur Höhenzonierung tropischer Bergregenwälder in den Anden Boliviens*. Wissenschaft in Dissertationen. (123 S.). Görich & Weiershausen, Marburg.
- BACH, K., SCHAWÉ, M., BECK, S., GEROLD, G., GRADSTEIN, S. & MORAES R., M. (2003): Vegetación, suelos y clima en los diferentes pisos altitudinales de un bosque montano de Yungas, Bolivia: Primeros resultados. *Ecología en Bolivia*, 38: 3-14.
- BARRY, R. (1992): *Mountain weather and climate*. Routledge, London, New York.
- BARSHAD, I. & ROJAS-CRUZ, L. (1950): A pedologic study of a podzol soil profile from the equatorial region of Colombia, South America. *Soil Science*, 70: 221-236.
- BARTHLOTT, W., LAUER, W. & PLACKE, A. (1996): Global distribution of species diversity in vascular plants: towards a world map of phytodiversity. *Erdkunde*, 50: 317-327.
- BECK, S. (1998): Floristic inventory of Bolivia - an indispensable contribution to sustainable development. In: BARTHLOTT, W. & WINIGER, M. (Hrsg.): *Biodiversity. A challenge for development, research and policy* (S. 243-266). Springer Verlag, Berlin.
- BENDIX, J. & RAFIQPOOR, M. (2001): Studies on the thermal conditions of soils at the upper tree line in the Paramo of Papallacta (Eastern Cordillera of Ecuador). *Erdkunde*, 55: 257-276.

- BENDIX, J., ROLLENBECK, R. & PALACIOS, W. (2004): Cloud detection in the tropics -a suitable tool for climate - ecological studies in the high mountains of Ecuador. *Int. J. Remote Sensing*, 25: 4521-4540.
- BENZING, D. (1990): Vascular epiphytes. General biology and related biota. (332 S.). Cambridge University Press, Cambridge.
- BHATTARAI, K. & VETAAS, O. (2003): Variation in plant species richness of different life forms along a subtropical elevation gradient in the Himalayas, East Nepal. *Global Ecology and Biogeography*, 12: 327-340.
- BLUME, H. & SCHWERTMANN, U. (1969): Genetic evaluation of profile distribution of Aluminium, Iron, and Manganese Oxides. *Soil Science Society of America Proceedings*, 33: 438-444.
- BÖHNER, J., KÖTHE, R. & TRACHINOW, C. (1997): Weiterentwicklung der automatischen Reliefanalyse auf der Basis von digitalen Geländemodellen. *Göttinger Geographische Abhandlungen*, 100: 3-21.
- BRAUN-BLANQUET, J. (1964): Pflanzensoziologie. Springer, Berlin.
- BROWN, J. (1988): Species diversity. In: MYERS, A. & GILLER, P. (Hrsg.): *Analytical biogeography*. Chapman & Hall, London.
- BRUIJNZEEL, L. & HAMILTON, L. (2000): Decision time for cloud forests. *IHP Humid Tropics Programme Series*, Nr. 13. Unesco Division of Water Sciences, Paris.
- BRUIJNZEEL, L. & PROCTOR, J. (1995): Hydrology and biogeochemistry of tropical montane cloud forests: what do we really know? In: HAMILTON, L., JUVIK, J. & F.N. SCATENA, (Hrsg.): *Tropical montane cloud forests* (S. 38-78). Springer Verlag, New York.
- BRUIJNZEEL, L. & VENEKLAAS, E. (1998): Climatic conditions and tropical montane forest productivity: the fog has not lifted yet. *Ecology*, 79: 3-9.
- BRUIJNZEEL, L. (1983): Element content of litterfall in a lower montane rain forest in Central Java, Indonesia. *Malayan Nature Journal*, 37: 199-208.
- BRUIJNZEEL, L. (2001): Hydrology of tropical montane cloud forests: A reassessment. *Land Use and Water Resources Research*, 1: 1-18.
- BRUIJNZEEL, L., WATERLOO, M., PROCTOR, J., KUITERS, A. & KOTTERINK, B. (1993): Hydrological observations in montane rain forests on Gunung Silam, Sabah, Malaysia, with special reference to the 'Massenerhebung' effect. *Journal of Ecology*, 81: 145-167.

- BUBB, P., MAY, I., MILES, L. & SAYER, J. (2004): Cloud forest agenda. UNEP-WCMC Biodiversity Series No 20, Cambridge.
- BURNHAM, C. (1974a): The role of the soil forming factors in controlling altitudinal zonation on granite in Malaysia. In: FLENLEY, J. (Hrsg.): Altitudinal zonation in Malaysia. Miscellaneous Series, 16. (S. 59-74). University of Hull, Department of Geography.
- BURNHAM, C. (1974b): Altitudinal changes in soils on granite in Malaysia. Int. Cong. Soil. Sci., 10: 290-296.
- BUSSMANN, R. W. (2001): The montane forests of Reserva Biologica San Francisco (Zamora-Chinchipe, Ecuador). Vegetation zonation and natural regeneration. Die Erde, 132: 9-25.
- CABIDO, M., BREIMER, R. & VEGA, G. (1987): Plant communities and associated soil types in a high plateau of the Cordoba Mountains, Central Argentina. Mountain Research and Development, 30: 25-42.
- CAVELIER, J. & MEJIA, C. (1990): Climatic factors and tree stature in the elfin cloud forest of Serrania de Macuira, Colombia. Agricultural and Forest Meteorology, 53: 105-123.
- CAVELIER, J., TANNER, E. & SANTAMARIA, J. (2000): Effect of water, temperature and fertilizers on soil nitrogen net transformations and tree growth in an elfin cloud forest of Colombia. Journal of Tropical Ecology, 16: 83-99.
- CHAPIN, F. (1991): Integrated response of plants to stress. Bioscience, 41: 29-36.
- CHAZDON, R. & FETCHER, N. (1984): Photosynthetic light environments in a lowland tropical rain forest in Costa Rica. Journal of Ecology, 72: 553-564.
- CHURCHILL, S., BALSLEV, H., FORERO, E. & LUTEYN, J. (1995): Biodiversity and conservation of neotropical montane forests. The New Botanical Garden, New York.
- CLINEBELL, R., PHILLIPS, O., GENTRY, A., STARK, N. & ZUURING, H. (1995): Prediction of neotropical tree and liana species richness from soil and climatic data. Biodiversity and Conservation, 4: 56-90.
- CUELLAR, R. J. B., PAREDES, X. & TERAN, R. (1995): Aspectos sociales y economicos relacionados al manejo del parque nacional y area natural de manejo integrado Cotapata. In: MORALES, C. (Hrsg.): Caminos de Cotapata. Instituto de Ecologia. La Paz, Bolivia.
- DOORENBOS, J. & PRUITT, W. (1988): Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper, 33. Rom.

- DOUMENGE, C., GILMOUR, D., PEREZ, M. & BLOCKHUS, J. (1995): Tropical montane cloud forests. Conservation status and management issues. In: HAMILTON, L., JUVIK, J. & SCATENA, F. (Hrsg.): Tropical montane cloud forests ecological studies 110 (S. 24-37). Springer Verlag, New York.
- EDWARDS, P. (1982): Studies of mineral cycling in a montane rain forest in New Guinea. Rates of cycling in throughfall and litter fall. *Journal of Ecology*, 70: 807-827.
- ELLENBERG, H. (1975): Vegetationsstufen in perhumiden bis perariden Bereichen der tropischen Anden. *Phytocoenologia*, 2: 368-387.
- EMCK, P. (in prep.): Klimadifferenzierung in Südecuador. Universität Erlangen, Dissertation am Institut für Geographie.
- FÖLSTER, H. & FASSBENDER, H. (1978): Untersuchungen über Bodenstandorte der humiden Bergwälder in der nördlichen Andenkordilliere. Wissenschaftliche Tagung 'Landnutzung in den humiden Gebieten der Tropen'. Göttingen.
- FOSTER, P. (2001): The potential negative impacts of global climate change on tropical montane cloud forests. *Earth- Science Reviews*, 55: 73-106.
- FRAHM, J. & GRADSTEIN, S. R. (1991): An altitudinal zonation of tropical rain forests using bryophytes. *Journal of Biogeography*, 18: 669-678.
- GARCIA- NUNEZ, C. & AZOCAR, A. A. R. F. (1995): Photosynthetic acclimation to light in juveniles of two cloud forest tree species. *Trees*, 10: 114-124.
- GENTRY, A. & DODSON, C. (1987): Contribution of nontrees to species richness of a tropical rain forest. *Biotropica*, 19: 149-156.
- GENTRY, A. (1982): Patterns of neotropical plant species diversity. *Evol. Biol.* 15:1-84.
- GENTRY, A. (1988): Changes in plant community diversity and floristic composition on environmental and geographical gradients. *Ann. Missouri Bot. Gard.*, 75: 1-34.
- GENTRY, A. (1992): Tropical forest biodiversity: distributional patterns and their conservational significance. *Oikos*, 63: 19-28.
- GENTRY, A. (1995): Patterns of diversity and floristic composition in neotropical montane forests. In: CHURCHIL, S. B. H., FORERO, E. & LUTEYN, J. (Hrsg.): Biodiversity and conservation of neotropical montane forests. (S. 103-126). The New York Botanical Garden, New York.
- GEOBOL (1993): Carta Geologica de Bolivia. Hoja 6045 Coroico, SGB Serie I-CGB-29.

- GEROLD, G. (1985): Klimatische und pedologische Bodennutzungsprobleme im ostbolivianischen Tiefland von Santa Cruz. In: BUCHHOLZ, H. J. (Hrsg.): Bolivien. Beiträge zur physischen Geographie eines Andenstaates (S. 69-162). Selbstverlag der geographischen Gesellschaft Hannover, Hannover.
- GEROLD, G. (1987): Untersuchungen zur Klima-, Vegetationshöhenstufung und Bodensequenz in SE-Bolivien. Ein randtropisches Andenprofil vom Chaco bis zur Puna. Aachener Geographische Arbeiten, 19: 1-71.
- GEROLD, G. (1989): Human Impact on forest ecosystems and soil deterioration in tropical Bolivia. In: ERDELEN, W., ISHWARAN, N. & MÜLLER, P. (Hrsg.): Proceedings of the international and interdisciplinary symposium „Tropical Ecosystems“. (S. 107-120). Saarbrücken.
- GEROLD, G. (1991): Nutzungseingriffe in tropischen Waldgesellschaften und deren pedo-ökologische Folgen (Bolivien). Giessener Beiträge zur Entwicklungsforschung, 19.
- GEROLD, G., SCHAWÉ, M. & JOACHIM, L. (2003): Pedoökologische hypsometrische Varianz in ungestörten Bergregenwäldern der Anden (Yungas). Geoöko, 24: 153-162.
- GERRISH, G., MUELLER - DOMBOIS, D. & BRIDGES, K. (1988): Nutrient limitation and metrosideros dieback in Hawaii. Ecology, 69: 723-727.
- GILL, A. (1969): The Ecology of an elfin forest in Puerto Rico. Aerial Roots. Journal of Arnold Arboretum, 50: 197-209.
- GOLLER, R., WILCKE, W., LENG, M., TOBSCHALL, H., WAGNER, K., VALAREZO, C. & ZECH, W. (2005 im Druck): Tracing water paths through small catchments under a tropical montane rain forest in south Ecuador by an oxygen isotope approach. Journal of Hydrology.
- GRAF, K. (1986): Klima und Vegetationsgeographie der Anden. Grundzüge Südamerikas und pollenanalytische Spezialuntersuchung Boliviens. In: FURRER, G., KELLER, W. & GAMPER, M. u. (Hrsg.): Physische Geographie. Zürich.
- GRIEVE, I., PROCTOR, J. & COUSINS, S. (1990): Soil variation with altitude on Volcan Barva, Costa Rica. Catena Supplement, 17: 525-534.
- GRIMM, U. & FASSBENDER, H. (1981): Ciclos bioquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. Inventario de las reservas orgánicas y minerales (N,P,K,Ca,Mg,Mn,Fe,Al,Na). Turrialba, 31: 27-37.
- GRUBB, P. & TANNER, E. (1976): The montane forests and soils of Jamaica: a reassessment. Journal of the Arnold Arboretum, 57: 313-368.

- GRUBB, P. & WHITMORE, T. (1966): A comparison of montane and lowland rainforest in Ecuador. The climate and its effects on the distribution and physiognomy of the forests. *Journal of Ecology*, 54: 303-333.
- GRUBB, P. (1971): Interpretation of the 'Massenerhebung' effect on tropical mountains. *Nature*, 229: 44-45.
- GRUBB, P. (1974): Factors controlling the distribution of forest-types on tropical mountains: new facts and a new perspective. In: FLENLEY, J. (Hrsg.): *Altitudinal zonation in Malaysia, transaction of the third Aberdeen symposium on Malesian ecology* (S. 13-45). University of Hull. Hull.
- GRUBB, P. (1977): Control of forest growth and distribution on wet tropical mountains: with special reference to mineral nutrition. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 8: 83-107.
- GRUBB, P. (1995): Mineral nutrition and soil fertility in tropical rain forests. In: LUGO, A. & LOWE, C. (Hrsg.): *Tropical forests: management and ecology. Ecological Studies* 112 (S. 308-330). Springer Verlag, New York.
- GRUBB, P., LLOYD, J., PENNINGTON, T. & WHITMORE, T. (1963): A comparison of montane and lowland rain forest in Ecuador. The forest structure, physiognomy and floristics. *Journal of Ecology*, 51: 567-601.
- GRYTNES, J. & VETAAS, O. (2002): Species richness and altitude, a comparison between simulation models and interpolated plant species richness along the Himalayan altitudinal gradient. *American Naturalist*, 159: 294-304.
- HAFKENSCHIED, R. (2000): *Hydrology and biogeochemistry of tropical montane rain forests of contrasting stature in the Blue Mountains, Jamaica*. Amsterdam.
- HAMILTON, A. (1975): A quantitative analysis of altitudinal zonation in Uganda forests. *Vegetatio*, 30: 99-106.
- HEALEY, J. (1989): A bioassay study of soils in the Blue Mountains of Jamaica. In: PROCTOR, J. (Hrsg.): *Mineral nutrients in tropical forest and savanna ecoystems* (S. 273-287). Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- HEANEY, A. & PROCTOR, J. (1989): Chemical elements in litter in forests on Volcán Barva, Costa Rica. In: PROCTOR, J. (Hrsg.): *Mineral nutrients in tropical forest and savanna ecoystems* (S. 255-271). Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- HEINRICHS, H., BRUMSACK, H., LOFTFIELD, N. & KÖNIG, N. (1986): Verbessertes Druckaufschlusssystem für biologische und anorganische Materialien. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 149: 350-353.

- HENDERSON, A., CHURCHILL, S. & LUTEYN, J. (1991): Neotropical plant diversity. *Nature*, 351: 21-22.
- HENNING, I. & HENNING, D. (1981): Potential evapotranspiration in mountain geoeosystems of different altitudes and latitudes. *Mountain Research and Development*, 1: 267-274.
- HERRMANN, R. (1971): Die zeitliche Änderung der Wasserbindung im Boden unter verschiedenen Vegetationsformationen der Höhenstufen eines tropischen Hochgebirges (Sierra Nevada de Sta Maria/Kolumbien). *Erdkunde*, 25: 90-112.
- HETSCH, W. & HOHEISEL, H. (1976): Standorts- und Vegetationsgliederung in einem tropischen Nebelwald. *Allg. Forst- und J.-Ztg.*, 147: 200-208.
- HETSCH, W. (1976): Die Beziehung von Niederschlag und Bodenbildung in der Andenkordillere Venezuelas. Dissertation, Universität Göttingen, Göttingen.
- HOFSTEDE, R., WOLF, J. & BENZING, D. (1993): Epiphytic biomass and nutrient status of a Colombian upper montane rain forest. *Selbyana*, 14: 37-45.
- HOHMEIER, J. & BRECKLE, S. (2005): Tree regeneration within natural canopy gaps in a South Ecuadorian montane forest. *Proceedings of the 18th Conference of the Society of Tropical Ecology (GTÖ)*, Berlin.
- HOLRIDGE, L., GRENKE, W., HATHEWAY, W., LIANG, T. & TOSI, J. (1971): Forest environments in tropical life zones. A pilot study. Pergamon Press, Oxford.
- IBISCH, P. (1996): Neotropische Epiphytendiversität - das Beispiel Bolivien. Martina Galunder - Verlag, Wiehl.
- ISHIBASHI, M. & TERASHIMA, I. (1995): Effects of continuous leaf wetness on photosynthesis: adverse aspects of rainfall. *Plant, Cell and Environment*, 18: 431-438.
- JENNY, H. (1948): Great soil groups in the equatorial regions of Colombia, South America. *Soil Science*, 66: 5-28.
- KAPPELLE, M., UFFELEN, J. & CLEEF, A. (1995): Altitudinal zonation of montane *Quercus* forests along two transects in the Chirripo National Park Costa Rica. *Vegetatio*, 119: 119-154.
- KEIG, G., FLEMING, P. & MCALPINE, J. (1979): Evaporation in Papua New Guinea. *The Journal of Tropical Geography*, 48: 19-30.
- KESSLER, M. & BACH, K. (1999): Using indicator families for vegetation classification in species - rich neotropical forests. *Phytocoenologia*, 29: 485-502.

- KESSLER, M. & BECK, S. (2001): Bolivia. In: KAPPELLE, M. & BROWN, A. (Hrsg.): *Bosques nublados del neotrópico* (S. 581-622). Costa Rica.
- KESSLER, M. (1999): Plantspecies richness and endemism during natural landslides succession in a perhumid montane forest in the Bolivian Andes. *Ecotropica*, 5: 123-136.
- KESSLER, M. (2000a): Altitudinal zonation of Andean cryptogam communities. *Journal of Biogeography* 27:275 – 282.
- KESSLER, M. (2000b): Elevational gradients in species richness and endemism of selected plant groups in the central Bolivian Andes. *Plant Ecology*, 149: 181-193.
- KITAYAMA, K. & AIBA, S. (2002): Ecosystem structure and productivity of tropical rain forests along altitudinal gradients with contrasting soil phosphorus pools on Mount Kinabalu, Borneo. *Journal of Ecology*, 90: 37-51.
- KITAYAMA, K. & MUELLER DOMBOIS, D. (1994): An altitudinal transect analysis of the windward vegetation on Haleakala, a Hawaiian island mountain. *Climate and soils. Phytocoenologia*, 24: 111-133.
- KITAYAMA, K. (1992): An altitudinal transect study of the vegetation on Mount Kinabalu, Borneo. *Vegetatio*, 102: 149-171.
- KÖRNER, C. & ALLISON, A. & H. H. (1983): Altitudinal variation of leaf diffusive conductance and leaf anatomy in Heliophytes of montane New Guinea and their interrelation with microclimate. *Flora*, 174: 91-135.
- KÖRNER, C. & BAHN, M. (1989): The nutritional status of plants from high altitudes. *Oecologia*, 22: 379-391.
- KÖRNER, C. (2003): *Alpine plant life. Functional plant ecology of high mountain ecosystems.* Springer Verlag, Berlin.
- KÖRNER, C., NEUMAYER, M., MENENDEZ-RIEDL, S. & SMEETS-SCHEEL, A. (1989): Functional morphology of mountain plants. *Flora*, 182: 353-383.
- KOZLOWSKI, T. & PALLARDY, S. (1984): Effects of flooding on water, carbohydrate and mineral relations. In: KOZLOWSKI, T. (Hrsg.): *Flooding and plant growth.* (S. 166-193). Academic Press, New York.
- KOZLOWSKI, T. (1976): Water supply and leaf shedding. In: KOZLOWSKI, T. (Hrsg.): *Water deficits and plant growth.* (S. 166-193). Academic Press, New York.
- LAMBERT, L. & CHITRAKAR, B. (1989): Variation of potential evapotranspiration with elevation in Nepal. *Mountain Research and Development*, 9: 145-152.

LARCHER, W. (2003): Ökophysiologie der Pflanzen. Ulmer, Stuttgart.

- LAUER, W. & ERLNBACH, W. (1987): Die tropischen Anden. Geoökologische Raumgliederung und ihre Bedeutung für den Menschen. Geographische Rundschau, 39: 86-95.
- LAUER, W. (1975): Klimatische Grundzüge der Höhenstufung tropischer Gebirge. (76-90 S.). Steiner Verlag, Innsbruck.
- LAUER, W. (1986): Das Klima der Tropen und Subtropen. In: REHM, S. (Hrsg.): Grundlagen des Pflanzenbaus in den Tropen und Subtropen (S. 16-45). Stuttgart.
- LAUSCHER, F. (1976): Weltweite Typen der Höhenabhängigkeit des Niederschlags. Wetter Leben, 28: 89-90.
- LESER, H. (1998): Dierke Wörterbuch Allgemeine Geographie. Westermann Verlag, München.
- LETTS, M. & MULLIGAN, M. (in prep.): The impact of light quality and leaf wetness on photosynthesis in North - West Andean tropical montane cloud forest.
- LEUSCHNER, C. (2000): Are high elevations in tropical mountains arid environments for plants? Ecology, 81: 1425-1436.
- LIEBERMAN, D., LIEBERMAN, M., PERALTA, R. & HEARTSHORN, G. S. (1996): Tropical forest structure and composition on a largescale altitudinal gradient in Costa Rica. Journal of Ecology, 84: 137-152.
- LOMOLINO, M. (2001): Elevation gradients of species - density: historical and prospective views. Global Ecology and Biogeography, 10: 3-13.
- LÜER, B. & BÖHMER, A. (2000): Vergleich zwischen Perkolation und Extraktion mit 1 M NH_4Cl - Lösung zur Bestimmung der effektiven Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) von Böden. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 163: 555-557.
- LYFORD, W. H. (1969): The Ecology of an elfin forest in Puerto Rico. Soil, root, and earthworm relationships. Journal of Arnold Arboretum, 50: 210-224.
- MARKHAM, A. (1998): Potential impacts of climate change of tropical forest ecosystems (guest editorial). Climate Change, 39: 141-143.
- MARRS, R., PROCTOR, J. & HEANEY, A. (1988): Changes in soil nitrogen-mineralization and nitrification along an altitudinal transect in tropical rain forest in Costa Rica. Journal of Ecology, 76: 466-482.
- MONTEITH, J. & UNSWORTH, M. (1990): Principles of environmental physics. Edwards Arnold, London.

- MORAES, M. & BECK, S. (1992): Diversidad florística de Bolivia. In: MARCONI, M. (Hrsg.): Conservación de la diversidad biológica en Bolivia. (S. 73-112). Centro de datos para la conservación, La Paz.
- MOTZER, T. (2003): Bestandsklima, Energiehaushalt und Evapotranspiration eines neotropischen Bergregenwaldes. Mannheimer Geographische Arbeiten. Selbstverlag des Geographischen Instituts der Universität Mannheim, Mannheim.
- MYERS, N., MITTERMEIER, R., MITTERMEIER, C., FONSEGA, G. & KENT, J. (2000): Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403: 853-858.
- NADKARNI, N. & MATELSON, T. (1992a): Biomass and nutrient dynamics of epiphytic litterfall in a neotropical montane forest, Costa Rica. *Biotropica*, 24: 24-30.
- NADKARNI, N. & MATELSON, T. (1992b): Biomass and nutrient dynamics of fine litter of terrestrially rooted material in a neotropical montane forest, Costa Rica. *Biotropica*, 24: 113-120.
- NADKARNI, N. (1986): The nutritional effects of epiphytes on host trees with special reference to alteration of precipitation chemistry. *Selbyana*, 9: 44-51.
- NORTHUP, R., DAHLGREN, R. & ZU, Z. (1995): Intraspecific variation of conifer phenolic concentration on a marine terrace soil acidity gradient: a new interpretation. *Plant and Soil*, 171: 255-262.
- NULLET, D. & JUVIK, J. (1994): Generalised mountain evapotranspiration profiles for tropical and subtropical latitudes. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 15: 17-24.
- ODLAND, A. & BIRKS, H. (1999): The altitudinal gradient of vascular plant species richness in Aurland, Western Norway. *Ecography*, 22: 262-266.
- ODUM, H. (1970): Rain forest structure and mineral cycling homeostasis. In: ODUM, H. & PIDGEON, R. (Hrsg.): A tropical rain forest, a study of irradiation and ecology at El Verde, Puerto Rico. (S. H3-H52). U.S. Atomic Energy Commission, Oak Ridge.
- OLIVEIRA-FILHO, A. T., VILELA, E. A. & CARVALHO, D. A. (1994): Effects of soils and topography on the distribution of tree species in a tropical riverine forest in South-Eastern Brazil. *Journal of Tropical Ecology*, 1994: 483-508.
- PAREJA MILLÁN, A. (in prep.): Variación hipsométrica y vertical del clima en el bosque nublado, caso Cerro Hornuni - Parque Nacional Cotapata. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität Mayor de San Andrés, Ökologisches Institut. La Paz.

- PEARCY, R. (1983): The light environment and growth of C3 and C4 tree species in the understorey of a Hawaiian forest. *Oecologia*, 58: 19-25.
- PENDRY, C. & PROCTOR, J. (1996): The causes of altitudinal zonation of rain forests on Bukit Belalong, Brunei. *Journal of Ecology*, 84: 407-418.
- POUNDS, J. F. M. & CAMPBELL, J. (1999): Biological response to climate change on a tropical mountain. *Nature*, 398: 611-615.
- PROCTOR, J. & L.A. BRUIJNZEEL & A.J.M. BAKER, (1999): What causes the vegetation types on Mount Bloomfield, a coastal tropical mountain of the Western Philippines? *Global Ecology and Biogeography*, 8: 347-354.
- PROCTOR, J. (1983): Tropical Forest Litterfall. I. Problems of data comparison. In: SUTTON, S., WHITMORE, T. & CHADWICK, A. (Hrsg.): *Tropical rain forest: ecology and management* (S. 267-273). Blackwell Scientific Publications. Oxford.
- PROCTOR, J. (1987): Nutrient cycling in primary and old secondary rainforests. *Applied Geography*, 7: 135-152.
- PROCTOR, J. (1989): *Mineral nutrients in tropical forest and savanna ecosystems*. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- PROCTOR, J., PHILLIPS, C., DUFF, G., HEANEY, A. & ROBERTSON, F. (1989): Ecological studies on Gunung Silam, a small ultrabasic mountain in Sabah, Malaysia. II. Some forest processes. *Journal of Ecology*, 77: 317-331.
- RAICH, J. & NADELHOFFER, K. (1989): Belowground carbon allocation in forest ecosystems: global trends. *Ecology*, 70: 1346-1354.
- REASONER, M., GRAUMILCH, L., MESSERLI, B. & BUGMANN, B. (2002): Global change and mountains. *Newsletter of the International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change (IHDP)*, 1: 1-5.
- RENGER, M. (1971): Die Ermittlung der Porengrößenverteilung aus der Körnung, dem Gehalt an organischer Substanz und der Lagerungsdichte. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 12: 53-67.
- REYNDERS, J. (1964): A soil sequence in the tropics from sea level to eternal snow. 8th International Congress of Soil Science, 8: 733-739.
- RIBERA, M. (1995): Aspectos ecologicos, del uso de la tierra y conservacion en el Parque Nacional y Area Natural de Manejo Integrado Cotapata. In: MORALES, C. (Hrsg.): *Caminos de Cotapata*. Instituto de Ecologia. La Paz, Bolivia.
- RICHARDS, P. (1952): *The tropical rain forest*. Cambridge University Press, Cambridge.

- RICHTER, M. (2001): Vegetationszonen der Erde. Klett – Perthes, Gotha.
- RICHTER, M. (2003): Using epiphytes and soil temperatures for eco-climatic interpretations in Southern Ecuador. *Erdkunde*, 57: 161-182.
- ROCHE, M., JAUREGUI, F., RIVERA, A., PENA MENDEZ, J., SALAS RADA, E. & MONTANO VARGAS, J. (1992): Balance hidrico supervicial de Bolivia. Orstom, La Paz.
- ROLLENBECK, R., BENDIX, J. & FABIAN, P. (2005 eingereicht): Spatial and temporal dynamics of atmospheric water- and nutrient inputs in tropical mountain forests of Southern Ecuador. Proceedings of the 2nd International Symposium on Tropical Montane Cloud Forests. Waimea, Hawaii, USA.
- RUIZ, F. S. Z. (1999): Abundancia distribucion altitudinal, estructura y uso de rodales de podocarpus (pino de monte) en el cerro hornuni, del parque nacional y area natural de manejo integrado cotapata. Unveröffentlichte Diplomarbeit, UMSA, Instituto de Ecologia. La Paz.
- SANTIAGO, L., GOLDSTEIN, G., MEINZER, F., FOWNES, J. & MUELLER-DOMBOIS, D. (2000): Transpiration and forest structure in relation to soil waterlogging in a Hawaiian montane cloud forest. *Tree Physiology*, 20: 673-681.
- SCHAWWE, M., GEROLD, G., BACH, K. & GRADSTEIN, S. (2005 akzeptiert): Hydrometeorological patterns in relation to forest structure and plant species diversity along an elevational gradient in a montane cloud forest in the Yungas, Bolivia. In: BRUIJNZEEL, S., JUVIK, J. & HAMILTON, L. (Hrsg.): Proceedings of the 2nd International Symposium on Tropical Montane Cloud Forests. Waimea, Hawaii, USA.
- SCHAWWE, M., GLATZEL, G. & GEROLD, G. (2003): Bodengenese entlang eines Vertikaltranssekts in bolivianischen Bergregenwäldern. *Mitt. Deutsch. Bodenk. Ges.*, 102: 561-562.
- SCHAWWE, M., GLATZEL, S. & GEROLD, G. (2005 eingereicht): Soil development along an altitudinal transect in a Bolivian tropical montane rainforest: podzolization vs. hydromorphy. *Catena*.
- SCHEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- SCHINNER, F. (1982): Soil microbial activities and litter decomposition related to altitude. *Plant and Soil*, 65: 87-94.
- SCHLICHTING, E., BLUME, H. & STAHR, K. (1995): Bodenkundliches Praktikum. (295 S.). Blackwell Wissenschaftsverlag, Berlin.

- SCHMITT, A. (2003): Zusammenhang zwischen Humuseigenschaften und Baumwachstum entlang eines Höhengradienten in einem ecuadorianischen Bergregenwald. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität Bayreuth, Geoökologie. Bayreuth.
- SCHRÖTER, C. (1926): Das Pflanzenleben der Alpen. Albert Raustein, Zürich.
- SCHRUMPF, M., GUGGENBERGER, G. & VALAREZO, C. (2001): Tropical montane rain forest soils. Development and nutrient status along an altitudinal gradient in the South Ecuadorian Andes. *Die Erde*, 132: 43-59.
- SEGAL, M. & DAVIS, J. (1992): The impact of cumulus reflection on the ground- level global irradiance. *Journal of Applied Meteorology*, 31: 217-222.
- SEVINK, J. (1984): An altitudinal sequence of soils in the Sierra Nevada de Santa Marta (Ecoandes). In: VAN DER HAMMEN, T. (Hrsg.): *Studies on tropical Andean ecosystems 2* (S. 131-137). Cramer, Vaduz.
- SILVER, W. & VOGT, K. (1993): Fine root dynamics following single and multiple disturbance in a subtropical wet forest ecosystem. *Journal of Ecology*, 81: 729-738.
- SILVER, W., LUGO, A. & KELLER, M. (1999): Soil oxygen availability and biogeochemistry along rainfall and topographic gradients in upland wet tropical forest soils. *Biogeochemistry*, 44: 301-328.
- SOIL SURVEY STAFF (1998): *Keys to soil taxonomy*. USDA-SCS Agric. Handbook. (326 S.). U.S. Gov. Print. Office, Washington D.C..
- SOJKA, R. (1992): Stomatal closure in oxygen - stressed plants. *Soil Science*, 154: 269-280.
- SOLLINS, P. (1998): Factors influencing species composition in tropical lowland rainforest: does soil matter? *Ecology*, 79: 23-30.
- STADTMÜLLER, T. (1987): *Cloud forests in the humid tropics. A bibliographic review*. The United Nations University, Tokyo.
- STEINHARDT, U. (1979): *Untersuchungen über den Wasser- und Nährstoffhaushalt eines andinen Wolkenwaldes in Venezuela*. Göttinger Bodenkundliche Berichte, Göttingen.
- STEVENS, G. (1989): The latitudinal gradient in geographical range: how so many species coexist in the tropics. *The American Naturalist*, 133: 240-256.
- STEVENS, G. (1992): The elevational gradient in altitudinal range, an extension of Rapoport's latitudinal rule to altitude. *American Naturalist*, 140: 893-911.

- TANNER, E. (1977): Four montane rain forests of Jamaica. A quantitative characterization of the floristics, the soils and the foliar mineral levels, and a discussion of the interrelations. *Journal of Ecology*, 65: 883-918.
- TANNER, E. (1980): Litterfall in tropical montane rainforests of Jamaica and its relation to climate. *Journal of Ecology*, 68: 833-848.
- TANNER, E. (1981): The decomposition of leaf litter in Jamaican montane rain forests. *Journal of Ecology*, 69: 263-275.
- TANNER, E., KAPOV, V., FRESKOS, S., HEALEY, J. & THEOBALD, A. (1990): Nitrogen and phosphorus fertilization of Jamaican montane forest trees. *Journal of Tropical Ecology*, 6: 231-238.
- TANNER, E., VITOUSEK, P. & CUEVAS, E. (1998): Experimental investigation of nutrient limitation of forest growth on wet tropical mountains. *Ecology*, 79: 10-22.
- TANNERS, W. & BEEVERS, H. (1990): Does transpiration have an essential function in long-distance ion transport in plants? *Plant Cell Environment*, 13: 745-750.
- TROLL, C. (1959): Die tropischen Gebirge. Ihre dreidimensionale klimatische und pflanzengeographische Zonierung. *Bonner Geographische Abhandlungen*, 25. Bonn.
- TUOMISTO, H. & DALBERG POULSEN, A. (1996): Influence of edaphic specialization on pteridophyte distribution in neotropical rain forests. *Journal of Biogeography*, 23: 283-293.
- VAN DER HAMMEN, T., MUELLER-DOMBOIS, D. & LITTLE, M. (1989): Manual of methods for mountain transect studies. Comparative studies of tropical mountain ecosystems. International Union of Biological Science, Paris.
- VAZQUEZ, J. & GIVNISH, T. (1998): Altitudinal gradients in tropical forest composition, structure and diversity in the Sierra de Manantlan. *Journal of Ecology*, 86: 999-1020.
- VENEKLAAS, E. & VAN EK, R. (1990): Rainfall interception in two tropical montane rain forests, Colombia. *Hydrological processes*, 4: 311-326.
- VENEKLAAS, E. (1991): Litterfall and nutrient fluxes in two montane tropical rain forests, Colombia. *Journal of Tropical Ecology*, 7: 319-336.
- VITOUSEK, P. & SANFORD, R. (1986): Nutrient cycling in moist tropical forest. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 17: 137-167.
- VITOUSEK, P. (1984): Litterfall, nutrient cycling, and nutrient limitation in tropical forests.

- Ecology, 65: 285-298.
- VITOUSEK, P., TURNER, D. & KITAYAMA, K. (1995): Foliar nutrients during long term soil development in Hawaiian montane rain forest. Ecology, 76: 712-720.
- WEAVER, P., BYER, M. & BRUCK, D. (1973): Transpiration rates in the Luquillo Mountains of Puerto Rico. Biotropica, 5: 123-133.
- WEAVER, P., MEDINA, E., POOL, D., DUGGER, K. & GONZALES- LIBOY, (1986): Ecological observations in the dwarf cloud forest of the Luquillo mountains in Puerto Rico. Biotropica, 18: 79-85.
- WEGNER, C., WUNDERLICH, M., KESSLER, M. & SCHAWÉ, M. (2003): Foliar C:N ratio of ferns along an Andean elevational gradient. Biotropica, 35: 486-490.
- WEISCHET, W. (1969): Klimatologische Regeln zur Vertikalverteilung der Niederschläge in Tropenbergen. Die Erde, 100: 287-306.
- WHITEMAN, C. (2000): Mountain meteorology. Fundamentals and applications. Oxford University Press, Oxford.
- WHITMORE, T. & BURNHAM, C. (1969): The altitudinal sequence of forests and soils on granite near Kuala Lumpur. Malayan Nature Journal, 22: 99-118.
- WHITMORE, T. & BURNHAM, C. (1984): Tropical rain forests of the Far East. Oxford University Press, New York.
- WHITMORE, T. (1989): Tropical forest nutrients, where do we stand? A tour de horizon. In: PROCTOR, J. (Hrsg.): Mineral nutrients in tropical forest and savanna ecosystems. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- WHITMORE, T. (1998): An introduction to tropical rain forest. Oxford.
- WILCKE, W., YASIN, S. & VALAREZO, C. (2001a): Nutrient budget of three microcatchments under tropical montane rain forest in Ecuador - preliminary results. Die Erde, 132: 61-74.
- WILCKE, W., YASIN, S., ABRAMOWSKI, U., VALAREZO, C. & ZECH, W. (2002): Nutrient storage and turnover in organic layers under tropical montane rain forest in Ecuador. European Journal of Soil Science, 53: 15-27.
- WILCKE, W., YASIN, S., VALAREZO, C. & ZECH, W. (2001b): Change in water quality during the passage through a tropical montane rain forest in Ecuador. Biogeochemistry, 55: 45-72.

- WOLF, J. (1993): Diversity patterns and biomass of epiphytic bryophytes and lichens along an altitudinal gradient in the Northern Andes. *Ann. Missouri Bot. Gard.*, 90: 928-960.
- ZOTZ, G. & HIETZ, P. (2001): The physiological ecology of vascular epyphytes: current knowlegde, open questions. *Journal of Experimental Botany*, 52: 2067-2078.

10. Anhang

Transekt Nr.	Höhe [m]	Neigung [Grad]	Exposition	Hochwert	Rechtswert	Währung	Sesquioxide [g kg ⁻¹]						Boden- farbe
							Fe _d	Al _d	Mn _d	Fe _o	Al _o	Mn _o	
2	2270	35	SO	618974	8208309	G,G	5.48 13.46 7.49 33.82	2.16 7.39 9.90 14.31	0.59 0.15 0.53 0.55	7.18 14.94 8.81 33.18	3.48 11.53 17.28 26.56	0.00 0.00 0.00 0.00	5 YR 2/3 2.5 YR 6/1 10 YR 2/3 7.5 YR 5/8 10 YR 5/6
Proben Nr.	Horizont	Tiefe	Lagerungs- dicke [g cm ⁻³]	Skelett			Korngröße [Gew. %]						
		[cm]		[%]	qS	mS	fs	gU	mU	fU	Sand	Schluff	Ton
5950	Of/Oh	+30	0.13				12.1	28.6	20.5	11.9	17	61	22
5997	Ae	0-25	1	6.3	2.9	1.8	10.6	25.8	1.3	31.0	14	58	28
6005	Bs/Bh	25-30	1	7.6	2.4	1.0	9.1	26.1	17.2	16.3	12	60	28
5994	Cv1	30-72	1.1	6.8	2.2	1.2	10.5	13.3	15.5	15.2	24	44	32
5992	Cv2	72-100	0.9	43.5	7.9	5.4							
Proben Nr.	Hor	Tiefe	Effektive Kationenaustauschkapazität (1M NH ₄ Cl) [cmol _c kg ⁻¹]										
		[cm]	Na	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Al	H+			
5950	Of/Oh	+30	0.25	1.14	0.57	1.07	0.03	0.40	4.86	1.89	10.21	30	2.65
5997	Ae	0-25	0.00	0.45	0.06	0.07	0.00	0.53	10.69	0.25	12.05	5	3.16
6005	Bs/Bh	25-30	0.00	0.10	0.01	0.02	0.00	0.22	7.65	0.03	8.02	2	4.07
5994	Cv1	30-72	0.00	0.09	0.03	0.01	0.00	0.04	3.08	0.01	3.27	4	4.48
5992	Cv2	72-100	0.00	0.07	0.08	0.01	0.00	0.00	0.13	0.00	0.30	54	5.07
Proben Nr.	Horizont	Tiefe	Gesamtgehalt [g kg ⁻¹]										
		[cm]	Fe	Al	Ca	Mg	Mn	P	S				
5950	Of/Oh	+30	1.8	3.8	0.3	0.3	0.03	0.49	1.89	42.88	2.06	21	
5997	Ae	0-25	11.2	23.5	0.1	0.6	0.19	0.23	0.22	1.10	0.15	7	
6005	Bs/Bh	25-30	21.7	42.1	0.1	0.9	0.22	0.24	0.21	1.52	0.15	10	
5994	Cv1	30-72	18.2	66.2	0.1	1.3	0.25	0.25	0.20	2.70	0.13	20	
5992	Cv2	72-100	56.9	142.6	0.0	2.5	0.20	0.26	0.39	3.01	0.13	24	

Tab. 18 Leitbodenprofil in 2270m spodic Dystrudept

Die braunschwarze organische Auflage hat eine Mächtigkeit von 30cm. Ein grauer schluffig - lehmiger Ae - Horizont (2.5 YR 6/1), mit einer mittleren Durchwurzelungsintensität, 25 cm mächtig, darunter ein 5 cm mächtiger, schluffig lehmiger, schwarzer Bh/Bs (10 YR 2/3) dem mit deutlicher Begrenzung ein schluffig lehmiger, brauner Cv1 Horizont (7,5 YR 5/8) folgt, der dann in einen lehmigen braunen Cv2- Horizont (10 YR 5/6) übergeht.

Transekt Nr.	Höhe [m ü.M.]	Neigung [Grad]	Exposition	Hochwert	Rechtswert	Währung	Sesquioxide [g kg ⁻¹]						Boden- farbe
							Fe _d	Al _d	Mn _d	Fe _o	Al _o	Mn _o	
2	2600	23	SO	618879	8208541	G,G	12.32 26.33	1.78 8.11	0.98 0.35	0.23 0.42 9.89 17.94	0.40 0.25 2.00 7.70	0.00 0.00 0.00 0.00	7.5 Yr 2/3 10 YR 2/2 10 YR 4/1 10 YR 3/2 7.5 YR 5/8
Proben Nr.	Horizont	Tiefe	Lagerungs- dichte	Skelett	[%]	Korngröße [Gew. %]							
						qS	mS	fS	qU	mU	fU	Sand	Schluff
5952 6031 6001 6028 5974	Of/Oh Aeh Sw/Ae1 Sw/Ae2 Sd/Cv	+35 0-5 5-20 20-41 41-73	0.2 0.9 1.8 1.8 1.2	0.3 43.2 56.0	0.9 1.2 6.4	2.5 1.5 5.0	29.7 43.0 20.4	28.3 23.5 18.0	2.1 13.9 17.9	16.4 10.6 16.7	33 46 32	47 48 53	20 6 16
Proben Nr.	Horizont	Tiefe	Effektive Kationenaustauschkapazität (1M NH ₄ Cl) [cmol _c kg ⁻¹]										
			Na	K	Mg	Ca	Mn	Fe	Al	H+	KAK eff.	BS	pH (CaCl ₂)
5952 6031 6001 6028 5974	Of/Oh Aeh Sw/Ae1 Sw/Ae2 Sd/Cv	+35 0-5 5-20 20-41 41-73	0.18 0.00 0.00 0.00 0.00	1.12 0.19 0.09 0.16 0.05	1.17 0.10 0.01 0.04 0.01	0.73 0.05 0.01 0.01 0.02	0.03 0.00 0.00 0.00 0.00	0.46 0.04 0.00 0.42 0.01	3.98 1.42 0.46 5.17 0.70	2.80 0.69 0.08 0.15 0.00	10.46 2.50 0.65 5.96 0.80	31 14 17 4 10	2.45 2.59 3.17 3.37 4.64
Proben Nr.	Horizont	Tiefe	Gesamtgehalt [g kg ⁻¹]										
			Fe	Al		K	Mg	Mn	P	S	[%]	[%]	Nt
5952 6031 6001 6028 5974	Of/Oh Aeh Sw/Ae1 Sw/Ae2 Sd/Cv	+35 0-5 5-20 20-41 41-73	1.2 4.5 6.0 30.3 33.4	2.9 13.7 32.5 71.6 62.8	0.3 0.2 0.0 0.0 0.0	0.9 4.3 12.9 22.1 15.8	0.3 0.1 0.7 1.8 1.4	0.02 0.08 0.18 0.26 0.16	0.69 0.12 0.05 0.17 0.16	1.75 0.24 0.03 0.16 0.19	47.02 5.43 0.35 2.91 1.12	2.02 0.23 0.03 0.14 0.05	23 24 12 21 25

Tab. 19 Leitbodenprofil in 2600m Histic Humaquept

Es ist eine 35 cm mächtige dunkelbraune organische Auflage vorhanden, dem ein 5 cm graubrauner Aeh (10 YR 2/2) folgt. Zwei graue Sw-Horizonten (10 YR 4/1; 3/2) differenzieren sich mit deutlicher Grenze zum gelbbraunen Sd/Cv (7.5 YR 5/8).

Transekt Nr.	Höhe [m ü.M.]	Neigung [Grad]	Exposition	Hochwert	Rechtswert	Währung	Sesquioxide [g kg ⁻¹]						Roden- farbe
							Fe _d	Al _d	Mn _d	Fe _o	Al _o	Mn _o	
2	3000	617550	8209862	17	SO	G,G				0.18	0.56	0.02	10 YR 3/1
										0.46	0.56	0.03	5 YR 2/2
										0.13	3.60	0.04	7.5 YR 2/1
										16.64	3.33	0.06	10 YR 4/2
													7.5 YR 3/3
Proben Nr.	Horizont	Tiefe	Lagerungsdichte [g cm ⁻³]	Skelett			Korngröße [Gew.%]						
		[cm]		[%]	qS	mS	fS	qU	mU	fU	Sand	Schluff	Ton
3732	Of/Oh	+20	0.13		0.0	0.5	23.6	33.8	16.8	6.3	24	57	19
3733	Sw/Aa	0-12	0.2	3.4	0.2	0.9	32.9	37.8	12.0	5.4	34	55	11
3734	Sw/Aeh	12-22	0.4	0.4	12.2	4.8	43.1	33.8	4.2	1.2	60	39	1
3735	Sd/Bs/Bh	22-48	0.5	2.7	12.3	7.2	19.3	22.3	12.8	7.8	39	43	18
3736	Cv/Bbs/Sd	52-100	1.3	33.1									
Proben Nr.	Horizont	Tiefe	Effektive Kationenaustauschkapazität (1M NH ₄ Cl)										
		[cm]	Na	K	Mg	Ca	Mn	Fe	Al	H+	KAK eff.	BS	pH (CaCl ₂)
			[cmol _c kg ⁻¹]										
3732	Of/Oh	+20	0.08	1.78	2.11	0.68	0.02	0.32	13.81	0.83	19.64	24	2.6
3733	Sw/Aa	0-12	0.01	0.07	0.10	0.04	0.00	0.07	2.04	0.52	2.86	8	2.6
3734	Sw/Aeh	12-22	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	1.67	0.31	2.02	1	3.4
3735	Sd/Bs/Bh	22-48	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	2.64	0.16	2.83	1	3.9
3736	Cv/Bbs/Sd	52-100	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.51	0.11	0.66	2	4.4
Proben Nr.	Horizont	Tiefe	Gesamtgehalt [g kg ⁻¹]										
		[cm]	Fe	Al	Ca	Mg	Mn	P	S		[%]	[%]	C/N
3732	Of/Oh	+20	2.5	11.0	0.2	2.5	0.6	0.03			42.11	1.67	25
3733	Sw/Aa	0-12	3.5	14.9	0.9	5.3	0.4	0.12			10.02	0.40	25
3734	Sw/Aeh	12-22	4.3	22.9	0.1	8.3	0.8	0.13			2.16	0.10	23
3735	Sd/Bs/Bh	22-48	19.5	24.2	0.2	6.4	1.2	0.19			1.88	0.04	51
3736	Cv/Bbs/Sd	52-100	95.9	63.0	0.9	17.0	2.3	0.29			0.96	0.05	20

Tab. 20 Leitbodenprofil in 3000m Typic Placaquod

Der schwarze, lehmige Sw/Aa - Horizont (10 YR 3/1) hat eine Mächtigkeit von 20 cm mit einer extrem starken Durchwurzelung (Wurzelfilz). Er geht in den dunkelgrauen Sw/Aeh - Horizont (5 YR 2/2) über mit schluffig-lehmiger Textur und 10 cm Mächtigkeit. Der darunter folgende Sd/Bs/Bh - Horizont (10 YR 4/2) besteht aus mehreren Eisenbändern, welche die Durchwurzelung begrenzen. Im sandig lehmigen, braunen Cv/Bbs/Sd - Horizont (7.5 YR 3/3) zeigen Fe - Oxidkonkretionen die bessere Durchlüftung dieses Horizontes an.

Profil Nr.	Proben Nr.	Horizont- tiefe [cm]	Horizont- bezeichnung	Höhe [m ü.M.]	Neigung [Grad]	Exposition	Bodenfarbe [Munsell]	pH [H ₂ O]	pH [CaCl ₂]	pH [KCl]	LF [μS cm ⁻¹]	LD [g cm ⁻³]	Skelett [%]	Sand [%]	Schluff [%]	Ton [%]
1	5949	+10	Of/Oh	1700	36	SSO		4.4	3.8	3.6		0.1				
1	6021	0-30	Ah	1700	36	SSO	10 YR 2/3	4.9	4.4	4.3	36.8	0.5	2.1	28.0	56.1	16.0
1	5995	30-100	Bv	1700	36	SSO	10 YR 4/6	5.2	4.5	4.5	23.0	0.7	64.3	34.2	34.1	31.6
2	5960	+20	Of/Oh	1700	33	SO		3.5	2.7	2.7		0.1				
2	5978	0-20	Ah	1700	33	SO		4.5	4.0	4.0	81.9	0.5	4.3	14.3	51.5	34.2
2	5987	20-90	Bv1	1700	33	SO		5.0	4.6	4.6	16.5	0.9	4.6	29.7	37.2	33.1
2	6016	90-135	Bv2	1700	33	SO		4.9	4.4	4.3	21.8	1.2	40.6	47.0	29.4	23.7
3	3709	+3	Of/Oh	1800		SO	7.5 YR 2/2	4.9	3.9	4.7		0.1				
3	3710	0-37	Ah	1800		SO	7.5 YR 2/2	5.6	4.0	4.0	20.0	0.9	18.5	29.5	55.6	14.9
3	3711	37-70	Bv1	1800		SO	10 YR 2/2	5.7	4.3	4.1	10.0	0.8	2.4	55.3	36.0	8.7
3	3712	70-117	Bv2	1800		SO	7.5 YR 4/6	4.3	4.0	4.2	40.0	0.8	6.3	61.9	30.8	7.3
4	5958	+23	Of/Oh	1800	27	SSO		3.6	2.6	2.4		0.1				
4	5988	0-35	Ah	1800	27	SSO	10 YR 1.7/1	4.6	4.2	4.2	36.3	0.6	1.5	32.0	49.7	18.4
4	5973	35-43	Bv1	1800	27	SSO	10 YR 3/4	5.0	4.5	4.5	21.2	0.8	2.6	19.0	64.0	17.0
4	6012	43-125	Bv2	1800	27	SSO	7.5 YR 5/6	5.2	5.0	5.2	13.9	0.8	26.3	75.2	16.7	8.1
5	5963	+20	Of/Oh	1800	42	OSO		4.0	3.2	3.0		0.1				
5	6037	0-20	Ah	1800	42	OSO	10 YR 2/3	4.3	3.8	3.7	84.3	0.7	50.7	37.1	36.7	26.2
5	6010	20-45	C	1800	42	OSO	2.5 Y 4/4	4.8	4.2	4.2	30.9	0.8	56.8	53.2	30.2	16.6
6	5951	+5 - +20	Of/Oh	1800	35	SSO		4.2	3.4	3.4		0.1				
6	5964	+5- 0	Ah/Of/Oh	1800	35	SSO		4.0	3.5	3.5		0.2				
6	5984	0-45	Ah	1800	35	SSO	10 YR 2/2	5.0	4.5	4.4	27.4	0.6				
6	5982	50-130	Bv	1800	35	SSO	7.5 YR 5/6	4.9	4.4	4.4	17.8	0.8	62.5	16.5	42.5	41.0
7	5959	+20	Of/Oh	1900	39	SO		3.9	2.8	2.7		0.1				
7	6036	0-43	Ah	1900	39	SO	10 YR 1.7/1	4.3	4.0	4.0	67.7	0.6	7.4	10.7	53.9	35.4
7	6008	43-82	Cv	1900	39	SO	7.5 YR 4/4	4.7	4.4	4.4	24.6	0.8	20.8	21.6	39.9	38.6
7	6030	82-93	Cv	1900	39	SO	2.5 YR 2/6	4.6	4.2	4.1	29.1	1.0	43.9	28.7	53.1	18.1
7	5986	93-112	Cv	1900	39	SO	10 YR 5/4	4.7	4.2	4.1	23.2	1.2				
7	5990	112-125	Cv	1900	39	SO	10 YR 6/4	4.7	4.2	4.2	25.7	1.1	48.7	45.1	23.3	31.6
7	6019	125-150	Cv	1900	39	SO	10 YR 5/4	4.6	4.2	4.1	25.2	0.9	39.5	77.0	15.6	7.3
7	6046	150-160	Cv	1900	39	SO	2.5 YR 5/6	4.6	4.2	4.0	36.4	1.2	35.2	26.7	46.7	26.6
8	5962	+25	Of/Oh	2000	23	OSO	5 YR 2/4	3.7	2.6	2.4		0.1				
8	5985	0-56	Ah	2000	23	OSO	10 YR 1.7/1	4.9	4.4	4.4	28.7	0.6				
8	6000	56-65	Bv	2000	23	OSO	10 YR 3/3	5.2	4.8	4.9	17.4	0.5				
8	5981	65-90	C	2000	23	OSO	10 YR 4/6	5.1	4.7	4.7	20.5	0.7	20.6	11.6	46.1	42.3
9	5956	+25	Of/Oh	2000	22	SO	5 YR 2/3	4.0	2.9	2.8		0.1				
9	6020	0-25	Ah	2000	22	SO	10 YR 1.7/1	4.5	3.8	3.8	40.4	0.9	1.4	14.6	55.6	29.8
9	5983	25-58	Ahe	2000	22	SO	10 YR 2/3	4.8	4.4	4.3	26.9	0.7	2.3	11.4	75.1	13.6
9	6040	58-70	Bs/Cv	2000	22	SO	10 YR 5/4	4.9	4.8	4.8	14.0	0.8	2.6	14.6	51.2	34.2
9	5972	70-100	Cv	2000	22	SO	7.5 YR 5/8	5.6	5.2	5.3	16.2	0.7	2.1	69.6	20.8	9.6
10	5969	+20	Of/Oh	2100	30	OSO	5 YR 2/4	3.7	2.9	2.6	167.0	0.2				
10	6017	0-17	Ah	2100	30	OSO	10 YR 1.7/1	3.6	3.2	3.2	35.1	0.5	43.1	25.7	43.7	30.6
10	5971	17-50	Bv	2100	30	OSO	10 YR 3/4	4.9	4.3	4.4	20.4	0.6				
10	6011	50-100	Cv	2100	30	OSO	10 YR 4/6	5.0	4.8	4.8		0.7	48.1	47.6	39.6	12.8

Tab. 21 Leitfähigkeit, pH (CaCl₂, KCl, H₂O), Lagerungsdichte (LD) und Korngrößenverteilung der Profile 1-10.

Profil Nr.	Proben Nr.	Horizont- tiefe [cm]	Horizont- bezeichnung	Höhe [m ü.M.]	Neigung [Grad]	Exposition	Bodenfarbe [Munsell]	pH [H ₂ O]	pH [CaCl ₂]	pH [KCl]	LF [µS cm ⁻¹]	LD [g cm ⁻³]	Skelett [%]	Sand [%]	Schluff [%]	Ton [%]
11	3712	1-288	Off/Oh	2200	15	SSO	5 YR 2/2	3,5	2,6	2,7	30,0	0,1				
11	3714	+8-0	Oh/Ah	2200	15	SSO	5 YR 3/2	3,4	2,4	2,5	40,0	0,2	12,5	6,4	57,9	35,7
11	3715	0-6	Ahe	2200	15	SSO	10 YR 4/1	3,8	2,7	2,8	30,0	1,5	2,7	19,2	65,7	15,1
11	3716	6-26	Sw/Ae	2200	15	SSO	10 YR 5/1	4,0	2,9	3,2	20,0	1,7	1,6	22,5	61,5	16,0
11	3717	26-28	Bh/Bs	2200	15	SSO	5 YR 3/6	4,2	3,5	3,5	10,0		42,6	24,6	57,2	18,2
11	3718	28-61	Sd/Cv	2200	15	SSO	10 YR 5/6	4,4	3,7	4,4		1,1	46,2	47,2	43,5	9,3
12	5950	+25	Off/Oh	2200	26	SSO	5 YR 2/3	3,7	2,7	2,5	52,9	0,1				
12	5997	0-25	Ah	2200	26	SSO	10 YR 1/1	4,0	3,2	3,2	36,1	1,0	6,3	16,8	61,1	22,1
12	6005	25-35	Ahe	2200	26	SSO	10 YR 2/3	4,4	4,1	4,1	23,8	1,0	7,6	14,0	58,1	27,9
12	5994	35-47	Aeh	2200	26	SSO	10 YR 4/2	4,8	4,5	4,5	21,4	1,1	6,8	12,5	59,6	27,9
12	5992	47-110	Bs/Bh/Cv	2200	26	SSO	10 YR 5/6	5,2	5,1	5,4		0,9	43,5	23,9	44,1	32,0
13	8870	+30	Off/Oh	2200	44	SSO		3,4	2,5	2,3						
13	8871	0-15	Aeh	2200	44	SSO		3,6	3,2	3,2						
13	8872	15-41	Bs	2200	44	SSO		4,6	4,3	4,4						
14	5953	+34	Off/Oh	2210	29	SO	10 YR 3/2	3,5	2,5	2,3	52,2	0,3				
14	6006	0-12	Ah	2210	29	SO	10 YR 3/4	4,1	3,2	3,2	21,9	0,8	16,5	17,5	56,0	26,5
14	5998	12-25	Ahe	2210	29	SO	2,5 YR 6/3	4,8	4,4	4,6	25,5	0,9	22,2	22,7	58,7	18,6
14	5979	25-40	Ae	2210	29	SO	2,5 YR 6/3	5,1	4,7	4,6	20,8	1,4	35,2	18,6	54,7	26,7
14	6002	40-100	Bs/Bh/Cv	2210	29	SO	7,5 YR 5/8	5,1	4,9	5,2		1,2	48,6	40,0	33,1	26,9
15	8873	+30	Off/Oh	2270	35	SO		3,6	2,6	2,3						
15	8874	0-25	Ae	2270	35	SO		4,0	3,2	3,0						
15	8875	25-30	Bs	2270	35	SO		4,6	4,1	4,2						
15	8876	25-30	Bh	2270	35	SO		4,0	3,4	3,4						
15	8877	25-72	Cv1	2270	35	SO		4,7	4,6	4,8						
15	8878	72-100	Cv2	2270	35	SO		4,8	4,7	4,7						
16	5957	+30	Off/Oh	2300	22	OSO	5 YR 2/2	3,5	2,5	2,3	122,0	0,2				
16	6014	0-12	Ah	2300	22	OSO	10 YR 1/1	3,5	2,9	3,0	31,1	0,8	63,8	35,9	42,1	22,0
16	6041	12-40	Bv	2300	22	OSO	10 YR 3/4	4,8	4,5	4,5	22,3	0,9	75,2	35,9	47,9	16,1
16	6022	40-46	fAh	2300	22	OSO	10 YR 1/1	4,7	4,3	4,3	18,4	0,9	57,6	27,2	58,3	14,5
16	5975	46-76	Ae	2300	22	OSO	10 YR 4/2	4,7	4,2	4,7	18,6	1,6	36,4	36,2	49,1	14,7
16	6024	76-100	Cv	2300	22	OSO	10 YR 5/6	4,8	4,6	4,6		1,2	55,1	36,0	45,4	18,7
17	3719	+12	Off/Oh	2400	12	SO	5 YR 2/2	3,4	2,3	2,4	30,0	0,1				
17	3720	0-5	Ah	2400	12	SO	5 YR 4/1	3,7	3,0	3,0	20,0	1,1	9,4	16,7	70,7	12,6
17	3721	5-40	Sw/Ae	2400	12	SO	10 YR 6/1	4,3	3,5	3,5	10,0	1,5	8,0	20,8	74,2	5,0
17	3722	74-83	Bh/Bs	2400	12	SO	10 YR 5/2	4,5	3,7	4,0	10,0	1,6	5,2	25,6	67,2	7,1
17	3723	40-98	Sd/Cv	2400	12	SO	2,5 Y 6/4	4,5	3,5	3,7		1,6	8,5	25,3	67,3	7,4
18	5952	+35	Off/Oh	2400	23	SO	7,5 Yr 2/3	3,5	2,5	2,3	67,4	0,2				
18	6031	0-5	Aeh	2400	23	SO	10 YR 2/2	3,5	2,6	2,5	20,6	0,9	0,3	33,1	46,8	20,1
18	6001	5-20	Sw/Ae1	2400	23	SO	10 YR 4/1	4,3	3,2	3,2	62,3	1,8	43,2	45,7	48,0	6,2
18	6028	20-41	Sw/Ae2	2400	23	SO	10 YR 3/2	3,9	3,4	3,4	21,8	1,8				
18	5974	41-73	Sd/Cv	2400	23	SO	7,5 YR 5/8	5,0	4,6	4,2		1,2	56,0	31,8	52,6	15,6
19	3724	+12	Off/Oh	2550	12	OSO	7,5 YR 2/1	3,2	2,3	2,4	20,0	0,1				
19	3725	0-18	Sw/Ae	2550	12	OSO	10 YR 5/1	4,2	3,4	3,4	20,0	0,4	0,7	16,1	70,3	13,5
19	3726	18-23	Bs/Bh	2550	12	OSO	10 YR 2/3	4,3	4,1	4,5	10	1,0	42,3	68,0	25,2	6,8
19	3727	23-108	Sd/Cv	2550	12	OSO	10 YR 2/3	5,7	4,1	4,3		1,5	36,4	44,2	39,9	15,9

Tab. 22 Leitfähigkeit, pH (CaCl₂, KCl, H₂O), Lagerungsdichte (LD) und Korngrößenverteilung der Profile 11-19.

Profil Nr.	Proben Nr.	Horizont- tiefe	Horizont- bezeichnung	Höhe	Neigung	Exposition	Bodenfarbe	pH [H ₂ O]	pH [CaCl ₂]	pH [KCl]	LF	LD	Skelett	Sand	Schluff	Ton
		[cm]		[m ü.M.]	[Grad]		[Munsell]				[µS cm ⁻¹]	[g cm ⁻³]	[%]	[%]	[%]	[%]
20	5917	+12	Ah/Ah	2550	32	WSW	5 YR 2/4	3.67	3.70	3.25	170	0.1				
20	6032	0-10	Ah	2550	36	WSW	7.5 YR 2/2	3.7	3.01	2.94	25.6	0.6	0	14.7	71.8	13.5
20	5989	10-20	Sw/Aeh	2550	36	WSW	10 YR 4/2	4.35	3.48	3.44	30.8	0.8	3.6	24.6	64.5	11.0
20	6003	10-25	Sw/Ae	2550	36	WSW	10 YR 4/2	4.34	3.82	3.9	31.4	0.8	6.8	27.3	61.5	11.2
20	6044	25-28	Bh/Bs	2550	36	WSW	5 YR 3/6				25.6	1.0	10.3	25.3	50.1	24.6
20	6034	28-100	Sd/Cv	2550	36	WSW	10 YR 5/8	4.8	4.6	4.76		1.5	70.3	44.0	45.3	10.7
21	5966	+35	Of/Oh	2700	37	SO		4.1	3.1	3.0	51.8	0.1				
21	6013	0-5	Ah	2700	37	SO	10 YR 5/2	4.0	3.2	3.1	13.8	0.8	0.6	34.7	58.0	7.2
21	6038	5-75	Sw/Ae	2700	37	SO	10 YR 6/2	4.7	3.7	3.6	10.6	1.5	78.1	53.5	42.6	3.9
21	6023	75-100	Cv/Sd	2700	37	SO	10 YR 5/3	4.6	3.7	3.5		1.5	62.0	70.3	26.3	3.4
22	5968	35	Of/Oh	2700	29	O	5 YR 2/3	4.0	2.7	2.7	48.8	0.1				
22	6035	0-40	Ahe	2700	29	O	10 YR 4/2	4.0	3.0	3.0	20.6	0.8	45.7	36.5	58.5	5.0
22	6027	40-55	Sw/Ae	2700	29	O	10 YR 5/1	4.4	3.3	3.3		1.0	38.7	32.5	62.6	4.8
22	6009	55-70	Cv/Sd/Bh/Bs	2700	29	O	10 YR 1.7/1					1.2				
23	3728	+20	Of/Oh	2800	14	SO	5 YR 2/2	3.4	2.4	2.4	70.0	0.1				
23	3729	0-9	Aeh	2800	14	SO	7.5 YR 3/2	3.6	2.6	2.7	30.0	1.1	2.3	14.6	61.3	24.1
23	3730	9-20	Ae	2800	14	SO	10 YR 5/2	3.9	3.1	3.1	10.0	1.0	0.4	28.0	62.8	9.2
23	3731	20-70	Cv/Cm	2800	14	SO	10 YR 6/1	4.4	3.5	3.6		1.6	30.5	56.6	39.4	3.9
24	5954	+25	Of/Oh	2900	27	SO		4.0	3.0	2.9	42.0	0.2				
24	6015	0-5	Aeh	2900	27	SO	10 YR 3/3	3.9	3.1	2.9	14.3	0.7	1.1	59.0	29.2	11.8
24	5996	5-22	Sw/Ae	2900	27	SO	10 YR 6/2	4.3	3.3	3.4	38.9	1.5	19.2	71.3	23.0	5.7
24	5980	22-60	Bh/Bs	2900	27	SO	10 YR 2/2	4.3	3.7	3.7	46.8	1.2	43.5	65.4	19.2	15.4
24	6004	60-100	Cv	2900	27	SO	5 YR 5/8	4.5	4.4	4.5		1.3	63.8	53.5	32.4	14.1
25	3732	+20	Of/Oh	3000	17	SO		4.0	2.6	2.9	30.0	0.1				
25	3733	0-12	Sw/Aa	3000	17	SO	5 YR 2/2	4.6	2.6	3.0	20.0	0.2	3.4	24.1	56.9	18.9
25	3734	12-22	Sw/Aeh	3000	17	SO	7.5 YR 2/1	4.6	3.4	3.6	10.0	0.4	0.4	34.1	55.3	10.7
25	3735	22-48	Sd/Bs/Bh	3000	17	SO	10 YR 4/2	4.4	3.9	3.7	10.0	0.5	2.7	60.1	39.2	0.7
25	3736	52-100	Cv/Bbs/Sd	3000	17	SO	7.5 YR 3/3	4.8	4.4	4.4	10.0	1.3	33.1	38.8	43.0	18.2
26	5948	+30	Of/Oh	3100	23	SO		4.2	3.0	2.8	31.4	0.1				
26	6007	0-16	Sw/Aeh	3100	23	SO	10 YR 3/2	4.3	3.6	3.6	25.0	1.0	2.6	33.0	41.7	25.3
26	6043	16-58	Sd/Bs	3100	23	SO	10 YR 6/8	4.8	4.5	4.5	27.0	1.1	41.3	39.8	57.5	2.7
26	6033	58-100	Cv/Bbs/Sd	3100	23	SO	7.5 YR 5/6	4.9	4.8	5.2		1.2				
27	5961	+20	Of/Oh	3200	31	SSO			3.5	3.2	54.1	0.1				
27	5977	0-20	Aa/Sw	3200	31	SSO	10 YR 3/1	4.3	3.5	3.4	29.8	0.5		34.9	46.1	18.9
27	6029	20-55	Sw/Aeh	3200	31	SSO	10 YR 4/1	4.2	3.5	3.4	38.8	1.0	21.5	30.5	55.8	13.7
27	5976	55-60	Sd/Bs/Bh	3200	31	SSO	10 YR 2/3	4.4	3.7	3.7	33.4	1.6	35.6	39.7	42.7	17.6
27	5970	65-110	Cv/Bbs/Sd	3200	31	SSO	10 YR 5/1	5.0	4.6	4.5		1.2	44.3			
28	5967	+25	Of/Oh	3300	20	SO		4.5	3.5	3.5	77.7	0.1				
28	5991	0-15	Oh/Ah	3300	20	SO	10 YR 1.7/1	4.0	3.0	3.0	28.3	0.4	1.1	4.5	63.8	31.6
28	6042	15-32	Ae	3300	20	SO	7.5 YR 3/1				32.8	1.3				
28	6025	32-49	Bh	3300	20	SO	7.5 YR 2/2	4.1	3.6	3.5	22.8	1.5	44.1	35.5	39.8	24.7
28	6026	49-79	Sw/Bs	3300	20	SO	10 YR 4/6	4.6	4.2	4.2	18.6	1.3				
28	5999	79-100	Sd/Cv	3300	20	SO	10 YR 6/1	4.7	4.6	4.6		1.3	47.3	53.2	35.0	11.8
29	5955	+30	Of/Oh	3450	24	SSO		4.4	3.3	3.1		0.1				

Tab. 23 Leitfähigkeit, pH (CaCl₂, KCl, H₂O), Lagerungsdichte (LD) und Korngrößenverteilung der Profile 20-29.

Profil Nr.	Proben Nr.	Horizont- tiefe [cm]	Horizont- bezeichnung	Höhe	Na	K	Mg	Ca	Mn	Fe	Al	H+	Summe	ECEC BS
				[m ü.M.]	[cmol kg ⁻¹]	[cmol kg ⁻¹]	[cmol kg ⁻¹]	[cmol kg ⁻¹]	[cmol kg ⁻¹]	[cmol kg ⁻¹]	[cmol kg ⁻¹]	[cmol kg ⁻¹]	[cmol kg ⁻¹]	in %
1	5995	30-100	Bv	1700	0.0	0.1	0.3	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	2.0	25.5
2	5960	+20	Of/Oh	1700	0.0	0.4	2.1	0.2	0.2	0.5	7.4	1.4	12.2	22.5
2	5978	0-20	Ah	1700	0.0	0.2	0.5	0.1	0.0	0.2	10.6	0.0	11.6	7.2
2	5987	20-90	Bv1	1700	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.5	1.0
2	6016	90-135	Bv2	1700	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	0.0	1.4	11.4
3	3709	+3	Of/Oh	1800	0.1	1.3	12.8	35.2	0.2	0.0	0.0	0.6	50.1	98.4
3	3710	0-37	Ah	1800	0.0	0.2	0.4	2.1	0.0	0.0	3.5	0.2	6.4	41.0
3	3711	37-70	Bv1	1800	0.0	0.1	0.1	0.4	0.0	0.0	1.9	0.4	3.0	22.0
3	3712	70-117	Bv2	1800	0.0	0.1	0.1	0.2	0.0	0.0	1.2	0.1	1.8	24.9
4	5958	+23	Of/Oh	1800	0.1	1.1	2.5	0.6	0.0	0.3	2.2	2.2	9.0	46.8
4	5988	0-35	Ah	1800	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	8.5	0.0	8.9	2.7
4	5973	35-43	Bv1	1800	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	2.8	0.0	3.1	7.0
4	6012	43-125	Bv2	1800	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.5	38.2
5	5963	+20	Of/Oh	1800	0.1	2.6	11.0	5.2	0.3	0.3	5.5	0.9	25.8	73.1
5	6037	0-20	Ah	1800	0.0	0.2	0.3	0.0	0.0	0.3	9.4	0.0	10.2	5.4
5	6010	20-45	C	1800	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	2.7	0.0	2.9	5.9
6	5951	+5 - +20	Of/Oh	1800	0.2	1.7	4.9	1.4	0.1	0.2	17.5	0.3	26.3	31.0
6	5964	+5- 0	Ah/Of/Oh	1800	0.0	0.4	0.7	0.5	0.0	0.6	20.2	0.2	22.6	7.2
6	5984	0-45	Ah	1800	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	4.1	0.0	4.4	4.9
6	5982	50-130	Bv	1800	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	0.0	1.6	9.9
7	5959	+20	Of/Oh	1900	0.1	1.2	1.3	0.2	0.0	0.3	5.6	1.3	10.1	27.7
7	6036	0-43	Ah	1900	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.1	11.6	0.0	12.0	2.0
7	6008	43-82	Cv	1900	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	2.2	5.4
7	6030	82-93	Cv	1900	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	0.0	1.8	5.5
7	5986	93-112	Cv	1900	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	0.0	1.4	7.5
7	5990	112-125	Cv	1900	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	0.0	2.7	6.1
7	6019	125-150	Cv	1900	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	0.0	1.9	6.2
7	6046	150-160	Cv	1900	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	0.0	2.4	4.4
8	5962	+25	Of/Oh	2000	0.1	0.9	0.7	0.3	0.0	0.5	5.6	2.2	10.3	19.7
8	5985	0-56	Ah	2000	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	4.8	0.0	5.1	6.2
8	6000	56-65	Bv	2000	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	0.0	1.4	12.1
8	5981	65-90	C	2000	0.0	0.1	0.0	0.2	0.0	0.0	0.6	0.0	0.9	35.8
9	5956	+25	Of/Oh	2000	0.2	0.9	0.6	0.3	0.0	0.4	6.4	1.1	9.9	19.7
9	6020	0-25	Ah	2000	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.3	13.2	0.1	14.0	2.5
9	5983	25-58	Ahe	2000	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	4.2	0.0	4.4	4.2
9	6040	58-70	Bs/Cv	2000	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	0.0	1.4	8.4
9	5972	70-100	Cv	2000	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.3	46.9
10	5969	+20	Of/Oh	2100	0.2	1.1	0.9	0.7	0.0	0.4	5.0	1.5	9.8	29.6
10	6017	0-17	Ah	2100	0.0	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	13.3	0.2	14.9	3.5
10	5971	17-50	Bv	2100	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	3.9	0.0	4.3	5.6
10	6011	50-100	Cv	2100	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	0.0	1.9	9.3

Tab. 24 Effektive Kationenaustauschfähigkeit (ECEC) der Profile 1-10.

Profil Nr.	Drehen Nr.	Horizont- tiefe [cm]	Horizont- bezeichnung	pH _{so}	ECEC Na [cmol.kg ⁻¹]	ECEC K [cmol.kg ⁻¹]	ECEC Mg [cmol.kg ⁻¹]	ECEC Ca [cmol.kg ⁻¹]	ECEC Mn [cmol.kg ⁻¹]	ECEC Fe [cmol.kg ⁻¹]	ECEC Al [cmol.kg ⁻¹]	ECEC H ⁺ [cmol.kg ⁻¹]	ECEC Summe [cmol.kg ⁻¹]	ECEC BS in %
11	3713	+38-8	Of/Oh	2200	0.1	1.5	4.4	0.9	0.0	0.2	8.2	1.3	16.7	41.4
11	3714	+8-0	Oh/Ah	2200	0.0	0.4	0.5	0.2	0.0	0.2	2.4	1.3	5.0	20.3
11	3715	0-6	Ahe	2200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1.1	0.6	1.9	5.2
11	3716	6-26	Sw/Ae	2200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	0.9	1.9	0.9
11	3717	26-28	Bh/Bs	2200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	3.6	0.2	3.9	0.6
11	3718	28-61	Sd/Cv	2200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.1	1.0	1.5
12	5950	+25	Of/Oh	2200	0.2	1.1	1.1	0.6	0.0	0.4	4.9	1.9	10.2	29.7
12	5997	0-25	Ah	2200	0.0	0.4	0.1	0.1	0.0	0.5	10.7	0.2	12.0	4.8
12	6005	25-35	Ahe	2200	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.2	7.6	0.0	8.0	1.6
12	5994	35-47	Aeh	2200	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1	0.0	3.3	4.2
12	5992	47-110	Bs/Bh/Cv	2200	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.3	53.9
13	8870	+30	Of/Oh	2200	0.3	0.9	4.6	2.1	0.1	0.4	4.0	1.0	13.4	58.8
13	8871	0-15	Aeh	2200	0.0	0.2	0.3	0.6	0.0	2.2	14.8	2.0	20.1	5.6
13	8872	15-41	Bs	2200	0.0	0.1	0.1	0.4	0.0	0.1	6.0	3.0	9.8	5.7
14	5953	+34	Of/Oh	2210	0.2	1.3	0.8	0.3	0.0	0.6	5.9	2.6	11.7	23.0
14	6006	0-12	Ah	2210	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.4	7.0	0.2	7.8	3.0
14	5998	12-25	Ahe	2210	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	3.1	0.0	3.3	4.0
14	5979	25-40	Ae	2210	0.0	0.1	0.0	0.2	0.0	0.0	1.9	0.0	2.2	13.4
14	6002	40-100	Bs/Bh/Cv	2210	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.3	61.1
15	8873	+30	Of/Oh	2270	0.3	1.6	8.5	2.0	0.1	0.3	2.4	4.0	19.0	64.5
15	8874	0-25	Ae	2270	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.2	1.7	5.0	7.5	6.9
15	8875	25-30	Bs	2270	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.4	4.1	6.0	11.0	4.9
15	8876	25-30	Bh	2270	0.0	0.1	0.1	0.5	0.0	0.9	8.7	7.0	17.3	4.3
15	8877	25-72	Cv1	2270	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.1	1.3	8.0	9.8	4.6
15	8878	72-100	Cv2	2270	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	1.4	9.0	11.0	4.4
16	5957	+30	Of/Oh	2300	0.1	0.9	1.0	0.5	0.0	0.4	5.5	2.3	10.7	23.2
16	6014	0-12	Ah	2300	0.0	0.2	0.1	0.1	0.0	0.8	10.6	0.5	12.3	3.7
16	6041	12-40	Bv	2300	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	0.0	3.7	4.4
16	6022	40-46	fAh	2300	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	3.9	0.0	4.0	2.7
16	5975	46-76	Ae	2300	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	1.7	6.2	1.8	6.2
16	6024	76-100	Cv	2300	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	1.6	7.7
17	3719	+12	Of/Oh	2400	0.1	0.9	1.4	1.6	0.0	0.4	4.8	2.0	11.2	35.2
17	3720	0-5	Ah	2400	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5	1.0	19.3
17	3721	5-40	Sw/Ae	2400	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1.5	1.6	0.3
17	3722	74-83	Bh/Bs	2400	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.1	1.2	0.5
17	3723	40-98	Sd/Cv	2400	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.1	0.5	0.4
18	5952	+35	Of/Oh	2400	0.2	1.1	1.2	0.7	0.0	0.5	4.0	2.8	10.5	30.5
18	6031	0-5	Aeh	2400	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	1.4	0.7	2.5	13.5
18	6001	5-20	Sw/Ae1	2400	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.1	0.7	16.6
18	6028	20-41	Sw/Ae2	2400	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.4	5.2	0.1	6.0	3.5
18	5974	41-73	Sd/Cv	2400	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.8	10.4
19	3724	+12	Of/Oh	2550	0.1	0.6	1.3	0.4	0.0	0.3	7.4	2.2	12.3	19.6
19	3725	0-18	Sw/Ae	2550	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.3	1.5	0.9
19	3726	18-23	Bs/Bh	2550	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.1	0.8	1.2
19	3727	23-108	Sd/Cv	2550	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.1	0.7	2.0

Tab. 25 Effektive Kationenaustauschfähigkeit (ECEC) der Profile 11-19.

Profil Nr.	Proben Nr.	Horizont- tiefe [cm]	Horizont- bezeichnung	Höhe [m ü.M.]	Na [cmolc kg ⁻¹]	ECEC K [cmolc kg ⁻¹]	ECEC Mg [cmolc kg ⁻¹]	ECEC Ca [cmolc kg ⁻¹]	ECEC Mn [cmolc kg ⁻¹]	ECEC Fe [cmolc kg ⁻¹]	ECEC Al [cmolc kg ⁻¹]	ECEC H ⁺ [cmolc kg ⁻¹]	ECEC Summe [cmolc kg ⁻¹]	ECEC BS in %
20	6032	0-10	Oh	2550	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.6	2.3	0.4	3.6	24.2
20	5989	10-20	Sw/Aeh	2550	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	1.6	0.1	1.9	5.0
20	6003	10-25	Sw/Ae	2550	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	4.1	0.0	4.3	2.5
20	6044	25-28	Bh/Bs	2550	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.7	0.0	0.9	22.4
20	6034	28-100	Sd/Cv	2550	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.8	13.3
21	5966	+35	Of/Oh	2700	0.2	1.3	1.0	0.9	0.0	0.4	7.0	0.7	11.5	29.0
21	6013	0-5	Oh	2700	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.2	0.2	0.7	46.6
21	6038	5-75	Sw/Ae	2700	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.2	54.6
21	6023	75-100	Cv/Sd	2700	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.2	43.2
22	5968	35	Of/Oh	2700	0.4	1.6	1.7	0.5	0.0	0.4	5.3	1.2	11.2	38.0
22	6035	0-40	Ahe	2700	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.4	0.2	0.8	23.8
22	6027	40-55	Sw/Ae	2700	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.1	0.9	25.5
22	6009	55-70	Cv/Sd/Bh/Bs	2700										
23	3728	+20	Of/Oh	2800	0.1	1.0	2.2	2.9	0.0	0.3	2.1	2.1	10.6	57.3
23	3729	0-9	Aeh	2800	0.0	0.3	0.4	0.3	0.0	0.1	0.6	1.0	2.7	39.8
23	3730	9-20	Ae	2800	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.2	0.4	0.8	21.8
23	3731	20-70	Cv/Cm	2800	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.5
24	5954	+25	Of/Oh	2900	0.3	1.3	0.8	0.6	0.0	0.5	4.3	0.9	8.7	34.5
24	6015	0-5	Aeh	2900	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.3	0.2	0.8	35.4
24	5996	5-22	Sw/Ae	2900	0.0	0.1	0.0	2.7	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	99.7
24	5980	22-60	Bh/Bs	2900	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.2	1.5	0.1	1.9	9.0
24	6004	60-100	Cv	2900	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0	1.2	7.0
25	3732	+20	Of/Oh	3000	0.1	1.8	2.1	0.7	0.0	0.3	13.8	0.8	19.6	23.7
25	3733	0-12	Sw/Aa	3000	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	2.0	0.5	2.9	7.9
25	3734	12-22	Sw/Aeh	3000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	0.3	2.0	0.7
25	3735	22-48	Sd/Bs/Bh	3000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	0.2	2.8	0.6
25	3736	52-100	Cv/Bbs/Sd	3000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.1	0.7	2.4
26	5948	+30	Of/Oh	3100	0.4	3.3	2.6	2.1	0.1	0.4	1.9	1.2	12.1	69.7
26	6007	0-16	Sw/Aeh	3100	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	3.9	0.1	4.4	6.2
26	6043	16-58	Sd/Bs	3100	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	1.2	12.4
26	6033	58-100	Cv/Bbs/Sd	3100	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.3	44.9
27	5961	+20	Of/Oh	3200	0.6	3.1	5.1	8.8	1.6	0.2	0.6	0.6	20.5	85.7
27	5977	0-20	Aa/Sw	3200	0.1	0.1	0.1	0.5	0.0	0.2	2.5	0.1	3.6	23.2
27	6029	20-55	Sw/Aeh	3200	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	3.3	0.1	3.7	5.4
27	5976	55-60	Sd/Bs/Bh	3200	0.0	0.1	0.1	0.5	0.0	0.2	4.9	0.1	5.7	10.4
27	5970	65-110	Cv/Bbs/Sd	3200	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	1.0	0.0	1.3	18.7
28	5967	+25	Of/Oh	3300	0.4	1.8	2.0	1.4	0.0	0.1	14.6	0.3	20.7	27.5
28	5991	0-15	Oh/Ah	3300	0.0	0.2	0.2	7.7	0.0	0.0	2.7	0.0	11.0	74.8
28	6042	15-32	Ae	3300	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.5	24.7
28	6025	32-49	Bh	3300	0.0	0.1	0.0	2.0	0.0	0.1	6.7	0.0	9.0	24.2
28	6026	49-79	Sw/Bs	3300	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	3.8	0.0	4.1	4.5
28	5999	79-100	Sd/Cv	3300	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	1.0	8.2
29	5955	+30	Of/Oh	3450	0.1	1.3	1.4	3.6	0.5	0.1	0.3	0.6	8.0	80.7

Tab. 26 Effektive Kationenaustauschfähigkeit (ECEC) der Profile 20-29.

Profil Nr.	Proben Nr.	Horizont- tiefe [cm]	Horizont- bezeichnung	Höhe	Gesamt Fe [g kg ⁻¹]	Gesamt Al [g kg ⁻¹]	Gesamt Ca [g kg ⁻¹]	Gesamt K [g kg ⁻¹]	Gesamt Na [g kg ⁻¹]	Gesamt Mg [g kg ⁻¹]	Gesamt Mn [g kg ⁻¹]	Gesamt P [g kg ⁻¹]	Gesamt Cu [g kg ⁻¹]	Gesamt S [g kg ⁻¹]	Gesamt Zn [g kg ⁻¹]
1	5949	1-10	Of/Oh	1700	6.1	15.2	1.7	3.0	0.8	1.0	1.1	1.4	0.0	0.0	0.0
1	6021	0-30	Ah	1700	40.6	82.8	0.5	9.3	1.3	3.7	0.4	1.0	0.0	0.7	0.1
1	5995	30-100	Bv	1700	34.8	83.2	0.1	16.1	0.7	4.9	0.4	0.4	0.0	0.2	0.0
2	5960	+20	Of/Oh	1700	4.5	9.2	0.3	1.3	0.5	0.8	0.1	0.6	0.0	2.7	0.0
2	5978	0-20	Ah	1700	34.3	72.7	0.4	8.7	1.4	3.9	0.2	0.6	0.0	0.8	0.0
2	5987	20-90	Bv1	1700	27.6	84.0	0.0	10.1	1.6	10.4	0.2	0.3	0.0	0.1	0.0
2	6016	90-135	Bv2	1700	29.1	52.2	0.1	5.9	2.1	14.4	0.1	0.3	0.0	0.0	0.0
3	3709	+3	Of/Oh	1800	20.5	45.7	4.2	8.3	1.5	3.9	1.0	0.1	0.0	1.0	0.1
3	3710	0-37	Ah	1800	38.3	83.7	0.5	8.5	1.3	2.6	0.5	1.3	0.0	0.0	0.1
3	3711	37-70	Bv1	1800	47.5	91.1	0.6	8.9	1.5	2.7	0.3	1.5	0.0	0.0	0.1
3	3712	70-117	Bv2	1800	52.7	96.8	0.6	9.5	1.5	3.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.1
4	5958	+23	Of/Oh	1800	1.4	2.4	0.2	0.6	0.2	0.5	0.0	0.6	0.0	2.8	0.0
4	5988	0-35	Ah	1800	36.8	61.6	0.3	5.6	0.8	1.9	0.2	0.6	0.0	0.7	0.0
4	5973	35-43	Bv1	1800	36.0	63.0	0.3	7.4	0.8	2.4	0.2	0.4	0.0	0.5	0.0
4	6012	43-125	Bv2	1800	49.8	91.6	0.4	10.0	0.8	2.8	0.2	0.5	0.0	0.6	0.0
5	5963	+20	Of/Oh	1800	2.4	6.4	1.5	1.6	0.3	1.7	0.1	1.0	0.0	2.7	0.0
5	6037	0-20	Ah	1800	40.1	76.7	0.2	20.4	1.2	2.6	0.3	0.8	0.0	0.6	0.0
5	6010	20-45	C	1800	33.2	78.0	0.1	20.6	0.7	5.3	0.5	0.3	0.0	0.1	0.0
6	5951	+5 - +20	Of/Oh	1800	1.7	14.3	0.6	1.5	0.4	1.0	0.0	1.0	0.0	2.2	0.0
6	5964	+5- 0	Ah/Of/Oh	1800	20.7	36.4	0.6	4.1	1.0	1.1	0.1	0.8	0.0	1.1	0.0
6	5984	0-45	Ah	1800	40.6	80.6	0.4	5.4	0.8	1.9	0.2	0.8	0.0	0.6	0.0
6	5982	50-130	Bv	1800	57.8	112.7	0.2	11.9	0.9	3.3	0.4	0.7	0.0	0.4	0.0
7	5959	+20	Of/Oh	1900	1.7	4.8	0.2	0.9	0.3	0.4	0.0	0.7	0.0	3.0	0.0
7	6036	0-43	Ah	1900	32.4	65.8	0.4	4.8	1.0	1.5	0.1	0.7	0.0	0.8	0.0
7	6008	43-82	Cv	1900	45.3	103.2	0.1	11.6	0.6	2.8	0.2	0.3	0.0	0.2	0.0
7	6030	82-93	Cv	1900	32.3	85.5	0.0	17.1	0.4	2.3	0.2	0.2	0.0	0.1	0.0
7	5986	93-112	Cv	1900	29.3	73.3	0.0	19.6	0.4	3.5	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0
7	5990	112-125	Cv	1900	25.6	59.5	0.0	7.0	1.6	16.8	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0
7	6019	125-150	Cv	1900	25.2	63.5	0.0	17.6	0.6	4.5	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0
7	6046	150-160	Cv	1900	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	5962	+25	Of/Oh	2000	1.7	3.9	0.2	0.6	0.2	0.3	0.0	0.5	0.0	2.3	0.0
8	5985	0-56	Ah	2000	38.4	72.0	0.4	3.6	0.8	1.5	0.1	0.5	0.0	0.6	0.0
8	6000	56-65	Bv	2000	42.7	92.7	0.4	4.1	0.8	1.8	0.1	0.5	0.0	0.5	0.0
8	5981	65-90	C	2000	52.9	120.1	0.2	9.7	0.8	2.8	0.2	0.3	0.0	0.3	0.0
9	5956	+25	Of/Oh	2000	1.9	4.8	0.4	0.7	0.4	0.3	0.0	0.6	0.0	2.2	0.0
9	6020	0-25	Ah	2000	36.0	37.1	0.2	2.5	0.7	1.0	0.1	0.6	0.0	0.6	0.0
9	5983	25-58	Ahe	2000	23.0	37.0	0.1	2.5	0.5	1.0	0.1	0.2	0.0	0.3	0.0
9	6040	58-70	Bs/Cv	2000	33.1	63.0	0.2	3.9	1.5	1.5	0.2	0.3	0.0	0.3	0.0
9	5972	70-100	Cv	2000	39.0	93.6	0.1	6.7	0.5	1.2	0.1	0.3	0.0	0.5	0.0
10	5969	+20	Of/Oh	2100	2.2	4.7	0.3	0.9	0.4	0.3	0.0	0.6	0.0	2.5	0.0
10	6017	0-17	Ah	2100	32.3	43.8	0.4	8.8	1.4	1.6	0.2	0.5	0.0	0.6	0.0
10	5971	17-50	Bv	2100	40.2	80.2	0.1	11.4	0.6	1.6	0.2	0.4	0.0	0.4	0.0
10	6011	50-100	Cv	2100	48.3	99.7	0.3	13.1	1.0	2.3	0.2	0.6	0.0	0.5	0.0

Tab. 27 Gesamtgehalte der Profile 1-10.

Profil Nr.	Proben Nr.	Horizont- tiefe [cm]	Horizont- bezeichnung	Höhe [m ü.M.]	Gesamt Fe [g kg ⁻¹]	Gesamt Al [g kg ⁻¹]	Gesamt Ca [g kg ⁻¹]	Gesamt K [g kg ⁻¹]	Gesamt Na [g kg ⁻¹]	Gesamt Mg [g kg ⁻¹]	Gesamt Mn [g kg ⁻¹]	Gesamt P [g kg ⁻¹]	Gesamt Cu [g kg ⁻¹]	Gesamt S [g kg ⁻¹]	Gesamt Zn [g kg ⁻¹]
11	3712	1-30.9	Of/Oh	2200	2.5	6.5	0.1	1.9	0.5	0.7	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0
11	3714	+8-0	Oh/Ah	2200	5.2	23.4	0.1	8.4	1.3	0.6	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
11	3715	0-6	Ahe	2200	5.2	34.9	0.2	14.6	1.1	0.7	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
11	3716	6-26	Sw/Ae	2200	6.5	49.9	0.2	21.0	0.8	1.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
11	3717	26-28	Bh/Bs	2200	72.5	96.1	1.4	32.3	0.8	2.4	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
11	3718	28-61	Sd/Cv	2200	49.6	119.1	0.5	33.9	0.8	4.3	0.3	0.0	0.0	0.0	0.1
12	5950	+25	Of/Oh	2200	1.8	3.8	0.3	0.8	0.4	0.3	0.0	0.5	0.0	1.9	0.0
12	5997	0-25	Ah	2200	11.2	23.5	0.1	4.7	0.4	0.6	0.2	0.2	0.0	0.2	0.0
12	6005	25-35	Ahe	2200	21.7	42.1	0.1	7.9	0.5	0.5	0.2	0.0	0.0	0.2	0.0
12	5994	35-47	Aesh	2200	18.2	66.2	0.1	14.7	0.6	1.3	0.2	0.3	0.0	0.2	0.0
12	5992	47-110	Bs/Bh/Cv	2200	56.9	142.6	0.0	14.7	0.4	2.5	0.2	0.3	0.0	0.4	0.0
13	8870	+30	Of/Oh	2200											
13	8871	0-15	Aesh	2200											
13	8872	15-41	Bs	2200											
14	5953	+34	Of/Oh	2210	2.4	4.7	0.2	1.0	0.3	0.3	0.0	0.4	0.0	2.0	0.0
14	6006	0-12	Ah	2210	11.6	28.1	0.2	6.3	0.6	0.8	0.3	0.2	0.0	0.2	0.0
14	5998	12-25	Ahe	2210	31.7	53.5	0.1	9.7	0.5	1.0	0.2	0.2	0.0	0.2	0.0
14	5979	25-40	Ae	2210	17.4	76.3	0.0	19.3	0.6	1.5	0.3	0.1	0.0	0.2	0.0
14	6002	40-100	Bs/Bh/Cv	2210	73.3	100.8	0.0	19.9	0.5	1.6	0.1	0.4	0.0	0.5	0.0
15	8873	+30	Of/Oh	2270											
15	8874	0-25	Ae	2270											
15	8875	25-30	Bs	2270											
15	8876	25-30	Bh	2270											
15	8877	25-72	Cv1	2270											
15	8878	72-100	Cv2	2270											
16	5957	+30	Of/Oh	2300	1.4	3.2	0.3	0.6	0.2	0.3	0.0	0.5	0.0	2.1	0.0
16	6014	0-12	Ah	2300	15.8	38.6	0.3	8.8	1.1	1.1	0.2	0.3	0.0	0.5	0.0
16	6041	12-40	Bv	2300	29.5	70.7	0.1	15.0	0.6	1.6	0.2	0.4	0.0	0.2	0.0
16	6022	40-46	fAh	2300	12.9	31.5	0.1	6.2	0.7	0.8	0.2	0.2	0.0	0.2	0.0
16	5975	46-76	Ae	2300	8.3	37.1	0.0	11.5	0.4	1.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
16	6024	76-100	Cv	2300	36.5	79.7	0.0	16.4	0.6	2.5	0.1	0.4	0.0	0.1	0.0
17	3719	+12	Of/Oh	2400	3.5	9.5	0.2	3.3	0.9	0.5	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
17	3720	0-5	Ah	2400	5.5	19.0	0.2	7.5	1.5	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
17	3721	5-40	Sw/Ae	2400	4.3	7.9	0.1	4.2	0.5	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
17	3722	74-83	Bh/Bs	2400	11.1	30.6	0.2	12.7	0.6	0.8	0.2	0.6	0.0	0.0	0.0
17	3723	40-98	Sd/Cv	2400	4.9	24.3	0.1	9.9	0.5	0.8	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
18	5952	+35	Of/Oh	2400	1.2	2.9	0.3	0.9	0.3	0.3	0.0	0.7	0.0	1.8	0.0
18	6031	0-5	Aesh	2400	4.5	13.7	0.2	4.3	1.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.2	0.0
18	6001	5-20	Sw/Ae1	2400	6.0	32.5	0.0	12.9	0.7	0.7	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
18	6028	20-41	Sw/Ae2	2400	30.3	71.6	0.0	22.1	0.7	1.8	0.3	0.2	0.0	0.2	0.0
18	5974	41-73	Sd/Cv	2400	33.4	62.8	0.0	15.8	0.7	1.4	0.2	0.2	0.0	0.2	0.0
19	3724	+12	Of/Oh	2550	2.7	9.0	0.1	2.4	1.1	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
19	3725	0-18	Sw/Ae	2550	5.1	28.2	0.2	10.4	0.8	0.9	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
19	3726	18-23	Bs/Bh	2550	164.9	78.6	1.5	12.2	0.7	1.1	0.2	0.7	0.0	0.2	0.0
19	3727	23-108	Sd/Cv	2550	58.3	93.5	2.2	21.6	1.0	2.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0

Tab. 28 Gesamtgehalte der Profile 11-19.

Profil Nr.	Proben Nr.	Horizont- tiefe [cm]	Horizont- bezeichnung	Höhe	Gesamt Fe [g kg ⁻¹]	Gesamt Al [g kg ⁻¹]	Gesamt Ca [g kg ⁻¹]	Gesamt K [g kg ⁻¹]	Gesamt Na [g kg ⁻¹]	Gesamt Mg [g kg ⁻¹]	Gesamt Mn [g kg ⁻¹]	Gesamt P [g kg ⁻¹]	Gesamt Cu [g kg ⁻¹]	Gesamt S [g kg ⁻¹]	Gesamt Zn [g kg ⁻¹]
20	5947	1-25	Of/Oh	2550	1.4	5.5	0.2	0.0	0.1	0.2	0.0	0.5	0.0	0.1	0.0
20	6032	0-10	Ah	2550	11.6	53.7	0.5	17.3	2.0	2.5	0.2	0.2	0.0	0.4	0.0
20	5989	10-20	Sw/Aeh	2550	11.3	69.2	0.3	22.3	1.3	3.2	0.3	0.1	0.0	0.1	0.0
20	6003	10-25	Sw/Ae	2550	20.9	91.5	0.2	28.8	1.4	3.7	0.3	0.2	0.0	0.1	0.0
20	6044	25-28	Bh/Bs	2550	0.0	84.0	0.2	27.6	1.2	2.8	0.3	0.5	0.0	0.3	0.0
20	6034	28-100	Sd/Cv	2550	61.6	112.0	0.2	30.0	1.5	5.1	0.4	0.9	0.1	0.2	0.0
21	5966	+35	Of/Oh	2700	3.8	9.9	0.8	1.9	1.2	0.6	0.0	1.1	0.0	2.2	0.0
21	6013	0-5	Ah	2700	3.9	11.8	0.3	3.1	1.4	0.6	0.0	0.1	0.0	0.2	0.0
21	6038	5-75	Sw/Ae	2700	3.8	17.1	0.2	5.3	0.5	1.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
21	6023	75-100	Cv/Sd	2700	4.8	13.3	0.0	4.0	0.2	0.5	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
22	5968	35	Of/Oh	2700	2.6	6.0	0.5	1.3	0.7	0.5	0.0	0.9	0.0	2.3	0.0
22	6035	0-40	Ahe	2700	7.3	27.9	0.3	8.7	1.4	1.2	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0
22	6027	40-55	Sw/Ae	2700	6.7	56.2	0.0	22.0	1.4	1.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
22	6009	55-70	Cv/Sd/Bh/Bs	2700	15.2	91.2	0.1	28.5	1.4	2.6	0.4	0.6	0.0	0.4	0.0
23	3728	+20	Of/Oh	2800	3.3	7.6	0.4	2.5	1.1	0.7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
23	3729	0-9	Aeh	2800	4.9	13.5	0.2	4.4	2.3	0.8	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
23	3730	9-20	Ae	2800	4.1	13.9	0.1	3.9	1.8	0.8	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
23	3731	20-70	Cv/Cm	2800	3.2	13.8	0.1	4.9	0.6	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	5954	+25	Of/Oh	2900	4.0	10.1	1.0	2.8	1.9	0.6	0.0	0.9	0.0	2.1	0.0
24	6015	0-5	Aeh	2900	4.4	11.0	0.3	2.2	0.8	0.5	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0
24	5996	5-22	Sw/Ae	2900	5.0	11.9	0.2	2.2	0.1	0.5	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
24	5980	22-60	Bh/Bs	2900	26.8	30.5	0.1	7.5	0.5	1.6	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0
24	6004	60-100	Cv	2900	69.7	57.1	0.3	9.2	1.6	4.4	0.1	1.5	0.1	0.1	0.0
25	3732	+20	Of/Oh	3000	2.5	11.0	0.2	2.5	0.9	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	3733	0-12	Sw/Aa	3000	3.5	14.9	0.9	5.3	1.5	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
25	3734	12-22	Sw/Aeh	3000	4.3	22.9	0.1	8.3	0.7	0.8	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
25	3735	22-48	Sd/Bs/Bh	3000	19.5	24.2	0.2	6.4	0.9	1.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
25	3736	52-100	Cv/Bbs/Sd	3000	95.9	63.0	0.9	17.0	1.1	2.3	0.3	1.2	0.0	0.3	0.1
26	5948	+30	Of/Oh	3100	1.2	2.1	0.7	1.3	0.3	0.5	0.0	0.3	0.0	1.0	0.0
26	6007	0-16	Sw/Aeh	3100	6.8	53.1	0.1	13.9	1.2	1.1	0.0	0.1	0.0	0.2	0.0
26	6043	16-58	Sd/Bs	3100	66.6	115.9	0.0	25.2	1.0	2.1	0.5	0.3	0.0	0.1	0.0
26	6033	58-100	Cv/Bbs/Sd	3100	109.9	128.2	0.2	25.5	0.9	2.6	3.5	1.2	0.1	0.3	0.1
27	5961	+20	Of/Oh	3200	1.6	3.4	3.3	1.9	0.5	1.2	0.7	0.5	0.0	1.0	0.0
27	5977	0-20	Aa/Sw	3200	5.3	39.9	0.2	12.1	0.9	1.2	0.1	0.1	0.0	0.3	0.0
27	6029	20-55	Sw/Aeh	3200	6.5	54.8	0.2	17.3	1.2	1.6	0.2	0.2	0.0	0.2	0.0
27	5976	55-60	Sd/Bs/Bh	3200	9.9	68.5	0.1	20.3	0.9	2.1	0.2	0.1	0.0	0.2	0.0
27	5970	65-110	Cv/Bbs/Sd	3200	47.9	60.5	0.1	14.2	0.9	3.5	1.1	0.9	0.0	0.1	0.0
28	5967	+25	Of/Oh	3300	1.3	10.3	0.5	1.1	0.4	0.5	0.0	1.0	0.0	1.9	0.0
28	5991	0-15	Oh/Ah	3300	4.7	17.6	0.4	4.7	1.2	1.1	0.1	0.2	0.0	0.5	0.0
28	6042	15-32	Ae	3300	8.4	25.4	0.2	9.3	0.7	0.9	0.2	0.1	0.0	0.1	0.0
28	6025	32-49	Bh	3300	8.8	45.3	0.0	13.7	1.5	1.6	0.0	0.2	0.0	0.3	0.0
28	6026	49-79	Sw/Bs	3300	32.1	43.8	0.9	9.9	2.1	3.9	0.2	0.5	0.0	0.2	0.0
28	5999	79-100	Sd/Cv	3300	7.3	27.2	0.1	8.1	0.3	1.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0
29	5955	+30	Of/Oh	3450	1.3	2.9	3.2	1.8	0.5	0.8	0.5	0.4	0.0	1.1	0.0

Tab. 29 Gesamtgehalte der Profile 20-29.

Tab. 30 Sesquioxide, Kohlenstoff und Stickstoffgesamtgehalte der Profile 1-10.

Profil Nr.	Proben Nr.	Horizont- tiefe [cm]	Horizont- bezeichnung	Höhe [m ü.M.]	C [%]	N [%]	C/N	Oxalat Al [g kg ⁻¹]	Oxalat Fe [g kg ⁻¹]	Oxalat Mn [g kg ⁻¹]	Oxalat Si [g kg ⁻¹]	Dithionit Fe [g kg ⁻¹]	Dithionit Al [g kg ⁻¹]	Dithionit Mn [g kg ⁻¹]	Dithionit Si [g kg ⁻¹]
1	5949	+10	Off/Oh	1700	37.3	2.8	13								
1	6021	0-30	Ah	1700	7.3	0.5	15	29.5	17.0	0.2	3.9	18.5	18.1	0.2	2.7
1	5995	30-100	Bv	1700	1.3	0.1	13	9.9	12.8	0.3	1.0	16.9	6.3	0.3	0.2
2	5960	+20	Off/Oh	1700	39.0	2.6	15								
2	5978	0-20	Ah	1700	10.8	0.7	15	24.6	18.4	0.1	1.2	16.8	16.5	0.8	2.6
2	5987	20-90	Bv1	1700	1.2	0.1	11	8.7	15.3	0.1	0.7	2.3	6.2	0.1	0.2
2	6016	90-135	Bv2	1700	0.5	0.0	15	3.3	6.4	0.0	0.2	9.7	2.4	0.5	0.0
3	3709	+3	Off/Oh	1800	20.5	1.7	12								
3	3710	0-37	Ah	1800	6.8	0.6	12	28.0	14.5	0.1	0.0				
3	3711	37-70	Bv1	1800	5.9	0.3	19	3.7	16.4	0.0	0.0				
3	3712	70-117	Bv2	1800	4.2	0.2	18	28.7	17.6	0.0	0.0				
4	5958	+23	Off/Oh	1800	41.9	2.8	15								
4	5988	0-35	Ah	1800	11.0	0.6	18	28.7	19.5	0.0	1.8	2.7	17.3	0.7	2.0
4	5973	35-43	Bv1	1800	1.2	0.3	4	27.8	21.7	0.0	5.2	23.4	17.0	0.6	3.3
4	6012	43-125	Bv2	1800	3.3	0.2	21	54.4	28.6	0.0	16.0	25.4	16.6	0.5	1.9
5	5963	+20	Off/Oh	1800	44.4	2.9	16								
5	6037	0-20	Ah	1800	7.8	0.5	15	13.2	19.9	0.0	0.1	18.6	9.7	0.7	0.5
5	6010	20-45	C	1800	0.7	0.1	10	2.5	2.9	0.1	0.0	9.1	2.2	0.9	0.0
6	5951	+5 - +20	Off/Oh	1800	45.1	2.6	17								
6	5964	+5- 0	Ah/Off/Oh	1800	25.0	1.7	14	12.5	9.2	0.0	0.3	9.4	7.3	0.2	1.0
6	5984	0-45	Ah	1800	9.8	0.7	15	39.5	21.5	0.0	5.6	22.3	2.9	0.4	2.7
6	5982	50-130	Bv	1800	1.4	0.1	11	8.7	19.2	0.0	1.0	32.5	8.3	1.0	0.4
7	5959	+20	Off/Oh	1900	42.7	2.8	15								
7	6036	0-43	Ah	1900	7.7	0.7	11	3.8	17.6	0.0	1.0	16.5	19.7	0.4	1.3
7	6008	43-82	Cv	1900	1.5	0.1	17	6.9	12.4	0.0	0.3	21.6	6.3	0.4	0.0
7	6030	82-93	Cv	1900	0.3	0.0	16	1.4	1.3	0.0	0.0	15.7	1.6	0.7	0.0
7	5986	93-112	Cv	1900	0.2	0.0	4	1.2	1.2	0.4	0.1	11.6	2.7	0.3	0.0
7	5990	112-125	Cv	1900	0.2	0.0	8	1.6	0.7	0.2	0.1	8.3	1.6	0.2	0.0
7	6019	125-150	Cv	1900	0.1	0.0	8	1.0	0.8	0.2	0.0	7.2	1.1	0.2	0.0
7	6046	150-160	Cv	1900	0.2	0.0	10	1.2	0.7	0.0	0.0	15.6	13.8	0.2	0.8
8	5962	+25	Off/Oh	2000	43.4	2.4	18								
8	5985	0-56	Ah	2000	11.6	0.6	19	34.7	22.2	0.0	2.3	21.5	18.6	0.4	1.2
8	6000	56-65	Bv	2000	6.8	0.5	14	52.9	26.3	0.0	11.0	24.6	22.2	0.3	3.2
8	5981	65-90	C	2000	2.4	0.2	13	13.4	22.1	0.0	1.5	31.3	2.0	0.4	0.5
9	5956	+25	Off/Oh	2000	44.0	2.3	19								
9	6020	0-25	Ah	2000	7.6	0.4	17	15.9	21.9	0.0	0.1	2.5	1.9	0.3	0.2
9	5983	25-58	Ahe	2000	6.6	0.3	22	15.4	13.6	0.0	1.0	13.0	9.8	0.2	0.5
9	6040	58-70	Bs/Cv	2000	2.1	0.1	24	2.4	13.7	0.0	4.8	16.5	12.7	0.2	2.0
9	5972	70-100	Cv	2000	2.5	0.1	19	55.3	37.2	0.0	16.2	39.8	22.3	0.8	2.5
10	5969	+20	Off/Oh	2100	41.2	2.7	15								
10	6017	0-17	Ah	2100	7.3	0.5	13	6.6	19.6	0.0	0.0	17.2	5.1	0.3	0.1
10	5971	17-50	Bv	2100	8.0	0.5	17	39.7	27.4	0.0	3.7	26.5	23.9	0.2	2.6
10	6011	50-100	Cv	2100	3.3	0.1	28	34.9	3.2	0.0	6.9	25.5	17.2	0.8	2.2

Tab. 31 Sesquioxide, Kohlenstoff und Stickstoffgesamthalte der Profile 11-19.

Profil Nr.	Proben Nr.	Horizont- tiefe [cm]	Horizont- bezeichnung	Höhe [m ü.M.]	C [%]	N [%]	C/N	Oxalat Al [g kg ⁻¹]	Oxalat Fe [g kg ⁻¹]	Oxalat Mn [g kg ⁻¹]	Oxalat Si [g kg ⁻¹]	Dithionit Fe [g kg ⁻¹]	Dithionit Al [g kg ⁻¹]	Dithionit Mn [g kg ⁻¹]	Dithionit Si [g kg ⁻¹]
11	3713	+38-8	Of/Oh	2200	47.0	2.3	20								
11	3714	+8-0	Oh/Ah	2200	22.1	1.2	18								
11	3715	0-6	Ahe	2200	4.2	0.2	26	0.3	0.3	0.0	0.0				
11	3716	6-26	Sw/Ae	2200	0.8	0.1	16	0.3	0.2	0.0	0.0				
11	3717	26-28	Bh/Bs	2200	2.6	0.1	27	4.7	2.6	0.0	0.0				
11	3718	28-61	Sd/Cv	2200	1.5	0.1	21	1.9	12.4	0.1	0.0				
12	5950	+25	Of/Oh	2200	42.9	2.1	21								
12	5997	0-25	Ah	2200	1.1	0.2	7	3.5	7.2	0.0	0.0	5.5	2.2	0.6	0.0
12	6005	25-35	Ahe	2200	1.5	0.2	10	11.5	14.9	0.0	0.1	13.5	7.4	0.1	0.0
12	5994	35-47	Aeh	2200	2.7	0.1	20	17.3	8.8	0.0	1.5	7.5	9.9	0.5	0.4
12	5992	47-110	Bs/Bh/Cv	2200	3.0	0.1	24	26.6	33.2	0.0	4.5	33.8	14.3	0.5	0.9
13	8870	+30	Of/Oh	2200	45.3	2.1	22	0.9	0.6	0.0	0.0				
13	8871	0-15	Aeh	2200	9.8	0.6	16	5.0	2.7	0.0	0.1				
13	8872	15-41	Bs	2200	7.4	0.4	21	26.2	26.7	0.3	1.1				
14	5953	+34	Of/Oh	2210	44.9	2.0	22								
14	6006	0-12	Ah	2210	2.1	0.2	13	2.2	3.8	0.0	0.0	5.5	1.8	0.3	0.0
14	5998	12-25	Ahe	2210	2.6	0.1	20	21.6	23.0	0.0	1.5	17.9	12.4	0.2	0.6
14	5979	25-40	Ae	2210	1.7	0.1	12	11.8	7.3	0.0	1.7	8.9	8.6	0.2	0.8
14	6002	40-100	Bs/Bh/Cv	2210	1.9	0.1	22	18.4	43.4	0.0	1.6	48.2	14.6	0.9	0.6
15	8873	+30	Of/Oh	2270	46.0	5.6	8	0.6	0.4	0.0	0.0				
15	8874	0-25	Ae	2270	0.8	0.1	14	0.3	1.3	0.0	0.0				
15	8875	25-30	Bs	2270	3.8	0.1	28	12.2	78.0	0.0	1.1				
15	8876	25-30	Bh	2270	5.0	0.7	8	3.3	29.9	0.0	0.2				
15	8877	25-72	Cv1	2270	3.2	0.1	32	24.5	27.5	0.0	4.4				
15	8878	72-100	Cv2	2270	3.2	0.1	31	27.6	25.4	0.0	5.7				
16	5957	+30	Of/Oh	2300	45.7	2.2	21								
16	6014	0-12	Ah	2300	7.5	0.5	17	2.8	6.2	0.0	0.0	6.7	2.5	0.6	0.0
16	6041	12-40	Bv	2300	3.9	0.1	26	15.8	12.8	0.0	0.7	16.3	12.6	0.4	0.2
16	6022	40-46	fAh	2300	6.1	0.4	15	6.0	3.5	0.0	0.1	5.5	3.8	0.1	0.0
16	5975	46-76	Ae	2300	0.5	0.0	15	0.7	0.3	0.0	0.0	4.4	1.3	0.1	0.0
16	6024	76-100	Cv	2300	1.3	0.0	30	1.5	15.9	0.0	1.2	21.5	7.3	0.3	0.1
17	3719	+12	Of/Oh	2400	38.5	2.1	18								
17	3720	0-5	Ah	2400	2.8	0.2	15								
17	3721	5-40	Sw/Ae	2400	0.2	0.0	9	0.4	0.2	0.0	0.0				
17	3722	74-83	Bh/Bs	2400	0.5	0.0	17	1.0	2.6	0.0	0.0				
17	3723	40-98	Sd/Cv	2400	0.2	0.0	8	0.2	0.3	0.0	0.0				
18	5952	+35	Of/Oh	2400	47.0	2.0	23								
18	6031	0-5	Aeh	2400	5.4	0.2	24	0.4	0.2	0.0	0.0				
18	6001	5-20	Sw/Ae1	2400	0.4	0.0	12	0.2	0.4	0.0	0.0				
18	6028	20-41	Sw/Ae2	2400	2.9	0.1	21	2.0	9.9	0.0	0.0	12.3	1.8	1.0	0.0
18	5974	41-73	Sd/Cv	2400	1.1	0.0	25	7.7	17.9	0.0	0.9	26.3	8.1	0.3	0.7
19	3724	+12	Of/Oh	2550	40.2	2.1	19.3								
19	3725	0-18	Sw/Ae	2550	0.5	0.0	12.4	0.2	0.6	0.0	0.0				
19	3726	18-23	Bs/Bh	2550	4.63	0.1	42.9	14.4	45.6	0.0	0.0				
19	3727	23-108	Sd/Cv	2550	1.434	0.1	24.3	8.4	16.0	0.0	0.0				

Profil Nr.	Proben Nr	Horizont- tiefe [cm]	Horizont- bezeichnung	Höhe [m ü.M.]	C	N	C/N	Oxalat Al [g kg ⁻¹]	Oxalat Fe [g kg ⁻¹]	Oxalat Mn [g kg ⁻¹]	Oxalat Si [g kg ⁻¹]	Dithionit Fe [g kg ⁻¹]	Dithionit Al [g kg ⁻¹]	Dithionit Mn [g kg ⁻¹]	Dithionit Si [g kg ⁻¹]
20	5947	+35	Of/Oh	2550	45.6	2.4	19								
20	6032	0-10	Ah	2550	7.3	0.4	18	0.6	5.2	0.0	0.0	2.8	0.4		0.0
20	5989	10-20	Sw/Aeh	2550	1.1	0.1	17	0.5	0.4	0.0	0.0	1.9	1.1	0.3	0.0
20	6003	10-25	Sw/Ae	2550	2.1	0.1	24	3.3	2.4	0.0	0.0	8.5	3.3	0.7	0.0
20	6044	25-28	Bh/Bs	2550	2.1	0.0	71	5.2	66.6	0.0	0.5	13.7	6.8	0.2	0.0
20	6034	28-100	Sd/Cv	2550	1.5	0.0	52	13.0	28.3	0.0	0.8	5.0	11.2	0.2	0.0
21	5966	+35	Of/Oh	2700	37.8	2.5	15								
21	6013	0-5	Ah	2700	2.4	0.1	21	0.8	0.5	0.0	0.0	1.7	1.0		0.0
21	6038	5-75	Sw/Ae	2700	0.1	0.0	49	0.2	0.7	0.0	0.0	1.7	0.8	1.0	0.0
21	6023	75-100	Cv/Sd	2700	0.2	0.0	23	0.3	0.1	0.0	0.0	2.5	0.6		0.0
22	5968	35	Of/Oh	2700	42.8	2.5	17								
22	6035	0-40	Ahe	2700	2.2	0.1	22	0.2	0.9	0.0	0.0	4.0	0.7	0.4	0.0
22	6027	40-55	Sw/Ae	2700	0.5	0.0	20	0.2	0.1	0.0	0.0	0.9	0.4		0.0
22	6009	55-70	Cv/Sd/Bh/Bs	2700	8.2	0.4	21								
23	3728	+20	Of/Oh	2800	39.1	2.1	19								
23	3729	0-9	Aeh	2800	14.4	0.9	15								
23	3730	9-20	Ae	2800	3.6	0.2	15	0.8	0.1	0.0	0.0				
23	3731	20-70	Cv/Cm	2800	0.1	0.0	8	0.3	0.9	0.0	0.0				
24	5954	+25	Of/Oh	2900	42.0	2.3	18								
24	6015	0-5	Aeh	2900	2.9	0.1	29	0.8	0.1	0.0	0.0	1.4	0.3		0.0
24	5996	5-22	Sw/Ae	2900	0.2	0.0	12	0.4	0.6	0.0	0.0	1.8	0.5	0.8	0.0
24	5980	22-60	Bh/Bs	2900	1.6	0.1	17	1.1	9.2	0.0	0.0	15.8	1.8	0.2	0.0
24	6004	60-100	Cv	2900	1.2	0.0	43	6.5	24.5	0.0	0.1	5.5	9.0	0.8	0.0
25	3732	+20	Of/Oh	3000	42.1	1.7	25								
25	3733	0-12	Sw/Aa	3000	10.0	0.4	25	0.6	0.2	0.0	0.0				
25	3734	12-22	Sw/Aeh	3000	2.2	0.1	23	0.6	0.5	0.0	0.0				
25	3735	22-48	Sd/Bs/Bh	3000	1.9	0.0	51	3.6	0.1	0.0	0.0				
25	3736	52-100	Cv/Bbs/Sd	3000	1.0	0.0	20	3.3	16.6	0.1	0.0				
26	5948	+30	Of/Oh	3100	45.3	1.1	41								
26	6007	0-16	Sw/Aeh	3100	2.8	0.1	19	1.6	3.0	0.0	0.0	3.1	1.1		0.0
26	6043	16-58	Sd/Bs	3100	1.1	0.0	29	5.3	14.3	0.8	0.2	41.9	8.9	0.6	0.0
26	6033	58-100	Cv/Bbs/Sd	3100	1.1	0.0	38	5.4	23.6	2.8	0.5	92.6	14.4	2.2	0.2
27	5961	+20	Of/Oh	3200	40.9	1.1	37								
27	5977	0-20	Aa/Sw	3200	0.5	0.2	2	1.7	1.1	0.0	0.0	0.9	0.9		0.0
27	6029	20-55	Sw/Aeh	3200	2.8	0.1	23	1.8	1.6	0.0	0.0	1.3	0.7		0.0
27	5976	55-60	Sd/Bs/Bh	3200	2.2	0.1	17	4.2	1.1	0.0	0.0	1.6	3.7		0.1
27	5970	65-110	Cv/Bbs/Sd	3200	1.1	0.1	13	7.2	22.7	1.4	0.5	35.1	6.9	1.7	0.4
28	5967	+25	Of/Oh	3300	43.5	2.0	21								
28	5991	0-15	Oh/Ah	3300	17.2	0.4	41	1.2	0.5	0.0	0.0	0.9	0.9	0.3	0.0
28	6042	15-32	Ae	3300	1.3	0.1	23	0.4	0.6	0.0	0.0	2.9	1.3	0.3	0.0
28	6025	32-49	Bh	3300	3.0	0.1	25	3.1	1.4	0.0	0.0	2.8	2.3		0.0
28	6026	49-79	Sw/Bs	3300	1.6	0.1	26	8.1	1.5	0.0	1.0	16.6	5.6	0.3	0.1
28	5999	79-100	Sd/Cv	3300	0.2	0.0	11	2.3	0.5	0.0	0.5	2.3	1.7		0.0
29	5955	+30	Of/Oh	3450	44.0	1.0	42								

Tab. 32 Sesquioxide, Kohlenstoff und Stickstoffgesamtgehalte der Profile 20-29.

Tab. 33 Geräteausstattung der Klimastationen 1850, 2600, 3050m ü.M.

Nr	Parameter	Gerätebezeichnung	Typ	Firma	Genauigkeit
	Datenaufnahme	Datalogger	Delta T- Logger	Delta- T Devices, Cambrigde	
1	Boden- temperatur	Bodentemperatur- fühler	Th2-p	UMS, München	0.154°C
2	Bodenfeuchte (vol. Wasser- gehalt)	FDR- Sonde	Theta Probe	Delta- T Devices, Cambrigde	3 %
3	Rel. Luftfeuchte	Hygro- Thermosensor	HTS 200	Klink, Horb	2.5 %
4	Lufttemperatur	Hygro- Thermosensor	HTS 200	Klink, Horb	0.2 K
5	Niederschlag	Kippwaage	ARG 100	EM, Gateshead	0.2 mm
6	Windrichtung	Windfahne	W200P	Vector Instruments, Wales	3°
7	Wind- geschwindigkeit	Anemometer	A100 L2	Vector Instruments, Wales	1 %
8	Strahlungs- bilanz	Nettoradiometer	NR Lite	Kipp und Zonen, Delft	10 W m ⁻²
9	Globalstrahlung	Sternpyranometer	8101	Schenk, Wien	0.5 %
10	Nebeleintrag	Kippwaage	KIPP 100	EM, Gateshead	0.1 mm

Curriculum Vitae

Marcus Schawe

Persönliche Daten

- Geburtsdatum: 03.09.1969
- Geburtsort: Osnabrück
- Familienstand: ledig
- Staatsangehörigkeit: deutsch

Bildungsgang

07/ 2005	Disputation
04/ 2000 – 07/ 2005	Doktorarbeit mit der Thematik: „Hypsometrischer Klima- und Bodenwandel in Bergregenwaldökosystemen Boliviens.“
10/ 1999	Abschluss des Diploms in Geographie. Nebenfächer: Bodenkunde, Bioklimatologie, Tropischer und Subtropischer Pflanzenbau
12/ 1998	Abschluss des ersten Staatsexamens für gymnasiales Lehramt. Thema der Examens- /Diplomarbeit: „Bodendifferenzierung und Bodenqualität im Amazonastiefland Ecuadors.“
10/ 1998 – 10/1999	Geographie Diplom [Georg- August- Universität Göttingen]
04/ 1994 – 12/ 1998	Studium gymnasiales Lehramt, Erdkunde und Sport [Georg- August- Universität Göttingen]
10/ 1991 – 04/ 1994	Studium gymnasiales Lehramt, Erkunde und Sport [Universität Osnabrück- Standort Vechta]
06/ 1989 – 01/ 1991:	Zivildienst: Kardinal-von-Galen-Haus, Schule für Körperbehinderte [Dinklage]
05/ 1989	Abitur am Gymnasium St. Angela-Schule [Osnabrück]
08/ 1982 – 05/ 1989	Gymnasium St. Angela-Schule [Osnabrück]