

EINE STUDIE ÜBER DEN ZUSAMMENHANG ZWISCHEN BODENTYP, KLIMA UND VEGETATION IN ECUADOR

von ERWIN FREI *

Aus der Eidg. Landw. Versuchsanstalt, Zürich, Schweiz

EINLEITUNG

In Ecuador demonstriert sich in ausserordentlich schöner Weise ein Zusammenhang zwischen Bodenformationen, Vegetation und Klima, welches in diesem Lande auf verhältnismässig kleinem Raum regional enorm grosse Unterschiede aufweist.

Seit der Gründungszeit der Bodenkunde, war das Klima stets als wichtiger, bodenbildender Faktor anerkannt. Besonders in grossräumigen Ländern mit einigermaßen einheitlicher Geologie und Landform, erwiesen sich die Bodenverhältnisse in überwältigender Weise beeinflusst durch die Klimazonen. Es hat sich allerdings gezeigt, dass neben dem Klima auch andere variable Faktoren wie beispielsweise die geologische Unterlage, die Landform, die Vegetation, das örtliche Wasser- und Wärmeregime des Bodens von grossem Einfluss auf die Bodenbildung sind. Entsprechend der heutigen Auffassung in der Bodenkunde, haben alle diese Faktoren sowie auch weitere hier nicht genannte, den Boden so geformt wie er sich uns gegenwärtig präsentiert. Selten wirken aber alle Faktoren gleich stark; meistens tritt einer den andern gegenüber dominierend hervor und vermag den Boden zu prägen. Wo z.B. aus irgend einem Grund der normale Wasserabzug aus dem Boden gehemmt ist, bestimmen diese lokalen hydrologischen Verhältnisse den Boden fast vollständig. Wo andererseits örtlich nahe beieinander

* Der Verfasser hatte Gelegenheit im Rahmen der technischen Hilfe der FAO als Berater der ecuadorianischen Regierung für bodenkundliche Fragen, die Böden von Ecuador während eines Jahres zu studieren.

TABELLE I
Kennzeichnende Merkmale einiger Bodentypen Ecuadors

Bodentyp Bezeichnung	Allgemeines Feuchtigkeits- regime	Humusbildung	Bildung mineralischer Kolloide	Mittlere Tiefgründigkeit der Boden- bildung	Azidität und Basengehalt	Wahrschein- liche Perkolate	Horizonte, Farbe und Gefüge	Natürliche Vegetation
Sterosem	sehr trocken; nie perkoliert; Nassperiode: 1-3 Monate	sehr gering	Schwellton- bildung	flach; ± 60 cm	alkalisch	—	A: hellgrau, grobklumpig, stark bindig	Kaktusbusch
Regur	trocken; selten perkoliert; Nassperiode 3-6 Monate	gut; schwarzer, kolloider Mull	sehr starke Schwellton- bildung	mässig flach; ± 80-100 cm	neutral oder alkal. sekundäres CaCO ₃	Erdaalkali evtl. Alkali	A: schwarz, grobklumpig, stark bindig A-C: hellgrau	Regengrüne Gehölze
Tropische Braunböden	mässig feucht, period. perkoliert; Nass- periode: 6-9 Monate	ziemlich gut; dunkler Mull	Schwelltone vorhanden	mässig tief; ± 150-200 cm	schwach sauer	Erdaalkali	A: dunkelbraun; bindiges Aggregatgefüge B: stark braun, Klumpig	tropischer immergrüner Laubwald
Braun-Latosol	feucht; regelm. perkoliert; 1-3 Monate trocken	mässig; schwarzer, dunkler Mull z.T. Rohhumus	im Obergrund Tonbildung, im Untergrund sesquioxydreich	tief; ± 200-300 cm	ziemlich sauer	Erdaalkali und SiO ₂	A: braun; lockeres Aggregatgefüge B ₁ : stark braun, bindig B ₂ : rot und grau	warmer Regenwald
Gelbroter- Latosol	dauernd feucht; stark perkoliert	schwach bis fehlend	Kaolin; im Untergrund sesquioxydreich	sehr tief; über 300 cm	sauer	SiO ₂	A: gelb, locker, aggregiert B: rot und grau, bindig	warmer Regenwald
Organo Latosol	dauernd feucht; stark perkoliert	stark; schwarzer Märhumus; z.T. Rohhumus	Kaolin; im Untergrund sesquioxydreich	tief; ± 300 cm	sauer	SiO ₂	A ₁ : schwarz, sehr porös A ₂ : gelb, porös B: rot grau, bindig	temperiert. Regenwald
Schwarzer Andenboden	mässig feucht; period. perkoliert; ab und zu trocken	stark; schwarzer, kolloider Mull; selten Mor	Allophan; mässige Tonbildung	ziemlich tief; 150-250 cm	schwach sauer bis sauer	Humus, SiO ₂ und Erdaalkali	A: schwarz; poröses Schwammgefüge A-C: hell, bindig	Horstgras- prärie
Braunsem der Anden	ziemlich trocken; sehr schwach perkoliert	mässig; kolloider Mull	mässige Tonbildung	mittel; ± 100 cm	neutral	SiO ₂ , Erdaalkali evtl., Alkali	A: dunkelbraun, locker, aggregiert A-C: oft hart	Buschgehölz
Brauner Wüstenboden	sehr trocken; nicht perkoliert	fast fehlend	fast fehlend	sehr flach; ca. 30-50 cm	alkalisch	—	A: hellgraubraun, sandig A-C: locker, sandig	offener Kaktusbusch

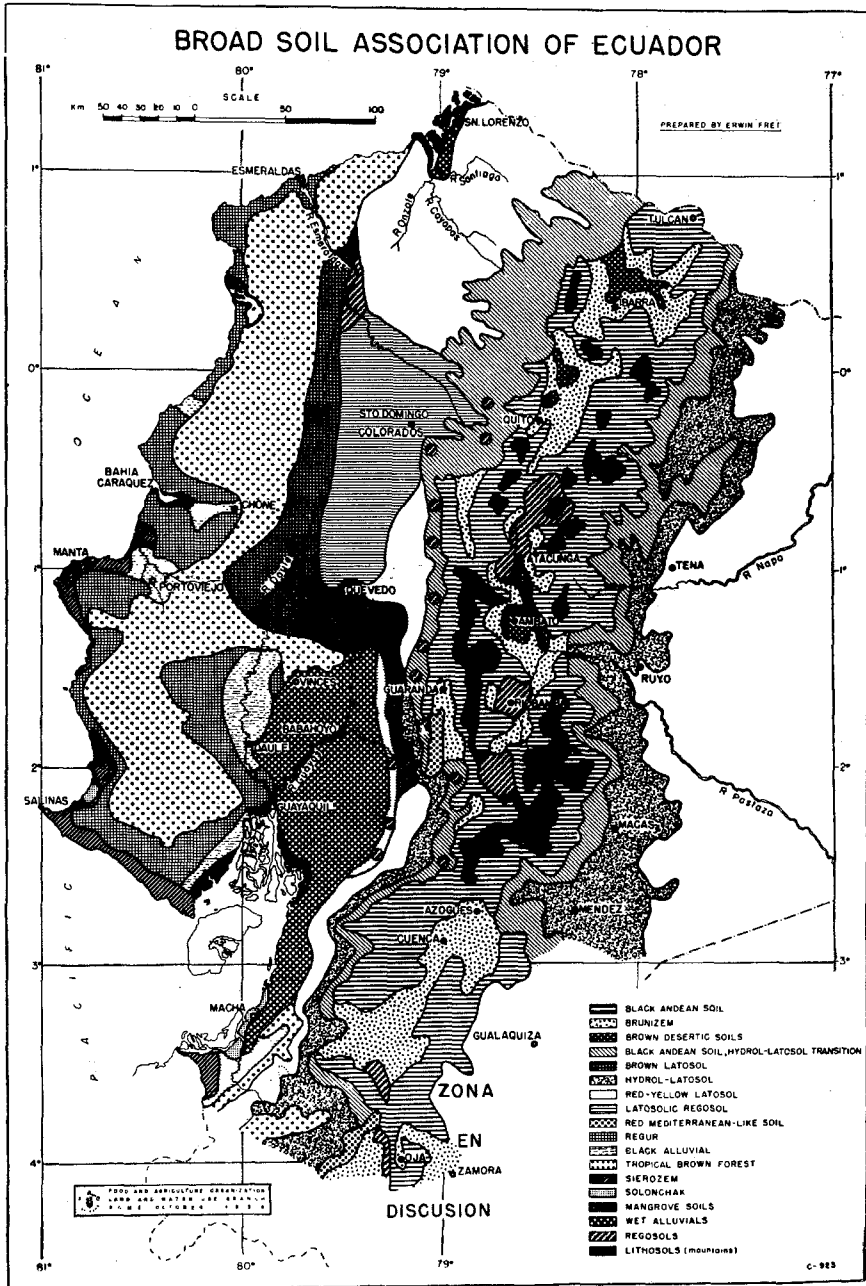
Böden auf reinem Kalk- und granitischem Gestein beobachtet werden können, hat man den Eindruck, die geologischen Verhältnisse seien allein ausschlaggebend für die Bodenausbildung. Ferner haben neuere pflanzensoziologisch-bodenkundliche Untersuchungen auf einen Zusammenhang zwischen Boden und Vegetationsausbildung hingewiesen, sodass bestimmte Bodenausbildungen, bestimmten Vegetationseinheiten zugeordnet werden können oder umgekehrt. Und schliesslich vermag auch das Relief auf die Bodenbildung einzuwirken, denn man wird z.B. am Steilhang eines Tales oder Gebirges andere Böden erwarten als in den Talsohlen.

Ohne die Bedeutung dieser vielfältigen Faktoren für die Bodenbildung zu verkennen, erweist es sich doch als zweckmässig, dass man sich bei bodenkundlichen Uebersichtsstudien auf grossen Flächen in erster Linie an den Faktor Klima hält. Die Gliederung des Territoriums von Ecuador in generelle Bodentypen (siehe Figur 1) ist zugleich auch eine Abgrenzung von Klimaregionen und somit von Gebieten mit unter sich verschiedenen landwirtschaftlichen Entwicklungsmöglichkeiten.

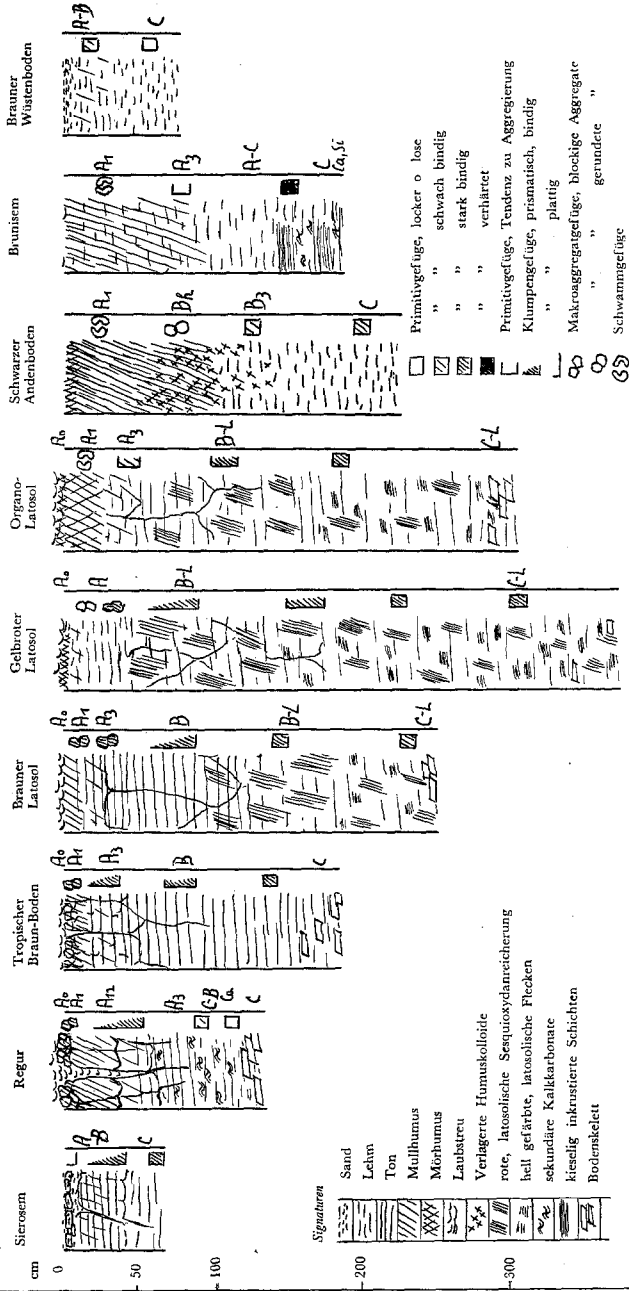
Bevor wir zu Besprechung der Bodentypen im einzelnen übergehen, sei auf die Tabelle I und die Figur 2 verwiesen, wo ein Ueberblick über die wichtigen, kennzeichnenden Merkmale dieser Böden gewonnen werden kann.

Von grösster Bedeutung für die Bodenbildung erweist sich stets die Art der Durchfeuchtung und Perkolation der Bodenprofile. Das Wasser ermöglicht die chemische Verwitterung des Bodenmaterials, wobei seine Wirksamkeit bei erhöhter Temperatur wesentlich intensiver ist, entsprechend seiner grösseren Eigendissoziation. Bei Wasserübersättigung des Bodens erfolgt Perkolation und damit verbunden Filtrationsverlagerungen von Bodenbestandteilen, wodurch viele Bodentypen erst ihre charakteristischen Horizonte erhalten.

Die Art der Humusbildung ist für die Beurteilung von Bodenprofilen ebenfalls von grosser Bedeutung. Sie gibt Anhaltspunkte über die Menge des Anfalls an organischen Rückständen, deren Einmischung in das Bodenprofil und über die biologische Aktivität beim Abbau. Die Humusform lässt mancherlei Rückschlüsse zu über die physikalischen und chemischen Bedingungen während der Humusbildung.



Figur 1. Generelle Bodentypen von Ecuador.
 (Bodenkarte herausgegeben von der Food and Agriculture Organisation der UN, Rom)



Figur 2. Profilskizzen einiger Bodentypen Ecuadors.

Die Bildung, Anreicherung oder Auswaschung mineralischer Bodenkolloide vermag gewisse Bodenprofile zu kennzeichnen. Das hervorstechendste Merkmal der Regurböden z.B., ist neben den dunklen Humuskolloiden, die grosse Menge an Schwelltonen im Oberhorizont, wodurch der Boden sein charakteristisch klumpiges und rissiges Gefüge erhält.

Die Tiefgründigkeit der Böden kann lokal wohl sehr variabel sein; die mittlere Tiefgründigkeit, statistisch aufgefasst, ist aber dennoch ein sehr instruktives Profilvermerkmal.

Azidität und Basengehalt des Bodens sind an den Bodentyp gebundene Merkmale, sofern eine genügende Variationsbreite akzeptiert wird. Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung des Muttermaterials können jedoch besonders bei jungen Bodenprofilen wesentliche Abweichungen von der Norm bedingen.

Die bei der Perkolation der Bodenprofile verlagerten, kennzeichnenden Substanzen sind nicht immer leicht festzustellen. Häufig können sie jedoch chemisch oder optisch direkt nachgewiesen werden. Die Art der verlagerten Kolloide oder Salze geben weitere Aufschlüsse über die Dynamik der Bodenbildung.

Horizontfolge, Farbe und Gefüge sind Eigenschaften des Bodenprofils, die für dessen Klassifikation von Bedeutung sind. Manche kennzeichnende Vorgänge bei der Ausbildung eines Bodentypes, lassen sich äusserlich an einer besonderen Farbtonung oder an einem speziellen Gefüge der Bodensubstanz leicht erkennen.

Die natürliche Vegetation steht häufig in engem Zusammenhang mit dem Bodentyp; wir konnten dies auch im hier zu besprechenden Beispiel deutlich erkennen. Die natürliche Vegetation wird deshalb erwähnt, aber mangels botanischer Studien, sind die hier in dieser Beziehung gemachten Angaben jedoch sehr fragmentarisch.

ERGEBNISSE DER STUDIE

1. *Die Sierosemböden im Küstentrockengebiet unter Kaktus-Busch Vegetation*

Der südliche Teil der ecuadorianischen Küste ist sehr niederschlagsarm; dadurch entsteht eine Halbwüste, die sich südwärts nach Peru fortsetzt und dort grössere Gebiete in Anspruch nimmt. Pro Jahr erhält der verhältnismässig schmale, trockene Küstenstreifen Ecuadors höchstens 250 mm Regen und zwar ausschliesslich

während der tropischen Regenzeit von Januar bis März, die übrigen neun Monate des Jahres sind absolut regenlos. Lokale Meerwinde bewirken zwar während der Trockenzeit oft Bewölkung, zu Niederschlägen kommt es aber nicht, weil der Humboldtstrom die Luftmassen über dem Meer ziemlich abkühlt. Ueber dem Land erwärmt sich die Luft wieder und gibt vorerst kein Wasser ab. In dieser Halbwüste herrscht ein warmes Klima, das jedoch bei 23° bis 24°C Jahresmittel um 1° bis 4°C weniger warm ist als in Landesinnern. Die Temperaturschwankungen sind gering, was für äquatoriale Gebiete ziemlich allgemein typisch ist. Während der langen Trockenzeit wird die Halbwüste völlig dürr. Nur die zahlreichen Kaktusgewächse vermögen das eintönige Grau zu unterbrechen. Auch die Bodenoberfläche ist kahl, völlig ausgetrocknet, häufig stark rissig und hart, sowie meistens durch eine sandige Verwehungsschicht bedeckt. Doch während der Regenzeit begrünt sich diese Wüste rasch. Dadurch wird eine gewisse kleine Menge organischen Materials produziert, das die Grundlage für eine sehr beschränkte Humusbildung gibt. Die kurze, jährliche Nässeperiode ermöglicht die Bildung von Tonmineralen in der 30–40 cm mächtigen Oberflächenschicht. Hier sind oft Tongehalte bis zu 40% zu finden. Siroseprofile werden nie perkoliert, weshalb sich die gelösten Salze im Boden wieder während des Austrocknens abscheiden. In der Regel findet man deshalb neutrale oder alkalische Reaktionen und nicht selten kommen Gipskristalle vor.

Diese grauen, tonigen Halbwüstenböden sind in Ecuador nicht landwirtschaftlich genutzt. Eine Nutzung käme auch nur unter intensiver Bewässerung in Frage und das Herleiten grosser Wassermengen dürfte hier ein Problem sein. Wo aber genügend Bewässerungswasser zugeführt werden könnte, wäre eine Inkulturnahme des sanft welligen Landes möglich. Gewisse Nachteile bilden die harte, klumpige Struktur des Oberbodens, die geringe Wasserdurchlässigkeit und ab und zu etwas hoher Salzgehalt.

2. Die Regurböden im Gebiet der regengrünen Gehölze

Landeinwärts, an den Halbwüstengürtel anschliessend, folgt ein niedrig gelegenes, jedoch häufig steil kupiertes Hügelland. Geologisch handelt es sich um tektonisch gehobene, häufig verworfene und etwas schräg gestellte Sedimentschichten des Tertiärs oder stellenweise sogar des jungen Quartärs. Tschopp⁸ nimmt an, dass die

Gebirgsbildung in den Anden auch im frühen Quartär noch angehalten hat und in dieser Zeit mit einer tektonischen Hebung bis gegen 1000 m zu rechnen ist. Bei dieser Hebung war natürlich auch das Andenvorland in Mitleidenschaft gezogen, das Küstengebiet Ecuadors ist gegenwärtig noch ziemlich erdbebengefährdet.

Das Gebiet der Regurböden erhält jährlich etwa 500 mm Niederschläge, die in der Regenzeit während 3–4 Monaten fallen. In dieser Zeit entwickelt sich eine recht üppige Vegetation. Der Strauchwald mit zahlreichen, mächtigen Ueberständerbäumen erreicht undurchdringliche Dichte. Zu Beginn der Trockenzeit erfolgt ein allgemeiner Blattfall und die Erdoberfläche bedeckt sich mit einer mehreren Zentimetern dicken, dünnen Laubschicht. Nur die wenigen hartlaubigen Sträucher und Kaktusarten bleiben grün. Mit dem völligen Austrocknen der Erdoberfläche entstehen weite, tiefe Risse, in die ein Teil des Pflanzenabfalls hinab gleitet. Alles Leben bleibt erstorben, bis mit Pünktlichkeit des Sonnenumlaufes die Regenzeit sich wiederholt. Dann schliessen sich die Bodenrisse und das organische Material erfährt einen raschen Abbau, der zur Bildung dunkel gefärbter bis schwärzlicher Humuskolloide führt. Dieser schwarze, tonige Oberboden verleiht dem Profil sein typisches Gepräge. Tropische, schwarze Böden sind bereits aus Indien, Australien und Afrika bekannt (Mohr und Van Baren⁶). Eines ihrer wichtigen Merkmale ist das starke Schwinden des tonreichen Obergrundes bei Trockenheit und das Aufschwellen bei Wiederbefeuchtung. Stellenweise ist dieser Vorgang so intensiv, dass die Bodenoberfläche ein kleinhügeliges Mikrorelief („Gilgai“ nach Hallsworth *et al.*) erhält. Der dunkle Obergrundhorizont enthält meist über 50% Ton und ist von grobklumpigem, ziemlich dichtem Gefüge. Er ist neutral und meistens ohne Kalziumkarbonat, dagegen folgt im poröseren, hellgrauen Unterboden eine Zone mit viel sekundären Kalziumkarbonatausblühungen.

Die landwirtschaftliche Produktivität dieser Böden ist beschränkt da sie wegen der hügeligen Landform nur schwierig bewässerbar sind. Auch Baumwolle gibt nur mit Bewässerung einen Ertrag. Glücklicherweise besitzt diese Zone alte, breite Talsohlen mit Alluvialböden, die bei Bewässerung leicht landwirtschaftlich entwickelbar sind.

3. *Die tropischen Braunböden des immergrünen Waldes*

Schreitet man vom Gürtel der Regurböden ostwärts, so kommt man in wenig höher gelegenes Hügelland. Es fällt hier etwas zusätzlicher Regen, der durch die lokalen Meereswinde herangebracht wird. Die jährlichen Niederschläge betragen 1000–1500 mm und sind in der einen Jahreshälfte konzentriert, während die andere ziemlich trocken ist. Immerhin genügt die Feuchtigkeitsversorgung, um einen dauernd grünen Wald gedeihen zu lassen. Dazu trägt bestimmt auch das bedeutend tiefgründigere Bodenprofil bei, das verhältnismässig viel Wasser speichern kann. Der deutlich humose Oberhorizont des Bodens (2–3% Humus), hat gewisse Ähnlichkeit mit dem entsprechenden Horizont beim Regur; doch ist er lockerer, weniger klumpig und weist ein grobes Makroaggregatgefüge auf. Typisch für die tropischen Braunböden ist besonders der, unter dem humosen Horizont folgende, stark braune, sehr tonreiche Mittelhorizont mit 50–60% Ton. Dieser klumpige Horizont geht in 100–150 cm Tiefe allmählich in das stark verwitterte Muttergestein über. Die Bodenprofile sind in der Regel schwach bis mässig sauer (pH 5–6) was auf eine periodische Perkolation während der Regenzeit hindeutet. Immerhin findet keine Tonzerstörung statt, im Gegenteil, es werden offenbar kieselsäurereiche Tone gebildet. Das Eisenoxydhydrat ist in diffuser Verteilung den Tonen angelagert, wodurch das Bodenprofil seine homogen braune Färbung erhält. Landwirtschaftlich handelt es sich um wertvolle Böden, die auch ohne Bewässerung einen Ertrag abwerfen. Anspruchsvolle Kulturen sollten jedoch noch zusätzliches Bewässerungswasser erhalten können, doch ist dies der ungünstigen Landform wegen nur beschränkt möglich. Ausserdem ist der Boden durch das steile Relief sehr dem Erosionsabtrag unterworfen.

4. *Die Braun-Latosole des Regenwaldes mit Trockenzeit*

Dringt man vom Gürtel der tropischen Braunböden noch weiter ostwärts ins Landesinnere vor, so gelangt man in regenreichere Zonen mit mindestens 2000 mm Niederschlag und einer mittleren Jahrestemperatur von 25–26°C. Das Gebiet ist stark hügelig und teilweise von ganz niederen Gebirgsketten durchzogen. Weitaus der grösste Teil dieses Landes ist heute noch vom ursprünglichen, dichten Regenwald bestockt. Die klimatischen Bedingungen gestatten hier bereits die Bildung von Latosolen (oder Laterisolen). Latosole sind

nach Kellogg⁴ rote und gelbe, feinkörnige, leichtverhärtende Böden, die zumindest die Tendenz zur Kieselsäureauswaschung und zur Rückstandsanreicherung der Sesquioxide aufweisen. Die Latosolbildung ist noch zu wenig untersucht, um eine sichere Vorstellung vom Entstehungsvorgang dieser wichtigen tropischen Böden zu haben. Sicher ist jedenfalls, dass eine grosse Zahl verschiedener Latosoltypen vorkommt. Die hier zu beschreibenden Braun-Latosole sind offenbar an mässig nasses, tropisches Klima mit deutlicher Trockenzeit gebunden. Die kurze Trockenzeit von 3 Monaten genügt um die oberen Bodenhorizonte auszutrocknen und die Humus- und Tonbildung hier wesentlich zu beeinflussen. Der zeitweilige Wassermangel hemmt offenbar den völligen Abbau der organischen Substanz, wodurch die Bildung eines verhältnismässig kräftigen humosen Oberhorizontes ermöglicht ist. Etwas tiefer im Bodenprofil folgt ein stark brauner, sehr zäher, tonreicher Horizont der deutlich an die tropischen Braunböden erinnert. Es ist zu vermuten, dass die periodische Austrocknung dieses Horizontes der Bildung und Erhaltung der Tonminerale günstig ist. Ausschlaggebend für die Klassifizierung des Bodenprofils ist der unter dem braunen Horizont anschliessende rot gescheckte Horizont mit grauen und gelben Flecken und Punkten. Dieser latosolische Horizont ist sehr tiefgründig und erreicht erst in 2–3 Metern unter der Oberfläche den Fels. Der Uebergang zum Muttergestein ist nach allen unseren Beobachtungen sehr diffus. Man kann aus diesem allmählichen Eindringen des latosolischen Horizontes in den Gesteinsuntergrund schliessen, dass bei konstant feucht-warmen Bedingungen die Lateritbildung die primäre Verwitterungs- und Bodenbildungsart ist. Sobald Wasser in das Gestein eindringen kann, ist dessen physikalische Zerkleinerung nicht unbedingt notwendig für das Durchgreifen der chemischen Verwitterung und für die Umwandlung in freie Kieselsäure, Sesquioxide und allenfalls Kaolin. Die ursprüngliche Gesteinsstruktur ist öfters auch bei völlig verwittertem Material noch deutlich erkennbar, was für die starke hydrolytische Wirkung des Wassers spricht.

Die Latosole sind ganz allgemein stark erosionsgefährdet, sobald sie von ihrer natürlichen Vegetation entblösst sind. Dies ist leicht verständlich, wenn man an die ausserordentliche Intensität der tropischen Regengüsse und an die Feinkörnigkeit und geringe Gefügestabilität des Bodens denkt. Sehr leicht wird dann der ganze

Oberboden weggeschwemmt und zurück bleibt nur das mehr oder weniger gründlich lateritisch verwitterte Muttergestein. Ob man in solchen extremen Fällen von Lateritvorkommen in amputierten Bodenprofilen noch von Boden im eigentlichen Sinne des Wortes reden kann, ist tatsächlich fraglich. In Ecuador sind glücklicherweise die Fälle solch weitgehender Erosion nicht häufig.

Der nicht erodierte Braun-Latosol ist landwirtschaftlich ein sehr guter, produktiver Boden z.B. für Bananen und Cacao. Tiefgründigkeit und häufige Niederschläge bewirken eine gute Wasserversorgung der Pflanzen. Günstig wirkt sich auch der Humusgehalt des Oberbodens aus und die mässig saure Reaktion ist noch kein Hemmnis für die Entwicklung der Vegetation.

5. *Die Gelbroten-Latosole des immer feuchten Regenwaldes*

In der Nähe des Andenfusses stauen sich die feuchten Luftmassen und werden zum Aufsteigen gezwungen. Daher kann es hier praktisch täglich regnen und die Summe der Jahresniederschläge beträgt 3000–4000 mm. Während der eigentlichen Regenzeiten sind die Regenfälle viel ausgiebiger und heftiger als in der übrigen Zeit, in der es vorkommen kann, dass mehrere Tage kein Regen fällt. Doch zum eigentlichen Abtrocknen der obersten Bodenschicht reicht es selten. Ganz ähnliche klimatische und bodenkundliche Verhältnisse wie am Westfuss der Anden herrschen auch im östlichen andennahen Tiefland.

Die dauernd feuchtwarmen Verhältnisse (Mitteltemperaturen von 26–28°C), ermöglichen nicht nur eine üppige Pflanzenproduktion jahraus, jahrein ohne Unterbruch, auch der Abbau der Pflanzenrückstände erfolgt sehr intensiv und gründlich. Es kann sich deshalb kein eigentlicher Humushorizont bilden. Hingegen ist im ungestörten Zustand der Boden stets durch eine mehrere Zentimeter dicke, lockere Pflanzendetritus-Schicht bedeckt; darunter folgt unmittelbar der humusarme Mineralboden. Leider muss diese natürliche, organische Bodendecke bei der Inkulturnahme der Böden zerstört werden und die feinkörnige Mineralerde kommt an die Oberfläche. Der 30–50 cm mächtige Obergrundhorizont besteht aus einem ziemlich lockeren, hellgelben oder gelbbraunen Lehm mit verhältnismässig grossen, aber offenbar sehr unbeständigen Aggregaten. Von Eisenhydroxyd-Anreicherungen ist hier makroskopisch nichts zu sehen. In den tieferen Schichten wird der Boden

jedoch zunehmend rot. Man findet dort einen hellroten bis intensiv roten, plastischen Lehm, der immer noch schwach aggregiert ist. Erst in 100–200 cm Profiltiefe folgt ein verhältnismässig kompakter Horizont, der neben seiner intensiv roten Farbe durch die zahlreichen gelben und grauen Punkte und Flecken auffällt. Mit zunehmender Profiltiefe erhalten die hellen Flecken die Oberhand und die hier blassroten Stellen und Aderungen treten mehr und mehr zurück, bis allmählich das Material den ursprünglichen Gesteinscharakter annimmt.

Sofern diese Böden vor Abschwemmung bewahrt bleiben, eignen sie sich gut für die tropische Landwirtschaft. Kommt jedoch der rote, dicht gelagerte, beim Austrocknen leicht verhärtende Untergrund obenauf, so werden Anbauschwierigkeiten nicht ausbleiben. Regeneration des eisenoxydreichen Untergrund-Materials in gutartige Kulturerde ist kaum möglich. Umsomehr lohnt sich ein fachgemässes und vorsichtiges Vorgehen bei der landwirtschaftlichen Entwicklung ursprünglicher Regenwaldgebiete. Die ziemlich tiefe Durchwurzelung der Regenwaldböden und der rasche Mineralstoffumsatz täuschen grosse Fruchtbarkeit vor, die bei landwirtschaftlicher Nutzung dann oft sehr rapid abfällt. Durch regelmässige Ergänzung der mineralischen Nährstoffe soll der Säure- und der Basengehalt dieser Böden reguliert werden.

6. *Latosolische Uebergänge zum Schwarzen-Andenboden im Gebiet des tropisch temperierten Regenwaldes.*

Am westlichen wie am östlichen unteren Hang des Andengebirges erreichen die Niederschläge ihr Maximum. Bei etwa 1000 m Meereshöhe fallen jährlich mehr als 4000 mm Regen. Mit zunehmender Meereshöhe geht die Niederschlagsmenge allmählich wieder zurück bis auf etwa 2000 mm pro Jahr. Es herrscht hier somit ausgesprochen humides Klima, besonders auch wegen der hohen Luftfeuchtigkeit durch die fast ständige Wolken- und Nebelbildung. Mit zunehmender Meereshöhe reduziert sich die jährliche Mitteltemperatur um ungefähr 0,5°C pro 100 m Höhendifferenz. Bei 1000 m Meereshöhe, der unteren Grenze des hier zu betrachtenden Gürtels, beträgt die Mitteltemperatur etwa 20°C. In 3000 m Meereshöhe, der oberen Grenze dieses Gürtels, können wir somit noch ungefähr 10°C annehmen. Dieses humide, temperierte Klima vermag ganz charakteristisch auf die Bodenformation einzuwirken.

Wald- oder Buschvegetation produzieren laufend eine grosse Menge Pflanzenreste, die hier nicht völlig mineralisiert werden können. Als Konsequenz bilden sich mehr oder weniger mächtige Humushorizonte. Dabei ist die Humusform wesentlich verschieden vom Humus der Braun-Latosole im wechselfeuchten Tropengebiet. Hier im immerfeuchten, temperierten Gebiet zwischen 1000 und 2000 m Meereshöhe entsteht ein sehr poröser, schwammiger Humushorizont, der beim künstlichen Trocknen stark an äusserem Volumen verliert. Er ist von schwarzer Farbe, hat jedoch deutlichen Mörhumus-Charakter. Unter diesem bis etwa 40 cm mächtigen, schwarzen Oberflächenhorizont folgt ein gelber Lehm und tiefer der rote, latosolische Lehm. Aehnliche Böden wie diese feuchten Organo-Latosole, wie wir diesen Typ vorläufig benennen, sind von Cline² in Hawaii als Hydrol Humic Latosols beschrieben worden.

Ueberschreiten wir die 2000 m Meereshöhe, so konstatieren wir eine immer stärkere Reduktion des latosolischen Untergrundes. Besonders der sesquioxidgeiche, rote Lehm ist bald nur noch in einer Schicht von wenigen Zentimetern Mächtigkeit vorhanden oder fehlt völlig. Der lockere, gelbrötliche Mittelhorizont, direkt unter dem zunehmend mächtiger werdenden Humushorizont, bleibt jedoch bis auf 3000 m Meereshöhe deutlich erhalten. Nicht selten findet man in dieser Höhe bis 100 cm mächtige, schwarze Oberflächenhorizonte, die nun dem Boden das Hauptgepräge verleihen.

Da die Andenhänge im allgemeinen sehr steil sind, findet man ziemlich selten gut ausgebildete, vollständige Bodenprofile. Häufig ist der Boden kolluvial gestört oder gar völlig aus jungem Blockmaterial bestehend. Die Andenhänge können deshalb nur an Stellen günstiger Landform landwirtschaftlich genutzt werden, im übrigen bleiben sie mit Vorteil der natürlichen Waldvegetation erhalten.

7. Die Schwarzen-Andenböden der Horstgrasprairie

Wenn man an den äusseren Andenhängen aufwärts schreitet und die 3000 m Höhengrenze erreicht, hat sich der Wald sehr stark aufgelockert oder hat bereits schon einer Buschvegetation Platz gemacht. Nun erfolgt der Uebergang in eine vorerst mehr oder weniger strauchreiche Grasprairie. Bei ungefähr 4000 m Meereshöhe wird der Rasen kürzer und noch etwas weiter oben lässt der gute

Bodenschluss zu wünschen übrig. Bei etwa 4200 m Meereshöhe findet man nur noch inselweise Vegetation und bald tritt man in die Regosole oder Lithosole aufweisende Hochgebirgswüste. Ungefähr bei 4800–5000 m ist die Dauerfrostgrenze. Alle Gipfel zwischen 5- und 6 tausend Metern tragen permanent eine Schneekuppe.

Die Berge und Hänge der Anden Ecuadors zwischen 3000 und 4000 m Meereshöhe, von denen wir hier besonders reden, gehören unbestritten den Schwarzen-Andenböden an. Die Temperatur dieses Gebietes ist kühl; sie beträgt im Jahresmittel zwischen 5 und 10°C. Dabei gibt es fast keine Schwankungen zwischen den Monatsmitteln, dagegen besteht eine starke, tägliche Temperaturfluktuation. In der Nacht kann die Temperatur nahe an den Gefrierpunkt sinken, am Tag wird es warm, da in diesen Höhenlagen nur geringe Bewölkungstendenz besteht. Die grosse Sonneneinstrahlung und die mässigen Niederschläge von 1000–2000 mm pro Jahr ergeben ein eher trockenes Klima; doch können übers ganze Jahr Niederschläge fallen. In der tropischen Regenzeit sind sie oft sehr ausgiebig, sodass die Bodenprofile periodisch ziemlich stark perkoliert werden.

Bei Betrachtung eines Schwarzen-Andenbodens fällt vor allem der häufig 100 cm und mehr mächtige, schwarze Oberboden auf, der ziemlich abrupt einem hellen Mineralerde-Untergrund aufliegt. Das Muttergestein besteht vorwiegend aus lockerer oder mässig kompakter Vulkanasche, deren Farbe und chemische Zusammensetzung variieren kann; doch kommen auch andere Muttergesteine vor. Meistens trifft man sandige bis lehmige Körnung; aber auch tonige Varianten sind nicht selten. Ganz allgemein findet man besonders im dunklen Oberboden ein sehr poröses, gut durchlüftetes Bodengefüge von schwacher bis mässiger Bindigkeit. In sandigen Böden sind die Makroaggregate eher unbeständig, tonreichere Aggregate erscheinen jedoch einigermaßen hart. Miller⁵ hat in solchen Böden Anzeichen für das Vorwiegen von nichtkristallinen Tonen (Aluminiumsilikaten) gefunden. Solche Allophane dominieren nach Thorp⁷ sowie Aomine und Yoshinaga¹ und anderen, in den Andoböden Japans, die mit den hier besprochenen Böden gewisse Ähnlichkeit haben könnten. Bei näherer Untersuchung des zwischen 5–15% Humus enthaltenden schwarzen Oberbodens bemerkt man eine deutliche Horizontierung. Der oberflächliche Teil ist stark

dunkelgraubraun gefärbt, während nach unten die Schwarzintensität zunimmt. Häufig ist der Horizont zwischen 50 und 100 cm Profiltiefe beinahe glänzend bläulich-schwarz. Es handelt sich hier offenbar um einen Humusanreicherungshorizont. Die Wanderung der Humuskolloide ist besonders in tonreicheren Varianten mit ziemlich dichten Aggregaten sehr schön zu sehen, indem sich hier die Kolloide vorwiegend an den Aggregatoberflächen und in den Bodenklüften absetzen, was im Profilschnitt zu einem gefleckten Aussehen des Horizontes führt. Aber auch in allen übrigen Varianten erscheinen die Aggregatoberflächen durch die Humuskolloidkrusten viel schwärzer als das zwischen den Fingern zerriebene Material. Die Art der Bildung und die Ursache der Wanderung dieser schwarzen Humuskolloide ist vorläufig ungeklärt. Wahrscheinlich wird die Grasvegetation und der verhältnismässig hohe Basengehalt des vulkanischen Muttermaterials eine Rolle spielen. Vielleicht sind aber die bodenklimatischen Verhältnisse ausschlaggebend durch den ständigen raschen Wechsel von Abbau fördernden und hemmenden Einflüssen. Der verhältnismässig hohe Gehalt an Natrium und freier Kieselsäure im Muttermaterial, dürfte trotz der sauren Reaktion (pH 5) die Wanderung der Humuskolloide befördern.

Landwirtschaftlich sind diese tiefgründigen Böden, soweit Landform und Klima einen Anbau erlauben, als gut und fruchtbar zu bezeichnen. Es sind die idealen Kartoffelböden. Für Schafe und Rinder bietet die natürliche Grasprairie allerdings eine sehr schlechte Futterqualität, sie könnte aber durch Düngung und zweckmässige Bewirtschaftung verbessert werden.

8. *Die Brunisemböden des Andentales.*

Die Andenkette ist in Ecuador längsgeteilt durch ein mehrere Kilometer breites, hügeliges Hochtal, das durch zahlreiche Querriegel in viele, separat drainierte Bassins zerfällt. Die Entstehung dieses eigentümlichen Hochlandes wird von den Geologen als tektonischer Grabenbruch angesehen, was auch das Vorhandensein der zahlreichen, längst erloschenen und teilweise noch aktiven Vulkane in Nähe der Bruchstellen erklären würde. Dieses Tal liegt auf durchschnittlich 2500 m Meereshöhe und ist somit ziemlich im Regenschatten der Gebirgsketten. Die tropische Regenzeit wirkt sich hier ebenfalls weniger stark aus und die jährliche Regenmenge beträgt nur zwischen 500–1200 mm. Die Niederschläge sind einiger-

massen über das ganze Jahr verteilt, doch sind längere regenfreie Perioden während den tropischen Trockenzeiten nicht selten. Im Verhältnis zur Meereshöhe ist das Klima durch die Muldenlage und die lange Sonnenscheindauer sehr mild, die Mitteltemperatur erreicht mindestens 15°C.

Im Andental sind die Böden nicht mehr schwarz wie im Gebirge. Das wärmere trockenere Klima ermöglicht offenbar nur eine geringere Humusproduktion, jedoch einen intensiveren Abbau der organischen Substanz. Die Farbtönung des Oberbodens ist deshalb dunkelgraubraun oder hellbraungrau. Auf Grund der Ähnlichkeit dieser Böden mit gewissen nordamerikanischen Prärieböden haben wir sie in die Brunisemgruppe gestellt.

Die Bodenprofile zeigen, wie die schwarzen Andenböden, einen sehr einfachen Aufbau. Ein humoser, meist 50–80 cm mächtiger Oberboden liegt mit diffussem Uebergang auf dem lockeren, oft aber sekundär verhärteten Muttermaterial. Der humose Oberboden zeigt in der Regel sandig-lehmige Körnung und ein poröses Aggregatgefüge mit ziemlich schwach beständigen Makroaggregaten. Im Falle des dunklen Brunisems ist dieser Horizont noch ziemlich humusreich und schwach sauer; es sind dies die Bruniseme, die etwa bei 1000 mm Niederschlägen gebildet werden und meist den Uebergang zu den Schwarzen-Andenböden darstellen. Die hellen Brunisemböden mit hellbraungrauem, neutralem Humushorizont, bilden sich im trockeneren Teilgebiet mit 600–800 mm Jahresniederschlägen. Eine Verlagerung der organischen Kolloide ist nicht oder nur schwach festzustellen, dagegen wandert bei der Verwitterung freigelegte Kieselsäure und bildet im Untergrund oft metermächtige, verhärtete Schichten. Sekundär verhärtete Vulkanaschschichten bilden geradezu ein typisches Landschaftsmerkmal des Zwischen-Andentales, denn sie sind häufig durch die Wasserläufe schluchtartig eingeschnitten oder durch Erosion blossgelegt und fallen dem Wanderer sofort auf. Zuweilen weisen die Bruniseme der Anden im unteren Profilteil Kalkkarbonat-Ausblühungen auf, was auf nur teilweise Perkolation der Profile hinweist. Da das Muttermaterial natürlicherweise häufig kalkarm ist, sind diese Ausblühungen aber nicht immer vorhanden.

Die Bruniseme der Anden sind die fruchtbaren Weizen- und Maisböden des Landes. Sie sind seit altersher landwirtschaftlich genutzt und die natürliche Vegetation ist deshalb nicht mehr

erhalten. Immerhin ist anzunehmen dass es sich um Buschvegetation handelt mit Trockenheits-resistenten Arten.

9. *Die braunen Wüstenböden des Zwischen-Andentales*

Zahlreiche Hangflächen und Mulden des Zwischen-Andentales erhalten vielleicht höchstens 200 mm Niederschläge pro Jahr. Ueberall dort verrät eine spärliche, offene Strauch- und Kaktusvegetation die grosse Trockenheit. Starke Winde verblasen die kahle Bodenoberfläche, wodurch der Boden mit einer lockeren Sandschicht bedeckt wird. Dem unter dieser Decksandschicht folgenden hellbraunen, etwa 30–40 cm mächtigen Bodenhorizont verleiht ein Minimum an Humus seine Farbtönung. Das Profil wird nie nachhaltig durchfeuchtet, weshalb die chemische Aufbereitung des Muttermaterialies nur äusserst langsam vor sich geht. Die braunen Wüstenböden sind deshalb ausnahmslos sandig. Die gelegentliche Befeuchtung durch die Niederschläge reicht gerade zum Lösen von Salzen, doch werden diese bald wieder ausgeschieden. Allgemein reagieren deshalb diese Böden schwach bis stark alkalisch. Unter dem beschriebenen, hellbräunlichen Horizont folgt das lockere Muttermaterial meistens vulkanischen Ursprungs. Die Profile dieser braunen Wüsten bis Halbwüsten erscheinen somit sehr flachgründig und die Bodenbildungsprozesse sind hier ausserordentlich schwach.

An landwirtschaftliche Nutzung dieser Trockengebiete der Anden ist vorläufig nicht zu denken. Die geringe Qualität des Bodens würde kaum eine Bewässerung rechtfertigen.

DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Das Vorkommen dieser ausserordentlich unterschiedlichen Boden-ausbildungen und Vegetationen in Ecuador ist nur durch die regional sehr grossen Klimaunterschiede zu erklären. Die Klimavariationen in diesem unter dem Aequator gelegenen Land ergeben sich aus den speziellen topographischen Verhältnissen. In Figur 3 ist ein schematischer West-Ost-Querschnitt durch das Land gezeichnet, an dem der Zusammenhang der topographischen Klimaregionen mit dem Bodentyp und der Vegetation verdeutlicht werden soll. Im tropisch warmen, westlichen Andenvorland sind die Boden- und Vegetationsverhältnisse im wesentlichen durch die variierende Niederschlags-

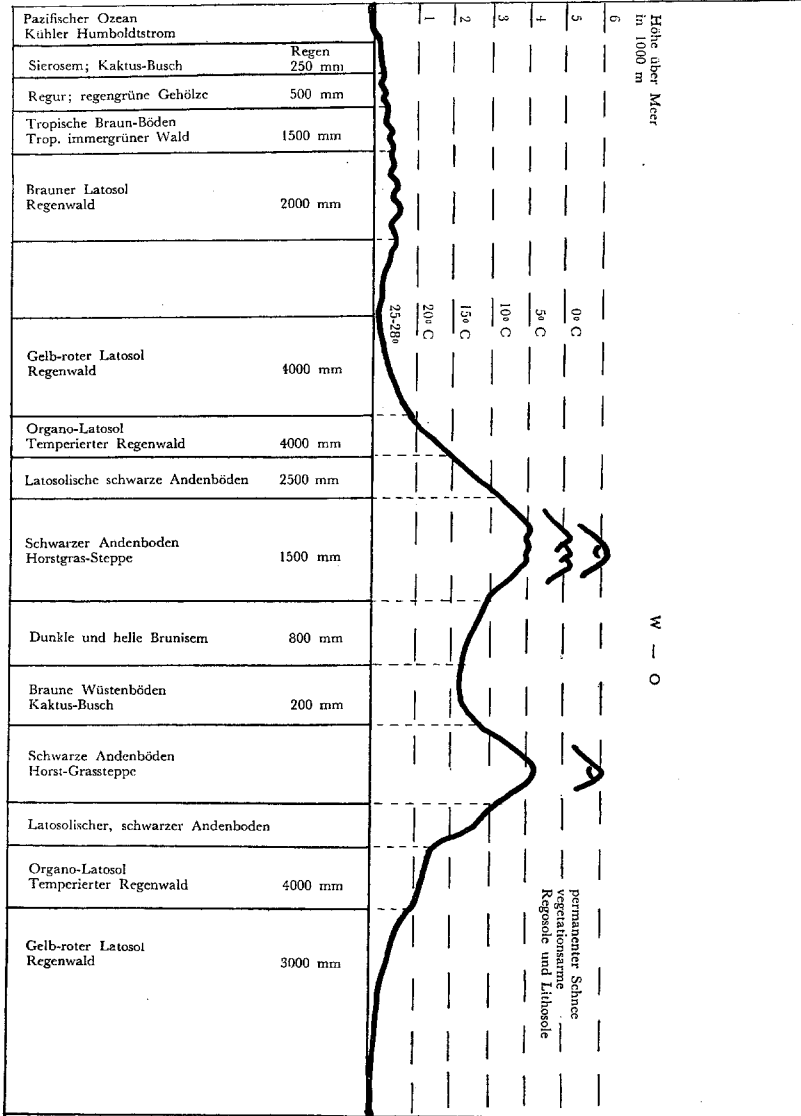
menge beeinflusst. Von der regenarmen pazifischen Küste bis zum ausserordentlich regenreichen Andenfuss wechselt man vom trockenen Sierosem und Regur durch Uebergänge zum immer feuchten gelbroten Latosol. Gleichzeitig wechselt die Vegetationsdecke in auffälligster Weise vom schüttereren, kaktusreichen Halbwüstenbusch zum regenrünen Wald, dann zum immergrünen Wald und schliesslich zum undurchdringlichen, palmenreichen Regenwald. Unterschiede im Feuchtigkeitsregime bei ungefähr gleich bleibender hoher Temperatur, vermögen derart grosse Unterschiede in der Boden- und Vegetationsausbildung zu bewirken, dass bei einer Uebersichtsbetrachtung jeder andere Faktor zurücktreten muss. Selbstverständlich können aber auch in diesen tropischen Gebieten bei detaillierten Studien die Einflüsse der Lokaltopographie, der geologischen Unterlage usw. nicht übersehen werden.

Vom Andenfuss bis zu den Andengipfeln erkennt man hauptsächlich den Einfluss der abnehmenden Jahrestemperatur verbunden mit etwas geringeren Niederschlagsmengen. Die kühlere Temperatur bewirkt vor allem eine Zunahme der Humusproduktion. Der Abbau der im Regenwald reichlich anfallenden organischen Substanz ist bei etwas weniger warmer Temperatur bereits leicht gehemmt. Bei der noch kühleren Temperatur der Andengipfel gilt dies noch in vermehrtem Masse. Veränderungen in Temperatur und Feuchtigkeit beeinflussen nicht nur die Humusbildung, sondern ebensosehr die Verwitterungsart und -intensität, sowie die Bildung von Bodenmineralen und Gelen. Dies führt zu völlig verschiedenem Aufbau des Latosolprofils im Gegensatz z.B. zum Schwarzen-Andenboden der Hochlage.

Im Zwischenandentale bestehen spezielle Niederschlagsverhältnisse verursacht durch den Regenschatten der Gebirge. Die festgestellten Unterschiede in Bodenausbildung und Vegetation sind hier als in erster Linie niederschlagsbedingt aufzufassen, wobei es sich um temperierte bis eher kühle Gebiete handelt. Der Uebergang vom Schwarzen-Andenboden zum Brunisem und zum braunen Wüstenboden ist wiederum von auffälligen Veränderungen in der Vegetation begleitet, die deutlich eine Anpassung an zunehmend aridere Verhältnisse erkennen lassen.

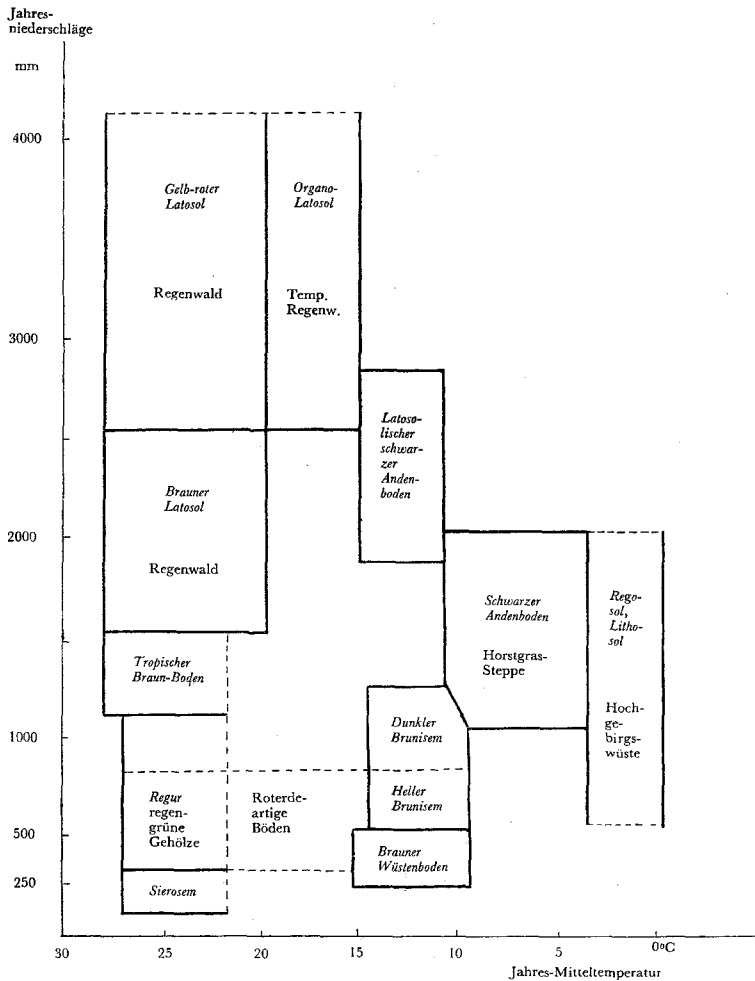
Der Einfluss der Jahresniederschlagshöhe und der Mitteltemperatur auf die Bodenausbildung und die Vegetation, ist in Figur 4 nochmals anhand einer graphischen Darstellung erläutert. Eine

direkte Beziehung zwischen Niederschlagssumme und Mitteltemperatur einerseits und der Boden- und Vegetationsausbildung andererseits, ist in äquatorialen Gebieten eher vorhanden, als in den gemässigten Zonen mit ihren grossen Klimaschwankungen. Die



Figur 3. Schematische Darstellung der Landform Ecuadors und der Beziehung zu Bodentyp und Klima.

Mitteltemperaturen Ecuadors setzen sich aus wenig voneinander abweichenden Einzelwerten zusammen; die Niederschlagssummen können zwar von Jahr zu Jahr ziemlich verschieden sein, jedoch ist die Niederschlagsverteilung einigermaßen konstant.



Figur 4. Ecuadors Böden in Beziehung zum Jahresniederschlag und zur jährlichen Mitteltemperatur.

Man erkennt in Figur 4 links in der Senkrechten die Bodentypfolge bei gleichmässig tropisch warmer Temperatur als Funktion variierender Niederschlagsgrösse. Diese Reihe vom Sierosem zum gelbroten

Latosol ist im westlichen Andenvorland Ecuadors in lückenloser Folge vorhanden. Von oben links im Diagramm nach unten rechts haben wir eine durch die gleichzeitig variierende Temperatur und Niederschlagssumme bedingte Folge von Bodentypen. Nämlich der an den äusseren Andenhängen verfolgbare Uebergang vom gelbroten Latosol zum Schwarzen-Andenboden.

Die vorliegende Studie gibt bei weitem kein vollständiges Inventar der tropischen Bodentypen, dies lassen auch die im Diagramm der Figur 4 enthaltenen Lücken vermuten. Im besprochenen Gebiet fehlt vor allem das feucht-kühle Klima mit wahrscheinlich podsolierten Böden – und das mässig feucht-temperierte Klima mit den entsprechenden Bodentypen.

In Ecuador, einem rein tropischen Land, konnte somit ein enger Zusammenhang zwischen Klimavariationen und der Boden- und Vegetationsausbildung beobachtet werden. Die Erkenntnis dieser Zusammenhänge ist nicht nur wichtig für Zwecke der Boden- und Vegetationskartierung, sie sind ebenfalls von grosser Bedeutung für die Lenkung der land- und forstwirtschaftlichen Entwicklung dieser tropischen Gebiete.

ZUSAMMENFASSUNG

Neun wichtige Bodentypen Ecuadors werden beschrieben; sie lassen sich in Gruppen der Wüstenböden, der schwarzen und braunen Tonböden, der Latosole und der dunkeln Gebirgsböden einreihen. Als Hauptursache für das Vorkommen derart verschiedener Böden sind klimatische Unterschiede erkannt worden. Die Summe der Jahresniederschläge, wie auch die jahreszeitliche Niederschlagsverteilung erreichen Extreme, die sich in den entsprechenden Bodentypen deutlich widerspiegeln. Auch Temperaturunterschiede, bedingt durch wechselnde Höhenlage, beeinflussen Boden- und Vegetationsausbildung in wesentlichem Masse.

SUMMARY

A study of the relation between soil, climate and vegetation of Ecuador.

Nine important soil groups of the territory of Ecuador have been described. They belong to the associations of desert soils, black and brown tropical soils, Latosols, and dark mountain soils. Climatic differences have been recognised as the main reason for these widely varying soil formations. The soil formations reflect clearly the distinctions in annual precipitation and monthly rain distribution. The soil profile and the vegetation cover seem

also to be greatly influenced by differences in the mean annual temperature depending on the altitude above sea level

Eingegangen am 4. Juni 1957

ERWÄHNTE LITERATUR

- 1 Aomine, S. und Yoshinaga, N., Clay minerals of some well-drained volcanic ash soils in Japan. *Soil Sci.* **79**, 349-358 (1955).
- 2 Cline, M. G., Soil Survey of the Territory of Hawaii. U.S. Dept. Agr. Soil Conserv. Serv. Series 1939, No. 25 (1955).
- 3 Hallsworth, E. G., Robertson, G. K. und Gibbons, F. R., Studies in pedogenesis in New South Wales. VII. The "Gilgai" soils. *J. Soil Sci.* **6**, 1-31 (1955).
- 4 Kellogg, Ch. E., Tropical soils. *Trans. 4th Intern. Congr. Soil Sci. Amsterdam* **1**, 266-276 (1950).
- 5 Miller, E. V., und Coleman, N. T., Colloidal properties of soils from Western Equatorial South America. *Soil Sci. Am. Proc.* **16**, 239-244 (1952).
- 6 Mohr, E. C. J. und Van Baren, F. A., Tropical soils. Interscience Publishers Inc., London-New York (1954).
- 7 Thorp, J. und Smith, G. D., Higher categories of soil classification: Order, suborder and great soil groups. *Soil Sci.* **67**, 117-126 (1949).
- 8 Tschopp, H. J., Geologische Skizze von Ekuador. *Bull. Schweiz. Petroleum-Geologen* **15**, No. 48, 14-45 (1948).